

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Zuwendungsempfänger:	Kennzeichen:
	033R086
BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)	A
TARTECH eco industries AG (TARTECH)	B
Fraunhofer UMSICHT – Institutsteil Sulzbach-Rosenberg (UMSICHT)	C
Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)	D
Stadtreinigung Hamburg (SRH)	E
Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR)	F
SpiCon GmbH (SpiCon)	G
Universität Duisburg-Essen (UDE)	H
Ludwig-Maximilians Universität München (LMU)	J

Autor : Dr.-Ing. Olaf Holm

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den o. g. Förderkennzeichen gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	1
1 Aufgabenstellung	1
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	15
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
II Eingehende Darstellung	25
1 Resultate des Forschungsvorhabens	25
a. Zusammenfassung.....	26
b. Einleitung	27
c. Vorgehensweise	29
c.1. Weitergehende Aufbereitung der Feinfraktion unter Berücksichtigung chemisch gebundener Metalle.....	30
c.2. Verwertung der Restmineralik und feiner Aluminiumfraktionen.....	30
c.3. Weitere Anwendungsgebiete der TARTECH-Technologie abseits von HMVA30	
c.4. Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung	31
d. Ergebnisse und Diskussion	31
d.1. Weitergehende Aufbereitung der Feinfraktion unter Berücksichtigung chemisch gebundener Metalle.....	35
d.2. Verwertung der Restmineralik und feiner Aluminiumfraktionen.....	35
d.3. Weitere Anwendungsgebiete der TARTECH-Technologie abseits von HMVA36	
d.4. Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung	36
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	40
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	43
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	46
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	46
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	49
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	51
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	53

6	Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	56
6.1	Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	56
6.2	Geplante Veröffentlichungen	60
	Quellen.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044.....	20
Abb. 2:	Ansicht der Aufbereitungsanlage für Hausmüllverbrennungaschen (HMVA) in Wiesbaden (Alpha-Linie und Beta-Linie).	31
Abb. 3:	Im Rahmen des Projektes (weiter-)entwickelte TAR-Prozessoren (Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger) zum Prallaufschluss von HMVA.....	32
Abb. 4:	Zusammensetzung der NE-Metallfraktionen aus der Alpha-Linie	33
Abb. 5:	Kupfer-Konzentration im Feststoff der mineralischen Fraktionen.....	33
Abb. 6:	Silber-Konzentration im Feststoff der mineralischen Fraktionen.....	34
Abb. 7:	Verfahrensfließschema der Beta-Linie zur Aufbereitung von HMVA-Fraktionen < 2 mm	34
Abb. 8:	Ergebnisse der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial für die Aufbereitung unterschiedlicher HMVA-Chargen in der Alpha-Linie und der beispielhaften Anlage nach dem Stand der Technik	37
Abb. 9:	Auswirkung auf die Wirkungskategorien Treibhauspotential und Eutrophierungspotenzial bei einer weitergehenden Behandlung von HMVA in der Beta-Linie gegenüber der ausschließlichen Behandlung in der Alpha-Linie	37
Abb. 10:	Zusammensetzung der Gutschriften des Szenarios EAG-Asche (Aufbereitung Alpha- und Beta-Linie versus Deponierung)	38

I Kurze Darstellung

Für eine übersichtlichere Struktur und Darstellung wurde im Hauptkapitel I die Projektstruktur anhand der Arbeitspakete (AP1 - AP6) für die Untergliederung herangezogen. Die Arbeitspakete, die darin beteiligten Projektpartner und die jeweilige Projektverantwortlichkeit (unterstrichen) stellten sich wie folgt dar:

- AP 1: Rostaschen aus der Hausmüllverbrennung als Input für das Prallzerkleinerungsverfahren
TARTECH, SRH (inkl. Unterauftragnehmer Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH))
- AP2: Aschen aus Monodeponien
BAM, BSR
- AP3: Aschen aus der Monoverbrennung von Elektronikschrott und metallurgische Schlacken
UMSICHT, UDE
- AP4: Metallurgische Verwertung von Al und Cu
TARTECH, HZG, UDE
- AP5: Rückgewinnung von Cu und weiteren Metallen durch physikalische und chemische Verfahren
BAM, LMU, SpiCon
- AP6: Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung
UMSICHT

1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus Aschen und Schlacken durch Aufschluss aus den mineralischen Verbunden. Durch das innovative Prallzerkleinerungsverfahren (Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger) des Projektpartners TARTECH, sollten die Verunreinigungen an den metallischen Anteilen praktisch vollständig abgeschlagen werden. Diese Aufbereitungstechnik sollte im Rahmen des Projektes so verfeinert und angepasst werden, dass metallische Partikel von 0,5 bis 5 mm aufgeschlossen werden, damit sie anschließend über Wirbelstromscheider in elementarer Form abgetrennt werden können.

AP1

Für die SRH war vor allem interessant, welche Mengen an Eisen- (Fe) und Nicht-eisen- (NE) Metallen, insbesondere in Bezug auf sogenannte strategische Metalle, aus unterschiedlichen Chargen Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) separierbar sind und welche Qualitäten die generierten Fraktionen haben. Dafür wurde HMVA aus mehreren Müllverbrennungsanlagen (MVA) zu verschiedenen Jahreszeiten jeweils direkt nach der Verbrennung geliefert, auf einer Fläche an der TARTECH-Anlage gealtert und später aufbereitet. Teilweise waren diese Chargen bereits mit vorhandener Technik der SRH vorbehandelt, also teilberaubt. So sollten Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen der Abfallgetrennthaltung, der HMVA-Aufbereitung und der Wiederfindungsrate von strategischen Metallen für HMVA aus Hamburg ermittelt werden.

AP2

Stellvertretend für Aschen aus Monodeponien war zu untersuchen, ob die seit 2009 auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagerte HMVA ausgebaut und die darin noch enthaltenen Metalle mit der innovativen Technik der TARTECH-Anlage zurückgewonnen werden können. Zu untersuchen war, welche Metalle in welcher Qualität und welche Anteile nach der mehrjährigen Liegezeit noch separiert werden können. Für die BSR war außerdem interessant, ob die mineralische Fraktion nach einer derartigen Behandlung noch zur Verwertung bei der Deponiesanierung einsetzbar ist. Für die Verwertbarkeit sind dabei einerseits die Einhaltung der Zuordnungswerte der Deponieverordnung für Schadstoffe im Feststoff und im Eluat sowie andererseits die verbliebene Gasdurchlässigkeit maßgeblich.

AP3

Mit Resten aus Entsorgungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG bzw. in Englisch WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)) sollten bei UMSICHT Verbrennungsversuche durchgeführt werden, um der Frage nachzugehen, ob die Rückgewinnung von NE-Metalle aus EAG-Behandlungsrückständen durch eine Kombination von thermischer Behandlung und nachgeschalteter innovativer Aufbereitung der Rückstände gesteigert werden kann. Dazu war eine entsprechende Aschemenge für die Weiterbehandlung in der TARTECH-Anlage zu erzeugen und zudem die Verteilungspfade, Wiederfindungsraten und chemischen Bindungsformen relevanter Metalle wie z. B. Kupfer und Aluminium zu untersuchen. Die anschließende Aufbereitung dieser Verbrennungsrückstände in der innovativen TARTECH-Anlage sollte als Grundlage für die Bewertung einer Mitverbrennung von im Hausmüll enthaltenen Elektrokleingeräten dienen.

Schlacken aus der Metallurgie enthalten ebenfalls Einschlüsse elementarer Metalle in Form kleinster Tröpfchen, die nicht mit klassischen mechanischen Trennverfahren vom mineralischen Anteil getrennt werden können. Die UDE ermittelte daher geeignete Schlacken aus der Stahl-, Edelstahl- und NE-Metallindustrie, die sich für eine Prallzerkleinerung mit der TARTECH-Technologie anbieten. Insbesondere Schlacken aus der Edelstahl- und NE-Metallindustrie enthalten wertvolle Metalle wie z.B. Nickel, Kupfer. Unter dem Aspekt des Recyclings ist es wichtig zu

wissen, ob die Elemente als Oxide oder als gediegene Metalle vorliegen. Des Weiteren war bekannt, dass sich die Zusammensetzungen von Schlacken in Abhängigkeit von der Korngröße ändern können. Vor diesem Hintergrund wurden potenziell geeignete Schlacken im Labormaßstab zerkleinert, klassiert und in den jeweiligen Fraktionen mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) untersucht. Im Weiteren wurden sie lichtmikroskopisch betrachtet, da auf diese Weise die metallischen Anteile bestimmt und zum Teil auch voneinander unterschieden werden können. Die auftretenden metallischen Phasen wurden mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) bestimmt und ihre Anteile bildanalytisch quantitativ gemessen.

AP4

Da sich Aluminium in Korngrößen < 3 mm nicht mehr für eine direkte Verwertung durch Einschmelzen eignet (zu hoher Anteil an Al_2O_3), wurde beim Projektpartner HZG die Synthetisierung von Wasserstoffspeichermaterialien und die Gewinnung von Wasserstoff mittels Aluminiumfraktionen aus oben genannten Verfahrensansätzen untersucht.

AP5

Das zerkleinerte und von Fe- und NE-Metallen entfrachtete mineralische Material mit vorwiegend oxidisch gebundenen Metallen sollte für weitere Prozessschritte verwendet werden. Durch Flotation und Dichtesortierung gewonnene Kupferkonzentrate könnten als Rohstoff für die Kupfermetallurgie eingesetzt werden. Entsprechende Verfahrensansätze wurden bei der BAM entwickelt und getestet. Andere gebundene Metalle wie Zink und Blei aus der Feinstfraktion könnten hydrothermal extrahiert, als Karbonate wieder ausgefällt und der Verhüttung zugeführt werden (Arbeiten an der LMU). Durch SpiCon wurde zudem die biogene Extraktion von Kupfer und später Zink durch Ganzzellverfahren untersucht. Dafür wurden Mikroorganismen eingesetzt, die speziell dafür geeignete Enzyme bilden können. So sollte unter Berücksichtigung der Anlagenentwicklung bei TARTECH ein mehrstufiges Aufschluss-, Trennungs- und Rückgewinnungsverfahren entstehen, um die in HMVA enthaltenen Wertmetalle weitestgehend nutzbar zu machen.

AP6

Sämtliche Projektschritte und -ergebnisse wurden von einer übergeordneten Nachhaltigkeitsbetrachtung unter Einbezug ökobilanzieller, ökonomischer und sozialer Aspekte bewertet. Zum Vergleich der neuartigen Technologie wurden Anlagenkonfigurationen zur HMVA-Aufbereitung nach dem derzeitigen Stand der Technik herangezogen. Dazu wurden je nach betrachtetem Asche-/Schlackentyp verschiedene Vergleichsszenarien mit geeigneten Systemgrenzen entwickelt und die notwendigen Daten erhoben. Mit Hilfe der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung sollten Schlussfolgerungen zur Eignung und Verbreitung des TARTECH-Verfahrens für die Praxis abgeleitet werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund von Verzögerungen bei der Standortfindung, der Finanzierung und der Realisierung der HMVA-Aufbereitungsanlage (vgl. I 3) hat sich die Fertigstellung der geplanten TARTECH-Anlage erheblich verschoben. Letztendlich wurde das Vorhaben in einer neu errichteten Anlage in Wiesbaden durchgeführt. Die TARTECH-Anlage wurde in einem hierfür vorgehaltenen und geeigneten Bereich auf einer Nebenfläche der Deponie Dykerhoffbruch aufgestellt und betrieben. Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Anlagenteilen (Alpha- und Beta-Linie).

In der Alpha-Linie mit einer Kapazität von ca. 220.000 Mg/a (werktätlich, einschichtig mit 10 h/Tag und 220 d/Jahr) entsprechend einer Durchsatzleistung von ca. 100 Mg/h wird die gealterte HMVA mechanisch aufbereitet. Wesentliches Kernaggregat ist der Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger mit dem mineralische und metallische Bestandteile der HMVA physikalisch voneinander abgetrennt werden sollen. Die Alpha-Linie konnte von den Projektpartnern schließlich im Dezember 2014 genutzt werden (vgl. I 3).

Im Rahmen des Projektes wurde die Beta-Linie entwickelt und im Juni / Juli 2015 in Betrieb genommen. Die Beta-Linie verfügt über mehrere Aufbereitungsschritte für die weitergehende Aufbereitung der in der Alpha-Linie erzeugten Feinfraktion < 2 mm mit einer Durchsatzleistung von bis zu 8 Mg/h.

AP1

Die konventionelle Aufbereitung von HMVA beginnt in Deutschland mit dem Austrag aus dem Nassentschlacker. Nach einer Alterung von ca. drei Monaten erfolgt die Aufteilung in verschiedene Korngrößen und Materialfraktionen. Innerhalb dieses Aufteilungsprozesses werden unter anderem verschiedene Windsichter, Magnetscheider und Wirbelstromscheider eingesetzt. Gegebenenfalls werden zusätzlich Zerkleinerungsaggregate genutzt. Zum Stand der Technik und zu den möglichen Verfahrenskombinationen sei auf die Literatur verwiesen [1, 2].

Um eine erhöhte Abscheidung der NE-Metalle bei gleichzeitig höherer Qualität sowie eine weitergehende Klassierung der mineralischen Produkte aus HMVA zu erreichen, kann die konventionelle Aufbereitung ergänzt oder alternative, innovative Behandlungsverfahren entwickelt und genutzt werden [1]. Für die SRH war vor allem interessant welche Potenziale durch eine weitergehende Aufbereitung mit der TARTECH-Anlage zusätzlich gehoben werden können. Insgesamt war ein Durchsatz von 40.000 Mg unterschiedlicher HMVA-Chargen aus Hamburger MVA bzw. bereits in Damsdorf endgelagerter HMVA vorgesehen. Aufgrund der Veränderungen bezüglich des Anlagenkonzeptes (inkl. Standortwechsel) konnten derartige Mengen nicht mehr berücksichtigt werden. Aus genehmigungsrechtlichen Gründen war auch der Durchsatz bereits endgelagerter HMVA nicht mehr möglich. Das Versuchskonzept wurde entsprechend angepasst und die Mengen reduziert (vgl. I 3). Die nach den Versuchen verbleibende Restmineralik wurde im

Wesentlichen auf geeigneten Einbauflächen der Deponie Dykerhoffbruch deponietechnisch verwertet.

Mittels der letzten Endes untersuchten HMVA-Chargen sollte zusätzlich zur Beurteilung des Potenzials der TARTECH-Anlage der Einfluss jahreszeitabhängiger Veränderung der Abfallqualität auf die Qualität der HMVA untersucht werden. Das betraf vor allem die Art und den Umfang der Rückgewinnung von Fe- und NE-Metallen aber auch von anderen sogenannten strategischen Metallen.

Hinsichtlich der Aufbereitung der Feinfraktion mit der Beta-Linie war von Interesse, ob sich aus der Feinfraktion im nennenswerten Umfang weitere NE-Metalle, insbesondere aber auch strategische Metalle und seltene Erden separieren lassen. Außerdem sollte die stoffliche Verwertung der verbleibenden Restmineralik aus der Feinfraktion beurteilt werden.

AP2

Die Siedlungsabfalldeponie Schöneicher Plan musste nach den Anforderungen des Deponierechts zum 01.06.2005 stillgelegt werden, da sie weder über eine geologische Barriere, noch über ein Basisabdichtungssystem verfügt. Nach Schließung sind Deponien (ebenfalls nach Deponierecht) zwingend mit einer Oberflächenabdichtung zu versehen. Um das auf dieser Dichtung gesammelte Niederschlagswasser geordnet abzuführen, muss der Abfallkörper zu einer Kubatur profiliert werden, von der das Oberflächenwasser im freien Gefälle ablaufen kann. Die erforderlichen Sammel- und Versickerungseinrichtungen im Umfeld der Deponie können nur dort gebaut werden, wo das Platzangebot ausreichend ist und die geologische Beschaffenheit des Untergrunds die Versickerung zulässt. Die Profilierung muss also bewirken, dass das Wasser von jedem beliebigen Punkt auf dem Deponiekörper im freien Gefälle - auch nach Abschluss der zu erwartenden Setzungen - den Sammel- und Versickerungseinrichtungen zufließt. Dafür muss der Deponiekörper einer ingenieurtechnischen Planung entsprechend profiliert werden.

Da die Deponie Schöneicher Plan am 01.06.2005 noch erhebliches Restvolumen hatte und die Endkubatur aufgrund der darunter liegenden Tongruben nicht allein durch Umlagerung herstellbar war, wird (unter anderem) die HMVA aus der MVA Ruhleben als Profilierungsmaterial eingesetzt. Aus dieser HMVA werden in Berlin-Ruhleben direkt nach der Verbrennung mit konventioneller Technik Fe- und NE-Metalle zurückgewonnen. Neben dem Einsatz als Verfüllmaterial wird die HMVA auch für den Bau der untersten Schicht des Oberflächenabdichtungssystems, der Trag- und Ausgleichsschicht verwendet. Die Trag- und Ausgleichsschicht liegt direkt unter den Dichtungselementen und muss in horizontaler Richtung durchlässig für die in Siedlungsabfalldeponien durch mikrobielle Prozesse entstehenden Deponiegase sein. Nur so kann das Deponiegas seitlich zu den Brunnen abgesaugt und ein Einstau unter den Dichtungsschichten vermieden werden.

Daneben hat HMVA die für den Deponiebau sehr günstige Eigenschaft, durch Verfestigung auf den Böschungen eine deutlich erosionsresistentere Oberfläche zu bilden, als alle Böden, die alternativ für gasgängige Trag- und Ausgleichs-

schichten eingesetzt werden könnten. So wird der Aufwand für die Nachbearbeitung der fertig hergerichteten Flächen vor dem Oberflächenabdichtungsbau deutlich reduziert. Außerdem stellt sich auch störender Grünbewuchs auf der HMVA erst später ein als auf den meisten anderen alternativen Materialien für die Trag- und Ausgleichsschichten.

Die Arbeiten zur Oberflächenabdichtung bei stillgelegten Deponien müssen gemäß Deponieverordnung „unverzüglich“ erfolgen, weil der Grundwasserschutz rechtlich die höchste Priorität besitzt. Daher wird die auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagerte HMVA kontinuierlich als Baustoff für die fertig zu stellenden Flächen verwendet bzw. durch weitere Anlieferungen überschüttet. Diese Arbeiten erfolgen durch Eigenleistungen der BSR. Nach Fertigstellung der profilierten Flächen und Erstellung der gasgängigen Trag- und Ausgleichsschicht aus HMVA werden Baufirmen beauftragt, darauf das Oberflächenabdichtungssystem zu errichten. Durch die laufenden Arbeiten zum Bau der Dichtung wurden bereits Flächen endgültig rekultiviert. Es geht also bei dem Versuch mit der HMVA von der Deponie Schöneicher Plan aus der MVA Ruhleben nicht um die Frage, ob diese noch mal behandelt werden sollte. Das ist - insbesondere nach den Verzögerungen im Projektablauf - aus Gründen des Bauablaufs und der vordringlichen Pflicht zur Deponieabdichtung nicht möglich. Stattdessen sollte stellvertretend für HMVA auf Monodeponien untersucht werden, ob es generell möglich und sinnvoll ist, bereits seit mehreren Jahren eingelagerte Asche wieder auszubauen, um Fe- und NE-Metalle zurückzugewinnen.

AP3

Zur Beschaffung einer entsprechenden Menge nicht weiter verwertbarer Fraktionen aus der EAG-Aufbereitung wurden mehrere geeignete Betriebe kontaktiert. Handproben von Materialien unterschiedlicher Aufbereitungstiefe wurden angefordert und untersucht. Im Ergebnis wurde ein mittelständisches regionales Unternehmen ausgewählt (vgl. Kap. I.5). Durch die Verzögerungen im Projektverlauf ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung für die zur Verfügung gestellten Chargen aus den Jahren 2013 (Voruntersuchungen) und 2014. Der Zulieferer hatte zwischenzeitlich die Behandlungstechnologie umgestellt. Deshalb waren weitere Analysen notwendig. Die für die Verbrennungsversuche notwendigen Feuerungsanlagen wie einem Drehrohrofen, einer Muldenfeuerung (Kleinf Feuerungsanlage mit wassergekühlter Brennmulde, 30 kW) und einer Rostfeuerung (Großfeuerung, 440 kW) standen bei UMSICHT im Technikum zur Verfügung.

Die UDE verfügte über die für die Durchführung der Untersuchungen notwendigen Gerätschaften sowie über Kontakte zur Eisen- und Stahlindustrie, um die erforderlichen Probenmaterialien zu beschaffen. Kenntnisse über Metallgehalte des Probenmaterials lagen zu Beginn der Untersuchungen nicht vor. Jedoch konnte in Rücksprache mit dem Unternehmen bestätigt werden, dass die Zusammensetzung der untersuchten Metallgranalien in etwa der Analyse der erzeugten Schmelzen entspricht.

AP4

Durch die Aufbereitung in der TARTECH-Anlage wird aus der HMVA unter anderem eine Fraktion generiert, die hauptsächlich aus Aluminiumpartikeln mit einer Größe < 3 mm besteht. Diese Partikel können nicht in Aluminiumherstellungsverfahren verwertet werden, da der Anteil an Al_2O_3 zu groß ist. Die Einlagerung dieser Fraktion in einer Deponie führt zur Emission von Wasserstoff, da das Aluminium mit Wasser unter Bildung eines basischen Milieus reagiert. Diese Reaktion ist exotherm, weswegen Deponieteile, in denen Aluminium eingelagert worden ist, für mehrere Monate auffallend warm werden. Außerdem stellt die Mischung von Wasserstoff und Umgebungsluft ein Explosionsrisiko dar. Diese in der Deponie unerwünschte Reaktion könnte unter kontrollierten Bedingungen aber wirtschaftlich interessant werden. Daher wurden in diesem Arbeitspaket zur Ermittlung alternativer Verwertungsmöglichkeiten die Synthetisierung von Wasserstoffspeichermaterialien und die Gewinnung von Wasserstoff mittels solcher Aluminiumfraktionen untersucht. Wissenschaftlich-technisch wird mit dieser Art der Verwendung von Abfallstoffen jedoch Neuland betreten.

AP5-BAM

Kenntnisse über die Anteile, in welcher Form (gediegen oder unterschiedlich chemisch gebunden) die relevanten Wertmetalle in der Feinfraktion von HMVA vorliegen, liegen so gut wie nicht vor (vgl. Kap. I 4). Lediglich qualitative Nachweise unterschiedlicher Bindungsformen konnten zum Teil bisher erbracht werden. Um Sortierverfahren, wie z.B. die Flotation, entwickeln und optimieren zu können, ist eine Definition der abzutrennenden Zielwertstoffe aber notwendig. Entsprechend waren im Projekt Untersuchungen zur Identifikation und sofern möglich auch zur Quantifizierung der in der Feinfraktion von HMVA vorliegenden Kupferspezies vorgesehen.

Bis auf eine Prallmühle (vgl. Kap. I 5) waren alle benötigten Gerätschaften für die verfahrenstechnischen Untersuchungen, die Probenvor- und aufbereitung und Analytik in der BAM vorhanden. Erforderliche Verbrauchsmaterialien insbesondere für die Analytik konnten aus den Projektmitteln angeschafft werden.

AP5-LMU

Mit den bisherigen konventionellen Techniken der Aufbereitung von HMVA in Deutschland liegt der tatsächlich abgetrennte NE-Metall-Anteil bei 0,67%, wobei hier die Elemente Al, Cu, Zn, Cr und Ni betrachtet werden, dies entspricht etwa 34% der NE-Metalle [3]. Mit Ausnahme von Al und Cu liegen die meisten anderen Elemente jedoch nicht in metallischer Form vor. Sie sind in Verbindungen eingebaut, welche sich bevorzugt im Feinanteil von HMVA wiederfinden. Die Speziierung und die Mineralogie sind für die wenigsten Elemente bisher bekannt. Einige Elemente sind bei höheren pH-Werten löslich, wie es HMVA in Gegenwart von Wasser aufweist. Allerdings betragen die eluierbaren Anteile nur 1-3% des Gesamtanteils an den Metallen. Die Löslichkeit kann jedoch bei höheren Temperaturen unter hydrothermalen Bedingungen gesteigert werden. In der Natur führen diese Prozesse zur Anreicherung dieser Elemente und zur Bildung epither-

maler Lagerstätten, wenn in Gegenwart von karbonatischen Anionen diese Metalle als Karbonate wieder ausgefällt werden. Das gilt insbesondere für Zn, Pb und Cu. Die karbonatischen Lagerstätten mit Smithsonit (ZnCO_3), Cerussit (PbCO_3) und Malachit ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) stehen im Fokus des Bergbaues weltweit.

In den MVA steht je nach Bauart Restdampf mit Temperaturen von 80-130°C zur Verfügung. Außerdem fällt prozess- und anlagenbedingt Salzsäure an. Es ist deshalb Ziel des Teilprojektes, unter diesen hydrothermalen Bedingungen und dem Einsatz der anfallenden Salzsäure höhere Metallanteile aus dem Feinanteil von HMVA zu eluieren und aus der mit Metallionen angereicherten Lösung die Metalle Pb und Zn auszufällen. Die Fällungsprodukte können dann einer Verhüttung zugeführt werden und führen so zu einem geringeren Ressourcenbedarf, speziell der strategisch bedeutsamen Metalle. Durch die Verwendung von Restdampf entsteht eine positive Energiebilanz.

Die Kinetik ist dabei von besonderer Bedeutung. Dazu müssen die Ratenkonstanten in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert ermittelt werden. Begleitend hierzu ist die Kenntnis der thermodynamischen Zustandsgleichungen notwendig. Die Modellierungen basieren auf der Ermittlung der entsprechenden Lösungsgleichgewichte und -bedingungen der Spezierung der Elemente in den HMVA-Phasen, die durch mikrochemische Analyse und quantitativen Elementverteilungsbildern mit der Elektronenstrahlmikrosonde bestimmt werden.

AP5-SpiCon

Bislang wird die mikrobielle Austragung von metallischen Komponenten im Bergbau durch Biomining großtechnisch zur Extraktion von Au, Co, Cu, Ni und U eingesetzt. Durch eigene Experimente im Labormaßstab konnten aus Schlämmen der Galvanikindustrie drei metallische Wertstoffe selektiv extrahiert und angereichert werden. Bei den Arbeiten mit biologischen Stoffen müssen bestimmte Vorkehrungen zum Arbeitsschutz getroffen werden, das wurde bei der Beantragung einkalkuliert.

AP6

Die Nachhaltigkeitsbetrachtung für die TARTECH-Anlage anhand der im Projekt durchgeführten Behandlungsversuche erfolgte nach Vorliegen der Ergebnisse im Zeitraum der kostenneutralen Projektverlängerung bis Ende März 2016.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Am 16.08.2012 fand das Kick-Off-Treffen des Verbundprojektes statt. In diesem Rahmen erfolgte u.a. die Feinabstimmung der gemeinsamen Kooperationsvereinbarung. Außerdem wurden Festlegungen für eine einheitliche Außendarstellung getroffen (z.B. die Einrichtung der ATR-Webseite, www.atr.bam.de). Inhaltlich stellten die einzelnen Projektpartner ihre Projektziele und Arbeitspläne vor, so dass vernetzungsrelevante Arbeitsschritte identifiziert und diskutiert werden konnten. Bereits bei dieser Sitzung wurde über mögliche Gründe, die eine Verschiebung des Anlagenbaus in Damsdorf nach sich ziehen können, diskutiert (vgl. 1. BMBF Zwischenbericht). Der avisierte Betriebsstart für April 2013 wurde jedoch noch als unproblematisch eingestuft.

Im direkten Nachgang des Kick-Off-Treffens fand am 21.08.2012 bei der BAM eine Besprechung zwischen Herrn Simon und Herrn Holm (beide BAM), Herrn Auhagen (BSR), Herrn Lübben (SRH), Herrn Gronholz, Frau Schmidt und Herrn Schmid (alle drei TARTECH) statt. Aufgrund von Kürzungen gegenüber dem Antrag sei demnach laut TARTECH ein Umsetzen der Anlagentechnik aus Fördermitteln nicht finanzierbar. TARTECH beabsichtigte daher nicht, die Anlage in Berlin aufzubauen. Die BSR verzichtete folgerichtig auf das Einleiten eines Genehmigungsverfahrens zum Betrieb der Anlage. Stattdessen sollen 1.000 Mg HMVA der BSR zur Anlage in Damsdorf gebracht werden, dort in kürzester Zeit aufbereitet und zur Deponie Schöneicher Plan zurückgebracht werden.

Am 14.12.2012 informierte Herr Gronholz (TARTECH) in einer eigens einberufenen Verbundprojektsitzung die Projektpartner, dass eine Nachnutzung der Anlage in der ursprünglich geplanten Weise nicht möglich sein werde. Es würde nach alternativen Standorten gesucht. Auch wurde seitens der SRH verdeutlicht, dass der Anlagenbetrieb auf der Deponie voraussichtlich nur zeitlich sehr eng befristet möglich sein würde. Ziel der Sitzung war es, alle Projektpartner umfassend zu informieren und in verbundrelevante Entscheidungen einzubinden. Im Ergebnis konnten sich alle Projektpartner ohne größere Probleme auf die veränderten Kosten- und Zeitplanungen einstellen (vgl. 1. BMBF Zwischenbericht).

Nach einigem hin und her wurde die BAM als Projektleiter am 24.04.2013 informiert, dass die TARTECH „grünes Licht für die verhandelten Verträge für die Anschlussverwendung erhalten hat“. Unterzeichnet werden sollten diese demnach Anfang Mai. Diese Verträge kamen jedoch auch nicht zu Stande. Daher fand am 04.07.2013 eine Besprechung zwischen dem Projektträger Jülich (PTJ, A. Jacobi und C. Bodensteiner) und TARTECH (A. Graf von Kalckreuth, C. Gronholz und M. Eras) unter der Beteiligung der Verbundkoordination (F.-G. Simon und O. Holm, beide BAM) statt. Zum Zeitpunkt dieser Besprechung stand TARTECH in Verhandlungen mit Verantwortlichen dreier weiterer Standorte, die eine Nachnutzung der Anlage zugelassen hätten. Ziel war demnach weiterhin, die Anlage zunächst im Rahmen des Projektes in Damsdorf zu errichten und dann auf einen dieser Standorte umzusetzen. Als zweite Option wurde über eine Anlage in Wiesbaden

diskutiert, bei der die Verträge unter Dach und Fach waren. Aus emissionschutzrechtlichen Gründen dürfe an diesem Standort jedoch kein Diesellaggregat betrieben werden. Dieser war aber wegen der Nutzung von Stickoxiden und CO₂ sowie der Abwärme zur Trocknung wesentlicher Bestandteil der geplanten FuE-Anlage. Folgende Punkte wurden diesbezüglich eingehender diskutiert:

(1) würden mit dieser Anlage die im Forschungsantrag formulierten Zielstellungen erfüllt, (2) blieben die Interessen der BSR, der SRH und deren Subpartner TUHH gewahrt und (3) welche abrechnungsrelevante Änderungen ergäben sich daraus, da die Anlage an diesem Standort nicht alleine von TARTECH errichtet und betrieben würde. Es wurde entschieden, die Anlage in Wiesbaden ins Projekt einzubinden, sofern bis Mitte Oktober 2013 kein anderer Standort für eine Nachnutzung gefunden würde.

Das war nicht der Fall, so dass die verwaltungsrechtlichen Schritte angegangen wurden, um die Anlage in Wiesbaden im Rahmen des Projektes zu nutzen. Dafür fand am 26.09.2013 eine Besprechung mit TARTECH beim PTJ unter Beteiligung von Herrn O. Holm (BAM) statt. Im Vorfeld des Treffens wurde von TARTECH die Idee von Herrn Holm aufgegriffen, in Ergänzung zur Anlage in Wiesbaden (Alpha-Linie) ein Technikum (Beta-Linie) zu errichten, um die forschungsrelevanten Zielstellungen des Teilprojektes vollständig umsetzen zu können. Die Auswirkungen und Änderungen auf die Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung bei TARTECH und die resultierenden Änderungen bei den Projektpartnern wurden im Nachgang dieser Besprechung jeweils bilateral zwischen den beteiligten Akteuren geklärt.

Unter Beteiligung von den Herren L. Lattka und A. Jacobi vom PTJ fand am 08.11.2013 ein Verbundprojekttreffen statt. In dieser Sitzung wurde die Einbindung der Anlage in Wiesbaden vorgestellt und diskutiert. Demnach sollten die aus der sogenannten Alpha-Linie in Wiesbaden gewonnenen Fraktionen (Stand damals < 3 mm) in einem Technikum (Beta-Linie) in Hamburg aufbereitet werden. Diese Beta-Linie sollte ab Mai/Juni 2014 einsatzbereit sein. Die resultierenden Mengenanpassungen wurden im Vorfeld mit der SRH abgesprochen, für die BSR änderte sich entgegen der letzten Planungen lediglich der Anfahrtsweg. Die von UMSICHT zu generierende WEEE-Rest-Asche könne laut Herrn Gronholz im Juni 2014 verarbeitet werden.

Die Alpha-Linie ging schließlich Mitte 2014 in den Routinebetrieb. Entgegen o.g. Planungen konnte das Technikum jedoch nicht in Hamburg errichtet werden. Stattdessen war ab diesem Zeitpunkt eine Einbindung der innovativen Anlagenteile in den Gesamtstandort Wiesbaden vorgesehen.

Am 15.09.2014 fand ein Verbundprojekttreffen in München statt, an dem auch Herr A. Jacobi vom PTJ teilnahm. Dabei stand aufgrund oben skizzierter Vorgänge eine kostenneutrale Verlängerung zur Diskussion. Im Einklang mit den vorgestellten Arbeitsständen und Ergebnissen der Teilprojekte sprachen sich bei diesem Treffen alle Projektpartner gegen eine kostenneutrale Verlängerung aus. Lediglich der Partner UMSICHT, der im Arbeitspaket zur Bilanzierung nicht hand-

lungsfähig war, kündigte eine kostenneutrale Verlängerung von etwa einem Dreivierteljahr an.

Ab September 2014 wurde dann die erste Charge (etwa 1000 Mg) HMVA vom Projektpartner SRH bereitgestellt und nach Wiesbaden zur Zwischenlagerung gebracht. Aufbereitet wurde diese HMVA an den Tagen 04. und 05.12.2014. Am 18.12.2014 wurden rund 500 Mg (noch einmal angepasste Menge) abgelagerter HMVA des Projektpartners BSR von der Deponie Schöneicher Plan angeliefert, aufbereitet und die Restmineralik wieder zurück zur Deponie Schöneicher Plan gefahren.

Von weiteren Verzögerungen im Bau der Beta-Linie waren vor allem die SRH und ihr Unterauftragnehmer TUHH betroffen. Die SRH deutete daher bereits in ihrem zum 11.02.2015 fälligen Zwischenbericht an, nun doch die Beantragung einer kostenneutralen Verlängerung in Betracht zu ziehen.

Die Beta-Linie wurde schließlich im April 2015 errichtet. In der Woche vom 18.-22.05.2015 sollten dann weitere Chargen des Projektpartners SRH in der Alpha-Linie sowie der dann gekoppelten Beta-Linie aufbereitet werden. Durch technische Probleme konnte in dieser Woche jedoch nur die Alpha-Linie gefahren werden. Die Produkte der Feinmineralik < 2mm wurden zwischengelagert und letzten Endes am 23.07.2015 in der Beta-Linie aufbereitet.

AP1

Zu Vorhabensbeginn waren die Realisierung und der Betrieb der TARTECH-Anlage auf der Deponie Damsdorf vorgesehen, deren Eigentümer der Wegezweckverband Segeberg (WZV) ist. Bereits seit 2005 wird HMVA der MVA Stelling Moor und der MVA Stapelfeld nach vorheriger Alterung und Aufbereitung auf der Deponie Damsdorf endgelagert. Insoweit war die Deponie Damsdorf aus Sicht der SRH sowohl aus logistischen als auch aus verwertungsseitigen Gründen der bevorzugte Standort für die Realisierung der TARTECH-Anlage. Im Rahmen der ersten Projektphase, in der Zeit vom IV. Quartal 2012 bis zum IV. Quartal 2013 wurden durch die SRH in Kooperation mit dem WZV und TARTECH die erforderliche Planung und Genehmigung für die Errichtung und den Betrieb der TARTECH Anlage vorangetrieben, bis hin zur finalen Abstimmung des Genehmigungsantrages. Aus oben genannten Gründen konnte dann aber der Bau der Anlage auf der Deponie Damsdorf nicht realisiert werden.

Als Ergebnis dieser Veränderungen mussten die Finanzierungs- und Terminpläne des AP 1 mehrfach angepasst werden. Unter anderem wurde aufgrund der veränderten Logistikanforderungen der ehemals geplante Einsatz von 40.000 Mg HMVA aus Hamburger MVAs auf ca. 4.370 Mg reduziert. Weiterhin konnte der ursprünglich geplante Einsatz von bereits endgelagerter HMVA der Deponie Damsdorf unter den veränderten Randbedingungen aus genehmigungsrechtlichen Gründen nicht mehr umgesetzt werden.

Im Ergebnis verbleibt für das hier in Rede stehende Teilprojekt die Untersuchung der oben genannten unterschiedlichen HMVA-Qualitäten in der TARTECH-Anlage am Standort Wiesbaden.

AP2

Bei Beantragung des Projekts war geplant, dass die TARTECH-Anlage nach dem Betrieb auf der Deponie Damsdorf umgesetzt und neben der Deponie Schöneicher Plan aufgebaut wird. Rund 40.000 Mg HMVA verschiedener Einlagerungszeiten sollten dann in dieser Anlage aufbereitet werden. Aufgrund der oben dargestellten Entwicklungen und Verzögerungen wurde das Versuchskonzept geändert. Es erschien nicht vertretbar, derartige Mengen HMVA so weit bis nach Wiesbaden zu transportieren. Der Behandlungsversuch wurde auf bereits mit den Verfahren der BSR beraubte HMVA, eingelagert in der Zeit ab 2009, beschränkt. Die für repräsentative Ergebnisse erforderliche Menge wurde mit etwa 500 Mg bestimmt. Tatsächlich im Versuch behandelt wurden 534,38 Mg HMVA.

Die Aufbereitung erfolgte am 18.12.2014. Im Verlauf des Versuchs entnahm die beauftragte Fa. SGS Institut Fresenius HMVA-Proben aus dem Input sowie aus allen Output-Fraktionen, um die tatsächlichen Metallrestgehalte, die daraus zurückgewonnen Anteile und deren Qualitäten zu bestimmen und um daraus den Erfolg der Behandlung bemessen zu können.

AP3

Die im Rahmen auch des Teilprojektes der SRH noch während der Antragsphase angedachte Erzeugung und Untersuchung von Verbrennungsrückständen aus der Monoverbrennung von EAG- Behandlungsrückständen wurden in Abstimmung mit dem PTJ lediglich von UMSICHT umgesetzt. Die Herstellung und Voruntersuchung wurde bei UMSICHT bis zum Jahresende 2014 abgeschlossen. Die Behandlung dieser Aschen in der TARTECH-Anlage sollte aufgrund der Feinkörnigkeit (überwiegend < 2 mm) hauptsächlich in der Beta-Linie erfolgen und war deshalb erst im Herbst 2015 möglich.

Das erforderliche Probenmaterial für die Ermittlung alternativer Schlacken konnten aus einem Stahlwerk und einer Gießerei ohne Verzögerung von der UDE beschafft werden. Die mechanischen Untersuchungsmethoden, wie die Zerkleinerung und magnetische Trennung wurden erfolgreich durchgeführt.

AP4

Das Arbeitspaket wurde, aufgrund der ohnehin schon geringen finanziellen Mittel, die dem HZG zur Verfügung standen, auf einfachste Art und Weise geplant und durchgeführt. Weiterhin konnte die Verwertung des Aluminiums zur Produktion von Wasserstoff nur im Rahmen einer bibliographischen Suche untersucht werden, da die Mittel für die Beschaffung der benötigten Apparaturen noch im Laufe des Projektes nachträglich gekürzt wurden.

AP5-BAM

Aus den sich früh abzeichnenden Verzögerungen des Anlagenbaus konnte geschlossen werden, dass für den Zeitraum der Methodenentwicklung noch keine mit dem TARTECH-Verfahren vorbehandelten Aschen zur Verfügung stehen würden. Entsprechend erfolgte am 25.09.2012 eine Probenahme abgelagerter HMVA auf der Deponie Schöneicher Plan des Verbundprojektpartners BSR. Diese HMVA wurde zum einen eingehend untersucht, um Erkenntnisse über die enthaltenen Bindungsformen von Kupfer zu erlangen, und zum anderen für die Methodenentwicklung der Flotation und der Zentrifugalsortierung genutzt. Außerdem wurde diese HMVA den anderen Projektpartnern dieses APs (LMU und SpiCon) zur Verfügung gestellt

Um Veränderungen des Ausgangsmaterials durch Pralleffekte analog dem Verfahrensprinzip von TARTECH zu berücksichtigen, wurden Teile der Feinfraktion des Materials von der Deponie Schöneicher Plan mit einer Prallmühle der TU-Berlin aufbereitet. Alle anderen verfahrenstechnischen Ansätze, Untersuchungen und Analysen fanden in und mit Geräten der BAM statt.

Nach Fertigstellung der TARTECH-Anlage in Wiesbaden wurden vor Ort mehrfach Proben der generierten und relevanten Teilfraktionen genommen. Im Wesentlichen wurden mit diesen Proben weitergehende Untersuchungen mit dem Zentrifugalsortierer durchgeführt.

AP5-LMU

Untersuchungsmaterial sollte der mineralische Anteil unterschiedlicher HMVA sein, die über den TARTECH-Prozess von Fe- und NE-Metallen entfrachtet wurde. TARTECH stellte zu Projektbeginn daher eine entfrachtete Schlacke des EBS Kraftwerkes E.ON –Energy from Waste – Heringen zur Verfügung. Weitere HMVA konnte von TARTECH im Bearbeitungszeitraum nicht zur Verfügung gestellt werden.

Die EBS-Schlacke wurde chemisch und mineralogisch charakterisiert. Es lagen keine Informationen darüber vor, welches Material für diese Schlacke verbrannt wurde. Die analysierten Pb- und Zn-führenden Phasen wurden noch nie in HMVA beobachtet, daher wurden mit dieser Schlacke keine weiteren Versuche gemacht. Ab Januar 2013 wurde für die weiteren Untersuchungen HMVA aus einer bayrischen MVA verwendet. Ab Oktober 2013 stand zusätzlich die abgelagerte HMVA der BSR s.o. zur Verfügung.

Über den TARTECH-Prozess werden die Anbackungen und Versinterungen von kleinsten metallischen Teilchen abgeschlagen und diese freigelegt. Dadurch erhöht sich jedoch der überwiegend mineralische Feinanteil zusätzlich. Da sich die TARTECH-Anlage weiterhin im Aufbau befand und kein Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde zur Erhöhung des Feinanteils die elektrodynamische Fragmentierung eingesetzt. Über dieses Verfahren kann der Feinanteil einer HMVA von 15% auf 70% gesteigert werden. Die ELD konnte im

Mai 2014 am Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen durchgeführt werden.

Die beiden HMVA wurden chemisch und mineralogisch charakterisiert und die hydrothermalen Lösungsexperimente bezüglich pH-Wert, Temperatur und Versuchsdauer optimiert. Ab Frühjahr 2015 wurde damit begonnen, die in den Hydrothermalexperimenten gelösten Metalle Blei und Zink auszufällen. Da nach der Auswertung und Zusammenstellung aller Ergebnisse noch die hydrochemische Modellierung durchgeführt werden sollte, wurde bis Oktober 2015 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt.

AP5-SpiCon

Aufbauend auf den eigenen Vorarbeiten wurde eine Methodik für die Behandlung von HMVA entwickelt. Wie bereits mehrfach dargestellt stand zunächst kein Material aus der TARTECH-Anlage zur Verfügung. Die Untersuchungen zur gezielten Extraktion der Metalle und deren selektiven Ausfällung wurden daher mit HMVA von der Deponie Schöneicher Plan durchgeführt. Alle weiteren Arbeiten konnten wie geplant durchgeführt werden.

AP6

Die Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung der projektrelevanten Behandlungsversuche verschiedener Aschen und Schlacken wurde mit dem Softwaretool GaBi 6[©] in Verbindung mit der Datenbank Ecoinvent[©] durchgeführt. Da aufgrund der genannten Verzögerungen bei der Errichtung der TARTECH-Anlage zunächst lange Zeit keine Realdaten zur Verfügung standen, wurden die dem Modell zugrunde liegenden Daten an Literaturvorgaben angelehnt abgeschätzt und an den entsprechenden Stellen in dem Modell durch flexible Variablen ersetzt. Dieses Vorgehen verursachte einen deutlich erhöhten Arbeitsaufwand im Rahmen der notwendigen Ausweitung der Modellstruktur. Die Erhebung der Daten über den Betrieb der TARTECH-Anlage als Grundlage zur Bewertung konnte erst nach kompletter Inbetriebnahme der Anlage in der zweiten Jahreshälfte 2015 begonnen werden. Für die gezielte Datenerhebung wurde ein Fragebogen entwickelt, um neben allgemeinen Informationen spezifische Daten zu den einzelnen Behandlungsversuchen abfragen zu können. Gleiches wurde hinsichtlich der Informationen zu einer Beispielanlage nach dem Stand der Technik mit einem adaptierten Fragebogen durchgeführt.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Siedlungs- und Gewerbeabfälle, die in die thermische Abfallbehandlung gelangen, enthalten das vollständige Spektrum anthropogen genutzter Wertstoffe. Durch getrennte Sammlung und Behandlung werden zwar erhebliche Mengen an Wertstoffen vor dem Verbrennungsprozess abgeschöpft und in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt, dennoch gelangen volkswirtschaftlich relevante Mengen von Metallen in den Restabfall und somit in die thermische Abfallbehandlung. Diese Metalle werden zum Teil nach dem Verbrennungsprozess aus der HMVA zurückgewonnen. Teilweise wird HMVA aber auch ohne jegliche Metallentfrachtung deponiert oder als Ersatzbaustoff verwertet. Wertstoffhaltige Sekundärrohstoffe gehen damit unwiederbringlich verloren.

AP1

Die Zusammensetzung der frischen HMVA ist im Wesentlichen abhängig von den eingesetzten Abfällen. Da während der Verbrennung nahezu die komplette organische Substanz umgesetzt wird, verbleiben als Rückstände die Flugasche, Reste der Rauchgasreinigung sowie die HMVA. Laut Literatur [3] werden für die Zusammensetzung deutscher HMVA folgende Schwankungsbreiten angegeben: 1-5 M% Unverbranntes, 7-10 M% Metallschrott sowie 85-90 M% mineralische Fraktion.

Eine bundesweite Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des UBA aus dem Jahr 2010 zeigte auf, dass nur bei 52% der deutschlandweit anfallenden HMVA (5,2 Mio. Mg/a) eine NE-Metallentfrachtung mit der Wirbelstromtechnik durchgeführt wurde. Die restliche HMVA wurde anderweitig entsorgt. Somit wurden laut Prognos lediglich 35.000 Mg NE-Metalle in verunreinigter Form zurückgewonnen. Voruntersuchungen von TARTECH an abgetrennten NE-Metallgemischen aus 26 Aufbereitungsanlagen für HMVA zeigten mineralische Anteile von 30 bis 60 M% (im Mittel 35 M%). Somit konnte davon ausgegangen werden, dass die Menge real abgeschöpfter NE-Metalle aus HMVA bundesweit sogar bei unter 25% lag. Unter Verwendung fortschrittlicher Technologien wurde von Steigerungspotenzialen um den Faktor 3 bis 4 ausgegangen, vor allem für Aluminium und Kupfer. Vollständig ungenutzt waren die Gehalte an chemisch gebundenem Kupfer und anderen Schwermetallen.

Einige Metalle sind in HMVA in rückgewinnungsrelevanten Größenordnungen vorhanden. Neben den Basismetallen Eisen, Kupfer oder Aluminium stehen heute vor allem die sogenannten strategischen Metalle, z.B. Edelmetalle oder auch seltene Erden, im Fokus. So wurden zum Beispiel in der HMVA der Amsterdamer Hausmüllverbrennung verschiedene Edelmetalle untersucht [4]. Dabei konnten in der Fraktion kleiner 2 mm eine Silberkonzentration von 2,1 g/Mg und eine Goldkonzentration von 0,11 g/Mg gemessen werden.

AP2

Neben der kontinuierlich anfallenden HMVA müssen auch historische HMVA in Betracht gezogen werden. Ein Großteil der HMVA wurde und wird als Baumaterial verwertet. Die darin vorhandenen Rohstoffe sind damit erst einmal festgelegt. Für die weitergehende Rückgewinnung von Metallen sind deshalb lediglich die abgelagerten HMVA relevant. Unter dem Aspekt des Ressourcenpotenzials sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Die historischen HMVA weisen vermutlich ein höheres Metallpotenzial auf, da die Abscheidung in den letzten Jahren wesentlich intensiviert und technologisch verbessert wurde. So ist zum Beispiel die Abtrennung von nicht-magnetischen Metallen erst in den letzten 20 Jahren flächendeckend umgesetzt worden. Das bedeutet, dass in älterer HMVA höhere Metallgehalte vermutet werden können. Gleichzeitig haben sich auch die Trennanforderungen an der Quelle, d.h. im Haushalt, verändert. Wesentliche Meilensteine in der Verringerung der Metallgehalte im Restmüll waren die Einführung des „gelben Sacks“, die Getrenntsammlung von Elektro- und Elektronikgeräten und die in einigen Bundesländern umgesetzte Wertstofftonne. Diese brach liegenden Potenziale sind ohnehin, unabhängig von den zukünftigen Entwicklungen in der Abfallwirtschaft, vorhanden. Untersuchungen zum Potenzial bereits abgelagerter HMVA waren vor Projektbeginn nicht bekannt.

AP3

Stehen jedoch die Edelmetalle und seltenen Erden im Fokus, so müssen vor allem die technischen Entwicklungen im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte berücksichtigt werden. Trotz des Trends zur Miniaturisierung und damit geringeren Mengen eines Stoffes in den Geräten gibt es insgesamt eine zunehmende Verwendung seltener Metalle wie strategischer Metalle und seltener Erden. Ein wesentlicher Punkt ist natürlich auch die gestiegene Verbreitung dieser Geräte. Im Gegensatz zu Elektrogroßgeräten wie Waschmaschinen, die eher selten in den Hausmüll geraten, finden sich Kleingeräte wie Mobiltelefone, Ladegeräte, USB-Sticks oder Taschenrechner vermehrt dort. Solche Fehlwürfe gelten als Hauptquelle für Edelmetalle und seltene Erden in HMVA. Im Gegenzug werden allein in Deutschland jährlich etwa zwischen 600.000 und 700.000 Mg EAG in den öffentlichen Sammelsystemen erfasst und in Recyclingeinrichtungen verarbeitet. Die Aufbereitungsverfahren umfassen in der Regel eine Reihe mechanischer Verfahrensschritte, um Wertstoffe aus dem Abfallstrom zurückzugewinnen oder Gefahrstoffe kontrolliert auszutragen. Im Rahmen einer Erstbehandlung werden z.B. externe Kabel und schadstoffhaltige Komponenten entfernt. Danach werden Gase und Flüssigkeiten entnommen und die Geräte weiter demontiert. Ziel ist dabei die Gewinnung von wiederverwendbaren Bauteilen und homogenen Werkstofffraktionen sowie die Abtrennung schadstoffhaltiger Bauteile. Eine Vorsortierung erfolgt häufig manuell, um Bauteile wie Elektromotoren und Kondensatoren unbeschädigt abtrennen zu können [5]. Im nächsten Schritt erfolgt eine Zerkleinerung der demontierten Geräte. Je nach gewünschter Korngröße werden z.B. Schredder, Rotorscheren oder Mühlen eingesetzt. Die zerkleinerten Fraktionen durchlaufen anschließend eine Kombination aus

Klassier- und Sortierverfahren, um Metalle und Kunststoffe voneinander zu trennen. Je nach Art und Kombination der Klassier- und Sortierverfahren werden verschiedene Wertstofffraktionen gewonnen, die sich wiederum für unterschiedliche Weiterverarbeitungswege eignen. Am Ende der Behandlung verbleibt jedoch in der Regel ein Stoffstrom aus Mischkunststoffen, Staub und Metallrückständen, der von den Recyclingunternehmen einer kostenpflichtigen Entsorgung zugeführt werden muss. Eine Grundlage für eine weitergehende Verwertung dieser Fraktion könnte die thermische Behandlung in einer Monoverbrennungsanlage sein.

Metallurgische Schlacken aus der Eisen- und Stahlindustrie werden gezielt eingesetzt, um unerwünschte Elemente aus einer Metallschmelze zu entfernen. Durch mechanische Einflüsse wie Spül- oder Rührprozesse und unterschiedliche Techniken zur Entfernung der Schlacke nach Abschluss des Vorgangs, werden jedoch metallische Partikel mit in die Schlacke transportiert. In der gängigen Aufbereitungstechnik großer Stahlwerke werden lediglich gröbere metallische Bestandteile der Schlacke entfernt. Die Aufbereitung und Entsorgung von Schlacken wird in der überwiegend klein- und mittelständischen Gießereindustrie in der Regel an externe Fachfirmen vergeben. Durch eine gezieltere Aufbereitung und eine damit einhergehend verbesserte Ressourceneffizienz, könnten diesen Unternehmen ökonomisch profitieren.

AP4

Vor Projektbeginn war bekannt, dass Al, zuzugemahlen mit NaH und einem geeigneten Additiv, wie z.B. $TiCl_3$, ein Gemisch bildet, welches unter Wasserstoffatmosphäre und bei geeigneten Druck- und Temperaturbedingungen in der Lage ist, bis zu 4,5 M% Wasserstoff einzulagern. Diese Wasserstoffspeicherreaktion ist reversibel. Es wurde außerdem gezeigt, dass das Mahlen unter Wasserstoffdruck (ca. 100 bar) direkt zur Bildung von $NaAlH_4$ führt, ohne dass eine Temperierung des Gemisches notwendig ist. Unbekannt war hingegen ob auch verunreinigtes Aluminium aus HMVA zu $NaAlH_4$ reagieren würde und wenn ja, zu welchen Anteilen und mit welcher Geschwindigkeit. Die Speicherkapazität des Produktes war ebenfalls unbekannt.

AP5-BAM

Dass Verfahren aus der Primärrohstoffgewinnung, wie Flotation, Dichtesortierung, Biolaugung und Hydrothermalverfahren, auch zur Rückgewinnung von Wertmetallen aus der Feinfraktion von HMVA geeignet sein könnten, ist eine Hypothese des ATR-Projektantrages. Gründe dafür sind die vergleichbaren Korngrößen und Wertstoffgehalte. Dass solche Ansätze an anderen Forschungseinrichtungen ebenfalls verfolgt wurden, war vor Projektbeginn nicht bekannt. An der TU-Clausthal wurden nach mündlicher Überlieferung Untersuchungen zur Flotation von HMVA mit dem Ziel der Rückgewinnung von Kupfer durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden jedoch noch nicht publiziert und konnten auch auf Nachfrage nicht zur Verfügung gestellt werden. Laut Informationen aus der persönlichen Kommunikation wurden die Untersuchungen jedoch im stark sauren Milieu, analog zu vielen gängigen Ansätzen der Primärrohstoffgewinnung, durch-

geführt. Die Ansätze die im Rahmen von ATR verfolgt wurden, gingen in eine andere Richtung.

Durch die Implementierung o.g. zusätzlicher Prozessschritte zur Erhöhung der NE-Metallausbeute bei der Aufbereitung von HMVA erhöht sich der Feinanteil der verbliebenen mineralischen Fraktionen zum Teil erheblich. Bereits ohne diese Aufbereitungsschritte besteht HMVA zu rund 25% aus Körnern unter 4 mm. Der Anteil der Feinstfraktion < 0,25 mm hat immer noch einen Massenanteil von rund 10%. In Anlagen, die nach dem Stand der Technik operieren, wird der Feinkornanteil im Allgemeinen nicht zur Metallrückgewinnung aufbereitet. Im Laufe der Projektzeit hat sich die durchschnittliche Untergrenze der NE-Metallrückgewinnung von etwa 4 auf 2 mm verringert. Allerdings zielen alle in der Praxis realisierten Verfahren lediglich auf die Rückgewinnung gediegener Metalle ab. Es ist jedoch zu erwarten, dass der Anteil gediegener Metalle kleiner wird, je kleiner die Korngröße ist. Untersuchungen zur Bestimmung der jeweiligen Anteile liegen so gut wie nicht vor. In der Regel werden Gesamtgehalte angegeben. So findet sich lediglich eine Veröffentlichung, die sich mit der Speziierung von Aluminium in der Feinfraktion beschäftigt [6]. Aus dieser geht hervor, dass rund 15% des Aluminiums in metallischer Form vorliegt. Aluminium wird aber unter den gängigen Milieubedingungen aufgrund seines unedleren Charakters, schneller oxidiert. Andere NE-Metalle wie Kupfer dürften daher einen höheren metallischen Anteil aufweisen. Dass Kupfer jedoch auch als Oxid und mineralisch gebunden vorliegt, ist erwiesen [7]. Die Bindungsform der Metalle ist aber maßgeblich für die Auswahl und den Erfolg der einzelnen Aufbereitungsmethoden. Verfahren wie die Flotation und die Dichtesortierung erscheinen aufgrund der Materialeigenschaften (Oberflächenbelegung, Heterogenität) ohne vorgeschaltete Aufbereitungsschritte daher wenig erfolgversprechend.

AP5-LMU

Aufgrund einer Studie vom Bayerischen Landesamt für Umwelt aus dem Jahr 2004 war bekannt, dass der Bleigehalt in der Feinfraktion der HMVA höher ist als in der Grobfraktion. Während über die Eigenschaften von HMVA in Abhängigkeit von Lagerungszeit, der Korngrößenfraktion und dem pH-Wert Untersuchungen vorliegen, gibt es in der Literatur keine Angaben zu hydrothermal behandelter HMVA.

Bisherige Forschungsprojekte über die Extraktion von Schwermetallen aus HMVA beziehen sich hauptsächlich auf umweltrelevante Kriterien. Dazu wird die Problematik von Deponiesickerwasser und Regenwasser als Eluent im Deponiekörper betrachtet. Andere Schwerpunkte liegen bei der Umweltverträglichkeit von HMVA als bauphysikalische Komponente [8]. Dabei werden frische und gealterte HMVA unterschieden. HMVA besteht überwiegend aus Hochtemperaturphasen, die unter natürlichen Umweltbedingungen metastabil sind. Frische HMVA ist ein äußerst reaktives Material. Bereits beim Abkühlen im Nassentschlacker verändern Umwandlungsprozesse den Mineralbestand. Vorwiegend handelt es sich um Karbonatisierungs- und Hydratisierungsreaktionen, die hauptsächlich am Feinstkorn

ablaufen. Bei der Alterung bleiben die Schadstoffgehalte weitestgehend in der HMVA. Jedoch wird mit der Mineralneubildung und der Karbonatisierung die Schadstofffreisetzung vermindert. Die Eluate gealterter HMVA weisen daher weitestgehend geringere Schwermetallkonzentrationen auf.

Die in der Literatur aufgeführten Lösungsversuche an HMVA behandeln die Immobilisierung von Gasen, Salzen, Sulfaten, Schadstoffen und Schwermetallen [9-13]. Die Eluierbarkeit von Schwermetallen, insbesondere von Zn und Pb, aus frischen, wie auch aus gealterter HMVA wurde mit unterschiedlichen Prozessen und Methoden untersucht. Für ein einheitliches Verfahren zur Beurteilung der Auslaugbarkeit wurden Eluate in Anlehnung an die DIN 38414 S4 (1984) angesetzt [12]. In verschiedenen gealterten Schlacken wurden geringere pH-Werte und Löslichkeiten von Schwermetallen, als in frischen Schlacken ermittelt [9].

Dijkstra et al. [10] stellten bei ihren Lösungsversuchen fest, dass eine Verringerung des pH-Wertes zu höheren Zn- und Pb-Gehalten im Eluat führen, während bei Langzeitlösungsversuchen geringere Zn- und Pb-Gehalte im Eluat zu messen sind.

AP5-SpiCon

Um Wertstoffe wie z. B. Metalle in die Wirtschaftskreisläufe zurückzuführen, wurden auch bereits Verfahren zum Bioleaching (auch Biohydrometallurgie oder Biooxidation) untersucht. Bioleaching wird zum einen definiert als die direkte Lösung von Metallen aus ihren mineralischen Quellen mit Hilfe natürlich vorkommender Mikroorganismen oder zum anderen als mikrobiell katalysierte Transformation von Elementen zur anschließenden Extraktion. So bieten eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Mikroorganismen aufgrund spezieller Stoffwechselforgänge hohe Selektivitäten zu bestimmten Metallen. Beispielsweise wurden *Acidithiobacillus ferrooxidans* und *Acidithiobacillus thiooxidans* erfolgreich zur Gewinnung von Cu und Zn eingesetzt. Auch andere Verfahren wurden im Bergbau bereits wirtschaftlich erfolgreich z.B. bei der Gewinnung von Au, Cu, Ni, U und Zn eingesetzt (Bio-mining).

Durch SpiCon wurde ein Verfahren zur Rückgewinnung von NE-Metallen aus Galvanik-Schlämmen entwickelt, welches eine Kombination aus Bioleaching, Biooxidation und außenstromloser bioelektrochemischer Abscheidung darstellt. Dabei wurden für diese Matrix biokatalytische Reaktionskinetiken optimiert, z.B. durch nachgeschalteten Enzymeinsatz. Zudem wurde ein Verfahrensschritt entwickelt, der eine gleichzeitige Abscheidung sowie die Beschichtung einer Kunststoffoberfläche mit Kupfer ermöglicht. Eine mikroskopische Untersuchung zeigte eine durchgängige, fehlerlose Beschichtung der Kunststoffoberfläche. Weiterhin wurden Verfahren zur selektiven Fixierung bestimmter Metalle aus Mehrstoffsystemen untersucht. Hierzu wurden funktionalisierte, planar auskristallisierende, selbstorganisierende Proteingitter mit einer Auflösung bis in den Nanometerbereich mit exakten geometrischer Strukturierung eingesetzt. Mittels der eingesetzten Biotemplates ließen sich über Redoxprozesse u.a. Nanopartikel aus Gold organisiert in räumlichen Strukturen herstellen.

AP6

Die drei Bereiche „Ökonomie“, „Ökologie“ und „Soziales“ bilden gleichwertig zu betrachtende Säulen der Nachhaltigkeit. Für ein Unternehmen, das nachhaltig wirtschaften will, stellt dies die Herausforderung dar, zugleich auf eine soziale, umweltverträgliche und ökonomisch erfolgreiche Art und Weise zu agieren.

Zur Betrachtung der Nachhaltigkeit kann z.B. eine Ökobilanz oder eine ökobilanzielle Betrachtung erstellt werden. Eine Ökobilanz ist im Allgemeinen eine normierte Methode, um potentielle Umweltwirkungen und Umweltaspekte von Produktsystemen und Dienstleistungen über den gesamten Lebensweg zu analysieren. Eine Ökobilanz, englisch „Life Cycle Assessment“ (LCA), wird durch die DIN EN ISO 14040 ff. definiert und umfasst vier Phasen (vgl. Abb. 1). Im AP6 wurde eine ökobilanzielle Betrachtung vorgenommen bei der einige Aspekte weniger stark betrachtet oder nicht komplett erfasst werden. Der Schwerpunkt der ökobilanziellen Betrachtung liegt daher auf der Herausarbeitung von Kernaussagen, wobei auf bestimmte Inhalte der Auswertung, der kritischen Prüfung sowie der Betrachtung von Allokationseffekten verzichtet wird [14].

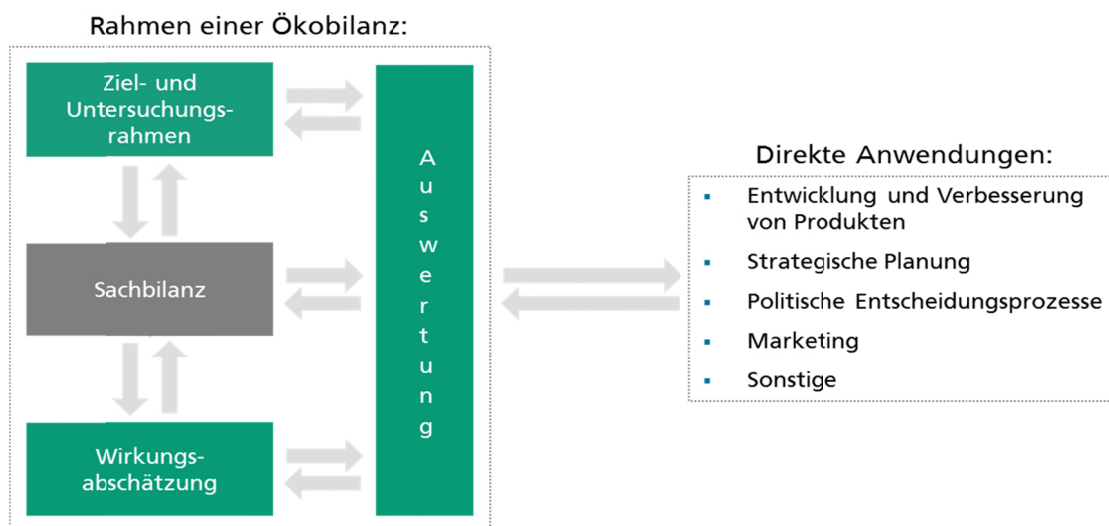


Abb. 1: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044, Abbildung nach [15].

Die Aufbereitung der Aschen/Schlacken sollte im Rahmen des ATR-Projekts ganzheitlich erfolgen. Deshalb wurden neben ökologischen Aspekten auch sozio-ökonomische und soziale Aspekte über den ganzheitlichen Betrachtungsansatz der ESSENZ-Methode einbezogen. Diese Methode ermöglicht die Betrachtung der Ressourceneffizienz eines Prozesses unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im Allgemeinen wird Ressourceneffizienz als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ereignisses zum Ressourceneinsatz definiert [16]. Die ESSENZ-Methode betrachtet die Dimensionen „Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“, „Umweltwirkungen“ und „Nutzen“. Diese Dimensionen werden auf Basis von 21 Kategorien abgebildet, die die Quantität der Dimensionen bestimmen [17].

Die Dimension „Verfügbarkeit“ ist in zwei Teildimensionen - „physische Verfügbarkeit“ und „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ - untergliedert [17]. Die Teildimension „physische Verfügbarkeit“ beinhaltet die geologische und anthropogene Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen. Die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch wird über den Wirkungsindikator „Abiotic Depletion Potential“ ($ADP_{\text{elementar}}$) (kg Sb-Äquiv.) bestimmt, welcher sich auf die ultimativen Reserven (gesamte Vorkommen einer Ressource in der Erdkruste [18]) bezieht und die Abnahme der Verfügbarkeit eines Rohstoffes nach geologischen Gesichtspunkten beschreibt [17, 19]. Gegenwärtige Modelle vernachlässigen jedoch die Anteile von Rohmaterialien, die sich in der Technosphäre befinden. Um neben dem Ressourcenverbrauch der Lithosphäre auch die Anthroposphäre bilanzieren zu können, wurde der Wirkungsindikator Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP) (kg Sb-Äquiv.) entwickelt. Beim AADP wird die Extraktionsrate eines Rohstoffes seinen Ressourcen und anthropogenen Vorkommen gegenübergestellt und wie beim $ADP_{\text{elementar}}$ auf Antimon normiert. Beim AADP werden die Ressourcen und nicht wie bei ADP die ultimativen Reserven betrachtet. Daher sind diese beiden Indikatoren nicht direkt miteinander vergleichbar. Relative Veränderungen von $ADP_{\text{elementar}}$ zu AADP schwanken zwischen -45% und +65%. Diese Schwankungsbreite verdeutlicht den Einfluss der Verlagerung von Rohstoffen in die Anthroposphäre. Das AADP-Modell ermöglicht es außerdem, den Abbau abiotischer Ressourcen detailliert zu bewerten. Ziel ist es dabei, die anthropogenen Lagerstätten als potentielle Quellen zu quantifizieren [20].

Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ setzt sich aus einer Betrachtung der Kategorien „Einhaltung von sozialen Standards“ und „Einhaltung von Umweltstandards“ zusammen. Es wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit von Ressourcen durch fehlende gesellschaftliche Akzeptanz eingeschränkt werden kann. Für eine Bewertung der Einhaltung sozialer Standards wird ein Screening-Indikator verwendet, welcher angibt, bei welchem Rohstoff während des Abbaus soziale Standards verletzt werden können. In dessen Berechnung fließen die Gesichtspunkte „Kinderarbeit“, „Zwangsarbeit“, „Konfliktgebiete“ sowie länderspezifische Risikofaktoren ein. Letztere werden aus einer speziellen Datenbank, der sogenannten Social Hotspot Database, entnommen.

Zur Quantifizierung der Kategorie „Einhaltung von Umweltstandards“ dient ein Indikator, der durch Multiplikation des prozentualen Anteils eines Landes an der globalen Produktion eines Rohstoffes und dem länderspezifischen Environmental Performance Index berechnet wird. Die vierte Dimension bewertet Umweltwirkungen auf Grundlage der Methode der Ökobilanz. Die Bewertung basiert auf der Betrachtung der Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AcP), Eutrophierungspotenzial (EP), Ozonabbaupotenzial (ODP) und Photochemisches Oxidationspotenzial (POCP).

Nach der Bewertung der einzelnen Kategorien, wird die Ressourceneffizienz innerhalb des gewählten Untersuchungsrahmens durch Division der funktionellen Einheit durch die Ergebnisse der Dimensionen ermittelt. Eine Aggregation zu einem Gesamtwert wird nach der ESSENZ-Methode nicht durchgeführt [17].

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Von Seiten der Projektkoordination erfolgte eine enge Zusammenarbeit und regelmäßige Abstimmung mit dem übergeordneten Projekt INTRAr3+.

Im Bereich der wissenschaftlich-technischen Aufgaben beschränkte sich die Zusammenarbeit im Wesentlichen auf interne Kooperationen. Ausnahmen sind den Absätzen zu den einzelnen Arbeitspaketen zu entnehmen. Insgesamt wurde schnell deutlich, dass auch eine Zusammenarbeit mit dem zweiten Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme r³, welches sich mit HMVA-Aufbereitung beschäftigte (VeMRec), nicht zielführend sein würde. Im genannten Projekt sollte eine Optimierung der Rückgewinnung von NE-Metallen aus HMVA mittels Sensortechnik erfolgen. Dieses Verfahren kann aufgrund technischer Begebenheiten jedoch nur auf vergleichsweise große Korngrößen (im Projekt > 8 mm) angewendet werden. Die Innovationen und der Fokus im Projekt ATR lagen aber in der Feinstfraktion von HMVA, letzten Endes im Bereich < 2 mm.

AP1 und AP2

Die SRH möchte in den kommenden Jahren die Aufbereitung von HMVA für die beiden MVA Borsigstraße und Rugenberger Damm optimieren. Daher ist die SRH seit 2011 sehr darum bemüht, Know-How im eigenen Unternehmen aufzubauen und künftig die HMVA-Aufbereitung nicht mehr vollständig zu vergeben, sondern anteilig selbst oder zumindest über Tochterunternehmen zu bewerkstelligen. Im Rahmen dieses Projektes fand ein häufigerer Austausch zwischen der SRH und den MVA-Betreibern der Borsigstraße (seit 1.1.2014 ein Tochterunternehmen der SRH) und des Rugenberger Damms (bis 2013 hatte SRH hier 25% Anteil, seit 2014 45% Anteil) statt. Beide MVA betreiben eigene Aufbereitungsanlagen, vermarkten die HMVA jedoch gemeinsam über das Hanseatische Schlackenkontor (HSK). An dieser Gesellschaft ist die SRH zu 16,67% beteiligt. Da das HSK die Verbindungsstelle zwischen Erzeugern und Abnehmern (als Baustoff) ist, ist dem HSK stark an der Qualität der fertig aufbereiteten HMVA gelegen. Die SRH steht mit dem HSK in regelmäßigem Austausch, wobei die Steigerung der Qualität zur Sicherung des Absatzes als Baustoff immer im Vordergrund steht.

Diverse Besuche in anderen Aufbereitungsanlagen (z.B. von INASHCO, REMEX, MDSU, Stork-Umweltdienste, Heidemann-Recycling) dienten der Information darüber, was andere Anlagen leisten können und welche Konzepte dort jeweils verfolgt werden. Diese Zusatzinformationen ermöglichen, die Leistungen der TARTECH-Anlagentechnologie besser und objektiver zu bewerten.

Die Kooperation mit der TUHH erfolgte in diesem Projekt in Form einer Beauftragung durch die SRH.

Die BSR und TARTECH haben unabhängig voneinander im Rahmen des Vorhabens am Institut SGS Fresenius in Berlin Analysen unterschiedlicher Materialien durchführen lassen.

TARTECH arbeitete zudem mit der Fa. SGM Magnetics in Manerbio, Italien, der Fa. ATZ in Zwickau sowie der Fa. Aurubis in Hamburg zusammen. Die Transporte der HMVA-Chargen von Hamburg zur Aufbereitungsanlage nach Wiesbaden wurden durch von TARTECH beauftragte Dritte ausgeführt. Der Fuhrpark der SRH hätte für diese umfangreichen Transporte keine ausreichenden Kapazitäten zur Verfügung stellen können.

AP3

Durch die Iwan Koslow GmbH & Co. KG, Landshut wurden die vorbehandelten EAG-Behandlungsrückstände für die Verbrennungsversuche bereitgestellt. Im Rahmen einer mit der Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, (Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik, Erneuerbare Energien) gemeinsam betreuten Bachelorarbeit wurden die thermischen Vorbehandlungsversuchen im Technikum von UMSICHT durchgeführt.

Die Fa. Friedrich Lohmann GmbH stellte der UDE Schlackeproben aus dem Stahlwerk und der Gießerei zur Verfügung.

AP4

Im Rahmen des AP4 gab es keine Zusammenarbeit mit externen Partnern.

AP5

Da in der BAM keine Prallmühle zur Aufbereitung der HMVA von der Deponie Schöneicher Plan vorhanden war, musste nach Alternativen gesucht werden. Fündig wurde man im Fachbereich Mechanische Verfahrenstechnik der TU-Berlin. Der Fachbereich verfügt über eine Prallmühle, mit der die benötigten Mengen bearbeitet werden konnten.

Hinsichtlich der Charakterisierung der HMVA wurde die TU-Freiberg kontaktiert, nachdem bekannt gegeben wurde, dass diese als eine Art zentrale Anlaufstelle für die Nutzung übergeordneter Messmethoden dienen sollte. Im Vorfeld der r³-Kick-Off-Veranstaltung fand eine Begehung statt, bei der die Möglichkeiten und Grenzen der vorhandenen Messtechnik eruiert werden konnten. Dabei wurde geklärt, ob und wie eine Zusammenarbeit zur Nutzung vorhandener Messgeräte erfolgen könne. Es kam zu keiner Zusammenarbeit, weil die Untersuchungen in ähnlicher Form auch an der BAM durchgeführt werden konnten und zudem Kosten für die Bearbeitung von Proben entstanden wären. Eine angebotene, zeitweilige eigenhändige Nutzung der Geräte hätte zu hohe Einarbeitungszeiten und ebenfalls Kosten verursacht. Außerdem wurde deutlich, dass mit der Umstrukturierung (Neugründung Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie und Umzug in neue Räumlichkeiten) im Vorhabenzeitraum die Geräte z.T. auch gar nicht zur Verfügung gestanden hätten. Da im Vorfeld der Fördermaßnahme nicht bekannt war, dass es ein solches Angebot geben wird, konnten folglich auch keine finanziellen Mittel im Projektantrag eingeplant werden. Das Konzept einer zentralen Einrichtung als Dienstleister für Messmethoden sollte daher dringend überdacht werden.

Seitens der LMU hat sich eine Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (IPB, Holzkirchen) ergeben. Im Rahmen des Programms „Märkte von Übermorgen“ wurde im Fraunhofer-internen Projekt „Molecular Sorting“ seitens des IBP die innovative Methode der elektrodynamischen Fragmentierung zur Aufbereitung von Verbrennungsrückständen und Schlacken erforscht und weiterentwickelt.

Bei SpiCon wurden Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie der TU Berlin für die Modellierung berücksichtigt, mit Vertretern beider Einrichtungen wurden diesbezüglich auch Expertengespräche durchgeführt.

AP6

Hinsichtlich der Ökobilanzierung des gesamten mehrstufigen Aufbereitungsverfahrens von ATR wie auch der einzelnen Verfahrensansätze gab es Kontakt zur Universität Stuttgart (Lehrstuhl für Bauphysik, Abt. Ganzheitliche Bilanzierung) und zum Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Deren Anfragen und Datenerhebungen wurden in enger Abstimmung von der BAM und UMSICHT bearbeitet und beantwortet. Da diese Projekte jedoch zeitgleich starteten, war es, entsprechend dem Projektfortschritt, in der Regel nicht möglich, die angeforderten Daten zeitnah zu liefern. Dieser Aspekt sollte bei der zukünftigen Planung von Begleitprojekten berücksichtigt werden.

UMSICHT arbeitete zudem bei der ökobilanziellen Bewertung von Verfahren zur Metallrückgewinnung aus HMVA in Form von Studienarbeiten mit folgenden Einrichtungen zusammen:

Technische Universität München (Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie sowie dem Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt), TU-Berlin (Fachgebiet Sustainable Engineering, u.a. auch Projektkoordinator des r³-Projektes ESSENZ) und Hochschule Hamm-Lippstadt (Lehrstuhl für Photonik und Materialwissenschaften).

Daten für die Bilanzierung einer beispielhaften Referenzanlage nach dem Stand der Technik stellte das Hanseatische Schlackenkontor GmbH, Hamburg zur Verfügung

II Eingehende Darstellung

Im Hauptkapitel II sind abgesehen von Kap. II.1 (Resultate des Forschungsvorhabens) die Ausführungen anhand der Teilprojekte (TPA - TPJ) untergliedert, da sich ein Großteil der Angaben auf die jeweiligen Zuwendungsempfänger bezieht. Folgende Teilprojekte wurden im Verbundvorhaben ATR gefördert:

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

Alle Teilberichte der Projektpartner mit den jeweiligen Resultaten und den wissenschaftlichen Ausführungen sind im Anhang dieses Gesamtberichtes zu finden. Für dieses Kapitel wurde aus den einzelnen Teilberichten eine Kurzfassung für das Gesamtprojekt erstellt, die wie folgt gegliedert ist:

- a. Zusammenfassung
- b. Einleitung
- c. Vorgehensweise
- d. Ergebnisse und Diskussion

a. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus Aschen und Schlacken, insbesondere aus Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA), durch Aufschluss aus den mineralischen Verbunden. Durch das innovative Prallzerkleinerungsverfahren des Projektpartners TARTECH eco industries AG sollten Verunreinigungen an den Metallen vollständig abgeschlagen werden. Für die großtechnische Demonstration dieses Verfahrens wurden durch die Projektpartner Stadtreinigung Hamburg (SRH) und Berliner Stadtreinigung (BSR) unterschiedliche Chargen HMVA, insgesamt ca. 5.000 Mg, zur Verfügung gestellt. Das zerkleinerte und von Eisen- und Nichteisen-Metallen entfrachtete Material mit vorwiegend oxidisch gebundenen Metallen wurde für weitere Verfahren verwendet. Zur Rückgewinnung von Kupfer wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Verfahren zur Flotation und Dichtesortierung und bei der Spicon GmbH Verfahren zur enzymatischen Extraktion erforscht. An der Ludwig-Maximilians Universität (LMU) wurde die hydrothermale Extraktion von Blei und Zink sowie deren Rückfällung untersucht.

Mit Blick auf die weitgehende Verwertung separierter Stoffströme wurde zum Einen untersucht, ob die mineralische Fraktion nach einer derartigen Behandlung noch zur Verwertung bei der Deponiesanierung einsetzbar ist. Zum Anderen wurde eine aus HMVA gewonnene Aluminiumfraktionen (< 3 mm) beim Projektpartner Helmholtz-Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (HZG) zur Synthese von Wasserstoffspeichermaterialien eingesetzt.

Mit Blick auf einen möglichen Technologietransfer für das innovative Prallzerkleinerungsverfahren wurden seitens des Projektpartners Universität Duisburg-Essen (UDE) geeignete Schlacken aus der Stahl-, Edelstahl- und NE-Metallindustrie ermittelt. Zudem wurden beim Projektpartner Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT Reststoffe aus WEEE-Recyclingprozessen verbrannt und in Teilen der großtechnisch umgesetzten Anlage aufbereitet.

Die Arbeiten im Rahmen des Verbundprojekts haben gezeigt, dass mit innovativen Technologien die NE-Rückgewinnungsquoten aus HMVA gegenüber Anlagen, die nach dem Stand der Technik arbeiten, deutlich erhöht werden können. Vor allem die Metalle Aluminium, Kupfer sowie Legierungselemente aus Messing konnten vermehrt zurückgewonnen werden. Die Anreicherung von weiteren wertvollen Metallen in separierten Stoffströmen aus der Fraktion < 2 mm wurde im Rahmen des Projektes nicht systematisch untersucht, wurde jedoch durch die Abnehmer der gewonnenen Konzentrate bestätigt. Der Anteil dieser Fraktion < 2 mm wird zwar bereits in der Alpha-Linie deutlich erhöht, eine Verwertung im Deponiebau auf der Deponie Schöneicher Plan ist jedoch weiterhin möglich.

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtungen zeigten, dass die Aufbereitung metallhaltiger HMVA grundsätzlich ökologische, soziale bzw. sozioökonomische Vorteile erbringt. Bereits die Aufbereitung von HMVA nach dem Stand der Technik ergibt demnach eine deutlich Gutschrift für die zurückgewonnenen Metalle, die unter Berücksichtigung der dabei erzeugten Emissionen im Saldo zu einer

Einsparung führt. Die Bilanzierung der Versuche im Rahmen des Projektes unterstreichen, dass das Ausmaß der Entlastung für Umwelt und Gesellschaft vor allem von den Metallgehalten der behandelten HMVA abhängt. Dabei lassen sich die ökologischen Vorteile auf die Schonung primärer Rohstoffe zurückführen. Insbesondere die hochwertige Aufbereitung unbehandelter HMVA mit hohen Gehalten an Eisen, Kupfer und Aluminium ist mit ökologischen Vorteilen verbunden. Im Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass der verfahrenstechnische Mehraufwand zur Erschließung des Rohstoffpotenzials von HMVA in der Korngrößenfraktion < 2 mm in Form der Beta-Linie nicht eindeutig als positiv oder negativ bewertet werden kann.

b. Einleitung

Siedlungs- und Gewerbeabfälle, welche in die thermische Abfallbehandlung gelangen, enthalten das vollständige Spektrum anthropogen genutzter Stoffe und Materialien. Durch eine getrennte Sammlung und Behandlung werden zwar erhebliche Mengen an Wertstoffen vor dem Verbrennungsprozess abgeschöpft und in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Dennoch gelangen volkswirtschaftlich relevante Mengen von Metallen in den Restabfall und somit in die thermische Abfallbehandlung. Diese Metalle werden bisher nur teilweise nach dem Verbrennungsprozess zurückgewonnen.

Bei Verbrennungsprozessen entstehen verschiedene feste und gasförmige Rückstände. Flugaschen und andere Rückstände aus der Rauchgasreinigung werden meist untertage entsorgt. Die größte Rückstandsfraktion bildet die HMVA. Unter HMVA wird im Allgemeinen der Verbrennungsrückstand verstanden, der bei der Feuerung nicht über die Abluft, sondern i. d. R. durch ein Rost nach unten aus dem Verbrennungsraum ausgetragen wird. Vielfach wird daher auch der Begriff Rostasche verwendet. Aus 1.000 kg Siedlungsabfall entstehen etwa 250 kg HMVA. Da in Deutschland jährlich etwa 20 Mio. Mg Siedlungsabfälle verbrannt werden, fallen folglich rund 5 Mio. Mg HMVA an. HMVA enthält weit weniger Problem- und Störstoffe als die Flugaschen und die Rückstände aus der Rauchgasreinigung, enthält zudem Metalle in elementarer Form und hat sehr gute bautechnische Eigenschaften. Aber auch sie kann nicht ohne weiteres als Ersatzbaustoff genutzt werden.

Frische HMVA ist ein inhomogenes Stoffgemisch mit metallischen und mineralischen Anteilen sowie sogenannten Durchläufermaterialien, wie Steine, Glas, Keramik und einem kleinen Anteil Restorganik. Der Metallanteil beträgt etwa 10%, wobei ein Großteil auf magnetische Eisenmetalle (Fe-Metalle) entfällt. Ein kleinerer, nichtmagnetischer Anteil (NE-Metalle) besteht vornehmlich aus den Metallen Aluminium und Kupfer sowie Legierungen wie Messing und Edelstahl. Über 80% der HMVA ist mineralisches Material, das etwa in gleichen Teilen aus Asche und Schlacke, also glasigen oder kristallinen Schmelzprodukten, besteht. Daher werden sie häufig auch als HMV-Schlacken bezeichnet.

HMVA wird in Deutschland fast ausschließlich nass, z.B. über ein Wasserbad, aus der Müllverbrennungsanlage (MVA) ausgetragen. Der mineralische Anteil besteht in der Hauptsache aus den Oxiden von Silizium, Aluminium sowie den Oxiden und Carbonaten der Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium. Der Gehalt an Erdalkalioxiden prägt das chemische Verhalten von HMVA im Kontakt mit Wasser. Calcium- und Magnesiumoxid werden von Wasser zu den entsprechenden Hydroxiden gelöst. Es stellt sich ein pH-Wert von über 12 ein. Diese hohen pH-Werte führen zur Oxidation unedler Metalle. Aluminium setzt dabei Wasserstoff frei. Zudem gehen abhängig vom pH-Wert unterschiedliche Schwermetalle in Lösung und können ausgewaschen werden.

Aus diesen Gründen wird in technischen Regelwerken zur stofflichen Verwertung von mineralischen Reststoffen gefordert, dass HMVA aufbereitet und abgelagert werden müssen, bevor sie einer Verwertung zugeführt werden. Konkretisiert wird die Ablagerung z.B. in den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, wonach die Ablagerung nass zu erfolgen hat und mindestens drei Monate umfassen soll. Da fast ein Drittel der HMVA im Straßenbau eingesetzt werden, hat sich dieser Prozessschritt als Stand der Technik etabliert.

Ziel der Lagerung ist es, Alterungsprozesse im Vorfeld der Verwertung ablaufen zu lassen. Die resultierende chemische und physikalische Stabilisierung der HMVA sichert unter anderem deren Raumbeständigkeit und damit die Stabilität oder Beschaffenheit der Bauwerke. So wird beispielsweise bei den resultierenden pH-Werten kein Wasserstoff mehr aus der Oxidation von Aluminium freigesetzt, der hohe Drücke und schließlich Risse in Bauwerken verursachen könnte. Zudem werden Schadstoffe teilweise immobilisiert bzw. deren Auswaschung gemindert. Durch Prozesse wie Carbonatisierung, Hydratbildung und Oxidation werden aber nicht nur Schadstoffe, sondern auch wertvolle Rohstoffe (vor allem Metalle) beeinflusst. Im Wesentlichen entstehen auf nahezu allen Partikeloberflächen mineralische Verkrustungen, die teilweise zusammenwachsen, die HMVA insgesamt verfestigen und so die Metallrückgewinnung erschweren.

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus HMVA wurden in der Projektlaufzeit bei den Aufbereitern von HMVA in Deutschland große Anstrengungen unternommen. So wurden z.B. immer mehr Sieblinien mit kleineren Kornbandbreiten eingesetzt, um die Effizienz von Sortierverfahren, vor allem die der Wirbelstromscheidung, zu steigern. Um die Metalle diesen und anderen Prozessschritten zugänglich zu machen, wurden die Aufbereitungsverfahren auf unterschiedliche Art und Weise umgestellt. Vielfach sollen, wie bei dem Projektpartner TARTECH, Metalle mittels mechanischer Beanspruchung von den mineralischen Anhaftungen befreit werden. Ein anderer Weg ist die möglichst schnelle Aufbereitung nach der Verbrennung, um der Bildung von mineralischen Anhaftungen und der Verfestigung der HMVA zuvorzukommen. Laut einer Befragung deutscher Aufbereiter von HMVA aus dem Jahr 2014 werden nach dem Stand der Technik derzeit im Durchschnitt 7,7% Fe-Metalle mit 5 Magnetscheidern und 1,3% NE-Metalle mit 5 Wirbelstromscheidern zurückgewonnen [2].

Durch die Implementierung oben genannter zusätzlicher Prozessschritte zur Verbesserung der Metallausbeute bei der Aufbereitung von HMVA erhöht sich der Feinanteil der verbliebenen mineralischen Fraktionen zum Teil erheblich. Bereits ohne diese Aufbereitungsschritte besteht HMVA zu rund 25% aus Körnern unter 4 mm. Der Anteil der Fraktion $< 0,25$ mm hat immer noch rund 10%. In Anlagen, die nach dem Stand der Technik operieren, wird der Feinkornanteil im Allgemeinen nicht zur Metallrückgewinnung aufbereitet. Im Laufe der Projektzeit hat sich die durchschnittliche Untergrenze der NE-Metallrückgewinnung von etwa 4 auf 2 mm verringert [2]. Allerdings zielen alle in der Praxis realisierten Verfahren lediglich auf die Rückgewinnung gediegener Metalle ab. In der Feinfraktion von HMVA befinden sich allerdings auch relevante Anteile Metalle in chemisch gebundener Form. Die Verfahren im Verbundprojekt ATR adressieren sowohl die ungenutzten Potenziale der Rückgewinnung chemisch gebundener Metalle als auch die der Rückgewinnung gediegener Metalle aus der Feinfraktion < 2 mm.

c. Vorgehensweise

Ziel des Vorhabens war die Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus Aschen und Schlacken durch Aufschluss aus den mineralischen Verbunden. Durch ein innovatives Prallzerkleinerungsverfahren des Projektpartners TARTECH sollten die Verunreinigungen an den metallischen Anteilen praktisch vollständig abgeschlagen werden. Diese Technologie wurde im Rahmen des Projektes so verfeinert und angepasst, dass auf diese Weise Partikel > 2 mm in einer großtechnisch operierenden Anlage (Alpha-Linie, Durchsatzleistung ca. 100 Mg/h) aufbereitet werden können. Für die Fraktion 0-2 mm wurde zudem eine weitergehende, mehrstufige Aufbereitungsanlage entwickelt und errichtet (Beta-Linie, bis zu 8 Mg/h).

Für die Leistungsbeschreibung dieser Anlagenteile wurde im Rahmen des Projektes HMVA aus mehreren Hamburger MVA zu verschiedenen Jahreszeiten jeweils direkt nach der Verbrennung geliefert, gealtert und später aufbereitet. Teilweise waren diese Chargen bereits mit vorhandener Technik vorbehandelt, also teilbearbeitet. So sollten Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen der Getrennthaltung von Abfall, der HMVA-Aufbereitung und der Wiederfindungsrate von strategischen Metallen für HMVA aus Hamburg ermittelt werden. Stellvertretend für Aschen aus Monodeponien wurde untersucht, ob von der BSR seit 2009 auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagerte HMVA ausgebaut und die darin noch enthaltenen Metalle mit der innovativen Technik der TARTECH-Anlage separiert werden können.

c.1. Weitergehende Aufbereitung der Feinfraktion unter Berücksichtigung chemisch gebundener Metalle

Das zerkleinerte und von Fe- und NE-Metallen entfrachtete Material mit vorwiegend oxidisch gebundenen Metallen sollte für weitere Prozessschritte verwendet werden. Durch Flotation und Dichtesortierung gewonnene Kupferkonzentrate könnten als Rohstoff für die Kupfermetallurgie eingesetzt werden. Entsprechende Verfahrensansätze wurden bei der BAM entwickelt und getestet. Andere gebundene Metalle wie Zink und Blei aus der Feinstfraktion könnten hydrothermal extrahiert, als Carbonate wieder ausgefällt und der Verhüttung zugeführt werden (Arbeiten an der LMU). Durch SpiCon wurde zudem die biogene Extraktion von Kupfer und später Zink durch Ganzzellverfahren untersucht. Dafür wurden Mikroorganismen eingesetzt, die speziell dafür geeignete Enzyme bilden können. So sollte unter Berücksichtigung der Anlagenentwicklung bei TARTECH ein mehrstufiges Aufschluss-, Trennungs- und Rückgewinnungsverfahren entstehen, um die in HMVA enthaltenen Wertmetalle weitestgehend nutzbar zu machen.

c.2. Verwertung der Restmineralik und feiner Aluminiumfraktionen

Mit Blick auf die Verwertung separierter Stoffströme wurde zum Einen untersucht, ob die mineralische Fraktion nach einer derartigen Behandlung noch zur Verwertung bei der Deponiesanierung einsetzbar ist. Fraglich waren hier die verbliebene Gasdurchlässigkeit und die Einhaltung hiesiger Zuordnungswerte. Zum Anderen ist bekannt, dass sich Aluminium in Korngrößen < 3 mm nicht für eine direkte Verwertung durch Einschmelzen eignet (zu hoher Anteil an Al_2O_3). Daher wurde beim Projektpartner HZG die Synthese von Wasserstoffspeichermaterialien mit Aluminiumfraktionen aus o.g. Verfahren im Labormaßstab untersucht und die Möglichkeit der Synthese von Wasserstoff anhand einer Literaturrecherche überprüft.

c.3. Weitere Anwendungsgebiete der TARTECH-Technologie abseits von HMVA

Schlacken aus der Metallurgie enthalten ebenfalls Einschlüsse elementarer Metalle in Form kleinster Tröpfchen, die nicht mit klassischen mechanischen Trennverfahren vom mineralischen Anteil getrennt werden können. Projektpartner UDE ermittelte daher geeignete Schlacken aus der Stahl-, Edelstahl- und NE-Metallindustrie, die sich für eine Prallzerkleinerung mit der TARTECH-Technologie anbieten. Insbesondere Schlacken aus der Edelstahl- und NE-Metallindustrie enthalten wertvolle Metalle wie z.B. Nickel und Kupfer.

Beim Projektpartner UMSICHT wurden zudem Verbrennungsversuche mit Resten aus Recyclingverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG bzw. WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)) durchgeführt und in der Beta-Linie aufbereitet. Diese Untersuchungen sollten als Grundlage für die Bewertung einer Mitverbrennung oder Monoverbrennung von Elektrokleingeräten im Hausmüll dienen.

c.4. Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung

Sämtliche Projektschritte und -ergebnisse werden von einer übergeordneten Nachhaltigkeitsbetrachtung bewertet. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Ressourceneffizienzpotenzial, welches sowohl für die im Projekt aufzubauenden Anlagen als auch für verschiedene Szenarien der Marktentwicklung dargestellt wird. Darüber hinaus werden nach der Methodik der Multikriterienanalyse weitere ökologische, ökonomische und soziale Kriterien in die Bewertung einbezogen. Hierzu werden verschiedene Indikatoren genutzt, welche die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeitsaspekte hinreichend charakterisieren. Als ökologische Indikatoren bieten sich beispielsweise Treibhauspotenzial (GWP in CO₂-Äquivalenten) und Energieverbrauch an.

d. Ergebnisse und Diskussion

Die Technologieerprobung wurde in einer neu errichteten Anlage in Wiesbaden durchgeführt. Die dort errichtete TARTECH-Anlage (vgl. Abb. 2) besteht im Wesentlichen aus zwei Anlagenteilen (Alpha- und Beta-Linie). Die Alpha-Linie wurde entwickelt, um aus Rückständen thermischer Prozesse Metalle > 2 mm zurückzugewinnen. Die innovative Beta-Linie ergänzt diesen Ansatz für die Aufbereitung von Rückständen < 2 mm und ermöglicht zudem die Anreicherung von in diesen Korngrößen vorhandenen strategischen Metallen.

Im Verbundprojekt wurde in der Alpha-Linie erstmals mit einer Ausbaustufe des sogenannten TAR-Processors (Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger, vgl. Abb. 3) gearbeitet. Mit dieser Ausbaustufe konnten die Aufprallgeschwindigkeiten in der Rotorkammer von zuvor max. 300 km/h auf über 650 km/h gesteigert werden.



Abb. 2: Ansicht der Aufbereitungsanlage für Hausmüllverbrennungsrückstände (HMVA) in Wiesbaden: Alpha-Linie im Hintergrund, Beta-Linie (weiß) im Vordergrund.



Abb. 3: Im Rahmen des Projektes (weiter-)entwickelte TAR-Prozessoren (Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger) zum Prallaufschluss von HMVA: Alpha-Linie (links) und Beta-Linie (rechts).

Die SRH stellte für die Untersuchungen ca. 4.300 Mg HMVA in sieben verschiedenen Qualitäten zur Verfügung. Aus 3.480 Mg frischer HMVA unterschiedlicher Chargen wurden insgesamt 62,64 Mg NE-Metalle zurückgewonnen. Dabei sind die VA-Metalle (Chrom-Nickel-Stähle) nicht berücksichtigt. Der Verschmutzungsgrad lag bei max. 15%. Eine typische Zusammensetzung der drei NE-Metallfraktionen (grob, mittel, fein) zeigt Abb. 4.

Kupfer wird vor allem in der Kornfraktion von 2-5 mm gefunden. Der Anteil an Fremdbestandteilen (in der Abbildung als Rest bezeichnet) ist in der Grobfraktion meist am geringsten.

Unter der Berücksichtigung dieses sogenannten Schuttabzugs und der VA-Metalle ergibt sich eine Rückgewinnungsquote von 1,80% für die reinen NE Metalle. Zudem wurden bereits in SRH-Anlagen fertig aufbereitete HMVA Chargen nachbehandelt. Aus 349 Mg HMVA der MVA Borsigstraße konnten noch 1,24% und aus 506 Mg HMVA der MVA Rugenberger Damm noch 1,27% reine NE-Metalle zurückgewonnen werden. Auch aus der ebenfalls bereits konventionell aufbereiteten und bereits abgelagerten HMVA (534 Mg) der BSR konnten relevante Mengen NE-Metalle (0,95%) separiert werden. Aufgrund o. g. Verfestigungsreaktionen konnten die enthaltenen Metalle jedoch nicht mit dem gleichen Reinheitsgrad abgeschieden werden, wie aus HMVA, die nach üblicher Lagerungszeit aufbereitet wurde.

Die Beta-Linie verbrauchte dabei eine Energie von von 2,2 kWh/Mg, was größenordnungsmäßig im Bereich anderer HMVA-Aufbereitungsanlagen in Deutschland liegt [21]. Damit ergibt sich eine Verdopplung des Energieverbrauchs bei der Implementierung einer derartigen Anlagenerweiterung.

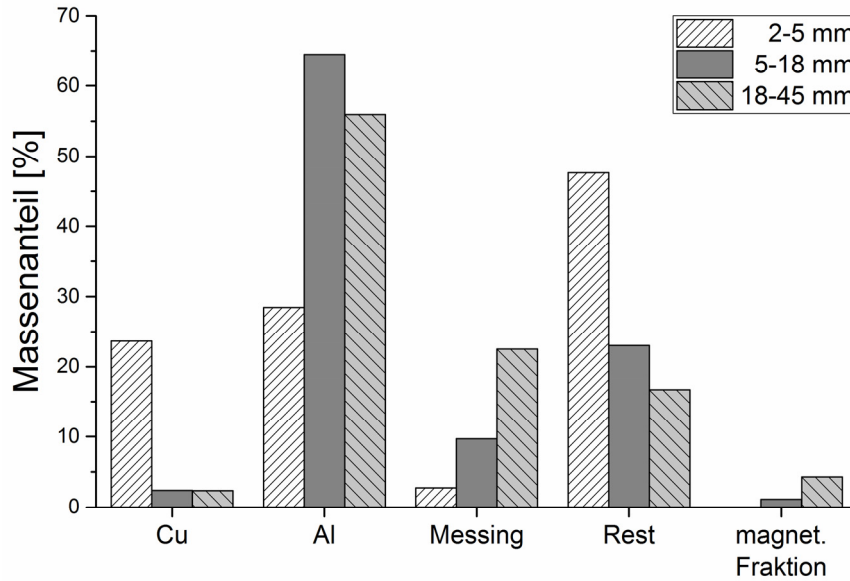


Abb. 4. Zusammensetzung der NE-Metallfraktionen aus der Alpha-Linie; HMVA aus der MVA Stelling Moor (Charge I)

In den mineralischen Fraktionen wurden Bestimmungen von Kupfer und Silber vorgenommen. Die Ergebnisse sind in den Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt. Die Werte für Kupfer liegen zwischen 2.000 und 4.000 mg/kg mit Extremwerten von 10.000-16.000 mg/kg. Silber liegt zwischen meist zwischen 2 und 8 mg/kg, einige um 10 mg/kg, wenige zwischen 20 und 30 mg/kg.

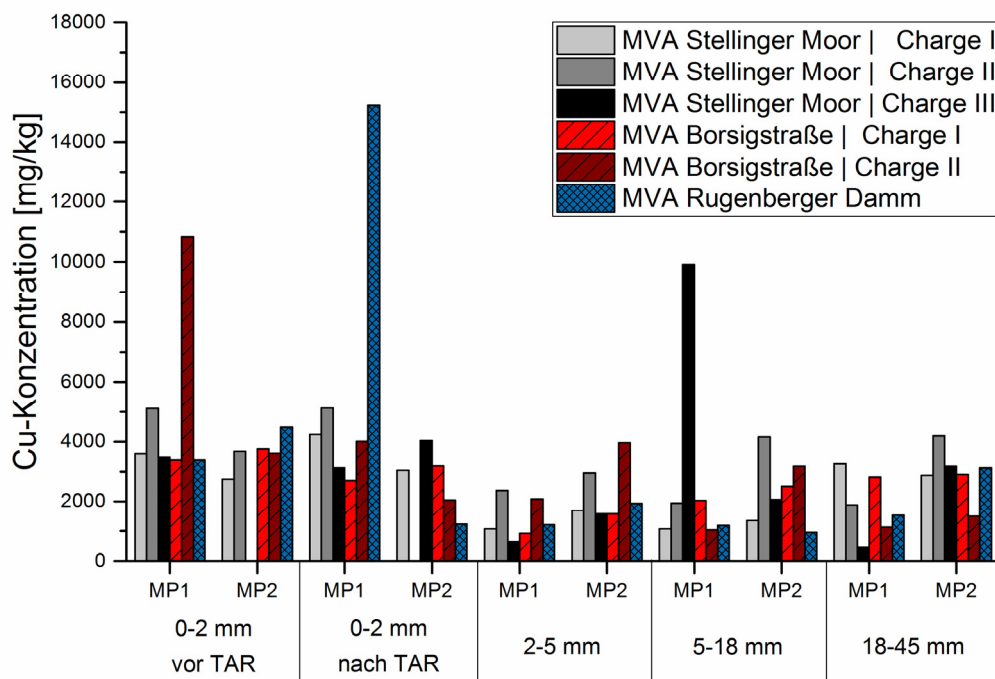


Abb. 5. Kupfer-Konzentration im Feststoff der mineralischen Fraktionen (MP: Mischprobe)

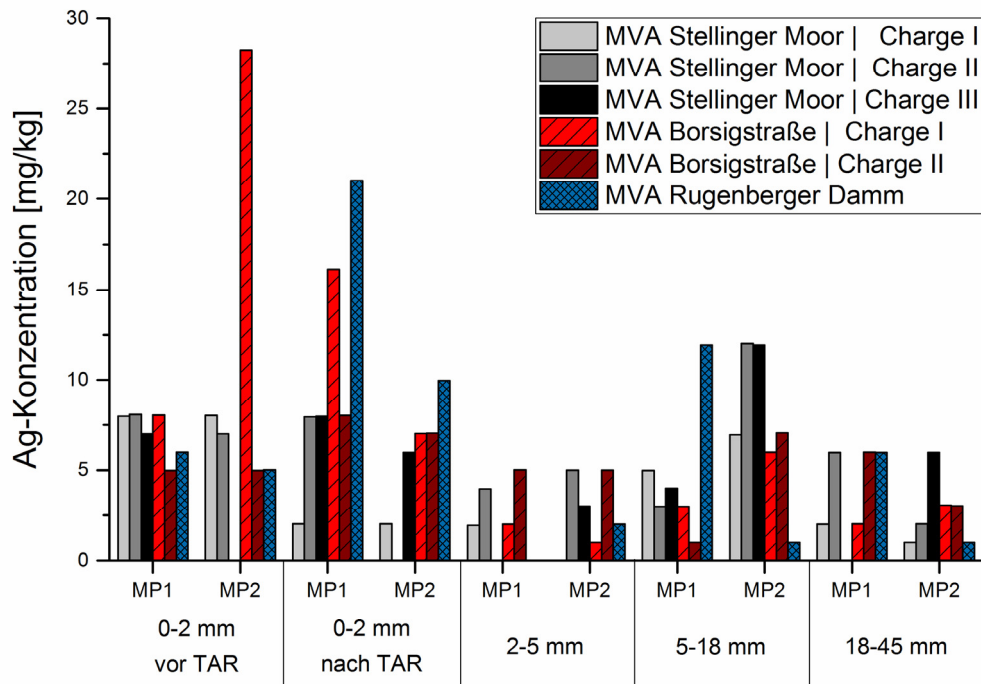


Abb. 6. Silber-Konzentration im Feststoff der mineralischen Fraktionen (MP: Mischprobe)

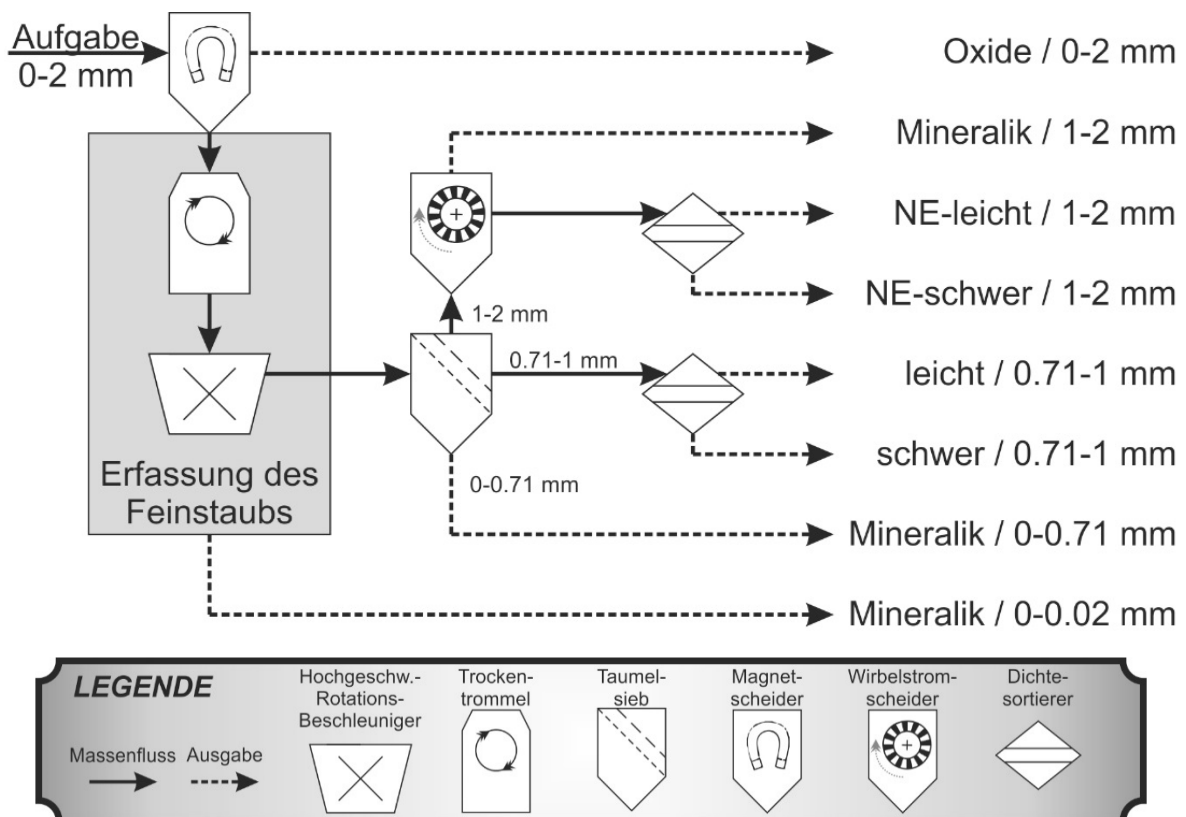


Abb. 7: Verfahrensfliessschema der Beta-Linie zur Aufbereitung von HMVA-Fractionen < 2 mm

Mit der innovativen Beta-Linie wurden im Rahmen des Verbundvorhabens 4.487 Mg HMVA aufbereitet. Die Aufbereitung erfolgte je nach Witterung in unterschiedlichen Chargen. Aus dem Input-Stoffstrom 0-2 mm HMVA wurden zwischen 1,58% und 1,70% NE-Metalle zurückgewonnen. Der Anteil dieser Input-Fraktion 0-2 mm aus der Aufbereitung in der Alpha-Linie schwankte zwischen 48,0% und 50,5%. Unter Berücksichtigung der Schuttabzüge konnten somit insgesamt (Alpha- und Beta-Linie) im Mittel 2,61% reine NE-Metalle aus der HMVA der SRH zurückgewonnen werden. Das entspricht gegenüber dem Stand der Technik (s.o.) einer Verdopplung der Ausbeute an NE-Metallen.

d.1. Weitergehende Aufbereitung der Feinfraktion unter Berücksichtigung chemisch gebundener Metalle

Ein im Vorfeld bekanntes Problem bei der Flotation von HMVA ist, dass die Metalle und Metallverbindungen nicht frei vorliegen. Doch auch künstlich zugegebene Kupfer-Komponenten ließen sich nicht zurückflotieren. Dass die Chemikalien grundsätzlich geeignet waren, konnte in den Versuchen mit einer Hallimond-Röhre gezeigt werden, doch die Milieubedingungen, die durch die Suspension von HMVA in der Trübe entstehen, sind derart ungünstig, dass weitergehende Untersuchungen nicht zielführend waren. Die komplexen Eigenschaften von HMVA führten auch dazu, dass die Abhängigkeiten der hydrothermalen Extraktion von Blei und Zink unter unterschiedlichen pH-Wert-Bedingungen und unter Verwendung verschiedener Säuren mittels Modellierungen nur eingeschränkt erklärbar sind. Anhand der Dichtesortierung mittels Zentrifugalsortierer hingegen konnte Kupfer gut aufkonzentriert werden. Besonders die Teilfraktion 0 - 710 µm aus der Beta-Linie (s. Abb. 7) erwies sich als gutes Ausgangsmaterial für die Zentrifugalsortierung. Bei Anreicherungsfaktoren zwischen 25 und 90 konnten aus dieser Fraktion unter verschiedenen Milieubedingungen jeweils rund 40% des enthaltenen Kupfers in das Konzentrat überführt werden. Die biogene, enzymatisch kontrollierte Extraktion von Metallen (vor allem von Kupfer) aus HMVA wurde unter Laborbedingungen erfolgreich durchgeführt.

d.2. Verwertung der Restmineralik und feiner Aluminiumfraktionen

Die chemische Untersuchung der Eluate der verbliebenen mineralischen Fraktion nach der Aufbereitung in der Alpha-Linie ergab, dass die Zuordnungswerte der Deponieverordnung eingehalten wurden. Ausgehend von der Kornsummenkurve (ermittelt nach DIN 18 123) ist eine Verwertung dieser mineralischen Fraktion in der gasgängigen Trag- und Ausgleichsschicht der Deponie Schöneicher Plan möglich.

Die Oberflächen der Partikel der aus HMVA separierten Aluminiumfraktion waren mit einer Oxidschicht überzogen, die vornehmlich aus Silizium und Kalzium enthielt. Dieses Aluminium wurde mit Natriumhydrid (NaH) unter einem Wasserstoffdruck von 100 bar gemahlen. Aus der Druck- und Temperaturentwicklung konnte die Bildung von Natriumalanat (NaAlH_4) abgeleitet und mittels Röntgen-

diffraktometrie-Messungen bestätigt werden. Weiterhin wurde mittels dynamischer Differenzkalorimetrie gezeigt, dass die Probe zuerst zu Na_3AlH_6 und erst später weiter zu NaAlH_4 reagierte. Die Synthese von Wasserstoff aus einer entsprechenden Aluminiumfraktion ist laut Literaturrecherche chemisch möglich.

d.3. Weitere Anwendungsgebiete der TARTECH-Technologie abseits von HMVA

Die Bestimmung des Metallinhaltes der untersuchten metallurgischen Schlacken wurde durch zerkleinernde Verfahren erreicht. Der Metallanteil der untersuchten Schlacken betrug ca. 25%. Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop ergaben, dass die Metallpartikel weitestgehend der Zusammensetzung der Schmelze entsprechen, aus der sie stammen. Zurückgewonnene Metalle könnten somit ohne die Gefahr von Kreuzkontamination durch unerwünschte Legierungselemente in Schmelzen ähnlicher Zusammensetzung recycelt werden.

Durch die Versuche mit verschiedenen Verbrennungsanlagen konnte nachgewiesen werden, dass EAG-Behandlungsrückstände als Monobrennstoff thermisch behandelbar sind. In Kleinversuchen wurde zudem gezeigt, dass die Zugabe von Holzpellets bis zu einem Anteil von 50% dazu beiträgt, die Emissionswerte zu verringern und den Anteil sowie die Härte von Agglomeraten in den Aschen zu steigern. Die Aschen wurden in einer Kugelmühle gemahlen und anschließend klassiert. Danach fanden sich ca. 70% des Kupfers (ermittelt mit EDX-Elementaranalysen) in den Fraktionen $> 250 \mu\text{m}$, die einen Massenanteil von unter 25% ausmachten. Schmelzversuche bestätigten die hohen Gehalte an Metallen in den Fraktionen $> 250 \mu\text{m}$. Somit kann durch Mahlen und anschließendes Klassieren bereits eine gute Abtrennung von Metallen und Mineralik erreicht werden.

d.4. Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtungen zeigten, dass die Aufbereitung metallhaltiger HMVA grundsätzlich ökologische, soziale bzw. sozioökonomische Vorteile erbringt. Bereits die Aufbereitung durchschnittlich zusammengesetzter HMVA nach dem Stand der Technik ergibt in allen betrachteten Wirkungskategorien deutliche Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle. Beispielhaft ist in Abb. 8 das Ergebnis für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial dargestellt.

Die Effekte der erzeugten Emissionen fallen in allen Wirkungskategorien deutlich niedriger aus als die Gutschriften für die Metalle. Die derzeit betriebenen HMVA-Aufbereitungsanlagen weisen allerdings sehr unterschiedliche Konfigurationen auf, so dass eine Definition des Stands der Technik nur schwer möglich ist. Auch die Beschaffenheit der HMVA kann aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung der verbrannten Abfälle sowohl saisonal als auch regional schwanken (vgl. Kap. I.4).

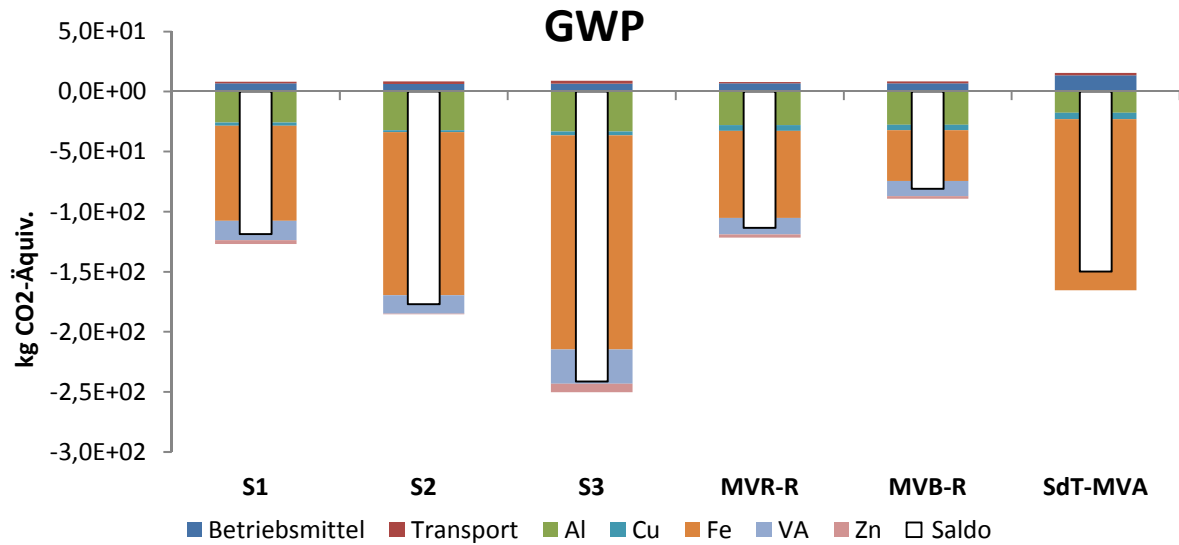


Abb. 8: Ergebnisse der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) für die Aufbereitung unterschiedlicher HMVA-Chargen in der Alpha-Linie und der beispielhaften Anlage nach dem Stand der Technik (SdT).
 S1, S2, S3 = Chargen I, II, III aus der MVA Stelling Moor
 MVR-R = Charge aus der MVA Rugenberger Damm
 MVB-R = Charge I aus der MVA Borsigstraße

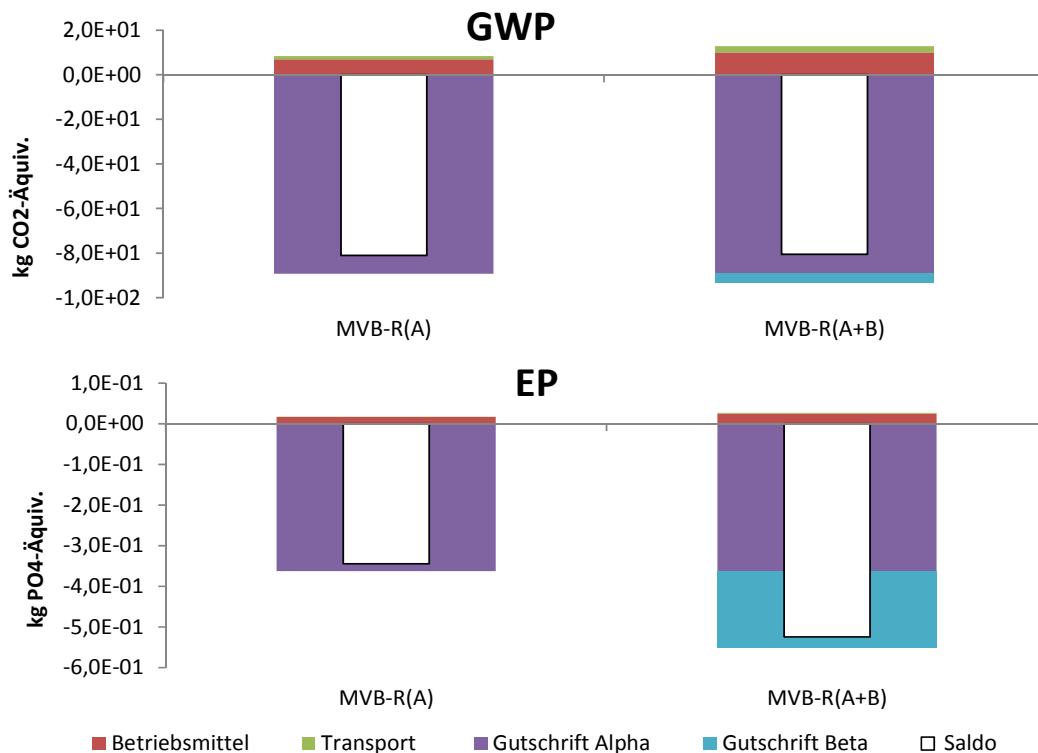


Abb. 9: Auswirkung auf die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP, oben) und Eutrophierungspotenzial (EP, unten) bei einer weitergehenden Behandlung von HMVA in der Beta-Linie (Alpha + Beta-Linie (A+B)) gegenüber der ausschließlichen Behandlung in der Alpha-Linie (A).

Die Bilanzierung der TARTECH-Versuchskampagnen unterstreicht, dass das Ausmaß der Entlastung für Umwelt und Gesellschaft vor allem vom Metallgehalt der behandelten HMVA abhängt (s. Abb. 8). Dabei lassen sich die ökologischen Vorteile auf die Schonung primärer Rohstoffe zurückführen. Insbesondere die hochwertige Aufbereitung unbehandelter HMVA mit hohen Gehalten an Eisen, Kupfer und Aluminium ist mit ökologischen Vorteilen verbunden. Im Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass die Erschließung des Rohstoffpotenzials von HMVA in der Korngrößenfraktion < 2 mm durch den verfahrenstechnischen Mehraufwand in Form der der Beta-Linie nicht eindeutig als positiv oder negativ bewertet werden kann. In den meisten Wirkungskategorien fallen die Gutschriften höher aus als die mit dem zusätzlichen Aufwand verbundenen Emissionen (z.B. bei dem Eutrophierungspotenzial, s. Abb. 9). Bei zwei der Wirkungskategorien (u.a. dem Treibhauspotenzial, s. Abb. 9) sind die Umweltwirkungen bei dieser Betrachtung ausgeglichen.

Für bereits vorbehandelte, z.T. von Metallen entfrachtete HMVA gilt, dass die Aufbereitung bei niedrigen Metallgehalten mit Hilfe des TARTECH-Verfahrens ökologisch sinnvoller ist als die Verbringung bzw. der Verbleib auf der Deponie. Allerdings sind die Gutschriften für die Einsparung von Primärrohstoffen erwartungsgemäß deutlich geringer als bei unbehandelter HMVA.

Aus ökologischer Sicht ergeben sich deutliche Vorteile aus einer Rückgewinnung von Metallen aus Aschen der thermischen Behandlung von EAG-Behandlungsrückständen. Daher würde es sich empfehlen, EAG-Abfälle künftig als Monochargen in thermischen Behandlungsanlagen einzusetzen, um damit die Konzentrationen relevanter Metalle in den resultierenden Aschen zu erhöhen. Die enthaltenen Metalle haben dabei allerdings sehr unterschiedliche Auswirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien, wie der folgenden Abb. 10 zu entnehmen ist.

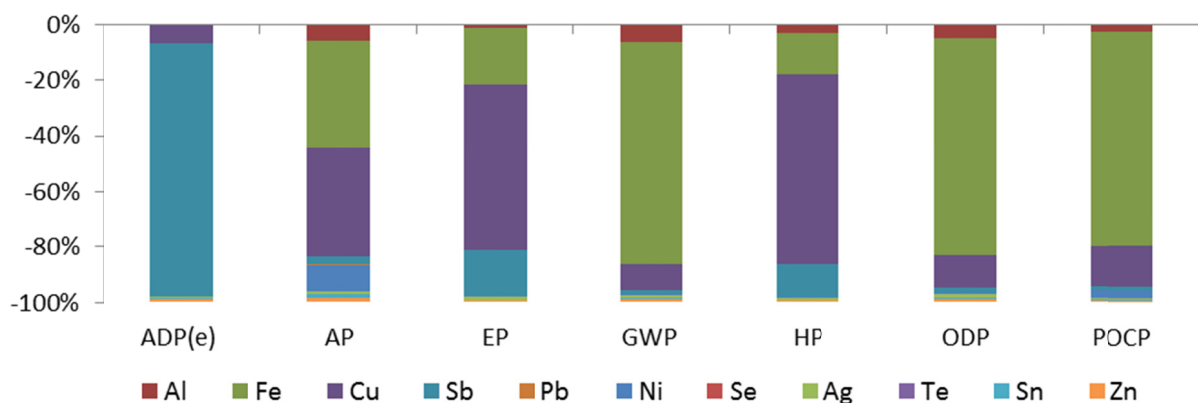


Abb. 10: Zusammensetzung der Gutschriften des Szenarios EAG-Asche (Aufbereitung Alpha- und Beta-Linie versus Deponierung):
 ADP = Abiotic Depletion Potential;
 AP = Versauerungspotenzial;
 EP = Eutrophierungspotenzial;
 GWP = Treibhauspotenzial
 HP = Humantoxizitätspotenzial
 ODP = Ozonabbau­potenzial
 POCP = Photochemisches Oxidationspotenzial

Für die „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ist vor allem die Art der ausgebrachten Metalle entscheidend. Die Akzeptanz eines Metalls und dessen Einsatz in Produkten hängen beispielsweise mit den Bedingungen beim Abbau der Erze zusammen. Da durch die Rückgewinnung von Metallen aus HMVA der Abbau von Primärmetallen teilweise substituiert werden kann, sind vor allem jene Metalle relevant, die bei sozialen Standards und Umweltstandards eine geringe gesellschaftliche Akzeptanz aufweisen. Den Ergebnissen zufolge ist dieser Umstand vor allem bei Blei, Eisen, Zinn und Aluminium gegeben.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Gegenüber den ursprünglichen Planungen (Finanzierungsplan vom 19.02.2012) ergaben sich letzten Endes nur geringe Verschiebungen. Der abschließende Finanzierungsplan ist vom 26.08.2015. Darin sind die Personalmittel leicht gesunken (195.904 € statt ursprünglich 199.404 €) stellen aber trotzdem noch mit Abstand den höchsten Kostenpunkt dar. Die Ausgaben für die studentische Hilfskraft (Position 822) wurden darin um 500 € auf 6.800 € erhöht.

Die frei werdenden Mittel wurden in die Position 843 (sonstige sächliche Verwaltungsausgaben) verschoben. Über 8.000 € wurden hier für neue Mahlbecher der Planetenkugelmühle benötigt. Zusammen mit den ebenfalls sehr kostspieligen, neuen Aufschlussgefäßen (insgesamt über 5000 €) für die Mikrowelle war so schon ein Großteil der letzten Endes 30.000 € in dieser Position gebunden. Hinzu kamen weitere Mittel für die Probenvorbereitung und Analyse (Gase, Chemikalien) z.B. für das Polywolfram für die Schwimm-Sink-Analyse.

Unter Berücksichtigung der unveränderten Mittel für Dienstreisen (9.000 €, Position 846) ergibt sich die ursprüngliche Gesamtzuweisung von 234.904 €.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Mit Schreiben vom 02.10.2014 an das PTJ hat TARTECH einen Antrag auf Mittelumwidmung der Zuwendungen gestellt. Mit Schreiben vom 14.11.2014 hat der PTJ dieser Umwidmung zugestimmt. Die Zuwendung für TARTECH hat sich demnach um 84.317 € auf final 1.195.850,00 € reduziert.

Im Wesentlichen fielen bei TARTECH Kosten für die Abarbeitung folgender Aufgaben an:

- Entwicklung einer Ausbaustufe für den Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger für die Alpha-Linie in Wiesbaden
- Entwicklung und Herstellung einer speziellen elektronischen Steuerung
- Entwicklung der Beta-Linie
- Gewinnung und Transport unterschiedlicher Chargen HMVA vom Projektpartner SRH bzw. deponierter HMVA von der BSR Deponie Schöneicher Plan
- chargenweise Behandlung der HMVA in der Alpha-Linie in Wiesbaden, sowie die Verwertung der Mineralik
- Behandeln/Prozessieren von HMVA und WEEE-Aschen in der Beta-Linie
- Gewinnung und Separation einer Trägersubstanz für chemisch gebundenes Kupfer in HMVA
- Bereitstellen von Proben finaler Erzeugnisse wie Raffinaden, Konzentrate aus Metallen und Mineralien für die Verbundpartner
- Transport von Teilmengen der Output-Stoffströme nach Hamburg sowie deren Behandlung und Analytik im technischen Labor

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Anhand des Verwendungsnachweises vom 11.04.2016 und dem Änderungsbescheid vom 02.07.2015 wird deutlich, dass über die gesamte Projektlaufzeit um ca. 20.224 € erhöhte Personalkosten (0837) entstanden waren. Diese lassen sich auf die verzögerte Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage zurückführen. Vor allem bei den Modellierungen für die Nachhaltigkeitsbewertung (AP 6) entstand aufgrund fehlender Realdaten ein höherer personeller Aufwand als ursprünglich geplant. UMSICHT beantragte deshalb zudem im Juni 2015 eine kostenneutrale Projektverlängerung um 9 Monate bis Ende März 2016 und eine Mittelumwidmung (Genehmigung des Projektträgers mit Änderungsbescheid 02.07.2015).

Die erhöhten Personalkosten wurden durch Einsparungen bei allen anderen Kostenarten (mit Ausnahme der sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (0850)) kompensiert. Insbesondere die Kosten für Fremdleistungen (0823) fielen um 10.640 € geringer aus, da viele der ursprünglich geplanten externen Materialanalysen in institutseigenen Laboren durchgeführt wurden. Auch die Materialkosten (0813) blieben deutlich (ca. 4.092 €) unter dem geplanten Wert, weil Verschleißerscheinungen ausblieben, die an den Verbrennungsapparaten aufgrund der hohen Halogenfrachten der Verbrennungsmaterialien erwartet worden waren. Kosten von ca. 1.390 € für externe Analysen wurden hingegen unter der o.g. Kostengruppe sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (0850) verbucht.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Die HZG war im Rahmen des Projektes von einer pauschalen Mittelkürzung seitens des BMBF betroffen. Letzten Endes fielen im Rahmen des Projektes Kosten in Höhe von 70.389,18 € an. Die Personalmittel stellen dabei mit 54.116,88 € die größte Position dar, während sich die restlichen Mittel in etwa gleichen Teilen auf Material- (5.310,26 €), Reise- (4.563,02 €) und Verwaltungskosten (6.399,02 €) verteilen.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Aufgrund der Entscheidung, die TARTECH-Anlage nicht im Raum Hamburg sondern in Wiesbaden zu errichten, war die Behandlung von 40.000 Mg HMVA aufgrund der Transportentfernungen nicht mehr sinnvoll. Die aufzubereitende Menge an Hamburger HMVA wurde auf ca. 4.400 Mg reduziert. Da die SRH nun nicht mehr die Fläche für die Aufstellung der Aufbereitungsanlage anmieten musste (27.000 € Plankosten) und auch die geplanten Maschinen (Radlader und Bagger, 97.860 € Plankosten) samt Kraftstoff (48.480 € Plankosten) und Bedienpersonal (76.255 € Plankosten) nicht mehr erforderlich waren, kam es zu Einsparungen in der Größenordnung von ca. 249.600 €. Dem entgegen stand jedoch, dass erwartete Einsparungen in der Größenordnung von ca. 180.000 € durch die Behandlung von 40.000 Mg HMVA in der TARTECH-Anlage nicht mehr realisiert werden konnten. Zudem sind durch das angeschobene Genehmigungsverfahren für die Anlagenerrichtung in Damsdorf Kosten in einer Größenordnung von 31.000 €

entstanden, denen letztendlich durch die Verlagerung des Anlagenstandortes keinerlei Nutzen mehr gegenüberstand.

Im TP E kam es daher insgesamt zu einer Reduzierung der unmittelbaren Vorhabenkosten in der Größenordnung von ca. 261.000 €. Die Förderquote wurde während der Antragsphase mit 40% angenommen und letztendlich auf 28,34% festgesetzt, um die erwartete Einsparung von 180.000 € abbilden zu können. Aufgrund der erheblichen Kostenreduzierung und der Tatsache, dass es nicht mehr zu Einsparungen bei der HMVA-Behandlung kam, wurde in 2013 die Förderquote rückwirkend wieder auf 40% hochgesetzt. Die anfänglich bewilligte Zuwendung (als Maximalbetrag) wurde trotzdem nur zu ca. 80% ausgeschöpft, ca. 34.000 € bereitgestellte Fördermittel wurden nicht abgerufen.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Die größten Posten der Abrechnung der BSR sind die Fremdleistung durch SGS Fresenius (5.539,00 €) für Probenahmen und Analysen und die Personalkosten (4.024,00 €), zum einen für die Kraftfahrer für den Ausbau, die Zerkleinerung und die Verladung der HMVA und zum anderen für die Projektleitung zur Versuchsbegleitung und Auswertung der Ergebnisse.

Aufgrund der dargestellten Veränderungen im Projektverlauf (vgl. Kap. I 3) wurde nur ein Bruchteil (ca. 4.700 €, bei einer Förderquote von 40%) der ursprünglich bewilligten Zuwendung von 92.948,00 € abgerufen.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Neben den in gleichen Teilen anfallenden Verbrauchsmitteln (1.909,67 €) und Kosten für die Analytik (2.100,00 €) fielen in erster Linie Personalkosten an. Durch ein fortlaufendes Projektcontrolling konnten geringfügige Optimierungen und somit monetäre Einsparungen erzielt werden. Günstige Preisentwicklungen am Markt haben zu weiteren Einsparungen geführt, so dass das vorgesehene Projektbudget (zuwendungsfähige Selbstkosten von 29.593 €) nicht vollständig abgerufen wurde.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Die größte Position stellten die Personalmittel mit 25.817,60 € für wissenschaftliche Mitarbeiter und 3.692,91 € für studentische Hilfskräfte dar. Darüber hinaus wurden 1.200 € für Aufträge an Dritte (externe Analysen) und 946,05€ für Material ausgegeben. Zusammen mit einer Projektpauschale von 6.331,31 € ergibt sich eine Gesamtfördersumme von 37.987,87 €. Die ursprüngliche Zuwendung (36.949,00 € + Projektpauschale 7.389,80 €) wurde somit nicht vollständig abgerufen.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Aufgrund des plötzlichen Todes des Projektleiters Prof. Dr. Fehr sind zusätzlich Reisen zu Tagungen und Konferenzen wie die DepoTech in Leoben oder die

Schlackenkonferenz in Berlin angefallen. Die Reisen (Kosten von 5.623,40 €) waren notwendig, da für Leoben bereits ein Vortrag angemeldet war. Die Schlackenkonferenz in Berlin diente dem Austausch mit Vertretern der Industrie und zur Diskussion und Repräsentation der eigenen Ergebnisse. Damit das Projekt erfolgreich zum Abschluss gebracht werden konnte, hat sich auch der zeitliche Aufwand erhöht. Daher wurden die sonstigen allgemeinen Verwaltungsausgaben (507,00 €) in Personalmittel (88.819,60 €) umgewandelt. Die Gesamtzuweisung belief sich entsprechend des Antrages sich auf 94.950 € zzgl. einer Projektpauschale von 18.990 €.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, bestehen die zugewiesenen Mittel zu über 80% aus Personalkosten. Die Aufgaben in diesem Teilprojekt waren sehr heterogen, so dass die teilweise Unterstützung durch eine studentische Hilfskraft für die Durchführung von Versuchen im Labor und im Technikum angemessen war. Auch waren die Herausforderungen, die an den Stelleninhaber gestellt wurden, ausgesprochen hoch. Gleich zu Beginn des Projektes gab es den Patentrechtsstreit mit Beteiligung der Öffentlichkeit (Interviews mit der Presse etc.). Hinzu kamen die internen Probleme durch die Verzögerungen bei dem Projektpartner TARTECH. Der Bau der Anlage war aber ein zentrales Arbeitspaket des Verbundprojektes. Die Berücksichtigung einer E14-Stelle, also eines vergleichsweise erfahrenen Wissenschaftlers, hat sich damit mehr als gerechtfertigt.

Die Kosten für die neuen Mahlbecher waren im Rahmen des Projektes nicht eingeplant, daher war die unter Kap. II 2 dargestellte Mittelverschiebung vonnöten. Ursprünglich wurde nicht davon ausgegangen, dass die Zerkleinerung, das Homogenisieren und das Herunterteilen auf die Mengen, die für die einzelnen Versuche gebraucht werden, so umfangreich werden. Auch diese Arbeiten sind z.T. Folgen des verzögerten Anlagenbaus. Alle anderen Kosten sind im Rahmen üblicher Ausgaben, die für die Durchführung von verfahrenstechnischen Versuchen im Labor und Technikum inkl. der Analysen anfallen. Gleiches gilt für die Mittel für Dienstreisen.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Die im Antrag beschriebenen Arbeiten waren notwendig und angemessen. Mit dem Hochgeschwindigkeits-Aufschluss, der im Zentrum des Vorhabens stand, konnte großtechnisch der Nachweis erbracht werden, dass mit derart innovativen Technologien / Verfahren enorme Rückgewinnungspotenziale an NE-Metallen und strategischen Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse erschlossen werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass es notwendig und richtig war, mit den innovativen Technologien große Mengen HMVA zu aufzubereiten, um erstmalig nachhaltige und belastbare Ergebnisse zu generieren.

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Die von UMSICHT geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Im Rahmen von AP 3 wurden umfangreiche Vorversuche und Verbrennungsversuche mit EAG-Behandlungsrückständen (ca. 1.730 kg) mit verschiedenen Verbrennungsanlagen im institutseigenen Technikum durchgeführt. Daraus wurden fast 300 kg Asche erzeugt und untersucht, die wiederum die notwendige Grundlage für den Behandlungsversuch in der TARTECH-Anlage darstellten.

Im AP 6 wurde das TARTECH-Verfahren aufgrund der Ergebnisse von Behandlungsversuchen mit verschiedenen HMVA-Chargen im Vergleich zu Anlagen nach dem Stand der Technik bewertet. Dazu mussten zunächst aus einem breit gefächerten Spektrum Daten über Anlagen zum Stand der Technik recherchiert werden. Des Weiteren wurden nach Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage über einen Fragebogen gezielt Kennzahlen zum allgemeinen Betrieb und insbesondere für die Behandlungsversuche erhoben. Die gesammelten Informationen flossen danach in die durch UMSICHT entwickelten Modelle zur gesamtheitlichen Beurteilung der Nachhaltigkeit unter Einbezug ökobilanzieller, ökonomischer und sozialer Aspekte ein.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Die Arbeiten waren notwendig, da es extrem wichtig ist, günstige Rohstoffe für die Metallhydride zu finden, wenn diese Technologie etabliert und für die Zwecke einer nachhaltigen Energieversorgung eingesetzt werden soll. Angemessen waren sie auch, da sie einen übersichtlichen Umfang hatten und trotzdem die gewünschten Informationen lieferten. Aufgrund der pauschalen Mittelkürzung konnten keine experimentellen Arbeiten im Bereich der Wasserstoffherstellung durch Hydrolyse von Aluminium durchgeführt werden. Die Literaturrecherche hat aber vielversprechende Resultate ergeben, die vermuten lassen, dass diese Art der Verwertung durchaus möglich und effizient sein könnte.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die geleisteten Arbeiten sind aus Sicht der SRH in jedem Fall angemessen und notwendig gewesen. Die TARTECH-Anlage hat sich in jeder Hinsicht als eine sehr innovative und leistungsfähige Anlage erwiesen. Es war daher sinnvoll, diese neue Technologie mit unterschiedlichen HMVA-Chargen aus verschiedenen Quellen zu beschicken und so die Einflüsse der jahreszeitlich variierenden Abfallzusammensetzung, aber auch die unterschiedlichen HMVA-Qualitäten in Abhängigkeit von der Anlagensteuerung während des Verbrennungsprozesses herauszuarbeiten. Durch die sehr späte Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage, insbesondere der Beta-Linie, wurden speziell die technischen Möglichkeiten der Beta-Linie noch nicht in ausreichender Tiefe herausgearbeitet. Der Bereich der Alpha-Linie hingegen konnte ausreichend erprobt und bewertet werden.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Die Arbeit der BSR bestand aus

- dem Ausbau der Asche aus dem Deponiekörper und der Zerkleinerung der verbackten größeren Brocken durch Überfahung mit der Raupe sowie die Verladung auf die vom Partner TARTECH bereitgestellten Transportfahrzeuge,
- die Begleitung des Behandlungsversuchs durch einen Ingenieur in Wiesbaden,
- die Beauftragung des Instituts SGS Fresenius mit Probenahmen und Untersuchungen des Eingangsmaterials, der abgeschiedenen Wertstofffraktionen sowie der verbliebenen mineralischen Fraktion,
- die Annahme und den Wiedereinbau der behandelten Asche, da ein Nachweis für die Verwertung vor Ort nicht erbracht werden konnte und
- der Teilnahme des Projektleiters an den Arbeitstreffen mit dem PTJ.

Alle Arbeiten waren unbedingt erforderlich um die dargestellten Ergebnisse zu erzielen.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Bislang liegen keine über Laborversuche hinausgehenden Daten zur biogenen selektiven Generierung metallischer Phasen vor. Dies ist jedoch eine Grundvoraussetzung für die Schaffung von kommerziell verwertbaren Wertschöpfungsketten. Die Arbeiten stützten sich auf entwickelte Techniken von SpiCon, die an die Bedingungen und Zielsetzungen des Vorhabens angepasst und optimiert werden mussten. Hierzu wurden speziell die organischen und anorganischen Komponenten und deren Wechselwirkungen aufeinander abgestimmt. Bei Arbeiten mit biologischen Stoffen mussten bestimmte Vorkehrungen zum Arbeitsschutz getroffen werden. Es mussten daher die entsprechenden technischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die Sicherheit und Arbeitsschutz gewährleisteten.

Aus diesen Gründen war die Zuwendung, die im Wesentlichen aus Personalmitteln bestand, im vollen Umfang gerechtfertigt.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Wie in Kap. II 2 dargestellt, bestehen die Ausgaben nahezu vollständig aus Personalmitteln. Die Durchführung der dargestellten Arbeiten ist sehr zeitintensiv, so dass diese Verteilung der Mittel notwendig und angemessen ist. Die notwendigen Materialien und Geräte konnten nahezu vollständig durch die Grundausstattung des Lehrstuhls zur Verfügung gestellt werden, so dass sich die weiteren Ausgaben (externe Analysen, Material) in einem für Laborversuche sehr geringem Umfang bewegten.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Die eingehende Charakterisierung der Pb- und Zn-führenden Phasen war für die Interpretation der Ergebnisse aus den hydrothermalen Experimenten von großer Wichtigkeit. Aufgrund der Feinheit des untersuchten Materials war es sehr zeitintensiv die röntgenographischen und mikrochemischen Analysen auszuwerten. Diese Ergebnisse und die hydrochemische Modellierung machten es möglich die

Vorgänge bei der hydrothermalen Extraktion von Metallen ansatzweise zu verstehen.

Die bei unterschiedlichen pH-Wert Bedingungen, Temperaturen und Versuchszeiten durchgeführten hydrothermalen Experimente hatten zum Ziel, die höchstmöglichen Eluationsraten von Pb und Zn aus dem Feinstanteil einer HMVA zu erreichen. Berücksichtigt wurde dabei, dass bei einer möglichen Übertragung der hydrothermalen Extraktion in den Industriemaßstab sowohl der anfallende Restdampf der MVA als auch die ebenfalls prozessbedingt anfallende Salzsäure eingesetzt werden könnten.

Zur Erhöhung des Feinanteils der untersuchten HMVA wurde die elektrodynamische Fragmentierung angewendet. Die Prozessparameter der Anlage des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen wurden auf die jeweilige HMVA angepasst, um die HMVA selektiv zu verkleinern.

Alle Arbeiten waren für die Zielstellung des TP J notwendig und die Mittelzuwendung daher angemessen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist in vollem Umfang gegeben. Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit der Arbeiten im Verbundvorhaben stellen sich zum Teil äußerst aussichtsreich dar und werden im Folgenden erläutert.

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Die BAM selbst verfolgt keine wirtschaftlichen Interessen. Dennoch waren die Untersuchungen stets so ausgerichtet, dass eine spätere Implementierung der Verfahren in der Praxis realistisch bleibt.

Die Ansätze zur Flotation der Feinfraktion von HMVA führten zu keinen verwertbaren Verfahrensansätzen. Das Patent war eine gute Grundlage, um ohne komplexe Chemikalienmixturen im gegebenen pH-Milieu arbeiten zu können. Die getesteten Erweiterungen (z.B. KEX als Sammler) blieben in diesem Rahmen, führten aber wie dargestellt zu keinen zufriedenstellenden Anreicherungen.

Anders stellt es sich bei den Versuchen zur Dichtesortierung mit dem Zentrifugalsortierer dar. Zwar handelte es sich hier um ein Gerät, dass eher in den Bereich Labormaßstab einzuordnen ist (Verarbeitung von etwa 200 mg Ausgangsmaterial), die wirkenden Kräfte lassen sich jedoch ohne weiteres auf größere Maßstäbe übertragen. Auch gibt es in anderen Wirtschaftszweigen bereits Einsatzgebiete für Zentrifugalsortierung im großtechnischen Maßstab. Ein

Upscaling, der im Rahmen des Projektes erlangten Erkenntnisse, könnte daher durchaus realistisch sein. Der Projektpartner TARTECH hat diesbezüglich schon Interesse an Folgeprojekten geäußert.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Durch den Einsatz der Beta-Linie konnte nachgewiesen werden, dass aus der HMVA-Fraktion < 2 mm noch etwa 1,60 %M NE-Metalle gewinnbar sind. Der Marktwert dieser NE-Metalle kann mit etwa 1.250,00 €/Mg NE-Metalle (LME-Kurse im Oktober 2015) beziffert werden. Damit beträgt der gewinnbare NE-Metall-Wert aus 1 Mg HMVA der Fraktion < 2 mm exakt 20,00 €, was ein enormes wirtschaftliches Potenzial darstellt.

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Ein eigens für das Projekt durch UMSICHT erzeugter neuer Stoffstrom ist Asche aus der Verbrennung von Resten aus der Vorbehandlung von EAG. Im Rahmen der dazu in AP 3 ausgeführten Verbrennungsversuche mit Monochargen an EAG-Behandlungsrückständen bzw. Mischungen mit Holzpellets (u.a. zur Verbesserung des Ausbrandverhaltens und der Emissionswerte) konnten wertvolle Erfahrungen zur thermischen Behandlung (geeignete Feuerungstechnik, Verbrennungsparameter, etc.) gesammelt werden. Mit dem Behandlungsversuch der EAG-Asche in der TARTECH-Anlage wurde zudem festgestellt, dass erzeugte Fraktionen reichhaltig an z.B. Kupfer und Aluminium sind und damit wirtschaftlich interessante Stoffströme darstellen.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Die Ergebnisse von HZG werden ausschließlich wissenschaftlich ausgewertet. Sofern Energieunternehmen von der Möglichkeit erfahren, durch extrem günstige Rohmaterialien wie HMVA erschwingliche Wasserstoffspeicher zu bauen, sind die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten gut.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Erste Erkenntnisse zeigen, dass die Nach- oder Umrüstung der in Hamburg vorhandenen HMVA-Aufbereitungstechnologie mit einer Technologie entsprechend der TARTECH-Technologie zu einer Steigerung der NE-Abtrennung von mehr als 0,5 M% führen wird. Nach Berechnungen von TARTECH, aber auch nach Einschätzungen anderer, leistungsfähiger HMVA-Aufbereiter ist daher davon auszugehen, dass so eine Anlagenoptimierung wirtschaftlich ist. Die SRH wird dieses noch in 2016 mit den Hamburger Rahmenbedingungen überprüfen und sich im Falle der Bestätigung dieser Einschätzungen voraussichtlich zu einer Nach- oder Umrüstung der vorhandenen HMVA-Aufbereitungsanlagen entscheiden.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Die Ergebnisse der Arbeiten der BSR mit der HMVA von der Deponie Schöneicher Plan stellen klar, dass die Behandlung der bereits abgelagerten HMVA vergleichs-

weise uninteressant ist. Stattdessen sollten die Anstrengungen zur Separierung der Metalle aus der frischen HMVA erhöht werden.

Da durch die Verzögerungen im r³-Projektlauf ein erheblicher Teil der HMVA bereits verbaut oder überbaut wurde, haben die Ergebnisse keine Relevanz in Bezug auf eine etwaige Nachbehandlung bereits abgelagerten HMVA der BSR. Als Schlussfolgerung daraus, dass die Abscheidung aus der bereits über Jahre gelagerten HMVA keine Reinheiten in der gewohnten Qualität erzeugt, hat die BSR die Anstrengungen erhöht, die Abscheidung aus der frischen HMVA weiter zu verbessern. Dies geschah bereits durch weiteren Ausbau der bestehenden Metallabscheidungsanlage und soll zukünftig durch weitere Veränderungen fortgesetzt werden. Dank dieser Erkenntnis können die personellen und finanziellen Kapazitäten zukünftig zielgerichtet eingesetzt werden.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Das entwickelte Verfahren stellt eine neue Option für die Rückgewinnung von Rohstoffen aus unterschiedlichen Stoffströmen wie z.B. metallhaltigen Aschen, Stäuben und Schlacken dar. Aufgrund funktionaler Vorteile gegenüber bisher eingesetzter Technologien könnte durch enzymatische Verfahren die Effizienz bei der Rohstoffrückgewinnung deutlich erhöht werden. Für SpiCon eröffnet sich durch diesen innovativen Ansatz ein Dienstleistungs- und Beratungssektor, aus dem sich gegebenenfalls Wettbewerbsvorteile und eine erhöhte Konkurrenzfähigkeit am Markt ergeben könnten.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Die UDE verfolgt keine wirtschaftlichen Interessen. Eine genaue Kenntnis des Metallinhaltes von metallurgischen Schlacken ist jedoch für KMU der Eisen- und Stahlindustrie interessant. Durch diese Kenntnis kann grundsätzlich abgeschätzt werden, ob sich eine Schlackeaufbereitung lohnt und sie dient gleichzeitig als valide Verhandlungsbasis mit Schlackeaufbereitern.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung dieses Metallinhaltes ist jedoch zu berücksichtigen, dass während der Projektlaufzeit die seit 2011 negative Preisentwicklung vieler, insbesondere metallischer, Rohstoffe anhielt.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Eine Übertragung der Hydrothermalexperimente vom Labormaßstab auf Pilot- und Industriemaßstab ist durchaus denkbar. Für industrielle Prozesse sind sowohl kurze Verweilzeiten als auch Energieeffizienz von großer Bedeutung. So könnte zur Erhitzung der Autoklaven die Restdampfwärme der MVA genutzt werden. Einen großen Einfluss auf die Eluierbarkeit von Blei und Zink hat der eingestellte pH-Wert. Bei niedrigen pH-Werten könnte es zu Temperatur-Säure-Korrosion des Autoklavenmaterials (in der Industrie wird meist V5A-Stahl eingesetzt) kommen. Ein pH-Wert von 3 würde bei einem korrosionsbeständigen V5A-Stahl noch keine Oberflächenkorrosion verursachen. Welches Autoklavenmaterial für den industriellen Maßstab am besten geeignet wäre, müsste noch getestet werden.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die exergetischen Betrachtungen zu nennen (vgl. erfolgte Veröffentlichungen). Um Aufwand und Nutzen jeglicher zusätzlicher Aufbereitungsschritte realistisch abschätzen zu können, sind diese neuen Ansätze äußerst interessant. Auch in diesem Zusammenhang wurde seitens TARTECH der Wunsch nach einer Fortführung der wissenschaftlichen Zusammenarbeit bereits angedeutet. Die wissenschaftlichen Ansätze, die bei der BAM verfolgt werden, haben in der Regel einen hohen Anwendungscharakter. Dass auch ein solches Thema das Interesse der Wirtschaft weckt, ist als sehr positiv zu bewerten.

Der Ansatz der Dichtesortierung wird in einem Folgeprojekt weiterverfolgt (vgl. Kap. 4.3). Wie sich bei den Untersuchungen herausstellte korreliert der Transfer von Kupfer in das Konzentrat ausgesprochen gut mit dem von Blei. Blei ist einer der Gründe warum die Feinfraktion von HMVA in der vorliegenden Form nicht für eine Verwertung in der Zementklinkerproduktion in Frage kommt. Ein weiteres Problem ist z.B. Cadmium. In dem Folgeprojekt steht die Verwertung der mineralischen Fraktion durch Entfernung solcher Störelemente im Vordergrund.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten können als sehr gut bewertet werden. Im Rahmen des Vorhabens konnte großtechnisch der Nachweis erbracht werden, dass mit derartigen innovativen Technologien / Verfahren zur Aufbereitung von Rückständen thermischer Prozesse substantielle ökologische wie auch ökonomische Vorteile erzielt werden können.

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Da sich UMSICHT aktuell aus kommerzieller Sicht nicht mit der Aufbereitung von Aschen/Schlacken beschäftigt, dagegen aber weiterhin mit der thermischen Behandlung von EAG zur Rückgewinnung von Technologiemetallen, könnte die Kooperationen mit Partnern, die innovative und leistungsstarke Verfahren wie z.B. die TARTECH-Anlage betreiben, zukünftig eine interessante Verfahrenskopplung darstellen.

Das zur Beurteilung der Nachhaltigkeit des TARTECH-Verfahrens im AP 6 entwickelte gesamtheitliche Bewertungsmodell schließt soziale, ökonomische (wirtschaftliche) und ökobilanzielle Aspekte ein. Die auf diesen 3 Säulen basierende umfassende Prozess- oder Verfahrensbewertung kann durch UMSICHT zukünftig adaptiert und weiterentwickelt werden.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Die wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten sind hervorragend, da die guten Ergebnisse dieser Untersuchungen schon zu einer ersten substantiellen

Publikation geführt haben (vgl. erfolgte Veröffentlichungen). Auch werden als Folge des Projektes Teilfraktionen aus HMVA als ernsthafte Alternativen für die Herstellung von Wasserstoffspeichern wahrgenommen.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die SRH ist ein eher wirtschaftlich arbeitendes Unternehmen und daher nicht auf den Zugewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen ausgerichtet. Sie hat jedoch eine enge Kooperation mit der TUHH und unterstützt daher die wissenschaftlichen Arbeiten an abfalltechnischen Fragestellungen. Dabei hat die SRH das Interesse, durch neue Erkenntnisse mehr für Umweltschutz und Nachhaltigkeit tun zu können. Geeignete und wirtschaftliche Technologien werden von der SRH gerne in den Praxisbetrieb übernommen.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Seitens der BSR wurden keine wissenschaftlichen Interessen verfolgt.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Die bislang entwickelte Lösung stellt eine wichtige Grundlage für weitere F&E-Aktivitäten auf dem Gebiet der nachhaltigen Produktion von Fein- bzw. Spezialchemikalien dar. Schnittstellen gibt es weiterhin zu den Arbeitsgebieten des Biofouling und der Biokorrosion zur Rückgewinnung von Metallen aus Bergbauhalden und Elektronikschrott.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Die Erfahrungen mit den untersuchten Schlacken und den dabei angewendeten Methoden sind für die UDE bei der Entwicklung und Bearbeitung weiterer Projekte sehr hilfreich. Insbesondere die Erkenntnisse über die magnetischen Phasen im mineralischen Teil der Schlacken unterstützten die Antragsstellung eines Projektes im Rahmen der Fördermaßnahme r⁴ sowie eines Projektantrages im Rahmen der BMWi-Fördermaßnahme IGF (Projektträger AiF) zur Aufbereitung und Verwertung von HMVA für die Zementindustrie.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Die Ergebnisse des Projektes tragen dazu bei, das Rückgewinnungspotenzial von Blei und Zink aus den HMVA zu verbessern. Nach einer Studie des IW von 2008 reicht die Menge an Blei und Zink, die mit verfügbaren Technologien wirtschaftlich abbaubar sind noch ca. 12 Jahre. Dies würde im schlimmsten Fall bedeuten, dass ab 2027 kein Blei und Zink mehr verfügbar wäre. Zink-Gehalte von bis zu 10000 ppm in der Feinstfraktion von HMVA könnten somit einen Beitrag zur Ressourcensicherheit leisten. Die Schwermetallgehalte in den verbleibenden festen Rückständen nach der hydrothermalen Extraktion sind geringer, so dass eine qualitative Aufwertung des Materials gegeben ist. Durch die hydrothermale Behandlung kann Blei und Zink zurückgewonnen werden, das in sehr fein verteilter Form vorliegt und mit mechanischen Aufbereitungstechniken nicht getrennt wer-

den kann. Für die Antragstellung zur Fördermaßnahme r⁴ waren die Ergebnisse zur hydrothermalen Extraktion von Blei und Zink aus dem Feinstanteil von HMVA dienlich.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Die sich abzeichnenden Veränderungen rechtlicher Vorgaben lassen erwarten, dass sich der Absatz von HMVA in die konventionellen Wege verändern wird. Bereits heutzutage ist es problematisch, die aus der HMVA generierten mineralischen Fraktionen am Markt zu platzieren, sie werden wieder zunehmend deponiert. Physikalische und chemische Verfahren und Verfahrenskombinationen zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus HMVA sind daher weiterzuentwickeln, um den künftigen Ansprüchen gerecht zu werden. Aktuelle Marktentwicklungen fokussieren sich allerdings hauptsächlich auf die Erhöhung der NE-Metallausbeute, in deren Folge sich der bisher nicht verwertbare, mineralische Feinanteil erhöht. Neben der Rohstoffverwertung der gröberen mineralischen Fraktionen (z.B. für den Straßenbau oder Beton und Asphaltindustrie) rückt damit auch die mineralische Feinfraktion (z.B. für die Zementklinkerproduktion) in den Vordergrund. In einem ebenfalls vom BMBF geförderten Folgeprojekt sind zukünftige Rohstoffabnehmer anhand von Eignungsprüfungen direkt beteiligt. Die Trocken- und Nassaufbereitung mineralischer Rückstände bis hin zum großtechnischen Einsatz in Bestandsanlagen berücksichtigt dabei die gesamte Breite der mineralischen Fraktionen. Nicht verwertbare Anteile sollen minimiert und definierte mineralische Rohstoffe zur Substitution von Primärrohstoffen bereitgestellt werden. Die BAM beschäftigt sich im Rahmen dieses Projektes weiterhin mit Feinfraktion von HMVA. Allerdings steht anders als im Projekt ATR hier die Verbesserung der Eigenschaften der mineralischen Fraktion im Vordergrund.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Neben der Gewinnung von Metallen und Oxiden ist für TARTECH auch die Verwertung der Restmineralik aus den Rückständen thermischer Prozesse von großer Bedeutung. Insbesondere die Fraktion < 0,71 mm dürfte für eine derartige Verwertung von Interesse sein. Die Fraktion 0,71–1 mm dürfte in zukünftigen Forschungsvorhaben ein interessanter Stoff für die Aufkonzentration von feinsten Metall-Partikeln und ggf. sogar von Seltenen Erden sein.

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Die ATR-Projektpartner haben während der Projektbearbeitung eine intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit aufgebaut. UMSICHT brachte dabei sein Know-how auf dem Gebiet der umfassenden Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für technologisch komplizierte Verfahren im Bereich der Kreislaufwirtschaft ein. Dabei wurde ein neues und maßgeschneidertes Modell zur Bewertung

komplexer Verfahren zur Aschen- und Schlackenbehandlung entwickelt (AP 6) und im Projektkonsortium und darüber hinaus bekannt gemacht. Damit bieten sich UMSICHT zukünftig neue Kooperationsmöglichkeiten in ähnlichen oder anderen Bereichen der Abfall- und Recyclingwirtschaft (Kreislaufwirtschaft). Da die Fraunhofer-Gesellschaft eine Internationalisierung ihrer Geschäftstätigkeiten anstrebt und im Bereich der Kreislaufwirtschaft im europäischen wie auch weltweiten Rahmen im Vergleich zu Deutschland oftmals ein großer Nachholbedarf besteht, kann UMSICHT das im Projekt gesammelte Know-how zur Etablierung angepasster, bestgeeignetster Technologie gewinnbringend einsetzen.

Zudem wurden umfangreiche Erkenntnisse zur thermischen Behandlung von Resten aus der EAG-Aufbereitung gesammelt (AP 3), die zukünftig zur Weiterentwicklung von möglichen Projektansätzen zur Verwertung dieses oder ähnlicher, wertvoller Stoffströme zusammen mit spezialisierten Wirtschaftspartnern genutzt werden können.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Wie oben erwähnt, sind beim HZG schon Arbeiten angelaufen, um andere, sich im Abfall befindliche Materialien für die Herstellung von Wasserstoffspeichern zu nutzen. Darüber hinaus ist es geplant, außerhalb von ATR die Untersuchungen zur Verwertbarkeit der Aluminiumfraktionen aus HMVA für die Herstellung von Wasserstoff zu Ende zu bringen und zu publizieren. Ein weiteres Projekt in dieser Richtung ist nicht ausgeschlossen.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Wie bereits im TP A (BAM) beschrieben, sieht auch die SRH Risiken in der zukünftigen Vermarktung der HMVA als Gesamtgemisch in der Funktion eines Ersatzbaustoffs. Obwohl es nicht Arbeitsschwerpunkt im ATR-Projekt war, hat sich gezeigt, dass die Stofftrennung in unterschiedliche Korngrößenbereiche viele Optionen öffnet. Aus den weitestgehend metallentfrachteten, mineralischen Reststoffen könnten gezielt definierte Baustoffkomponenten z.B. Zuschlagstoffe für die Beton-, Asphalt- und Zementindustrie erzeugt werden. Im o.g. neuen Projekt (OPTIMIN) werden sich SRH und BAM zusammen mit der TUHH und anderen Partnern dieser Fragestellung zuwenden. So eröffnet die umfassende Stoffstromtrennung der TARTECH-Technologie zur Optimierung der NE-Metallabtrennung den Weg in eine nachgeschaltete Verbesserung der Verwertung der mineralischen Reststoffe aus der HMVA-Aufbereitung.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Nach Abschluss der anstehenden weiteren Verbesserungen der Metallabscheidung können die erzielten Ergebnisse (Abscheideraten und Qualitäten) mit den Ergebnissen des Projektes verglichen werden, um so den Erfolg und weitere Potenziale besser einordnen zu können.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Das im Teilprojekt G entwickelte Verfahren kann unabhängig von weiteren Verfahren angewendet werden. Es ist jedoch auch jederzeit, vor allem durch den Fokus auf die bisher weitestgehend unbeachtete Feinkornfraktion, eine komplementäre Anbindung an andere Verfahren und Verfahrenskombinationen möglich. Für die Entwicklung zu einem marktreifen Verfahren ist eine Weiterentwicklung der im ATR-Projekt erzielten Ansätze jedoch unabdingbar. Die Anschlussfähigkeit für eine nächste Phase ist aber im vollen Umfang gegeben.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Wie bereits dargestellt kann die UDE die in diesem Vorhaben gewonnenen Erfahrungen nutzen, um weitere Forschungsprojekte erfolgreich zu bearbeiten. Zwei bereits beantragte Projekte beschäftigen sich mit der zukünftigen Verwertung von oxidischen Reststoffen aus Hochtemperaturprozessen (Schmelzaggregate, bzw. HMVA). Diese Projekte betrachten sowohl das Recycling wirtschaftsstrategischer Rohstoffe als auch die Verwertung der mineralischen Fraktion vor dem Hintergrund der zu erwartenden Änderungen der rechtlichen Vorgaben bezüglich des Absatzes von HMVA auf bisherigem Weg.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Da während der Müllverbrennung neben der HMVA auch Filterstäube und Rauchgasreinigungsrückstände anfallen, die stark mit Schwermetallen wie Blei und Zink belastet sind, können die Erkenntnisse des Projektes auf diese Rückstände ausgedehnt werden. Durch die hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus den Filterstäuben könnte eine kostenintensive Verbringung der Filterstäube unter Tage vermieden werden. Die verbleibenden festen Rückstände würden für weitere Anwendungen z.B. in der Zementindustrie zur Verfügung stehen.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Wie bereits im Kap. I 4 dargestellt wurden an der TU-Clausthal Versuche zur Flotation von HMVA durchgeführt. Ergebnisse dazu wurden bisher nicht veröffentlicht und können somit nicht bewertet werden. Nach Kenntnisstand des Verfassers befasst sich kein weiteres Institut mit der Dichtesortierung von Feinkornfraktionen aus HMVA.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus HMVA wurden in der Projektlaufzeit bei den Aufbereitern von HMVA große Anstrengungen unternommen. So wurden z. B. immer mehr Sieblinien mit kleineren Kornbandbreiten eingesetzt, um die Effizienz von Sortierverfahren, vor allem die der Wirbelstromscheidung, zu steigern. Um die Metalle diesen und anderen Prozessschritten zugänglich zu machen, wurden die Aufbereitungsverfahren auf unterschiedliche Art und

Weise umgestellt. Vielfach sollen wie bei dem Projektpartner TARTECH Metalle mittels mechanischer Beanspruchung von den mineralischen Anhaftungen befreit werden. Das gleiche Ziel wird z.B. mittels elektrodynamischer Fragmentierung verfolgt [22], das sich aber noch im Stadium der Entwicklung befindet. Ein anderer Weg ist die möglichst schnelle Aufbereitung der Aschen nach der Verbrennung, um der Bildung von mineralischen Anhaftungen und der Verfestigung der HMVA zuvorzukommen. Das Ergebnis dieser Anstrengungen spiegelt sich in einer aktuellen Studie [2] wieder.

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Zur thermischen Behandlung von EAG-Abfällen bzw. Rückständen aus der Aufbereitung (AP 3) an anderen Stellen liegen aktuell keine gesicherten Erkenntnisse vor. Es ist lediglich aus Expertengesprächen bekannt, dass z.B. Shredder-Rückstände, die bei der EAG-Aufbereitung als nicht weiter stofflich und rohstofflich verwertbare Fraktionen anfallen, thermisch in MVA mitbehandelt werden, jedoch nicht in Form von Monochargen.

Die Nachhaltigkeitsbewertung von neuartigen Verfahren und Technologien kann im Allgemeinen anhand von ökobilanziellen, ökonomischen und sozialen Kenndaten weiterentwickelt werden. Dazu werden an anderen Stellen unter Einbezug individueller Randbedingungen jeweils neue prozess- oder verfahrensspezifische Modelle entwickelt. Vergleichbare Arbeiten zur Nachhaltigkeitsbewertung innovativer Asche- oder Schlackeaufbereitungssysteme sind den Autoren hingegen nicht bekannt.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

Es sind keine anderen Stellen bekannt, bei denen ähnliche Untersuchungen zum Recycling feinsten Aluminiumfraktionen aus HMVA durchgeführt werden.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Aktuelle Ergebnisse aus einer norddeutschen MVA über eine Zeitreihe von 20 Jahren zeigen, dass die Gehalte an Fe-Schrott von 12 M% in 1997 über die Jahre kontinuierlich auf 3 M% in 2014 zurückgegangen sind. Durch technische Nachrüstung konnten im gleichen Zeitraum die Rückgewinnungsraten bei NE-Metallen von 0,3 M% nach erster Installation von Wirbelschichtabscheidern auf 1,2 M% gesteigert werden. In einer anderen norddeutschen Anlage konnte durch eine weitergehende Aufbereitung die NE-Rückgewinnung auf 1,3 M% - bezogen auf die frische HMVA - gesteigert werden. [23]

Innerhalb der Projektzeit fand eine Fortentwicklung des Standes der Technik und der bestverfügbaren Technik statt. Laut einer Befragung deutscher Aufbereiter von HMVA aus dem Jahr 2014 werden nach dem Stand der Technik derzeit im Durchschnitt 7,7 M% Fe-Metalle mit 5 Magnetscheidern und 1,3 M% NE-Metalle mit 5 Wirbelstromscheidern gewonnen [2].

Innerhalb der Projektzeit fand insbesondere im Bereich der NE-Rückgewinnung eine erhebliche Technisierung statt. Führten im Jahr 2009 lediglich 50-85 % der Anlagen eine NE-Separation durch [24], findet dieses heute in allen Anlagen mit mindestens 2 Wirbelstromscheidern statt. Folglich steigerte sich die Wertstoffausbringung für NE-Metalle von 29 % in 2010 [24] auf 56 % in 2014 [2]. Zudem wurde auch die Fe-Separation verbessert so dass auch Korngrößen bis 2 mm berücksichtigt werden. Die durchschnittliche Alterungszeit vor der Aufbereitung liegt heute nicht mehr bei 12 Wochen, sondern bei etwa 4 Wochen [2].

Neben der deutlichen Fortentwicklung des Standes der Technik kam es auch im Bereich der innovativen Verfahren (nasse Aufbereitung, Sensortechnik, etc.) und der bestverfügbaren Technik bei der konventionellen Aufbereitungstechnik zu erheblichen Fortschritten [1]. Durch die geschickte Kombination klassischer Aufbereitungstechniken kann dabei oft mehr erreicht werden, als durch eine zusätzliche Technisierung.

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

Projekte oder Veröffentlichungen, die sich gezielt mit der Aufbereitung bereits abgelagerter HMVA beschäftigen, sind nicht bekannt.

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

Erst im Projektverlauf wurde bekannt, dass an einigen anderen Instituten Verfahren zur Biolaugung erforscht werden. Substantielle Veröffentlichungen sind aber bisher nicht bekannt.

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Nach aktuellem Kenntnisstand sind keine Untersuchungen zur Ermittlung des Metallgehaltes metallurgischer Schlacken, insbesondere über optische Verfahren, bekannt.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Projekte, Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen, die sich mit der Rückgewinnung von Blei und Zink aus dem Feinstanteil von HMVA beschäftigen, sind nicht bekannt.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Veröffentlichungen

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Simon, F.G. und Adam, C. (2012), *Ressourcen aus Abfall*. Chemie Ingenieur Technik 84(7), 999-1004

Krüger, O. und Simon, F.G. (2012), *Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, in: Stegmann, R., Rettenberger, G., Kuchta, K., Fricke, K. und Heyer, K.U. (Hrsg.), *Deponietechnik 2012*, Hamburger Berichte Bd. 37, 177-186, Verlag Abfall aktuell

Simon, F.G. und Holm O. (2013), *Recovery of Metals from Waste, an Example for the Resource Cycle*, World Resources Forum, Shaping the Future of Natural Resources, Davos(CH), EMPA, Proceedings Paper.

Simon, F.G. und O. Holm (2013), *Rostasche – Durch Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse kann die Metallausbeute erhöht werden*, ReSource 26(3): 31-37.

Simon, F. G. and O. Holm (2013), *Aufschluss, Trennung, Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozess - Verdopplung der Metallausbeute aus MVA-Rostasche, Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie – Berliner Schlackenkonferenz – K. J. Thomé-Kozmiensky*. Neuruppin, TK-Verlag, 297-310.

Holm, O. (2014), *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, SUM 2014 - 2nd Symposium on Urban Mining, Bergamo, Proceedings Paper.

Simon, F.G. und O. Holm (2015), *Recovery of metals from waste, an example for the resource cycle*, Natural resources, Sustainable targets, technologies, lifestyles and governance. C. Ludwig, C. Matasci and X. Edelmann. Villigen PSI, CH, Paul Scherrer Institut, 289-293.

Holm, O. (2015), *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*, SARDINIA 2015 - 15th International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Proceedings Paper.

Simon, F.-G. and Holm, O. (2016). *Exergetic considerations on the recovery of metals from waste*. International Journal of Exergy 19(3): 352-363.

Simon, F.-G. and Holm, O. (2016). *Reduction of natural resource use by improving resource efficiency*. Universal Journal of Materials Science 4(3): 54-59.

Holm, O. and Simon F.-G. (2017). *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*. Waste Management 59: 229-236.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

keine

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

keine

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

N. Bergemann, C. Pistidda, C. Milanese, A. Girella, B.R.S. Hansen, J. Wurr, J.M. Bellosta von Colbe, J. Jepsen, T.R. Jensen, A. Marini, T. Klassen, M. Dornheim (2014), *NaAlH₄ production from waste aluminum by reactive ball milling*, Int. J. Hydrogen Energy, 39(18), 9877-9882.

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Kuchta, K. (2012), *Rückgewinnung von Metallen aus Schlackedeponien und potentielle Verwertungswege*, Deponietechnik 2012, R. Stegmann; G. Rettenberger; K. Fricke, K. Kuchta, K.-U. Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.

Kücüker, M.; Westphal, L. und K. Kuchta, (2013), *Bottom Ash from Municipal solid waste incineration plants in Hamburg*, IWWG International Waste Working Group (Hg.): Sardinia_2013. Cossu, Pinjing He, Kjeldsen, Matsufuji, Reinhart und Stegmann. 14th International Waste Management and Landfill Symposium, 30.9.2013 - 4.10.2013, S. 372

Kuchta, K. (2014), *Schlackeaufbereitung zur Separierung von Metallen und Seltenen Erden*, In: Deponietechnik 2014. R. Stegmann; G. Rettenberger; R. Siechau; K. Fricke; K. Kuchta; K.-U. Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.

Enzner, V. und K. Kuchta, (2014), *Metallrückgewinnung aus Hausmüllverbrennungsschlacken*, 3. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Nürnberg 5. und 6. Februar 2014, S.299-306. (Beitrag im Tagungsband und Posterpräsentation)

Enzner, V.; Ritzkowski, M. und K. Kuchta, (2014), *Metals in bottom ash landfills – resource potential and recovery options, Crete 2014*. 4th International Conference – Industrial and Hazardous Waste Management. September 2nd – 5th 2014. Chania/ Crete/ Greece. (Beitrag im Tagungsband und Präsentation)

Lübben, S. (2015), *Verwertung von Abfallverbrennungsgasche als Zuschlagstoff in der Beton-, Asphalt- und Zementindustrie, Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen – Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2*, Berliner Schlackenkonferenz – K. J. Thomé-Kozmiensky. Neuruppin, TK-Verlag, 321-335

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

keine

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

keine

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Deike, R., Ebert, D., Schubert, D., Ulum, R., Warnecke, R. und M. Vogell (2013), *Reste in Schlacke und Asche – Beim Recycling von Metallen aus den Rückständen der Abfallverbrennung kommt es auf die Reinheit der Fraktionen an*. ReSource 26(3): 24-30.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Günther, A., Fehr, K.T. & John, M. (2014), *Hydrothermale Extraktion von MVA Rückständen*, DepoTech Tagungsband 2014.

Günther, A., & Fehr, K.T. (2014), *Hydrothermal Solution of Heavy Metals from MSWI Fly Ashes*, Abstract ISHA 2014.

Günther, A., Fehr, K.T. & Hochleitner, R. (2014), *Hydrothermal Solution of Heavy Metals from MSWI Residues*. Tagungsband DMG Jena 2014

Günther, A. Fehr, K.T. & John, M. (2014), *Hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus MVA-Rückständen*, Urban Mining Congress 2014.

Günther, A., Beck, A. & Fehr, K.T. (2013), *Hydrothermal Recovery of Zn and Pb from MSWI Bottom Ashes and APC Residues*, Abstract ISHA 2013.

Vorträge

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

Simon, F.G. (2011), Rohstoffpotenzial von MVA-Schlackedeponien. Deponietage, DWA, Neuss, Präsentation.

Simon, F.G. (2012), Aufbereitung von Verbrennungsschlacken. 691. Dechema Kolloquium Siedlungsabfall als Rohstoffquelle für Metalle, Frankfurt/M. (DLF-Radio Interview Edles aus Asche)

Simon, F.G. und Holm O. (2013), *Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren*. ProcessNet - Jahrestreffen der Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Frankfurt(Main), Präsentation und Poster.

Holm, O. (2013), *ATR - Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, KickOff r3 - Strategische Metalle und Mineralien, Freiberg, Präsentation und Poster.

Holm, O. (2014), *Rückgewinnung von Kupfer aus der Feinfraktion von HMVA mittels Dichtesortierung*, ProcessNet - Jahrestreffen der Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Karlsruhe, Präsentation.

Simon, F.G. und O. Holm (2014), *Recovery of non-ferrous metals from MSW IBA by means of mechanical processes*, International VDI Conference Metals and Minerals Recovery from IBA, Düsseldorf, VDI Wissenforum.

Holm, O. (2014), *Gewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse - ATR*, Urban Mining Kongress und Statusseminar r3 - Strategische Metalle und Mineralien, Essen, Präsentation.

Holm, O. (2014), *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, SUM 2014 - 2nd Symposium on Urban Mining, Bergamo, Präsentation.

Holm, O. C. Gronholz und S. Lübben (2015), *ATR - Gewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, Die Zukunftsstadt als Rohstoffquelle - Urban Mining und r3-Abschlusskonferenz, Bonn, Präsentation und Poster.

Holm, O. (2015), *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*, SARDINIA 2015 - 15th International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Präsentation.

Holm, O. (2016), *Innovative treatment trains of IBA from MSW with special focus on the fate and behavior of the fine fraction < 2 mm*. 2nd International VDI Conference 2016 - Metals and Minerals Recovery from IBA, Düsseldorf, 12.10.2016, Präsentation.

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

keine

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

Matyschik, J. (2012): *Ökologischer Nutzen durch verbesserte Rückgewinnung von NE-Metallen aus MVA-Schlacken*. 8. Ökobilanzwerkstatt, Fraunhofer IBP, Stuttgart, Präsentation.

Matyschik, J. (2013): *Optimierte Metallrückgewinnung aus mineralischen Schlacken als Beispiel für eine Quantifizierung von Ressourceneffizienz*. 9. Ökobilanzwerkstatt, TU Graz, Österreich, Präsentation.

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

keine

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Lübben, S. (2013), *Entwicklung des Schlackerecyclings am Beispiel der MVA*, Hamburg T.R.E.N.D, Hamburg, Präsentation

Lübben, S. (2013), *Wertstoffe aus der Müllverbrennungsschlacke*, 22. Kölner Abfalltage, Köln, Präsentation

Lübben, S. (2014), *Wertstoffe aus der MVA-Schlacke gestern – heute – morgen*, Workshop Asche – Schlacken – Stäube vom Wirtschaftsförderungszentrum Ruhr für Entsorgung- und Verwertungstechnik e.V., Präsentation

Enzner, V. und K. Kuchta, (2014), *Nicht-Eisen-Metallgehalte in Abfallverbrennungsschlacken*, DGAW 4. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 27. und 28. März 2014, S.113-117

Lübben, S. (2015), *Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals*, ISWA Beacon Conference Resources from Waste: Sorting and Treatment Techniques, Hamburg, Präsentation

Lübben, S. (2015), *Forschungsaktivitäten der Stadtreinigung Hamburg auf dem Gebiet der Müllverbrennungsschlacken*, Vortrag im Rahmen der Vorlesungsreihe TUHH goes sustainable, TU Hamburg-Harburg, Präsentation

Lübben, S. (2016), *Schlacke aus der Müllverbrennung – Mehr drin als man denkt!*, Vortrag im Rahmen der Vorlesung Umweltpolitik und Nachhaltigkeit an der TU Hamburg-Harburg, Präsentation

Lübben, S. (2016), *Schlacke als Quelle für mineralische Baustoffe*, Hamburg T.R.E.N.D, Hamburg, Präsentation

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

keine

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

keine

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

Deike, R., Ebert, D., Schubert, D., Ulum, R., Warnecke, R. und M. Vogell (2013), *Metalle in HVM-Schlacke – Darstellung aktueller Abtrenngrade und Potenziale für ein wirtschaftliches und nachhaltiges Urban Mining*. 16. ITAD Mitgliederversammlung, Düsseldorf, Präsentation.

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

Günther, A., Fehr, K.T. & John, M. (2014), *Hydrothermale Extraktion von MVA Rückständen*, DepoTech Tagungsband 2014.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

TP A (BAM): Projektkoordination und physikalisch-chemische Verfahren

- Holm, O., *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, *International Journal of Sustainable Engineering* (submitted).

TP B (TARTECH): Anlagenentwicklung

- offen

TP C (UMSICHT): Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung

- keine weiteren geplant

TP D (HZG): Wasserstoffuntersuchungen

- keine weiteren geplant

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

- Enzner, V. und K. Kuchta, *Aufbereitung von Rostaschen mittels Hochgeschwindigkeitsprallzerkleinerer*. 4. Symposium „Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovation“. 17. Und 18.2.2016 Tutzing. Angenommen als Vortrag mit Beitrag im Tagungsband.
- Enzner, V. und K. Kuchta (2016), *Substitution von Primärrohstoffen durch die mineralische Restfraktion aus Rostaschen*, 6. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ der DGAW, Berlin, Poster und Beitrag Tagungsband
- Enzner, V. und K. Kuchta, *Bottom ash treatment – „state-of-the-art“ in Germany in comparison to an innovative method*, EurAsia Waste Management Symposium 2016. 2.-4.5.2016 Istanbul. Angenommen als Vortrag mit Beitrag im Tagungsband.
- Veröffentlichung der Bilanzierungsergebnisse in einem internationalen Journal
- Lübben, S.: *Innovative Verfahren zur Herstellung von Baustoffkomponenten aus Hausmüllverbrennungasche*, Recy & DepoTech, November 2016

TP F (BSR): Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

- keine geplant

TP G (SpiCon): Enzymatische Verfahren

- Quednau et al: *Bioprocessing of saleable copper chloride recovered from ashes of incineration plants*, noch kein Journal ausgewählt

TP H (UDE): Aschen aus der Monoverbrennung und metallurgische Schlacke

- keine weiteren geplant

TP J (LMU): Zink und Blei-Rückgewinnung

- eine Veröffentlichung zur Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, sowie
- eine zum Thema hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus MVA-Rückständen

Quellen

- [1] Holm, O. (2015): Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany, SARDINIA 2015 - 15th International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari
- [2] Kuchta, K. und Enzner, V. (2015): Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen - Bewertung der Ressourceneffizienz. EdDE - Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V, EdDE-Dokumentation 17
- [3] Alwast, H. und Riemann, A. (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4025.html>
- [4] Muchova, L., Bakker, E. und Rem, P. (2009): Precious Metals in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 9(1-2), S. 107-116
- [5] Martens, H. (2011): *Recyclingtechnik - Fachbuch für Lehre und Praxis*, Spektrum - Akademischer Verlag: Heidelberg
- [6] Biganzoli, L., Ilyas, A., Praagh, M.v., Persson, K.M. und Grosso, M. (2013): Aluminium recovery vs. hydrogen production as resource recovery options for fine MSWI bottom ash fraction. *Waste Management* 33(5), S. 1174-1181
- [7] Augsburg, A., Köster, R., Amme, M. und Eberle, S.H. (1997): Mobilität und Festphasenspezifikation von Kupfer aus Schlacken der Hausmüllverbrennung. *Müll und Abfall* (3), S. 144-153
- [8] Travar, I., Lidelöw, S., Andreas, L., Tham, G. und Lagerkvist, A. (2009): Assessing the environmental impact of ashes used in a landfill cover construction. *Waste Management* 29(4), S. 1336-1346
- [9] Meima, J.A. und Comans, R.N.J. (1999): The leaching of trace elements from municipal solid waste incinerator bottom ash at different stages of weathering. *Applied Geochemistry* 14(2), S. 159-171
- [10] Dijkstra, J.J., van der Sloot, H.A. und Comans, R.N.J. (2006): The leaching of major and trace elements from MSWI bottom ash as a function of pH and time. *Applied Geochemistry* 21(2), S. 335-351
- [11] Gade, B., Pöllmann, H., Heindl, A. und Westermann, H. (2001): Long-term behaviour and mineralogical reactions in hazardous waste landfills: a comparison of observation and geochemical modelling. *Environmental Geology* 40(3), S. 248-256
- [12] Magel, G. (2003): *Mineralogische und chemische Untersuchungen zur abiotischen Wasserstoffentwicklung in Müllverbrennungsanlagen*, Herbert Utz Verlag, München
- [13] Pöllmann, H. (2007): *Immobilisierung von Schadstoffen durch Speichermineralbildung*, Shaker Verlag
- [14] Weimann, K., Matyschik, J. Adam, C., Schulz, T., Linß, E., Müller, A. (2013), Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbesondere Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung
- [15] Hense, P. (2013): Erstellung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Metallgewinnung aus mineralischen Rückständen, Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Technische Universität München, Masterarbeit

-
- [16] Bongardt, B., Buchgeister, J., Denz, W., Giegrich, J. (2014): Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth Verlag: Berlin
- [17] Bach, V., Berger, M., Finkbeiner, M., Henssler, M. (2015): Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/Messung von Ressourceneffizienz (ESSENZ-Methode), in: Thomé-Kozmiensky, K. (Hrg.), Recycling und Rohstoffe, Bd. 9, S. 243–250, TK Verlag: Nietwerder
- [18] Guinée, J. (1995): Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines, Leiden University, Doktorarbeit
- [19] van Oers, L., de Koning, A., Guinée, J. B. und Huppes, G. (2002), Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook
- [20] Schneider, L., Berger, M. und Finkbeiner, M. (2011): The 2011 anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. International Journal of Life Cycle Assessment 16(9), S. 929–936
- [21] Gleis, M. und Simon, F.G. (2016): Novellierung des BVT-Merkblattes Abfallverbrennung – Sachstand, Entwicklungstendenzen und neue Verfahren zur Aufbereitung von Rostaschen und Filterstäuben –, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrg.), Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3 - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Bd. 3, S. 163-172, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky: Neuruppin
- [22] Weh, A. (2015): Effiziente der Metallrückgewinnung aus Kehrlichtverbrennungasche mittels Hochspannungsimpulsverfahren, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, Berlin, Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 167-191
- [23] Lübben, S. (2015): Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals, ISWA Beacon Conference Resources from Waste: Sorting and Treatment Techniques, Hamburg
- [24] Gillner, R. (2011): Nichteisenmetallpotential aus Siedlungsabfällen in Deutschland, RWTH Aachen, Dissertation

Schlussbericht

**BMBF-Forschungsvorhaben
Förderkennzeichen 033R086 A**

Verbundvorhaben:

ATR

**Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung
von ressourcenrelevanten Metallen
aus Rückständen thermischer Prozesse
mit innovativen Verfahren**

Teilprojekt A:

**Projektkoordination und physikalische-chemische
Verfahren**

ausführende Stelle:

**BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Fachbereich 4.3 – Schadstofftransfer und Umwelttechnologien**

Projektleiter:	Prof. Franz-Georg Simon
Autor und Projektwissenschaftler:	Dr.-Ing. Olaf Holm
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2012 - 30.06.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	7
1 Aufgabenstellung	7
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II Eingehende Darstellung	11
1 Resultate des Forschungsvorhabens	11
a. Herkunft, Herstellung und Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien 11	
a.1. Probenahme	11
a.2. Probenvor- und aufbereitung	12
a.2.1. Entwässerung und Trocknung	12
a.2.2. Siebanalysen / Herstellung von Siebfractionen	13
a.2.3. Probenverjüngung und -zerkleinerung	13
a.2.4. Schwimm-Sink-Analyse	14
a.2.5. Prallzerkleinerung zur Freilegung der Metalle und zur Vereinzelung der Agglomerate.....	15
a.2.6. Königswasseraufschluss in der Mikrowelle	16
a.3. Messungen und Analysen	17
a.3.1. Ermittlung der Kupferspezies in der Feinkornfraktion von HMVA .	17
a.3.1.1. Mikroskopische Untersuchungsmethoden	17
a.3.1.2. Elektronenoptische und röntgenanalytische Verfahren	18
a.3.1.3. Zusammenfassung und Diskussion.....	19
a.3.2. Induktiv gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektroskopie (ICP- OES) 21	
a.3.3. Dichtemessung.....	21
b. Flotation.....	22
b.1. Flotation von HMVA	23
b.2. Flotation von HMVA im Rahmen von ATR	23
b.2.1. Geräte zur Durchführung der Flotationsexperimente	24
b.2.2. Flotationsreagentien und Additive	25
b.2.2.1. Herstellung von Kaliumethylxanthogenat (KEX)	26

b.2.2.2.	Verseifung von Palmöl.....	26
b.2.2.3.	Dotierung unterschiedlicher Kupferspezies	26
b.2.3.	Versuchsreihen.....	27
b.2.3.1.	Untersuchung zur generellen Eignung der Flotationschemikalien unter Verwendung der Hallimond-Röhre	28
b.2.3.2.	Auswahl und Dosierung des Schäumers	29
b.2.3.3.	Auswahl eines geeigneten Versuchsmilieus.....	31
b.3.	Schlussfolgerungen	32
c.	Dichtesortierung	33
c.1.	Dichtesortierung von HMVA zur Kupferanreicherung	33
c.2.	Dichtesortierung von HMVA im Rahmen von ATR	34
c.2.1.	Funktionsweise des Zentrifugalsortierers	34
c.2.2.	Versuchsdurchführungen am Zentrifugalsortierer	35
c.2.3.	Versuchsreihen.....	36
c.2.3.1.	Methodenentwicklung.....	37
c.2.3.2.	Anwendung auf das Material aus der Alpha-Linie	39
c.2.3.3.	Erweiterung der Versuchsanlage und Optimierung	41
c.3.	Schlussfolgerungen	45
d.	Exergetische Bewertung von Ressourcen am Beispiel von HMVA.....	46
e.	Allgemeine Schlussfolgerungen	48
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	49
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	49
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	50
4.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	50
4.2	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projekt-ende	50
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	51
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	51
6	Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	52
6.1	Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	52
6.2	Geplante Veröffentlichungen	53
Quellen	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Gehalte von Kupfer und Zink in Siebfractionen der HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“.....	13
Abb. 2:	Einfluss der Prallmühle der TU-Berlin: Ausgangsmaterial und gepralltes Material; Digitalmikroskopie	15
Abb. 3:	Einfluss der Kreuzschlagmühle: Siebdurchgang und Siebauflage; Auflichtmikroskopie von Dünnschliffen	16
Abb. 4:	links: Stereomikroskopie, der überwiegende Teil der Partikel in HMVA zeigt Anhaftungen feinsten weiß-grauer Aschepartikel; Mitte und rechts: Polarisationsmikroskopie, Glasphase unter ungekreuzten (Mitte) und gekreuzten Polarisatoren (rechts)	17
Abb. 5:	Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop; Kupferdrähte im Streupräparat; ausgewählte Partikel, fixiert auf einem Objektträger mit Klebefläche	18
Abb. 6:	Rückstreuелеktronenbilder der Mikrosonde; Cu und Pb eingeschlossen in einem Partikel aus Si, Ca und Al; poröses Partikel; heterogenes Partikel aus Fe und Ni.....	19
Abb. 7:	Kupferdraht, Digitalmikroskopie; Elementverteilungsbild Cu, Mikro-RFA; Elementverteilungsbild mit Cu, Ca und Si, Mikro-RFA; Elementverteilungsbild Cu und Ti, Mikro-RFA	19
Abb. 8:	Schematischer Aufbau der eigens hergestellten Hallimond-Röhre und Trennung von Kupfer und Sand in eben dieser	24
Abb. 9:	Laborflotationsmaschine; schematische Zeichnung und Schaumbildung bei einer Versuchsdurchführung	25
Abb. 10:	Kupfer(II)oxid, Kupfer, Messing und Bronze jeweils als Ausgangsmaterial und zerkleinert für die Flotationsexperimente	27
Abb. 11:	Cuprit und Malachit gemahlen und auf < 50 µm gesiebt, Digitalmikroskop.....	27
Abb. 12:	Gute Anreicherung von Kupfer (links) und Kupfer(II)oxid (Mitte) aus Sand mit Diesel als Sammler; rechts: unspezifische Flotation von HMVA in der Hallimond-Röhre, das Ausgangsmaterial wurde fast vollständig ins Flotat überführt	29
Abb. 13:	Flotation von mit Kupfer(-verbindungen) dotierter Hausmüllverbrennungsasche unter Verwendung von Seife aus Palmöl bzw. Spülmittel als Schäumer in der Laborflotationszelle.....	30
Abb. 14:	Massenausbringung, Wertstoffausbringung und Anreicherungs-faktoren bei den Flotationsversuchen von HMVA mit Palmölseife und Spülmittel	31

Abb. 15: Massenausbringung, Wertstoffausbringung und Anreicherungsfaktoren bei den Flotationsversuchen von HMVA mit dotiertem Kupfer(II)oxid und Kupfer.....	31
Abb. 16: Schematische Darstellungen des Massenflusses im Zentrifugalsortierer.	34
Abb. 17: Selbstkonzipierte Erweiterungen des Falcon SB L 40	35
Abb. 18: Schematische Darstellungen des Versuchsstandes	36
Abb. 19: Massenausbringung und Dichte der Konzentrate sowie Anreicherungsfaktoren und Wertstoffausbringungen der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie Schöneicher Plan gemahlen auf < 250 µm ...	37
Abb. 20: Konzentration von Kupfer in Abhängigkeit der Dichte des Konzentrates	37
Abb. 21: Massenausbringung und Dichte der Konzentrate sowie Anreicherungsfaktoren und Wertstoffausbringungen der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ unterschiedlicher Korngrößenbereiche < 250 µm, 250–630 µm und 630–1000 µm (gesiebt, nicht gemahlen)	38
Abb. 22: Wiederholungsmessungen der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie Schöneicher Plan, Korngrößen 250 - 630 µm (gesiebt, nicht gemahlen)	39
Abb. 23: Verteilungsdichte und Verteilungssumme der unterschiedlichen Fraktionen < 2mm aus Alpha-Linie in Wiesbaden sowie die Konzentrationen für Kupfer in den zugrunde liegenden Siebfraktionen	40
Abb. 24: Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop zum Vergleich der Fraktionen vor und nach dem Aufschluss (hier Siebfraktion 200 – 630 µm des SRH-Materials)	40
Abb. 25: Verteilungsdichte und Verteilungssumme des Probenmaterials aus der Beta-Linie (HMVA < 710 µm) sowie die Konzentrationen für Kupfer und Blei in den zugrunde liegenden Siebfraktionen	42
Abb. 26: Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop der Fraktion 0 – 710 µm aus der Beta-Linie (SRH-Material)	42
Abb. 27: Anreicherungsfaktoren und Wertstoffausbringungen für Kupfer bezogen auf die Massenausbringungen	43
Abb. 28: Korrelation zwischen der Anreicherung von Blei und von Kupfer im Konzentrat.....	45

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Betriebsbedingungen und Messparameter der ICP-OES	21
Tab. 2:	Verwendete Flotationsreagentien, Funktion und Kürzel für die Versuchsansätze	26
Tab. 3:	Qualitative Beurteilung der Flotationsexperimente in der Hallimond- Röhre unter Verwendung von Diesel als Sammler	28
Tab. 4:	Massenausbringungen sowie Gehalte, Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen für Kupfer in den Siebfraktionen < 250 µm aus der Alpha-Linie	41
Tab. 5:	Versuchsbedingungen, Massenausbringungen, Gehalte in den Konzentraten, Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen für Kupfer und Blei zur statistischen Versuchsplanung	44
Tab. 6:	Berechnung der chemischen Exergie einer typischen HMVA.....	47

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) mit ihrem Fachbereich 4.3 Schadstofftransfer und Umwelttechnologien hat für das Verbundvorhaben „ATR - Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren“ die Gesamtkoordination übernommen. Bei insgesamt neun Projektpartnern fiel folgerichtig ein nicht unwesentlicher Aufwand für Verwaltungsaufgaben an. Insbesondere die Verzögerungen bei dem Bau der großtechnischen Anlagen im Teilprojekt B (ausführlich erläutert im Bericht für das Gesamtvorhaben) resultierten in einer Vielzahl von Folgeaufgaben.

Wissenschaftlich verfahrenstechnisches Ziel des Teilprojektes A bei der BAM war die Rückgewinnung von Metallen und metallischer Verbindungen aus speziellen, bereits teilaufbereiteten Fraktionen von Aschen aus der Hausmüllverbrennung (HMVA). Ausgangsmaterial sollten Fraktionen sein, die im Rahmen des Projektes vom Projektpartner TARTECH eco industries AG bereitgestellt werden sollten. Eigens und im Rahmen des Projektes entwickelte Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger sollten die mineralischen Oberflächenverkrustungen abschlagen, die einzelnen Bestandteile trennen und so eine effizientere Sortierung mit Anschlussverfahren ermöglichen. Die Verfahren, die bei der BAM dafür zum Einsatz kamen, waren im Wesentlichen Flotation und Dichtesortierung mittels eines Zentrifugalsortierers. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf der Rückgewinnung bzw. Anreicherung von Kupfer und Kupferverbindungen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Kenntnisse über die Anteile in welcher Form (gediegen oder unterschiedlich chemisch gebunden) die relevanten Wertmetalle in der Feinfraktion von HMVA vorliegen, liegen so gut wie nicht vor (vgl. Kap. I 4). Lediglich qualitative Nachweise unterschiedlicher Bindungsformen konnten zum Teil bisher erbracht werden. Um Sortierverfahren wie z.B. die Flotation entwickeln und optimieren zu können, ist eine Definition der abzutrennenden Zielwertstoffe aber notwendig. Entsprechend waren im Projekt Untersuchungen zur Identifikation und sofern möglich auch zur Quantifizierung der in der Feinfraktion von HMVA vorliegenden Kupferspezies vorgesehen.

Bis auf eine Prallmühle (vgl. Kap. I 5) waren alle benötigten Gerätschaften für die verfahrenstechnischen Untersuchungen, die Probenvor- und aufbereitung und Analytik in der BAM vorhanden. Erforderliche Verbrauchsmaterialien insbesondere für die Analytik konnten aus den Projektmitteln angeschafft werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens aus Sicht der Projektkoordination ist dem Gesamtbericht zu entnehmen. Die wissenschaftlich-technischen Aspekte werden im Folgenden erläutert.

Aus den sich früh abzeichnenden Verzögerungen des Anlagenbaus konnte geschlossen werden, dass für den Zeitraum der Methodenentwicklung noch keine mit dem TARTECH-Verfahren vorbehandelten Aschen zur Verfügung stehen würden. Entsprechend erfolgte am 25.09.2012 eine Probenahme abgelagerter HMVA auf der Deponie „Schöneicher Plan“ des Verbundprojektpartners BSR. Diese Asche wurde zum Einen eingehend untersucht, um Erkenntnisse über die enthaltenen Bindungsformen von Kupfer zu erlangen, und zum Anderen für die Methodenentwicklung der Flotation und der Zentrifugalsortierung genutzt.

Um Veränderungen des Ausgangsmaterials durch Pralleffekte analog dem Verfahrensprinzip von TARTECH zu berücksichtigen, wurden Teile der Feinfraktion des Materials von der Deponie „Schöneicher Plan“ mit einer Prallmühle der TU-Berlin aufbereitet (vgl. Kap. a.2.5). Alle anderen verfahrenstechnischen Ansätze, Untersuchungen und Analysen fanden in und mit Geräten der BAM statt.

Nach Fertigstellung der TARTECH-Anlage in Wiesbaden wurden vor Ort mehrfach Proben der generierten und relevanten Teilfraktionen genommen. Im Wesentlichen wurden mit diesen Proben weitergehende Untersuchungen mit dem Zentrifugalsortierer durchgeführt.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Metallen aus HMVA werden derzeit große Anstrengungen unternommen. So werden z. B. immer mehr Sieblinien mit kleineren Kornbandbreiten eingesetzt, um die Effizienz von Sortierverfahren, vor allem die der Wirbelstromscheidung, zu steigern. Um die Metalle diesen und anderen Prozessschritten zugänglich zu machen werden die Aufbereitungsverfahren auf unterschiedliche Art und Weise umgestellt. Vielfach sollen Metalle wie beim Projektpartner TARTECH mittels mechanischer Beanspruchung von den mineralischen Anhaftungen befreit werden. Das gleiche Ziel wird z.B. mittels Hochspannungsimpulsverfahren verfolgt (Weh, 2015), das sich aber noch im Stadium der Entwicklung befindet. Ein anderer Weg ist die möglichst schnelle Aufbereitung der Aschen nach der Verbrennung, um der Bildung von mineralischen Anhaftungen und der Verfestigung der Aschen zuvorzukommen.

Durch die Implementierung der zusätzlichen Prozessschritte erhöht sich der Feinanteil der verbliebenen mineralischen Fraktionen zum Teil erheblich. Bereits ohne diese Aufbereitungsschritte besteht HMVA zu rund 25% aus Körnern unter 4 mm. Der Anteil der Feinstfraktion < 0,25 mm hat immer noch einen Massenanteil von rund 10%. In Anlagen, die nach dem Stand der Technik operieren, wird der Feinkornanteil im Allgemeinen nicht zur Metallrückgewinnung aufbereitet. Im Laufe der Projektzeit hat sich die durchschnittliche Untergrenze der NE-Metallrückge-

winnung von etwa 4 auf 2 mm verringert. Allerdings zielen alle in der Praxis realisierten Verfahren lediglich auf die Rückgewinnung gediegener Metalle ab. Es ist jedoch zu erwarten, dass der Anteil gediegener Metalle kleiner wird je kleiner die Korngröße ist. Untersuchungen zur Bestimmung der jeweiligen Anteile liegen so gut wie nicht vor. In der Regel werden Gesamtgehalte angegeben. So findet sich lediglich eine Veröffentlichung, die sich mit der Speziierung von Aluminium in der Feinfraktion beschäftigt (Biganzoli et al., 2013). Aus dieser geht hervor, dass rund 15% des Aluminiums in metallischer Form vorliegt. Aluminium wird aber unter den gängigen Milieubedingungen aufgrund seines unedleren Charakters, schneller oxidiert. Andere NE-Metalle wie Kupfer dürften daher einen höheren metallischen Anteil aufweisen. Dass Kupfer jedoch auch als Oxid und mineralisch gebunden vorliegt, ist erwiesen (Augsburg et al., 1997). Die Bindungsform der Metalle ist aber maßgeblich für die Auswahl und den Erfolg der einzelnen Aufbereitungsmethoden. Verfahren wie die Flotation und die Dichtesortierung erscheinen aufgrund der Materialeigenschaften (Oberflächenbelegung, Heterogenität) ohne vorgeschaltete Aufbereitungsschritte daher wenig erfolgversprechend.

Das Verfahren aus der Primärrohstoffgewinnung, wie Flotation, Dichtesortierung, Biolaugung und Hydrothermalverfahren, auch zur Rückgewinnung von Wertmetallen aus der Feinfraktion von HMVA geeignet sein könnten, ist eine Hypothese des Projektantrages ATR. Gründe dafür sind die vergleichbaren Korngrößen und Wertstoffgehalte. Dass solche Ansätze auch von anderen Forschungseinrichtungen verfolgt wurden, war vor Projektbeginn nicht bekannt. An der TU-Clausthal wurden nach mündlicher Überlieferung Untersuchungen zur Flotation von HMVA mit dem Ziel der Rückgewinnung von Kupfer durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden jedoch noch nicht publiziert und konnten auch auf Nachfrage nicht zur Verfügung gestellt werden. Laut Informationen aus der persönlichen Kommunikation wurden die Untersuchungen jedoch im stark sauren Milieu, analog zu vielen gängigen Ansätzen der Primärrohstoffgewinnung, durchgeführt. Die Ansätze die im Rahmen von ATR verfolgt wurden, gingen in eine andere Richtung (vgl. II 1 b.2). Im Projektverlauf wurde zudem bekannt, dass an einigen Instituten auch Verfahren zur Biolaugung und zur chemischen Laugung erforscht werden. Substantielle Veröffentlichungen sind aber bisher nicht bekannt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Von Seiten der Projektkoordination erfolgte eine enge Zusammenarbeit und regelmäßige Abstimmung mit dem übergeordneten Projekt INTRAr3+. Eingehendere Informationen finden sich diesbezüglich im Bericht für das Gesamtprojekt. Hinsichtlich der Ökobilanzierung des gesamten, mehrstufigen Aufbereitungsverfahrens von ATR wie auch der einzelnen Verfahrensansätze gab es Kontakt zur Universität Stuttgart (Lehrstuhl für Bauphysik, Abt. Ganzheitliche Bilanzierung) und zum Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Deren Anfragen und Datenerhebungen wurden gemeinsam mit dem Projektpartner von Fraunhofer UMSICHT bearbeitet und beantwortet. Da diese Projekte jedoch zeitgleich starteten, war es, entsprechend dem Projektfortschritt, in der Regel nicht

möglich die erwünschten Daten zeitnah zu liefern. Dieser Aspekt sollte bei der zukünftigen Planung von Begleitprojekten berücksichtigt werden.

Im Bereich der wissenschaftlich-technischen Aufgaben beschränkte sich die Zusammenarbeit im Wesentlichen auf die Projektpartner LMU und UDE. Insgesamt wurde deutlich, dass auch eine Zusammenarbeit mit dem zweiten Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme r^3 , welches sich mit HMVA-Aufbereitung beschäftigte (VeMRec), nicht zielführend sein würde. Im genannten Projekt sollte eine Optimierung der Rückgewinnung von NE-Metallen aus HMVA mittels Sensortechnik erfolgen. Dieses Verfahren kann aufgrund technischer Begebenheiten jedoch nur auf vergleichsweise große Korngrößen (im Projekt $> 8 \text{ mm}$) angewendet werden. Die Innovationen und der Fokus im Projekt ATR lagen aber in der Feinstfraktion von HMVA, letzten Endes im Bereich kleiner 2 mm .

Da in der BAM keine Prallmühle zur Aufbereitung der von der Deponie „Schöneicher Plan“ entnommenen HMVA vorhanden war, musste nach Alternativen gesucht werden. Fündig wurde man im Fachbereich Mechanische Verfahrenstechnik der TU-Berlin. Der Fachbereich verfügt über eine Prallmühle mit der die benötigten Mengen bearbeitet werden konnten.

Hinsichtlich der Charakterisierung der HMVA wurde die TU-Freiberg kontaktiert, nachdem bekannt gegeben wurde, dass diese als eine Art zentrale Anlaufstelle für die Nutzung übergeordneter Messmethoden dienen sollte. Im Vorfeld der r^3 -Kick-Off-Veranstaltung fand eine Begehung statt, bei der die Möglichkeiten und Grenzen der vorhandenen Messtechnik eruiert werden konnten. Dabei wurde geklärt, ob und wie eine Zusammenarbeit zur Nutzung vorhandener Messgeräte erfolgen könne. Es kam zu keiner Zusammenarbeit, weil die Untersuchungen in ähnlicher Form auch an der BAM durchgeführt werden konnten und zudem Kosten für die Bearbeitung von Proben entstanden wären. Eine angebotene, zeitweilige eigenhändige Nutzung der Geräte hätte zu hohe Einarbeitungszeiten und ebenfalls Kosten verursacht. Außerdem wurde deutlich, dass mit der Umstrukturierung (Neugründung Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie und Umzug in neue Räumlichkeiten) im Vorhabenzeitraum die Geräte z. T. auch gar nicht zur Verfügung gestanden hätten. Da im Vorfeld der Fördermaßnahme nicht bekannt war, dass es ein solches Angebot geben wird, konnten folglich auch keine finanziellen Mittel im Projektantrag eingeplant werden. Das Konzept einer zentralen Einrichtung als Dienstleister für Messmethoden sollte daher dringend überdacht werden.

II Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Herkunft, Herstellung und Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien

Die Charakterisierung des Materials diente zum Einen als Grundlage zur Abschätzung des Urban Mining-Potentials, zum Anderen aber auch zur Ableitung geeigneter Verfahrensansätze für die Anreicherung von Wertmetallen. Dass nach Nassentschlackung und Alterung die Oberflächen nahezu aller Partikel der HMVA mit mineralischen Anhaftungen versehen sind, ist gemeinhin bekannt. Flotation, deren Funktionsprinzip auf Unterschieden in den Oberflächeneigenschaften basiert, erscheint daher ohne entsprechende Aufbereitungsschritte nicht zielgerichtet. Die Anhaftungen führen andererseits aber auch zu einer Verringerung der Dichte metallhaltiger Partikel, so dass auch eine Dichtesortierung erschwert wird. Die Auswirkungen unterschiedlicher Aufbereitungsschritte, z. B. zur Freilegung der Oberflächen, wurden daher unter Verwendung eines Digitalmikroskops betrachtet. Die Feststoffgehalte wurden nach Mikrowellenaufschluss mit Königswasser an der ICP-OES bestimmt.

a.1. Probenahme

Das Ausgangsmaterial für die eigenen Untersuchungen sollte vorab in der großtechnischen Anlage der Fa. TARTECH eco industries AG unter anderem unter Verwendung der Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger aufbereitet werden. Wie bereits erläutert (s. Kap. I 3), stand dieses Material für den Zeitraum der Methodenentwicklung jedoch nicht zur Verfügung. Da o. g. Anlage im Rahmen des Projektes mit HMVA betrieben werden sollte, die vorab in Anlehnung an die LAGA M20 ungefähr 3 Monate gealtert wird, wurde für die Methodenentwicklung am 25.09.2012 abgelagerte HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ des Verbundprojektpartners BSR als alternatives Ausgangsmaterial besorgt. Dabei handelte es sich um eine Haufwerksprobenahme.

Nach Fertigstellung der Alpha-Linie in Wiesbaden wurde an den Aufbereitungstagen 04. + 05.12. (HMVA vom Projektpartner SRH) und 18.12. 2014 (HMVA vom Projektpartner BSR) jeweils Proben der Fraktionen < 2 mm vom Förderband genommen (vgl. Anlagenkonfiguration im Bericht zum Teilprojekt B). Diese Materialien wurden mit dem Digitalmikroskop untersucht und aufgrund der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Erkenntnisse lediglich mit dem Zentrifugalsortierer weiter aufbereitet.

Gleiches gilt für die Materialien aus der Beta-Linie, deren Probenahmen am 23.07.2014 in Wiesbaden aus den Auffangbehältern am Taumelsieb erfolgte. Hier standen Materialien der Körnungen 0-0,73 mm, 0,73-1 mm und 1-2 mm zur Verfügung, die vorab mit einem starken Magneten teilentrachtet und dann im

Rotationstrockner getrocknet wurden. Die Feinstfraktion (etwa $< 20 \mu\text{m}$) wurde während Trocknung und Siebung aktiv abgesaugt und einer Abluftreinigung zugeführt. Eine Probennahme dieses nicht unerheblichen Anteils an Feinstmaterial erfolgte nicht. Für die Aufbereitung mittels Zentrifugalsortierer wurde ausschließlich die Körnung 0-0,73 mm berücksichtigt. Die gröberen Fraktionen lassen sich nicht in dem Zentrifugalsortierer verarbeiten (vgl. Kap. c.2.3.1) und werden indes vom Projektpartner selbst vor Ort weiter aufbereitet.

a.2. Probenvor- und aufbereitung

Um die verschiedenen Verfahren anwenden zu können musste die Probenmenge z. T. erheblich reduziert (verjüngt) und/oder das Material zerkleinert werden. Sowohl für die Flotation wie auch für die Zentrifugalsortierung wurden jeweils Mengen um 200 g pro Versuch verarbeitet. Für die Flotation musste das Material in einem Korngrößenbereich von $\sim 100 \mu\text{m}$ und kleiner vorliegen. Die ersten Untersuchungen mit dem Zentrifugalsortierer sollten zum Vergleich mit dem gleichen Material wie für die Flotation durchgeführt werden. Anschließend wurden hier unterschiedliche Körnungsbänder untersucht, die zum Teil lediglich gesiebt und ansonsten nicht anderweitig mechanisch beansprucht (zerkleinert) wurden.

Eine große Herausforderung ist das repräsentative herunterteilen bzw. das Homogenisieren vor und nach jedem Aufbereitungsschritt. Um die unterschiedlichen Einstellungen und Verfahrensansätze vergleichen zu können mussten jeweils eine Reihe gleichwertiger Ausgangsproben hergestellt werden.

a.2.1. Entwässerung und Trocknung

Sowohl die Versuche zur Flotation als auch die mit dem Zentrifugalsortierer erfolgten nassmechanisch, also mit einem erheblichen Wasserüberschuss gegenüber dem Feststoff. Sofern die Feststoffe suspendiert vorlagen, mussten je nach Körnung und Dichte der Materialien unterschiedlich lange Sedimentationszeiten berücksichtigt werden. Der Überstand wurde anschließend mit Wasserstrahlpumpen und einem Schlauch abdekantiert. Da sich sehr feine Partikel zum Teil weiterhin in der Schwebelage befanden, konnte dabei ein gewisser Verlust an Feststoffen nicht vermieden werden. Das betraf in erster Linie den Überlauf bei der Zentrifugalsortierung, der aber lediglich als Kontrolle diente. Eigentliches Interesse galt hier den Konzentraten. Die Feststoffe wurden dann mit Wasser quantitativ aus den jeweiligen Gefäßen in eine mit Filter belegte Nutsche gespült. Mittels Wasserstrahlpumpe wurde das Material anschließend über eine Saugflasche entwässert. Der Filter mit dem entwässerten Feststoff wurde letztlich im Trockenschrank getrocknet.

Die großen Mengen Material von der Deponie „Schöneicher Plan“ wurden in der Technikumshalle auf Deponiedichtungsbahnen ausgebreitet und luftgetrocknet. Die Proben aus der Alpha-Linie wurden auf Metallschalen unter dem Abzug getrocknet, die der Beta-Linie waren ja bereits verfahrensbedingt trocken.

Für Siebanalysen im Feinkornbereich oder für die Aufschlüsse wurden die jeweiligen Teilmengen in Trockenschränken getrocknet.

a.2.2. Siebanalysen / Herstellung von Siebfractionen

Das Hauptinteresse im Projekt galt der Feinfraktion der HMVA. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass ein Siebschnitt von 4 mm geeignet sei, da mit kleineren Korngrößen in der Regel keine Aufbereitung mehr stattfindet. Im Laufe des Projektes wurde jedoch deutlich, dass die Aufbereiter in der Praxis mittlerweile weiter herunter gehen und die unbearbeitete Fraktion bei etwa < 2 mm liegt.

Entsprechend dem damaligen Kenntnisstand wurde die HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ anhand eines Taumelsiebes mit einer Siebeinlage von 4 mm in eine Grobfraktion und eine Feinfraktion getrennt. Teilmengen beider Fraktionen wurden nachher jeweils weiter klassiert, so dass eine Korngrößenverteilung für die gesamte HMVA ermittelt werden konnte. Für die Grobfraktion wurde das Taumelsieb verwendet, für die Feinfraktion ein Siebturm. Um Kenntnisse über die Wertstoffverteilung in Abhängigkeit der Korngröße zu erlangen, wurden die einzelnen Fraktionen aufgeschlossen und mittels ICP-OES analysiert.

Von Interesse war dabei vor allem die Verteilung in der Feinfraktion. So erhöht sich z. B. der Gehalt an Zink und Blei hier mit abnehmender Korngröße, während der Kupfergehalt offenbar Korngrößenunabhängig ist (vgl. Abb. 1). Die Anreicherungen einiger Metalle in den feineren Kornfraktionen fallen jedoch so gering aus, dass sich durch reine Klassierungen weder Wertstoffe (z. B. Zink) anreichern noch Schadstoffgehalte (z. B. Blei) maßgeblich senken lassen.

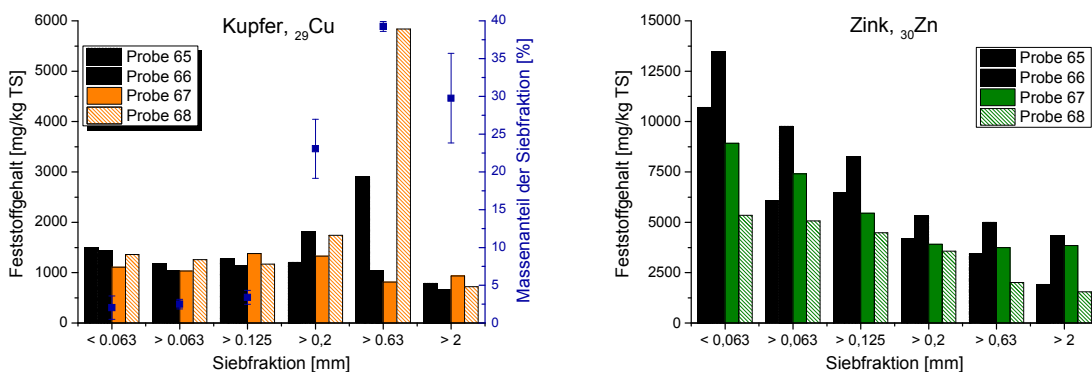


Abb. 1: Gehalte von Kupfer (links) und Zink (rechts) in Siebfractionen der HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“. In der linken Grafik wird der Massenanteil durch geschlossene Quadrate angezeigt (rechte y-Achse)

Die Gewinnung aller weiteren Teilmengen definierter Korngrößenbereiche erfolgte mittels Klassierung im Siebturm unter Verwendung der jeweiligen Siebeinlagen.

a.2.3. Probenverjüngung und -zerkleinerung

Um die Materialien nach der Probennahme, einzelnen Aufbereitungsschritten oder der Herstellung künstlicher Gemische zu homogenisieren und zu verjüngen kamen Riffelteiler und Rotationsprobenteiler unterschiedlicher Größen zum Einsatz. In der Regel wurde dabei nach dem sogenannten Cross-Riffling-Verfahren vorgegangen.

Für Flotation muss das Material in einem Korngrößenbereich um $\sim 100 \mu\text{m}$ und kleiner bereitgestellt werden. Dafür wurde die HMVA < 4 mm von der Deponie

„Schöneicher Plan“ zunächst mit einem Walzenbrecher (Typ *WS 250x150-L*, Fa. *Siebtechnik*) vorzerkleinert. Anschließend wurde das Material unter Verwendung einer Kreuzschlagmühle (*SK 100 Comfort Gusseisen*, Fa. *Retsch*) auf den gewünschten Kornbereich gebracht. Die Verwendung des Siebeinsatzes mit einer Maschenweite von 100 µm erwies sich dabei als ungeeignet, da die Poren immer wieder verstopften. In der Annahme, dass auch bei dem nächstgröberen Sieb ein wesentlicher Anteil in flotierbaren Korngrößen vorliegt, wurde die Siebeinlage mit der Maschenweite 250 µm verwendet. Dabei bildete sich eine Siebauflage, die analog zu dem Siebdurchgang mit den unterschiedlichen mikroskopischen Methoden untersucht wurde (vgl. Kap. a.2.5 und a.3.1.1).

Die Feinmahlungen für die Mikrowellenaufschlüsse mit Königswasser erfolgten mit einer Planetenkugelmühle vom Typ *MM 2000* der Fa. *Retsch*. Viele Probenmaterialien aus den Versuchen waren allerdings von sich aus schon so fein, dass eine weitere Zerkleinerung zum Zweck der Analyse nicht nötig war.

a.2.4. Schwimm-Sink-Analyse

Die Schwimm-Sink-Analyse (SSA) ist eine Methode zur Dichtentrennung. Dafür wird eine Lösung definierter Dichte verwendet, die sogenannte Schwerelösung. Wird eine Feststoffprobe, die sich aus Komponenten unterschiedlicher Dichten zusammensetzt, zur Schwerelösung gegeben, so trennt sich die Probe im Idealfall in zwei Fraktionen auf. Diese werden als Schwimmgut und Sinkgut bezeichnet und können nach der Trennung separat untersucht werden. Zusätzlich kann ein weiterer Anteil der Feststoffprobe in der Schwerelösung in Schwebelösung bleiben. Die SSA hat den Vorteil, dass auch Proben mit einem breiten Korngrößenspektrum getrennt werden können. Bei vielen anderen Verfahren zur Dichtesortierung hat die Korngröße einen erheblichen Einfluss auf das Trennverhalten.

Die SSA im Rahmen des Projektes diente zunächst der Herstellung eines Konzentrats, das für die Charakterisierung der Kupferspezies in der Feinfraktion der HMVA herangezogen werden sollte (vgl. Kap. a.3.1.1). Dafür wurden Schwerelösungen unterschiedlicher Dichten mit Natriumpolywolframat hergestellt. Kupfer konnte dabei schrittweise angereichert werden. Andererseits offenbarten sich bei den Versuchen hohe Anteile in der Schwebelösung, also keine klare Trennung in Sinkgut und Schwimmgut, sowie eine sehr aufwändige Rücktrennung des Materials von der Schwerelösung.

Schwerelösungen sollen eigentlich wiederverwendbar sein, indem die Materialien gewaschen und das Waschwasser anschließend wieder eingeeengt wird. Bei den Versuchen wurden jedoch Querkontaminationen in beide Richtungen beobachtet. So wurde z. B. bei den Untersuchungen zur Ermittlung der Kupferspezies (vgl. Kap. a.3.1) immer wieder Wolfram gefunden. Auch ließ sich das Waschwasser nicht vollständig von Rückständen der HMVA befreien mit der Folge, dass sich die wiederverwendete Natriumpolywolframat-Schwerelösung nicht mehr vernünftig auf die gewünschte Dichte einstellen ließ. In den folgenden Untersuchungen wurde daher auf den Einsatz der SSA verzichtet. Ein großtechnischer Einsatz von Schwerelösungen zur Anreicherung von Wertmetallen in der Feinfraktion von HMVA ist folglich nicht zielführend. Für gröbere Körnungen könnte dieses Verfah-

ren jedoch geeignet sein. Im Bereich der Metalltrennung (Aluminium- vs. Kupferfraktion) wird es z.B. großtechnisch eingesetzt.

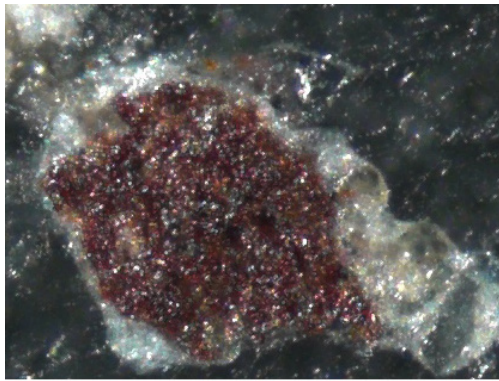
a.2.5. Prallzerkleinerung zur Freilegung der Metalle und zur Vereinzelung der Agglomerate

Wie bereits dargestellt, ist eine Freilegung der Metalle und Metallverbindungen die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Anreicherung mittels Flotation oder Dichtesortierung. Dieser Schritt sollte im Rahmen des mehrstufigen Aufbereitungskonzeptes des Projektes in der Anlage der Fa. TARTECH stattfinden. Aufgrund der Verzögerungen wurde nach alternativen Möglichkeiten gesucht diesen Aufbereitungsschritt zu realisieren. Am Fachbereich Mechanische Verfahrenstechnik der TU-Berlin konnte schließlich eine geeignete Prallmühle genutzt werden.

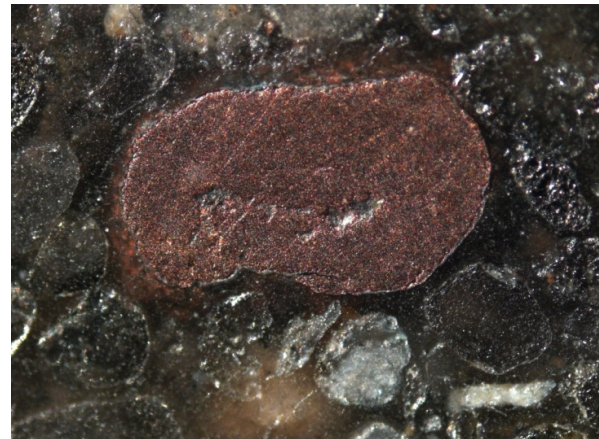
Das Material (HMVA < 4 mm von der Deponie „Schöneicher Plan“) wurde in der Prallmühle der TU-Berlin aufbereitet und anschließend eingehender mit dem Digitalmikroskop untersucht (vgl. Abb. 2). Im Vergleich zu nicht gepralltem Material konnte keine nennenswerte Freilegung interessanter Partikel festgestellt werden. Die Prallkraft in der alten Mühle der TU-Berlin reichte offensichtlich nicht aus. Dass aber Pralleffekte zur Freilegung von Partikeln führen können, beweist die Siebauflage (Siebeinsatz 250 µm) der Kreuzschlagmühle. Aufgrund des wiederholten Pralleffektes bestand die Siebauflage (zu große Partikel) im Gegensatz zum Siebdurchgang aus metallischen Partikeln, die abgerundet und deren Oberflächen frei von mineralischen Anhaftungen waren (vgl. Abb. 3).



Abb. 2: Einfluss der Prallmühle der TU-Berlin: Ausgangsmaterial (links) und gepralltes Material (rechts); Digitalmikroskopie



200 µm



200 µm

Abb. 3: Einfluss der Kreuzschlagmühle: Siebdurchgang (links) und Siebaufgabe (rechts); Auflichtmikroskopie von Dünnschliffen

Abgesehen von dieser Beobachtung konnte mit dem Digitalmikroskop bei keinem weiteren Verfahrensschritt eine Freilegung von Metallen beobachtet werden. Das betrifft sowohl die Aufbereitung der Materialien von der Deponie „Schöneicher Plan“ als auch die Produkte aus der Anlage in Wiesbaden. Rein optisch war kein augenfälliger Unterschied zwischen der neuen Feinfraktion < 2 mm nach der Bearbeitung im Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger der Apha-Linie und dem Ausgangsmaterial < 2 mm zu erkennen. Auch die Fraktionen der Beta-Linie zeigten keine wesentlichen Merkmalsänderungen.

a.2.6. Königswasseraufschluss in der Mikrowelle

Zur Bestimmung der Feststoffgehalte relevanter Elemente (v.a. Kupfer, Zinn, Zink, Blei etc.) mittels ICP-OES (vgl. II 1 a.3.2) wurden die Proben mit Königswasser aufgeschlossen. Für den Königswasseraufschluss wurden jeweils 0,5 g Probe mit 2 mL Wasser angefeuchtet und anschließend mit 12 mL Königswasser versetzt. Das Königswasser setzte sich aus 9 mL 37%iger Salzsäure und 3 mL 65%iger Salpetersäure zusammen. Um Matrixeffekte zu verhindern wurde die Salzfracht erhöht indem Lithiumnitrat in einer Konzentration von 200 g/L hinzugegeben wurde. Die Proben wurden dann in spezielle Probenbehälter überführt und in der Mikrowelle (Typ *microPREP – 1500*, Fa. *MLS*) mit folgendem Programm aufgeschlossen:

- Schritt 1: t = 10 min L = 800 W T = 160 °C p = 30,0 bar
- Schritt 2: t = 05 min L = 1000 W T = 210 °C p = 30,0 bar
- Schritt 3: t = 20 min L = 700 W T = 210 °C p = 40,0 bar
- Schritt 4: t = 55 min Abkühlen über Ventilator.

Danach wurden die Proben gefiltert und das Filtrat gekühlt. Für einige Proben konnte aufgrund der geringen Probemenge in den Konzentraten nach Anreicherung nur ein Aufschluss hergestellt werden. Für alle anderen Proben wurde eine Doppelbestimmung vorgenommen. Im Falle starker Abweichungen der beiden Analysenwerte wurde ein weiterer Aufschluss angesetzt und gemessen.

a.3. Messungen und Analysen

Hinsichtlich der angewandten Messmethoden gab es zwei Hauptarbeitsgebiete. Einerseits galt es die enthaltenen Kupferverbindungen mit diversen unterschiedlichen Geräten zu identifizieren und sofern möglich zu quantifizieren. Andererseits wurden so gut wie alle Proben aufgeschlossen und an der ICP-OES gemessen, um vor allem den Kupfergehalt zu bestimmen. Außerdem wurde die Dichte Ausgangsmaterialien sowie der Konzentrate und überwiegend auch der Berge bestimmt.

a.3.1. Ermittlung der Kupferspezies in der Feinkornfraktion von HMVA

Mikroskopie, Strukturuntersuchungen mit Röntgenstrahlen und Elektronenoptik sollten dazu dienen die verschiedenen kupferhaltigen Phasen zu identifizieren und evtl. Unterschiede zwischen verschiedenen Proben aufzuzeigen. Daher wurde das Material der Deponie „Schöneicher Plan“ < 4 mm nach Zerkleinerung (nach Walzenbrecher und Kreuzschlagmühle, < 250 µm) und unbehandelt untersucht. Außerdem wurde die Siebauflage aus der Schlagkreuzmühle (s. Kap. a.2.5) berücksichtigt.

a.3.1.1. Mikroskopische Untersuchungsmethoden

Mithilfe einer üblichen 10 fach vergrößernden Geologenlupe von Doublet wurden die drei Ausgangsproben zunächst betrachtet und beschrieben. Anschließend wurden unter Verwendung von Epoxidharz Dünnschliffe hergestellt, um die Probe im Polarisationsmikroskop zu untersuchen. Für die Auflichtmikroskopie wurden zusätzlich, ebenfalls unter Verwendung von Epoxidharz, Anschliffe hergestellt.

Das Stereomikroskop (Typ *Stemi 1000*, Fa. *Zeiss*) diente während der Dünnschliffherstellung der Einschätzung der Schliffdicke. Weiterhin wurde eine Probe im Auflicht untersucht und beschrieben. Partikel, die aufgrund von Form und Farbe als potentiell kupferhaltig eingeschätzt wurden, konnten mit einer Mikroskopiernadel separiert werden. Dabei wurden besonders rötlich und metallisch anmutende Partikel, sowie Partikel mit grünlicher Patina separiert und zur Herstellung eines Streupräparats genutzt. Einige wurden auf einem Objektträger mit Klebefläche fixiert.

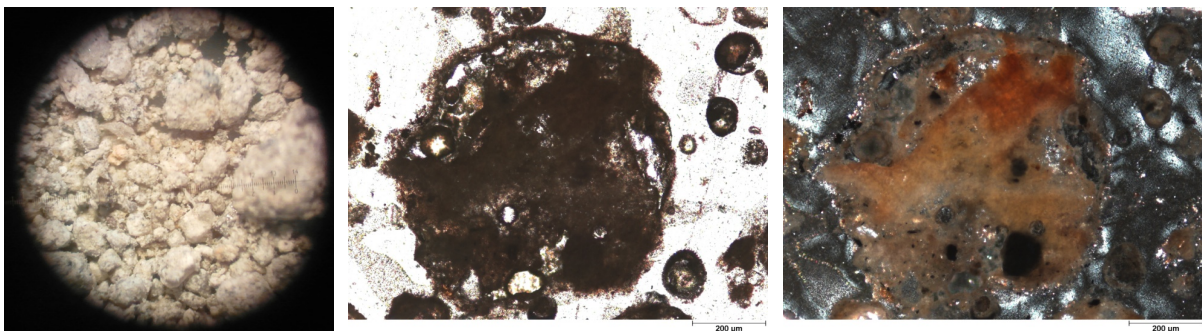


Abb. 4: links: Stereomikroskopie, der überwiegende Teil der Partikel in HMVA zeigt Anhaftungen feinsten weiß-grauer Aschepartikel; Mitte und rechts: Polarisationsmikroskopie, Glasphase unter ungekreuzten (Mitte) und gekreuzten Polarisatoren (rechts)

Die Dünnschliffe und Anschliffe wurden soweit möglich mithilfe des Polarisationsmikroskops (Typ *DM RXP*, Fa. *Leica*) auf Haupt- und Nebengemein角度 untersucht. Konoskopische Untersuchungen wurden nicht vorgenommen. Das Mikroskop war aufgrund der fehlenden Amici-Bertrand-Linse (ABL) für die Konoskopie nicht gut geeignet. Daher wurden nicht alle anisotropen Minerale mittels Polarisationsmikroskopie identifiziert. Mithilfe einer zusätzlichen Beleuchtungsapparatur (Typ *Highlight 3100* Fa. *Olympus Europe*) mit zwei verstellbaren Schwanenhals-Lampen wurde auch im Auflicht mikroskopiert. Mit einer digitalen Mikroskopkamera (Typ *ProgRes C10*, Fa. *Jenoptik*) wurde das Bild direkt auf einen Bildschirm übertragen. Mit dem Darstellungs- und Bearbeitungsprogramm „*aquinto a4i docu*“ wurden die Bilder digital erfasst, optimiert und Maßstäbe eingefügt.

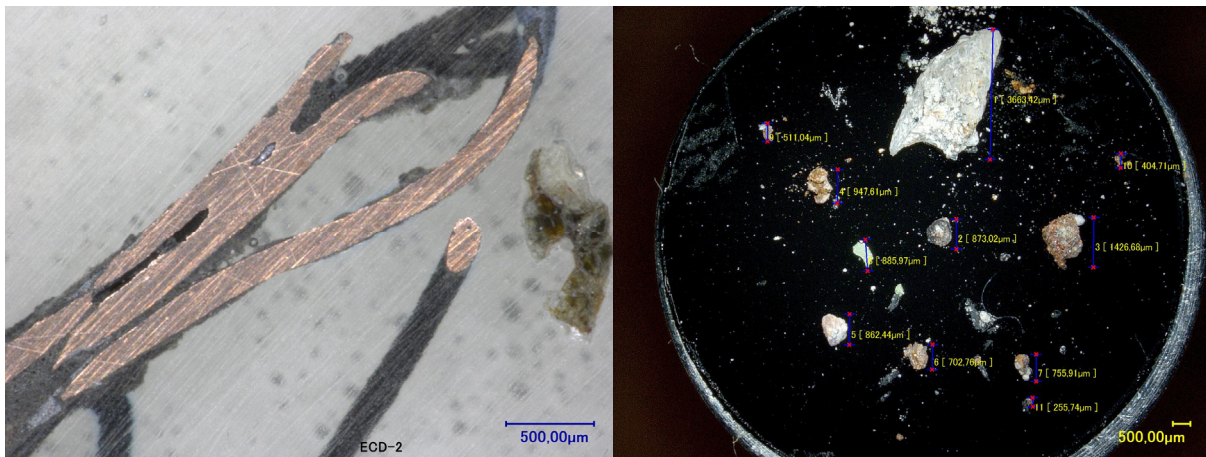


Abb. 5: Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop; links: Kupferdrähte im Streupräparat; rechts: ausgewählte Partikel, fixiert auf einem Objektträger mit Klebefläche

Die Digitalmikroskopie (Gerät vom Typ *VHX 2000*, Fa. *Keyence*) diente im Rahmen dieser Untersuchungen zur besseren Orientierung auf den Proben während der Mikro-RFA. Die Partikel im Anschliff des Streupräparates und die Partikel auf dem Objektträger mit Klebefläche wurden mit dem Gerät im Auflicht betrachtet und anschließend fotografiert und vermessen.

a.3.1.2. Elektronenoptische und röntgenanalytische Verfahren

Die Untersuchungen mit der Mikrosonde (Elektronenstrahlmikroanalysator vom Typ *JXA 8200 WD/ED combined microanalyzer*, Fa. *Jeol*) dienen der Identifikation von Kupferspezies. Die Dünnschliffe wurden vor der Messung mit Kohlenstoff bedampft. Mit dem Gerät wurden dann qualitative Punktanalysen verschiedener Partikel vorgenommen. Durch die Veränderung von Helligkeit und Kontrast war es möglich besonders die Partikel, die mit schweren Elementen angereichert waren, sichtbar zu machen.

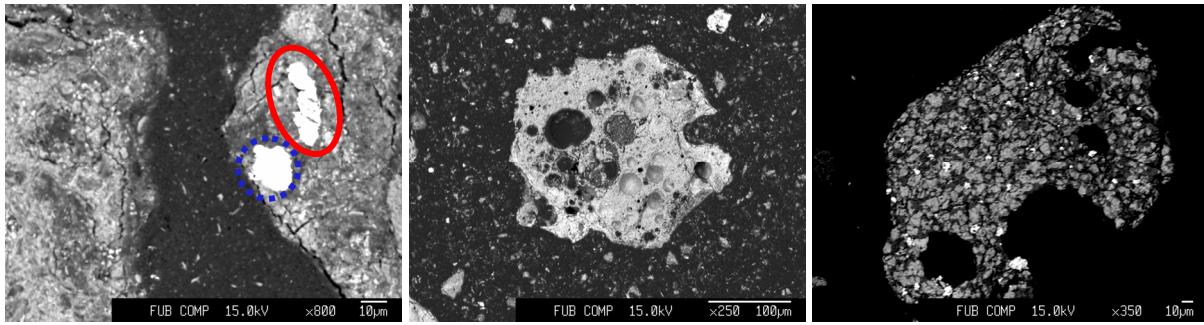


Abb. 6: Rückstreuelektronenbilder der Mikrosonde; links: Cu (rotes Oval) und Pb (blauer gepunkteter Kreis) eingeschlossen in einem Partikel aus Si, Ca und Al; Mitte: poröses Partikel; rechts: heterogenes Partikel aus Fe und Ni

Die Messungen mit dem Röntgen (Pulver)-Diffraktometer (XRD, Typ *Ultima IV*, Fa. *Rigaku*) wurden zur Bestimmung und Identifikation von Kupferspezies genutzt. Untersucht werden sollte auch, ob in den Fraktionen höherer Dichte mehr Kupferphasen identifiziert werden können, als in denen geringerer Dichte. Insgesamt wurden 10 Proben gemahlen, auf die kreisrunden Probenträger gedrückt und vermessen, darunter die einzelnen Fraktionen aus der Schwimm-Sink-Analyse (s. Kap. a.2.4).

Mithilfe der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (Mikro-RFA, Typ *Eagle III µProbe*, Fa. *Röntgenanalytik Systeme*) wurden das Streupräparat und die Partikel auf dem Objektträger mit Klebefläche untersucht. Mit dem energiedispersiven System wurden Punktanalysen der verschiedenen Partikel gemacht. Hierbei wurden die Messparameter innerhalb eines bestimmten Bereiches immer individuell angepasst. Aus jeder Messung resultierten ein Spektrogramm sowie eine Tabelle, welche die semiquantitative chemische Zusammensetzung des Messpunktes angab. Anschließend wurden größere Bereiche der beiden Proben mit dem wellenlängendispersiven System vermessen. Dieses sogenannte Mapping lieferte Elementverteilungsbilder für 16 frei wählbare Elemente. Insgesamt wurden 9 Mappings durchgeführt.

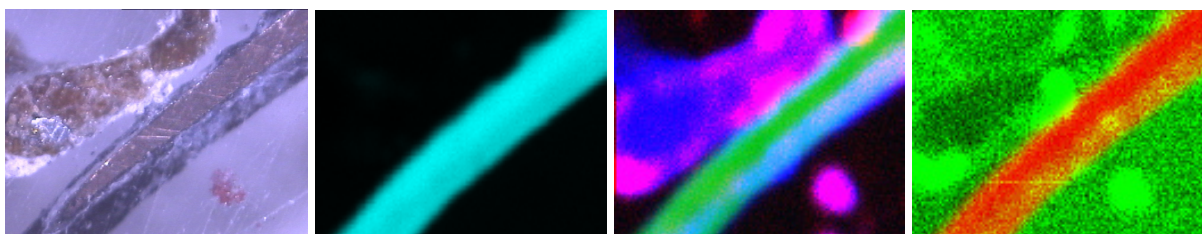


Abb. 7: links: Kupferdraht, Digitalmikroskopie; Mitte links: Elementverteilungsbild Cu (cyan), Mikro-RFA; Mitte rechts: Elementverteilungsbild mit Cu (grün), Ca (rot) und Si (blau), Mikro-RFA; unten rechts: Elementverteilungsbild Cu (rot) und Ti (grün), Mikro-RFA

a.3.1.3. Zusammenfassung und Diskussion

Die Untersuchungen mittels mikroskopischen, elektronenoptischen und röntgenografischen Methoden ergaben, dass sich die Feinkornfraktion (< 4 µm) der HMVA überwiegend aus amorphen Glasphasen, Silikaten (Quarz, Gehlenit-Akermanit, Feldspatkomponenten) und metallischen Phasen zusammensetzte. Durchläufermaterialien wie Papier und Keramik traten in geringen Mengen ebenfalls

auf. Viele der metallischen Bestandteile waren elementares Eisen (Stahl) sowie durch Oxidation entstandene Eisenoxide. Andere Metalle wie Nickel, Chrom und Titan traten als typische Stahlbestandteile häufig nur in Verbindung mit Eisen auf.

Kupfer konnte in verschiedenen Spezies in der Asche identifiziert werden. Am häufigsten trat elementares Kupfer auf. In geringeren Mengen konnten Partikel als Legierung wie Messing (CuZn) und Bronze (CuSn) sowie die Kupferoxide Tenorit (CuO) und Cuprit (Cu₂O) identifiziert werden. Die deutlich erkennbare grüne Farbe einiger weniger kupferhaltiger Partikel lässt vermuten, dass auch das Kupfercarbonat Malachit (Cu₂[(OH)₂ | CO₃]) in geringen Mengen in der Asche vorkam. Der hohe Titananteil, der bei der Messung dieser Partikel auftrat, könnte dadurch erklärt werden, dass Kupfer in Verbindung mit Titan in verschiedenen elektrischen Bauteilen (z.B. Anoden, Kühlvorrichtung in PCs) eingesetzt wird. Zusätzlich zu diesen Kupferverbindungen traten verschiedenste Mischphasen auf in denen Kupfer zusammen mit Calcium, Silicium, Aluminium, Kalium, Schwefel, Titan, Eisen, Chrom und Blei vorkam. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Untersuchungsergebnissen von Arickx et al. (Arickx et al., 2008). Dort werden drei Elementvergesellschaftungen beschrieben, die weitestgehend mit der oben genannten übereinstimmen. Bei ihren Untersuchungen wurde zusätzlich Zink, Magnesium, Chlor und Phosphor gefunden, Kalium tritt in der Vergesellschaftung nicht auf. Das Auftreten von Chlor in Messungen der Mikro-RFA und der Mikrosonde kann durch das chlorhaltige Einbettungsmittel Epoxidharz erklärt werden.

In der gesiebten nicht gemahlten Schlacke war das elementare Kupfer meist umgeben von einer mineralischen Verkrustung, die überwiegend Silicium, Calcium und Aluminium enthielt. Diese Calcium-(Aluminium)-Silikat-Hydrat-Phasen (CASH-Phasen) entstehen durch Alterungsprozesse während der Ablagerung (Speiser, 2001).

Weiterhin entstehen während der Lagerung durch Korrosionsvorgänge Oxidverbindungen auf den Oberflächen gediegener Metalle. Bei den schwarzen Randbereichen der Kupferdrähte (s. Abb. 5) handelt es sich vermutlich um die Kupferoxidverbindung Tenorit evtl. auch mit geringen Anteilen an Cuprit (Arickx et al., 2008). Auch an anderer Stelle (Augsburg et al., 1997) wird das Auftreten dieser Kupferoxide als Deckschicht metallischer Kupferpartikel beschrieben. Beide Minerale konnten mittels XRD identifiziert werden.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass elementares Kupfer die häufigste Kupferverbindung in der Asche war. In geringen Mengen traten Bronze, Messing, Cuprit, Tenorit und Malachit sowie kupferhaltige Mischphasen auf. Die Partikel waren in der Regel umgeben von mineralischen Phasen. In der Siebaufgabe konnte eine Freilegung, Abrundung und Akkumulation von Metallen beobachtet werden.

a.3.2. Induktiv gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektroskopie (ICP-OES)

Alle Kalibrierlösungen und Proben wurden mit den in Tab. 1 aufgeführten Einstellungen an der ICP-OES vom Typ *iCAP 7000* (Fa. *Thermo Fisher Scientific*) gemessen.

Tab. 1: Betriebsbedingungen und Messparameter der ICP-OES

Hersteller/ Typ	Thermo Scientific/ iCAP™ 7000
Gas	Argon
Dispersionselement	Echelle-Polychromator
Anzahl der Messungen pro Probe	2
Plasmaenergie	1150 W
Nebulizer gas flow	0,5 L/min
Acceleration gas flow	0,5 L/min
Messdauer im UV-Bereich	15 Sek.
Messdauer im sichtbaren Bereich	5 Sek.

Zunächst erfolgte jeweils eine externe Kalibrierung derer Elemente, die in der jeweiligen Untersuchung von Interesse waren. Dafür wurden jeweils 5 Standards mit den gewünschten Elementkonzentrationen angesetzt. Anschließend wurden die aus dem Königswasseraufschluss stammenden Proben und Blindwerte gemessen. Da die Konzentrate und Ausgangsproben zum Teil außerhalb des Messbereichs der Kalibrierung lagen, mussten diese bisweilen nachträglich 1:10 verdünnt und erneut gemessen werden.

a.3.3. Dichtemessung

Zur Messung der Dichte der Schwerelösungen (s. Kap. II 1 a.2.4) wurden Aräometer eingesetzt. Diese haben ablesbare Skalen mit zunehmenden Dichtewerten von oben nach unten. Je geringer die Dichte der Flüssigkeit ist, umso tiefer taucht das Messgerät in die Lösung ein.

Für die Dichtemessung der Feststoffe wurde ein Gasverdrängungs – Pyknometer (*AccuPyc 1330*, Fa. *Micromeritics*) verwendet. Dabei wird mit Helium bei konstantem Druck das Restvolumen eines metallischen Probenbechers, der die Probe enthält, bestimmt. Das Gewicht der Probe wird vorher über eine separate Feinwaage bestimmt und vor der Messung eingetragen. Die Berechnung der Dichte erfolgt dann durch das Gerät.

b. Flotation

Flotation ist ein selektiver Prozess zur Abtrennung definierter Bestandteile aus einem Feststoffgemisch. Die Anreicherung erfolgt dabei aus einer Trübe. Zwar kann die Trennung auch über unterschiedliche Flüssigkeiten (z.B. mit Öltropfen und Wasser) erfolgen, im Allgemeinen wird jedoch der Begriff Flotation mit der weit verbreiteten Schaumflotation gleichgesetzt. Dabei werden Gasblasen in eine zumeist wässrige Trübe eingebracht und bilden Korn-Blase-Aggregate mit den zu flotierenden Partikeln. Diese Aggregate steigen auf und lagern die Feststoffpartikel im aufschwimmenden Schaum ab. Der feststoffbeladene Schaum kann dann mechanisch abgezogen werden. Die Selektivität beruht dabei auf unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der zu trennenden Partikel. Aus der genannten Konfiguration ergibt sich, dass die bei der Schaumflotation zu sammelnden Partikel hydrophob sein müssen. Wasserlösliche und hydrophile Partikel bilden keine Korn-Blase-Aggregate und setzen sich auf dem Boden der Flotationseinheit ab. In den allermeisten Fällen reicht der hydrophobe Charakter der Partikel jedoch nicht aus, so dass Chemikalien, sogenannte Sammler, zugesetzt werden, die auf der Oberfläche der zu flotierenden Partikel adsorbieren und deren Hydrophobizität erhöhen. Die Sammler bringen bisweilen ausreichende Schaumwirkung mit sich, so dass in diesen Fällen auf die Zugabe eines expliziten Schäumers verzichtet werden kann. Neben Sammlern und Schäumern, die in fast allen Flotationskonfigurationen eingesetzt werden, kann der Einsatz weiterer Chemikalien sinnvoll sein, z. B. um die Hydrophobizität unerwünschter Begleitpartikel zu senken (Drücker) und deren parallele Anreicherung im Schaum zu minimieren.

Die Flotation als Dreiphasen-System wird durch unzählige Faktoren beeinflusst und gilt bis heute als nicht vollständig verstanden (Shean and Cilliers, 2011). Ergänzend zu den unterschiedlichsten Partikeleigenschaften (Größe, Dichte, Oberfläche etc.) und vielfältigen Flotationschemikalien (auch Dosierung, Wechselwirkungen etc.) seien an dieser Stelle noch die physikalischen-chemischen Eigenschaften der Trübe (pH-Wert, el. Leitfähigkeit, Redoxpotential etc.), die Gasflussraten, die Blasengröße und -verteilung, die Trübedichte und der Trübedurchsatz (in kontinuierlichen Anwendungen) sowie die Schaumeigenschaften erwähnt.

Einmal richtig eingestellt, lässt sich mit einem Flotationsprozess ein sehr hoher Reinheitsgrad der Konzentrate und somit eine hohe Anreicherung erzielen. Aus diesem Grund findet die Flotation bereits seit Anfang des 19. Jahrhunderts in der Aufbereitung von Mineralen aus dem Bergbau breite Anwendung. Die Herausforderung hier liegt in der mechanischen Vorbehandlung der Erze. Vor allem die Freilegung der Minerale von der restlichen Gesteinsmatrix durch Brechen und Mahlen bestimmt maßgeblich die resultierende Ausbeute, erfordert aber auch einen erheblichen Energieeintrag. Die Anreicherungsfaktoren der Flotationsprozesse haben sich im Laufe der Jahre zunehmend verbessert. Zudem ist die Bauwürdigkeit vorhandener Lagerstätten stetig gesunken. Die abgereicherten Reste (Berge) sind mengenmäßig erheblich und enthalten z.T. noch relevante Mengen an Wertmineralien, so dass folgerichtig nach und nach auch die bereits abgelagerten Halden der Berge wieder wirtschaftlich interessant werden.

b.1. Flotation von HMVA

Der bisherige Einsatz der Flotation in der Aufbereitung von Stoffgemischen aus der Abfallwirtschaft und der Sekundärrohstoffgewinnung fokussiert sich vor allem auf die Abtrennung von Störsubstanzen. Beispiele sind die Entfernung von PCB, Chlorbenzolen und unverbrannten Kohlenstoffresten aus Flugaschen (Shean and Cilliers, 2011) und anderen Verbrennungsaschen oder von Druckerschwärze und Tinte aus Recyclingpapier (Vashisth et al., 2011). Anders als in der Mineralaufbereitung stellen hier jedoch die Berge das gewünschte Produkt dar und nur die kleine Menge Konzentrat den Abfall.

Die Flotation von HMVA ist eine besondere Herausforderung. Zu den genannten Einflussfaktoren (s. Kap. b) kommt die Heterogenität der Aschen als Ausgangssubstrat. Das gilt sowohl für die Korngrößenverteilung als auch für die Anzahl unterschiedlicher Bestandteile. Die Oberflächenbelegung dieser Bestandteile ist hingegen durch die nachträgliche Mineralneubildung nach der Nassentaschung und Alterung weitgehend einheitlich (s. Kap. a.3.1 und Abb. 4). Ohne vorbereitende Aufbereitungsschritte ist demnach eine Anreicherung von Wertstoffen aus HMVA mittels Flotation wenig erfolgsversprechend. Unter Umständen führt aber die Abreicherung von Schadstoffen dazu, dass die Berge als Produkt interessant werden könnten. Die Aktivitäten im Rahmen des Projektes zielten jedoch auf die Anreicherung von unterschiedlichen Kupferspezies im Konzentrat.

Da ein Großteil der Erzlagerstätten sulfidisch gebundene Metalle beherbergen, existieren entsprechend viele Erfahrungen mit der Flotation sulfidischer Bestandteile. Oxide werden häufig sulfidisiert (z. B. mit Na_2S oder NaHS) und dann analog zu oder gar in einem gemeinsamen Schritt mit den Sulfiden flотиert (Lee et al., 2009). Seltener sind Anwendungsbeispiele bei denen die Oxide direkt flотиert werden. So existieren zur direkten Flotation oxidisch vorliegender kupferbestandteile lediglich Ansätze (Rao and Finch, 2003, Buckley et al., 2009) und ein Patent (Geyer, 1974) zur Flotation Malachit-haltiger Erze. Vorteil dieser Verfahrensansätze ist der vorgegebene alkalische pH-Wert, der sich in einer Suspension von HMVA schon von alleine einstellt und im Bereich minimaler Löslichkeit von Kupfer liegt. Um den Milieubedingungen vieler publizierter Verfahrensansätze gerecht zu werden, müsste sonst der pH-Wert der Trübe in den sauren Bereich verschoben werden, wodurch relevante Mengen Kupfer in Lösung gehen könnten.

b.2. Flotation von HMVA im Rahmen von ATR

Die Zielvorgaben innerhalb des Projektes waren ein möglichst einfaches Verfahren zu entwickeln und auf die Zugabe von toxikologisch problematischen und / oder teuren Chemikalien weitestgehend zu verzichten, so dass im Sinne angewandter Forschung eine anschließende Implementierung in bestehende Aufbereitungsanlagen realistisch bleibt.

Ein wesentlicher Punkt ist der pH-Wert. Der überwiegende Anteil bestehender Flotationsverfahren zur Anreicherung von Kupfer wird bei sauren pH-Werten durchgeführt. Außerdem liegen die in Erzen enthaltenen Kupferverbindungen vornehmlich sulfidisch vor. Bei HMVA stellt sich aufgrund des enthaltenen CaO

aber ein stark basischer pH-Wert ein. Ein Wechsel von diesem pH-Bereich zu sauren Milieubedingungen, die vielfach für die Anreicherung von Kupfer erprobt sind, ist aber aus diversen Gründen nicht zielführend. Durch die sich ändernden Milieubedingungen würden u.a. auch eine Reihe von Schwermetallverbindungen in Lösung gehen. Äußerst komplexe Prozesswasseraufbereitungen wären die Folge. Die Untersuchungen fokussierten sich daher auf die wenigen Ansätze, die im basischen pH-Wert und zudem auf oxidische Kupferverbindungen angewendet wurden, vor allem auf das Patent zur Flotation nichtsulfidischer Erze (Geyer, 1974).

Die eigenen Voruntersuchungen ergaben, abgesehen von gediegener Kupfer, keine dominierende Kupferspezies (s. Kap. a.3.1). Jedoch wurde hier die HMVA-Fraktion < 4 mm untersucht. Wie dargestellt wird der Anteil vermutlich kleiner, wenn lediglich Fraktionen < 2 mm (wie im späteren Projektverlauf) oder gar Fraktionen, die nicht mehr zurechtgemahlen werden müssten, zur Flotation herangezogen würden. Da die Flotation im Allgemeinen auf eine dezidierte Zielverbindung hin optimiert wird, ein weiterer nicht zu unterschätzender Nachteil.

b.2.1. Geräte zur Durchführung der Flotationsexperimente

Um die grundsätzliche Eignung der Flotationschemikalien für die unterschiedlichen Kupferspezies zu testen, wurden zunächst einfache Gemische mit Sand flo- tiert. Dafür wurde eine sogenannte Hallimond-Röhre verwendet, die in Anlehnung an bestehende Hinweise aus der Literatur konzipiert und anschließend von einem Glasbläser hergestellt wurde (vgl. Abb. 8). Dadurch war es im Gegensatz zu den Versuchen mit der Laborflotationsmaschine möglich den Prozess zu beobachten. Ausprägung und Neigung zur Bildung von Korn-Blase-Aggregaten für die dotierten Kupferspezies (vgl. Kap. b.2.2.3) unter den jeweiligen Milieubedingungen konnten so sehr gut beurteilt werden. Außerdem wurde deutlich weniger Material pro Versuch benötigt, was gerade im Hinblick auf dotierten Kupferspezies ein weiterer Vorteil war.

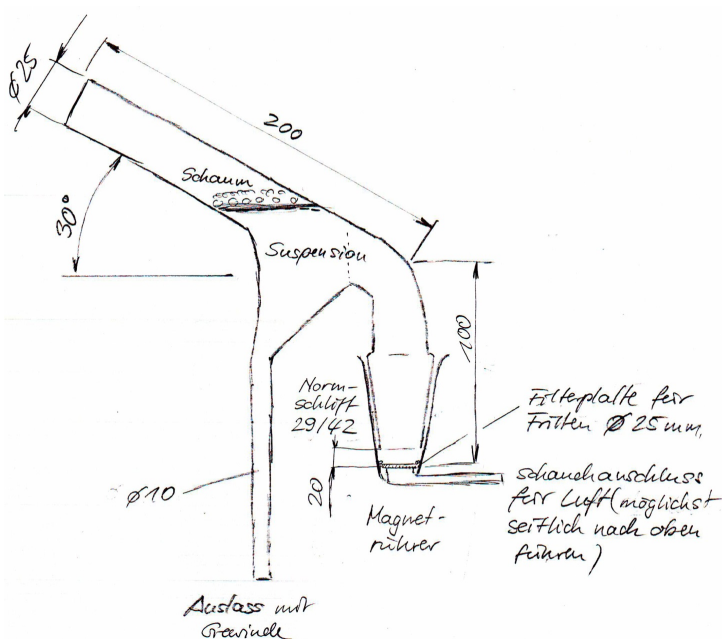


Abb. 8: Schematischer Aufbau der eigens hergestellten Hallimond-Röhre (links) und Trennung von Kupfer und Sand in eben dieser (rechts)

Wird oberhalb des Magnetrührers Luft in die Hallimond-Röhre (s. Abb. 8) eingeblasen, steigen im rechten, senkrechten Rohr viele kleine Luftblasen auf. Haften sich Partikel an diese an, werden die Korn-Blase-Aggregate bis an die Flüssigkeitsoberfläche transportiert. Da diese durch die Krümmung des Rohres versetzt ist, sinken die Partikel nach dem Zerplatzen der Blase bzw. nach dem Auflösen der Schaumschicht in das linke Rohr, wo sich das Konzentrat sammelt.

Bei der Laborflotationsmaschine (Typ 1-6 L / MN 935 / 5, Fa. Humboldt Wedag Coal & Minerals Technology, vgl. Abb. 9 links) wird die Luft durch die Drehung des Rotors eingesaugt. Die Luftzufuhr hängt dabei folglich von der Umdrehungszahl ab, kann aber auch mit Überdruck erhöht werden. Um diese auch herunterregeln zu können, wurde ein Kugelventil vorgeschaltet. Durch die Rotation wird gleichzeitig die Suspension durchmischt, so dass die Feststoffe immer wieder aufgewirbelt werden (vgl. Abb. 9 unten rechts). Die gebildeten Korn-Blase-Aggregate wandern zur Flüssigkeitsoberfläche und vereinen sich mit der Schaumschicht. Ein Teil der beladenen Schaumschicht wandert automatisch über die in den Plastikbehältern integrierte Lippe in ein bereitgestelltes Gefäß (vgl. Abb. 9 oben rechts). Ein Großteil der Schaumschicht muss allerdings entweder nach definierten Zeiten oder nach Beendigung des Versuches manuell abgezogen werden. Für Versuche mit der Laborflotationsmaschine muss daher der Schaum relativ lange stabil bleiben. In der Hallimond-Röhre hingegen kann auch ganz ohne Schaumschicht eine Sortierung erfolgen.

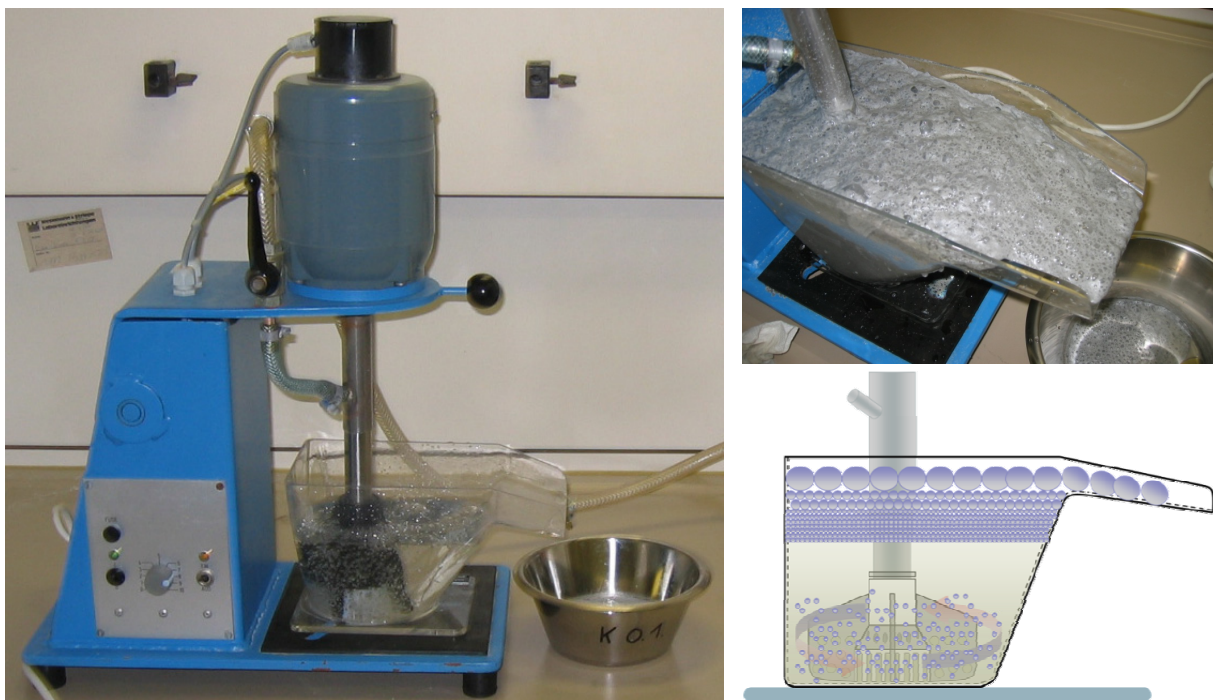


Abb. 9: Laborflotationsmaschine (links); schematische Zeichnung (rechts unten, Quelle S. Lang) und Schaumbildung bei einer Versuchsdurchführung (rechts, oben)

b.2.2. Flotationsreagentien und Additive

Wie bereits (s. Kap. b.2) erwähnt sollten die Versuche im basischen Milieu stattfinden. Um die pH-Werte zu regeln wurden gesättigte Natriumcarbonat-Lösungen

und 12,5%ige Natronlauge eingesetzt. Die weiteren Chemikalien, die im Laufe der unterschiedlichen Versuche zum Einsatz kamen sind in der Tab. 2 gelistet.

Tab. 2: Verwendete Flotationsreagentien, Funktion und Kürzel für die Versuchsansätze

Chemikalie	Funktion	Kürzel	Hersteller
Diesel	Sammler	D	<i>Tanke</i>
Resanol A	Sammler	Res	<i>Ekof GmbH</i>
Sapinol MT+	Sammler	Sap	<i>Ekof GmbH</i>
Kaliummethylxanthogenat*	Sammler	KEX	
Spülmittel	Schäumer	S	<i>Clean and Clever ECO 11</i>
Palmölseife**	Schäumer	P	<i>Sigma-Aldrich (Fluka)</i>
Natriumsilicat	Drücker	D1	<i>J.T.Baker 'Baker Analyzed'</i>
2-Hydroxyethyl Cellulose	Drücker	D2	<i>Sigma-Aldrich</i>
Kupfer(II)-oxid		CuO	<i>GERMED</i>

* KEX Herstellung s. Kap. b.2.2.1; ** Herstellung der Palmölseife s. Kap. b.2.2.2

b.2.2.1. Herstellung von Kaliummethylxanthogenat (KEX)

Zur Herstellung des Sammlers KEX wurde wie in der Literatur beschrieben vorgegangen (Rao, 1971).

Zunächst wurden in einem beheizten Rundkolben 42 g Kaliumhydroxid (KOH) in reinem Ethanol (152 mL) vollständig gelöst. Nachdem die Lösung auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurden unter steter Kühlung mit einem Eisbad nach und nach 45 mL Kohlenstoffdisulfid (CS₂) zugegeben. Nach Beendigung der Reaktion wurde der Überstand abdekantiert. Das gelb-kristalline Fällungsprodukt wurde in einer mit Filter bestückten Nutsche mittels Saugflasche zunächst getrocknet und dann dreimal mit je 25 mL Diethylether gewaschen. Schließlich wurde der Feststoff in einem Exsikkator über Kieselgel im Vakuum getrocknet.

b.2.2.2. Verseifung von Palmöl

Für die Verseifung von Palmöl wurden 20 g Palmöl geschmolzen und dann 70 mL einer 15%igen Natronlauge langsam zu getropft und verrührt. Gleich im Anschluss wurde portionsweise 50 mL bidest. Wasser zugegeben. Währenddessen wurde der Ansatz mit einem Stabmixer zu einer milchigen Emulsion vermischt und kurz erhitzt. Bis zum Abkühlen der Emulsion wurde weiter gerührt, so dass sich die beiden Phasen nicht mehr trennten. Die noch zähflüssige Seife wurde zum Aushärten bei Zimmertemperatur stehen gelassen. Zur Versuchsdurchführung wurde die Seife jeweils durch Zugabe von bidest. Wasser und Erhitzen wieder verflüssigt.

b.2.2.3. Dotierung unterschiedlicher Kupferspezies

Da zur Methodenentwicklung keine Materialien zur Verfügung standen, in denen die relevanten Kupferverbindungen freigelegt vorlagen, wurden diese zugegeben. Zunächst in einem vereinfachten Ansatz zu Sand (Versuche in der Hallimond-Röhre) und im weiteren Verlauf zur HMVA. Dafür wurden die in HMVA üblichen metallischen Kupfer-Komponenten wie gediegenes Kupfer, Bronze und Messing von entsprechenden Bauteilen abgefeilt und anschließend zurechtgesiebt (vgl. Abb. 10). Chemisch gebundenen Kupferverbindungen wie Malachit, Cuprit und

kommerziell erhältliches Kupfer(II)-Oxid (s. Tab. 2 und Abb. 10) wurden zerkleinert, gemahlen und ebenfalls zurechtgesiebt.

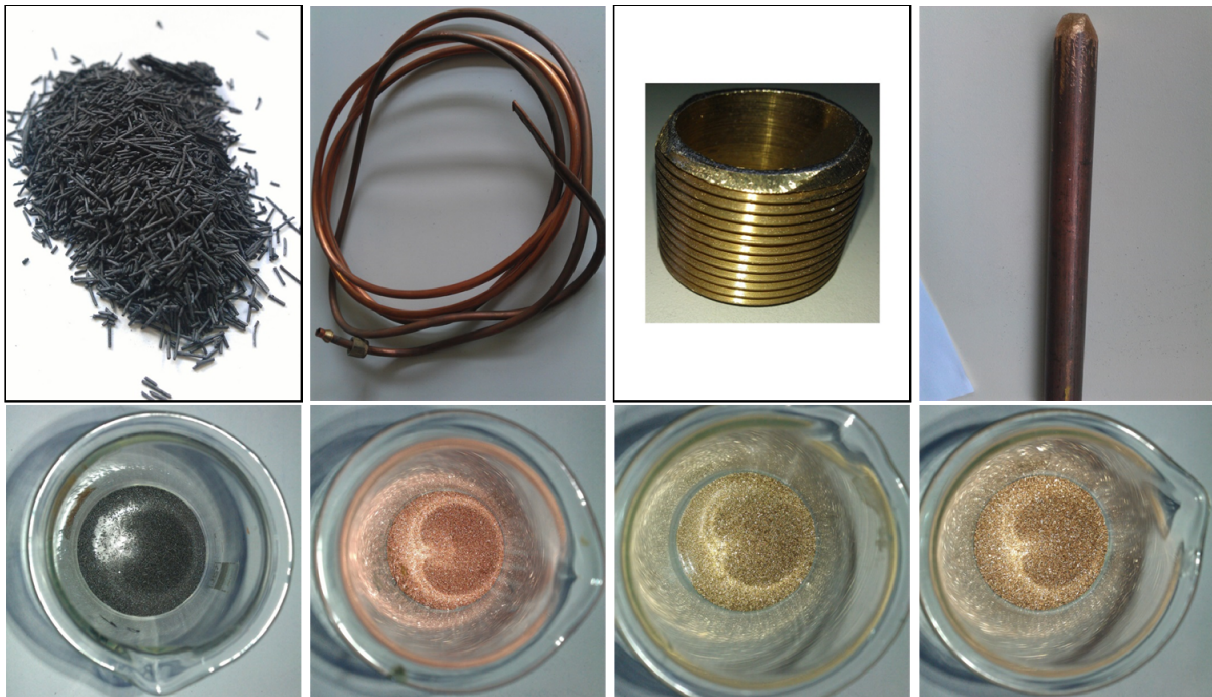


Abb. 10: Kupfer(II)oxid, Kupfer, Messing und Bronze (von links nach rechts) jeweils als Ausgangsmaterial (oben) und zerkleinert (unten) für die Flotationsexperimente

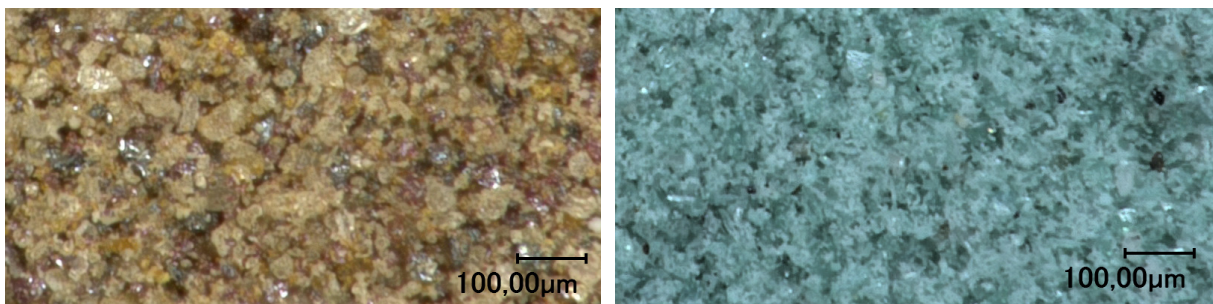


Abb. 11: Cuprit (links) und Malachit (rechts) gemahlen und auf $< 50 \mu\text{m}$ gesiebt, Digitalmikroskop

b.2.3. Versuchsreihen

Für die Methodenentwicklung wurden Kupfer, relevante Kupferlegierungen und chemisch gebundene Kupferverbindungen auf flotierbare Korngrößen zerkleinert (s. Kap. b.2.2.3) und zunächst mit Sand und später mit HMVA vermischt, um sie dann mittels Flotation zurückzugewinnen. Aufgrund zu erwartender Wechselwirkungen zwischen den zugegebenen Chemikalien, ist eine schrittweise Auswahl der unterschiedlichen Chemikalien nicht sinnvoll. So kann nicht zunächst ein geeigneter Schäumer ausgewählt und erst später der beste Sammler ermittelt werden. Ursprünglich war daher angedacht statistische Versuchsplanung für die Ermittlung der optimalen Versuchsbedingungen einzusetzen. Dafür müssen aber zunächst die Versuchsgrenzen sinnvoll abgesteckt werden (Definition der Einflussgrößen und deren Grenzbereiche). Zum Beispiel darf eine Chemikalie durch die Änderung des pH-Wertes nicht in eine andere Erscheinungsform übergehen. Die Versuchsgrenzen galt es also zunächst in Voruntersuchungen zu finden. Die

Anreicherung innerhalb dieser Versuche war jedoch derart unbefriedigend, dass auf die Erstellung eines Versuchsplans zur Optimierung der Flotation von HMVA verzichtet wurde.

Die vorgenommenen Untersuchungen lassen im Nachhinein wie folgt gruppieren:

- Untersuchungen zur generellen Eignung der Flotationschemikalien unter Verwendung der Hallimond-Röhre
- Auswahl und Dosierung des Schäumers
- Auswahl eines geeigneten Versuchsmileus.

Der pH-Wert wurde bei den meisten Versuchen unter Verwendung genannter Chemikalien auf etwa 10 eingestellt (s. Kap. b.2.2). Außerdem kamen die zwei Drücker (s. Tab. 2) einzeln und kombiniert zum Einsatz. Anhand der in Tab. 2 genannten Kürzel lässt sich die Chemikalienszusammensetzung der einzelnen Versuche in den Grafiken (vgl. Abb. 14 und Abb. 15) nachvollziehen.

b.2.3.1. Untersuchung zur generellen Eignung der Flotationschemikalien unter Verwendung der Hallimond-Röhre

Um die grundsätzliche Eignung der Flotationschemikalien für die unterschiedlichen Kupferspezies zu testen wurden zunächst einfache Gemische mit Sand flotiert. In der Regel wurde das Gemisch so hergestellt, dass etwa 5% der Masse aus Wertstoff (Kupferverbindung) bestand. Anhand dieser Versuche erfolgte im Wesentlichen eine qualitative Bewertung der Trennung, des Ausmaßes der Massenausbringung (Sammeln) und des Schaums. In Tab. 3 sind einige Ergebnisse unter Verwendung von Diesel als Sammler zusammengestellt. Dabei wird deutlich, dass Diesel als Sammler unter bestimmten Bedingungen geeignet ist und sogar für unterschiedliche Kupfer-Komponenten wirkt. Natriumhydroxid eignete sich generell nicht so gut als pH-Regler für die Flotation von Kupfer-Komponenten mit dem Diesel als Sammler.

Tab. 3: Qualitative Beurteilung der Flotationsexperimente in der Hallimond-Röhre unter Verwendung von Diesel als Sammler (- schlecht, 0 mittel, + gut)

Palmölseife als Schäumer			Gemisch aus Sand und	Spülmittel als Schäumer		
Schaum	Sammeln	Trennung		Schaum	Sammeln	Trennung
0	+	+	Kupfer(II)oxid	+	+	+
-	+	+	Kupfer	0	0	-
-	+	+	Bronze	0	0	-
-	+	+	Messing	+	+	+
-	0	-	Cuprit			

Grundsätzlich konnte zudem festgestellt werden, dass die Wirkung der Chemikalien unter Verwendung von bidest. Wasser generell besser war als bei der Verwendung von Leitungswasser. Dieses galt besonders für die Schäumer. Wie angedeutet ist die mangelhafte Schaumbildung bei der Verwendung der Hallimond-Röhre aufgrund der Anordnung nicht essentiell. Da die Versuche jedoch auf die

Laborflotationsmaschine übertragen werden sollten, waren auch die Schaumeigenschaften zu berücksichtigen.

Abgesehen von einer Kombination mit Resanol als Sammler und 2-Hydroxyethyl Cellulose als Drücker (D2) für eine Anreicherung von Kupfer(II)-oxid zeigten die Sammler Resanol und Sapinol keine zufriedenstellenden Ergebnisse. KEX wurde erst in späteren Versuchen in der Laborflotationsmaschine getestet. Für die Versuche mit der Laborflotationsmaschine wurde daher im Wesentlichen mit Diesel als Sammler gearbeitet.



Abb. 12: Gute Anreicherung von Kupfer (links) und Kupfer(II)oxid (Mitte) aus Sand mit Diesel als Sammler; rechts: unspezifische Flotation von HMVA in der Hallimond-Röhre, das Ausgangsmaterial wurde fast vollständig ins Flotat überführt

b.2.3.2. Auswahl und Dosierung des Schäumers

Bereits in den Voruntersuchungen mit der Hallimond-Röhre zeigte sich, dass schäumende Wirkung der Palmölseife stark vom Ionengehalt in der Lösung abhängt. In Untersuchungen mit dest. Wasser war die Schaumwirkung noch sehr gut. Bei der Verwendung von Leitungswasser und Sandgemischen wurde hingegen schon deutlich mehr Seife benötigt. Das Spülmittel war auch hier schon deutlich Milieuresistenter.

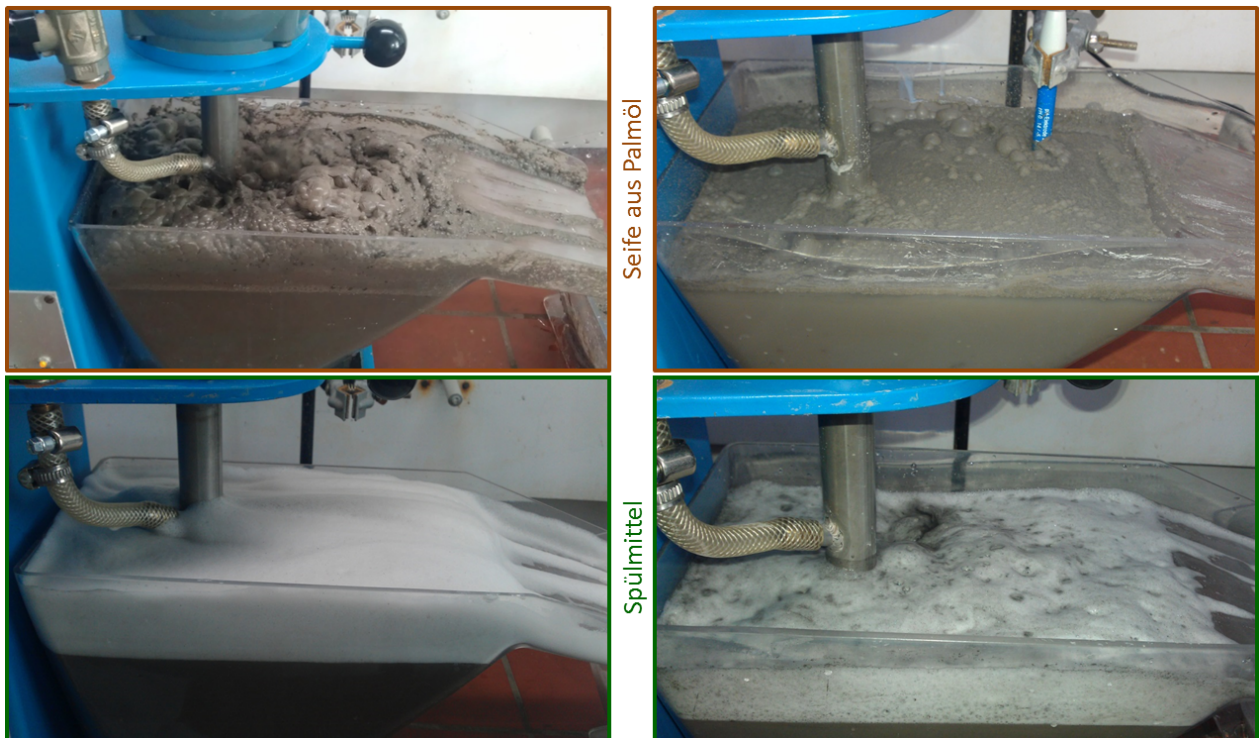


Abb. 13: Flotation von mit Kupfer(-verbindungen) dotierter Hausmüllverbrennungssasche unter Verwendung von Seife aus Palmöl (oben) bzw. Spülmittel (unten) als Schäumer in der Laborflotationszelle.

Bei den Versuchen mit HMVA in der Laborflotationsmaschine war dann zusätzlich zu erkennen, dass aus der Verwendung von Palmölseife im Allgemeinen eine viel zu hohe Massenausbringung resultierte (vgl. Abb. 13 und Abb. 14). Damit ist schon grundsätzlich keine nennenswerte Anreicherung möglich. Zudem musste eine wesentlich größere Menge Seife hinzugegeben werden als im Patent vorgesehen (Geyer, 1974). Bestandteile der HMVA binden ganz offensichtlich die Seife und verhindern eine effektive Schaumbildung (s. Abb. 13 oben rechts).

Zwar konnte die Massenausbringung unter Verwendung der Drücker in den Versuchen mit Palmölseife deutlich gesenkt werden, jedoch ging die Wertstoffausbringung dann im gleichen Maße zurück (vgl. Abb. 14).

Der Schaum aus Spülmittel war hingegen vergleichsweise stabil und zeigt selbst keinen Sammeleffekt (vgl. Abb. 13, unten links). Das Bild unten rechts in der Abb. 13 erscheint optisch bewertet vielversprechend. Es zeigt eine geringe Massenausbringung und einen stabilen abziehbaren Schaum. Doch auch bei solchen Versuchen wurde kein wirklicher Sortiereffekt nachgewiesen (vgl. Kap. b.2.3.3).

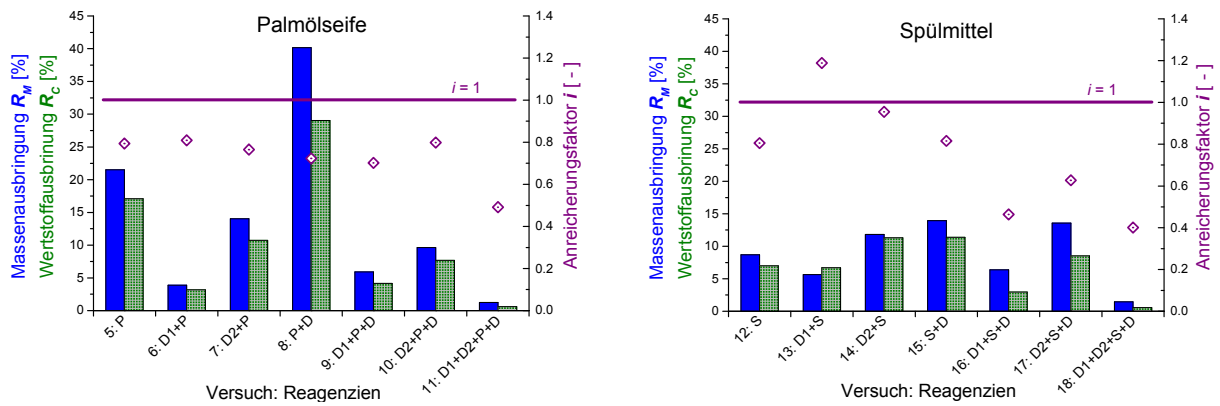


Abb. 14: Massenausbringung, Wertstoffausbringung und Anreicherungs-faktoren bei den Flotationsversuchen von HMVA mit Palmölseife (links) und Spülmittel (rechts); für die Kürzel der Versuchsschemikalien siehe auch Tab. 2

b.2.3.3. Auswahl eines geeigneten Versuchsmilieus

Entsprechend der Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln wurde vorwiegend mit Spülmittel als Schäumer und Diesel als Sammler weitergearbeitet. Die Effektivität der Drücker konnte nicht systematisiert werden, daher wurden Versuche mit den einzelnen Drückern und Kombinationen getestet. Ohne Zugabe von freiliegenden Kupfer-Komponenten lagen die Anreicherungs-faktoren grundsätzlich unter 1 (vgl. Abb. 14). Das bedeutet, dass keine Anreicherung, sondern gar eine Abreicherung in das Flotat stattgefunden hat. Selbst in Versuchen in denen Kupfer in Form von Kupfer(II)oxid (s. Abb. 15, links) oder metallischem Kupfer (vgl. Abb. 15, rechts) zugegeben wurde, fand nur selten eine wirkliche Anreicherung statt.

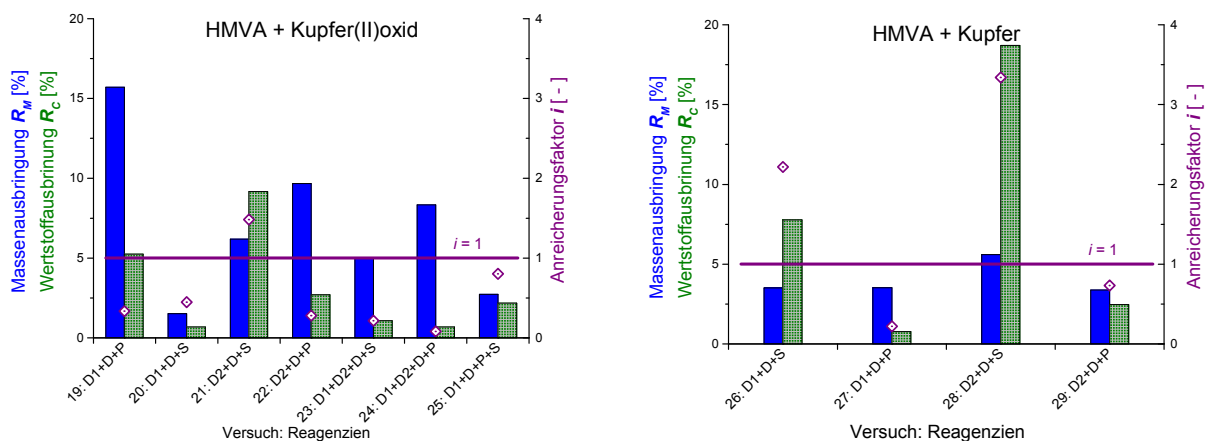


Abb. 15: Massenausbringung, Wertstoffausbringung und Anreicherungs-faktoren bei den Flotationsversuchen von HMVA mit dotiertem Kupfer(II)oxid (links) und Kupfer (rechts); für die Kürzel der Versuchsschemikalien siehe auch Tab. 2

Es fiel auch auf, dass die Ergebnisse, die in der Hallimond-Röhre erzielt wurden, nicht ohne weiteres auf die Laborflotationsmaschine übertragbar waren. So war in der Flotationsmaschine Sapinol besser als Resanol (ohne Schäumer). Eine Anreicherung konnte aber auch in der Laborflotationszelle mit diesen Sammlern nicht erreicht werden (max. Anreicherungsfaktor von $\sim 1,6$ bei Kupfer(II)oxid Zugabe).

Bei der Verwendung von KEX als Sammler und Spülmittel als Schäumer erwies sich der Drücker 2-Hydroxyethyl Cellulose (D2) als ungeeignet für die Flotation von HMVA. Mit Natriumsilikat (D1) ließ sich die Massenausbringung auf $< 10\%$ reduzieren. Im Gegensatz zu den anderen Versuchen gab es auch ohne Zugabe von Kupfer-Komponenten eine leichte Anreicherung (Faktor $\sim 1,6$). KEX wirkte als Sammler gleichermaßen auf Kupfer(II)oxid als auch auf reines Kupfer. Die Mischungen wurden jedoch nicht mit der ICP-OES gemessen, daher mussten die Ausgangskonzentrationen kalkuliert werden. Mit diesen berechneten Werten ergeben sich Anreicherungsfaktoren von über 4 für die dotierte HMVA (sowohl einzeln als auch in paritätischem Verhältnis).

b.3. Schlussfolgerungen

Ein im Vorfeld bekanntes Problem bei der Flotation von HMVA ist, dass die Metalle und Metallverbindungen nicht frei vorliegen. Ganz offensichtlich konnte jedoch auch der Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger der Beta-Linie nicht die Oberflächen der Partikel in den für die Flotation relevanten Korngrößenbereichen freischlagen (vgl. Kap. a.2.5). Eine Vorgabe der Versuche war, dass eine entwickelte Methode in der Praxis umsetzbar bleibt. Eine weitergehende Aufbereitung der HMVA für die Flotation wird kaum wirtschaftlich sein. Doch auch künstlich zugegebene Kupfer-Komponenten ließen sich nicht zurückflotieren. Die Anreicherungsfaktoren sämtlicher Versuchsansätze lagen unter 5%. Vielfach waren im Flotat sogar geringere Kupfergehalte als im Ausgangsmaterial. Dass die Chemikalien grundsätzlich geeignet waren, konnte in den Versuchen mit der Hallimond-Röhre gezeigt werden. Doch die Milieubedingungen, die durch die Suspension von HMVA in der Trübe entstehen, sind derart ungünstig, dass weitergehende Untersuchungen nicht zielführend waren. Auch HMVA aus Trockenentaschung dürfte daher trotz freiliegender Metalle und Metallverbindungen nicht zur Flotation geeignet sein.

c. Dichtesortierung

Dichtesortierprozesse werden schon seit Jahrhunderten für die Trennung mineralischer Rohstoffe genutzt. Allerdings überlagern bei vielen dieser Prozesse andere Einflussgrößen, wie vor allem die Korngrößenverteilung des Trennguts oder in dynamischen Systemen Strömungscharakteristika des Trennmediums, die Dichtentrennung. Wie bereits im Kap. a.2.4 angedeutet, kommt die Schwimm-Sink-Analyse der eigentlichen Sortierung nach Dichte am nächsten. Für die Herstellung der Analysenproben zur Ermittlung der in HMVA enthaltenen Kupferspezies, wurde daher dieses Verfahren bevorzugt (s. Kap. a.3.1, vgl. Kap. c.1). Wie sich zeigte, ist die Verwendung einer Schwimm-Sink-Analyse aber vergleichsweise aufwändig. Eigentlich zeichnen sich Sortierprozesse über die Dichte gegenüber anderen Verfahren eher durch niedrige Investitions- und Betriebskosten sowie niedrige Energieverbräuche aus. In der Regel kann mit Wasser als Fluid gearbeitet werden, so dass zusätzlich zum Wohle der Umwelt auf den Einsatz problematischer Chemikalien oder Lösemittel verzichtet werden kann. Im technischen Maßstab wird Dichtesortierung daher eher durch den Einsatz von Setzmaschinen verwirklicht (Weimann et al., 2003).

c.1. Dichtesortierung von HMVA zur Kupferanreicherung

Zur Charakterisierung der Bindungsformen sind in der Feststoffanalytik zum Teil höhere Gehalte erforderlich als in HMVA enthalten sind. Um eine analysierbare, kupferreichere Fraktion zu erhalten, wurden in einer Untersuchung daher aus fünf verschiedenen Mischungsverhältnissen von Tetrabrommethan und Tetrachlorkohlenstoff Schwerlösungen im Bereich von 2,28 bis 2,96 g/cm³ hergestellt, mit denen auf < 0,4 mm zerkleinerte HMVA getrennt wurde. Im Ergebnis war zwar der Kupfergehalt mit 3,3 mg/kg* in der Fraktion mit der größten Dichte > 2,96 g/cm³ am höchsten, jedoch fanden sich in den anderen Dichtefraktionen Gehalte von 1,86 bis 2,96 mg/kg*, die zudem über 83% des Massenanteils der Asche darstellten. Somit konnte keine nennenswerte Anreicherung erzielt werden. (Augsburg et al., 1997)

**Anmerkung: die Werte sind in der Veröffentlichung in mg/kg angegeben. Unter Berücksichtigung aller anderen Angaben müssten die Werte aber eigentlich g/kg darstellen*

Grundsätzlich liegen die Dichten von reinem Kupfer, Kupferlegierungen und auch der Kupferoxide mit CuO ~6 g/cm³ und CuO₂ ~6,5 g/cm³ in einem Bereich, der eine Dichtesortierung gegenüber der restlichen Mineralik zulässt. Allerdings liegt Kupfer teilweise auch mineralisch gebunden (z.B. als Chalcopyrit CuFeS₂, Dichte ~4,2 g/cm³) und vor allem vergesellschaftet mit anderen Aschebestandteilen vor (Speiser, 2001). Allein die Oberflächenbelegung verringert die Gesamtdichte des Partikels und erschwert somit eine Dichtesortierung, was durch die dargestellten Ergebnisse von Augsburg et al. bestätigt wird. Der Trennschnitt bei 2,96 g/cm³ ist allerdings auch vergleichsweise gering. Ein Trennschnitt bei höherer Dichte führt unter Umständen zu einer deutlich höheren Kupferkonzentration. Um diese zu steigern ist, entsprechend zur Flotation, auch für die Dichtesortierung eine Vorbehandlung der Asche gegebenenfalls sinnvoll.

c.2. Dichtesortierung von HMVA im Rahmen von ATR

Die grundsätzliche Zielstellung der Dichtesortierung im Rahmen des Projektes beschränkte sich auf die Kupferanreicherung aus der Feinkornfraktion von HMVA unter Verwendung eines Zentrifugalsortierers. Um das Verfahren mit der Flotation vergleichen zu können, wurde zur Methodenentwicklung zunächst das gleiche Material verwendet. Anschließend wurden verschiedene, zurechtgesiebte Korngrößenfraktionen der gleichen HMVA, die keiner weiteren mechanischen Beanspruchung unterlagen, untersucht. Nach Fertigstellung der einzelnen Anlagenteile in Wiesbaden wurden mit diesen Materialien jeweils weitere Untersuchungen durchgeführt.

c.2.1. Funktionsweise des Zentrifugalsortierers

Das Zentrifugieren beschreibt das mechanische Verfahren zur Trennung von Suspensionen mithilfe der Fliehkraft als treibende Kraft. Bei dem Falcon Separator SB L40 handelt es sich um eine Vollmantel-Zentrifuge. Dessen wesentliches Merkmal ist eine zylinderförmige, im unteren Teil konisch geformte Schale, die nach oben offen ist (vgl. Abb. 16 und Abb. 17 c und d). Sie besteht aus Kunststoff und ist auf einer drehbaren Welle montiert. Die Rotationsgeschwindigkeit kann so eingestellt werden, dass Kräfte bis 300 G wirken. Durch die Wirkung der schnell umlaufenden Schale werden die Bestandteile an die Wandung gepresst. Vor der offenen Oberkante liegen Ringnuten, in denen in regelmäßigen Abständen, radial verteilte Löcher eingebracht sind. Über diese Düsen wird ein Wasserstrom quer zur Wirkungsrichtung hineingepresst. Neben dem festgelegtem Radius der zylindrischen Schale verbleiben als einstellbare Einflussfaktoren für das Trennverhalten daher die Rotationsgeschwindigkeit und der Wasserdruck, der an diesen Düsen herrscht.

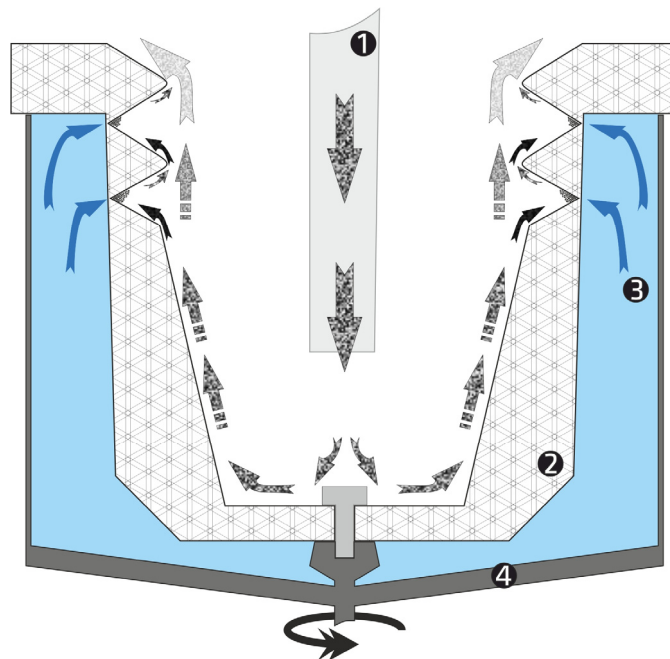


Abb. 16: Schematische Darstellungen des Massenflusses im Zentrifugalsortierer: (1) Zugaberohr für die Suspension, (2) Trennschale, (3) Wasserzulauf für das Gegenstromwasser und (4) mit dem Antrieb verbundene, rotierende Stahlschale.

c.2.2. Versuchsdurchführungen am Zentrifugalsortierer

Der Falcon Separator SB L40 arbeitet in einem halbkontinuierlichen Verfahrenszyklus (Semi-Batch). Das Prozesswasser mit dem suspendierten Feststoff wird kontinuierlich zugeführt und mit den leichteren Partikeln über den Rand gespült. Die Partikel mit höherer Dichte verbleiben in den vertikalen Ringnuten. Nachdem die zu trennende Probe vollständig dosiert wurde, werden der Zulauf und die Rotation gleichzeitig gestoppt. Das Konzentrat verbleibt in der Schale und muss dort anschließend quantitativ herausgespült werden.

Da die zu trennenden Materialien eine hohe Dichte aufweisen, wurden Wasser und Feststoff nicht in einem Vorlagegefäß suspendiert, sondern gemeinsam in die Schale dosiert (vgl. Abb. 17 a). Bei der Sortierung mittels Zentrifugalsortierer wird viel Wasser gebraucht, das aufgrund der Semi-Batch-Konfiguration nicht im Kreislauf geführt werden kann. Daher musste ein geeigneter Auffangbehälter nachgeschaltet werden (s. Abb. 17 b). So konnten auch die überspülten Reste quantitativ aufgefangen und analysiert werden.

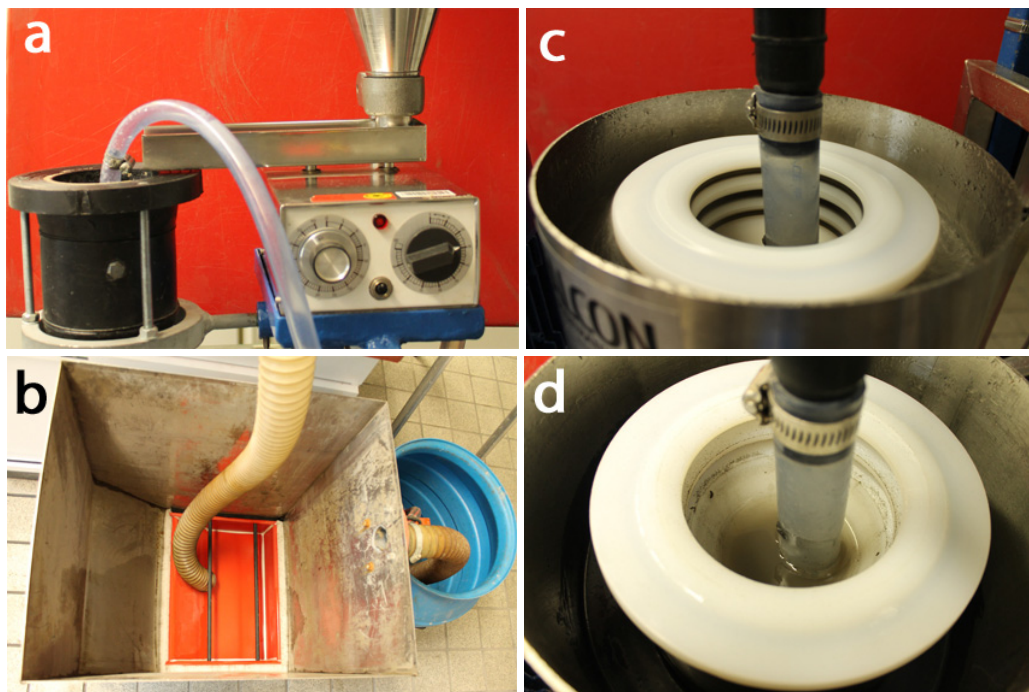


Abb. 17: Selbstkonzipierte Erweiterungen des Falcon SB L 40: Suspensionseinheit (a) und der Auffangbehälter mit entnehmbarem Einsatz (b); rotierende Zentrifugenschale mit Konzentrat in den Rillen (c) und Konzentrat in der Zentrifuge nach Beendigung eines Sortiervorgangs (d).

Zur Einstellung und Erhöhung (vgl. Kap. c.2.3) des Wasserdrucks an den Ringnuten wurde der Versuchszustand für spätere Versuchsreihen mit einer Tauchpumpe (Typ *MP1*, Fa. *Grundfos*) erweitert. Der anliegende Druck wurde mittels Manometer im Zulauf gemessen (vgl. Abb. 18, (7)) und konnte infolgedessen zwischen 1,5 bar (entspricht dem Wasserdruck, den die Leitung im Laborraum erzeugte) und 3,5 bar variiert werden. Abb. 18 zeigt die schematische Darstellung des Versuchszustandes nach abschließender Installation der Pumpe zur Einstellung und Erhöhung des Wasserdrucks an den Ringnuten.

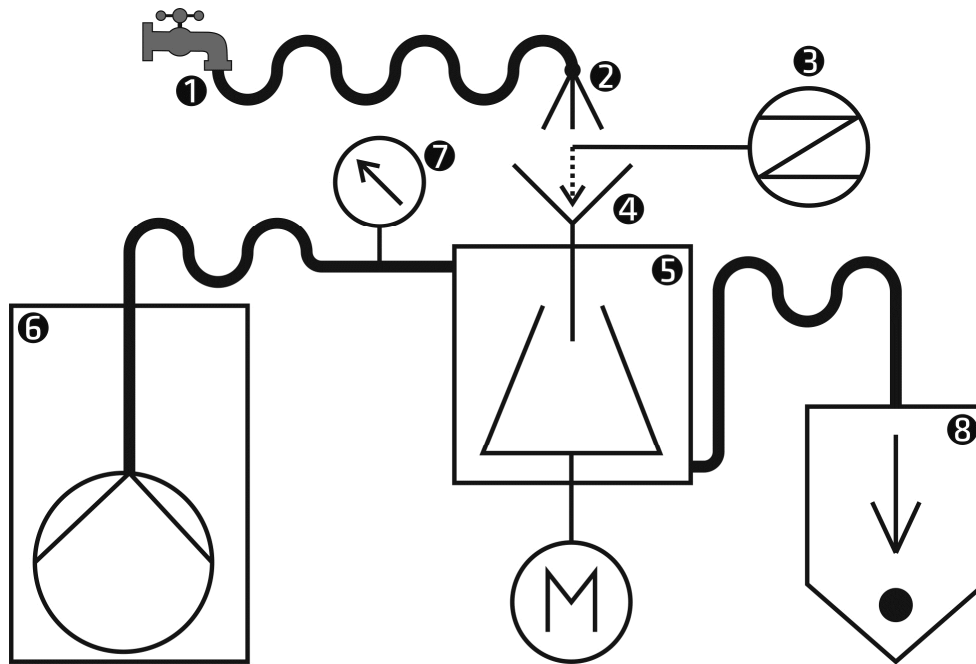


Abb. 18: Schematische Darstellungen des Versuchsaufbaus: (1) Wasserhahn, (2) Düse zur Verteilung des Leitungswassers, (3) Trichter und Vibrationsrinne für die Zugabe des Feststoffs, (4) Trichter zur Suspendierung und Zugabe in die Trennschale, (5) Trennschale, (6) Wasserreservoir mit Tauchpumpe, (7) Manometer und (8) Absetzkammer.

c.2.3. Versuchsreihen

Bereits in den ersten Versuchen mit dem Zentrifugalsortierer stellte sich heraus, dass der Einfluss anderer Parameter, wie die Zugabegeschwindigkeit des Materials über die Vibrationsrinne, vernachlässigbar ist. Als wesentliche Einflussgrößen blieben daher die Rotationsgeschwindigkeit der Schale und der Gegendruck des Wassers durch die Löcher in den Ringnuten. Während des Betriebes kam es immer wieder zu Druckschwankungen in der Wasserleitung. Diese waren am geringsten bei voll aufgedrehten Hähnen, also bei den höchstmöglichen Drücken, die durch die Wasserleitung zur Verfügung gestellt werden konnte. Ein Großteil der Untersuchungen zur Methodenentwicklung wurde daher mit diesem Druck durchgeführt. Trotzdem kam es ab und an zu unkalkulierbaren Druckschwankungen. Später wurde die Versuchsanlage durch die Implementierung einer Pumpe erweitert (s. Kap. c.2.2). Dadurch konnte der Druck konstant gehalten werden und zudem gegenüber der Wasserleitung auch deutlich erhöht werden.

Die wesentlichen Untersuchungen mit dem Zentrifugalsortierer lassen sich wie folgt gruppieren:

- Methodenentwicklung mit dem Material von der Deponie „Schöneicher Plan“,
- Anwendung der optimierten Versuchsbedingungen auf das Material aus der Alpha-Linie und
- Erweiterung der Versuchsanlage und Optimierung der Dichtesortierung für die Kornfraktion 0 – 730 µm aus der Beta-Linie.

c.2.3.1. Methodenentwicklung

Für die Methodenentwicklung wurde zunächst das gleiche Ausgangsmaterial verwendet, das auch für die Flotationsversuche genutzt wurde (s. Kap. a.2.3, HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ < 4 mm mit Walzenbrecher und Schlagkreuzmühle auf < 250 µm zerkleinert).

Aus der Abb. 19 wird deutlich, dass sich mit steigender Rotationsgeschwindigkeit der Schale auch die Massenausbringung ins Konzentrat erhöht. Gegenläufig ist der Trend bezüglich der Dichte des Konzentrates. Beide Trends waren so zu erwarten und verlaufen hier nahezu linear. Bei der geringstmöglichen Rotationsgeschwindigkeit erreicht das Konzentrat eine maximale Dichte von fast 3,76 g/cm³. In diesem Bereich konnte aber nicht die höchste Kupferkonzentration gemessen werden (vgl. Abb. 20). Eine Erklärung dafür könnte sein, dass bei diesen Einstellungen Kupferverbindungen oder kupferhaltige Agglomerate mit niedriger Gesamtdichte in die Berge verlagert werden. In Verbindung mit der sehr geringen Massenausbringung ergibt sich somit für die geringste Rotationsgeschwindigkeit eine unzureichende Wertstoffausbringung von deutlich unter 10%. Bei der nächsthöheren Rotationsgeschwindigkeit von ~510 rpm werden die höchsten Anreicherungs-faktoren erreicht. Die Wertstoffausbringung liegt hier zwischen 15 und 20%. Bei weiter steigenden Rotationsgeschwindigkeiten bleibt diese zwar zunächst konstant, aber die Anreicherungs-faktoren sinken deutlich.

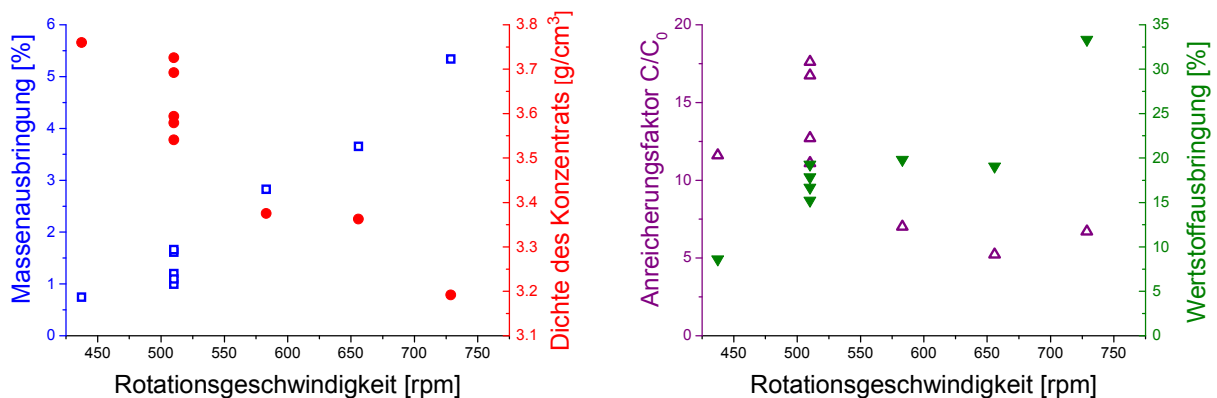


Abb. 19: Massenausbringung und Dichte der Konzentrate (links) sowie Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen (rechts) der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ gemahlen auf < 250 µm

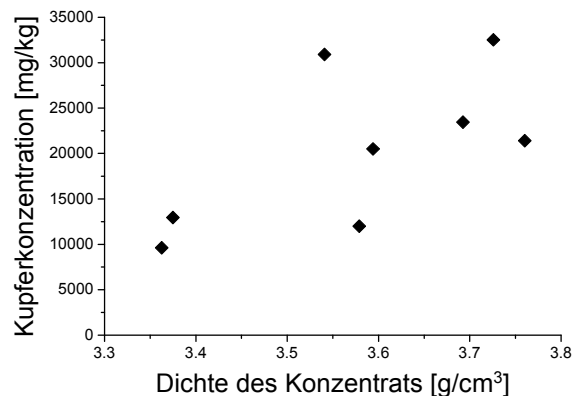


Abb. 20: Konzentration von Kupfer in Abhängigkeit der Dichte des Konzentrates

Für den Korngrößenbereich $< 250 \mu\text{m}$ ergibt sich (bei maximalen Wasserdruck aus der Leitung) somit eine optimale Rotationsgeschwindigkeit von $\sim 510 \text{ rpm}$. Das wird auch durch die Untersuchungen mit lediglich $< 250 \mu\text{m}$ gesiebt Material von der Deponie „Schöneicher Plan“ bestätigt (vgl. Abb. 21). Für größere Kornbandbreiten liegen die optimalen Bereiche erwartungsgemäß bei niedrigeren Rotationsgeschwindigkeiten.

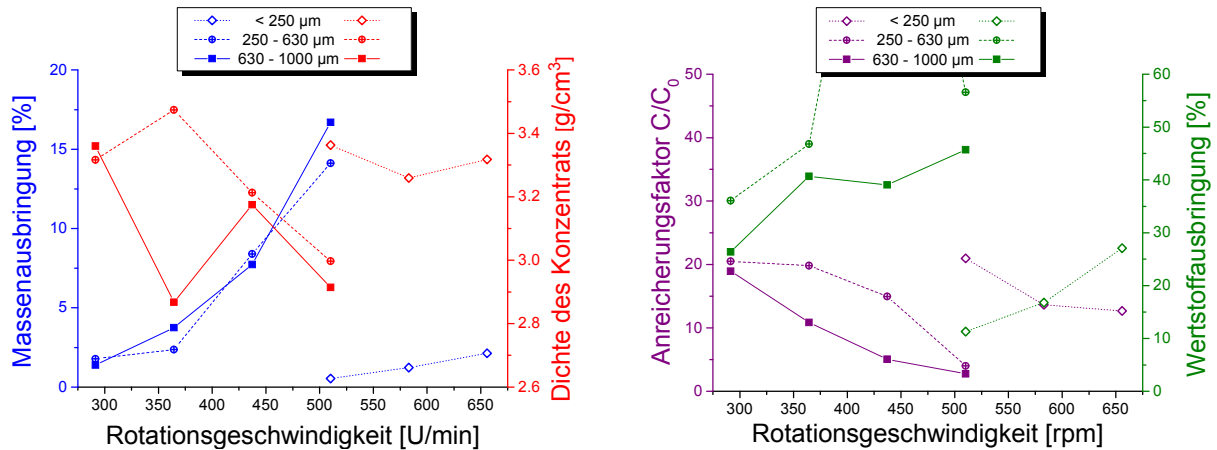


Abb. 21: Massenausbringung und Dichte der Konzentrate (links) sowie Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen (rechts) der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“ unterschiedlicher Korngrößenbe-reiche $< 250 \mu\text{m}$, 250–630 μm und 630–1000 μm (gesiebt, nicht gemahlen)

Obwohl die gesiebten Fraktionen keiner weiteren mechanischen Beanspruchung unterlagen, liegt der Anreicherungs-faktor der Fraktion $< 250 \mu\text{m}$ höher als bei dem zerkleinerten Material. Die Wertstoffausbringung ist hingegen etwas gerin-ger. Die besten Ergebnisse wurden für die Kornbandbreite 250 – 630 μm erzielt. Bei den niedrigstmöglichen Rotationsgeschwindigkeiten konnten bei einem Anreicherungs-faktor von 20,5 rund 36% des Kupfers ins Konzentrat verlagert werden. Diese Werte basieren auf 5 Messungen bei der Rotationsgeschwindigkeit von $\sim 290 \text{ rpm}$. Die Kupferkonzentrationen zu diesen Wiederholungsmessungen sind in Abb. 22 dargestellt. Deutlich wird, dass in diesem Körnungsbereich die Doppelbestimmung des Konzentrats deutliche Abweichungen zeigt. Das Konzentrat ist somit ein sehr inhomogenes Gemisch. Gleichzeitig verdeutlicht Abb. 22 aber auch, dass die Anreicherung im Rahmen dieser Schwankungen ein recht robuster Prozess ist.

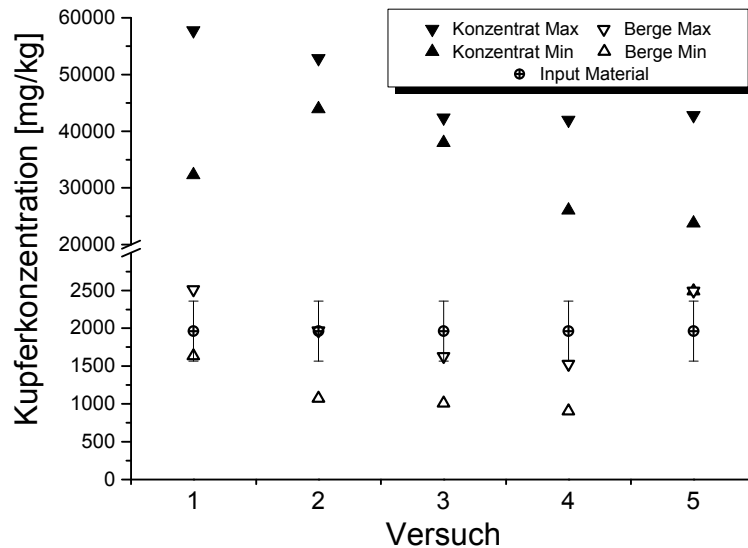


Abb. 22: Wiederholungsmessungen der Zentrifugalsortierung mit HMVA von der Deponie „Schöneicher Plan“, Korngrößen 250 - 630 μm (geseibt, nicht gemahlen)

c.2.3.2. Anwendung auf das Material aus der Alpha-Linie

In der Alpha-Linie des Projektpartners TARTECH werden an zwei unterschiedlichen Stellen der Behandlungskette Fraktionen der Korngrößen $< 2\text{ mm}$ ausgeschleust (Holm and Simon, 2017). Eine Fraktion $< 2\text{ mm}$ wird vor dem Aufschluss mit dem Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger abgesiebt und eine danach. Vor den Untersuchungen lagen keine Kenntnisse über diese neu generierte Feinkornfraktion vor, so dass jeweils beide Fraktionen (vor und nach Aufschluss) einzeln charakterisiert und mittels Zentrifugalsortierung behandelt wurden. Im Rahmen des Gesamtprojektes wurden für die Leistungsbeschreibung der Anlage in Wiesbaden unterschiedliche Chargen HMVA aufbereitet. Für die weitergehende Aufbereitung mit dem Zentrifugalsortierer wurde je eine Fraktion des Projektpartners SRH (direkt nach Verbrennung geliefert und vor Ort gealtert) und eine des Projektpartners BSR (bereits 2009 auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagert) untersucht. Abb. 23 zeigt die Ergebnisse der Siebanalyse und die Kupferkonzentrationen in den einzelnen, zugrunde liegenden Siebfraktionen dieser vier Ausgangsmaterialien.

Ein wesentlicher Unterschied der beiden Chargen ist der Kupfergehalt. Die Charge der SRH hat deutlich höhere Gehalte. Auch hier zeigt sich wieder die steigende Inhomogenität von Proben mit größer werdender Kornbandbreite. Andererseits zeigen die Siebanalysen keine wesentlichen Unterschiede, weder zwischen den einzelnen Chargen der Projektpartner noch zwischen den Fraktionen vor und nach Aufschluss mit dem Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger. Das wird auch durch die optische Begutachtung mit dem Digitalmikroskop bestätigt. Insgesamt nehmen die Unterschiede der Fraktionen vor und nach Aufschluss mit geringer werdender Kornbandbreite ab. Bei größeren Siebfraktionen ist der Einfluss der mechanischen Beanspruchung zum Teil deutlich zu erkennen. Je kleiner die Partikel werden, desto ähnlicher werden sich die Fraktionen. Exemplarisch sind in Abb. 24 die beiden Siebfraktionen 200 - 630 μm des SRH-Materials abgebildet.

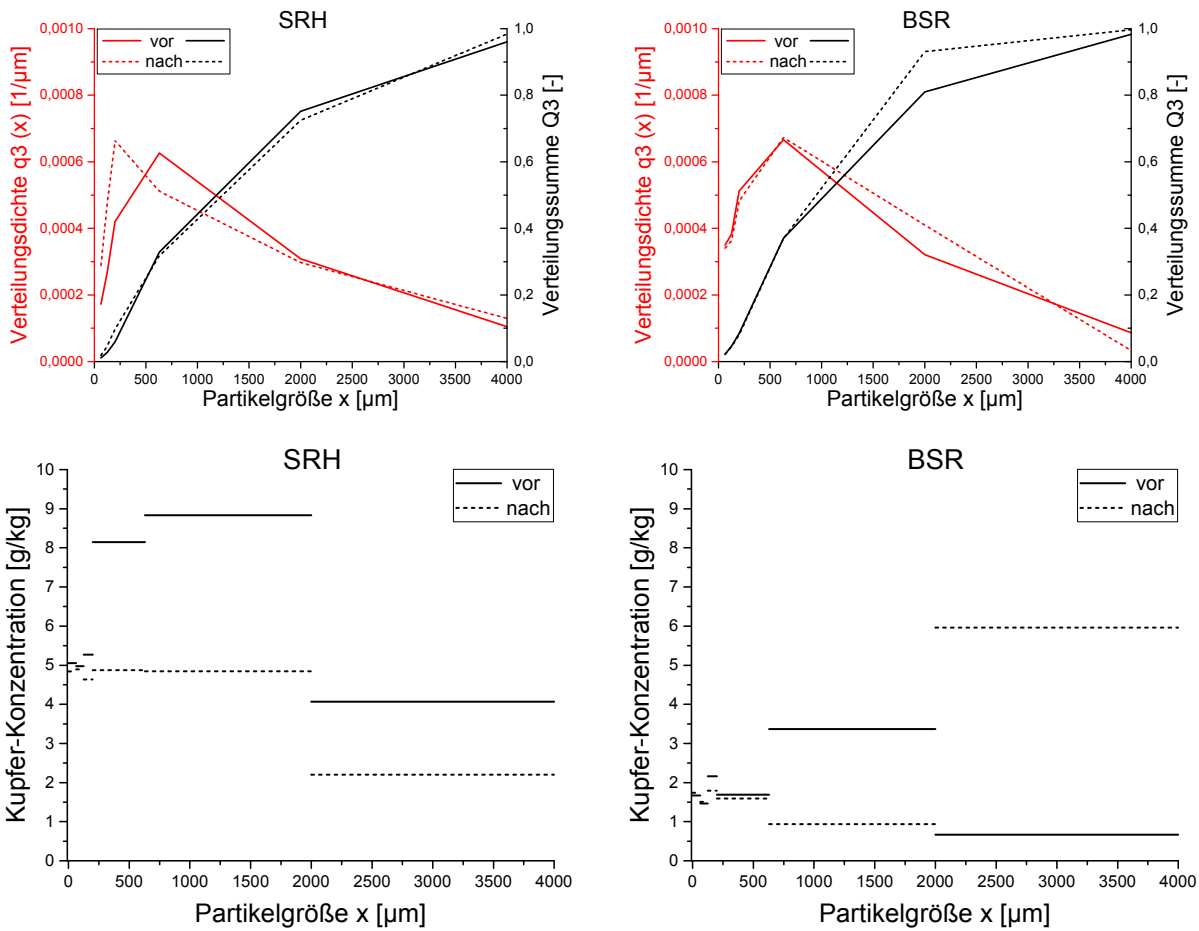


Abb. 23: Verteilungsdichte und Verteilungssumme (oben) der unterschiedlichen Fraktionen < 2mm aus Alpha-Linie in Wiesbaden (SRH-Material: links, BSR-Material: rechts, gestrichelte Linien jeweils nach Aufschluss mit Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger) sowie die Konzentrationen für Kupfer in den zugrunde liegenden Siebfraktionen (unten)



Abb. 24: Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop zum Vergleich der Fraktionen vor und nach dem Aufschluss (hier Siebfraktion 200 – 630 μm des SRH-Materials)

Aufgrund dieser Beobachtungen muss davon ausgegangen werden, dass durch den Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleuniger in diesem Körnungsbereich im Wesentlichen Agglomerate vereinzelt werden, die mechanische Beanspruchung aber nicht ausreicht, um die Oberflächen freizuschlagen. Unklar bleibt

allerdings, warum das Freischlagen der Oberflächen gröberer Partikel sich offensichtlich nicht in der Zusammensetzung der Feinfraktion widerspiegelt.

Für die Aufbereitung mit dem Zentrifugalsortierer wurde bewusst auf eine weitere Zerkleinerung verzichtet. Im Wesentlichen wurde zum Vergleich mit den Ergebnissen aus der Methodenentwicklung mit Siebfraktionen < 250 µm gearbeitet. Entgegen der Ergebnisse aus der Methodenentwicklung ergaben die Versuche mit gröberen Kornbandbreiten geringere Anreicherungs-faktoren. In Tab. 4 sind die Ergebnisse aller Fraktionen < 250 µm zusammengestellt. Die Anreicherungscharakteristik ist in allen Proben nahezu identisch, trotz der unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen der unterschiedlichen Materialien. Gegenüber dem unbehandelten Material von der Deponie „Schöneicher Plan“ (vgl. Abb. 21) ergeben sich geringere Anreicherungs-faktoren (zumeist unter 10) und Wertstoffausbringungen (zwischen 10,8 und 16,9 %). Warum die Ergebnisse aus der Methodenentwicklung zumindest für das Material der BSR vor Aufschluss nicht bestätigt werden konnten, bleibt unklar. Die Annahme, dass der Aufschluss die Möglichkeiten einer Dichtesortierung verbessert, konnte damit nicht bestätigt werden. Allerdings ist die Alpha-Linie (entgegen der Beta-Linie) auch nicht für diesen Feinkornbereich ausgelegt. Die Ergebnisse stehen aber im Einklang mit den Erkenntnissen aus der Materialcharakterisierung, in der keine wesentlichen Unterschiede zwischen den vier Ausgangsmaterialien ermittelt werden konnten.

Tab. 4: Massenausbringungen sowie Gehalte, Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen für Kupfer in den Siebfraktionen < 250 µm aus der Alpha-Linie

Probe	Rm [%]	Kupfergehalte			Kupfer-Anreicherung	
		Ausgang [mg/kg]	Konzentrat [mg/kg]	Berge [mg/kg]	i [-]	Rc [%]
SRH - nach	1,69	4980	44004	3952	8,8	14,9
SRH - nach	1,91	4980	43995	3824	8,8	16,9
SRH - vor	1,43	4413	38430	3858	8,7	12,4
SRH - vor	1,76	4413	27022	4029	6,1	10,8
BSR - nach	1,36	2045	19975	1622	9,8	13,3
BSR - nach	1,96	2045	13498	1757	6,6	12,9
BSR - vor	1,58	2194	20694	1418	9,4	14,9
BSR - vor	1,36	2194	24644	1539	11,2	15,3

c.2.3.3. Erweiterung der Versuchsanlage und Optimierung

Für die Untersuchungen nach Erweiterung des Versuchsstandes (nunmehr gemäß Abb. 18) konnte SRH-Material aus der fertiggestellten und separaten Beta-Linie genommen werden. Für die Beta-Linie wurden die beiden Fraktionen < 2 mm aus der Alpha-Linie entsprechend der generierten Massenanteile vermischt und aufbereitet. Im Wesentlichen wird das Material in der Beta-Linie mit starken Magneten von Oxiden befreit, dann getrocknet und anschließend mittels eines für diese Kornbandbreiten ausgelegten Hochgeschwindigkeits-Rotations-Beschleunigers beansprucht (vgl. (Holm and Simon, 2017)). Der durch Trocknung und Zerkleinerung entstehende Feinststaub wird dabei über den Luftpfad abgesaugt. So sollen

Partikel $< 20 \mu\text{m}$ in einer gesonderten Fraktion abgetrennt werden. Die Siebanalyse (vgl. Abb. 25) und die mikroskopischen Aufnahmen (vgl. Abb. 26) bestätigen, dass das Material $0 - 710 \mu\text{m}$ weitgehend von feinsten Partikeln befreit ist. Dieses Material wird vor Ort nicht weiter aufbereitet und eignet sich ausgehend von den Ergebnissen aus den vorherigen Untersuchungen sehr gut für die weitergehende Aufbereitung anhand des Zentrifugalsortierers. Folglich wurden mit diesem Material die Untersuchungen zur Optimierung der Versuchsbedingungen durchgeführt. Nach dem Aufschluss werden in der Beta-Linie zudem die Siebfraktionen $710 - 1000 \mu\text{m}$ und $1000 - 2000 \mu\text{m}$ generiert, die aber von TARTECH selber großtechnisch weiter aufbereitet werden.

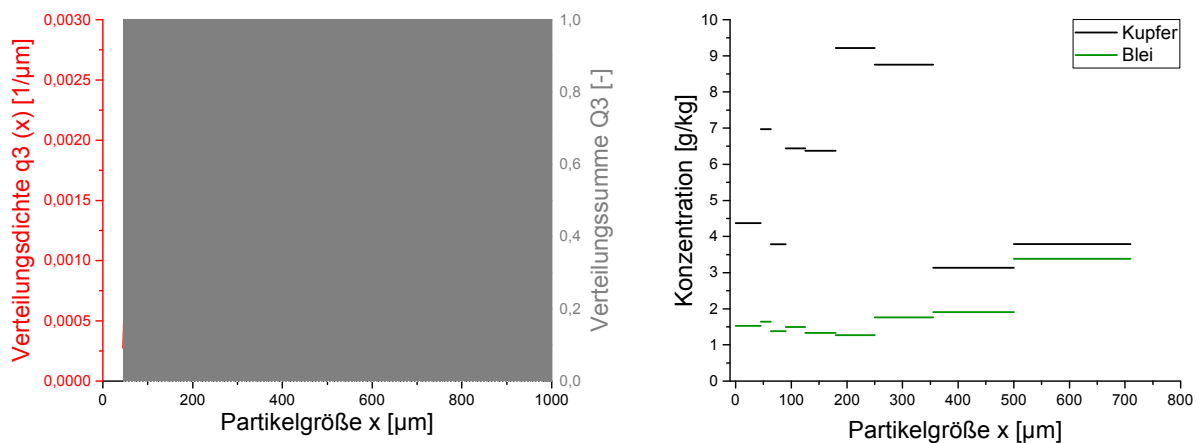


Abb. 25: Verteilungsdichte und Verteilungssumme (links) des Probenmaterials aus der Beta-Linie (HMVA $< 710 \mu\text{m}$) sowie die Konzentrationen für Kupfer und Blei in den zugrunde liegenden Siebfraktionen (rechts)



Abb. 26: Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop der Fraktion $0 - 710 \mu\text{m}$ aus der Beta-Linie (SRH-Material)

Die Siebanalyse zeigt eine bimodale Verteilungsdichte. Somit unterscheidet sich das Material deutlich von den anderen Fraktionen, mit denen eine Zentrifugalsortierung durchgeführt wurde. Außerdem ist, wie bereits erwähnt, der Anteil an Feinstkorn deutlich geringer. Wie anhand der Abb. 26 deutlich wird ist das Material auffallend rundlich. Die Konzentrationen in der gesamten Fraktion $0 - 710 \mu\text{m}$ liegen für Kupfer bei $5,8 \text{ g/kg}$ und für Blei bei $1,1 \text{ g/kg}$.

Durch die Installation der Pumpe konnte der Wasserdruck an den Ringnuten der Zentrifugenschale deutlich erhöht und konstant eingestellt werden. Fraglich war nunmehr, ob sich die Dichtesortierung verbessern lässt, oder ob die Prozesseinstellungen keinen wesentlichen Einfluss auf die Anreicherung haben. Bereits mit dem Wasserdruck aus der Leitung konnten ja Massenausbringungen kleiner 1% realisiert werden. Wie die Ergebnisse in Abb. 27 verdeutlichen, ist die Anreicherung von Kupfer unabhängig von der Prozessführung eine Funktion der Massenausbringung. Bei Massenausbringungen kleiner 2% werden für dieses Material sehr hohe Anreicherungsfaktoren erreicht, die bei 0,5% fast den Wert 90 erreichen. Die Wertstoffausbringung liegt bei diesen Messungen bei rund 30%. Auch bei diesen Versuchsreihen bestätigt sich, dass bei zu geringen Massenausbringungen die Konzentration von Kupfer im Konzentrat abfällt. Wie bereits unter c.2.3.1 diskutiert wird bei diesen Prozessbedingungen offensichtlich Kupfer aus der Schale herausgespült, ob als Agglomerat oder mineralisch gebunden lässt sich mit den vorhandenen Ergebnissen und Untersuchungsmöglichkeiten nicht klären.

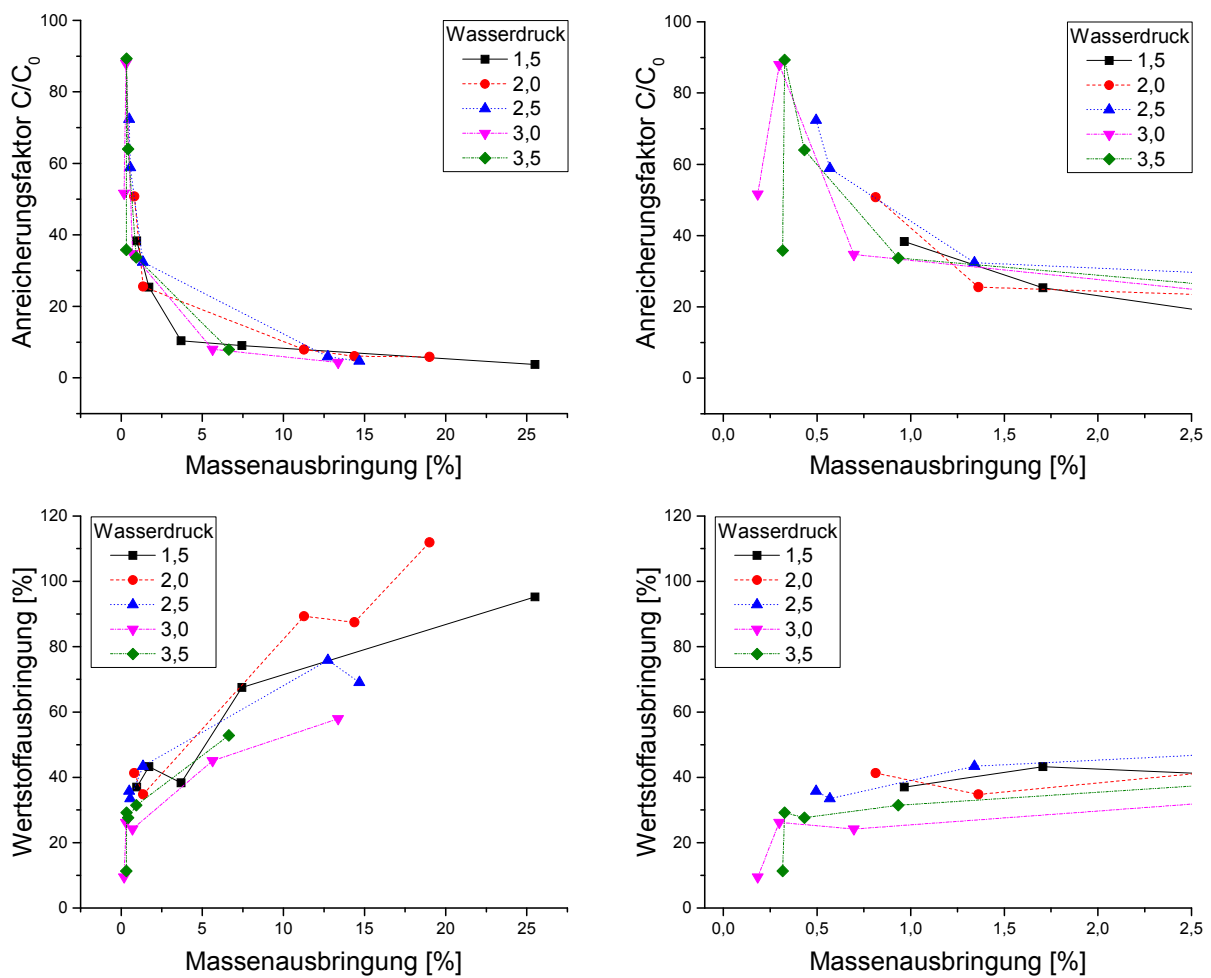


Abb. 27: Anreicherungsfaktoren (oben) und Wertstoffausbringungen (unten) für Kupfer bezogen auf die Massenausbringungen; Eingrenzung der Darstellung auf den für die Anreicherung relevanten Bereich (rechts)

Um die Versuchsbedingungen für das Material aus der Beta-Linie zu optimieren wurde eine Versuchsreihe nach dem Prinzip der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Aus den vorangegangenen Versuchen konnte ein quadratischer Zusammenhang der Einfluss- und Zielgrößen nicht ausgeschlossen werden, daher wurde ein quadratisches Modell mit insgesamt neun Versuchen gewählt. Kriterien zur Festlegung des Versuchsbereichs waren ein hoher Anreicherungs-faktor sowie eine Massenausbringung über 0,5 %. Die Einflussfaktoren Wasser-druck und Rotationsgeschwindigkeit der Zentrifugenschale wurden daher auf je drei Stufen getestet (vgl. Tab. 5). Die Versuche wurden innerhalb von einem Tag in einer randomisierten Reihenfolge durchgeführt.

Tab. 5: Versuchsbedingungen, Massenausbringungen, Gehalte in den Konzentraten, Anreicherungs-faktoren und Wertstoffausbringungen für Kupfer und Blei zur statistischen Versuchsplanung

Einflussfaktoren		Konzentrat		Kupfer	
Druck [bar]	Rotationsgeschw. [rpm]	Massenausbringung [%]	Dichte [g/cm ³]	Anreicherungs-faktor [-]	Wertstoffausbringung [%]
2,25	450	0,67	4,03	37,58	25,29
2,25	510	1,04	3,57	32,59	34,05
2,25	570	1,15	3,5	23,2	26,63
2,5	450	0,42	4,43	49	20,69
2,5	510	0,88	3,66	29,34	25,79
2,5	570	1,06	3,52	28,96	30,83
2,75	450	0,48	4,25	50,34	24,35
2,75	510	0,6	3,99	49,32	29,53
2,75	570	0,6	3,74	43,08	25,95

Die Auswertung der Versuchsreihe ergab, dass beide Einflussfaktoren einen linearen Effekt auf die Zielgröße der Massenausbringung haben. Zudem sind die Effekte nahezu gleich groß und wie erwartet einander entgegengerichtet. Demnach müsste sich in dem Untersuchungsbereich bei höchstem Druck und bei niedrigster Rotationsgeschwindigkeit die geringste Massenausbringung ergeben. Aufgrund der systemimmanenten Schwankungen war das nicht der Fall. Die geringsten Massenausbringungen gingen zwar mit den höchsten Anreicherungen einher, die Wertstoffausbringungen sind hier jedoch nicht am höchsten. Die größte Wertstoffausbringung (34%, bei einem Anreicherungs-faktor von 32,5) ergab sich bei einer Rotationsgeschwindigkeit von ~510 rpm und einem Druck von 2,25 bar.

Eine Anreicherung bestimmter Elemente in das Konzentrat kann auch zu einer Qualitätsverbesserung der Restmineralik, also der Berge führen, sofern es sich um ein Problem- oder Schadelement für eine weitergehende Verwertung handelt. Im Zuge der Untersuchungen zur Wertstoffanreicherung wurde festgestellt, dass die Anreicherung von Kupfer und Blei in das Konzentrat gut miteinander korrelieren (vgl. Abb. 28). Allerdings sinken die Konzentrationen der Elemente in den Bergen bei der Dichtesortierung nicht so stark (s. Tab. 4). Häufig lagen die Konzentrationen des Ausgangsmaterials und der Berge noch sehr dicht beieinander und im Bereich der für dieses heterogene, körnige Material üblichen Schwankungen, die sich aus der Probenvorbereitung, -aufbereitung und Analyse ergeben.

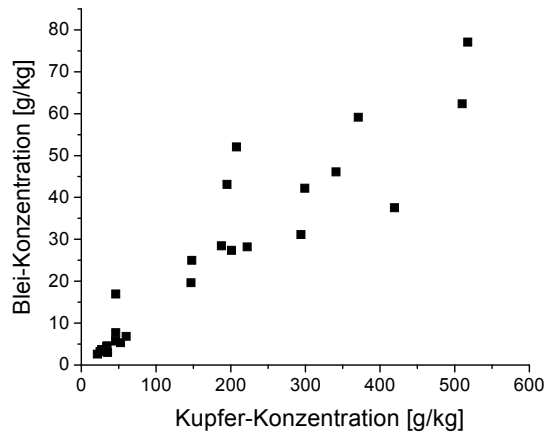


Abb. 28: Korrelation zwischen der Anreicherung von Blei und von Kupfer im Konzentrat

c.3. Schlussfolgerungen

Mit den Untersuchungen zur Dichtesortierung mittels Zentrifugalsortierer konnte gezeigt werden, dass es möglich ist Fraktionen zu separieren, die ansprechend hohe Kupfergehalte aufweisen. Mit den Materialien aus der Alpha-Linie wurden allerdings lediglich Anreicherungsfaktoren um 10 mit Wertstoffausbringungen um 15% erzielt. Ausgehend von den Ergebnissen der Materialcharakterisierung, kann bei diesem Material im Korngrößenbereich < 2 mm allerdings auch von einer nahezu unbehandelten Probe gesprochen werden. Wie schon die Ergebnisse der Methodenentwicklung zeigen, wirkt sich eine Materialbeanspruchung durchaus positiv auf die Kupferanreicherung aus. Besonders deutlich wird dieses bei dem Material aus der Beta-Linie, die speziell für die Behandlung von Korngrößen < 2 mm ausgelegt ist. Mit diesem Material wurden Kupferkonzentrationen von über 500 g/kg im Konzentrat erreicht. Solche Spitzenwerte sind natürlich nicht generell im großtechnischen Maßstab zu realisieren und hängen zudem von den Ausgangsgehalten der eingesetzten HMVA ab, dennoch sind die durchschnittlich erzielten Anreicherungsfaktoren und Wertstoffausbringungen durchaus vielversprechend.

Um mittels Dichtesortierung eine kupferreiche Fraktion zur weitergehenden Verwertung zu gewinnen, müssen den Ergebnissen nach die Prozessbedingungen so eingestellt werden, dass eine Massenausbringung von unter 2 % garantiert wird. Die Dichte des Konzentrates liegt dann in der Regel über $3,2 \text{ g/cm}^3$ und könnte anders als die Massenausbringung ggf. sogar zur Prozesskontrolle herangezogen werden. Mit diesen Ergebnissen bestätigt sich auch, dass der Trennschnitt in der Veröffentlichung von Augsburg et al. zu niedrig war, um eine ansprechende Anreicherung zu erhalten.

Mit dem Zentrifugalsortierer konnten lediglich geringe Mengen Konzentrat hergestellt werden. Die Herstellung einer größeren Menge Konzentrat würde den Weg ebnen mit unterschiedlichen Analyseverfahren Strukturaufklärung zu betreiben. Nach wie vor ist weitgehend unbekannt, in welcher Form das Kupfer in der Feinfraktion vorliegt. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass ein großer Anteil Kupfer in der Restmineralik (den Bergen) enthalten bleibt.

d. Exergetische Bewertung von Ressourcen am Beispiel von HMVA

Der thermodynamische Wert einer Ressource kann definiert werden als die minimale Arbeit, die aufgewendet werden muss, um eine bestimmte chemische Verbindung oder ein chemisches Element aus Materialien in der Umwelt herzustellen (Valero et al., 2002). Diese minimale Arbeit wird als chemische Exergie b_{ch} bezeichnet. Zur Berechnung der chemischen Exergie wurde das Konzept der Referenzumwelt (reference environment, R.E.) definiert (Szargut, 2005). In der R.E. liegen alle Stoffe in ihrer stabilsten Form vor und sind vollständig homogen verteilt. Für jedes chemische Element wurde eine Form (Verbindung oder Element) als Referenzsubstanz bestimmt. Für die drei in HMVA am häufigsten vorkommenden Elemente Ca, Al und Si sind dies die Verbindungen $CaCO_3$, $AlSiO_5$ und SiO_2 , für die Atmosphäre sind es N_2 , O_2 , Ar und CO_2 und für das Meereswasser z. B. Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} . Aus den definierten Referenzsubstanzen lassen sich die chemischen Exergien der Elemente $b_{ch\ el}$ (Rivero and Garfias, 2006) und daraus die Exergien aller chemischen Verbindungen b_{ch} berechnen:

$$b_{ch}^0 = \Delta_f G^0 + \sum n_{el} b_{chel}^0$$

mit $\Delta_f G^0$ als Freie Bildungsenthalpie und n_{el} der Anzahl mol der Elemente in einer Verbindung.

Die Exergie der Referenzsubstanzen beträgt 0 kJ/mol bei einer Konzentration, die einer vollständig homogenen Verteilung entspricht. Die minimale Arbeit durch Aufkonzentrierung zu den reinen Substanzen kann mit Hilfe der molaren Konzentration x_i berechnet werden. Die Gleichung gilt streng genommen nur für ideale homogene Lösung.

$$b_{conc} = -RT \ln x_i$$

So beträgt der Wert für b_{ch} für reines Gold (Referenzsubstanz) 50,6 kJ/mol, was einer molaren Konzentration von $1,36 \times 10^{-9}$ (Konzentration in der Erdkruste) entspricht, reiner Sauerstoff hat einen Wert von $b_{ch}=3,92$ kJ/mol entsprechend der Arbeit für die Aufkonzentrierung von 20,54 Vol.% in Luft. Bei diesen Werten handelt es sich um das thermodynamische Minimum. In der Realität werden deutlich höhere Energien für die Aufkonzentrierung benötigt, bei Sauerstoff 237 kJ/mol (Szargut, 2005), bei Gold ist die tatsächliche Arbeit sogar um den Faktor 422879 höher (Valero et al., 2010).

Die chemische Exergie einer Mischung b_{ch} kann aus den Exergien der beteiligten Substanzen $b_{ch\ i}$ und dem konzentrationsabhängigen Anteil berechnet werden:

$$b_{ch} = \sum x_i (b_{chi} + RT \ln x_i)$$

Eine solche Berechnung wurde mit den 291 wichtigsten Mineralen und Metallen für die Erdkruste durchgeführt. Die Exergie wurde dabei zu 3,63 kJ/mol bestimmt

(Valero et al., 2012). Mit der gleichen Formel kann die Exergie einer typischen HMVA ermittelt werden. Die Daten dazu sind in Tab. 6 gelistet.

Tab. 6: Berechnung der chemischen Exergie einer typischen HMVA. Die Werte für $b_{ch\ i}$ und x_i sind der Literatur entnommen (Rivero and Garfias, 2006, Song et al., 2012, Valero et al., 2012)

Subst.	$b_{ch\ i}$ (kJ/mol)	C (g/kg)	x_i in HMVA (mol/mol)	x_i in Erdkruste (mol/mol)	$x_i b_{ch\ i}$	$x_i RT \ln(x_i)$	b_{ch} (kJ/mol)
SiO ₂	1.64	337.81	3.99E-01	5.91E-01	0.6541	-0.9144	-0.2603
CaO ^a	129.88	84.75	1.07E-01	1.24E-02	13.9241	-0.5971	13.3270
K ₂ O ^b	7.4	18.28	1.37E-02	6.55E-02	0.1017	-0.1470	-0.0453
P ₂ O ₅ ^c	32.4	49.43	2.47E-02	1.24E-03	0.7995	-0.2278	0.5717
Al ₂ O ₃	4.48	161.44	1.12E-01	6.55E-02	0.5028	-0.6123	-0.1095
MgO	62.42	12.29	2.16E-02	1.18E-03	1.3482	-0.2066	1.1416
Fe ₂ O ₃	17.66	134.33	5.96E-02	1.30E-03	1.0523	-0.4192	0.6331
SO ₃ ^d	16.6	6.50	5.76E-03	1.24E-04	0.0956	-0.0741	0.0215
Na ₂ O ^e	4.8	49.72	5.68E-02	7.98E-02	0.2727	-0.4064	-0.1337
TiO ₂	21.22	10.52	9.32E-03	5.29E-04	0.1979	-0.1087	0.0891
NaCl	14.3	3.63	4.40E-03	1.57E-03	0.0630	-0.0596	0.0034
CuO ^f	6.5	2.07	1.85E-03	5.62E-05	0.0120	-0.0290	-0.0170
ZnO	22.9	4.61	4.01E-03		0.0919	-0.0552	0.0367
PbO	46.9	1.70	5.39E-04		0.0253	-0.0101	0.0152
Al	795.7	18.00	4.72E-02	0.0000	37.5781	-0.3596	37.2185
Cu	132.6	4.80	5.35E-03	6.05E-07	0.7100	-0.0698	0.6402
Fe	374.3	100.00	1.27E-01	0.0000	47.4759	-0.6532	46.8227
Summe		1000	1.0		104.6275	-4.9501	99.9550

^a Wert für x_i in der Erdkruste von Calcit (CaCO₃)

^b Wert für $b_{ch\ i}$ und x_i in der Erdkruste von Orthoclas (KAlSi₃O₈)

^c Wert für $b_{ch\ i}$ und x_i in der Erdkruste von Apatit (Ca₅(PO₄)₃OH)

^d Wert für $b_{ch\ i}$ und x_i in der Erdkruste von Gips (CaSO₄)

^f Wert für x_i in der Erdkruste von Chalcopyrit (CuFeS₂)

Zur Vereinfachung wurden die beteiligten Elemente als Oxide berechnet (Ausnahmen: NaCl und zusätzlich zu den Oxiden die drei elementaren Metalle Fe, Cu und Al)(Faulstich, 1993). Es ist zu erkennen, dass viele Substanzen in HMVA gegenüber der Erdkruste angereichert sind, CuO z. B. um den Faktor 33, elementares Kupfer sogar um mehr als den Faktor 8800. Elementares Eisen und elementares Aluminium gibt es in der natürlichen Erdkruste gar nicht. Daher ist der Wert für die Exergie von HMVA mit knapp 100 kJ/mol deutlich höher als der der Erdkruste. Den größten Anteil daran haben die elementaren Metalle Eisen und Aluminium. Es folgt der Anteil von CaO. Die Exergie b_{ch} von CaO (gebrannter Kalk) liegt bei 129,9 kJ/mol und führt zu dem hohen Anteil von mehr als 13 kJ/mol. Die Exergie b_{ch} von CaCO₃ (Kalkstein) liegt bei nur 17,2 kJ/mol, so dass ein deutlich geringerer Wert resultieren würde. Vermutlich liegt Ca in HMVA nicht ausschließlich als CaO vor. Beim Alterungsprozess reagiert CaO in jedem Fall zu CaCO₃.

Vom exergetischen Standpunkt ist die Abtrennung von CuO ($b_{ch}=6.5$ kJ/mol) aus der HMVA wenig sinnvoll, da für die Herstellung von Kupfer aus CuO mehr als 120 kJ/mol aufgewendet werden müssen. Technisch werden oxidische Erze von Kupfer hydrometallurgisch (Gewinnungselektrolyse in H_2SO_4) zu Kupfer aufgearbeitet. Dagegen wird bei der Herstellung von Kupfer aus sulfidischen Erzen ($b_{ch}(CuFeS_2)= 1530,5$ kJ/mol) die überschüssige Exergie aus der Oxidation des sulfidischen Schwefel zu Schwefelsäure genutzt, um zusätzlichen Kupferschrott einzuschmelzen. Auch für Fe_2O_3 ($b_{ch}=17.7$ kJ/mol) resultiert nur ein geringer Anteil an der gesamten Exergie. Falls jedoch die Eisenverbindungen statt als Hämatit in der Form von Magnetit vorliegen, fällt die Exergiebilanz günstiger aus ($b_{ch}(Fe_3O_4)= 116,3$ kJ/mol).

Die exergetischen Berechnungen stellen jeweils den thermodynamischen Minimalaufwand dar. In der Technik sind die Exergieaufwände bei der Aufkonzentrierung (s.o.) und der eigentlichen Herstellung deutlich höher. So ist die kumulative Exergieeffizienz (cumulative exergy efficiency, CExE) der Roheisenherstellung 30,6%, der Herstellung von Aluminium aus Al_2O_3 13.2% und der der Kupferproduktion aus sulfidischen Rohstoffen sogar nur 1,4% (Szargut, 2005). Die tatsächlichen Exergieverbräuche liegen also um die Faktoren 3,2 (Fe), 7,6 (Al) bzw. 71,4 (Cu) höher (Szargut, 2005).

e. Allgemeine Schlussfolgerungen

Die erhöhte Metallausbeute durch die verbesserte HMVA Aufbereitung hat deutliche ökologische Vorteile. Diese beruhen im Wesentlichen auf der Energieeinsparung im Vergleich zur Metallproduktion aus Erzen und damit verbunden dem Treibhauspotenzial (Eisen hat hier wegen der Menge den größten Anteil) und der Schonung natürlicher Ressourcen (hier vor allem Kupfer).

Die sich abzeichnenden Veränderungen rechtlicher Vorgaben (Mantelverordnung derzeit im 3. Arbeitsentwurf, darin: Einführung einer ErsatzbaustoffV und Novelierungen der DepV, BBodSchV und GrwV) lassen erwarten, dass der Absatz von HMVA in die konventionellen Wege verändern wird. Bereits heutzutage ist es problematisch, die aus der HMVA erzeugten mineralischen Fraktionen am Markt zu platzieren, sie werden wieder zunehmend deponiert. Physikalische und chemische Verfahren und Verfahrenskombinationen zur Rückgewinnung verschiedener Rohstoffe aus HMVA sind daher weiterzuentwickeln, um den künftigen Ansprüchen gerecht zu werden. Aktuelle Marktentwicklungen fokussieren allerdings hauptsächlich auf die Erhöhung der NE-Metallausbeute, in deren Folge sich der bisher nicht verwertbare, mineralische Feinanteil erhöht. Neben der Rohstoffverwertung der gröberen mineralischen Fraktionen (z.B. für den Straßenbau oder Beton und Asphaltindustrie) rückt damit auch die mineralische Feinfraktion (z.B. für die Zementklinkerproduktion) in den Vordergrund. Von den untersuchten Methoden hat zumindest die Dichtesortierung ein Potential zur weitergehenden Verarbeitung von HMVA. Im Mittelpunkt stehen dabei jedoch nicht die Massemetalle wie Kupfer oder Zink, sondern Edelmetalle wie Gold und Silber, sowie vor allem auch die Verbesserung der Qualität der Restmineralik für eine weitergehende Verwertung.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gegenüber den ursprünglichen Planungen (Finanzierungsplan vom 19.02.2012) ergaben sich letzten Endes nur geringe Verschiebungen. Der abschließende Finanzierungsplan ist vom 26.08.2015. Darin sind die Personalmittel leicht gesunken (195.904 € statt ursprünglich 199.404 €) stellen aber trotzdem noch mit Abstand den höchsten Kostenpunkt dar. Die Ausgaben für die studentische Hilfskraft (Position 822) wurden darin um 500 € auf 6.800 € erhöht.

Die frei werdenden Mittel wurden in die Position 843 (sonstige sächliche Verwaltungsausgaben) verschoben. Über 8.000 € wurden hier für neue Mahlbecher der Planetenkugelmühle benötigt. Zusammen mit den ebenfalls sehr kostspieligen, neuen Aufschlussgefäßen (insgesamt über 5000 €) für die Mikrowelle war so schon ein Großteil der letzten Endes 30.000 € in dieser Position gebunden. Hinzu kamen weitere Mittel für die Probenvorbereitung und Analyse (Gase, Chemikalien) z.B. für das Polywolframat für die Schwimm-Sink-Analyse.

Unter Berücksichtigung der unveränderten Mittel für Dienstreisen (9.000 €, Position 846) ergibt sich die Gesamtzuweisung von 234.904 €.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, bestehen die zugewiesenen Mittel zu über 80% aus Personalkosten. Die Aufgaben in diesem Teilprojekt waren sehr heterogen, so dass die teilweise Unterstützung durch eine studentische Hilfskraft für die Durchführung von Versuchen im Labor und im Technikum angemessen war. Auch waren die Herausforderungen, die an den Stelleninhaber gestellt wurden, ausgesprochen hoch. Gleich zu Beginn des Projektes gab es den Patentrechtsstreit mit Beteiligung der Öffentlichkeit (Interviews mit der Presse etc.). Hinzu kamen die internen Probleme durch die Verzögerungen bei dem Projektpartner TARTECH eco industries AG. Der Bau der Anlage war aber ein zentrales Arbeitspaket des Verbundprojektes. Die Berücksichtigung einer E14-Stelle, also eines vergleichsweise erfahrenen Wissenschaftlers, hat sich damit mehr als gerechtfertigt.

Die Kosten für die neuen Mahlbecher waren im Rahmen des Projektes nicht eingeplant, daher war die unter Kap. II 2 dargestellte Mittelverschiebung vonnöten. Ursprünglich wurde nicht davon ausgegangen, dass die Zerkleinerung, das Homogenisieren und das Herunterteilen auf die Mengen, die für die einzelnen Versuche gebraucht werden, so umfangreich werden. Auch diese Arbeiten sind z. T. Folgen des verzögerten Anlagenbaus. Alle anderen Kosten sind im Rahmen üblicher Ausgaben, die für die Durchführung von verfahrenstechnischen Versuchen im Labor und Technikum inkl. der Analysen anfallen. Gleiches gilt für die Mittel für Dienstreisen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist in vollem Umfang gegeben. Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Projektes stellt sich zum Teil äußerst aussichtsreich dar und wird im Folgenden erläutert.

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die BAM selbst verfolgt keine wirtschaftlichen Interessen. Dennoch waren die Untersuchungen stets so ausgerichtet, dass eine spätere Implementierung der Verfahren in der Praxis realistisch bleibt.

Die Ansätze zur Flotation der Feinfraktion von HMVA führten zu keinen verwertbaren Verfahrensansätzen. Das Patent war eine gute Grundlage, um ohne komplexe Chemikalienmixturen im gegebenen pH-Milieu arbeiten zu können. Die getesteten Erweiterungen (z.B. KEX als Sammler) blieben in diesem Rahmen, führten aber wie dargestellt zu keinen zufriedenstellenden Anreicherungen.

Anders stellt es sich bei den Versuchen zur Dichtesortierung mit dem Zentrifugalsortierer dar. Zwar handelte es sich hier um ein Gerät, dass eher in den Bereich Labormaßstab einzuordnen ist (Verarbeitung von etwa 200 mg Ausgangsmaterial), die wirkenden Kräfte lassen sich jedoch ohne weiteres auf größere Maßstäbe übertragen. Auch gibt es in anderen Wirtschaftszweigen bereits Einsatzgebiete für Zentrifugalsortierung im großtechnischen Maßstab. Ein Upscaling, der im Rahmen des Projektes erlangten Erkenntnisse, könnte daher durchaus realistisch sein. Der Projektpartner TARTECH hat diesbezüglich schon Interesse an Folgeprojekten geäußert.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die exergetischen Betrachtungen zu nennen. Um Aufwand und Nutzen jeglicher zusätzlicher Aufbereitungsschritte realistisch abschätzen zu können, sind diese neuen Ansätze äußerst interessant. Auch in diesem Zusammenhang wurde seitens TARTECH der Wunsch nach einer Fortführung der wissenschaftlichen Zusammenarbeit bereits angedeutet. Die wissenschaftlichen Ansätze, die bei der BAM verfolgt werden, haben in der Regel einen hohen Anwendungscharakter. Dass auch ein solches Thema das Interesse der Wirtschaft weckt, ist als sehr positiv zu bewerten.

Der Ansatz der Dichtesortierung wird in einem Folgeprojekt weiterverfolgt (vgl. Kap. 4.3). Wie sich bei den Untersuchungen herausstellte korreliert der Transfer von Kupfer in das Konzentrat ausgesprochen gut mit dem von Blei. Blei ist einer der Gründe warum die Feinfraktion von HMVA in der vorliegenden Form nicht für eine Verwertung in der Zementklinkerproduktion in Frage kommt. Ein weiteres Problem ist z.B. Cadmium. In dem Folgeprojekt steht die Verwertung der mineralischen Fraktion durch Entfernung solcher Störelemente im Vordergrund.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die sich abzeichnenden Veränderungen rechtlicher Vorgaben lassen erwarten, dass der Absatz von HMVA in die konventionellen Wege verändern wird. Bereits heutzutage ist es problematisch die aus der HMVA generierten mineralischen Fraktionen am Markt zu platzieren, sie werden wieder zunehmend deponiert. Physikalische und chemische Verfahren und Verfahrenskombinationen zur Rückgewinnung verschiedener Rohstoffe aus HMVA sind daher weiterzuentwickeln, um den künftigen Ansprüchen gerecht zu werden. Aktuelle Marktentwicklungen fokussieren sich allerdings hauptsächlich auf die Erhöhung der NE-Metallausbeute, in deren Folge sich der bisher nicht verwertbare, mineralische Feinanteil erhöht. Neben der Rohstoffverwertung der gröberen mineralischen Fraktionen (z.B. für den Straßenbau oder Beton und Asphaltindustrie) rückt damit auch die mineralische Feinfraktion (z.B. für die Zementklinkerproduktion) in den Vordergrund. In einem ebenfalls vom BMBF geförderten Folgeprojekt sind zukünftige Rohstoffabnehmer anhand von Eignungsprüfungen direkt beteiligt. Die Trocken- und Nassaufbereitung mineralischer Rückstände bis hin zum großtechnischen Einsatz in Bestandsanlagen berücksichtigt dabei die gesamte Breite der mineralischen Fraktionen. Nicht verwertbare Anteile sollen minimiert und definierte mineralische Rohstoffe zur Substitution von Primärrohstoffen bereitgestellt werden. Die BAM beschäftigt sich im Rahmen dieses Projektes weiterhin mit Feinfraktion von HMVA. Allerdings steht anders als im Projekt ATR hier die Verbesserung der Eigenschaften der mineralischen Fraktion im Vordergrund.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Wie bereits im Kap. I 4 dargestellt wurden an der TU-Clausthal Versuche zur Flotation von HMVA durchgeführt. Ergebnisse dazu wurden bisher nicht veröffentlicht und können somit nicht bewertet werden.

Nach Kenntnisstand des Verfassers befasst sich kein weiteres Institut mit der Dichtesortierung von Feinkornfraktionen aus HMVA.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Veröffentlichungen

Simon, F.G. und Adam, C. (2012), *Ressourcen aus Abfall*. Chemie Ingenieur Technik 84(7), 999-1004

Krüger, O. und Simon, F.G. (2012), *Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, in: Stegmann, R., Rettenberger, G., Kuchta, K., Fricke, K. und Heyer, K.U. (Hrg.), *Deponietechnik 2012, Hamburger Berichte Bd. 37*, 177-186, Verlag Abfall aktuell

Simon, F.G. und Holm O. (2013), *Recovery of Metals from Waste, an Example for the Resource Cycle*, World Resources Forum, Shaping the Future of Natural Resources, Davos(CH), EMPA, Proceedings Paper.

Simon, F.G. und O. Holm (2013), *Rostasche – Durch Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse kann die Metallausbeute erhöht werden*, *ReSource* 26(3): 31-37.

Simon, F. G. and O. Holm (2013), *Aufschluss, Trennung, Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozess - Verdopplung der Metallausbeute aus MVA-Rostasche, Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie – Berliner Schlackenkonferenz – K. J. Thomé-Kozmiensky*. Neuruppin, TK-Verlag, 297-310.

Holm, O. (2014), *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, SUM 2014 - 2nd Symposium on Urban Mining, Bergamo, Proceedings Paper.

Simon, F.G. und O. Holm (2015), *Recovery of metals from waste, an example for the resource cycle*, Natural resources, Sustainable targets, technologies, lifestyles and governance. C. Ludwig, C. Matasci and X. Edelmann. Villigen PSI, CH, Paul Scherrer Institut, 289-293.

Holm, O. (2015), *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*, SARDINIA 2015 - 15th International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Proceedings Paper.

Simon, F.-G. and Holm, O. (2016). *Exergetic considerations on the recovery of metals from waste*. International Journal of Exergy 19(3): 352-363.

Simon, F.-G. and Holm, O. (2016). *Reduction of natural resource use by improving resource efficiency*. Universal Journal of Materials Science 4(3): 54-59.

Holm, O. and Simon F.-G. (2017). *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*. Waste Management 59: 229-236.

Vorträge

Simon, F.G. (2011), Rohstoffpotenzial von MVA-Schlackedeponien. Deponietage, DWA, Neuss, Präsentation.

Simon, F.G. (2012), Aufbereitung von Verbrennungsschlacken. 691. Dechema Kolloquium Siedlungsabfall als Rohstoffquelle für Metalle, Frankfurt/M. (DLF-Radio Interview Edles aus Asche)

Simon, F.G. und Holm O. (2013), *Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren*. ProcessNet - Jahrestreffen der Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Frankfurt(Main), Präsentation und Poster.

Holm, O. (2013), *ATR - Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, KickOff r3 - Strategische Metalle und Mineralien, Freiberg, Präsentation und Poster.

Holm, O. (2014), *Rückgewinnung von Kupfer aus der Feinfraktion von HMVA mittels Dichtesortierung*, ProcessNet - Jahrestreffen der Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Karlsruhe, Präsentation.

Simon, F.G. und O. Holm (2014), *Recovery of non-ferrous metals from MSW IBA by means of mechanical processes*, International VDI Conference Metals and Minerals Recovery from IBA, Düsseldorf, VDI Wissenforum.

Holm, O. (2014), *Gewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse - ATR*, Urban Mining Kongress und Statusseminar r3 - Strategische Metalle und Mineralien, Essen, Präsentation.

Holm, O. (2014), *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, SUM 2014 - 2nd Symposium on Urban Mining, Bergamo, Präsentation.

Holm, O. (2015), *ATR - Gewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*, Die Zukunftsstadt als Rohstoffquelle - Urban Mining und r3-Abschlusskonferenz, Bonn, Präsentation und Poster.

Holm, O. (2015), *Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany*, SARDINIA 2015 - 15th International Waste Management and Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Präsentation.

Holm, O. (2016), *Innovative treatment trains of IBA from MSW with special focus on the fate and behavior of the fine fraction < 2 mm*. 2nd International VDI Conference 2016 - Metals and Minerals Recovery from IBA, Düsseldorf, 12.10.2016, Präsentation.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

- Holm, O., *Recovery of copper from small grain sizes of municipal solid waste incineration bottom ash by means of density separation*, Waste Management (submitted).

Quellen

- Arickx, S, Van Gerven, T, Boydens, E, L'hoest, P, Blanpain, B and Vandecasteele, C (2008) Speciation of Cu in MSWI bottom ash and its relation to Cu leaching. *Applied Geochemistry* 23: 3642-3650.
- Augsburg, A, Köster, R, Amme, M and Eberle, S H (1997) Mobilität und Festphasenspezifikation von Kupfer aus Schlacken der Hausmüllverbrennung. *Müll und Abfall* 144-153.
- Biganzoli, L, Ilyas, A, Praagh, M v, Persson, K M and Grosso, M (2013) Aluminium recovery vs. hydrogen production as resource recovery options for fine MSWI bottom ash fraction. *Waste Management* 33: 1174-1181.
- Buckley, A N, Goh, S W, Skinner, W M, Woods, R and Fan, L J (2009) Interaction of cuprite with dialkyl dithiophosphates. *International Journal of Mineral Processing* 93: 155-164.
- Faulstich, M (1993) Schmelzen von Rückständen aus der Müllverbrennung - Integrieren oder Nachschalten?-, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (ed.), *Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung*, pp. 175-188, Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.
- Geyer, G (1974) Flotation nichtsulfidischer Kupfererze, 19.06.1974.
- Holm, O and Simon, F-G (2017) Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. *Waste Management* 59: 229-236.
- Lee, K, Archibald, D, McLean, J and Reuter, M A (2009) Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors. *Minerals Engineering* 22: 395-401.
- Rao, S R (1971) *Xanthates and Related Compounds*, New York: Marcel Dekker.
- Rao, S R and Finch, J A (2003) Base metal oxide flotation using long chain xanthates. *International Journal of Mineral Processing* 69: 251-258.
- Rivero, R and Garfias, M (2006) Standard chemical exergy of elements updated. *Energy* 31: 3310-3326.
- Shean, B J and Cilliers, J J (2011) A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing* 100: 57-71.
- Song, G, Xiao, J, Zhao, H and Shen, L (2012) A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy* 40: 164-173.
- Speiser, C (2001) Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Technischen Universität München, Doktorarbeit.
- Szargut, J (2005) *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*, Southampton: WIT Press.

- Valero, A, Ranz, L and Botero, E (2002). Exergetic Evaluation of Natural Mineral Capital (1) - Reference Environment and Methodology, 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2002), Berlin.
- Valero, A, Valero, A and Martínez, A (2010) Inventory of the exergy resources on earth including its mineral capital. *Energy* 35: 989-995.
- Valero, A, Valero, A and Vieillard, P (2012) The thermodynamic properties of the upper continental crust: Exergy, Gibbs free energy and enthalpy. *Energy* 41: 121-127.
- Vashisth, S, Bennington, C P J, Grace, J R and Kerekes, R J (2011) Column Flotation Deinking: State-of-the-art and opportunities. *Resources Conservation and Recycling* 55: 1154-1177.
- Weh, A (2015). Effiziente der Metallrückgewinnung aus Kehrrichtverbrennungsasche mittels Hochspannungsimpulsverfahren, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, Berlin, K.J., T.-K. (ed.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 167-191.
- Weimann, K, Giese, L B, Mellmann, G and Simon, F G (2003) Building materials from waste. *Materials Transactions* 44: 1255-1258.

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 B

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt B:

Industriepartner für innovative Verfahren

ausführende Stelle:

**BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Fachbereich 4.3 – Schadstofftransfer und Umwelttechnologien**

Projektleiter:	Dipl. Ing. Claus Gronholz
Autor:	Dipl. Ing. Claus Gronholz , Mary Schmidt
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2012 - 30.06.2015,

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	6
.....	
1 Aufgabenstellung	6
2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
.....	
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	7
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II Eingehende Darstellung	7
1 Resultate des Forschungsvorhabens	7
AP 1/1 Entwicklung einer Ausbaustufe für den TAR-Prozessor (Hochgeschwindigkeits-Aufschluss) TKM - Anlage in Wiesbaden....	7
2 AP 2/1 Gewinnung von insgesamt 4.337,24 Mg SRH-Schlacken sowie deren Transporte zur Alpha-und Beta-Linie	8
3 AP 3/1 Gewinnung und Separation einer Trägersubstanz für chemisch gebundenes Kupfer in MV-Schlacken	9
.....	
4 AP 4/1 Gewinnung von 534,38 Mg deponierter MV-Schlacke auf der BSR Deponie Schöneicher Plan, sowie deren Transport zur Alpha-Linie nach Wiesbaden und nach der Aufbereitung zurück zur Deponie Schöneicher Plan	10
5 AP 5/1 Entwicklung und Herstellung einer speziellen elektronischen Steuerung für die Anforderungen im r ³ - Vorhaben	10
6 AP 6/1 Die chargenweise Behandlung der MV-Schlacken aus dem AP 2/1 und AP 4/1 in der Alpha-Linie in Wiesbaden, sowie die Verwertung der Mineralik	11
7 AP 7/1 Auswertung der Ergebnisse aus dem AP 6/1 sowie Bereitstellung von metallischen und mineralischen Konzentraten für die Verbundpartner	12

III 1/AP 1/2 Entwicklung einer Aufbereitungsanlage (Beta-Linie) im Technikums-Maßstab	14
III 2/AP 2/2 Behandeln/Prozessieren von ca. 4.500 Mg MV-und EEEW-Schlacken in der Beta-Linie in Wiesbaden	15
III 3-4/AP 3/2 und 4/2 Transport und Teilmengen der Output-Stoffströme nach Hamburg sowie deren Behandlung und Analytik im technischen Labor	15
III 5/AP 5/2 Bereitstellen von Proben finaler Erzeugnisse wie Raffinaden, Konzentrate aus Metallen und Mineralien für die Verbundpartner	15
III 6/AP 6/2 Auswertung der r3-relevanten Ergebnisse, wie Konzentrate in den Rückständen thermischer Prozesse ...	16
2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	19
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	19
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	19
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende	19
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	19
5. Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	20
6. Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	20
6.1. Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	20
6.2. Geplante Veröffentlichungen	20

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2 - 5	Einzelhaufwerke der angelieferten SRH-Schlacken
Abb. 10,11,12	Spezielle elektronische Steuerung für die Alpha-Linie
Abb. 13	Flow Chart Alpha-Linie
Abb. 14,15,16	Qualitäten der NE-Metalle gewonnen mit der Alpha-Linie
Abb. 17	Flow Chart Beta-Linie
Abb. 18	Dosiereinrichtung
Abb. 19	Magnetanlage
Abb. 20	Trocknungseinrichtung
Abb. 21	Rotationsbeschleuniger / High Speed Accelerator
Abb. 22	Klassieranlage für 4 Trennschnitte
Abb. 23	Hochfrequenz NE-Abscheider
Abb. 24	Schwingsetzmaschine
Abb. 25	Wendelscheider
Grafik 1	SRH

Tabellenverzeichnis

Tabelle B	Versuchstag 04./05.12.2014
Tabelle C	Versuchstag 18.12.2014
Tabelle D	Versuchstag 19.02.2015
Tabelle E	SRH
Tabelle F	SRH
Tabelle G	Versuch Beta-Linie
Tabelle H	Versuch Beta-Linie
Tabelle I	Versuch Beta-Linie

Anlagenverzeichnis

- Anlage A1 Zeitliche Verzögerung im Vergleich zur ursprünglichen Planung - Meilensteinplanung
- Anlage A2 Umsetzung der Meilensteinplanung
- Anlage A3 Schreiben vom PtJ 14.11.2014 mit Antrag
- Anlage A4 Prüfbericht SGS Fresenius
- Anlage A5 Schreiben an PtJ vom 02.10.2014 mit AP's

I Kurze Darstellung

I/1 Aufgabenstellung

Mechanische Aufbereitung von Rückständen thermischer Prozesse durch Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen (ATR).

I/2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Teil 1: Behandlung von Rückständen thermischer Prozesse sog. MV-Schlacken von der SRH aus Hamburg und der BSR aus Berlin in der großtechnischen Anlage (Alpha-Linie) der TKM in Wiesbaden.

Teil 2: Rückgewinnung von strategischen- Metallen und Mineralien aus Rückständen thermischer Prozesse mit der Beta-Linie im Technikums-Maßstab.

I/3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Aufgrund fehlender behördlicher Genehmigungen für die Errichtung und den Betrieb einer Alpha-/Beta-Linie auf der Deponie Damsdorf, eingereichte ursprüngliche Planung, waren für den Erfolg des Projektes Umwidmungen erforderlich.

Diese Umwidmungen/Planungsänderungen führten zu zeitlichen Verzögerungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung. Details gehen aus den **Anlagen A1** und **A2** hervor. Mit Schreiben vom 14.11.2014 (**Anlage A3**) hat der Projektträger (PtJ) die Umwidmung und den daraus resultierenden Kürzungs- und Änderungsbescheid genehmigt.

I/4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Eine bundesweite Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des UBA aus dem Jahr 2010 zeigt auf, dass von den deutschlandweit anfallenden 5,2 Mio. Mg Rostasche nur bei 2,7 Mio. Mg (52 %) eine NE-Metallentfrachtung mit der Wirbelstromtechnik durchgeführt wurde.

Die restlichen Aschen wurden anderweitig entsorgt. Aus den 5,2 Mio. Mg wurden laut Prognos 35.000 Mg NE-Metalle in verunreinigter Form gewonnen. Untersuchungen an abgetrennten NE-Metallgemischen aus 26 Aufbereitungsanlagen für Rostasche (Probengröße 50-100 Mg pro Anlage) zeigen auf, dass im Regelfall von Verschmutzungsgraden (mineralische Anhaftungen und Anbackungen von verschlackten Anteilen) in der Größenordnung zwischen 30 Gew.-% und 60 Gew.-% im Mittel 35 Gew.-% ausgegangen werden kann.

Somit reduziert sich die real abgeschöpfte NE- Metallabscheidung aus MVA's bundesweit auf 20.000 Mg/a bis 25.000 Mg/a, was einer Rückgewinnungsquote von 25 % entspricht.

I/5 *Zusammenarbeit mit anderen Stellen*

Die TARTECH AG hat im Rahmen des r³-Vorhabens mit den Institut SGS Fresenius in Berlin, der Fa. SGM Magnetics in Manerbio, Italien, der Fa. ATZ in Zwickau sowie der Fa. Aurubis in Hamburg zusammen gearbeitet.

II **Eingehende Darstellung**

II/1 *Resultate des Forschungsvorhabens*

II/1 AP 1/1 *Entwicklung einer Ausbaustufe für den TAR-Prozessor (Hochgeschwindigkeit-Aufschluss) TKM-Anlage in Wiesbaden.*

Im r³-Vorhaben sollte erstmalig mit einer Ausbaustufe des TAR-Prozessors eine Aufprallgeschwindigkeit in der Rotorenkammer von >650 km/h erzeugt werden. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte man Erfahrungen mit Aufprallgeschwindigkeiten von maximal 300 km/h.

Vorreiter war hier die Firma GET Hamburg GmbH, für die der Projektleiter, Dipl. Ing. C. Gronholz, bis September 2009 tätig war. Die Entwicklung der Ausbaustufe erfolgte planmäßig im Zeitraum Juli 2012 bis Februar 2013.

Die Hochgeschwindigkeits-Aufschlusstechnologie (Ausbaustufe) basiert auf der Erfindung DE10 2011 050 789 A1 des Projektleiters, Dipl. Ing. C. Gronholz.

Im Rahmen des r³-Vorhabens wurde die Ausbaustufe für die Aufbereitung von ca. 5000 t MV-Schlacken erfolgreich eingesetzt.

Technische Daten Ausbaustufe

Antrieb:	2x 90 KW
Oberläufer:	1x Schneidstern
	5x Ebenen mit Werkzeugen
Untersläufer:	3x Ebenen mit Werkzeugen
Anzahl der Werkzeuge:	16 bis 96 Stck.
Gewicht:	18.700 kg



Foto 1: Ausbaustufe TAR-Prozessor

II/2 AP2/1 Gewinnung von insgesamt 4.337,24 Mg SRH-Schlacken sowie deren Transporte zur Alpha- und Beta-Linie nach Wiesbaden.

Im Zeitraum 17. September 2014 bis 10. Mai 2015 wurden insgesamt 4.337,24 Mg MV-Schlacken bei der SRH übernommen und nach Wiesbaden zur Alpha- und Beta-Linie transportiert.

In der nachfolgenden Tabelle A sind die Einzelmengen nach Herkunft und Schlackenart aufgelistet.

Menge (Mg)	Schlackenart	Herkunft
1.026,3 Mg	Rohschlacke	MVA Stelling Moor
472,80 Mg	Rohschlacke	MVA Stelling Moor
355,60 Mg	Rohschlacke	MVA Stelling Moor
718,80 Mg	Rohschlacke	MVB
348,60 Mg	kalzinierte Schlacke	MVB
908,7 Mg	Rohschlacke	MVR
506,4 Mg	kalzinierte Schlacke	MVR

Tabelle A

Die angelieferten MV-Schlacken wurden als Einzelhaufwerke getrennt aufgesetzt und jeweils durch Schilder gekennzeichnet.

Auf den **Abbildungen Nr. 2 bis Nr. 5** sind die unterschiedlichen Haufwerke zu sehen.

II/ 3 AP 3/1 Gewinnung und Separation einer Trägersubstanz für chemisch gebundenes Kupfer in MV-Schlacken.

Kupfer kommt in zwei unterschiedlichen Aggregatzuständen in MV-Schlacken vor. Einmal als metallisches gediegenes Kupfer, dieses kann frei vorliegen oder in der MV-Schlacke versintert, d.h. eingebacken, sein.

Diese Art von Kupfer wird beim Hochgeschwindigkeitsaufschluss freigelegt und ist dadurch separierbar. Zum anderen kommt Kupfer in MV-Schlacken als chemisch gebundenes Kupfer vor. Um auch dieses Kupfer zu gewinnen, wurden bei der Fa. SGM Magnetics in Manerbio/Italien mehrfach Versuche mit speziell entwickelten Magnettrommeln durchgeführt.



Foto 8: Die spezielle Starkfeld-Magnetanlage (grün) im Technikum in Manerbio.



Foto 9: Mit der speziellen Starkfeld-Magnetanlage separiertes chemisch gebundenes Kupfer

Mit den Versuchen in Manerbio konnte der Gehalt an chemisch gebundenen Kupfer in MV-Schlacken zwar deutlich von ca. 7.500 Mg/kg auf ca. 1.400 Mg/kg gesenkt werden, liegt aber noch deutlich über dem angestrebten Ziel von < 119 Mg/kg TM Kupfer (Genzwert für Z1.2 nach LAGA Boden).

II 4/AP4/1 *Gewinnung von 534,38 Mg deponierter MV-Schlacke auf der BSR Deponie Schöneicher Plan, sowie deren Transport zur Alpha-Linie nach Wiesbaden und nach der Aufbereitung zurück zur Deponie Schöneicher Plan.*

In Abstimmung mit den Projektpartnern BSR wurden am 17. und 18. Dezember 2014 insgesamt 534,38 Mg deponierte und zuvor teilentfrachtete MV-Schlacke von der Deponie Schöneicher Plan nach Wiesbaden (Alpha-Linie) transportiert.

Die Aufbereitung in der Alpha-Linie erfolgte am 18. Dezember 2014. Die in der Alpha-Linie aufbereitete und Metall entfrachtete MV-Schlacke wurde dann im Zeitraum 18.12.2014 bis 22.12.2014 zurück zur Deponie Schöneicher Plan transportiert und dem Projektpartner BSR übergeben.

II 5/AP 5/1 *Entwicklung und Herstellung einer speziellen elektronischen Steuerung für die Anforderungen im r³-Vorhaben.*

In Kooperation mit der Fa. ATZ GmbH (Automatisations -Technik-Zwickau) wurde für die Anforderungsprofile der Alpha-Linie, hier in erster Linie die Ausbaustufe des TAR-Prozessors (II 1/AP 1/1), eine spezielle Steuerung entwickelt und hergestellt.

Die spezielle elektronische Steuerung umfasst folgende Parameter, die gesteuert und überwacht werden.

SP 1: Aufprallgeschwindigkeit im TAR-Prozessor

SP 2: Energieverbrauch (elektrisch)

SP 3: Temperaturen FU's Lager Rotoren TAR-Prozessor

SP 4: Steuerung Input Stoffstrom

SP 5: 8 Frequenzumrichter

SP 6: Stromaufnahme (A)

Auf den **Abbildungen 10, 11** und **12** sind Details der speziellen elektronischen Steuerung zu sehen.

II 6/AP 6/1 *Die chargenweise Behandlung der MV-Schlacken aus dem AP2/1 und AP4/1 in der Alpha-Linie in Wiesbaden, sowie die Verwertung der Mineralik.*

Die **Abbildung 13** zeigt das Flow Chart der Alpha-Linie.

Die in rot eingetragenen Massen-Prozente (%M) sind Durchschnittswerte aus der Behandlung/Aufbereitung von 150.00 Mg MV-Schlacke.

In der **Tabelle B** sind die Ergebnisse aus den Versuchstagen 04./05. Dezember 2014 aufgeführt. Bei der aufbereiteten MV-Schlacke handelt es sich um Rohschlacke aus der SRH-Anlage Stelling Moor. Rechnet man die VA-Metalle (Chrom-Nickel-Stahl) zu den NE-Metallen, so beträgt der Mittelwert der NE-Recovery Rate 1,90 % M.

Auf den **Abbildungen 14,15** und **16** sind die Qualitäten der mit der Alpha-Linie gewonnenen NE-Metalle zu sehen.

In der **Tabelle C** sind die Ergebnisse von dem Versuchstag 18. Dezember 2014, an dem in der Alpha- Linie 534,38 Mg bereits vorbehandelter und deponierter MV-Schlacke des Projektpartners BSR, aufgeführt. Mit der Alpha-Linie konnten aus der vorbehandelten und bereits deponierten MV-Schlacke der BSR noch 1,02 %M hochwertige NE-Metalle gewonnen werden. In der **Tabelle D** sind die Ergebnisse vom Versuchstag 19. Februar 2015 aufgeführt.

An diesem Versuchstag wurde Rohschlacke aus der SRH-Anlage Stelling Moor in der Alpha-Linie aufbereitet. Mit der Alpha-Linie wurden aus dieser Charge 2,70 %M hochwertige NE-Metalle gewonnen. Wir haben nun mal einen Vergleich der 1.Charge zur 2.Charge vorgenommen.

Die Abweichungen der Recovery Rates sind enorm, wie aus der **Grafik 1** und der **Tabelle E** erkennbar ist, und ein Beleg dafür, dass die Zusammensetzung der Abfälle, die thermisch verwertet werden, einen großen Einfluss auf die aus der Schlacke gewinnbaren Metalle und Oxide haben.

In der **Tabelle F** sind die Ergebnisse aus der Testwoche vom 18.-22. Mai 2015 dargestellt. In der Testwoche wurden erstmalig auch Schlacken in der Alpha-Linie aufbereitet, die zuvor bei den MVA's MVB (Borsigstraße) und MVR (Rugenberger Damm) mit den dort vorhandenen Schlackenaufbereitungsanlagen aufbereitet wurden. Da diese MV-Schlacken bereits kalziniert waren (3 Monate abgelagert) tragen diese Chargen die Bezeichnung "kalziniert".

Da in der Testwoche auch Rohschlacken von der MVB und MVR mit der Alpha-Linie aufbereitet wurden, liefern die Testergebnisse folgende Resultate:

In beiden, MVB und MVR, funktioniert die FE-Entfrachtung sehr gut, da in den bereits aufbereiteten MV-Schlacken mit max. 0,07 %M FE-Metalle, so gut wie gar keine

FE- Metalle mehr enthalten waren. Anders hingegen sieht es bei den Oxiden und NE-Metallen >2 mm aus.

Mit der Alpha-Linie wurden noch 40 %M bis 53 %M von den insgesamt in den MV-Schlacken enthaltenen Oxiden, gewonnen. Ähnlich sieht es bei den NE-Metallen >2 mm aus. Hier werden mit der konventionellen Anlage bei der MVB und MVR gerade mal zwischen 37 %M und 40 %M der gewinnbaren NE-Metallpotenziale >2 mm gewonnen.

II 7/ AP 7/1 *Auswertung der Ergebnisse aus dem AP 6/1 sowie die Bereitstellung von metallischen und mineralischen Konzentraten für die Verbundpartner.*

An den insgesamt zwölf Testtagen waren zeitweise Mitarbeiter von den Projektpartnern BAM, SRH, TUHH, LMU, BSR sowie Fraunhofer Umsicht vor Ort an der Alpha-Linie in Wiesbaden.

Die TARTECH AG hat den jeweiligen Projektpartnern die gewünschten metallischen und mineralischen Materialproben zur Verfügung gestellt.

Auf den **Abbildung 6** und **7** sind eine größere Charge von mineralischen Proben für die SRH zu sehen.

Es handelt sich hierbei um jeweils ca. 20 Mg Gesteinskörnung 2/5 mm und ca. 20 Mg Gesteinskörnung 5/18 mm für die SRH, hergestellt mit der Alpha-Linie aus den Schlacken der MVB.



Abb. 6: Gesteinskörnung 2/5 mm



Abb. 7: Gesteinskörnung 5/18 mm

III 1/AP1/2 Entwicklung einer Aufbereitungsanlage (Beta-Linie) im Technikums-Maßstab

Die Beta-Linie erlaubt die Behandlung/Aufbereitung von MV-Schlacken der Körnung 0/2 mm in drei getrennten Verfahrensschritten.

Die **Abbildung 17** zeigt das Flow Chart der Beta-Linie. Die Beta-Linie wurde vom Projektleiter, Herrn Dipl. Ing. C. Gronholz und der Mitarbeiterin, Frau Mary Schmidt, entwickelt.

Die Beta-Linie, besteht aus folgenden technischen Komponenten/Einrichtungen:

4 Dosiereinrichtungen (**Abbildung 18**)

1 Magnetanlage (**Abbildung 19**)

1 Trocknungseinrichtung (**Abbildung 20**)

1 Rotationsbeschleuniger/High Speed Rotation Accelerator (**Abbildung 21**)

1 Klassiersanlage zur Herstellung von bis zu 4 unterschiedlichen Trennschnitten (**Abbildung 22**)

1 Hochfrequenz NE-Abscheider (**Abbildung 23**)

1 Schwingsetzmaschine (**Abbildung 24**)

1 Wendelscheider mit bis zu 4 Starts (**Abbildung 25**)

Die Beta-Linie mit ihren drei Verfahrensschritten ist eine Spezialanlage, in der feinste Metallpartikel in der Schlackenfraktion 0/2 mm, die immerhin etwa 48 %M der MV-Schlacke ausmacht, so aufgeschlossen werden, dass sie sehr effizient gewonnen werden können.

Das Herzstück der Beta-Linie ist der High Speed Rotation Accelerator (Rotationsbeschleuniger), mit dem erstmalig Aufprallgeschwindigkeiten von bis zu 1.200 km/h erzeugt werden können.

Die Entwicklung dieser Maschine stammt vom Projektleiter, Dipl. Ing. C. Gronholz und wurde speziell für das r³ - Vorhaben entwickelt und gefertigt.



Abb. 26: Beta-II Linien (weiß) vor der Alpha-Linie

III 2/ AP2/2 *Behandeln/Prozessieren von ca. 4.500 Mg MV-und EEEW-Schlacken in der Beta-Linie in Wiesbaden*

Ein Schwerpunkt des r³-Verbundvorhabens Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR), ist die Frage, welche Potenziale an Kupfer und Edelmetallen sind aus der Schlacken-Fraktion 0/2 mm gewinnbar. Dazu wurden, wie im AP 2/2 beschrieben, umfangreiche Test auf der Beta-Linie gefahren. Das Input-Material der Beta-Linie ist die Kornfraktion 0/2 mm, welche mit der Alpha-Linie nicht aufgeschlossen und somit auch nicht Metall entfrachtet wird.

In der **Tabelle G** (Test 1) sind die unterschiedlichen Output-Stoffströme eines Tests mit 210 Mg dargestellt.

In der **Tabelle H** (Test 2) sind die Ergebnisse eines Tests, der in Anwesenheit der Projektpartner SRH, TUHH, BAM und LMU am 23.7.2015 durchgeführt wurde, dargestellt. In der **Tabelle I** (Test 3) sind die Ergebnisse eines Tests mit einer Inputmenge von 725,0 Mg dargestellt.

Bei den unterschiedlichen Tests wurden die Aufprallgeschwindigkeiten (Impact Speed) variiert, um deren Einfluss auf die Output-Stoffströme zu ermitteln.

III 3- 4 /AP 3/2 und 4/2

Transport von Teilmengen der Output-Stoffströme nach Hamburg sowie deren Behandlung und Analytik im technischen Labor

An den Output-Stoffströmen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Konzentration von seltenen Erden in der Oxidfraktion
(siehe Prüfbericht SGS Fresenius Nr. 3464982)
2. Konzentration an Metallpartikeln in der Schwerfraktion 710 µm -1,0 mm
(siehe Prüfbericht SGS Fresenius 3464982-REMA 150796)
3. Kupfergehalt in dem NE-Metallgemisch aus dem Verfahrensschritten I. und II..
4. Anfertigen von Probenkörper mit den Fraktionen < 20 µm und 0-710 µm als Additive

III 5/ AP 5/2 *Bereitstellung von Proben finaler Erzeugnisse wie Raffinaden, Konzentrate aus Metallen und Mineralien für die Verbundpartner*

Die Verbundpartner haben wunschgemäß ihre Proben von den Output-Stoffströmen der Beta-Linie erhalten.

III 6/AP 6/2 *Auswertung der r³-relevanten Ergebnisse, wie Konzentrationen in den Rückständen thermischer Prozesse.*

Es konnte nachhaltig nachgewiesen werden, dass die Schlacken-Feinfraktionen 0/2 mm noch erhebliche Mengen an werthaltigen NE-Metallen enthalten. Der gewinnbare NE-Metallgehalt schwankt dabei zwischen 1,58 %M und 1,70 %M bezogen auf die Input-Menge 0/2 mm. Das mit der Beta-Linie gewonnene NE-Metallgemisch (siehe **Abbildung 27**) ist sehr sauber, da es im Mittel nur etwa 20 %M Inertbestandteile wie Keramik und Glas enthält.



Abb. 27: NE-Metallgemisch aus dem II. Verfahrensschritt

Interessant an diesem NE-Metallgemisch ist auch der überdurchschnittlich hohe Anteil an Kupfer, der bei den diversen Tests mit 34 %M - 38 %M ermittelt wurde. Die **Abbildung 29** zeigt das NE-Metallgemisch behandelt in 10 %-iger HCl. Man erkennt optisch sehr gut den hohen Kupferanteil.



Abb. 29: NE-Metallgemisch behandelt in 10%-iger HCl

Auf der **Abbildung 28** ist das Kupferkonzentrat aus der Schwingsetzmaschine zu sehen. Man erkennt bereits mit dem bloßen Auge die Anwesenheit des Edelmetalls Gold.



Abb. 28: Kupferkonzentrat aus der Beta-Linie

Schmelzanalysen mit diesem Kupferkonzentrat bei Aurubis haben Goldgehalte von 75 ppm-118 ppm ergeben. Wie aus den **Tabellen G, H** und **I** hervorgeht, wird beim Hochgeschwindigkeit-Aufschluss im High Speed Accelerator kein Pulver erzeugt, da der Anteil der Körnung >1 mm nach der Behandlung immerhin noch zwischen 34,0 %M und 37,9 %M beträgt.

Mit den Inert-Fractionen $< 20 \mu\text{m}$ und $0 - 710 \mu\text{m}$ wurden im Labor unterschiedliche Probenkörper hergestellt.

Die **Abbildung 31** zeigt vier unterschiedliche Probenkörper vor den bau- physikalischen Tests.



Abb. 31: Probenkörper

Bei den Untersuchungen im Hause SGS Fresenius konnten in der Oxid-Feinfraktion keine Aufkonzentration an Seltenen Erden gemessen werden. Auch konnte in der Schwerfraktion 710 μm -1,0 mm aus dem Wendelscheider keine Aufkonzentration von NE- und Edelmetallen gemessen werden.

Beides ist nach Aussage von SGS Fresenius auf die sehr geringen Probenmengen, die untersucht wurden, zurückzuführen. Da weder die Seltenen Erden noch die NE-/Edelmetalle in den feinen Granulometrien der MV-Schlacken homogen verteilt sind, unterliegen Untersuchungen mit derart kleinen Mengen einem großen Zufallsgenerator.

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Mit Schreiben vom 02.10.2014 an das PtJ (**Anlage A5**) hat die TARTECH AG einen Antrag auf Umwidmung der Zuwendungen gestellt. Durch die beantragte Umwidmung waren weder die Meilensteinplanung vom 15. September 2014 noch die wissenschaftlichen Forschungsergebnisse des Antrages gefährdet. Mit Schreiben vom 14. 11.2014 (**Anlage A3**) hat der Projektträger (PtJ) der Umwidmung zugestimmt.

Im Zuge der Umwidmung haben sich für die TARTECH AG auch die Zuwendungen um 84.317,00 € reduziert auf final 1.195.850,00 €.

Alle 13 Arbeitspakete hat die TARTECH AG im Rahmen des r³-Vorhabens vollständig abgearbeitet.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Antrag beschriebenen Arbeiten waren notwendig und angemessen. Mit dem Hochgeschwindigkeits-Aufschluss, der im Zentrum des Vorhabens stand, konnte großtechnisch der Nachweis erbracht werden, dass mit derart innovativen Technologien / - Verfahren enorme Rückgewinnungspotenziale an Nicht-Eisen-Metallen und strategischen Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse generiert werden können. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass es notwendig und richtig war, mit den innovativen Technologien eine Gesamtmenge von über 4.800 Mg MV-Schlacken zu behandeln/aufzubereiten, wodurch erstmalig nachhaltige / belastbare Ergebnisse vorliegen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende*

Es konnte im Rahmen des r³-Vorhabens durch den Einsatz der Beta-Linie (Hochgeschwindigkeits-Aufschluss) nachgewiesen werden, dass aus der MV-Schlacken Fraktion 0/2 mm noch etwa 1,60 %M NE-Metalle gewinnbar sind. Der Marktwert dieser NE-Metalle kann mit etwa 1.250,00 €/Mg NE-Metalle (LME-Kurse im Oktober 2015) beziffert werden.

Damit beträgt der gewinnbare NE-Metall-Wert aus 1 Tonne MV-Schlacke der Fraktion 0/2 mm exakt 20,00 €, was somit ein enormes wirtschaftliches Potenzial darstellt.

4.2 *Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende*

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten können als sehr gut bewertet werden, da im Rahmen des r³-Vorhabens großtechnisch der Nachweis erbracht wurde, dass mit innovativen Verfahren/Technologien zukunftsweisende ökologische und ökonomische Beiträge aus Rückständen thermischer Prozesse möglich sind.

4.3 *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Neben der Gewinnung von Metallen und Oxiden ist für die TARTECH AG auch das Gebiet der Mineralien in den Rückständen thermischer Prozesse von großer Bedeutung. Auf der **Abbildung 32** ist die mineralische Fraktion 710 µm-1,0 mm zu sehen.



Abb. 32: Mineralik 710 μm - 1,0 mm

Diese Fraktion dürfte in zukünftigen Forschungsvorhaben ein interessanter Stoff für Aufkonzentrationsversuche sein. Im Fokus steht hier die Aufkonzentration von feinsten Metall-Partikeln sowie die Aufkonzentration von Seltenen Erden.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

- keine -

6. Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1. *Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen*

- keine -

6.2. *Geplante Veröffentlichungen*

- noch offen -

Berlin, den 30. Oktober 2015

Zeitliche Verzögerung im Vergleich zur ursprünglichen Planung

Arbeitspaket	AP - Leiter	2012				2013				2014				2015			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 1	TARTECH			■	■	■				■	■	■	■				
										■	■	■	■	■	■	■	■
AP 2	BAM						■	■	■	■	■						
										■	■	■	■	■	■		
AP 3	ATZ					■	■	■	■	■	■						
										■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4	TARTECH							■	■	■	■	■					
										■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5	BAM			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 6	ATZ			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

- Zeitplan zur Projektdurchführung ursprüngliche Planung
- Zeitplan zur Projektdurchführung nach der Umwidmung

Umsetzung der Meilensteinplanung



α - Linie	08/14	09/14	10/14	11/14	12/14	01/15	02/15	03/15	04/15	05/15	06/15
500 t Schlacken der BSR		■	■	■							
1.000 t deponierte Schlacken der SRH			■	■	■	■					
3.000 t Rohschlacke nach der drei monatigen Alteration 1. Lot 1.000 t			■	■	■	■	■	■	■		

Hinweis: Starttermine die aus Sicht TARTECH möglich sind.

Verzögerungen durch erforderliche behördliche Zustimmungen auf Seiten der BSR und SRH können eintreten.

β - Linie	08/14	09/14	10/14	11/14	12/14	01/15	02/15	03/15	04/15	05/15	06/15
Fraktion 0/2 mm der BSR			■	■	■						
Fraktion 0/2 aus dep. Schlacke SRH			■	■	■	■	■	■	■		
Fraktion 0/2 aus Rohschlacke SRH				■	■	■	■	■	■	■	■
Aschen aus WEEE, Monoverbrennung				■	■	■	■	■	■	■	■
Sonstige Aschen / Schlacken						■	■	■	■	■	■

■ Update 12.09. 2014

Eingangsdatum	EINGANG 19. OKT. 2014	
Genehmigung		
Projekt	Bank	
Erfassung	Freigabe	Valuta



PROJEKTTRÄGER FÜR DAS
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektträger Jülich · Forschungszentrum Jülich GmbH · Postfach 610247 · 10923 Berlin

TARTECH eco industries AG
Unter den Linden 32-34
10117 Berlin

PDF → AK
→ CG
→ H4
→ MJ
→ ME

Zertifiziert nach
DIN EN ISO 9001

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

HAUSANSCHRIFT: Zimmerstraße 26-27 · 10969 Berlin
POSTANSCHRIFT: Postfach 61 02 47 · 10923 Berlin

ANSPRECHPARTNER/IN: Lukas Lattka

GESCHÄFTSBEREICH:

FACHBEREICH: UMW1

UNSER ZEICHEN: 033R086B

IHR ZEICHEN:

TELEFON: +49 30 20199-3266

TELEFAX: +49 30 20199-3330

E-MAIL: l.lattka@fz-juelich.de

14.11.2014

Betr.: Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68542, Haushaltsjahr 2014, für das Vorhaben:
"r³ - Strategische Metalle, Verbundvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR): Teilprojekt B: Anlagenentwicklung"

hier: **Kürzungs- und Änderungsbescheid**

Förderkennzeichen: 033R086B

Kassenzeichen: 810302720525

Bezug: Unsere Zuwendungsbescheide vom 14.06.2012, 03.12.2012, 02.12.2013, 11.12.2013
Ihr Schreiben vom 02.10.2014 mit Ergänzungen vom 21.10.2014, 02.11.2014, 06.11.2014, 10.11.2014

Anlg.: Gesamtvorkalkulation (neuer Stand)

Sehr geehrte Damen und Herren,

hiermit kürzen wir im Einvernehmen mit Ihnen die bewilligte Zuwendung von höchstens

	1.280.167,00 €
um	84.317,00 €
auf höchstens	1.195.850,00 €

(in Buchstaben: Eins-eins-neun-fünf-acht-fünf-null Euro).

Die Mittel werden kassenmäßig nunmehr wie folgt zur Verfügung gestellt:

240.526,39 €	im Haushaltsjahr	2012 - 2013
273.983,00 €	im Haushaltsjahr	2014
161.000,00 €	im Haushaltsjahr	2015
499.640,61 €	im Haushaltsjahr	2016
20.700,00 €	im Haushaltsjahr	2017.

Aufgrund Ihres o.a. Schreibens gilt in Abänderung unseres Bescheides vom 11.12.2013 die Gesamtvorkalkulation in der beigefügten neuen Fassung.

Im Übrigen gilt unser Bescheid vom 11.12.2013.

Rechtsbehelfsbelehrung

Gegen diesen Bescheid kann innerhalb eines Monats nach Bekanntgabe Widerspruch erhoben werden. Der Widerspruch ist bei dem Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich (DEQ), 52425 Jülich einzulegen.

Mit freundlichen Grüßen

Forschungszentrum Jülich GmbH


i. A. André Greif


i. A. Dr. Andreas Jacobi

G E S A M T V O R K A L K U L A T I O N

für die Zeit vom 01.07.2012 bis 30.06.2015

Thema des Vorhabens 033R086B:

r³ - Strategische Metalle, Verbundvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR): Teilprojekt B: Anlagenentwicklung

0813	Material	0,00
0823	FE-Fremdleistungen	482.440,00
0837	Personalkosten	765.543,00
0838	Reisekosten	29.940,00
0847	vorhabenspezifische Abschreibungen	0,00
0848	AfA sonstige	0,00
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	896.350,00
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	0,00
0860	Verwaltungskosten	0,00
0899	summarisch	0,00
0881	Selbstkosten des Vorhabens (Summe A-I)	2.174.273,00
0882	Eigenmittel des Antragstellers	978.423,00
0883	Mittel Dritter/Einnahmen	0,00
0884	Zuwendung	1.195.850,00

Kassenmäßige Bereitstellung

Jahr	Zuwendung
bis 2013	240.526,39
2014	273.983,00
2015	161.000,00
2016	499.640,61
2017	20.700,00

Sperrungen

Position	gesperrter Betrag
8888 Sperre auf Gesamtzuwendung	564.652,69
8888 Sperre auf Gesamtzuwendung	119.585,00

Alle Betragsangaben in EUR



Abb. 2: Einzelhaufwerk der angelieferten SRH-Schlacke
„Rohschlacke - MV Stelling Moor“



Abb. 3: Einzelhaufwerk der angelieferten SRH-Schlacke
„Rohschlacke - MVR“



Abb. 4: Einzelhaufwerk der angelieferten SRH-Schlacke
„Rohschlacke - MVB“



Abb. 5: Einzelhaufwerk der angelieferten SRH-Schlacke
„kalzinierte Schlacke - MVB“



Abb. 10: Spezielle elektronische Steuerungen für die Alpha-Linie



Abb. 11: Spezielle elektronische Steuerungen für die Alpha-Linie

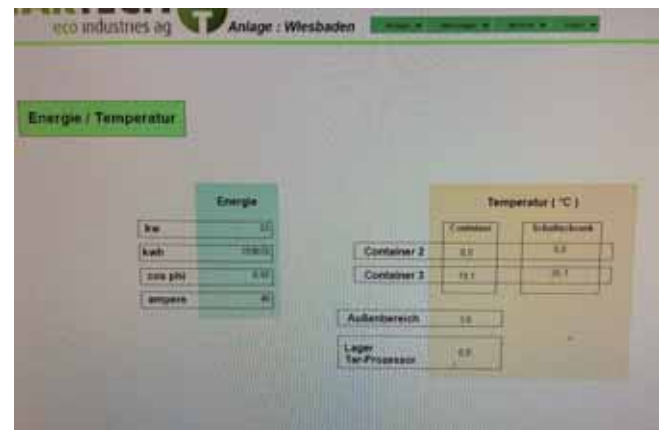


Abb. 12: Spezielle elektronische Steuerungen für die Alpha-Linie

Alpha – Linie Prozess Flow Chart

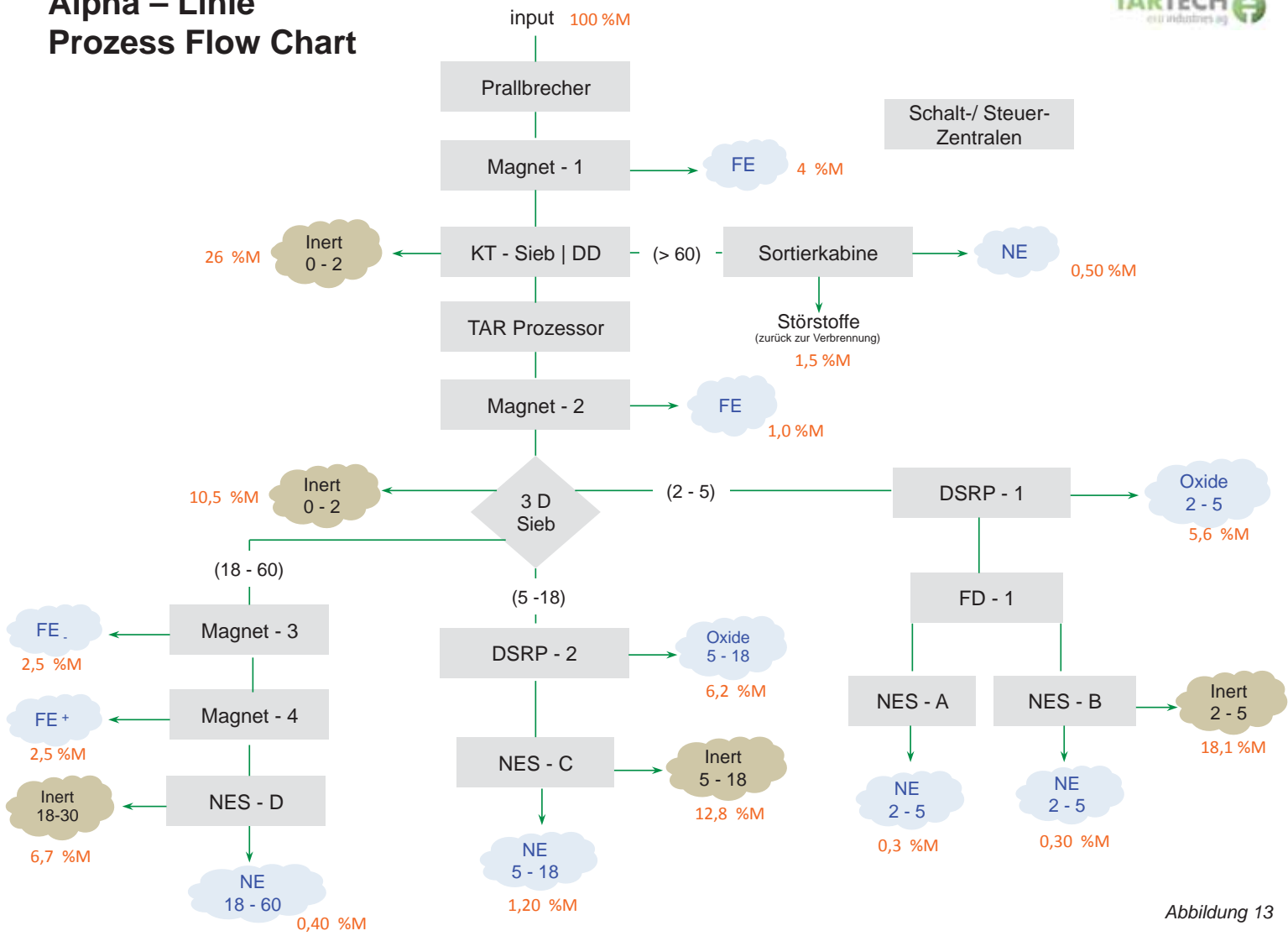


Abbildung 13

Behandlung von Rohschlacke in der Alpha-Linie in Wiesbaden - AP 2/1 (Teil1)

Anlieferzeitraum der Rohschlacke: 17.09.2014 - 01.10.2014

Anlieferungsmenge : 1.026,34 Mg

Alterationszeit: Ø 10 Wochen

Prozessierte Menge 1. Versuchstag 04.12.2014: 518,91 Mg

Prozessierte Menge 2. Versuchstag 05.12.2014 : 455,71 Mg

Rücktrocknung / Feuchtereduktion während der Alteration: 52,26 Mg = 5,1 %M vom Input

Recovered Material	Mengen 1. Versuchstag	Anteil in prozessierter Schlacke in % (RR)	Mengen 2. Versuchstag	Anteil in prozessierter Schlacke in % (RR)	Anteil in % gesamt (Mittelwert)
FE - large	15.820 kg	3,05 %M	21.450 kg	4,71 %M	3,82 %M
FE - fine	2.800 kg	0,54 %M	2.700 kg	0,59 %M	0,56 %M
Oxide (2 - 5)	9.920 kg	1,91 %M	8.860 kg	1,94 %M	1,92 %M
Oxide (5 - 18)	14.280 kg	2,75 %M	11.620 kg	2,55 %M	2,65 %M
Oxide (18 - 60)	2.480 kg	0,48 %M	2.900 kg	0,64 %M	0,55 %M
NE (2 - 5)	1.080 kg	0,21 %M	920 kg	0,20 %M	0,21 %M
NE (5 - 18)	3.500 kg	0,67 %M	3.580 kg	0,79 %M	0,73 %M
NE (18 - 60)	2.790 kg	0,54 %M	3.400 kg	0,75 %M	0,64 %M
VA (> 60)	1.260 kg	0,24 %M	1.900 kg	0,42 %M	0,32 %M
Unburned (> 60)	840 kg	0,16 %M	1.060 kg	0,23 %M	0,19 %M

! Hinweis: Die Schlacken, die am 2. Versuchstag prozessiert wurden, wurden zeitlich zuerst angeliefert.

Erst wenn die Recovery Rate (RR) mit dem Yield (Y) multipliziert wird erhält man eine Aussage über die Pure Metal Rate (PMR).



Abb. 14: NE - Metalle 2/5 mm



Abb. 16: NE - Metalle 5/18 mm



Abb. 15: NE - Metalle 18/60 mm

Behandlung von deponierter MV-Schlacke in der Alpha-Linie in Wiesbaden - AP 4/1 (Teil1)

Anlieferzeitraum der MV-Schlacke: 17.-18. Dezember 2014

Anlieferungsmenge : 534,38 Mg

Prozessierte Menge: 534,38 Mg

Start der Behandlung : 18. Dezember 2014; 8:30 Uhr

Durchschnittlicher Durchsatz: 72,2 Mg/h

Ende der Behandlung: 18. Dezember 2014 ; ca. 16:00 Uhr

Recovered Material	Mengen am Versuchstag	Anteil in prozessierter Schlacke in % (RR)
FE - large	60 kg	0,01 %M
FE - fine	220 kg	0,04 %M
Oxide (2 - 5)	17.020 kg	3,19 %M
Oxide (5 - 18)	12.800 kg	2,40 %M
Oxide (18 - 60)	1.100 kg	0,21 %M
NE (2 - 5)	900 kg	0,17 %M
NE (5 - 18)	2.760 kg	0,52 %M
NE (18 - 60)	1.380 kg	0,26 %M
VA (> 60)	380 kg	0,07 %M
Unburned (> 60)	70 kg	0,01 %M

! Hinweis: Erst wenn die Recovery Rate (RR) mit dem Yield (Y) multipliziert wird erhält man eine Aussage über die Pure Metal Rate (PMR).

Behandlung von Rohschlacke in der Alpha-Linie in Wiesbaden - AP 2/1 (Teil1) 2. Charge

Anlieferzeitraum der Rohschlacke: 15. - 22. Dezember 2014

Anlieferungsmenge : 471,18 Mg

Prozessierte Menge: 471,18 Mg

Start der Behandlung: 19. Februar 2015; 9:45 Uhr

Ende der Behandlung: 19. Februar 2015; 18:15 Uhr

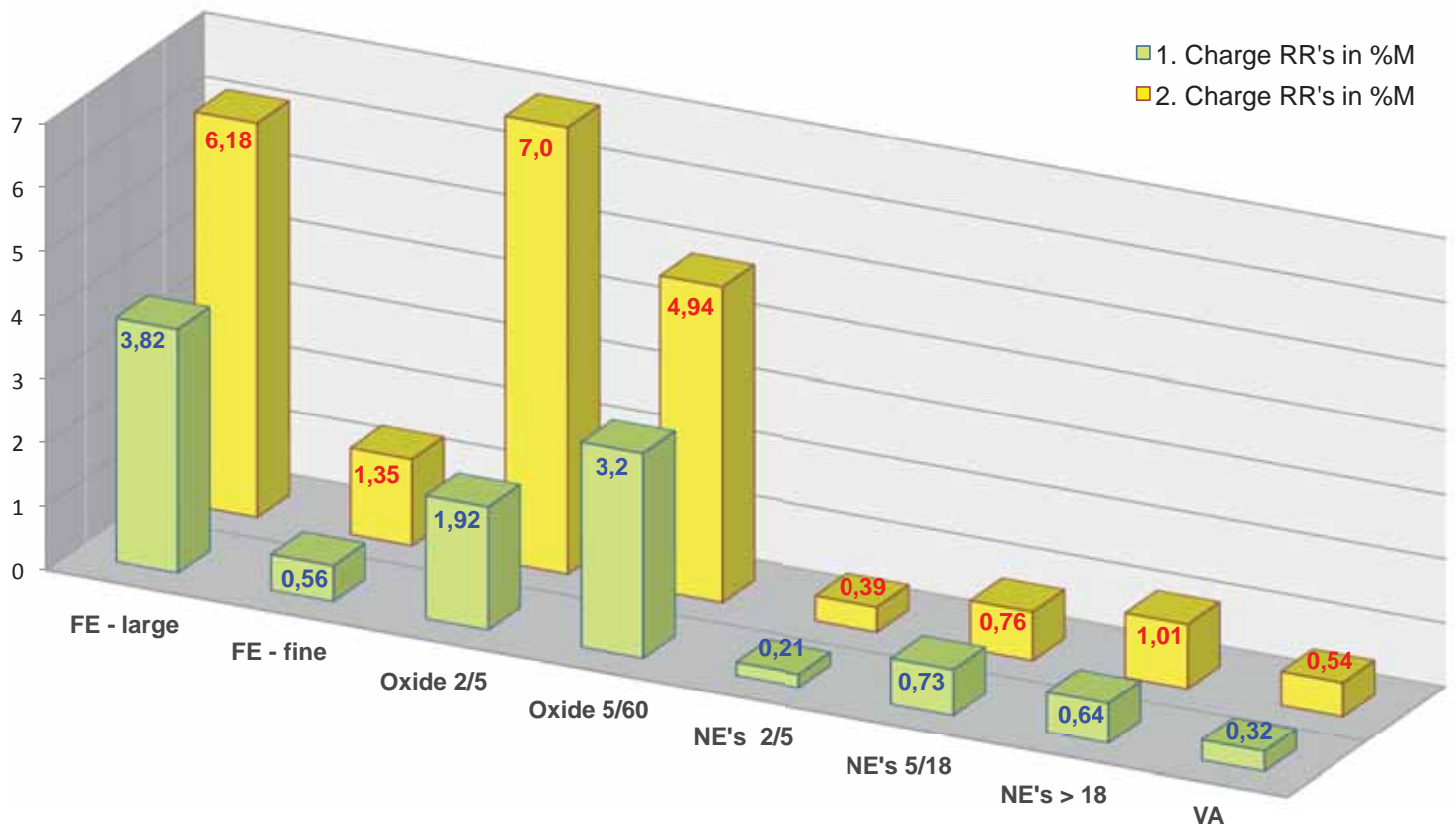
Recovered Material	Mengen am Versuchstag	Anteil in prozessierter Schlacke in % (RR)
FE - large	29.100 kg	6,18 %M
FE - fine	6.380 kg	1,35 %M
Oxide (2 - 5)	32.960 kg	7,00 %M
Oxide (5 - 60)	23.260 kg	4,94 %M
NE (2 - 5)	1.820 kg	0,39 %M
NE (5 - 18)	3.600 kg	0,76 %M
NE (18 - 60)	4.780 kg	1,01 %M
VA (> 60)	2.560 kg	0,54 %M
Unburned (> 60)	40 kg	0,01 %M

1. Hinweis: Die abgelagerte Rohschlacke konnte aufgrund der geringen Menge 471 Mg und dadurch zu kleiner Haldenhöhe während der Kalzinierung nicht entsprechend trocknen. Die Schlacke hatte am Tag der Aufbereitung noch eine Gesamtfeuchte von 18,2 %M.

2. Hinweis: Erst wenn die Recovery Rate (RR) mit dem Yield (Y) multipliziert wird, erhält man eine Aussage über die Pure Metal Rate (PMR).

Rohschlacke von der MVA – Stellingor Moor

Vergleich der 1. Charge (aufbereitet 04./05.12.2014)
mit der
2. Charge (aufbereitet 19.02.2014)



Grafik 1

Rohschlacke von der MVA - Stelling Moor

Vergleich der 1. Charge (04./05.12.2014) mit der 2. Charge (19.02.2015)

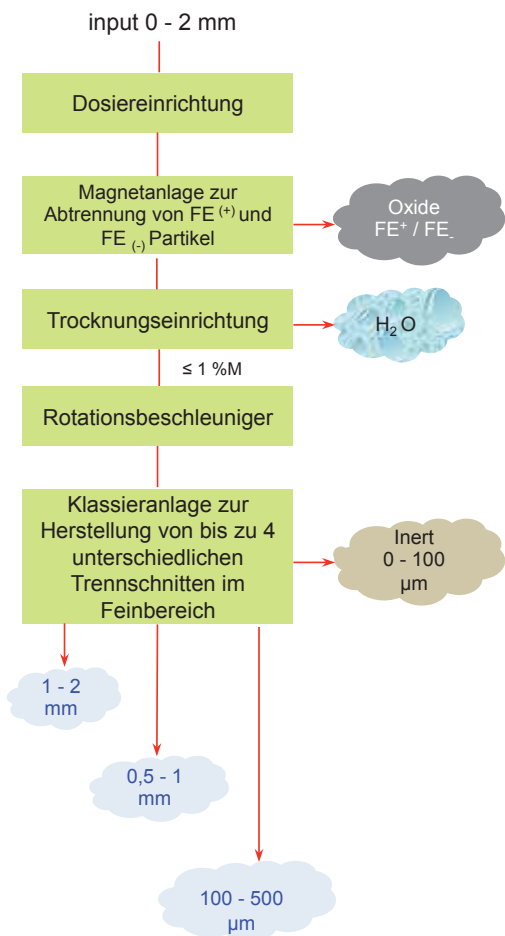
	RR's 1. Charge	RR's 2. Charge	Standardabweichung Veränderung in %
FE - large	3,82 %M	6,18 %M	+ 61,8 %
FE - fine	0,56 %M	1,35 %M	+ 141,1 %
Oxide 2/5	1,92 %M	7,00 %M	+ 264,6 %
Oxide 5/60	3,20 %M	4,94 %M	+ 54,4 %
NE's 2/5	0,21 %M	0,39 %M	+ 85,7 %
NE's 5/18	0,73 %M	0,76 %M	+ 4,1 %
NE's >18	0,64 %M	1,01 %M	+ 57,8 %
VA	0,32 %M	0,54 %M	+ 68,8 %

Auswertungen der Testwoche vom 18. - 22. Mai 2015

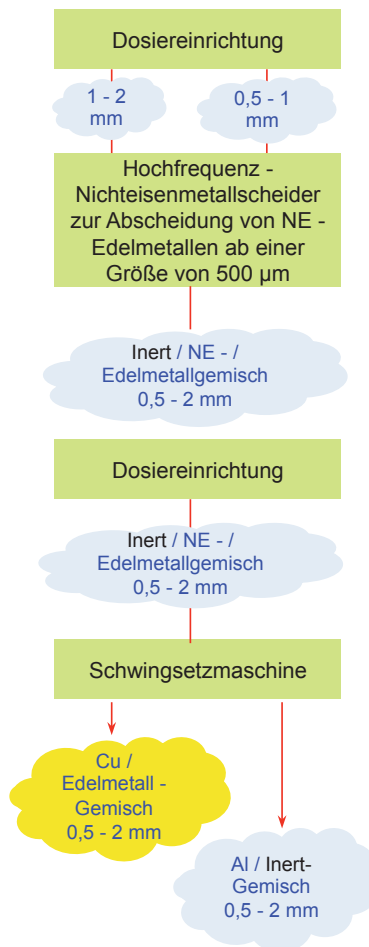
	FE- large	FE- fine	Oxide 2/5	Oxide 5/60	NE 2/5	NE 5/18	NE 18/60	VA > 60	Unburned > 60	FE gesamt	Oxide gesamt	NE gesamt
Stellinger Moor 355,6 Mg	30,5 Mg 8,45 %M	5,08 Mg 1,43 %M	14,70 Mg 4,14 %M	10,74 Mg 3,02 %M	1,88 Mg 0,53 %M	1,92 Mg 0,54 %M	4,02 Mg 1,13 %M	2,13 Mg 0,60 %M	1,86 Mg 0,52 %M	9,88 %M	7,16 %M	2,80 %M
MVB 718,8 Mg	24,58 Mg 3,42 %M	5,46 Mg 0,76 %M	32,96 Mg 4,59 %M	23,98 Mg 3,34 %M	3,67 Mg 0,51 %M	3,45 Mg 0,48 %M	5,54 Mg 0,77 %M	2,10 Mg 0,29 %M	6,83 Mg 0,95 %M	4,18 %M	7,93 %M	2,05 %M
MVR 908,7 Mg	15,06 Mg 1,66 %M	5,36 Mg 0,59 %M	47,7 Mg 5,25 %M	29,99 Mg 3,30 %M	4,73 Mg 0,52 %M	4,45 Mg 0,49 %M	6,72 Mg 0,74 %M	2,45 Mg 0,27 %M	6,10 Mg 0,67 %M	2,25 %M	8,55 %M	2,02 %M
MVB kalziniert 348,6 Mg	0,0 Mg 0,00 %M	0,26 Mg 0,07 %M	8,44 Mg 2,42 %M	6,14 Mg 1,76 %M	1,71 Mg 0,49 %M	1,50 Mg 0,43 %M	1,11 Mg 0,32 %M	0,00 Mg 0,00 %M	0,00 Mg 0,00 %M	0,07 %M	4,18 %M	1,24 %M
MVR kalziniert 120 Mg¹⁾ 386 Mg	0,00 Mg 0,00 %M 0,00 %M	0,00 Mg 0,00 %M 0,00 %M	2,23 Mg 1,86 %M 7,4 Mg 1,92 %M	1,54 Mg 1,28 %M 6,18 Mg 1,60 %M	0,58 Mg 0,48 %M 2,75 Mg 0,72 %M	0,66 Mg 0,55 %M 1,70 Mg 0,44 %M	0,28 Mg 0,23 %M 0,42 Mg 0,11 %M	0,00 Mg 0,00 %M 0,00	0,00 Mg 0,00 %M 0,00	0,00 %M	3,43 %M	1,27 %M

¹⁾ Versuch wurde abgebrochen da die Schlacke zu feucht war.

I. Verfahrensschritt



II. Verfahrensschritt



III. Verfahrensschritt

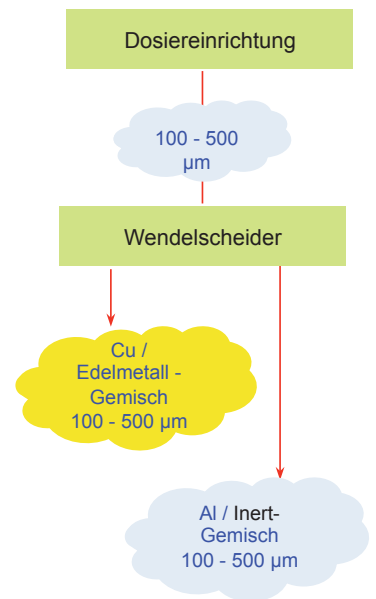


Abbildung 17



Abb. 18: Dosiereinrichtung



Abb. 19: Magnetanlage



Abb. 20: Trocknungseinrichtung

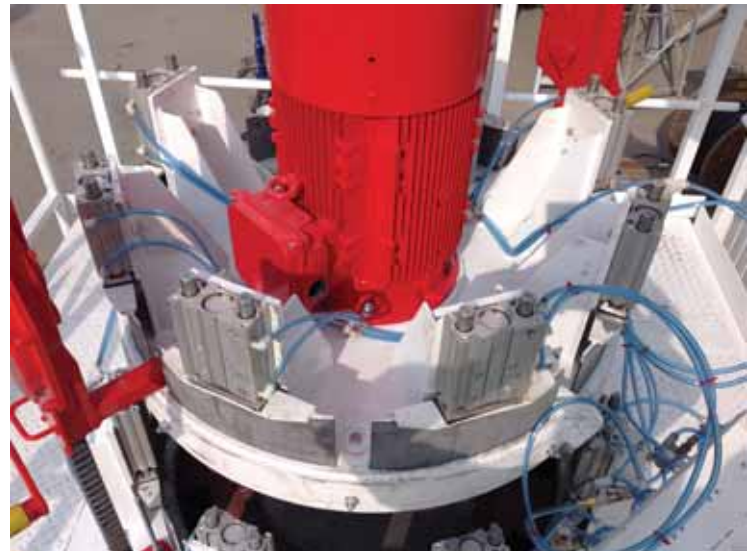


Abb. 21: Rotationsbeschleuniger / High Speed Accelerator



Abb. 22: Klassieranlage für 4 Trennschnitte



Abb. 23: Hochfrequenz - NE-Abscheider



Abb. 24: Schwingsetzmaschine



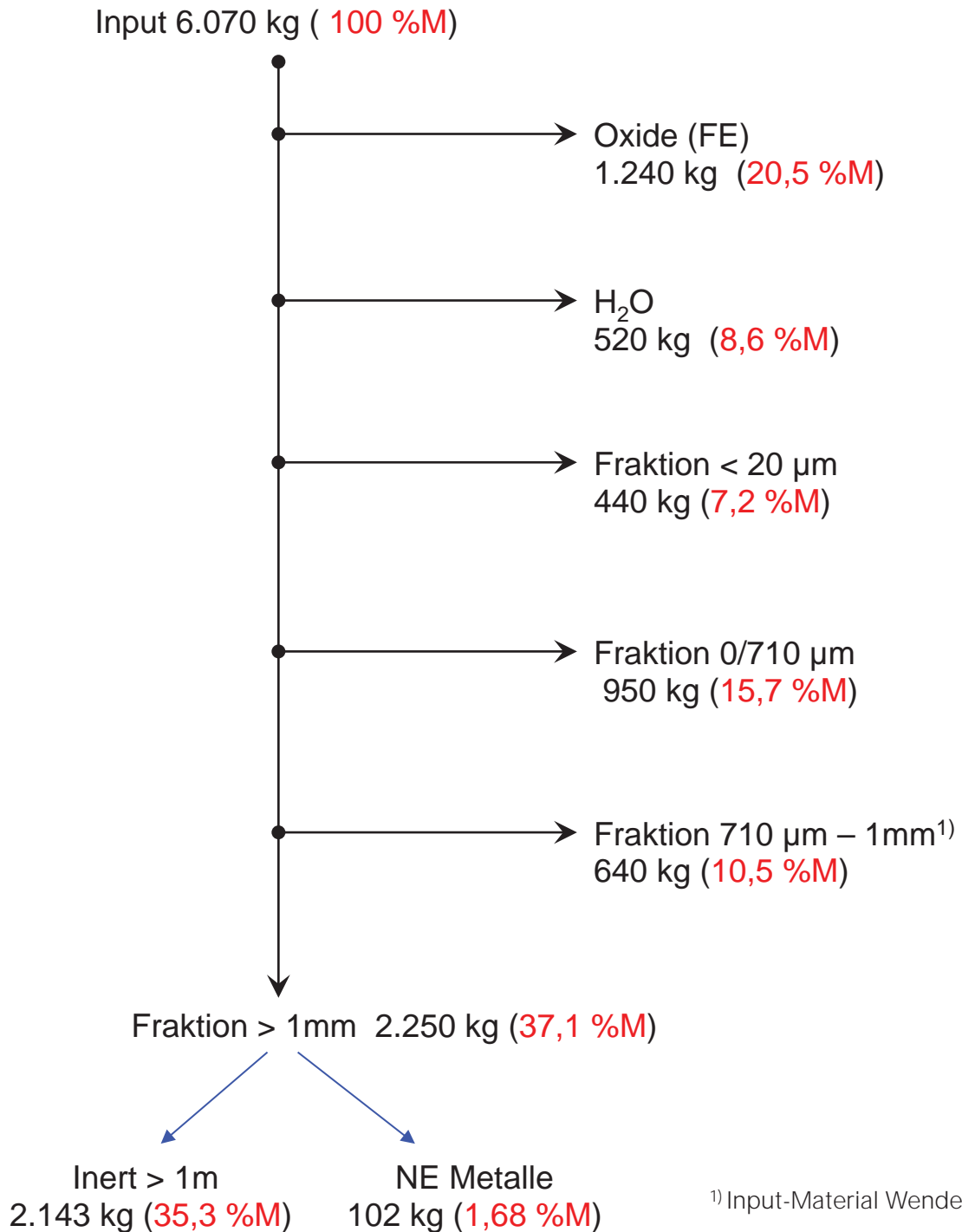
Abb. 25: Wendelscheider

Test 1 Beta II (A + C) Linien

Impact Speed: 1.050 km/h

Versuchstag: 23.07.2015

Input: MVB-Schlacke 0/2 mm aus der Alpha- Linie (48 % von gesamter MV-Schlacke)



¹⁾ Input-Material Wendelscheider

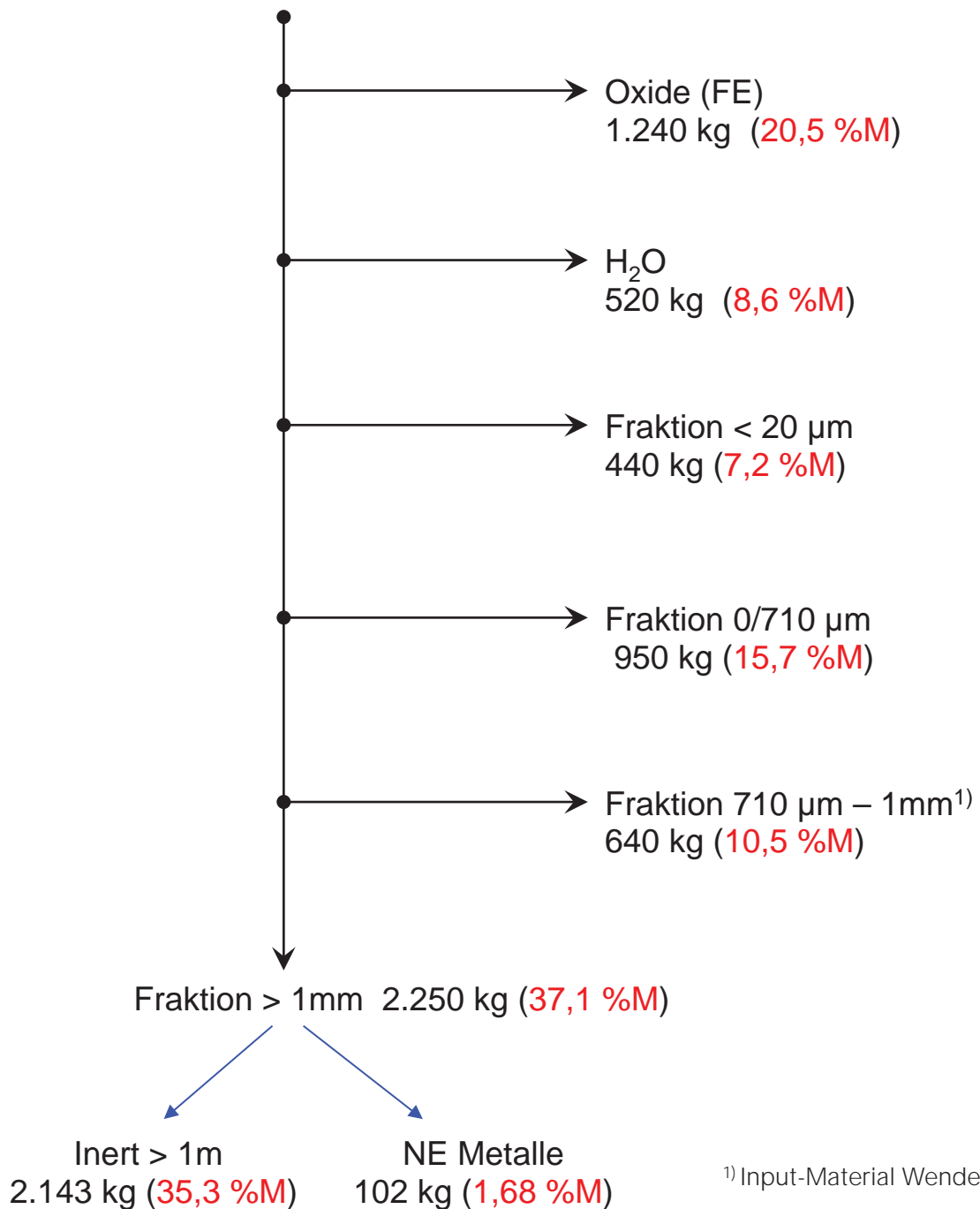
Test 2 Beta II (A + C) Linien

Impact Speed: 1.100 km/h

Versuchstag: 23.07.2015

Input: MVB-Schlacke 0/2 mm aus der Alpha- Linie (48 % von gesamter MV-Schlacke)

Input 6.070 kg (100 %M)



¹⁾ Input-Material Wendelscheider

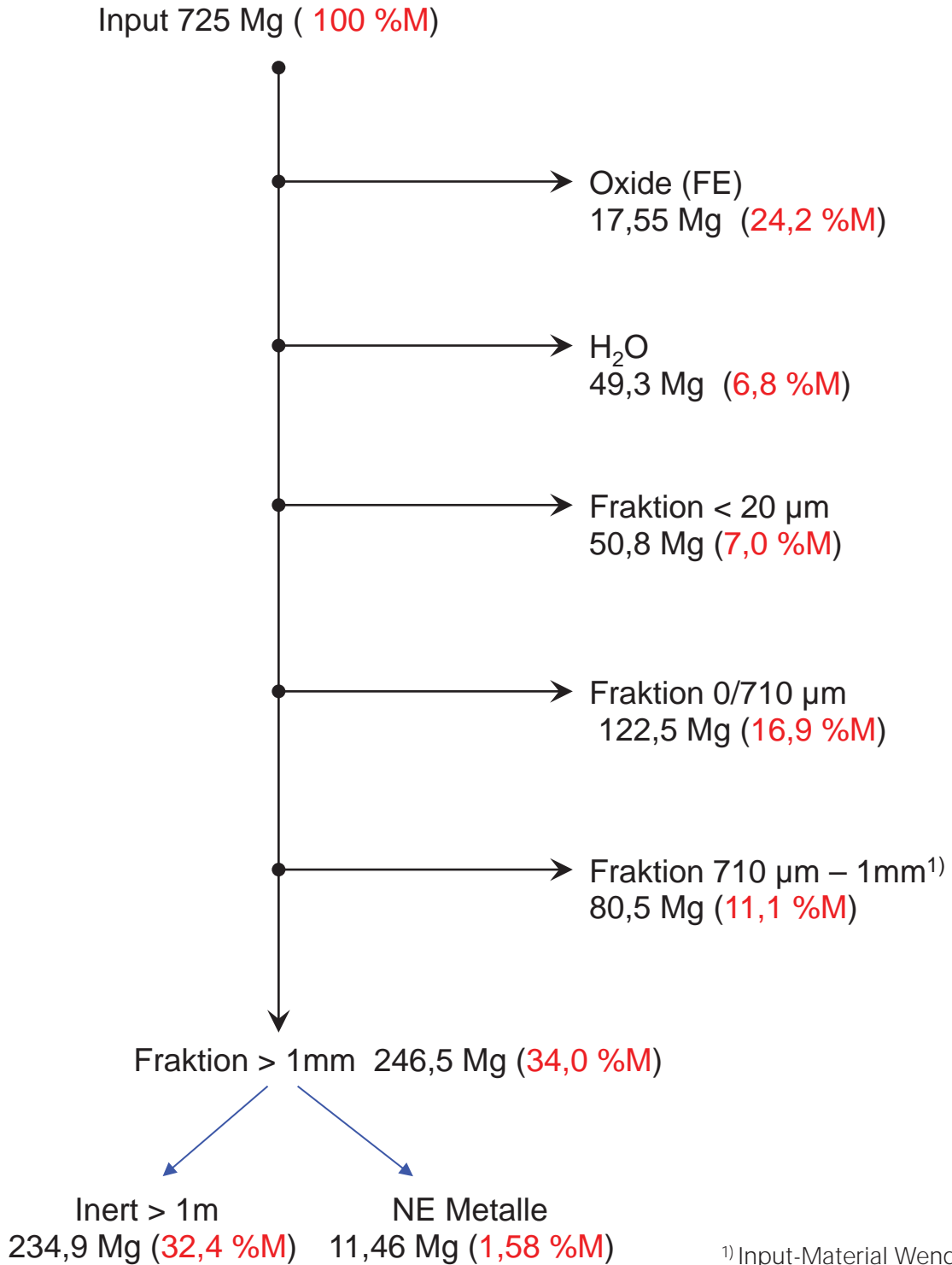
Test 3

Beta II (A + C) Linien



Impact Speed: 1.200 km/h

Input: MVB/ MVR-Schlacke 0/2 mm aus der Alpha- Linie (50,5 % von gesamter MV-Schlacke)



¹⁾ Input-Material Wendelscheider

TARTECH eco industries AG | Unter den Linden 32-34 | 10117 Berlin

Projektträger Jülich Forschungszentrum
Jülich GmbH
Herr Dr. Jacobi
Herr Lattka
Zimmerstrasse 26-27

TARTECH eco industries AG

Unter den Linden 32-34

10117 Berlin

T +49 30 2067159-0

F +49 30 2067159-11

www.tartech.com

10969 Berlin

Dipl. Ing. Claus Gronholz - Chief Technical Officer

T: +49 30 2067159

M: +49 0152- 22 94 69 51

E: cgronholz@tartech.com

Berlin, 02.10.2014

Antrag auf Umwidmung der Zuwendungen

Sehr geehrter Herr Dr. Jacobi,
sehr geehrter Herr Lattka,

nach reiflicher Überlegung möchten wir, die TARTECH AG (TTAG), die im August / September 2014 angedachte Übertragung der Projektarbeiten von der TARTECH AG auf die TARTECH & KNETTENBRECH Mineralikaufbereitung GmbH (TKM) in Wiesbaden, nicht weiter verfolgen.

Da das Technikum, die Beta-Linie, in seiner Herstellung mit etwa 770.000 € doch deutlich teurer wird, als die von uns kalkulierten und beantragten € 608.109, schlagen die Gesellschafter der TKM vor, die Beta-Linie zu 100 % aus eigenen Mitteln zu errichten. Der TTAG wird diese Beta-Linie, mit all den speziellen Einrichtungen dann im Rahmen des r³-Vorhabens für die Aufbereitung der Schlacken aus Berlin und Hamburg, zur Verfügung gestellt.

Die Kosten für die Nutzung der Beta Linie zur Aufbereitung von ca. 4.500 t Schlacken von der BSR und der SRH sind im Arbeitspaket AP 2/2 eingestellt.

In diesen Kosten sind auch die hohen Energiekosten, die bei der großtechnischen Trocknung der Schlacken auf einen Wassergehalt von < 1%M erforderlich sind, sowie die Kosten für den Wasserbedarf der Schwingsetzmaschine, des Wendelscheiders, alle Verschleißkosten und die

Commerzbank AG Berlin

Konto 501993000

BLZ 10040000

Amtsgericht Berlin

HRB 129494

Vorstand:

Alexander Graf von Kalckreuth

Aufsichtsrat:

Udo Müller (Vorsitzender)

Material – Handling – Kosten, enthalten.

Die Beschickung und Entsorgung der Stoffströme führt auf Anweisung eines Technikers / Ingenieurs der TTAG, die TKM mit eigenem Personal und eigenen Maschinen, durch.

Damit werden alle Tests / Versuche mit der Beta-Linie unter der Regie der TTAG durchgeführt.

Die Ingenieure / Techniker der TTAG legen in Abstimmung mit den Projektpartnern alle ingenieurwissenschaftlichen Arbeitsprogramme, die auf der Beta-Linie durchgeführt werden sollen, fest.

Damit gehören nach Rücksprache mit der TKM alle wissenschaftlichen Forschungsergebnisse ausschließlich der TTAG.

Die am 15. September 2014 in München vorgestellte Meilensteinplanung wäre durch die nachfolgende Umwidmung nicht gefährdet.

Mit dieser Umwidmung reduzieren sich die Selbstkosten des Vorhabens (0881) noch einmal um € 53.554,00 auf jetzt **€ 2.166.273,00** und dieses, obwohl die TTAG alle Transportkosten der Projektpartner SRH und BSR in voller Höhe von € 173.300,00 übernommen hat.

Wir bitten höflich, um die nachfolgend detailliert nach Arbeitspaketen aufgeschlüsselte Umwidmung unserer Zuwendungen.

Für Rückfragen steht Ihnen der Unterzeichner jederzeit gern zur Verfügung.

Mit besten Grüßen

gez. Dipl. Ing. Claus Gronholz
(Projektleiter)

Gesamtvorkalkulation nach der Umwidmung im September 2014

0823	FE – Fremdleistung	457.865,00 €
0837	Personalkosten	756.582,00 €
0838	Reisekosten	67.476,00 €
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	884.350,00 €
0881	Selbstkosten des Vorhabens	2.166.273,00 €
0882	Eigenmittel des Antragstellers	974.822,85 €
0884	Zuwendungen	1.191.450,15 €

Übersicht der Arbeitspakete (AP) im r³ – F&E Vorhaben

Im Teil 1: **Behandlung von Schlacken aus Hamburg und Berlin in der Großanlage (Alpha-Linie) in Wiesbaden (TKM – Anlage)**

- AP 1/1:** Entwicklung einer Ausbaustufe für den TAR – Prozessor (Hochgeschwindigkeits – Anschluß) der TKM – Anlage in Wiesbaden.
- AP 2/1:** Gewinnung von 3.000 t Rohschlacke in der MVA *Stellingor Moor* (SRH) in Hamburg sowie deren Transport nach Wiesbaden. Gewinnung von 1.000 t aufbereiteter MV – Schlacke aus der MVA Stapelfeld sowie deren Transport nach Wiesbaden.
- AP 3/1:** Die Gewinnung und Separation einer Trägersubstanz für chemisch gebundenes Kupfer in MV – Schlacken.
- AP 4/1:** Gewinnung von 500 t deponierter MV – Schlacke auf der Deponie *Schöneicher Plan* (BSR), sowie deren Transport nach Wiesbaden und zurück zur Deponie Schöneicher Plan
- AP 5/1:** Entwicklung und Herstellung einer speziellen elektronischen Steuerung, für die Anforderungen im r³ F&E Vorhaben.
- AP 6/1:** Die chargenweise Behandlung der MV - Schlacken aus den Arbeitspaketen AP 2/1 und AP 4/1 in der TKM – Anlage in Wiesbaden, sowie die Verwertung der Mineralik.
- AP 7/1:** Auswertung der Ergebnisse aus dem AP 6/1 sowie die Bereitstellung von metallischen und mineralischen Konzentraten für die Verbundpartner.

r3 - Vorhaben

Teil 1:
Behandlung von Schlacken aus Hamburg und Berlin
in der Großanlage in Wiesbaden



0823	FE - Fremdleistung	ATZ	91.000,00 €
		ECD	190.450,00 €
0837	Personalkosten (Entwicklung + Test's)		417.282,00 €
0838	Reisekosten		46.976,00 €
0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten:		
	- Behandeln der 5.000t in der TKM - Anlage		
	43,00 €/t		215.000,00 €
	- 3.000 t Transport von HH nach Wiesbaden	31,00 €/t	93.000,00 €
	- 500 t Transport von BSR nach Wiesbaden und zurück zur BSR	83,60 €/t	41.800,00 €
	- 5.000 t Verwertung bei der EWL	14,00 €/t	70.000,00 €
	- 1.000 t Transport Stapelfeld - Wiesbaden	38,50 €/t	38.500,00 €
0881	Selbstkosten des Vorhabens (Teil 1)		<u>1.204.008,00 €</u>

FKZ 033R086B

Teil 1 (Alpha - Linie Wiesbaden)

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 1/1	Entwicklung einer Ausbaustufe für den TAR - Prozessor (Hochgeschwindigkeits - Anschluß) der TKM - Anlage in Wiesbaden	(0823) C. Gronholz - 1.086 Std.	119.460,00 €
		M.Schmidt - 268 Std.	17.420,00 €
	Reisekosten (0838) 11 Tage Berlin - Hamburg	C. Gronholz	5.500,00 €
	Summe AP 1/1		142.380,00 €
AP 2/1	Gewinnung von 3.000 t Rohschlacke in der MVA <i>Stellinger Moor</i> (SRH) in Hamburg, sowie deren Transport nach Wiesbaden. Gewinnung von 1.000 t aufbereiteter MV - Schlacke aus der MVA-Stapelfeld, sowie deren Transport nach Wiesbaden.	(0823) M. Schmidt - 1 Std.	65,00 €
		C.Gronholz - 8 Std.	880,00 €
		Transport von HH nach Wiesbaden 3.000 t (0850)	93.000,00 €
		Transport von Stapelfeld nach Wiesbaden 1.000 t (0850)	38.500,00 €
	Reisekosten (0838) 6 Tage Berlin - Wiesbaden	C. Gronholz	3.000,00 €
	Summe AP 2/1		135.445,00 €

FKZ 033R086B

Teil 1 (Alpha - Linie Wiesbaden)

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand (0823)	Kosten
AP 3/1	Gewinnung und Separation einer Trägersubstanz für chemisch gebundenes Kupfer in MV - Schlacken.	C. Gronholz - 142 Std.	15.620,00 €
		M. Schmidt - 81 Std.	5.265,00 €
	Reisekosten (0838)		
	3 x zur Fa. SGM Magnetics nach Brescia / Italien	C. Gronholz - 6 Tage M. Schmidt - 6 Tage	4.988,00 € 4.988,00 €
	Summe AP 3/1		30.881,00 €
AP 4/1	Gewinnung von 500 t deponierter MV - Schlacke auf der Deponie <i>Schöneicher Plan</i> (BSR), sowie deren Transport nach Wiesbaden und zurück zur Deponie <i>Schöneicher Plan</i>	Transport von Berlin nach Wiesbaden 500 t und zurück (0850)	41.800,00 €
	Reisekosten (0838)		
	1 Tag Berlin - Wiesbaden	M. Schmidt	500,00 €
	Summe AP 4/1		42.300,00 €
AP 5/1	(0823) Entwicklung und Herstellung einer speziellen elektronischen Steuerung, für die Anforderungen im r ³ F & E Vorhaben 1. Systemplanung 2. Elektroplanung Anlage 3. Software Leitsystem - Visualisierung und Bedienung	1.400 Std.	91.000,00 €

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 5/1	4. Software Leitsystem - Datenhaltung, Datenauswertung und Datenfernübertragung 5. SPS - Systemsoftware 6. Inbetriebnahme einschließlich Anlageneinführung und Schulung		
	Reisekosten (0823)		8.000,00 €
	Summe AP 5/1		99.000,00 €
AP 6/1	Die chargenweise Behandlung der MV - Schlacken aus den AP 2/1 und AP 4/1 in der TKM - Anlage in Wiesbaden, sowie die Verwertung der Mineralik	(0823) C. Gronholz - 96 Std. M.Schmidt - 64 Std.	10.560,00 € 4.160,00 €
	Reisekosten (0838) 16 Tage Berlin - Wiesbaden	C. Gronholz M. Schmidt	8.000,00 € 8.000,00 €
	Aufbereiten von 5.000 t MV - Schlacken in der TKM - Anlage in Wiesbaden inkl. aller Betriebskosten (Personal, Verschleiss, Energie, etc.)	(0850) 43,00 €/t	215.000,00 €
	Verwertung von 5.000 t aufbereiteter MV - Schlacke bei der ELW in Wiesbaden	14,00 €/t	70.000,00 €
	Summe AP 6/1		315.720,00 €

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
		(0823)	
AP 7/1	Auswertung der Ergebnisse aus dem AP 6/1 sowie die Bereitstellung von metallischen und mineralischen Konzentraten für die Verbundpartner	C. Gronholz - 85 Std. M.Schmidt - 118 Std.	9.350,00 € 7.670,00 €
	Reisekosten (0838)		
	2 Tage Berlin - Hamburg	C. Gronholz M.Schmidt	1.000,00 € 1.000,00 €
	2 Tage Berlin - Wiesbaden	C. Gronholz M. Schmidt	1.000,00 € 1.000,00 €
	Summe AP 7/1		21.020,00 €

Übersicht der Arbeitspakete (AP) im r³ – F&E Vorhaben

Im Teil 2: Rückgewinnung von Strategischen-Metallen und Mineralien aus Rückständen thermischer Prozesse mit der Beta - Linie im Technikums - Maßstab

- AP 1/2:** Entwicklung einer Aufbereitungsanlage im Technikums – Maßstab, mit der im Batchbetrieb (50 kg – 1.500 kg) die Fraktion 0/3 mm aus der TKM – Anlage, sowie Aschen aus der WEEE – Monoverbrennung, behandelt werden können.
- AP 2/2:** Nutzung der Beta – Linie der TKM GmbH zur Aufbereitung / Behandlung von 4.500 t Schlacken der Fraktion 0/2 mm aus der Alpha-Linie.
- AP 3/2:** Transport der Mineralik 0/250 µm von Wiesbaden nach Hamburg sowie der Aschen aus der WEEE – Monoverbrennung von Sulzbach – Rosenberg (Frauenhofer Umsicht) nach Wiesbaden.
- AP 4/2:** Behandlung der Stoffe/ Materialien aus dem AP 3/2 im Technikum / Beta-Linie.
- AP 5/2:** Bereitstellung von Proben finaler Erzeugnisse wie Raffinaden, Konzentrate aus strategischen Mineralien und Metallen für die Verbundpartner.
- AP 6/2:** Auswertung der r³ – relevanten Ergebnisse, wie Konzentrationen in den Rückständen thermischer Prozesse.

r3 - Vorhaben



**Teil 2:
Rückgewinnung von strategischen Metallen und Mineralien aus
Rückständen der thermischen Verwertung von Abfällen mit der Beta-Linie
im Technikums - Maßstab**

0823	FE - Fremdleistung	176.415,00 €
0837	Personalkosten	339.310,00 €
0838	Reisekosten	20.500,00 €
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	426.050,00 €
0881	Selbstkosten des Vorhabens (Teil 2)	<u>962.275,00 €</u>

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 1/2	Entwicklung einer Aufbereitungsanlage im Technikums - Maßstab mit einer zusätzlichen Trocknungs-Linie (0823)	C. Gronholz - 865 Std.	95.150,00 €
		M.Schmidt - 395 Std.	25.675,00 €
	Reisekosten (0838)		
	2 Tage Berlin - Zwickau	C. Gronholz	1.000,00 €
	1 Tag Berlin - Mühlheim	C. Gronholz	500,00 €
	2 Tage Berlin - Hamburg	C. Gronholz	1.000,00 €
	2 Tage Berlin - Göppingen	C. Gronholz	1.000,00 €
	Summe AP 1/2		124.325,00 €

FKZ 033R086B
 Teil 2 (Beta - Linie Hamburg)

**Nutzung der Beta-Linie der TKM GmbH
 zur Aufbereitung / Behandlung**



Arbeitspaket	Bezeichnung (0850)	Anschaffungspreis / Herstellungskosten
AP 2/2	Behandeln von 4.500 t MV - und EEEW - Schlacken in der Beta-Linie der TKM in Wiesbaden. Verfahrensschritte: α -Aufschluss, Trocknung, Hochgeschwindigkeitsaufschluss, Wirbelstrom - Abscheidung, 2 - Linien Separationsverfahren. Inkl. aller Betriebskosten wie Verschleiss, Strom, Gas für Trocknung etc. 91,70 €/t	412.650,00 €
	C. Gronholz 48 Std. (0823) M.Schmidt 12 Std. (0823)	5.280,00 € 780,00 €
	Reisekosten (0838) 18 Tage Berlin - Wiesbaden	C.Gronholz 9.000,00 €
	Summe AP 2/2	427.710,00 €

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 3/2	Transport der Mineralik 0/250 µm von Wiesbaden nach Hamburg, sowie der Aschen aus der WEEE - Mono-verbrennung von Sulzbach-Rosenberg (Fraunhofer Umsicht) nach Hamburg. (0823)	C. Gronholz - 16 Std.	1.760,00 €
		M.Schmidt - 16 Std.	1.040,00 €
	Transport von 15 Big Bags von Wiesbaden nach Hamburg (0850)		9.000,00 €
	Transport von 3 Big Bags von Sulzbach - Rosenberg nach Hamburg (0850)		2.400,00 €
	Summe AP 3/2		14.200,00 €

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 4/2	Behandlung der Stoffe/Materialien aus dem AP 3/2 im Technikum (0823)	C. Gronholz - 266 Std.	29.260,00 €
		M.Schmidt - 192 Std.	12.480,00 €
	Summe AP 4/2		41.740,00 €
AP 5/2	Bereitstellung von Proben finaler Erzeugnisse wie Raffinaden, Konzentrate aus startegischen Metallen und Mineralien für die Verbundpartener (0823)	M. Schmidt - 12 Std.	780,00 €
	Transport und Versandkosten (0850)		2.000,00 €
	Summe AP 5/2		2.780,00 €

Arbeitspakete und Leistungsangebote



Arbeitspaket	Inhaltsbeschreibung	Aufwand	Kosten
AP 6/2	Auswertung der r ³ - relevanten Ergebnisse, wie Konzentrationen in den Rückständen thermischer Prozesse (0823)	C. Gronholz - 30 Std.	3.300,00 €
		M.Schmidt - 14 Std.	910,00 €
	Reisekosten (0838) 8 Tage Berlin - Wiesbaden	C. Gronholz	8.000,00 €
	Summe AP 6/2		12.210,00 €

r³ – Strategische Metalle, Verbundvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen – relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR)

FZK 033R086B

Übersicht über die Umwidmung der geplanten Kosten

Kosten vor der Umwidmung	Kosten nach der Umwidmung				
Einzelpositionen	0813 Material	0823 FE-Fremdleistung	0837 Personalkosten	0838 Reisekosten	0850 sonstige Kosten
0813 Material 608.109 €	/	35.945 €	103.922 €	6.068 €	416.610 €
0823 FE – Fremdleistung 421.920 €	/	421.920 €	/	/	/
0837 Personalkosten 652.660 €	/	/	652.660 €	/	/
0838 Reisekosten 61.408 €	/	/	/	61.408 €	/
0850 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten 467.740 €	/	/	/	/	467.740 €
Kosten nach der Umwidmung	0 €	457.865 €	756.582 €	67.476 €	884.350 €

SGS Institut Fresenius GmbH Goerzallee 305a 14167 Berlin

ecd Hamburg GmbH
Glockengießerwall 26
20095 Hamburg

Prüfbericht
Auftrags Nr. 3464982
Kunden Nr. 10078484

Herr Oliver Sommer
Telefon 030/84718-220
Fax 030/84718-150

Environmental Services
SGS Institut Fresenius GmbH
Goerzallee 305A
14167 Berlin



Berlin, den 30.09.2015

Ihr Auftrag/Projekt: Untersuchungen von MVA-Schlackefraktionen aus einer Schlackeaufbereitungsanlage
Ihr Bestellzeichen:
Ihr Bestelldatum: 03.08.2015

Prüfzeitraum vom 03.08.2015 bis 24.09.2015
erste laufende Probenummer 150721645
Probeneingang am 06.08.2015

SGS Institut Fresenius

Oliver Sommer
Customer Service

Naser Riazati
Customer Service

Ines Walther
Customer Service

Seite 1 von 3

Proben vom Kunden geliefert

Matrix: Schlacke

1. Ergebnisse Seltene Erden, Germanium und Gold

 Probenvorbereitung: Aufschluß für seltene Erden mit HNO₃/HF/H₂SO₄;KÖWA-Aufschluß für Gold
 Verfahren: ICP-MS

SGS IF-Proben-Nr.:

150721645

Probenkennung:

Schwerfraktion 0,71 mm - 1,1 mm

		I	II	III	Mittelwert	Labor (1)
Lanthan (La)	mg/kg	17	22	18	19,0	TS
Cer (Ce)	mg/kg	34	36	24	31,3	TS
Praseodym (Pr)	mg/kg	2,8	3,2	4,2	3,4	TS
Neodym (Nd)	mg/kg	11	12	17	13,3	TS
Samarium (Sm)	mg/kg	1,9	2,1	1,7	1,9	TS
Europium (Eu)	mg/kg	1,7	0,5	0,4	0,9	TS
Gadolinium (Gd)	mg/kg	1,9	2,2	5,1	3,1	TS
Terbium (Tb)	mg/kg	0,40	0,40	0,4	0,4	TS
Dysprosium (Dy)	mg/kg	1,4	1,7	2	1,7	TS
Holmium (Ho)	mg/kg	0,3	0,3	0,3	0,3	TS
Erbium (Er)	mg/kg	1,5	1,5	1,6	1,5	TS
Thulium (Tm)	mg/kg	0,1	0,1	0,1	0,1	TS
Ytterbium (Yb)	mg/kg	1,1	1	1	1,0	TS
Lutetium (Lu)	mg/kg	0,2	0,2	0,1	0,2	TS
Yttrium (Y)	mg/kg	35	11	11	19,0	TS
Scandium (Sc)	mg/kg	5,1	5,1	4,4	4,9	TS
Germanium (Ge)	mg/kg	< 1	< 1	< 1	< 1	TS
Gold	mg/kg	< 5	< 5	< 5	< 5	TS

150721646

Probenkennung:

Oxide aus Beta-Linie

		I	II	III	Mittelwert	
Lanthan (La)	mg/kg	19	15	22	18,7	TS
Cer (Ce)	mg/kg	27	21	23	23,7	TS
Praseodym (Pr)	mg/kg	6,1	11,0	6,5	7,9	TS
Neodym (Nd)	mg/kg	24	41	28	31,0	TS
Samarium (Sm)	mg/kg	1,7	1,3	1,3	1,4	TS
Europium (Eu)	mg/kg	0,7	0,5	0,3	0,5	TS
Gadolinium (Gd)	mg/kg	3,1	4,1	3,1	3,4	TS
Terbium (Tb)	mg/kg	0,30	0,30	0,3	0,3	TS
Dysprosium (Dy)	mg/kg	1,4	4,3	2,2	2,6	TS
Holmium (Ho)	mg/kg	0,3	0,2	0,2	0,2	TS
Erbium (Er)	mg/kg	0,7	0,7	0,6	0,7	TS
Thulium (Tm)	mg/kg	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	TS
Ytterbium (Yb)	mg/kg	0,9	0,8	0,7	0,8	TS
Lutetium (Lu)	mg/kg	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	TS
Yttrium (Y)	mg/kg	11	8,9	7,6	9,2	TS
Scandium (Sc)	mg/kg	2,8	1,9	1,6	2,1	TS
Germanium (Ge)	mg/kg	< 1	< 1	< 1	< 1	TS

 1) Die Laborstandorte der SGS Gruppe Deutschland und Schweiz gemäß den oben genannten Kürzeln sind aufgeführt unter www.fresenius.de/filestore/89/laborstandortkuerzelsgs2.pdf

Proben vom Kunden geliefert

Matrix: Schlacke

1. Ergebnisse Mikrosortieranalyse und REM-EDX Untersuchung

Durchführung:

Ca. 50 g der Probe wurde über Mühle (0,25 mm Sieb) gegeben
Sortiert wird der Anteil > 0,25 mm (Siebrückstand)
zur Kontrolle wurde der Siebrückstand von 0,30 g von Hand (0,25 mm) nachgesiebt
Mittels Magneten wurde FE und Stahl aus Siebrückstand > 0,25 mm abgetrennt
Rest Anteil > 0,25 mm unter Lichtlupe sortiert.

Sortieranalyse

Probennummer	150721645 Schwerfraktion 0,71- 1,1 mm
Probenkennung:	
Masse ges. [g TR]	50,08
Auswaage:	[g]
FE - Metalle	0,0325
VA - Stahl	0,0901
NE-Metalle	0,0372
Restmineralik	49,9202
Anteile in Prozent	[%]
FE - Metalle	0,06
VA - Stahl	0,18
NE-Metalle	0,07
Restmineralik	99,68

Labor (1)

BE

Summe aller Metallteile
%
0,32

Ergebnisse REM-EDX laut Prüfbericht 3464982_REMA150796 (Anlage)

SGS Proben-Nr.	Konzentration metallreicher Partikel in der Feinfraktion	Massenanteil „nicht zerkleinerbarer“ Metallteile	Summe aller Metallteile
	%	%	%
150721645	0,24	0,09	0,33

DD

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH · Königsbrücker Landstraße 161 · D-01109 Dresden

ecd Hamburg GmbH
Glockengießerwall 26
20095 Hamburg

Auftrags-Nr.: 3476982
Auftrag vom: 03.08.2015
Kunden-Nr.: 10124595



Herr Sommer
t +49 30 84728-220
f +49 30 84718-299
oliver.sommer@sgs.com

Environment Services

Berlin, 24.09.2015

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH
Goerzallee 305a
D-14167 Berlin

Ihr Auftrag/Projekt: Untersuchung von Feinschlacke auf Metalle
Ihr Bestellzeichen:
Ihr Bestelldatum: 03.08.2015

Prüfberichts-Nr.: 3464982-REMA150796
Prüfberichts-Titel: Untersuchung von Schlacke auf Metallpartikel
Auftraggeber: ecd Hamburg GmbH
Probennahme: durch Auftraggeber
SGS-IF-Proben-Nr.: 150721645
Probeneingang: 07.08.2015
Untersuchungsmethoden: Rasterelektronenmikroskopie (REM)
mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX),

Prüfzeitraum: 10.09.2015 – 24.09.2015
Gesamtumfang: 4 Seiten Bericht und 1 Anlage

o.c.
Oliver Sommer
Customer Service

Naser Riazati
Customer Service
is loah

Ines Walther
Customer Service

Untersuchung von Schlacke auf Metallpartikel

1. Aufgabenstellung

Untersuchung einer Schlackeprobe auf metallische Partikel in Anlehnung an BIA 7487

2. Probenbeschreibung

Tab. 1: Probenübersicht

SGS-IF-Proben-Nr.	Laborinterne Proben-Nr.	Probenart
150721645	A50796-1	Schlacke Schwerfraktion 0,71 mm – 1,1 mm

3. Untersuchungsverfahren

3.1. Probenvorbereitung und -voruntersuchungen

Die aus Berlin angelieferte Probe (Gesamtmasse 10,80g) wurde zunächst einer Siebung über ein 2mm-Sieb unterzogen. Dabei wurden größere Metallteile (9,09 mg) und organisches Material (0,14 g) aussortiert.

Durch stufenweises schonendes Aufmörsern der gesamten Probe und Aussortieren größerer Metallteile wurde eine Analysenprobe der Kornfeinheit < 125 µm) hergestellt.

Von der Analysenprobe wurde ein Streupräparat auf Spectrotab angefertigt und ohne weitere Präparation im REM-EDX einem Screening unterzogen. Die Untersuchung erfolgte mittels REM Hitachi S3400 NII mit EDX Bruker Quantax 400 (mit SUTW-Detektor).

3.2. REM-EDX-Untersuchung in Anlehnung an BIA 7487

Für die Untersuchung nach dem BIA-Messverfahren für Gefahrstoffe Nr. 7487 „Verfahren zur analytischen Bestimmung geringer Massengehalte von Asbestfasern in Pulvern, Pudern und Stäuben mit REM/EDX“ wurde von der gemäß 3.1. unter 125 µm zerkleinerten Ausgangsprobe eine Teilmenge von ca. 3 mg entnommen und in 150 ml Isopropanol suspendiert. Ein Teil der Suspension wurde einige Minuten lang im Ultraschallbad behandelt und geschüttelt. Auf beidseitig mit Gold beschichtetem Kernporenfilter (Polycarbonatfilter, 25 mm Durchmesser, 0,2 µm Porenweite) wurde durch Vakuumfiltration eine Filterbelegung von ca. 0,6 µg / mm² erzeugt. Der effektiv genutzte Filterdurchmesser war 15 mm.

Nach dem Trocknen wurde der belegte Filter in einem Raster-Elektronenmikroskop mit Röntgenanalysesystem (REM/EDX) bei einer Beschleunigungsspannung von 20 kV ausgewertet. Es wurde das REM Hitachi S3400 NII mit EDX Bruker Quantax 400 (mit SUTW-SDD-Detektor) eingesetzt.

Es wurde bei ca. ca. 5000facher Bildschirmvergrößerung gearbeitet, was einer Bildfeldfläche von 2244 μm^2 entspricht. Es wurde eine Filterfläche von 0,146 mm^2 (65 Bildfelder) ausgewertet.

Die Partikeluntersuchung erfolgte interaktiv. Mit Hilfe des Rückstreuelektronendetektors (BSE) wurden auf Basis des Ordnungszahlkontrastes auffällige Partikel vorausgewählt und dann mittels EDX auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Die Partikelabmessungen wurden mittels der REM-Messsoftware bestimmt.

Aus Länge L und Breite B sowie einem Formfaktor von 0,5 wurde nach der Formel $V = 0,5 L \times B \times B$ das Partikelvolumen berechnet und mit einer mittleren Dichte von ca. 5 g/cm^3 wurde der Massenanteil dieser Partikel berechnet.

4. Ergebnisse

4.1. Probenpräparation / REM-EDX-Probenvoruntersuchung

Die Ergebnisse der Probenvoruntersuchung an einem Streupräparat der Ausgangsprobe und an der auf aufgemörserten Pulverprobe sind in Anlage 1 dargestellt.

Die Ergebnisse der Probenaufbereitung sind in Tab. 2 zusammengestellt:

Tab. 2: Ergebnisse der Probenaufbereitung

Probe	Bemerkungen	Gesamtmasse angeliefert	nicht zermörserbare Metallpartikel
		g	g
150721645	Fraktion 0,71 mm – 1,1 mm	10,80	0,009

Einige Partikel dieser nicht zermörserbaren Partikel sind siehe Anlage 1 Abb. 5a und 5b abgebildet.

4.3. REM-EDX-Untersuchung in Anlehnung an BIA 7487

Die Auswertung der Filterprobe in Anlehnung an BIA 7487 ergab folgende relevante Partikelzahlen (siehe Tab. 3):

Tab. 3: Ergebnisse der Partikelanalysen an der Filterprobe

SGS Proben-Nr.	untersuchte Bildfeldanzahl	untersuchte Filterfläche [mm^2]	untersuchte Partikelanzahl	davon	Anzahl
150721645	65	0,146	1023	Fe-reiche Zn-reiche Cu-reiche Sn-reiche Mn-reiche	24 20 20 1 4

Die aus den Partikelabmessungen und der mittleren Dichte von 5 g/cm³ konservativ berechneten Massenkonzentrationen sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Ergebnisse der Partikelanalysen (in Massenkonzentrationen)

SGS Proben-Nr.	Gesamtmassen- belegung auf untersuchter Filterfläche	Partikelart	Masse metallreicher Partikel	Konzentration metallreicher Partikel	
	ng		ng	%	ppm
150721645	65	Fe-reich	0,061	0,084	835,6
		Cu-reich	0,081	0,111	1110
		Zn-reich	0,082	0,112	1123
		Sn-reich	0,003	0,004	41,1
		Mn-reich	0,008	0,011	109,6
		Summe	0,235	0,322	3219

5. Zusammenfassung / Bewertung / Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen an der Schlackeprobe ergaben folgende Konzentrationen auffälliger Partikel (siehe Tab. 5). Bei den Grobpartikeln handelt es sich um Maximalangaben, da ein großer Teil der Partikel nicht metallischer Natur ist.

Bei den metallreichen Feinpartikeln handelt es sich überwiegend um Partikel im unteren µm-Bereich, wo eine Trennung metallischer und sauerstoffhaltiger Partikel (Oxide) problematisch ist.

Tab. 5: Konzentration auffälliger Partikel

SGS Proben-Nr.	Massenanteil „nicht zerkleinerbarer“ Metallteile	Konzentration metallreicher Partikel in der Feinfraktion
	%	%
150721645	0,09	0,24

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.

- Ende des Prüfberichtes -

**Schlacke Schwerfraktion 0,71 - 1,1 mm
(SGS Proben Nr. 150721645)**

Streupräparat (Übersicht)



Abb. 1a: Übersichtsbild (15 kV REM SE)

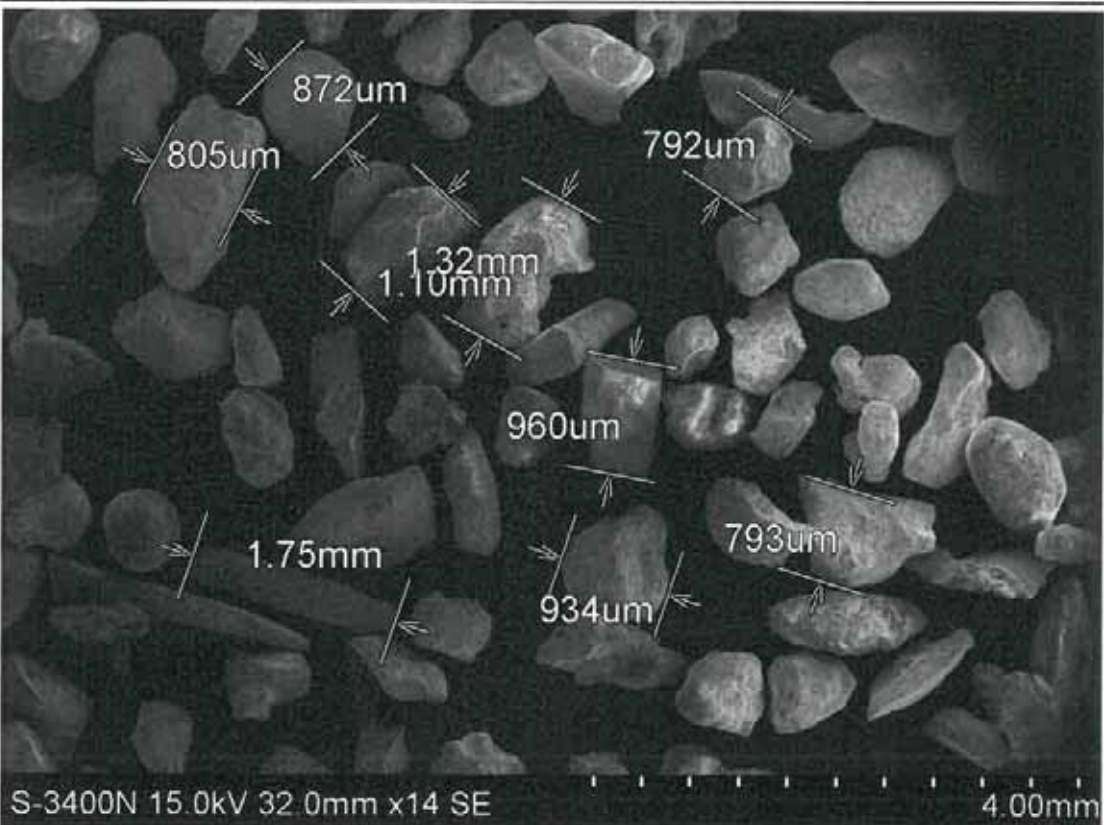


Abb. 1b: Bild 1a mit ausgewählter Bemaßung

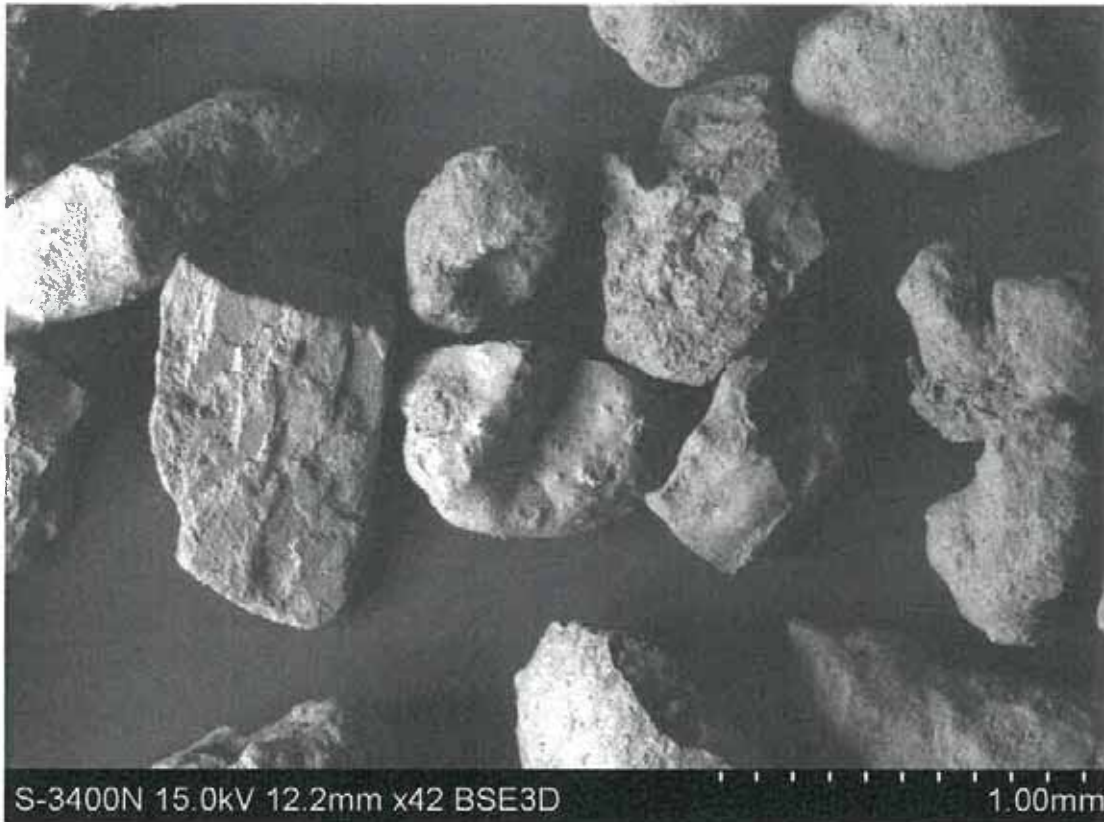


Abb. 2a: Detail aus Abb. 1a (15 kV REM BSE)

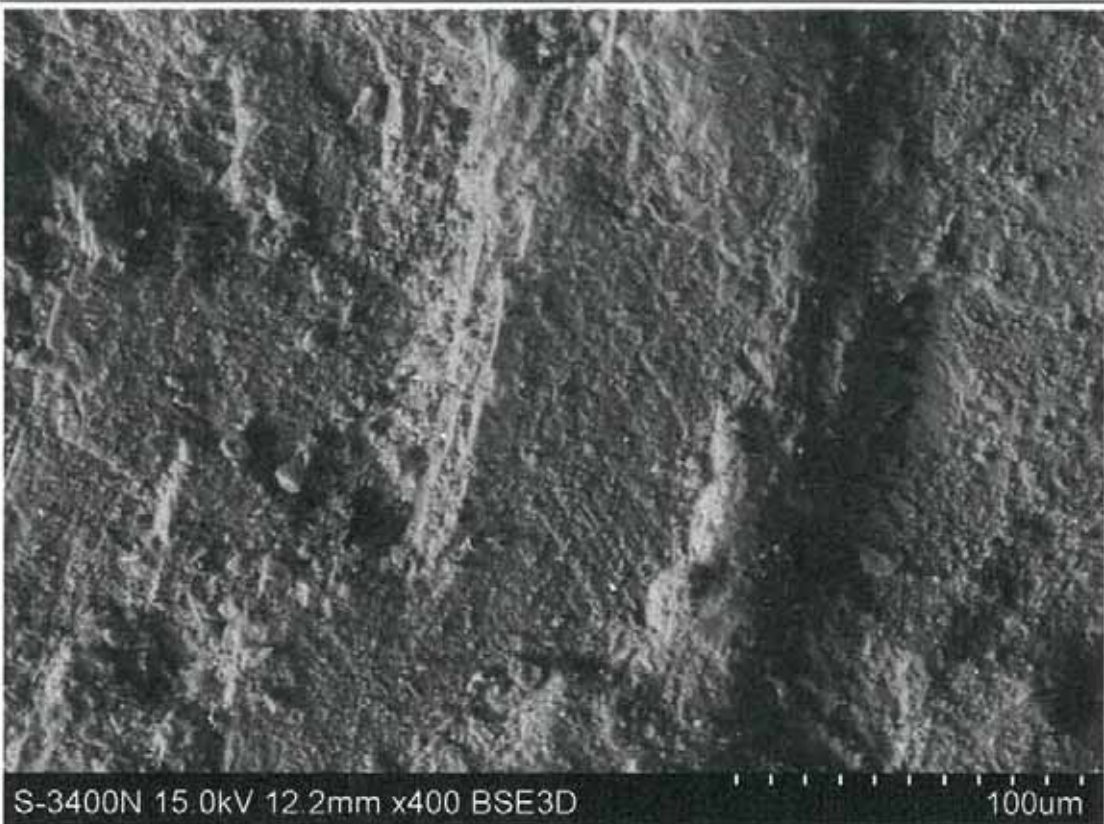


Abb. 2b: Detail aus Abb. 2a Partikel Bildmitte

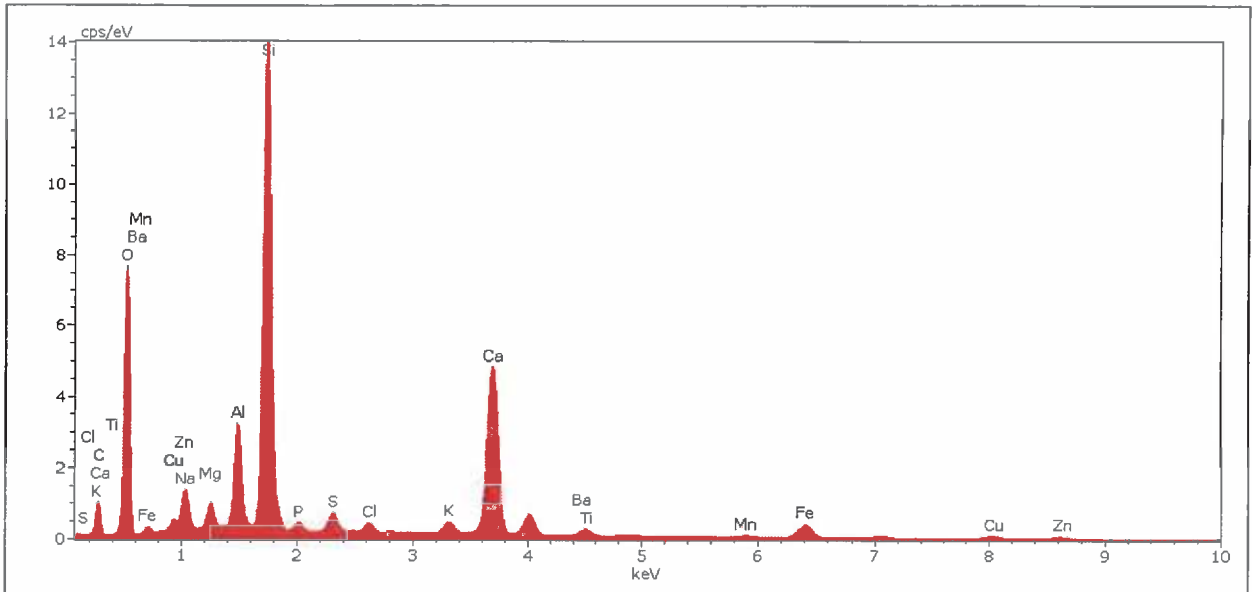


Abb. 3a: Übersichtsspektrum aufgemörserte Probe (Kornfeinheit unter 125 µm)

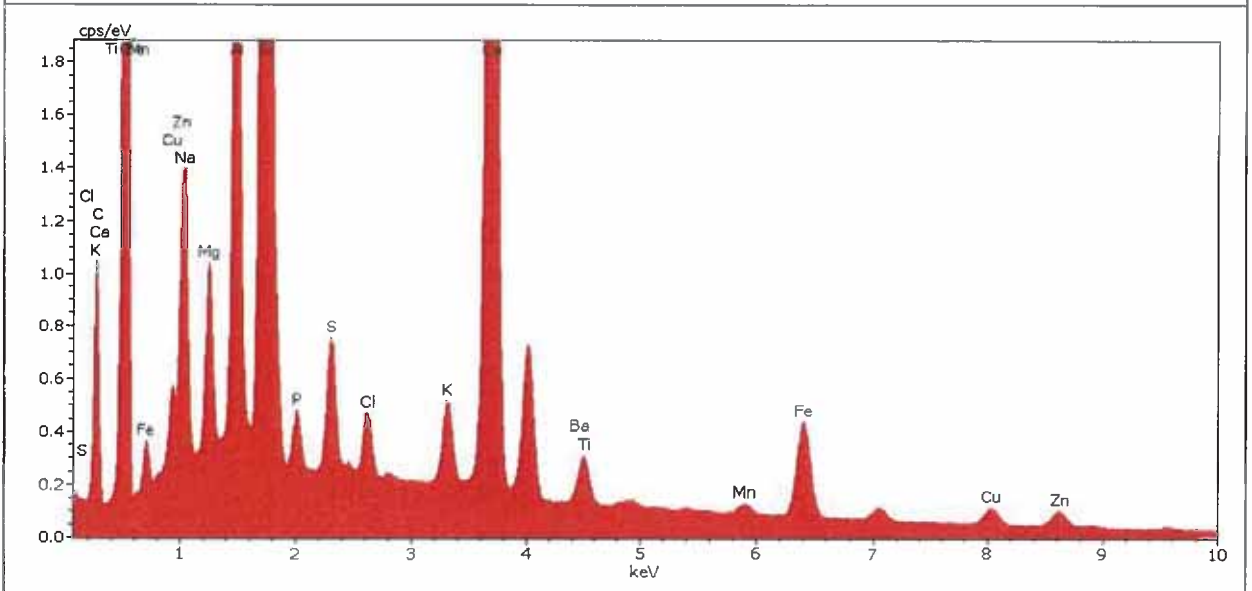


Abb. 3b: Spektrum aus Abb. 3a mit anderer Skalierung

Filterprobe

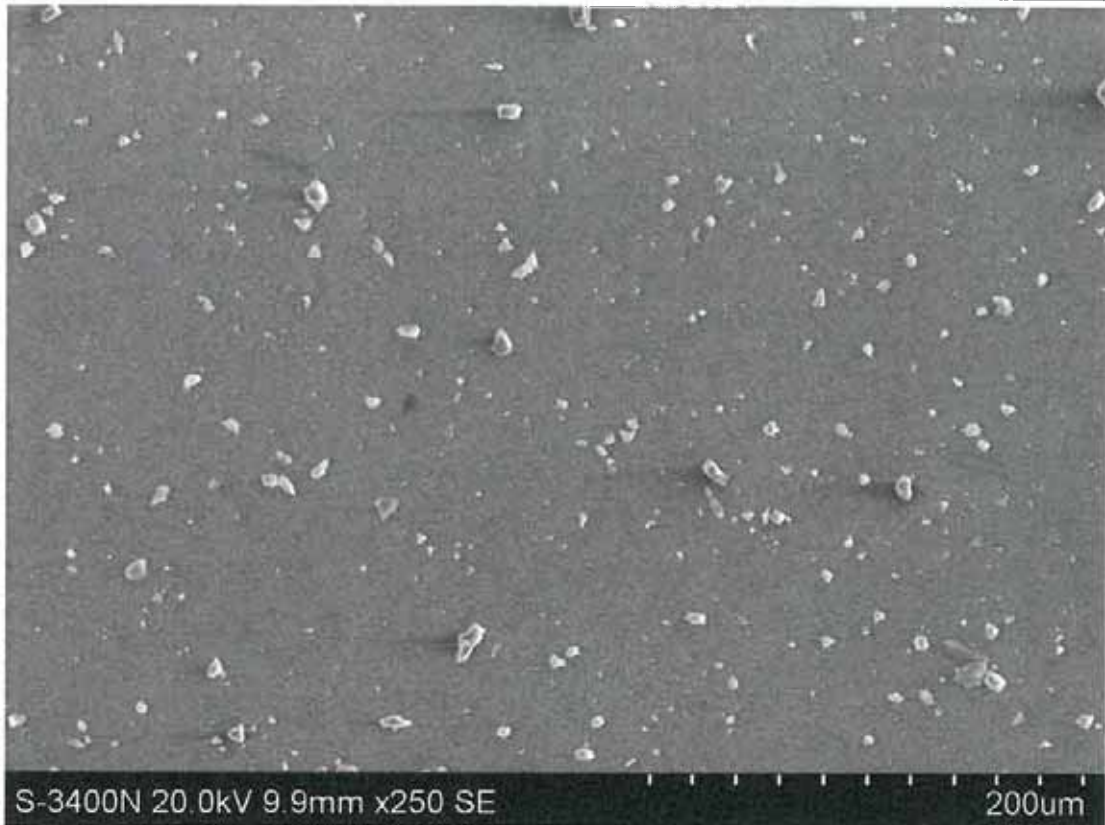


Abb. 4a: Übersicht des mit der aufgemörserten Probe belegten Kernporenfilters

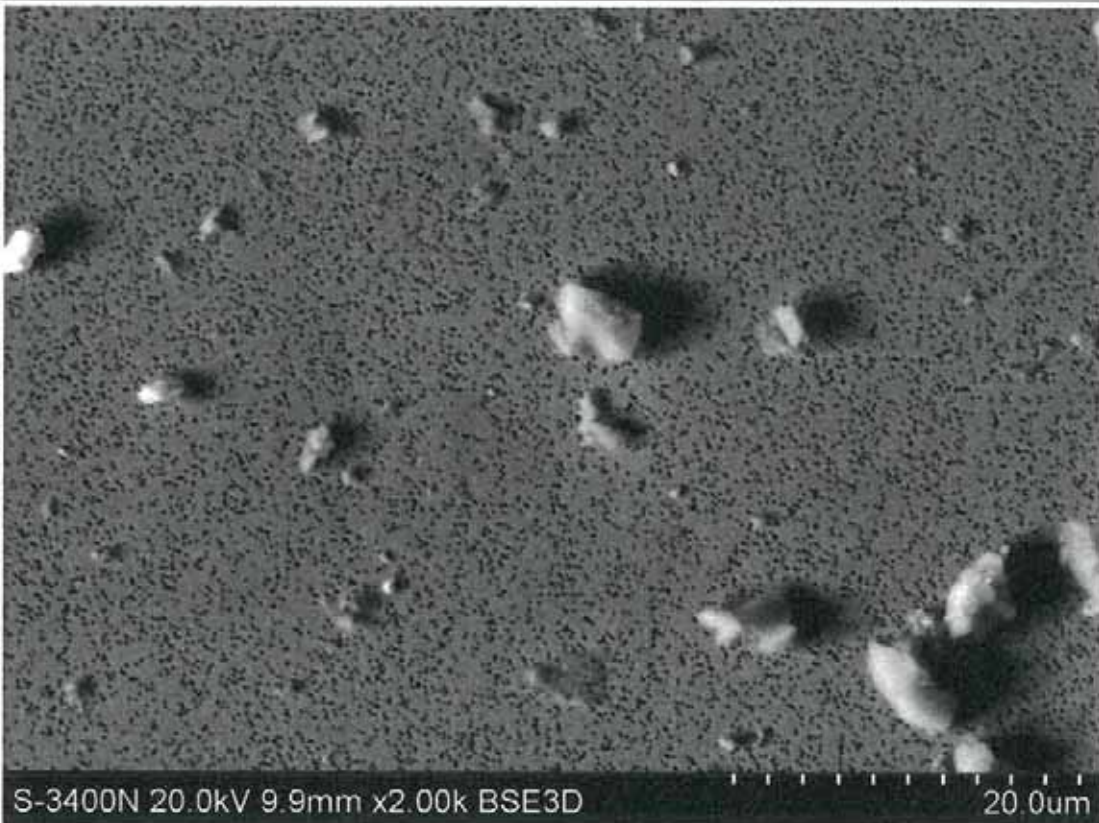


Abb. 4b: Größe eines Bildfeldes (bei 2000facher eingestellter Vergrößerung, BSE-Bild)

Herausgelesene metallische Grobpartikel



Abb. 5a: Cu-Span

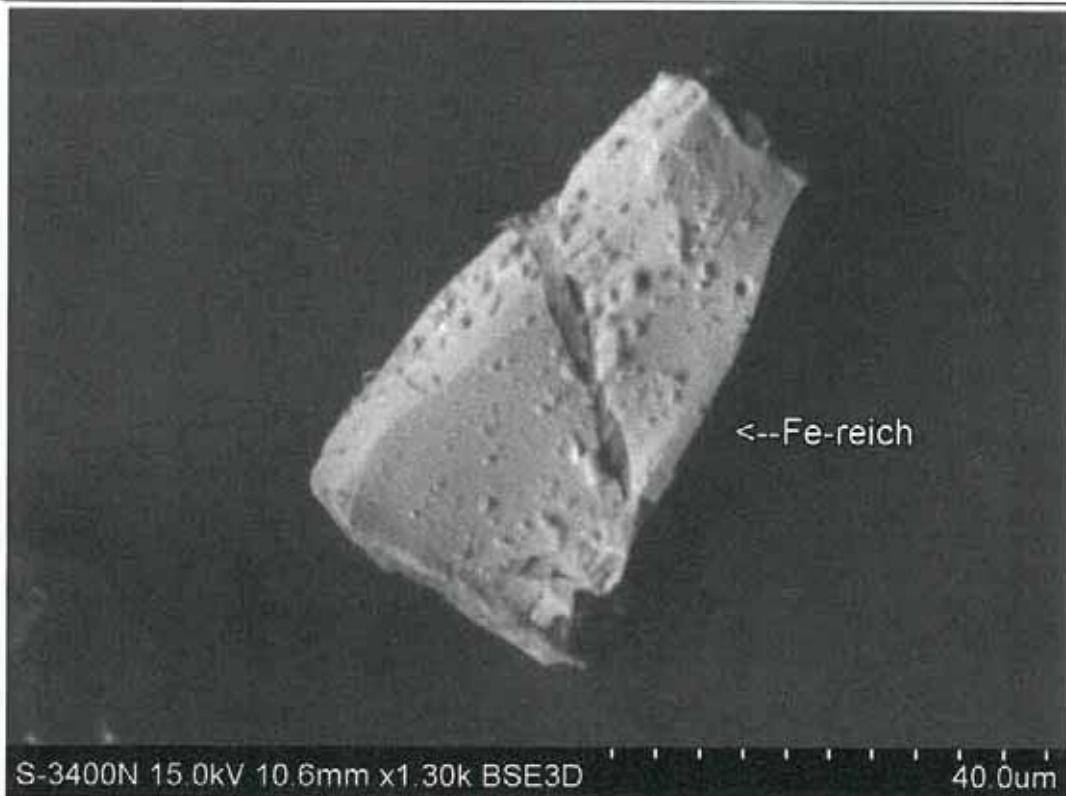


Abb. 5b. Fe-reiches Partikel

Schlussbericht

**BMBF-Forschungsvorhaben
Förderkennzeichen 033R086 C**

Verbundvorhaben:

ATR

**Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung
von ressourcenrelevanten Metallen
aus Rückständen thermischer Prozesse
mit innovativen Verfahren**

Teilprojekt C:

**Untersuchungen zu Aschen aus der Monoverbrennung
(AP 3)**

Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung (AP 6)

ausführende Stelle:

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg**

An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg

Projektleiter: Dr.-Ing. Peter Degener

Autoren und Projektwissenschaftler: M. Eng. Jonathan Aigner

Dr.-Ing. Matthias Franke

Dipl.-Ing. Jan Matyschik

M. Sc. Peter Hense

Dipl.-Ing. Katharina Reh

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015,
kostenneutral verlängert bis 31.03.2016

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086 C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung.....	1
1 Aufgabenstellung	1
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn.....	8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
II Eingehende Darstellung	18
1 Resultate des Forschungsvorhabens	18
a. Aschen aus der Verbrennung von Elektronikschrott (AP 3)	18
a.1. Verbrennungs- und Aufbereitungsversuche	18
a.1.1. Verbrennungstechnik.....	18
a.1.2. Aufbereitung und Charakterisierung	21
a.1.3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	22
a.1.3.1. Verbrennungsvorversuch 1: Brennstoff 100 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände (Ökotherm CS-30)	22
a.1.3.2. Verbrennungsvorversuch 2: Brennstoff 75 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets (Ökotherm CS-30)	23
a.1.3.3. Verbrennungsvorversuch 3: Brennstoff 50 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände + 50 Ma.-% Holzpellets (Ökotherm CS-30)	24
a.1.3.4. Verbrennungsversuch 4: Brennstoff 100 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände (MAWERA)	25
a.1.3.5. Aufbereitungsversuche (Zerkleinerung, Absiebung, Schmelze) und Charakterisierung	26
a.2. Behandlung der EAG-Asche in der TARTECH-Anlage.....	29
b. Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung (AP 6)	31
b.1. Beschreibung der großtechnischen Behandlungsversuche für verschiedene Aschen/Schlacken in der TARTECH-Anlage.....	31
b.2. Nachhaltigkeitsbetrachtung.....	33
b.2.1. Ausgangssituation und Ziele.....	33
b.2.2. Hintergrund	33
b.2.2.1. Grundlegender Aufbau von Ökobilanzen	33
b.2.2.2. ESSENZ-Methode	34
b.2.3. Methodik.....	36

b.2.3.1.	Stoffströme des ökologischen Bewertungsmodells	36
b.2.3.2.	Methode, Untersuchungsrahmen und Zieldefinition	37
b.2.3.3.	Funktionelle Einheit	38
b.2.3.4.	Systemgrenzen	38
b.2.3.5.	Vergleichsszenarien	40
b.2.3.6.	Beschreibung einer ausgewählten Referenzanlage nach dem Stand der Technik	41
b.2.3.7.	Sachbilanz.....	43
b.2.3.8.	Methoden der Wirkungsabschätzung	49
b.2.4.	Ergebnisse	49
b.2.4.1.	Wirkungsabschätzung	49
b.2.4.2.	Szenario: Rohaschen α -Linie.....	50
b.2.4.3.	Szenario: Rohasche - „ α “- versus „ $\alpha + \beta$ “-Behandlung	54
b.2.4.4.	Szenario: vorbehandelte Asche/Schlacke - Aufbereitung α - Linie versus Deponierung	56
b.2.4.5.	Szenario: EAG-Asche - Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung.....	59
b.2.4.6.	Ergebnisse der ESSENZ-Methode.....	63
b.2.5.	Diskussion und Schlussfolgerungen	68
c.	Zusammenfassung	71
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	73
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	75
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	76
4.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	76
4.2	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projekt-ende.....	76
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	77
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen.....	78
6	Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge.....	79
6.1	Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	79
6.2	Geplante Veröffentlichungen	80
Quellen	81
Anhang	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit nach [IHK Nürnberg 2016].	9
Abbildung 2: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044, Abbildung nach [Hense 2013].	10
Abbildung 3: Längsschnitt Muldenfeuerung CS30 (Hersteller: Ökotherm).	18
Abbildung 4: Aufbau der MAWERA-Feuerungsanlage.	20
Abbildung 5: Siebfraktionen der Aschen eines Verbrennungsvorversuchs mit EAG-Rückständen – Verteilung Masse und Anteile Cu pro Fraktion.	26
Abbildung 6: Siebfraktionen der Aschen eines Verbrennungsvorversuchs mit EAG-Rückständen - Ergebnisse der EDX-Elementaranalyse der Siebfraktionen.	28
Abbildung 7: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044 [Hense 2013].	34
Abbildung 8: Systemgrenzen der Aufbereitung der Aschen/Schlacken S1, S2, S3, MVB-R, MVB-V, MVR-R und D-S.	39
Abbildung 9: Systemgrenzen der Aufbereitung der EAG-Asche.	39
Abbildung 10: Ablauf einer exemplarischen Asche-/Schlackenaufbereitungsanlage nach dem SdT, Abbildung [Hoffmann 2016].	43
Abbildung 11: Modellierung der Aufbereitung der Asche MVB-R in der α -Linie.	46
Abbildung 12: Modellierung der Aufbereitung der Asche MVB-R in der β -Linie.	47
Abbildung 13: Modellierung einer exemplarischen Anlage nach dem SdT.	48
Abbildung 14: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Treibhauspotenzial (GWP).	51
Abbildung 15: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Ozonabbaupotenzial (ODP).	51
Abbildung 16: Szenario Rohaschen (α -Linie) - photochemische Oxidationspotenzial (POCP).	52
Abbildung 17: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Humantoxizitätspotenzial (HP).	52
Abbildung 18: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Versauerungspotenzial (AcP).	53
Abbildung 19: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Eutrophierungspotenzial (EP).	53
Abbildung 20: Szenario Rohaschen (α -Linie) - abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).	54
Abbildung 21: Szenario Rohasche („ α “ - versus „ $\alpha + \beta$ “-Behandlung) – Treibhauspotenzial (GWP).	55
Abbildung 22: Szenario Rohasche („ α “ - versus „ $\alpha + \beta$ “-Behandlung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).	55
Abbildung 23: Szenario Rohasche („ α “ - versus „ $\alpha + \beta$ “-Behandlung) – Eutrophierungspotenzial (EP).	56
Abbildung 24: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Treibhauspotenzial (GWP).	57
Abbildung 25: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Versauerungspotenzial (AcP).	57
Abbildung 26: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Eutrophierungspotenzial (EP).	58
Abbildung 27: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).	58

Abbildung 28: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) - photochemisches Oxidationspotenzial (POCP).	59
Abbildung 29: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) - abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).....	59
Abbildung 30: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) – Treibhauspotenzial (GWP).	60
Abbildung 31: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) – Versauerungspotenzial (AcP).....	60
Abbildung 32: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).	61
Abbildung 33: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) - abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).....	61
Abbildung 34: Zusammensetzung der Gutschriften des Szenarios EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung).....	62
Abbildung 35: Anteilige Auswirkungen der α - und β -Linie auf die betrachteten Wirkungskategorien.	62
Abbildung 36: Einflüsse der α - und β -Linie auf das Ozonabbaupotenzial (ODP). 63	
Abbildung 37: Übersicht über die im Rahmen der ESSENZ-Methode berücksichtigten Metalle.	64
Abbildung 38: ADP _{elementar} -Werte, basierend auf den zurückgewonnenen Metallen (Mengengerüst).	64
Abbildung 39: AADP-Werte, basierend auf den zurückgewonnenen Metallen (Mengengerüst).	65
Abbildung 40: Ergebnisse für die Aschen/Schlacken S1, S2, S3, MVR-R, SdT - Einfluss der Kategorien auf die sozio-ökonomische Verfügbarkeit.	66
Abbildung 41: Ergebnis für die Aschen/Schlacken MVB-R, MVB-R A+B, MVB-V, D-S, EAG - Einfluss der Kategorien auf die sozio-ökonomische Verfügbarkeit.	66
Abbildung 42: Gesellschaftlichen Akzeptanz der zurückgewonnenen Metalle hinsichtlich sozialer Standards.	67
Abbildung 43: Gesellschaftlichen Akzeptanz der zurückgewonnenen Metalle hinsichtlich Umweltstandards.	67
Abbildung 44: Ressourceneffizienz „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“.	68
Abbildung 45: Siebfraktion < 0,5 mm (links) und 0,5-1,0 mm (rechts).	85
Abbildung 46: Siebfraktion 1,0-2,0 mm (links) und > 2 mm (rechts).	85
Abbildung 47: 100 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände (links: Brennstoff, rechts: Asche).	86
Abbildung 48: 75 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets (links: Brennstoff, rechts: Asche).	86
Abbildung 49: 50 Ma.- % EAG- Behandlungsrückstände + 50 Ma.-% Holzpellets (links: Brennstoff, rechts: Asche).	87
Abbildung 50: Schmelzversuch Nr. 1 (250-500 μ m).....	87
Abbildung 51: Schmelzversuch Nr. 2 (250-500 μ m).....	88
Abbildung 52: Schmelzversuch Nr. 5 (> 500 μ m).	88
Abbildung 53: Schlacke des Schmelzversuchs Nr. 2 (links: Zoom x16; rechts: Zoom x50).	88

Abbildung 54: Kleinere Agglomerationen (Brennstoffmischung 75 Ma.-% EAG-
Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets). 89
Abbildung 55: EAG-Behandlungsrückstände mit Kalk gemischt (links) und Asche
am Rostende (rechts). 89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Untersuchungsergebnisse zur stofflichen Zusammensetzung der aufbereiteten EAG-Behandlungsrückstände (Charge 1 (2013) und Charge 2 (2014)).	5
Tabelle 2: Überblick der Dimensionen physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit sowie die gesellschaftliche Akzeptanz [Bach et al. 2015]	13
Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse Aschen Verbrennungsvorversuche.	24
Tabelle 4: Einstellungen der Verbrennungsparameter für Hauptverbrennungsversuch.	25
Tabelle 5: Ergebnisse der Schmelzversuche.	27
Tabelle 6: Behandlung von EAG-Asche in der TARTECH-Anlage - stoffliche Zusammensetzung der In- und Outputfraktionen.	30
Tabelle 7: Großtechnische Versuche mit Aschen/Schlacken mit der TARTECH-Anlage.	31
Tabelle 8: Übersicht über die im Rahmen der Ökobilanz berücksichtigten Aschen/Schlacken.	37
Tabelle 9: Vergleichsszenarien für die Nachhaltigkeitsbewertung.	41
Tabelle 10: Auflistung der für die Berechnung der Gutschriften verwendeten Datensätze aus ecoinvent 3.1.	45
Tabelle 11: Gewählte Wirkungsindikatoren gemäß CML [Guinée 1995].	49
Tabelle 12: Erklärung der Kategorien Betriebsmittel, Transport, Gutschrift und Gesamt.	50
Tabelle 13: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von MVB-R(A) und MVB-R(A+B).	56
Tabelle 14: Darstellung der wichtigsten zahlenmäßigen Positionen, Vergleich Änderungsbescheid vom 02.07.2015 und Schlussverwendungsnachweis vom 11.04.2016.	74
Tabelle 15: Ergebnisse der EDX-Elementaranalysen für die Aschesiebfraktionen Verbrennungsvorversuch (in Ma.-%).	91
Tabelle 16: Zusammenfassende Darstellung der Recherchen zum SdT, Spannbreiten aus der Literatur, Festlegung des Stands der Technik und Einordnung einer Beispielanlage nach SdT [Hoffmann 2016; Mancke 2016].	92

Abkürzungsverzeichnis

AADP	Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential
Ad	Arbeitstag
ADP _{elementar}	Abiotic Depletion Potential
AcP	Acidification potential (Versauerungspotenzial)
AP	Arbeitspaket
AR	Abiotischer Ressourcenverbrauch
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BSR	Berliner Stadtreinigungsbetriebe
CML	Centrum voor Milieuwetenschappen, Universität Leiden, Niederlande
CO	Kohlenstoffmonoxid
D-S	<u>Deponieschlacke</u> von BSR
EAG	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
EP	Eutrophierungspotenzial
ETI	Enabling Trade Index
ESSENZ	<u>Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/Messung von Ressourceneffizienz</u>
Fe	Eisen
FE	Funktionelle Einheit
GA _{UM}	Einhaltung von Umweltstandards
GA _s	Einhaltung sozialer Standards
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
GV	Glühverlust
HCl	Salzsäure
HH	Handelshemmnisse
HHI	Herfindahl-Hirschmann-Index
HMVA	Hausmüllverbrennungsgasche
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Konz_P	Konzentration der Produktion
Konz_R	Konzentration der Reserven

Konz_U	Unternehmenskonzentration
Kopp	Koppelproduktion
LCA	Life Cycle Assessment
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
Ma.-%	Masseprozent
Mg	Megagramm
MK	Minenkapazität
MVB	Müllverwertung Borsigstraße, Hamburg
MVB-R	<u>R</u> ohasche aus <u>MVB</u>
MVB-V	<u>V</u> orbehandelte Asche aus <u>MVB</u>
MVA	Müllverbrennungsanlage
MVR	Müllverbrennungsanlage Rugenberger Damm, Hamburg
MVR-R	<u>R</u> ohasche aus <u>MVR</u>
MVR-V	<u>V</u> orbehandelte Asche aus <u>MVR</u>
NE	Nichteisen
NFW	Nachfragewachstum
NO _x	Stickoxide
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotenzial)
PPI	Policy Potential Index
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (Photochemisches Oxidationspotenzial)
PRS	Preisentwicklung
PS	Politische Stabilität
PVC	Polyvinylchlorid
REX	Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben
ρ	roh (Dichte)
S...	Asche aus MVA Stelling Moor
Sb-Äquiv.	Antimon-Äquivalent
SO ₂	Schwefeldioxid
SdT	Stand der Technik
SRH	Stadtreinigung Hamburg
TS	Trockensubstanz / Trockengehalt
TR	Trockenrückstand

TU	Technische Universität
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
UBA	Umweltbundesamt
UDE	Universität Duisburg-Essen
UMSICHT	Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik
VA	Synonym für rostfreien Stahl, z.B. Chrom-/Nickel legierter Stahl
VDI-GEU	Verein Deutscher Ingenieure - Gesellschaft Energie und Umwelt
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WG	Wassergehalt
WGI	World Governance Indicators

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Fraunhofer UMSICHT bearbeitete im Rahmen des **ATR-Teilprojektes C** die Arbeitspakete (AP) 3 und 6.

AP 3 – zum Thema Aschen aus der Monoverbrennung von Elektronikschrott - beinhaltete praxisnahe Verbrennungsversuche mit Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG bzw. WEEE¹), um zu prüfen, ob die Rückgewinnung von NE-Metalle aus EAG-Behandlungsrückständen durch eine Kombination von thermischer Behandlung und nachgeschalteter innovativer Aufbereitung der Rückstände gesteigert werden kann. Dazu war eine entsprechende Aschemenge für die Weiterbehandlung in der TARTECH-Anlage zu erzeugen und zudem die Verteilungspfade, Wiederfindungsraten und chemischen Bindungsformen relevanter Metalle wie z.B. Kupfer und Aluminium zu untersuchen.

Die im Projekt erzeugten Aschen wurden für einen Behandlungsversuch in der TARTECH-Anlage zur Verfügung gestellt. Dabei stellte die Behandlung der sehr feinkörnigen EAG-Asche (weitestgehend < 2 mm) eine besondere technologische Herausforderung dar, worin zugleich der innovative Ansatz des TARTECH-Verfahrens im Vergleich zu herkömmlichen Aufbereitungsverfahren besteht.

Im **AP 6 – zum Thema Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung** - wurde eine übergeordnete Bewertung der Nachhaltigkeit des TARTECH-Verfahrens unter Einbezug ökobilanzieller, ökonomischer und sozialer Aspekte durchgeführt. Zum Vergleich der neuartigen Technologie wurden Anlagenkonfigurationen zur Aschen-/Schlackenaufbereitung nach dem derzeitigen Stand der Technik (SdT) herangezogen.

Für die Nachhaltigkeitsbetrachtungen des TARTECH-Verfahrens wurden die Ergebnisse (Stoffstromverteilung und Outputqualitäten) für mehrere Behandlungsversuche mit Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) [Lübben und Enzner 2016], bereits in einer Deponie abgelagerte und rückgebaute Schlacke [Auhagen 2015], Asche aus der Verbrennung von EAG-Behandlungsrückständen für den vorliegenden Bericht herangezogen. Ziel war es, die Behandlung der einzelnen Stoffströme untereinander sowie gegenüber einer Behandlung in Anlagen nach dem SdT zu vergleichen. Dazu wurden je nach betrachtetem Asche-/Schlackentyp verschiedene Vergleichsszenarien mit geeigneten Systemgrenzen entwickelt und die notwendigen Daten erhoben. Mit Hilfe der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung sollten Schlussfolgerungen zur Eignung und Verbreitung des TARTECH-Verfahrens für die Praxis abgeleitet werden.

¹ Englisch: Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund erheblicher Verzögerungen bei der Standortfindung, der Finanzierung und Errichtung der TARTECH-Anlage hatte sich die davon abhängige Durchführung der Behandlungsversuche zeitlich deutlich verschoben.

Nach stufenweiser Inbetriebnahme im Dezember 2014 bzw. Juli 2015 der aus den α - und β -Linien bestehenden TARTECH-Anlage am Standort der TARTECH & Knettenbrecht Mineralikaufbereitung GmbH in Wiesbaden wurden die projektrelevanten Versuche im IV. Quartal 2014 begonnen und im III. Quartal 2015 abgeschlossen. Zur Durchführung der Versuche konnten die zum jeweiligen Zeitpunkt betriebsbereiten Anlageteile genutzt werden. Deshalb lief die Mehrzahl der Versuche nur über die α -Linie der TARTECH-Anlage. Die β -Linie im jeweiligen Ausbauzustand wurde während der Projektlaufzeit nur für ausgewählte Versuche z.B. für Aschen von EAG-Behandlungsrückständen eingesetzt. Den Behandlungsversuchen schlossen sich die Analysen der erzeugten Stoffströme im Herbst 2015 an.

Die Herstellung und Voruntersuchung der Verbrennungsaschen aus EAG-Behandlungsrückständen wurde unbeeinflusst von den oben genannten Verzögerungen durch Fraunhofer UMSICHT bis zum Jahresende 2014 abgeschlossen. Die Behandlung dieser Aschen in der TARTECH-Anlage sollte aufgrund der Feinkörnigkeit (weitestgehend < 2 mm) hauptsächlich in der β -Linie erfolgen und war deshalb erst im Herbst 2015 möglich.

Die Nachhaltigkeitsbetrachtung für die TARTECH-Anlage anhand der im Projekt durchgeführten Behandlungsversuche erfolgte nach Vorliegen der Ergebnisse im Zeitraum der kostenneutralen Projektverlängerung durch Fraunhofer UMSICHT bis Ende März 2016.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Aschen aus der Verbrennung von Elektronikschrott (AP 3)

Im ersten Schritt wurden zur Beschaffung einer entsprechen Menge nicht weiter verwertbarer Fraktionen aus der EAG-Aufbereitung mehrere geeignete Betriebe kontaktiert und Handproben mit Materialien aus unterschiedlichen vorhergehenden Aufbereitungstiefen angefordert und untersucht. Im Ergebnis wurde ein mittelständisches regionales Unternehmen ausgewählt, das EAG der Kategorien 1, 3 und 5 (mit Ausnahme von „weißer Ware“) aufbereitet.

Im nächsten Schritt wurden drei Fraktionen (grob, mittel, fein) durch Klassierung erzeugt und auf ihre Eigenschaften untersucht. Dabei wurden neben mechanischen Eigenschaften, wie der Eignung für eine konstante Zuführung in die Brennkammer, auch chemisch-physikalische Parameter wie Glühverlust und Heizwert ermittelt. Darüber hinaus wurden die jeweiligen Zusammensetzungen (Fe-Metalle, Kunststoffe, Kupfer, Organik, etc.) durch händische Sieb- und Sortieranalysen bestimmt. Die grobe Fraktion (Stückgrößen: ca. 50-80 mm) aus geschredderten EAG-Kleingeräten mit einer geringen vorhergehenden Aufbereitungstiefe erwies sich aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und der Neigung zur Verkeilung bei der Zuführung in den Brennraum als nicht geeignet. Die feine Fraktion (Stückgrößen: < 10 mm, siehe Anhang Abbildung 45 und Abbildung 46) und die mittlere Fraktion (überwiegende Stückgröße: ca. 15 mm) waren hinsichtlich der Zuführung in den Brennraum unproblematisch. Da die feine Fraktion im Vergleich zur mittleren Fraktion einen wesentlich höheren Kupferanteil aufwies, wurde sie als die am besten geeignete Fraktion ausgewiesen.

In einem weiteren Schritt erfolgten die Auswahl geeigneter Feuerungsanlagen und die Anpassung der Verbrennungsparameter (Verweilzeit, Stöchiometrie, etc.). Dazu fanden Verbrennungsversuche mit kleineren Mengen in einem Drehrohrofen bei verschiedenen Temperaturen zwischen 850 °C und 1000 °C statt. Daraus konnte das jeweilige Abbrandverhalten beurteilt werden. Bedingt durch den hohen Kunststoffanteil ergaben sich zunächst Schwierigkeiten aufgrund von Materialverklebungen einhergehend mit einer unvollständigen Verbrennung in der Brennzone. Durch Erhöhung der Verbrennungstemperatur auf ca. 1000 °C wurden geringere Verklebungen und damit bessere Verbrennungsergebnisse erzielt. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden die Verbrennungsparameter und auch das spezifische Abbrand- und Verschlackungsverhalten in verschiedenen Feuerungen wie z.B. einer Kleinfeuerungsanlage (Muldenfeuerungsanlage mit wassergekühlter Brennmulde, 30 kW) und einer Großfeuerungsanlage (Rostfeuerungsanlage, 440 kW) erprobt. Des Weiteren wurden Randbedingungen (Verweilzeiten des Brennstoffs in der Brennkammer über die Variierung der Durchsatzmenge durch die Steuerungen der Brennstoffeinschubgeschwindigkeit und des Ascheschiebers oder Regelung des Lambda-Wertes durch die Steuerung der Luftzufuhr über die Veränderung des Differenzdrucks zwischen Brennkammer und Abgastrakt) variiert und optimiert.

Mit den Verbrennungsversuchen konnte nachgewiesen werden, dass das verwendete Ausgangsmaterial grundsätzlich ohne Hilfsstoffe verbrannt werden kann.

Allerdings kam es mit Monochargen zusätzlich zum nicht optimalen Feststoffausbrand auch zu erhöhten Emissionen. Deshalb wurden zur Verringerung der Verklebung bzw. Agglomeration weitere Versuche mit Brennstoffmischungen aus EAG-Behandlungsrückständen und bis zu 50 Ma.-% Holzpellets (Ascheanteil < 4 %) durchgeführt. Mit den Holzpellets, die nicht zur Agglomeration neigen, konnte das Verkleben und die damit verbundene Agglomeratbildung im Brennraum stark vermindert werden. Zudem wurde das spezifische Abbrandverhalten deutlich verbessert und eine homogenere Temperaturverteilung im Brennraum erreicht. Infolge dessen konnten auch die Emissionswerte deutlich verringert werden. Mit steigendem Anteil beigemischter Holzpellets stieg der Anteil von kleineren, aber vollständig durchgebrannten Agglomeraten sowie deren Härte in den erzeugten Aschen.

Da die TARTECH-Anlage zur weitergehenden Behandlung der erzeugten Aschen aus EAG-Behandlungsrückständen aufgrund der oben geschilderten Verzögerungen zunächst nicht zur Verfügung stand, wurden erste Ascheproben ersatzweise mit einer institutseigenen Kugelmühle zerkleinert und klassiert. Für die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung bzw. der Metallgehalte der verschiedenen Siebfraktionen wurden anschließend EDX-Elementaranalysen durchgeführt. Dazu mussten Siebfraktionen > 250 µm zuerst eingeschmolzen und die entstandenen Legierungen und Aschen einzeln analysiert werden. Fraktionen < 250 µm konnten hingegen direkt analysiert werden.

Der Zulieferer für aufbereitete EAG-Behandlungsrückstände hatte zwischenzeitlich die Behandlungstechnologie umgestellt. Dadurch ergaben sich deutliche Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung für die zur Verfügung gestellten Chargen aus den Jahren 2013 und 2014. Deshalb wurden weitere Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 1 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass Charge 2 einen höheren Energiegehalt (Heizwerte und Glühverlust) bei geringeren Metallgehalten (Eisen, Aluminium, Kupfer) aufwies.

Tabelle 1: Ausgewählte Untersuchungsergebnisse zur stofflichen Zusammensetzung der aufbereiteten EAG-Behandlungsrückstände (Charge 1 (2013) und Charge 2 (2014)).

Parameter	Einheit	Charge 1 (April 2013)	Charge 2 (September 2014)
Oberer Heizwert	MJ/kg	5,1	25,0
Unterer Heizwert	MJ/kg	4,7	24,0
Glühverlust (550 °C)	Ma.-%	50,2	82,4
Gehalt Aluminium	Ma.-%	2,5	1,5
Gehalt Eisen	Ma.-%	3,5	0,3
Gehalt Kupfer	Ma.-%	6,2	0,5

Aufgrund der veränderten Zusammensetzung von Charge 2 und Charge 1 wurden Verbrennungsversuche in der Kleinf Feuerungsanlage wiederholt. Dabei wurden hohe HCl-Emissionen festgestellt, die auf einen hohen PVC-Anteil im Ausgangsmaterial zurückgeführt wurden. Zudem erwies sich die Agglomeratbildung im Verbrennungsprozess als problematisch.

Da durch die Vorversuche ein vollständiger Ausbrand der EAG-Behandlungsrückstände bei einer Monoverbrennung nachgewiesen werden konnte, wurde der Hauptversuch auch als Monoverbrennung durchgeführt. Die durch die Zugabe von Holzhackschnitzeln erzielte Verringerung wichtiger Emissionswerte während der Vorversuche wurde im Hauptversuch durch eine Mischung des Brennstoffes mit 5 Ma.-% Löschkalk erreicht werden.

Insgesamt wurden ca. 1.730 kg der EAG-Behandlungsrückstände thermisch behandelt. Es konnte demonstriert werden, dass eine Monoverbrennung mittels Rostfeuerung möglich ist. In Anlehnung an die Vorgaben der 17. BImSchV wurde mit einem Glühverlust von 1,73 Ma.-% ein vollständiger Ausbrand (§ 5 (1) 1 und 2: < 5 Ma.-%) erreicht und eine Verweilzeit der Abgase von mindestens 2 Sekunden bei > 850 °C (§ 6 (3) und (1)) eingehalten. Über die gesamte Versuchsdauer hinweg wurden die Emissionswerte über eine Online-Messung im Rohgas bestimmt. Dadurch konnte die Rauchgasreinigung gezielt auf den zu verbrennenden Stoffstrom (EAG-Behandlungsrückstände) ausgelegt werden. Die gemessenen Rohgaswerte (CO, HCl, SO₂, NO_x, Staub) waren mit Emissionswerten, wie sie bei Müllverbrennungsanlagen vorkommen, vergleichbar, so dass mit marktverfügbaren Abgasreinigungssystemen eine Einhaltung der BImSchV-Werte sehr wahrscheinlich gewährleistet werden kann. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls zu erwähnen, dass die gemessenen Emissionswerte während des gesamten Verbrennungsverlaufes vergleichsweise konstant waren. Die Reduktion der bereits in den Vorversuchen beobachteten HCl-Emissionen durch Zugabe von Löschkalk erwies sich als wenig effektiv. Aus diesem Grund muss das HCl über Sekundärmaßnahmen reguliert werden. Problematisch ist hierbei das erhebliche Korrosionspotenzial.

Die erzeugten Aschen, insgesamt rund 290 kg, wurden dem Projektpartner TARTECH im Dezember 2014 im Rahmen des Projekttreffens vom 04.-05.12.2014 übergeben.

Nachdem die β -Linie der TARTECH-Anlage im Jahr 2015 stufenweise in Betrieb genommen worden war, wurde am 08.09.2015 die zwischengelagerte EAG-Asche behandelt. Im ersten Schritt musste das Material aufgrund enthaltener, größerer Aschebestandteile in der α -Linie der TARTECH-Anlage zerkleinert werden, um die notwendige maximale Korngröße von < 2 mm für die Behandlung in der β -Linie zu gewährleisten. Aufgrund des geringen Wassergehaltes der EAG-Asche (es wurde keine Nassentschlackung bei den Verbrennungsversuchen im Technikum von Fraunhofer UMSICHT durchgeführt) konnte auf ein Durchlaufen der Trocknungsanlage verzichtet und unmittelbar die Trennung von NE-Metallen und Mineralikfraktion durchgeführt werden. Die gewonnenen NE-Metallfraktionen (> 5 mm, 2-5 mm (aus α -Linie) und < 2 mm (aus β -Linie)) wurden gewogen und wie auch die Mineralikfraktion auf ihre stoffliche Zusammensetzung untersucht.

Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung (AP 6)

Das AP 6 beinhaltet die Bilanzierung, Quantifizierung und Bewertung der projektrelevanten Behandlungsversuche verschiedener Aschen und Schlacken. Im ersten Schritt wurde dazu eine Prozessmodellierung mit dem Ökobilanz-Softwaretool GaBi 6[©] in Verbindung mit der Datenbank Ecoinvent[©] erstellt. Der Schwerpunkt der ersten Modellierung lag zunächst auf den Aschen von Rückständen aus der EAG-Behandlung (AP 3). Das Grundmodell wurde mit einer sehr breiten Basis als Grundlage für weitere Stoffströme wie z.B. HMVA ausgestattet. Es wurden Bilanzierungsgrenzen definiert und eine Auswahl an ökologischen, ökonomischen und sozialen Bewertungskriterien zusammengestellt.

In einem nächsten Schritt wurde mit Hilfe einer Modellierung mit der Ökobilanz-Software GaBi 6[©] eine ökobilanzielle Betrachtung der Aschen-/Schlackenaufbereitung nach dem SdT durchgeführt. Verglichen wurden, nach dem Prinzip der ganzheitlichen Bilanzierung, die Umweltauswirkungen einer Rückgewinnung von Fe- und NE-Metallen aus Aschen/Schlacken. Das den verschiedenen Aufbereitungstechnologien zugeführte Inputmaterial bildete die jeweilige funktionelle Einheit (1 Mg Asche/Schlacke). Die zur Aschen- bzw. Schlackenaufbereitung vorgesehene neuartige Technik des Projektpartners TARTECH sollte dann mit der Methode der Ökobilanzierung dem bisherigen SdT gegenübergestellt werden. Dazu wurden umfangreiche Recherchen zum SdT im Bereich der Aschen- und Schlackenaufbereitung in Deutschland durchgeführt (Darstellung der Ergebnisse siehe Anhang Tabelle 16). Da jedoch aufgrund der genannten Verzögerungen bei der Errichtung der TARTECH-Anlage lange Zeit keine Realdaten zur Verfügung standen, wurden die dem Modell zugrunde liegenden Daten an Literaturvorgaben angelehnt abgeschätzt und an den entsprechenden Stellen in dem Modell durch flexible Variablen ersetzt. Dies verursachte für Fraunhofer UMSICHT einen deutlich erhöhten Arbeitsaufwand im Rahmen der notwendigen Ausweitung der Modellstruktur. Die Wirkungsabschätzung wurde für die drei Stoffströme EAG-Asche, HMV-Rohaschen, vorbehandelte HMV-Aschen und abgelagerte HMV-Schlacke durchgeführt. Für die Aschen wurde zudem jeweils die Option einer stofflichen

Nutzung oder Deponierung der Restfraktionen angesetzt. Mit Hilfe der Bewertungsmethode „CML“² wurden folgende Wirkungskategorien bilanziert:

- Ressourcenverbrauch,
- Landnutzung,
- kumulierter Energieaufwand,
- Treibhaus-, Eutrophierungs-, Versauerungs-, Photochemisches Oxidations-, Humantoxizitäts- und Ozonabbaupotenzial.

Neben den geologischen Aspekten wurden zudem sozio-ökonomische und soziale Aspekte des Ressourcenverbrauchs untersucht. Auf diese Weise lässt sich das Potential der Ressourceneffizienz deutlich umfassender analysieren. Für die Beleuchtung verschiedener Aspekte bei der Aufbereitung von Aschen und Schlacken wurde die ökobilanzielle Betrachtung anhand mehrerer Szenarien durchgeführt. Für den Vergleich zwischen der neuartigen TARTECH-Aufbereitungstechnik und dem SdT wurde jeweils die gleiche Weiternutzung der Aschen (Deponierung oder stoffliche Nutzung) angenommen. Für die Bewertung der Ressourceneffizienz der Asche- und Schlackenaufbereitungsverfahren wurden anstelle der sonst üblichen Reserven alle Ressourcen sowie der anthropogene Vorrat eines Rohstoffes in die Kalkulationen einbezogen.

Die Erhebung der Daten über den Betrieb der TARTECH-Anlage als Grundlage zur Bewertung konnte erst nach kompletter Inbetriebnahme der Anlage in der zweiten Jahreshälfte 2015 begonnen werden. Für die gezielte Datenerhebung wurde ein Fragebogen entwickelt, um neben allgemeinen Informationen spezifische Daten zu den einzelnen Behandlungsversuchen abfragen zu können. Gleiches wurde hinsichtlich Informationen zu einer Beispielanlage nach dem SdT mit einem adaptierten Fragebogen durchgeführt.

² CML-Methode ist ein ökologieorientiertes Informations- und Entscheidungsinstrument zur Erstellung einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040 [Mancke 2016].

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Zum SdT im Bereich der Aschen- und Schlackenaufbereitung wird an dieser Stelle auf die Schlussberichte der Vorhabensteilprojekte B [Gronholz und Schmidt 2015] und C [Lübben und Enzner 2016] sowie die Veröffentlichung zur umfassenden Erhebung von Daten zur Aschen- und Schlackenaufbereitung in Deutschland von [Kuchta und Enzner 2015] verwiesen.

AP 3 – Aschen aus der Monoverbrennung von Elektronikschrott

In Deutschland werden jährlich etwa zwischen 600.000 und 700.000 Mg EAG in den öffentlichen Sammelsystemen erfasst und in Recyclingeinrichtungen verarbeitet. Die Aufbereitungsverfahren umfassen in der Regel eine Reihe mechanischer Verfahrensschritte, um Wertstoffe aus dem Abfallstrom zurückzugewinnen oder Gefahrstoffe kontrolliert auszutragen. Im Rahmen einer Erstbehandlung werden zum Beispiel externe Kabel und schadstoffhaltige Komponenten entfernt. Danach werden Gase und Flüssigkeiten entnommen und die Geräte weiter demontiert. Ziel ist dabei die Gewinnung von wiederverwendbaren Bauteilen und homogenen Werkstofffraktionen sowie die Abtrennung schadstoffhaltiger Bauteile. Eine Vorsortierung erfolgt häufig manuell, um Bauteile wie Elektromotoren und Kondensatoren unbeschädigt abtrennen zu können [Martens 2011].

Im nächsten Schritt erfolgt eine Zerkleinerung der demontierten Geräte. Je nach gewünschter Korngröße werden zum Beispiel Schredder, Rotorscheren und Mühlen eingesetzt. Die zerkleinerten Fraktionen durchlaufen anschließend eine Kombination aus Klassier- und Sortierverfahren, um Metalle und Kunststoffe möglichst effizient voneinander zu trennen. Mit Magnetscheidern werden Metalle wie Eisen abgetrennt. Wirbelstromscheider erfassen hingegen nichtmagnetische Metallfraktionen wie Edelstahl, Kupfer oder Aluminium. Ebenso werden Schwimm-Sink-Trennverfahren eingesetzt, um möglichst homogene Metallfraktionen zu gewinnen. Bei der Erfassung sortenreiner Metall- und Kunststofffraktionen sind zudem optische Sortierverfahren wie die Nahinfrarotspektrometrie zunehmend von Bedeutung [Martens 2011]. Je nach Art und Kombination der Klassier- und Sortierverfahren werden verschiedene Wertstofffraktionen gewonnen, die sich wiederum für unterschiedliche Weiterverarbeitungswege eignen.

Am Ende der Behandlung verbleibt jedoch in der Regel ein Stoffstrom aus Mischkunststoffen, Staub und Metallrückständen, der sich nicht mit Hilfe klassischer Sortier- bzw. Klassierverfahren in hochwertig verwertbare Fraktionen auftrennen lässt. Der Stoffe sind Abfälle bzw. Reste, die die Recyclingunternehmen einer kostenpflichtigen Entsorgung zuführen müssen. Eine Möglichkeit zur Entsorgung dieser Aufbereitungsreste ist die Behandlung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen. In klassischen Müllverbrennungsanlagen (MVA) werden die Aufbereitungsreste jedoch mit anderen Abfällen vermischt. Die

in den EAG-Rückständen enthaltenen Metalle verbleiben dann überwiegend in der Asche bzw. Schlacke.

Eine Aufbereitung der Verbrennungsrückstände mit dem Ziel, Metalle zurückzugewinnen, ist somit bei der Verbrennung metallhaltiger EAG-Aufbereitungsrückstände besonders sinnvoll, zumal neben Massenmetallen auch Technologiemetalle und Edelmetalle enthalten sein können. Hierbei ist jedoch die Konzentration der Metalle in den Aschen/Schlacken von entscheidender Bedeutung. Bei einer Vermischung der Aufbereitungsrückstände mit klassischen Siedlungsabfällen ist davon auszugehen, dass die in der Asche/Schlacke verbleibenden Metalle in sehr geringen Konzentrationen vorliegen und nur in geringem Umfang zurückgewonnen werden können. Deshalb sollte im vorliegenden Projekt die Erzeugung und Untersuchung von Aschen mit möglichst hohen Metallkonzentrationen aus der thermischen Behandlung von EAG-Aufbereitungsrückständen in Mono-Chargen - d.h. ohne eine Vermischung mit anderen Abfällen untersucht - werden.

Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung (AP6)

Die drei Bereiche „Ökonomie“, „Ökologie“ und „Soziales“ bilden gleichwertig zu betrachtende Säulen der Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 1 nach [IHK Nürnberg 2016]). Für ein Unternehmen, das nachhaltig wirtschaften will, stellt dies die Herausforderung dar, zugleich auf eine soziale, umweltverträgliche und ökonomisch erfolgreiche Art und Weise zu agieren.

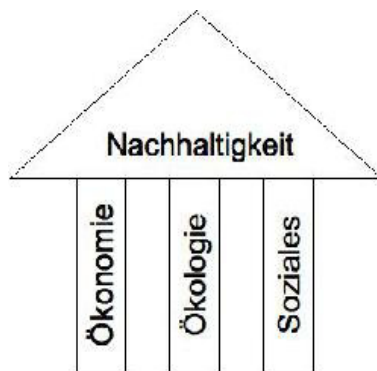


Abbildung 1: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit nach [IHK Nürnberg 2016].

Der Stand des Wissens wird in grundlegender Weise nachfolgend für die zur Nachhaltigkeitsbewertung des TARTECH-Verfahrens herangezogene Methode beschrieben.

Nachhaltigkeitsbetrachtung

Zur Betrachtung der Nachhaltigkeit kann z.B. eine Ökobilanz oder eine ökobilanzielle Betrachtung erstellt werden.

Eine **Ökobilanz** ist im Allgemeinen eine normierte Methode, um potentielle Umweltwirkungen und Umweltaspekte von Produktsystemen und Dienstleistungen über den gesamten Lebensweg zu analysieren. Eine Ökobilanz, englisch „Life Cycle Assessment“ (LCA), wird durch die DIN EN ISO 14040 ff. definiert und umfasst vier Phasen (siehe auch Abbildung 2):

- Ziel und Untersuchungsrahmen,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung,
- Auswertung.

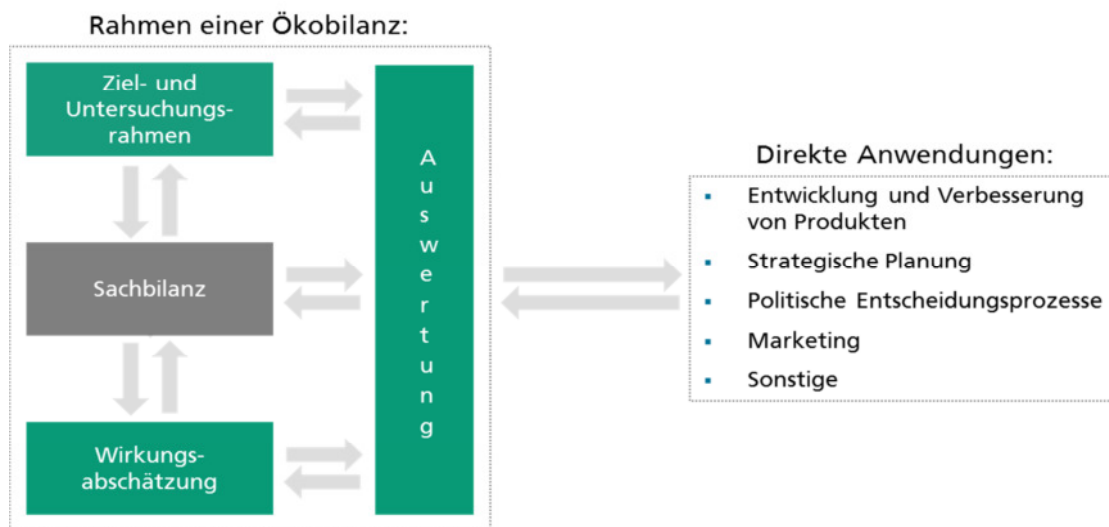


Abbildung 2: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044, Abbildung nach [Hense 2013].

In AP6 wurde eine **ökobilanzielle Betrachtung** angestellt. Diese unterscheidet sich von der Ökobilanz insofern, dass bei der ökobilanziellen Betrachtung einige Aspekte weniger stark betrachtet oder nicht komplett erfasst werden. Der Schwerpunkt der ökobilanziellen Betrachtung liegt auf der Herausarbeitung von Kernaussagen, wobei auf bestimmte Inhalte der Auswertung, der kritischen Prüfung sowie der Betrachtung von Allokationseffekten verzichtet wird [Weimann et al. 2013].

ESSENZ-Methode

Die Aufbereitung der Aschen/Schlacken sollte im Rahmen des ATR-Projekts ganzheitlich erfolgen. Deshalb wurden neben ökologischen Aspekten aus der ökobilanziellen Betrachtung zusätzlich auch sozio-ökonomische und soziale Aspekte über den ganzheitlichen Betrachtungsansatz der ESSENZ-Methode einbezogen. Die Methode ermöglicht die Betrachtung der Ressourceneffizienz eines Prozesses unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen

Gesichtspunkten. Im Allgemeinen wird Ressourceneffizienz als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ereignisses zu dem dafür nötigen Ressourceneinsatz definiert [Bongardt et al. 2014]:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzen (Produkt, Funktion, funktionelle Einheit)}}{\text{Aufwand (natürlicher Ressourceneinsatz)}}$$

Ressourceneffizienz zeichnet sich durch eine effiziente Nutzung von Ressourcen in Produktionsprozessen aus. Ziel ist es dabei, eine möglichst hohe Wertschöpfung mit möglichst geringem Ressourceneinsatz zu generieren. Aussagen über die Nachhaltigkeit des Ressourceneinsatzes sollten die Ressourcenverfügbarkeit in Zusammenhang mit dem heutigen und den zukünftigen Bedarf sowie die Umweltwirkungen in Zusammenhang mit Abbau und Nutzung der Ressourcen berücksichtigen. Ebenso nehmen wirtschaftliche und soziale Aspekte Einfluss auf die Verfügbarkeit von Ressourcen. Um eine sinnvolle Grundlage für Betrachtungen auf Produkt-, Unternehmens- oder Länderebene zu bilden, sollte folglich eine ganzheitliche Bewertung der Ressourceneffizienz ökologische, wirtschaftliche und soziale Aspekte über den gesamten Lebensweg beinhalten.

Die ESSENZ-Methode betrachtet die Dimensionen „Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“, „Umweltwirkungen“ und „Nutzen“. Diese Dimensionen werden auf Basis von 21 Kategorien abgebildet, die die Quantität der Dimensionen bestimmen. Die Dimension „Verfügbarkeit“ ist in zwei Teildimensionen - „physische Verfügbarkeit“ und „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ - untergliedert [Bach et al. 2015]. Die Teildimension „physische Verfügbarkeit“ beinhaltet die geologische und anthropogene Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen. Die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch wird über den Wirkungsindikator „Abiotic Depletion Potential“ ($ADP_{\text{elementar}}$) (kg Sb-Äquiv.) bestimmt, welcher sich auf die ultimativen Reserven³ bezieht und die Abnahme der Verfügbarkeit eines Rohstoffes nach geologischen Gesichtspunkten beschreibt [Bach et al. 2015; van Oers et al. 2002].

Der stetig zunehmende anthropogene Verbrauch bestimmter Ressourcen hat zu einer Verlagerung der Vorkommen von der Lithosphäre in die Anthroposphäre geführt. Ressourcen in anthropogenen Lagerstätten könnten zukünftig durch Rückgewinnungsprozesse wiederverwendbar werden und sollten bei Betrachtungen von Rohstoffverfügbarkeiten berücksichtigt werden.

Gegenwärtige Modelle vernachlässigen die Anteile von Rohmaterialien, die sich in der Technosphäre befinden. Um neben dem Ressourcenverbrauch der Lithosphäre auch die Anthroposphäre bilanzieren zu können, wurde der Wirkungsindikator Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP) (kg Sb-Äquiv.) entwickelt. Beim AADP wird die Extraktionsrate eines

³ Bei ultimativen Reserven handelt es sich um das gesamte Vorkommen einer Ressource in der Erdkruste [Guinée 1995].

Rohstoffes seinen Ressourcen und anthropogenen Vorkommen gegenübergestellt und wie beim $ADP_{\text{elementar}}$ auf die Referenzsubstanz Antimon normiert. Beim AADP werden die Ressourcen und nicht wie bei ADP die ultimativen Reserven betrachtet. Daher sind diese beiden Indikatoren nicht direkt miteinander vergleichbar. Relative Veränderungen von $ADP_{\text{elementar}}$ zu AADP schwanken zwischen -45 % und +65 %. Diese Schwankungsbreite verdeutlicht den signifikanten Einfluss der Verlagerung von Rohstoffen in die Anthroposphäre. Das AADP-Modell ermöglicht es außerdem, den Abbau abiotischer Ressourcen detailliert zu bewerten. Ziel ist es dabei, die anthropogenen Lagerstätten als potentielle Quellen zu quantifizieren [Schneider et al. 2011].

Für eine Bewertung des Einflusses sozio-ökonomischer Aspekte werden die Kategorien „Konzentration der Reserven“, „Konzentration der Produktion“, „Unternehmenskonzentration“, „Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben“, „Koppelproduktion“, „Preisentwicklung“, „Primärmaterialeinsatz“, „politische Stabilität“, „Minenkapazität“, „Handelshemmnisse“ und „Nachfragewachstum“ betrachtet. Die Quantifizierung dieser Kategorien erfolgt über ein Modell, das sich an der Methode der ökologischen Knappheit orientiert. Da erst ab einer bestimmten Schwelle ein potentielles Risiko besteht, wird der Wirkungsindikator der Kategorie einem spezifischen Grenzwert gegenüber gestellt und quadriert. Anschließend erfolgen eine Normierung der Ergebnisse auf die globale Rohstoff-Produktionsmenge und eine lineare Skalierung. In Tabelle 2 werden die Kategorien der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit zusammengefasst.

Tabelle 2: Überblick der Dimensionen physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit sowie die gesellschaftliche Akzeptanz [Bach et al. 2015]

Physische Verfügbarkeit		
Kategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator
Abiotischer Ressourcenverbrauch (AR)	Aufzehrung von Ressourcen (geologisch und anthropogen) durch vermehrte Förderung	Aufzehrung von Ressourcen
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit		
Kategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator
Konzentration der Reserven (Konz_R)	Konzentration von Reserven in bestimmten Ländern	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)
Konzentration der Produktion (Konz_P)	Konzentration von Produktionsstandorten in bestimmten Ländern (Minen)	HHI
Unternehmenskonzentration (Konz_U)	Konzentration von Unternehmen, die Metalle und fossile Rohstoffe handeln	HHI
Minenkapazität (MK)	Erschließungszeitraum neuer Minen	Minenkapazität
Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX)	Politische Gegebenheiten zur Erschließung von Minen	Policy Potential Index (PPI)
Handelshemmnisse (HH)	Metalle und fossile Rohstoffe, die Handelshemmnissen unterliegen	Enabling Trade Index (ETI)
Koppelproduktion (Kopp)	Auftreten als Nebenmaterial	Anteil des durch Koppelproduktion gewonnenen Materials
Politische Stabilität (PS)	Stabilität der Regierung in Ländern die Ressourcen abbauen	World Governance indicators (WGI)
Nachfragewachstum (NFW)	Erhöhung der Nachfrage	Prozentuales Wachstum

Gesellschaftliche Akzeptanz		
Kategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator
Einhaltung sozialer Standards (GA _s)	Soziale Standards werden nicht eingehalten	Einhaltung von sozialen Standards
Einhaltung von Umweltstandards (GA _{UM})	Umweltstandards werden nicht eingehalten	Einhaltung von Umweltstandards

Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ setzt sich aus einer Betrachtung der Kategorien „Einhaltung von sozialen Standards“ und „Einhaltung von Umweltstandards“ zusammen. Es wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit von Ressourcen durch fehlende gesellschaftliche Akzeptanz eingeschränkt werden kann. Für eine Bewertung der Einhaltung sozialer Standards wird ein Screening-Indikator verwendet, welcher angibt, bei welchem Rohstoff während des Abbaus soziale Standards verletzt werden können. In dessen Berechnung fließen die Gesichtspunkte „Kinderarbeit“, „Zwangsarbeit“, „Konfliktgebiete“ sowie länderspezifische Risikofaktoren ein. Letztere werden aus einer speziellen Datenbank, der sogenannten Social Hotspot Database, entnommen. Zur Quantifizierung der Kategorie „Einhaltung von Umweltstandards“ dient ein Indikator, der durch Multiplikation des prozentualen Anteils eines Landes an der globalen Produktion eines Rohstoffs und dem länderspezifischen Environmental Performance Index berechnet wird. Die vierte Dimension bewertet Umweltwirkungen auf Grundlage der Methode der Ökobilanz. Die Bewertung basiert auf der Betrachtung der Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AcP), Eutrophierungspotenzial (EP), Ozonabbaupotenzial (ODP) und Photochemisches Oxidationspotenzial (POCP). Nach der Bewertung der einzelnen Kategorien, wird die Ressourceneffizienz innerhalb des gewählten Untersuchungsrahmens durch Division der funktionellen Einheit durch die Ergebnisse der Dimensionen ermittelt. Eine Aggregation zu einem Gesamtwert wird nach der ESSENZ-Methode nicht durchgeführt [Bach et al. 2015].

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der wissenschaftlich-technische Austausch fand innerhalb des Projektverbundes unter Beteiligung von Fraunhofer UMSICHT zu regelmäßigen Treffen unter Koordination der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) statt:

- 1. Projekttreffen (Kick-Off) des ATR-Verbundes, BAM, Berlin (16.08.2012): Feinabstimmung der Kooperationsvereinbarung und einer einheitlichen Außendarstellung, Vorstellung der AP durch die Teilnehmer, Vorstellung der durch UMSICHT eingebrachten ersten Ideen und Möglichkeiten zur Nachhaltigkeitsbewertung
- 2. Projekttreffen, BAM, Berlin (14.12.2012): Abstimmung zu den Auswirkungen der geänderten Rahmenbedingungen und Verzögerungen bei der Errichtung und Betrieb der TARTECH-Anlage (AP 1) auf die weiteren Vorhabenpartner
- 3. Projekttreffen, BAM, Berlin (08.11.2013): Abstimmung zu den Auswirkungen der erneut geänderter Rahmenbedingungen (AP 1: Errichtung und Betrieb der TARTECH-Anlage) auf die weiteren Vorhabenpartner
- zusätzliches Projekttreffen, Universität Duisburg Essen (UDE), Duisburg (18.12.2013): Abstimmungsgespräch beim Projektpartner zu Vorgehensweise in AP 3, insbesondere die Auswahlkriterien der für den TARTECH-Prozess geeigneten metallurgischen Schlacken
- 4. Projekttreffen, Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), München (15.09.2014): Besprechung zum Projektstand, insbesondere zum begonnenen Aufbau und der Inbetriebnahme erster Komponenten der TARTECH-Anlage am Standort der TARTECH & Knettenbrecht Mineralikaufbereitung GmbH in Wiesbaden
- zusätzliches Projekttreffen, BAM, Berlin (22.09.2014): internes Projekttreffen im Rahmen des r³-Projektverbundes zur Vorbereitung eines Workshops zur Nachhaltigkeitsbewertung im ATR- und r³-Projektverbund
- zusätzliches Projekttreffen, TARTECH & Knettenbrecht Mineralikaufbereitung GmbH, Wiesbaden (04.-05.12.2014): Besichtigung der α -Linie der TARTECH-Anlage nach Inbetriebnahme, Entnahme erster Proben verschiedener Outputstoffströme durch den Projektpartner Stadtreinigung Hamburg (SRH) bzw. die Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) als Unterauftragnehmer
- 5. Projekttreffen, TARTECH & Knettenbrecht Mineralikaufbereitung GmbH, Wiesbaden (18.-19.05.2015): Vorstellung der jeweiligen Arbeitsstände der Projektpartner, Besichtigung neuer Komponenten der β -Linie der TARTECH-Anlage und Abstimmung weitere Vorgehensweise
- Behandlungsversuch mit EAG-Aschen, TARTECH & Knettenbrecht Mineralikaufbereitung GmbH, Wiesbaden (08.09.2015): Behandlung von bei Fraunhofer UMSICHT erzeugten Aschen aus der Verbrennung von EAG-Behandlungsrückständen gemeinsam durch Projektpartner TARTECH und Fraunhofer UMSICHT

Zusätzlich dazu wurden weitere Stellen in die Zusammenarbeit eingebunden:

- Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Fachbereich Abfallressourcenwirtschaft am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft im Unterauftrag der SRH: enge Kooperation und regelmäßiger Austausch über die gesamte Projektlaufzeit bzgl. Begleitung und Ergebnissen der großtechnischen Versuche zur Behandlung von HMVA aus Hamburg
- Ökobilanz-Werkstatt 2012, Stuttgart (04.09.2012): Abstimmungsgespräch über verschiedene Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung und Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen mit Lehrstuhl für Bauphysik LBP der Universität Stuttgart (Bearbeitung der Nachhaltigkeitsbewertung im r³-Koordinationsprojekt INTRA r³)
- TU Berlin, Fachgebiet Sustainable Engineering (Projektkoordinator des r³-Projektes ESSENZ), Berlin (13.11.2012): erste Gespräche über Neuentwicklungen von Bewertungsmethoden für Ressourceneffizienz
- r³-Kick-Off-Veranstaltung, TU Bergakademie Freiberg (Projektleitung des r³-Koordinationsprojektes INTRA r³) (17.-18.04.2013): Abstimmungsgespräche über Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung und Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen mit Lehrstuhl für Bauphysik LBP der Universität Stuttgart
- 10. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit, Leipzig (09.-11.09.2013): vertiefende Abstimmungsgespräche über Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung und Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen mit Lehrstuhl für Bauphysik LBP der Universität Stuttgart
- TU Berlin, Fachgebiet Sustainable Engineering, Berlin (12.11.2013): weiterführende Gespräche über Neuentwicklungen von Bewertungsmethoden für Ressourceneffizienz
- BAM, Berlin (06.10.2014): Workshop mit TU Bergakademie Freiberg zu gemeinsamen Schnittmengen innerhalb der Nachhaltigkeitsbewertung
- Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Stuttgart: mehrfache Abstimmungen zur Ökobilanzierung
- Iwan Koslow GmbH & Co. KG, Landshut: Aufbereitung und Bereitstellung vorbehandelter EAG-Behandlungsrückstände als Grundlage für die Verbrennungsversuche im AP 3
- Hanseatisches Schlackenkontor GmbH, Hamburg: Bereitstellung von Informationen über eine beispielhafte Referenzanlage nach dem SdT zur Aschen- bzw. Schlackenaufbereitung
- Technischen Universität München, Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie, Straubing: Zusammenarbeit zur Erstellung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Metallgewinnung aus mineralischen Rückständen im Rahmen einer Masterarbeit
- Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik, Erneuerbare Energien, Amberg: Zusammenarbeit zur Durchführung von thermischen Vorbehandlungsversuchen im Technikum von Fraunhofer UMSICHT mit

Behandlungsrückständen der EAG-Aufbereitung im Rahmen einer Bachelorarbeit

- TU Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Sustainable Engineering, Berlin: Zusammenarbeit bei der ökobilanziellen Bewertung von Verfahren zur Metallrückgewinnung aus Aschen und Schlacken der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen einer Masterarbeit
- Hochschule Hamm-Lippstadt, Lehrstuhl für Photonik und Materialwissenschaften, Lippstadt: Zusammenarbeit bei der Bewertung sozialer Aspekte für Verfahren zur Metallrückgewinnung aus Aschen und Schlacken im Rahmen einer Bachelorarbeit
- Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt (Studiengang: Umweltplanung und Ingenieurökologie): Zusammenarbeit bei der Bewertung wirtschaftlicher Aspekte von Verfahren zur Metallrückgewinnung aus Aschen und Schlacken im Rahmen einer Masterarbeit

II Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Aschen aus der Verbrennung von Elektronikschrott (AP 3)

a.1. Verbrennungs- und Aufbereitungsversuche

a.1.1. Verbrennungstechnik

Die Aschen aus EAG-Behandlungsrückständen wurden im institutseigenen Technikum durch diverse Verbrennungsversuche erzeugt. Zunächst wurden mit einem kleinen Drehrohrofen (Typ: FHRD-100/600/1100, Hersteller: Linn High Therm GmbH) Vorversuche durchgeführt. Diese waren für die eigentlichen Verbrennungsversuche notwendig, um Parameter wie die optimale Verbrennungstemperatur und die Verweilzeit im Verbrennungsraum abzuschätzen. Die Einstellungen der Anlage (Neigung und Umdrehungsgeschwindigkeit) wurden so vorgenommen, dass die Verweilzeit groß genug war, um eine möglichst vollständige Verbrennung zu gewährleisten. Die Verbrennungstemperatur wurde mit Hilfe eingebauter Thermolemente auf 1.000 °C eingestellt.

Aufgrund der Korngrößenverteilung der EAG-Behandlungsrückstände wurde für die weiteren Verbrennungsversuche eine Muldenfeuerung (Typ: CS30, Feuerungswärmeleistung: 10-30 kW, Hersteller: Ökotherm, siehe auch Abbildung 3) ausgewählt. Bei diesem Feuerungstyp wird der Brennstoff nach dem Prinzip der Quereinschubfeuerung mit Schnecken (alternativ mit Kolben) zugeführt. Ausgestattet ist die Feuerung mit einer wassergekühlten Brennmulde, einer runden Brenn- und Nachbrennkammer sowie stehenden Wärmetauschern mit Turbulatoren. Die Wasserkühlung der zusätzlich mit einem Ascheschieber ausgestatteten Brennmulde verhindert ein Anbacken von Schlacke im Brennraum.

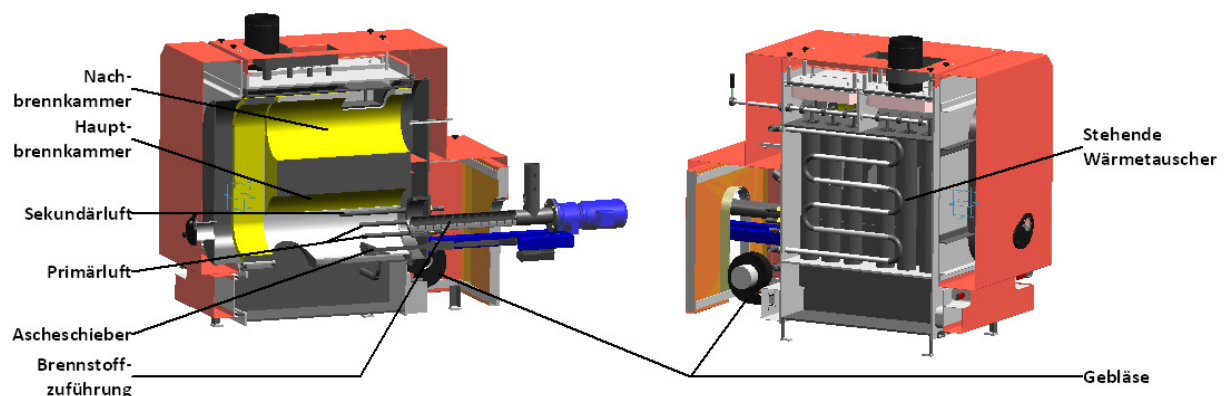


Abbildung 3: Längsschnitt Muldenfeuerung CS30 (Hersteller: Ökotherm).

In der Muldenfeuerung wurden Verbrennungsversuche mit folgenden Brennstoffen bzw. Brennstoffgemischen durchgeführt:

- Brennstoff: 100 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände,
- Brennstoffgemisch: 75 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände, 25 Ma.-% Holzpellets,
- Brennstoffgemisch: 50 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände, 50 Ma.-% Holzpellets.

Brennstoffmischungen wurden verwendet, um den Verbrennungsverlauf und das Emissionsverhalten zu optimieren (siehe auch Kapitel I.3). Die Mischungen mit Holzpellets wurden massenbezogen durchgeführt. Aufgrund des vergleichsweise geringen Ascheanteils der Holzpellets ($\leq 0,7$ Ma.-%, DIN 2009a) waren die Auswirkungen auf Aschequantität bzw. -qualität und damit auch auf die NE-Metallrückgewinnung vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurde das Aufheizen der Feuerungsanlagen ebenfalls mit Holzpellets durchgeführt.

Die im Technikum zur Verfügung stehenden Feuerungen sind an eine Abgasreinigung angeschlossen. Noch vor der Behandlung der Abgase werden diese in einem kontinuierlich arbeitendem Gasanalysesystem für Emissionsparameter nach der 17. BImSchV zentral gemessen und die Emissionswerte bestimmt.

Die Staubmessung erfolgt in Anlehnung an die DIN 2066. Neben H_2O , CO_2 , O_2 und N_2 (alle in %) können die Massen (in $mg \cdot m^{-3}_{i.N.}$) von Kohlenstoffmonoxid (CO), Salzsäure (HCl), den Stickoxiden NO und NO_2 , Ammoniak (NH_3) sowie Schwefeldioxid (SO_2) bestimmt werden.

Für den Hauptversuch wurde eine Rostfeuerungsanlage (Typ: FSR 440, Hersteller: MAWERA, Nennwärmeleistung: 100 bis 440 kW) eingesetzt, da Rostsysteme, bei denen eine gestufte Prozessführung über den Reaktionsweg möglich und effektiv ist, besonders gut für grobstückige Stoffströme wie z.B. EAG-Behandlungsrückstände geeignet sind [Beckmann und Scholz 2003]. Zudem bietet diese Feuerungsanlage deutlich mehr Variationsmöglichkeiten bei der Verbrennungsführung. Ein Beispiel hierfür ist die Möglichkeit, Verweilzeit und Betthöhe in den einzelnen Reaktionszonen durch die getrennte Bewegung der Rostelemente unabhängig zu steuern. Darüber hinaus können mögliche Agglomerate durch die Rostbewegung wieder aufgelockert werden, sodass sich ein gleichmäßiges Glutbett bildet. Durch die drei Unterwindzonen der Primärluftzuführung kann die zugeführte Luftmenge optimal auf den trockenen Brennstoff eingestellt werden. Somit ist es möglich, Trocknungs-, Entgasungs-, Hauptverbrennungs- und Nachverbrennungszone zu regulieren. Mit Hilfe des Gasbrenners in der zweiten Nachbrennkammer kann eine zuverlässige Nachverbrennung der Rauchgase, insbesondere des Kohlenmonoxids, erreicht werden.

Der schematische Aufbau der MAWERA-Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Feuerraum besteht aus einem horizontalen Vorschubrostsystem mit zwei

unabhängig voneinander regelbaren Rostzonen. Der Brennstoff wird mittels Förderbänder wahlweise aus einem Container oder aus einer Bigbag-Station über eine Waage zum Befüllungstrichter geführt. Über eine Schneckenförderung wird der Brennstoff automatisch in den Brennraum auf den Rost geschoben und mittels Gasbrenner gezündet. Primär- und Sekundärluft können getrennt voneinander geregelt werden. Während die Sekundärluft über seitliche Öffnungen in die erste Nachbrennkammer eingeblasen wird, erfolgt die Zugabe der Primärluft über drei separat regelbare Unterwindzonen, welche die Verbrennungsluft von unten durch die Roststäbe in das Brennstoffbett einführen. Das Rauchgas wird im Gegenstromprinzip in die erste Nachbrennkammer geführt. Nach Zugabe der Sekundärluft hat das Rauchgas eine Verweilzeit in der Nachbrennkammer von mehr als 2 Sekunden bei einer Mindesttemperatur von 850 °C. Es erfolgt eine weitere Umlenkung in die zweite Nachbrennkammer, in der mit Hilfe eines Gasbrenners die Rauchgase nachverbrannt werden können. Zusätzlich ist die Feuerungsanlage mit einer Rauchgasrückführung ausgestattet, die es möglich macht, die NO_x - und CO -Emissionen zu reduzieren. Optional bietet die MAWERA-Feuerungsanlage die Möglichkeit, Harnstoff (Ammoniak) in die erste Nachbrennkammer einzuspeisen, um die NO_x -Emissionen weiter zu senken. Die entstehende Asche fällt am Ende des Rostes in einen im Keller stehenden Aschekasten. Es wurde eine Trockenentaschung durchgeführt, da eine Nassentaschung, aufgrund chemisch-physikalischer Reaktionen der enthaltenen Metalle mit dem Wasser, Probleme bei der Rückgewinnung mittels einer mechanischen Aufbereitung zur Folge haben kann [Quicker et. al 2014].

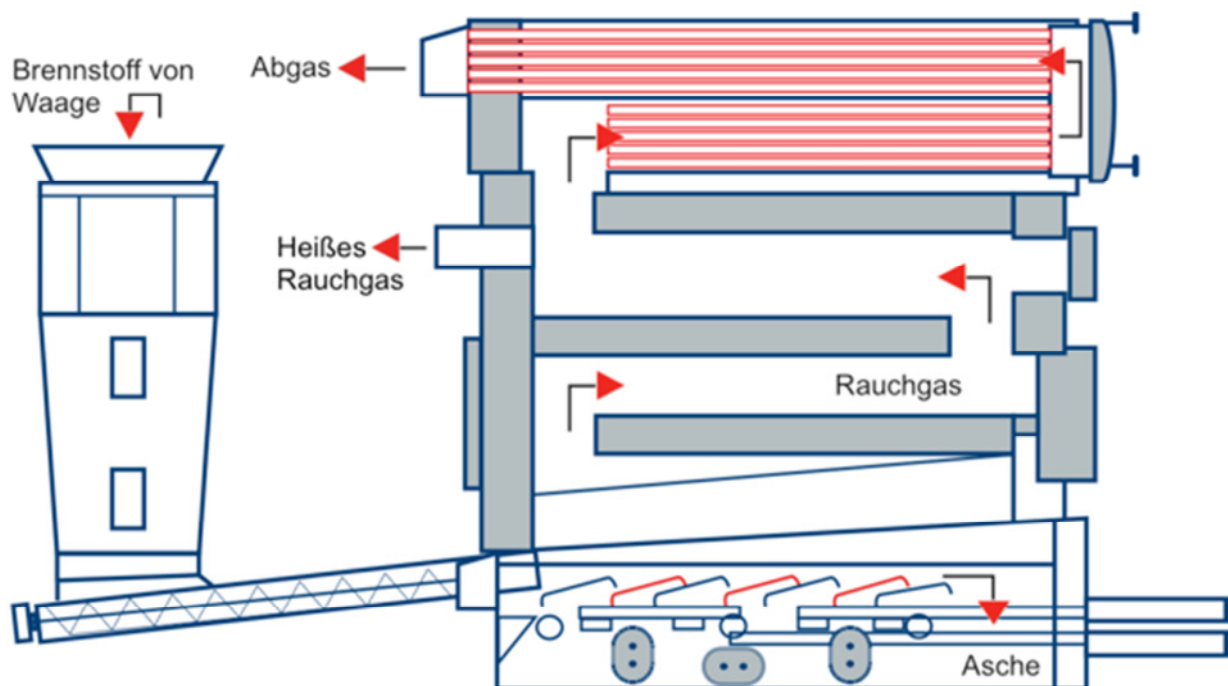


Abbildung 4: Aufbau der MAWERA-Feuerungsanlage.

Die Ergebnisse der in Kapitel I.3 beschriebenen Vorversuche zeigten, dass grundsätzlich ein vollständiger Ausbrand bei der Monoverbrennung von EAG erreicht werden kann. Deshalb sollte auch der Hauptversuch als Monoverbrennung durchgeführt werden. Zudem wurden aufgrund der Vorversuche auch in diesen Versuchen hohe HCl-Emissionen erwartet. Als Primärmaßnahme zur Reduzierung der HCl-Emissionen wurde der Prozess der Trockensorption bzw. der „Chemisorption“ gewählt, bei der die gasförmigen Schadstoffe durch eine chemische Reaktion an ein Reagenz, in diesem Fall an Löschkalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), gebunden werden. Dieses Sorptionsverfahren ist für die Schadstoffabscheidung bei der Müllverbrennung bereits gängige Praxis, wird dort jedoch meist in der Rauchgasreinigungsanlage angewandt. Dabei wird Kalk in den Rauchgasstrom geblasen und anschließend an einem Gewebefilter abgeschieden [Karpf et. al 2014]. Für den Hauptversuch wurden die EAG-Behandlungsrückstände deshalb mit ca. 5 % Löschkalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) manuell gemischt (Foto siehe Anhang Abbildung 55). Analog zu den Verbrennungsvorversuchen wurden die Emissionen mit einem Messgerät der Firma Dr. Födisch untersucht. In mehreren Versuchen wurde eine für den Behandlungsversuch mit der TARTECH-Anlage notwendige Aschemenge von ca. 290 kg erzeugt. Eine repräsentative Probe der Aschemenge wurde zur Bestimmung der Eigenschaften (z.B. TS/WG-Gehalte, GV, Metallgehalte) verwendet.

a.1.2. Aufbereitung und Charakterisierung

Die Rohasche wurde nach den Verbrennungsversuchen ohne Einsatz von Wasser abgekühlt und Ascheproben anschließend zerkleinert. Zur Vorzerkleinerung wurde ein Backenbrecher (Typ: Pulverisette 1, Hersteller: Fritsch) eingesetzt, der eine Endfeinheit von 1 mm erreicht. Mit einer Planetenmühle (Kugelmühle, Typ: Pulverisette 5 classic line, Hersteller: Fritsch) fand eine weitergehende Zerkleinerung von bis zu $< 1 \mu\text{m}$ (je nach Material, Angabe des Herstellers) statt. Bei beiden angesprochenen Verfahren wurden Metallpartikel nicht zerkleinert, sondern lediglich deformiert. Auf diese Weise ließen sich Metalle wie Al, Fe und Cu durch Siebungen gut entfernen und anschließend sortieren. Die Staffelung der Siebfraktionen war:

- $< 63 \mu\text{m}$,
- $63\text{-}125 \mu\text{m}$,
- $125\text{-}250 \mu\text{m}$,
- $250\text{-}500 \mu\text{m}$,
- $> 500 \mu\text{m}$.

Zur Trennung des gemahlten Gemisches und zur Konzentrierung der Metallfraktionen können verschiedene Verfahren verwendet werden. Neben dem Sieben können Trockenverfahren wie das Sichten als auch Nassverfahren wie die Sink-Schwimm-Trennung genutzt werden. Die Flotation ist ein für die primäre Kupfergewinnung typisches Sortierverfahren, das jedoch neben relativ geringen Konzentrationsgraden (ca. 25-30 %) ein hoher Chemikalieneinsatz kennzeichnet.

Zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung bzw. der Metallgehalte der verschiedenen Siebfraktionen wurden für Fraktionen < 250 µm EDX-Elementaranalysen durchgeführt.

Für die gröbere Fraktion (> 250 µm) kann diese Analyseverfahren aufgrund der höheren Korngröße nicht genutzt werden, da die Ergebnisse durch Drähte und andere „grobe“ Elemente auf der relativ kleinen Testoberfläche (ca. 1 cm²) verzerrt würden. Deshalb mussten die Fraktionen 250-500 µm und > 500 µm getrennt voneinander eingeschmolzen werden. Zur Durchführung der Schmelzversuche wurde ein Induktionsschmelzofen (Hersteller: Linn High Therm GmbH) und Graphittiegel mit ca. 15 ml Fassungsvermögen verwendet. Das Ergebnis dieser Schmelze waren Legierungen und getrennt vorliegende Schlacken (siehe Anhang Abbildung 50 bis Abbildung 53). Die Legierungen wurden nach Abkühlung und Aushärtung angeschliffen und nachfolgend durch eine EDX-Elementaranalyse charakterisiert.

a.1.3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

a.1.3.1. Verbrennungsvorversuch 1: Brennstoff 100 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände (Ökotherm CS-30)

Der erste Verbrennungsvorversuch in der Muldenfeuerung Ökotherm sollte vor allem zeigen, dass die EAG-Behandlungsrückstände monoverbrannt werden können. Dazu wurde die Feuerungsanlage zuerst mit Holzpellets auf > 900 °C aufgeheizt und im Anschluss mit dem eigentlichen Brennstoff via Schneckenförderung beschickt. Auf diese Weise sollte die Bildung von Dioxinen unterdrückt werden. Da in diesem ersten Versuch bestimmte Verbrennungsparameter wie die Verweilzeit des Brennstoffs im Brennraum, die Primärluftzuführung und Ähnliches erst eingestellt werden mussten, zeigten sich hohe Schwankungen in den Emissionen. Vor allem die Messwerte von CO und O₂ schwankten sehr stark; bei CO wurde mehrmals die Messgrenze von 1.500 mg*m⁻³_{i.N.} überschritten. Die geringsten Emissionswerte zeigte der Versuch bei folgenden Einstellungswerten:

- Primärluftzufuhr: 100 % (Standard 70 %)
 - o Ziel: Erhöhung des Volumenstroms
- Brennstoffeinschub (Puls / Pause): 0,3 s / 14,0 s
 - o Ziel: Verringerung des Massenstroms
- Ascheschieber (Puls / Pause): 1 s / 2 s
 - o Ziel: Erhöhung der Verweildauer im Brennraum
- Differenzdruck (Kaminabzug): -0,10 bis -0,20 mbar
 - o Ziel: Erhöhung des Volumenstroms

Mit dieser Parametrierung wurden pro Stunde 6,92 kg Brennmaterial verbrannt. Im Vergleich zur Verbrennung konventioneller Brennstoffe war die Ascheaustragung sehr hoch getaktet, um ein Verkleben des Brennmaterials im vorderen Bereich des Brennraums zu vermeiden. Dieses Verkleben trat im

Übergangsbereich zwischen Brennstoffzuführung (Schnecke) und Brennraum auf und wirkte sich negativ auf den Ausbrand sowie die damit verbundenen Emissionswerte aus. In nahezu regelmäßigen Abständen lösten sich mehr oder weniger große Stücke der Agglomerate und fielen in den Brennraum. Dadurch stiegen die Temperatur ($> 950\text{ °C}$) sowie die CO-Emissionen ($> 1.500\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{i.N.}}$) kurzzeitig stark an. Zur Verringerung wurde der Differenzdruck des Kaminabzugs vorübergehend manuell erhöht, so dass weiterer Sauerstoff in den Brennraum gelangte.

Die Untersuchung der Asche ergab einen vollständigen Ausbrand (gemäß 17. BImSchV, siehe auch Kapitel I.3). Der Trockenrückstand (TR) der ausgekühlten Aschen lag bei 99,73 Ma.-% und der Glühverlust bei 1,44 Ma.-%.

Insgesamt zeigte sich, dass eine Monoverbrennung durchgeführt werden kann, jedoch aufgrund der Agglomeration des Brennstoffs keine gleichbleibenden Ergebnisse und Emissionswerte zu erwarten sind (Fotos des Brennstoffs und der Asche siehe Anhang Abbildung 47).

a.1.3.2. Verbrennungsvorversuch 2: Brennstoff 75 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets (Ökotherm CS-30)

Analog zum ersten Verbrennungsvorversuch wurde die Muldenfeuerung mit Pellets auf ca. 900 °C aufgeheizt. Durch die Ergebnisse der ersten Feuerung ließen sich bestimmte Parameter übernehmen, so dass die Einstellphase deutlich kürzer gehalten werden konnte.

Folgende Parameterveränderungen gegenüber dem ersten Versuch zeigten in der Online-Messung die geringsten Emissionswerte und ließen auch aufgrund hoher Verbrennungstemperaturen auf einen vollständigen Ausbrand schließen:

- Brennstoffeinschub (Puls / Pause): 0,3 s / 12,0 s
- Ascheschieber (Puls / Pause): 1 s / 5 s
- Differenzdruck (Kaminabzug): -0,14 mbar

Die Emissionswerte von CO erreichten zwar weiterhin Werte außerhalb des Messbereichs von $1.500\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{i.N.}}$, jedoch deutlich weniger häufig und regelmäßiger. Diese Regelmäßigkeit ließ darauf schließen, dass das Zurückfahren des Ascheschiebers eine Verdichtung des Brennstoff-Asche-Gemisches bewirkte. Sobald der Ascheschieber vorfuhr, wurde das Glutbett auseinander getragen und Stellen von Unverbranntem offengelegt. Dadurch stiegen die CO-Emissionen und Verbrennungstemperaturen zügig. Weiterhin kam es zu Agglomerationen im Bereich des Brennraums (siehe Anhang Abbildung 54). Auch bei dieser Brennstoffmischung kann von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen werden: Der TR lag bei 99,61 Ma.-%, der Glühverlust bei 1,80 Ma.-% (Fotos des Brennstoffs und der Asche siehe Anhang Abbildung 48).

a.1.3.3. **Verbrennungsvorversuch 3: Brennstoff 50 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände + 50 Ma.-% Holzpellets (Ökothem CS-30)**

Wie in den vorangegangenen Versuchsdurchläufen wurde der Ofen auf eine Temperatur von 900 °C vorgeheizt. Es zeigte sich, dass die CO-Emissionen seltener die Messgrenze von $1.500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}$ überschritten und auch der Mittelwert geringer war. Während der Verbrennung wurden vier Staubmessungen im Rein- und Rohgas durchgeführt, die im Mittel Werte von $454,20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}$ (Rohgas) bzw. $261,53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}$ (Reingas) zeigten.

Der TR der Aschen belief sich auf 99,91 Ma.-% und der GV auf 0,44 % (Fotos des Brennstoffs und der Asche siehe Anhang Abbildung 49).

Fazit Verbrennungsvorversuche 1-3 (Ökothem Muldenfeuerung):

Insgesamt konnte mithilfe der drei Verbrennungsvorversuche nachgewiesen werden, dass eine Monoverbrennung von EAG-Behandlungsrückständen ebenso wie eine gemeinsame Verbrennung mit Holzpellets als Hilfsbrennstoff möglich ist. Die Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse für die Aschen in Tabelle 3 zeigt, dass ein vollständiger Ausbrand (GV: < 2 Ma.-% bei TR-Gehalten: > 99,5 Ma.-%) gewährleistet werden konnte. Der vergleichsweise geringe GV für Versuch 3 wurde neben der Erhöhung des Holzpelletanteils auch auf Schwankungen in der Zusammensetzung der als Brennstoff verwendeten EAG-Behandlungsrückstände zurückgeführt. Die Schüttdichten erhöhten sich zudem mit steigender Vermischung mit Holzpellets auf ca. $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse Aschen Verbrennungsvorversuche.

Versuche	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Anteil EAG-Rest (Ma.-%)	100	75	50
Anteil Holzpellets (Ma.-%)	0	25	50
GV (Ma.-%)	1,44	1,80	0,44
TR (Ma.-%)	99,73	99,61	99,91
ρ_{Sch} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,878	0,964	0,977

Aufgrund der vergleichsweise kleinen Feuerungsanlage wurden jedoch Probleme wie z.B. eine ungleichmäßige Verbrennung und daraus folgend Schwankungen wichtiger Verbrennungs- (u.a. Temperatur) und Emissionsparameter (CO- und O₂-Gehalte) verursacht. Deshalb war für den Hauptverbrennungsversuch eine größere Feuerungsanlage vorzusehen.

a.1.3.4. Verbrennungsversuch 4: Brennstoff 100 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände (MAWERA)

Der Hauptverbrennungsversuch wurde in der in Kapitel II.a.1.1 beschriebenen Rostfeuerung durchgeführt. Dabei war der Verbrennungsprozess so zu steuern, dass die Feuerraumtemperatur den Schmelzpunkt der Zielmetalle nicht erreichte.

Die Untersuchung der Verbrennungsprozesse ergab für einen Betrieb mit möglichst niedrigen Emissionswerten und geringer Agglomeratbildung die in Tabelle 4 dargestellte Parametrierung.

Tabelle 4: Einstellungen der Verbrennungsparameter für Hauptverbrennungsversuch.

Brennstoffeinschub (Puls / Pause)	4 s / 11 s
Rostgeschwindigkeit (Rost 1 / Rost 2)	60 % / 25 %
Primärluftverteilung (Zone 1 / Zone 2 / Zone 3)	95 % / 89 % / 50 %
Sekundärluftzugabe	50 %
Unterdruck im Brennraum	1,1 mbar

Mit diesen Parametern wurde die Verbrennung von ca. 24 kg EAG-Behandlungsrückstände pro Stunde durchgeführt. Der Hauptverbrennungsversuch mit ca. 1.730 kg EAG-Behandlungsrückständen dauerte inklusive Zündvorgang, Aufheizung und Herunterfahren des Kessels ca. 81 Stunden.

Die Schüttdichte der erzeugten Asche betrug $0,866 \text{ g/cm}^3$ und war diesbezüglich mit der Asche des Vorversuches Nr.1 vergleichbar (siehe Tabelle 3, Foto siehe Anhang Abbildung 55). Der TR betrug 99,85 Ma.-% (entspricht den Ergebnisse der Vorversuche siehe Tabelle 3). Der Glühverlust war mit 1,73 Ma.-% mit den Ergebnissen der Vorversuche Nr. 1 und 2 (siehe Tabelle 3) vergleichbar und zeigt einen vollständigen Ausbrand auf.

Zudem wurden die Metallgehalte der Asche untersucht. Die Analysenergebnisse sind in Tabelle 6 zusammen mit den Ergebnissen für den Behandlungsversuch in der TARTECH-Anlage dargestellt.

Fazit Verbrennungsversuche

Durch die Versuche mit verschiedenen Verbrennungsanlagen konnte nachgewiesen werden, dass EAG-Behandlungsrückstände als Monobrennstoff thermisch behandelbar sind. In Kleinversuchen wurde zudem gezeigt, dass die Zugabe von Holzpellets bis zu einem Anteil von 50 Ma.-% dazu beiträgt, die Emissionswerte zu verringern und den Anteil sowie die Härte von Agglomeraten in den Aschen zu steigern.

a.1.3.5. Aufbereitungsversuche (Zerkleinerung, Absiebung, Schmelze) und Charakterisierung

Eine Probe der Aschen des ersten Verbrennungsversuchs (Ökotherm) war mit einem Backenbrecher zerkleinert und in der Kugelmühle fein gemahlen worden. Die Siebung der gemahlenen Asche ergab, dass der höchste Masseanteil in der Siebfraction von 63-125 μm (42,02 Ma.-%) und der geringste im Bereich von 250-500 μm (4,04 Ma.-%) lag. Abbildung 5 zeigt die gesamte Verteilung über die fünf Fraktionen sowie den Kupferanteil pro Siebfraction. Es wird deutlich, dass durch eine Siebung bereits der größte Anteil des Kupfers isoliert werden konnte. Die höchsten Kupferanteile finden sich in den beiden gröbereren Siebfractionen⁴ mit 67,60 Ma.-% (250-500 μm) bzw. 45,27 Ma.-% (> 500 μm). Vom gesamten Kupferinhalt entfallen ca. 70 Ma.-% auf die Fraktionen > 250 μm und entsprechend ca. 30 Ma.-% auf die Fraktionen < 250 μm .

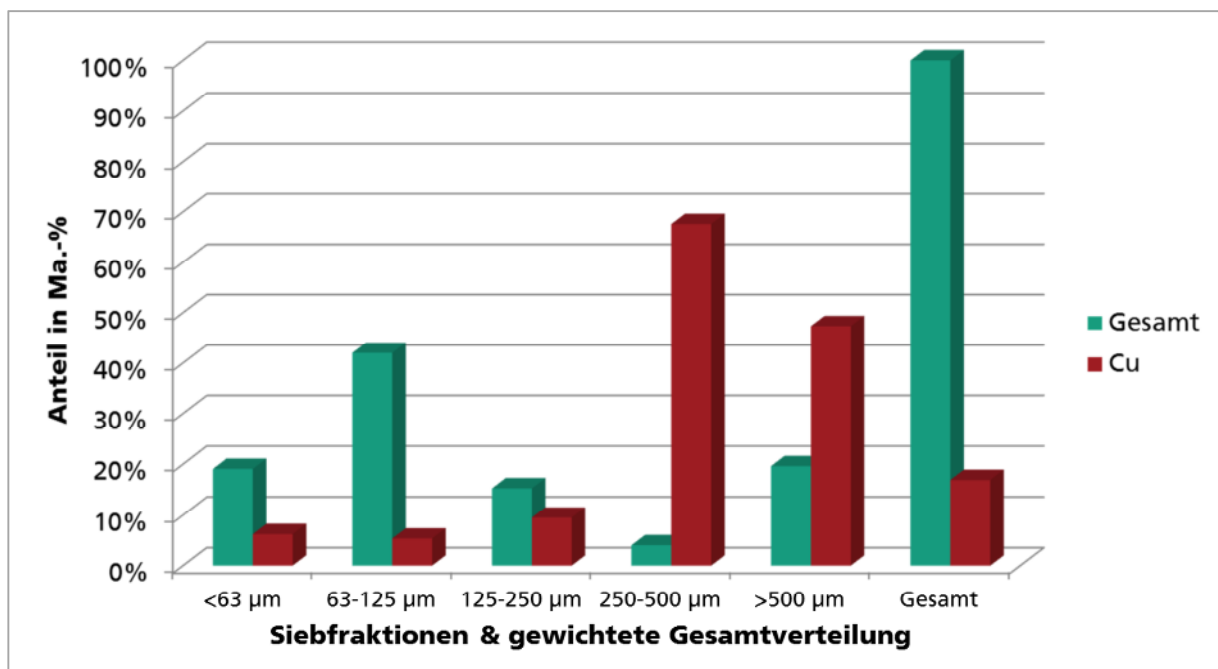


Abbildung 5: Siebfractionen der Aschen eines Verbrennungsvorversuchs mit EAG-Rückständen – Verteilung Masse und Anteile Cu pro Fraktion.

Zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung bzw. der Metallgehalte durch EDX-Analysen mussten die Siebfractionen > 250 μm und > 500 μm zunächst getrennt voneinander bei mehr als 1500 °C eingeschmolzen werden (siehe auch Kapitel II.a.1.2). Die Ergebnisse der Schmelzversuche finden sich in Tabelle 5. Bei allen Versuchen kam es während der Befüll- und Nachchargierphasen zu starker Rauchentwicklung mit teils gelben Verfärbungen und Ablagerungen (Hinweis auf Schwefel). Die Versuche 3 und 4 zeigten keine

⁴ Für die Siebfractionen > 250 μm ist der Metallanteil über das Verhältnis von Legierung zu Schlacke nach den Schmelzversuchen und mit den entsprechenden Metallanteilen zurückgerechnet worden.

klare Trennung zwischen Legierung und Schlacke. Es ist anzumerken, dass es bei den Schmelzen der gröberen Körnungen erst später und damit deutlich langsamer zu einer Schmelze kam. Für die Elementarzusammensetzung wurden deshalb die gemittelten Werte der Versuche 1 und 2 (für die Fraktion 250-500 μm) sowie die Werte des Versuchs 5 (Fraktion > 500 μm) genutzt. Durch die fehlende Phasentrennung sowie Schlackeanhaftungen am Graphit war es teils schwierig, genaue Massenanteile der beiden Phasen anzugeben. Deshalb wurden in Tabelle 5 nur die Ergebnisse für die Versuche 1,2 und 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Schmelzversuche.

Laufende Nr.	Fraktion μm	Einwaage g	P_{max}^* kW	T_{max} °C	Anteil Legierung Ma.-%	Anteil Schlacke Ma.-%
1	250-500	38,50		1.600	78,75	14,52
2	250-500	50,26	19,0	1.650	82,35	8,64
5	> 500	50,28	19,0	1.750	82,98	

* Dem Induktionsofen maximal zugeführte elektrische Leistung.

Sowohl bei der feineren als auch der gröberen Fraktion zeigte sich, dass der Anteil der Legierung mit durchschnittlich 80,55 Ma.-% (Versuch 1 und 2) bzw. 82,98 Ma.-% (Versuch 5) relativ hoch ist. Insbesondere die Schmelzen mit den Nummern 2 und 5 wurden mit annähernd gleichen Mengen eingewogen und ergaben fast gleiche Massenanteile an Legierungen. Dies wies darauf hin, dass sich durch Mahlen und anschließendes Sieben bereits ein großer Anteil an Nichtmetallen abscheiden lässt.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der EDX-Elementaranalysen für die Metalle Aluminium, Kupfer und Eisen in sämtlichen Fraktionen der Ascheprobe. Es wird deutlich, dass Aluminium mit relativ geringen Konzentrationen in sämtlichen Fraktionen vorliegt. Eine Ausnahme stellt wiederum die Fraktion > 500 μm dar, in der der Aluminiumanteil ca. 10 Ma.-% betrug. Eisen wurde mit einer ähnlichen Verteilung angetroffen, mit einem maximalen Gehalt von ca. 20 Ma.-% in der Fraktion > 500 μm .

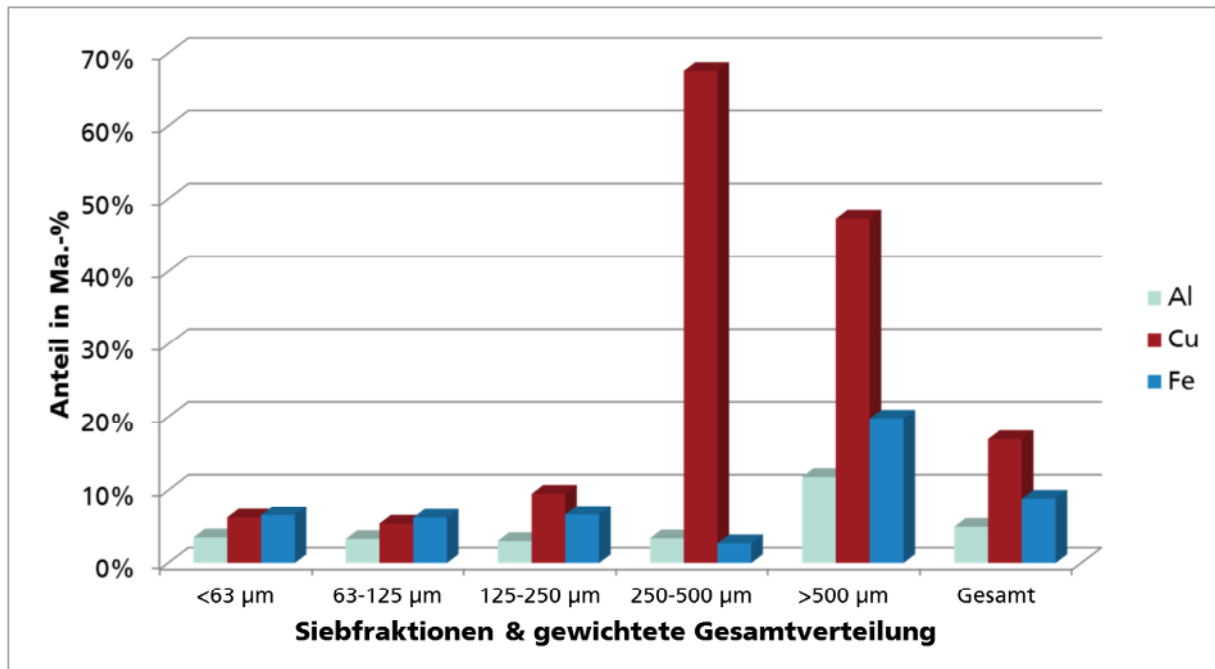


Abbildung 6: Siebfraktionen der Aschen eines Verbrennungsvorversuchs mit EAG-Rückständen - Ergebnisse der EDX-Elementaranalyse der Siebfraktionen.

Zudem findet sich im Anhang in Tabelle 15 eine tabellarische Darstellung für sämtliche untersuchte Elemente.

Fazit

Durch das Aufmahlen und anschließende Klassieren der Aschen konnte der größte Anteil des Kupfers bereits isoliert werden. Vom gesamten Kupferinhalt entfielen ca. 70 Ma.-% auf die Fraktionen $> 250 \mu\text{m}$ und ca. 30 Ma. % auf die Fraktionen $< 250 \mu\text{m}$. Aufgrund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Siebung bei $250 \mu\text{m}$ rund dreiviertel (76,3 Ma. %) des gesamten Aschemassestroms und gleichzeitig ca. 70 Ma. % des Kupfers abgetrennt werden kann.

In den Schmelzversuchen zeigten die bearbeiteten Proben, dass der Anteil der Legierung mit ca. 81 Ma. % ($250-500 \mu\text{m}$) bzw. ca. 83 Ma. % ($> 500 \mu\text{m}$) relativ hoch ist. Auch dies wies darauf hin, dass durch Mahlen in einer Kugelmühle und anschließendes Sieben bereits eine saubere Abtrennung von Mineralik und Metall erreicht werden kann und sich ein großer Anteil an Nichteisenmetallen abscheiden lässt. Bezüglich der Ergebnisse der Schmelzversuche ist anzumerken, dass diese im Labormaßstab erzeugten Ergebnisse nicht direkt auf größere Schmelzen übertragbar sind. Aufgrund der kleinen Bauform des Tiegels mit einem Fassungsvermögen von 15 ml kann eine für Induktionsschmelzen typische Eigenbewegung des Materials nur bedingt stattfinden. Durch diese Einschränkung lagern sich aggregiert Anteile verschiedener Metalle in der Schlacke ab, wie dies auf Abbildung 53 im Anhang zu erkennen ist. Wenn die angesprochene

Eigenbewegung wie bei großmaßstäbigen Anlagen abläuft, ist davon auszugehen, dass der Anteil verschiedener Metalle an der Legierung höher sein wird.

a.2. Behandlung der EAG-Asche in der TARTECH-Anlage

Die erzeugten EAG-Aschen (ca. 290 kg) wurden nach stufenweiser Inbetriebnahme der β -Linie der TARTECH-Anlage im Jahr 2015 am 08.09.2015 behandelt. Für eine detaillierte Beschreibung der TARTECH-Anlage wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht des Vorhabensteilprojektes B [Gronholz und Schmidt 2015] verwiesen. Entgegen der ursprünglichen Planung musste die Asche aufgrund grobkörniger Agglomerate zunächst in der α -Linie vorzerkleinert werden, um die notwendige maximale Korngröße von 2 mm für die Behandlung in der β -Linie zu gewährleisten. Aufgrund des geringen Wassergehaltes (99,85 Ma.-%) konnte auf ein Durchlaufen der Trocknungsanlage der β -Linie verzichtet und unmittelbar die Trennung von NE-Metallen und Mineralikfraktion durchgeführt werden. Dabei fand ein vereinfachter Durchlauf mit folgenden Teilen der β -Linie statt:

- Magnetabscheider,
- TAR-Prozessor 2,
- NE-Abscheider.

Die gewonnenen NE-Metallfraktionen:

- 5 mm (aus α -Linie),
- 2-5 mm (aus α -Linie),
- < 2 mm (aus β -Linie),
- < 2 mm Restfraktion überwiegend aus Mineralik,

wurden gewogen und anschließend - wie auch die Mineralikfraktion - auf ihre stoffliche Zusammensetzung untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse (siehe Tabelle 6) zeigen, dass insbesondere die NE-Metallfraktion < 2 mm hauptsächlich (ca. 79 Ma.-%) aus den untersuchten Metallarten bestand. Dabei wurden besonders hohe Gehalte an Aluminium (ca. 55 Ma.-%) und Kupfer (ca. 20 Ma.-%) festgestellt.

Die Fraktion 2-5 mm enthielt ca. 38 Ma.-% der untersuchten Metalle und dabei insbesondere ca. 29 Ma.-% Aluminium und ca. 5 Ma.-% Kupfer.

Allerdings hatte sowohl die Fraktion NE-Metalle < 2 mm mit ca. 1,3 Ma.-% (TS) als auch die Fraktion NE-Metalle 2-5 mm mit ca. 0,2 Ma.-% (TS) nur geringe Anteile an der Gesamtmasse der Asche. Inklusive der Fraktion NE-Metalle > 5 mm betrug der Masseanteil der Outputs 1 bis 3 (Tabelle 6) nur ca. 1,7 Ma.-% (TS) am gesamten Stoffstrom.

Die Restmineralikfraktion (Output 4) hatte einen Anteil von ca. 98 Ma.-% (TS). Insgesamt enthielt diese Fraktion noch ca. 19 Ma.-% der untersuchten Metalle und dabei hauptsächlich Kupfer (ca. 8 Ma.-%), Aluminium (ca. 5 Ma.-%) und Eisen (ca. 2 Ma.-%).

Tabelle 6: Behandlung von EAG-Asche in der TARTECH-Anlage - stoffliche Zusammensetzung der In- und Outputfraktionen.

Element	Input	Output 1	Output 2	Output 3	Output 4
	Rohasche gesamt	NE-Fraktion > 5 mm	NE-Fraktion 2-5 mm	NE-Fraktion < 2 mm	Mineralik gesamt
Anteile in [Ma.-% (TS)]					
Ag	0,0031	0,0011	0,0016	0,0064	0,0029
Al	3,84	3,82	28,90	55,40	4,95
Co	0,0042	0,0035	0,0028	0,0021	0,0045
Cr	0,093	0,0305	0,0289	0,0224	0,0538
Cu	4,54	3,46	4,64	20,40	8,17
Fe	1,31	1,41	1,20	1,22	2,00
Mg	1,89	2,620	2,170	0,437	1,92
Pb	0,05	0,0171	0,0314	0,0982	0,0431
Sb	0,803	0,370	0,266	0,287	0,627
Sn	0,15	0,0370	0,0305	0,0474	0,0811
Sr	0,05	0,0502	0,0420	0,0411	0,0463
Ti	2,43	0,275	0,571	0,258	0,526
Zn	0,098	0,136	0,156	0,699	0,155

b. Bilanzierung, Quantifizierung, Bewertung (AP 6)

b.1. Beschreibung der großtechnischen Behandlungsversuche für verschiedene Aschen/Schlacken in der TARTECH-Anlage

Zur Untersuchung der TARTECH-Anlage wurden entsprechend des jeweiligen Ausbauzustandes der α - und β -Linien (Einschränkungen durch Verzögerungen bei der Errichtung und Inbetriebnahme, siehe auch Kapitel I.2) umfangreiche Behandlungsversuche durchgeführt.

Die Herkunft und Eigenschaften sowie die in der TARTECH-Anlage durchlaufenen Behandlungsstufen für die einzelnen Aschen/Schlacken sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Großtechnische Versuche mit Aschen/Schlacken mit der TARTECH-Anlage.

Nr.	Herkunft Asche/Schlacke	Zustand	Beschreibung	Behandlung TARTECH
1	BSR, Schlackendeponie, Berlin / Brandenburg	deponierte, rückgebaute Schlacke	aus Deponie zurückgebaut MV-Schlacke	α-Anlage
2	SRH, MVA Stelling Moor, Hamburg	Rohasche	aus 90 % Hausmüll und 10 % Gewerbemüll, Sommer inkl. relevanter Gartenabfallmengen	
3			aus 90 % Hausmüll und 10 % Gewerbemüll, aus Herbst mit hohem Laubanteil	
4			aus 90 % Hausmüll und 10 % Gewerbemüll, aus Winter, Hausmüll ohne Garten- und Grünabfälle	
5			SRH, MVR Rugenberger Damm, Hamburg	
6		vorbehandelte Schlacke	Schlacke nach Entfrachtung (zweifach) und 3-monatiger Kalzinierung	
7	SRH, MVB Borsigstraße, Hamburg	Rohasche	aus 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbemüll	α- und β-Anlage
8		vorbehandelte Schlacke	aus 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbemüll, Schlacke nach Entfrachtung (nach vier Wochen Lagerung)	α-Anlage
9	Fraunhofer UMSICHT, EAG-Reste Monoverbrennung, Sulzbach-Rosenberg	Rohasche	EAG-Asche	α- und β-Anlage

Im Aufbereitungsversuch Nr. 1 wurden 534,38 Mg vorentschröttete HMVA, die in den Jahren ab 2009 eingelagert und 2014 aus der Deponie Schöneicher Plan in Brandenburg 2015 zurückgebaut wurde, im Dezember 2014 behandelt [Auhagen 2015].

Die Stadtreinigung Hamburg (SRH) stellte weitere Aschen aus drei Hamburger Müllverbrennungsanlagen (MVA Stellingener Moor, MVA Rugenberger Damm (MVR) und MVA Borsigstraße (MVB)) für die Untersuchungen zur Verfügung [Lübben und Enzner 2016].

Für den Versuch 2 wurden 974,62 Mg Rohasche (Ausgangsmenge ca. 1.024 Mg; nach Lagerung aufgrund der verspäteten Inbetriebnahme der Tarteck-Anlage wurde ein Masseverlust von ca. 5 % festgestellt), für Versuch 3 (ca. 495 Mg) und Versuch 4 (ca. 350 Mg) aus der MVA Stellingener Moor eingesetzt. Aus den Aschen der MVA Stellingener Moor wurden verfahrensbedingt bereits nach der Verbrennung über einen Stangensizer großstückige Fe-Metalle (Grobschrott) abgetrennt. Im Jahresdurchschnitt hat der Grobschrott einen Anteil von ca. 0,42 % der Rohasche. Für den Versuch 2 wurden der Ascheprobe vor der Behandlung in der TARTECH ca. 5,6 Mg Grobschrott wieder hinzugegeben; für die Versuche 3 und 4 jedoch nicht.

Aus der MVA Rugenberger Damm (MVR) wurden ca. 910 Mg nicht vorbehandelte Rohasche (Versuch 5) und ca. 500 Mg vorbehandelte Asche, die bereits zweifach in der MVR aufbereitet und einer dreimonatigen Kalzinierung unterzogen wurde (Versuch 6), eingesetzt.

Zwei weitere Aschen stammen aus der MVB. Im Rahmen der Aufbereitungsversuche wurden ca. 730 Mg nicht vorbehandelte Rohasche und ca. 350 Mg vorbehandelte Asche in der Tarteck-Anlage aufbereitet (Versuche 7 und 8).

Die am Institutsteil des Fraunhofer UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg mit Verbrennungsversuchen hergestellte EAG-Asche (ca. 290 kg) wurde abschließend im September 2015 in der Tarteck-Anlage aufbereitet (Versuch 9).

Detaillierte Beschreibungen zu den Versuchsabläufen und Ergebnissen sind den Teilprojektschlussberichten der Verbundpartner für die aus Berlin (BSR) [Auhagen 2015] und Hamburg (SRH) [Lübben und Enzner 2016] stammenden Aschen/Schlacken zu entnehmen.

b.2. Nachhaltigkeitsbetrachtung

b.2.1. Ausgangssituation und Ziele

Ziel der ökobilanziellen Betrachtung ist die Quantifizierung potentieller Umweltwirkungen durch die Asche-/Schlackenaufbereitung mit Hilfe des TARTECH-Verfahrens. Die Identifizierung und Bewertung der potentiellen Umweltwirkungen orientiert sich an der internationalen Norm zur Ökobilanzierung, der DIN EN ISO 14040 / 14044. Mittels der Methodik der Ökobilanz soll so der potenzielle ökologische Nutzen einer innovativen Asche-/Schlackenaufbereitung untersucht und bewertet werden.

Da die heterogene Zusammensetzung von Aschen/Schlacken die Ergebnisse der Ökobilanz signifikant beeinflussen, wurde die Aufbereitung von insgesamt 8 verschiedenen Aschen/Schlacken ökobilanziell betrachtet. Einbezogen wurden Rohaschen mit unterschiedlichen Charakteristika sowie vorbehandelte Schlacken, eine bereits abgelagerte Deponieschlacke und eine Asche aus einer Verbrennung von Rückständen aus der Aufbereitung von EAG (siehe Tabelle 7). Die Effizienz der TARTECH-Anlage in Bezug auf die Metallrückgewinnung sollte durch die Gegenüberstellung mit der in Deutschland etablierten Aschen-/Schlackenaufbereitung nach dem Stand der Technik (SdT) ökologisch beurteilt werden. Dazu war zunächst der in Deutschland aktuell vorzufindende SdT in diesem Bereich zu bestimmen. Auf Grundlage der Daten aus den durchgeführten Versuchskampagnen war der SdT im Nachgang mit dem neuartigen TARTECH-Verfahren gegenüberzustellen (Vergleichsszenarien siehe Tabelle 9). Durch die Anwendung der ESSENZ⁵-Methode (siehe Kapitel II.b.2.2.2) sollten im Sinne einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung neben ökologischen auch ökonomische und soziale Aspekte beleuchtet werden, die mit der Rückgewinnung von Metallen aus Aschen/Schlacken in Verbindung stehen.

b.2.2. Hintergrund

b.2.2.1. Grundlegender Aufbau von Ökobilanzen

Eine Ökobilanz ist eine über die Normen ISO EN 14044 ff. definierte Methode, um potentielle Umweltwirkungen und Umweltaspekte von Produktsystemen und Dienstleistungen über den gesamten Lebensweg zu analysieren. Eine Ökobilanz umfasst grundsätzlich vier Phasen:

- Ziel und Untersuchungsrahmen,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung,
- Auswertung.

Eine ökobilanzielle Betrachtung, wie sie im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde, unterscheidet sich zur Ökobilanz darin, dass einige Aspekte weniger stark

⁵ ESSENZ steht für „Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung / Messung von Ressourceneffizienz“.

betrachtet oder nicht komplett erfasst werden. Der Schwerpunkt der ökobilanziellen Betrachtung liegt auf der Herausarbeitung von Kernaussagen, wobei auf bestimmte Inhalte der Auswertung, der kritischen Prüfung sowie der Betrachtung von Allokationseffekten verzichtet wird [Weimann et al. 2013].

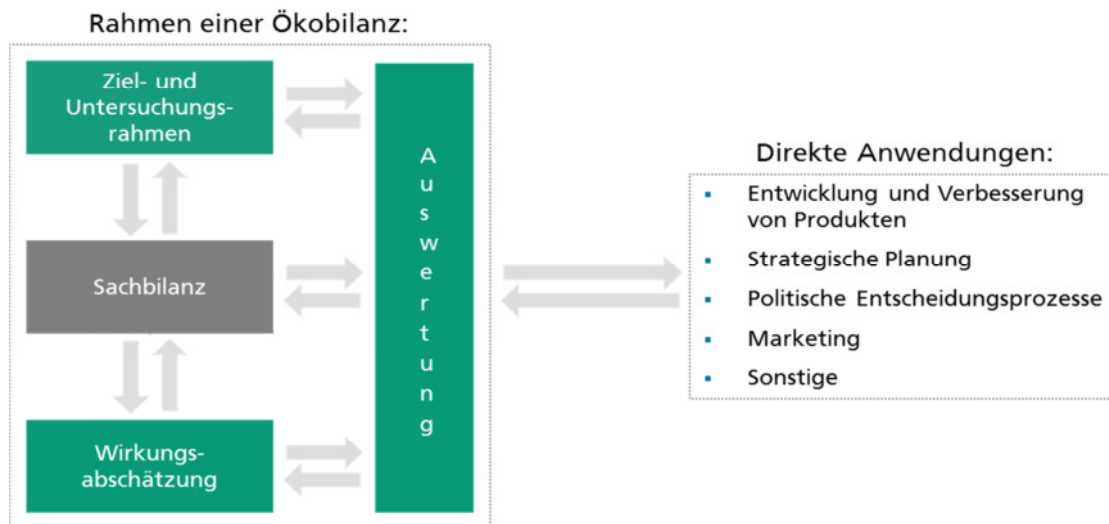


Abbildung 7: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / 14044 [Hense 2013].

b.2.2.2. ESSENZ-Methode

Um die Aufbereitung von Aschen/Schlacken im Rahmen des ATR-Projekts ganzheitlich zu untersuchen, wurden im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung nicht nur ökologische Aspekte, sondern auch sozio-ökonomische und soziale Aspekte einbezogen. Für diesen ganzheitlichen Betrachtungsansatz wurde die sogenannte ESSENZ-Methode gewählt. Diese Methode ermöglicht die Betrachtung der Ressourceneffizienz eines Prozesses unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im Allgemeinen wird Ressourceneffizienz als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ereignisses zu dem dafür nötigen Ressourceneinsatz definiert [Bongardt et al. 2014].

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzen (Produkt, Funktion, funktionelle Einheit)}}{\text{Aufwand (natürlicher Ressourceneinsatz)}}$$

Die Nachhaltigkeit des Ressourceneinsatzes hängt unter anderem von der Ressourcenverfügbarkeit sowie von den Umweltwirkungen in Zusammenhang mit Abbau und Nutzung der Ressourcen ab. Ebenso nehmen wirtschaftliche und soziale Aspekte Einfluss auf die Verfügbarkeit von Ressourcen. Um eine sinnvolle Grundlage für Betrachtungen auf Produkt-, Unternehmens- oder Länderebene zu bilden, sollte folglich eine ganzheitliche Bewertung der Ressourceneffizienz ökologische, wirtschaftliche und soziale Aspekte über den gesamten Lebensweg beinhalten.

Die ESSENZ-Methode betrachtet die Dimensionen „Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“, „Umweltwirkungen“ und „Nutzen“. Diese Dimensionen werden auf Basis von 21 Kategorien abgebildet. Die Dimension „Verfügbarkeit“ ist in zwei Teildimensionen, „Physikalische Verfügbarkeit“ und „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, untergliedert [Bach et al. 2015]. Die Teildimension „Physikalische Verfügbarkeit“ beinhaltet die geologische und anthropogene Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen. Die der physikalischen Verfügbarkeit zugeordnete Kategorie ist der abiotische Ressourcenverbrauch, der über den Wirkungsindikator „Abiotic Depletion Potential“ ($ADP_{\text{elementar}}$) bestimmt wird. $ADP_{\text{elementar}}$ bezieht sich auf die ultimativen Reserven⁶ und beschreibt somit die Abnahme der Verfügbarkeit eines Rohstoffes nach geologischen Gesichtspunkten [Bach et al. 2015; van Oers et al. 2002].

Der Rohstoffbedarf ist mit einer zunehmenden Verlagerung der primären Rohstoffquellen der Lithosphäre in Sekundärrohstofflager der Anthroposphäre verbunden. Um neben Rohstoffen aus primären Quellen auch die anwachsenden Sekundärrohstoffquellen zu berücksichtigen, enthält die ESSENZ-Methode den Wirkungsindikator „Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential“ (AADP). AADP stellt die Extraktionsrate eines Rohstoffes in den in der Lithosphäre vorhandenen Ressourcen und den anthropogenen Sekundärrohstoffvorkommen gegenüber.

Der Einfluss sozio-ökonomischer Aspekte wird anhand der nachfolgend aufgelisteten Kategorien bewertet:

- Konzentration der Reserven,
- Konzentration der Produktion,
- Unternehmenskonzentration,
- Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben,
- Koppelproduktion,
- Preisentwicklung,
- Primärmaterialeinsatz,
- politische Stabilität,
- Minenkapazität,
- Handelshemmnisse,
- Nachfragewachstum.

Die Quantifizierung dieser Kategorien erfolgt mit Hilfe eines Modells, das sich an der Methode der ökologischen Knappheit orientiert. Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ umfasst die Kategorien „Einhaltung von sozialen Standards“ und „Einhaltung von Umweltstandards“. Für eine Bewertung der Einhaltung sozialer Standards wird ein Screening-Indikator verwendet, der soziale Aspekte des Rohstoffabbaus beleuchtet. In den Screening-Indikator fließen die Gesichtspunkte „Kinderarbeit“, „Zwangsarbeit“, „Konfliktgebiete“ sowie länderspezifische Risikofaktoren ein. Letztere werden aus einer speziellen

⁶ Bei ultimativen Reserven handelt es sich um das gesamte Vorkommen einer Ressource in der Erdkruste [Guinée 1995].

Datenbank, der sogenannten Social Hotspot Database, entnommen. Für die Kategorie „Einhaltung von Umweltstandards“ wird ein Indikator genutzt, der durch Multiplikation des prozentualen Anteils eines Landes an der globalen Produktion eines Rohstoffs mit dem länderspezifischen „Environmental Performance Index“ (EPI) berechnet wird. Die vierte Dimension bewertet Umweltwirkungen auf Grundlage der Methode der Ökobilanz. Die Bewertung basiert auf der Betrachtung der Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Ozonabbaupotenzial und Photochemisches Oxidationspotenzial (Abkürzungen: GWP, AP, EP, ODP und POCP). Nach der Bewertung der einzelnen Kategorien wird die Ressourceneffizienz innerhalb des gewählten Untersuchungsrahmens durch Division der funktionellen Einheit durch die Ergebnisse der Dimensionen ermittelt. Eine Aggregation zu einem Gesamtwert wird nach der ESSENZ-Methode nicht durchgeführt [Bach et al. 2015].

b.2.3. Methodik

b.2.3.1. Stoffströme des ökologischen Bewertungsmodells

Für die ökologische und soziale Bewertung wurden die zur Verfügung stehenden Daten aus den in der TARTECH-Anlage durchgeführten Versuchskampagnen ausgewertet (siehe auch Kapitel II.b.1). Die Versuche umfassten den Durchsatz verschiedener Aschen/Schlacken mit jeweils spezifischen Charakteristika. Ebenso wurden bei der Auswahl der Aschen unterschiedliche Jahreszeiten berücksichtigt, um damit verbundene Schwankungen in der Zusammensetzung der eingesetzten Abfälle zu berücksichtigen. Zudem wurden unbehandelte Rohaschen, sowie bereits vorbehandelte Asche/Schlacke untersucht. Zwei der betrachteten Aschen wurden neben der α -Linie auch in der β -Linie der TARTECH-Anlage aufbereitet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Bezeichnung, Herkunft, Zustand und Behandlung der betrachteten Aschen/Schlacken.

Tabelle 8: Übersicht über die im Rahmen der Ökobilanz berücksichtigten Aschen/Schlacken.

Bezeichnung	Herkunft Asche/Schlacke	Zustand Asche/Schlacke	Behandlung
SdT-HMVA	Bestimmung durch Literaturrecherche und Datenabfrage (siehe Anhang Tabelle 16)	Rohasche	SdT
S1 S2 S3 MVR-R	SRH, MVA Stellinger Moor, Hamburg SRH, MVR Rugenberger Damm, Hamburg	Rohasche (inkl. Grobschrott)	α -Linie
MVB-R (A+B)	SRH, MVB Borsigstraße, Hamburg	Rohasche (exkl. Grobschrott)	α - und β -Linie
MVB-V	SRH, MVB Borsigstraße, Hamburg	Vorbehandelte Asche	α -Linie
D-S	BSR, Deponie Schöneicher Plan	Deponierte, rückgebaute Schlacke	
EAG	Fraunhofer UMSICHT, EAG- Monoverbrennung, Sulzbach- Rosenberg	Rohasche (exkl. Grobschrott)	α - und β -Linie

b.2.3.2. Methode, Untersuchungsrahmen und Zieldefinition

Durchführung, Modellaufbau, Datenermittlung sowie Analyse der ökobilanziellen Betrachtung orientieren sich an den internationalen Normen zur Ökobilanz, DIN EN ISO 14040 und 14044 (siehe Kapitel II.b.2.2.1).

Zur Modellierung und Simulation der Daten wurde die von Thinkstep entwickelte Software GaBi genutzt. Die verwendeten Datensätze wurden der Datenbank ecoinvent (Version 3.1) entnommen.

Ziel dieser ökobilanziellen Betrachtung ist die Quantifizierung der potentiellen Umweltwirkungen, die mit einer Aschen- bzw. Schlackenaufbereitung mit Hilfe des von TARTECH entwickelten Verfahrens einhergehen. Die Betrachtung berücksichtigt acht Aschen/Schlacken unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzungen. Als Grundlage dient ein Vergleichsansatz gemäß der in Kapitel II.b.2.3.5 definierten Szenarien.

b.2.3.3. Funktionelle Einheit

Kernelement der Betrachtung sind die in Aschen/Schlacken enthaltenen Wertstoffe, die durch eine Aufbereitung zurückgewonnen werden können. Die Nutzung der so gewonnenen Sekundärrohstoffe hat ökologische Vorteile gegenüber der Gewinnung von Rohstoffen aus primären Quellen, die üblicherweise mit deutlich höheren, negativen Umwelteinwirkungen verbunden ist. Als funktionelle Einheit (FE) wurde 1 Mg Asche/Schlacke, ausgekühlt und an der Aufbereitungsanlage vorliegend, festgelegt.

b.2.3.4. Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der ökobilanziellen Betrachtung umfassen folgende Module:

- Aufbereitung der Aschen/Schlacken mit dem TARTECH-Verfahren (unter Berücksichtigung des Verbrauchs von Betriebsmitteln und den mit der Herstellung der Anlagen und Maschinen verbundenen Emissionen) mit Ziel der Rückgewinnung von Metallen (unter Berücksichtigung von Qualitätsverlusten),
- Primärherstellung der Rohstoffe, die aus Aschen/Schlacken zurückgewonnen werden können,
- Verwertung der nach einer Aufbereitung verbleibenden Rest-Mineralik-Fraktion,
- Transporte der Produkte und Infrastruktur.

Die Betrachtungen beginnen mit der Aufbereitung der Aschen/Schlacken an der TARTECH-Anlage. Innerhalb der Systemgrenzen wurden die einzelnen Prozesse der Aschen-/Schlackenaufbereitung aufgenommen. In das System eingehende Energie- und Massenflüsse sind der Bedarf an elektrischer Energie und fossilen Energieträgern, an Betriebsmitteln, sowie die für den Betrieb der Anlage benötigten Maschinen und die Infrastruktur. Outputströme sind die aus dem Energieverbrauch resultierenden Emissionen, nicht genutzte Abwärme, die zurückgewonnenen Sekundärmetalle sowie entstehende Abfälle. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Systemgrenzen für die ökobilanzielle Betrachtung der Aufbereitung verschiedener Aschen/Schlacken. In Bezug auf die Rückgewinnung der Metalle stellt die EAG-Asche dabei einen Spezialfall dar. Es wurde davon ausgegangen, dass aufgrund der Zusammensetzung der verbrannten Abfälle (siehe auch Tabelle 7) bei der Aufbereitung der Aschen/Schlacken S1, S2, S3, MVB-R, MVB-V, MVR-R und D-S hauptsächlich Basismetall-Fractionen wie unlegierter Stahl (Fe), Aluminium (Al), Blisterkupfer (Cu), Zink (Zn) und Edelstahl (VA) relevant sind. Bei der Behandlung der Asche aus der Verbrennung von EAG-Behandlungsrückständen wurden zusätzlich weitere rückgewinnbare Sekundärmetalle wie Antimon, Nickel, Blei, Selen und Silber erwartet. Unter der Annahme, dass die zurückgewonnenen Sekundärmetalle Primärmetalle ersetzen, werden die dadurch eingesparten Emissionen in Form einer Gutschrift ausgewiesen.

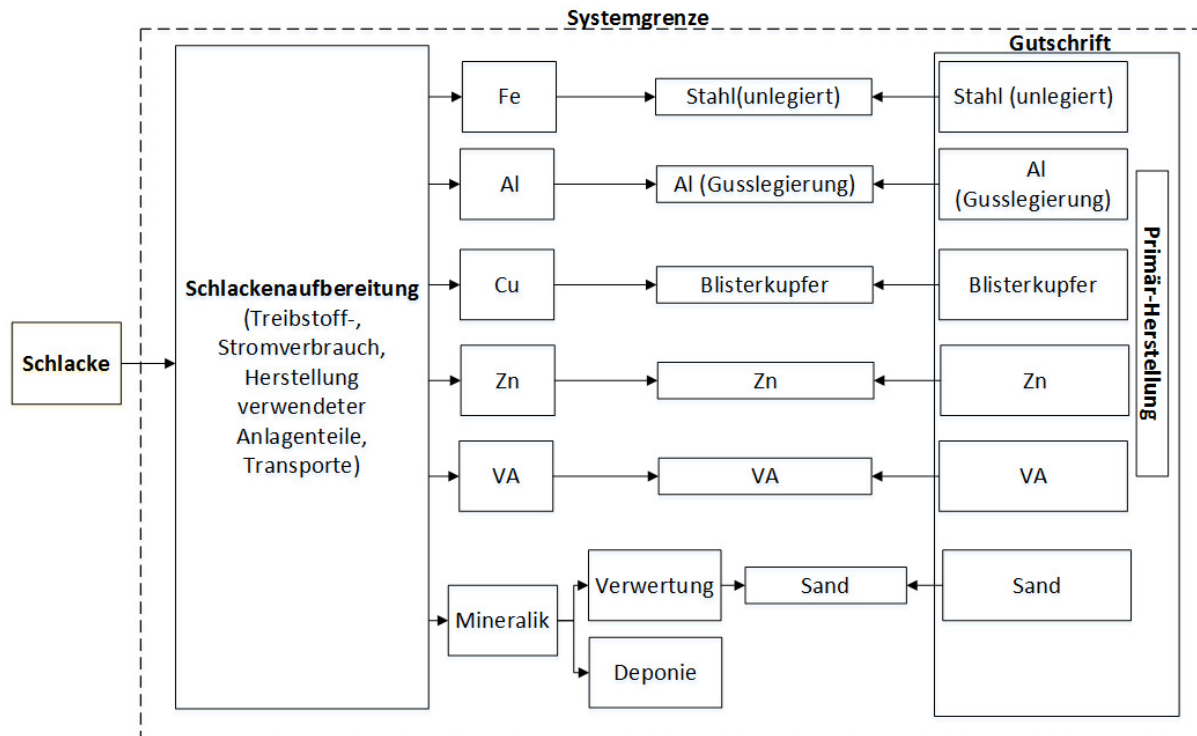


Abbildung 8: Systemgrenzen der Aufbereitung der Aschen/Schlacken S1, S2, S3, MVB-R, MVB-V, MVR-R und D-S.

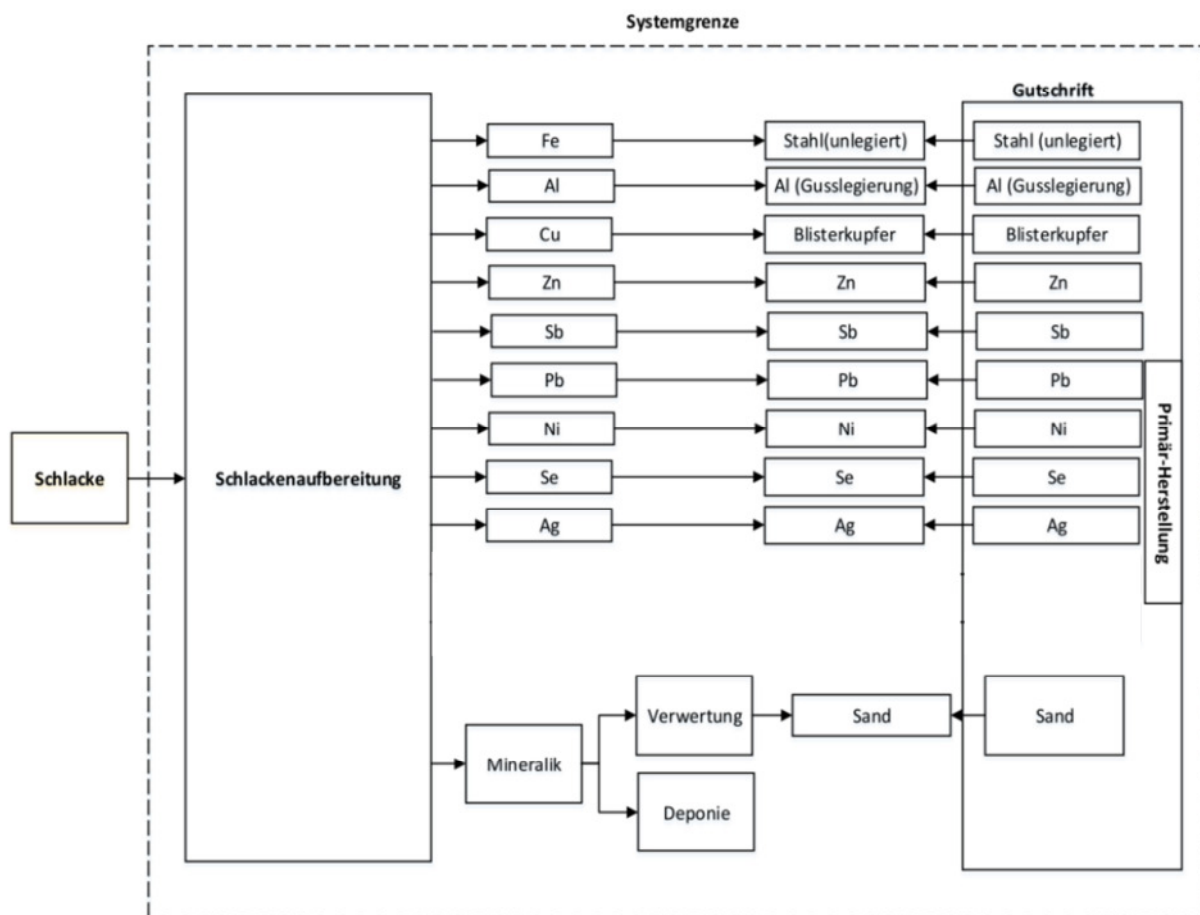


Abbildung 9: Systemgrenzen der Aufbereitung der EAG-Asche.

Bei den Transporten wurden die weitere Verbringung der zurückgewonnenen Metallfraktionen und der mineralischen Restfraktion zur Verwertung bzw. Entsorgung berücksichtigt. Die Transporte erfolgen dabei jeweils per Lkw. Die mit den Transporten verbundenen Umweltwirkungen basieren auf Datenbankwerten (ecoinvent 3.1). Das zurückgewonnene Al wird zum nächst gelegenen Aluminium-Verarbeiter transportiert (Transportdistanz 210 km). Die Fe- und VA-Fraktion werden zusammen zu einem 90 km entfernten Stahlwerk transportiert. Alle weiteren Metallfraktionen werden in ein Recyclingwerk nach Lünen transportiert (256 km). Die mineralische Restfraktion wird zur nächst gelegenen Deponie gebracht, die sich in diesem Fall auf dem Gelände befindet. Deshalb wurde hierbei eine Transportdistanz von 1 km angenommen.

b.2.3.5. Vergleichsszenarien

Zum Vergleich der Asche-/Schlackenaufbereitung nach dem SdT mit einer Aufbereitung mit dem TARTECH-Verfahren wurden vier Vergleichsszenarien definiert (Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleichsszenarien für die Nachhaltigkeitsbewertung.

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Betrachtete Asche/Schlacke
Szenario Rohaschen α -Linie	Vergleich der Aufbereitung von Rohaschen mittels TARTECH (nur α - Linie) und mittels einer Anlagenkonfiguration nach dem SdT	S1, S2; S3, MVR-R, MVB-R
Szenario Rohasche α - und β -Linie	Vergleich der Aufbereitung von Rohasche in der α -Linie mit einer Aufbereitung in α - und β -Linie	MVB-R
Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke α -Linie	Vergleich einer vorbehandelten Asche (MVB-V) und einer Deponieschlacke (D-S) nach einer Aufbereitung in der α -Linie ⁷ mit einer Deponierung/Verwertung	MVB-V, D-S
Szenario EAG α - und β -Linie	Vergleich der Aufbereitung einer Asche aus der Verbrennung von EAG- Aufbereitungsrückständen in der α - und β -Linie mit einer Deponierung/ Verwertung	EAG

b.2.3.6. Beschreibung einer ausgewählten Referenzanlage nach dem Stand der Technik

Im ersten Schritt wurde eine umfassende Literaturrecherche über die typische Zusammensetzung von Aschen/Schlacken aus der Hausmüllverbrennung und zum aktuellen SdT in der Aschen- und Schlackenaufbereitung in Deutschland durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl von Anlagenkonfigurationen konnten hinsichtlich der SdT für einzelne Aspekte nur Bereiche eingegrenzt werden. Ausgehend von den Ergebnissen wurden zusätzlich dazu exemplarische Betriebsdaten zu einer Anlage nach dem SdT mittels Fragebogen und Interview erhoben [Schmidt 2015].

Der prinzipielle Aufbau einer exemplarischen SdT-Aufbereitungsanlage ist in Abbildung 10 wiedergegeben. Die Rostasche wird vor der Aufbereitung bereits in der MVA von groben Fe-Metallen entfrachtet (ca. 1,5 %) und bildet dann die

⁷ In diesem Vergleichsansatz wäre grundsätzlich auch der Blick auf eine Gegenüberstellung der Deponierung mit einer Aufbereitung in α - und β -Linie interessant. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung bei der Inbetriebnahme der β -Linie standen hierzu jedoch keine Daten zur Verfügung.

Rohasche für die weitere Aufbereitung, bestehend aus zwei Stufen. In der ersten Stufe wird die Asche abgeseibt, sodass eine Fraktion z.B. der Größe < 32 mm entsteht. Das Überkorn wird in einer Prallmühle zerkleinert und erneut abgeseibt. Der durchschnittliche Masseanteil am verbleibenden Überkorn beträgt ca. 2,8 %. Die Fraktion der Korngröße < 32 mm wird durch zwei Magnetabscheider vom Fe-Metallen entfrachtet. Zwischen den beiden Stufen der Aufbereitungsanlage erfolgt eine Zwischenlagerung der Asche über einen Zeitraum von z.B. sechs Wochen, mit dem Ziel einer Kalzinierung und Trocknung. Aufgrund von Agglomerationsprozessen und dabei entstehenden größeren Bestandteile ist in der zweiten Stufe eine erneute Zerkleinerung der Fraktion > 32 mm notwendig. In der zweiten Stufe erfolgen eine erneute Fe-Entfrachtung und die NE-Abscheidung durch zwei NE-Abscheider. Um die Abscheideergebnisse zu verbessern, kann die Fraktion noch einmal in zwei Fraktionen mit Korngrößen von z.B. 12-32 mm und < 12 mm getrennt werden. Die von Metallen entfrachteten Fraktionen werden nach Abschluss der Metallseparation wieder in eine Gesamtrestfraktion zusammengeführt und nach einer weiteren Lagerungszeit von z.B. sechs Wochen vermarktet. Dieses Material kann danach vollständig als Ersatzbaustoff verwertet werden.

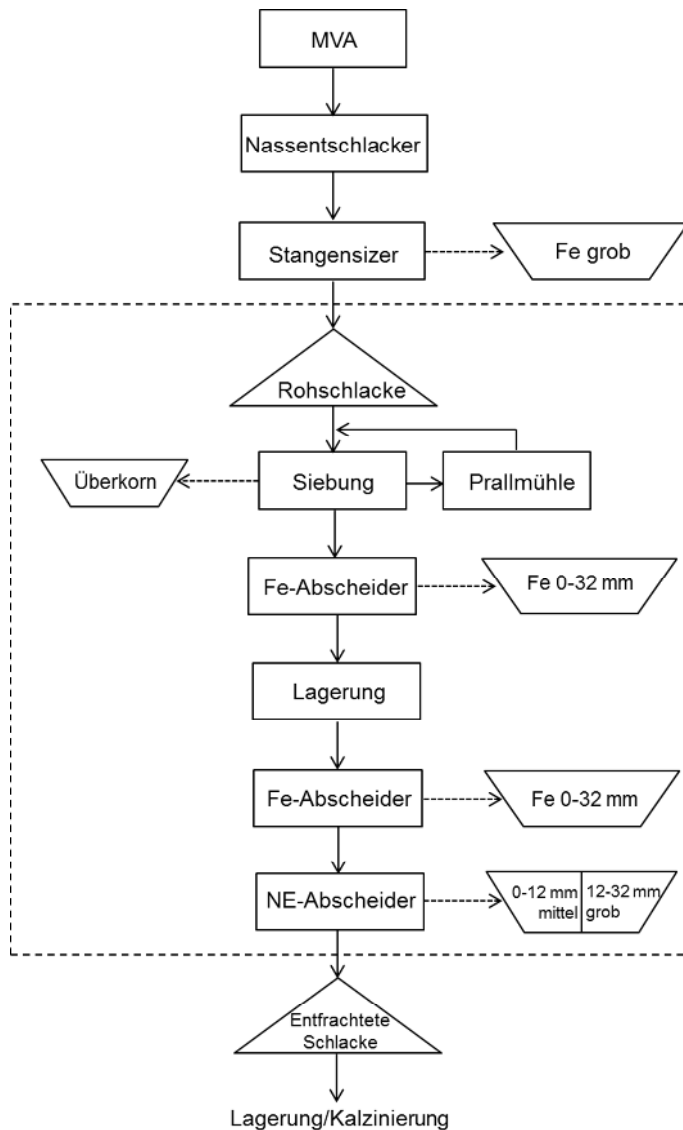


Abbildung 10: Ablauf einer exemplarischen Asche-/Schlackenaufbereitungsanlage nach dem SdT, Abbildung [Hoffmann 2016].

Die Ergebnisse der Recherchen und die Definition des SdT als Vergleichsgrundlage für die vorliegende Arbeit finden sich im Anhang in Tabelle 16.

b.2.3.7. Sachbilanz

Datenerhebung

Zur Durchführung der Sachbilanz innerhalb der festgelegten Systemgrenzen wurden Daten bei den beteiligten Projektpartnern abgefragt. Die Datenabfrage umfasste die folgenden Parameter:

- Betriebsmittel:
Zu den Betriebsmitteln zählen Maschinendaten (Gewicht, Treibstoff-/ Stromverbrauch, Kapazität). Die Angaben zu Betriebsmitteln der

TARTECH-Anlage wurden vom Betreiber zur Verfügung gestellt [Gronholz 2015].

- Massenbilanzen und Metallgehalte:
Massenbilanzen und Metallgehalte der Aschen S1, S2, S3, MVB-R, MVB-V und MVR-R, die mit der TARTECH-Anlage aufbereitet wurden, sind auf Daten der Technischen Universität Hamburg (TUHH) zurückzuführen [Enzner 2015]. Die Bereitstellung der Daten für die Schlacke D-S geht auf den Betreiber der TARTECH-Anlage und Analysen des Fresenius Instituts im Auftrag der Berliner Stadtreinigung zurück. Die Daten hinsichtlich der EAG-Asche wurden von Fraunhofer UMSICHT ermittelt. Die Elementaranalysen der einzelnen Fraktionen wurden im Auftrag des Fraunhofer Institut UMSICHT vom Hygiene-Institut des Ruhrgebiets durchgeführt. Für die gewählte SdT-Anlage sind durchschnittliche Rückgewinnungseffizienzen angegeben. Zudem wurde über eine Literaturrecherche eine durchschnittliche Zusammensetzung von MVA-Aschen/Schlacken in Deutschland definiert. Ziel der Datenerhebung war eine möglichst detaillierte Abbildung der Aufbereitung verschiedener Aschen/Schlacken in den TARTECH-Linien und in der Referenzanlage.
- Bezüglich der in der TARTECH-Anlage durchgeführten Versuche standen jedoch keine Daten zur Zusammensetzung der Inputaschen zur Verfügung, weshalb keine ashespezifischen Rückgewinnungseffizienzen ermittelt werden konnten. Der direkte Vergleich der beiden Anlagentypen war in Bezug auf die Effizienz der Metallrückgewinnung deshalb nicht möglich. Die Aufbereitung nach dem SdT wurde dennoch in die Wirkungsabschätzung aufgenommen. Dazu wurde eine durchschnittlich zusammengesetzte Asche auf der Grundlage von Literaturangaben definiert und mit den durchschnittlichen Effizienzangaben der SdT-Anlage verrechnet.
- Daten über spezifische Umweltwirkungen:
Die länderspezifischen Datensätze der Energiebereitstellung sowie Umweltwirkungen in Verbindung mit Produktion und Verarbeitung von Metallen aus primären und sekundären Quellen wurden der Datenbank ecoinvent V.3.1 entnommen. Die in dieser Betrachtung ausgewählten Datensätze für die Energieversorgung beziehen sich auf den Produktionsstandort Deutschland („deutscher Energiemix“).

Modellierung

Die Modellierung bildet die Schlackenaufbereitung von jeweils acht verschiedenen Schlacken in der TARTECH-Anlage und einer nach Literaturangaben definierten, durchschnittlichen Schlacke in einer Anlage nach dem SdT ab. Die Erstellung des Modells erfolgte mit Hilfe der GaBi-Software. Für die Berechnung der Gutschriften durch die Rückgewinnung von Metallfraktionen aus den in Tabelle 8 aufgeführten Aschen/Schlacken wurden die Datenbankwerte aus ecoinvent 3.1 gemäß Tabelle 10 verwendet.

Tabelle 10: Auflistung der für die Berechnung der Gutschriften verwendeten Datensätze aus ecoinvent 3.1.

Metall	Qualität	Datensatz ecoinvent 3.1
Cu	Blisterkupfer	RER: copper production, blister-copper
Al	Gusslegierung	GLO: market for aluminium, cast alloy
Fe	Stahl unlegiert	RER: steel production, converter, unalloyed
VA	Chrom (18 %) Nickel (8 %) legierter Stahl	RER: steel production, converter, chromium steel 18/8
Ag		GLO: market for silver
Ni	99,5 % Nickel	GLO: market for nickel, 99,5 %
Pb		GLO: market for lead
Sb		GLO: market for antimony
Se		GLO: market for selenium
Sn		GLO: market for tin
Te		GLO: market for tellurium
Zn		GLO: market for Zink

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen exemplarisch die Modellierung der Aufbereitung der Asche MVB-R in der α - und β -Linie. Abbildung 13 zeigt die Modellierung der Aufbereitungsanlage nach dem SdT.

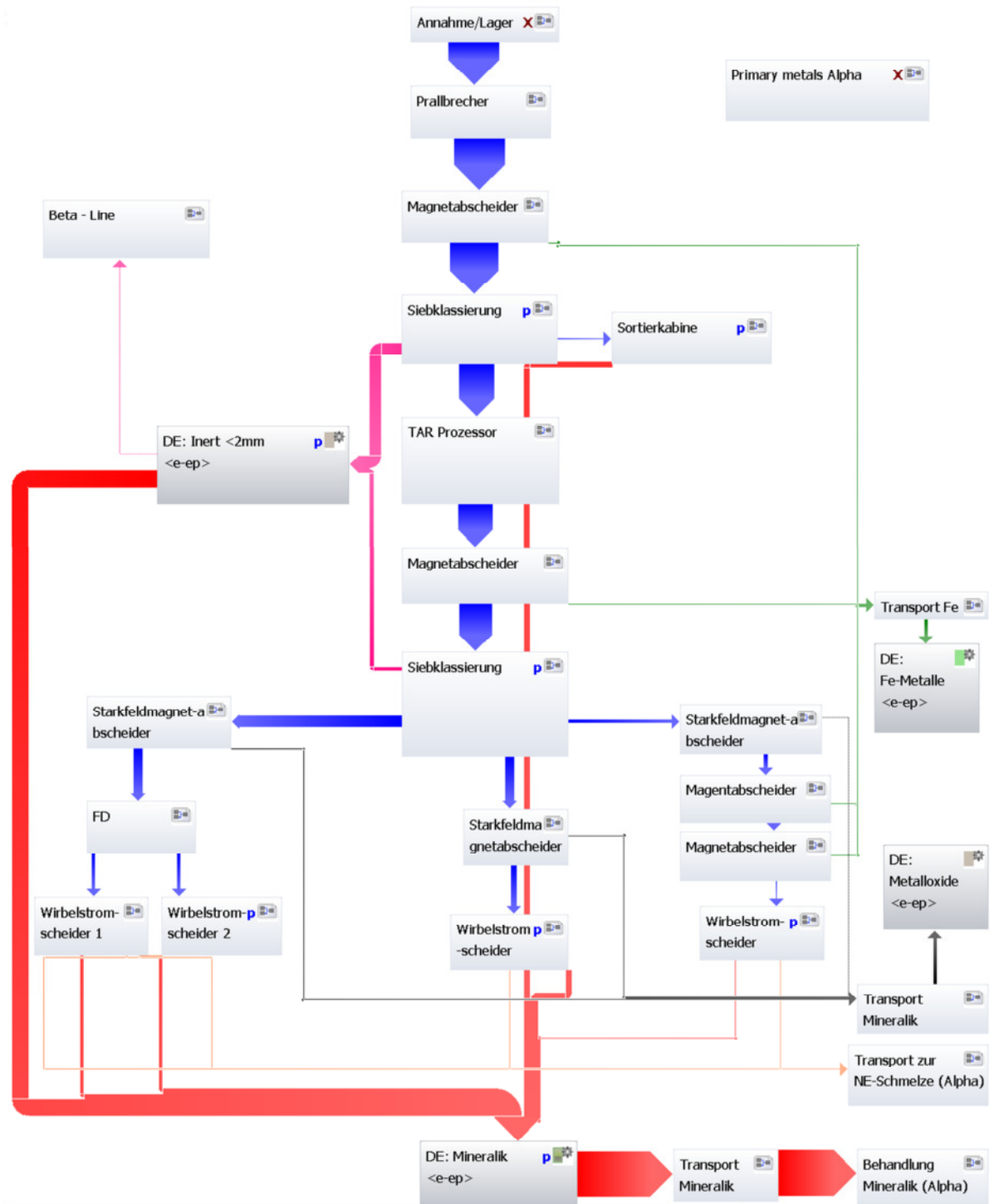


Abbildung 11: Modellierung der Aufbereitung der Asche MVB-R in der α -Linie.

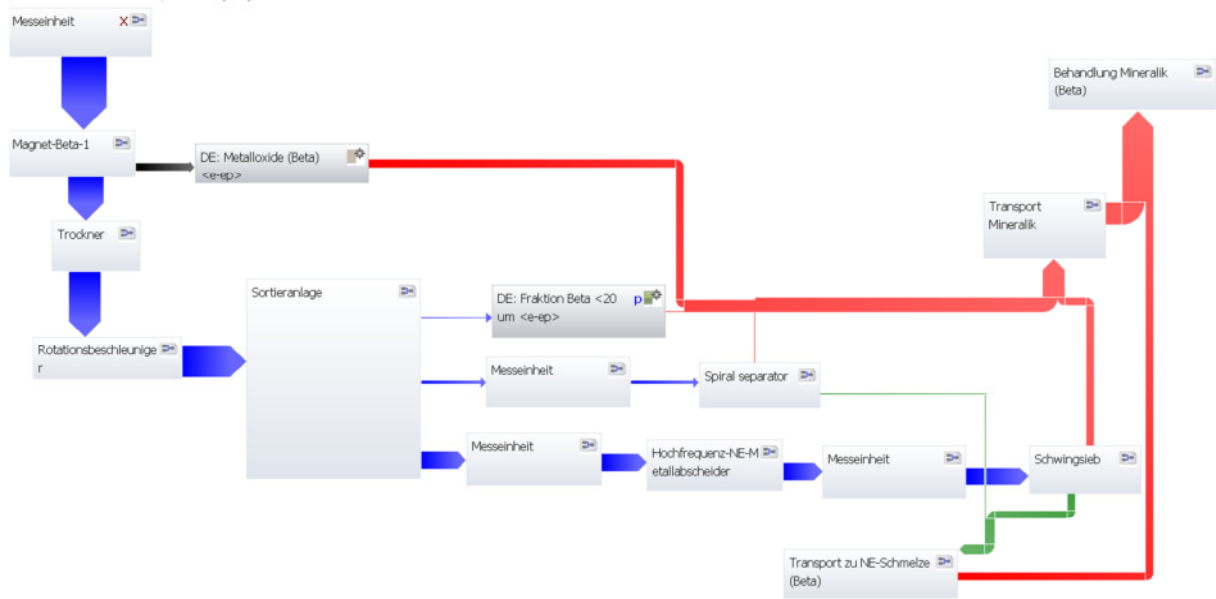


Abbildung 12: Modellierung der Aufbereitung der Asche MVB-R in der β -Linie.

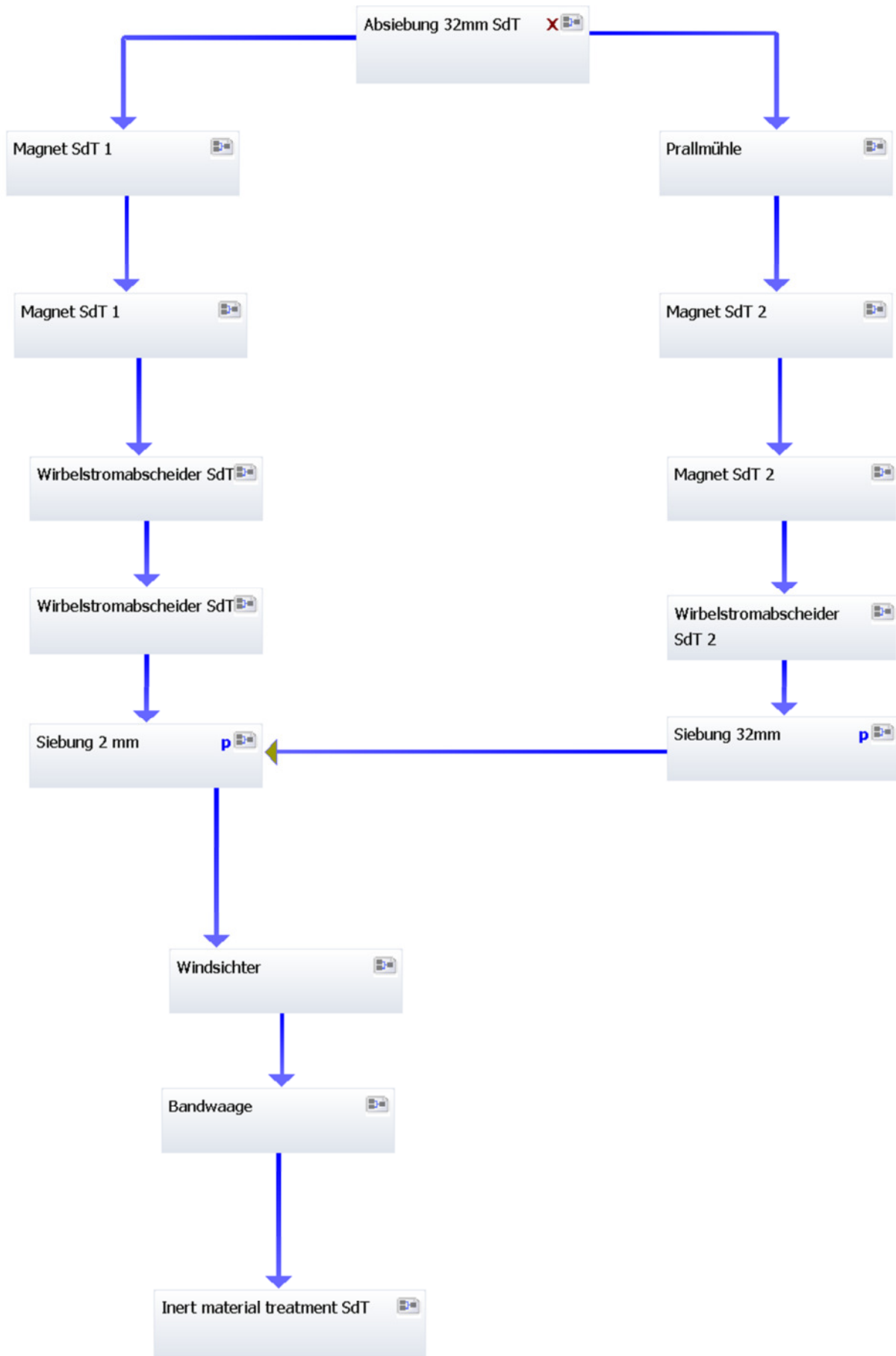


Abbildung 13: Modellierung einer exemplarischen Anlage nach dem SdT.

b.2.3.8. Methoden der Wirkungsabschätzung

Mit den Daten der Sachbilanz wurden in der Wirkungsabschätzung Umweltwirkungen auf Ebene verschiedener Wirkungsindikatoren untersucht. In der vorliegenden Wirkungsabschätzung wurde eine vom Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) der Universität Leiden entwickelte Methode angewendet. Die Wirkungsabschätzung mit Hilfe der CML-Methode erfolgte anhand der in Tabelle 11 dargestellten Wirkungsindikatoren.

Tabelle 11: Gewählte Wirkungsindikatoren gemäß CML [Guinée 1995].

Wirkungsindikator	Bemerkung	Bezugseinheit
Treibhauspotential 100 Jahre (GWP)	Erwärmung der Erdatmosphäre durch die Reflexion von Wärmestrahlung durch Gase in derselben	kg CO ₂ -Äqv.
Eutrophierungspotential (EP)	Überdüngung von Böden und Gewässern	kg Phosphat Äqv.
Photochemisches Oxidationspotential (POCP)	Bodennahe Ozonbildung durch Photooxidantien Sommersmog	kg Ethen-Äqv.
Abiotic Depletion Potential elementar (ADP(e))	Maß des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs	kg Sb-Äqv.
Humantoxizitätspotential (HP)	Maß für Giftwirkung toxischer Substanzen auf den Menschen	kg DCB-Äqv.
Versauerungspotential (AcP)	Klassifizierung von Vorläufersubstanzen für Säuren	kg SO ₂ -Äqv.
Ozonabbaupotential (ODP)	Maß für den rel. Effekt des Abbaus der Ozonschicht durch einen Stoff (z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe)	kg R11-Äqv.

b.2.4. Ergebnisse

b.2.4.1. Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen setzten sich aus einer Vielzahl von Parametern zusammen. Um die Ergebnisse übersichtlich darzustellen, wurden die Umweltauswirkungen mehrerer Prozesse für einige Abbildungen in die Kategorien „Betriebsmittel“, „Transport“, „Gutschriften“ und „Gesamt“ zusammengefasst. Die Zuordnung der Prozesse zu den jeweiligen Kategorien ist in Tabelle 5 beschrieben.

Tabelle 12: Erklärung der Kategorien Betriebsmittel, Transport, Gutschrift und Gesamt.

Betriebsmittel	Transport	Gutschrift	Gesamt
-Treibstoffverbrauch - Stromverbrauch - Herstellung verwendeter Anlagen - Verwertung der entfrachteten Fraktionen	-Transporte während der Aufbereitung -Transporte der entfrachteten Fraktionen	Setzt sich aus den eingesparten Umweltaus- wirkungen der zurückgewon- nenen Metalle zusammen	Summe aller Auswirkungen: Σ Technische Betriebsdaten, Transport, Gutschrift der Metalle)

b.2.4.2. Szenario: Rohaschen α -Linie

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einer Aufbereitung der Rohaschen S1, S2, S3, MVR-R und MVB-R in der α -Linie der TARTECH-Anlage dargestellt. Die Summen der emittierten und durch Metallrückgewinnung eingesparten Schadstoff-Äquivalente („Gutschriften“) werden jeweils mit Hilfe eines weißen Saldo-Balkens veranschaulicht.

Abbildung 14 bis Abbildung 20 zeigen, dass durch die Rückgewinnung von Metallen aus Aschen deutlich mehr Emissionen eingespart werden als durch den Betrieb der Aufbereitungsanlage emittiert werden. Auf Ebene der Wirkungskategorien GWP, ODP und POCP weisen die Aschen S3 und S2 im Saldo die meisten Einsparungen an Emissionen auf. Dabei ist zu beachten, dass der Betrag der Gutschriften stark von der Aschenzusammensetzung der Aschen/Schlacken abhängt. So enthalten beispielsweise die Aschen S1, S2 und S3 Grobschrott, die Aschen MVR-R und MVB-R sind hingegen von Grobschrott befreit. Der größte Teil der Gutschriften entfällt bei allen Aschen auf Eisen und Aluminium.

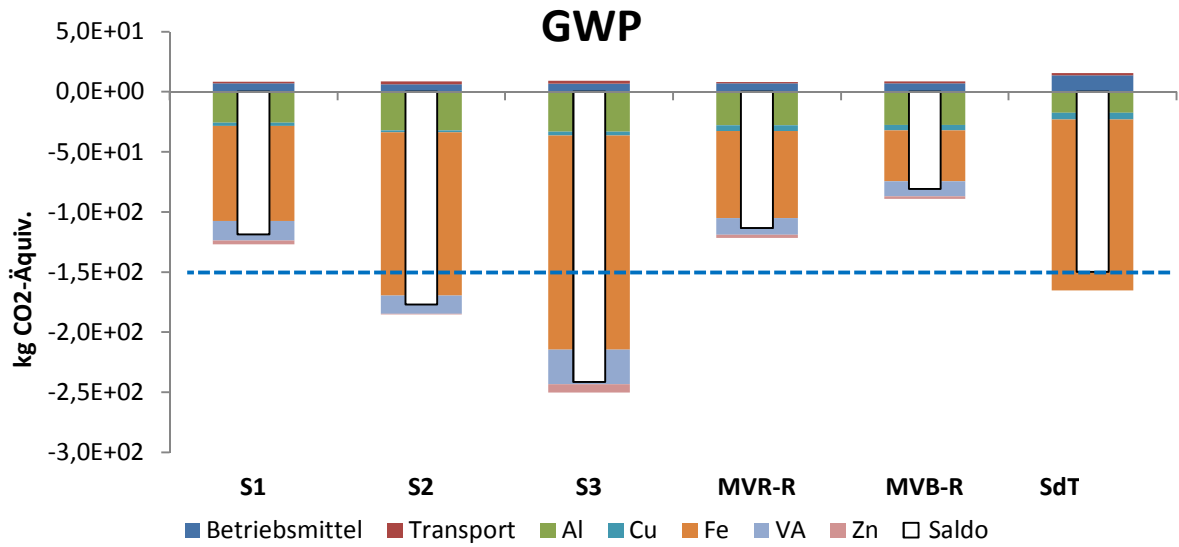


Abbildung 14: Szenario Rohaschen (α-Linie) – Treibhauspotenzial (GWP).

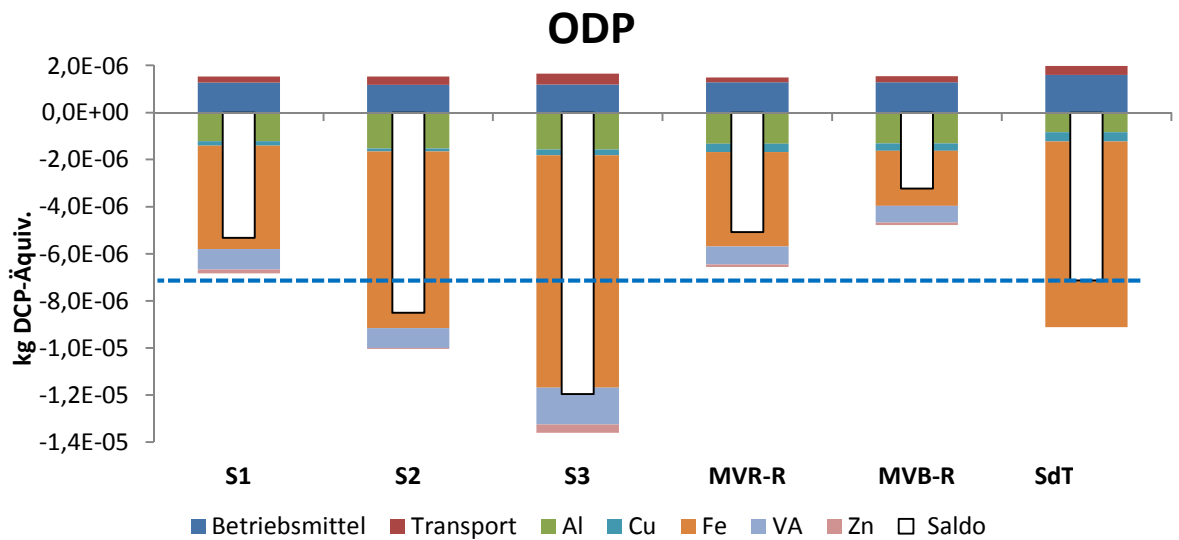


Abbildung 15: Szenario Rohaschen (α-Linie) – Ozonabbaupotenzial (ODP).

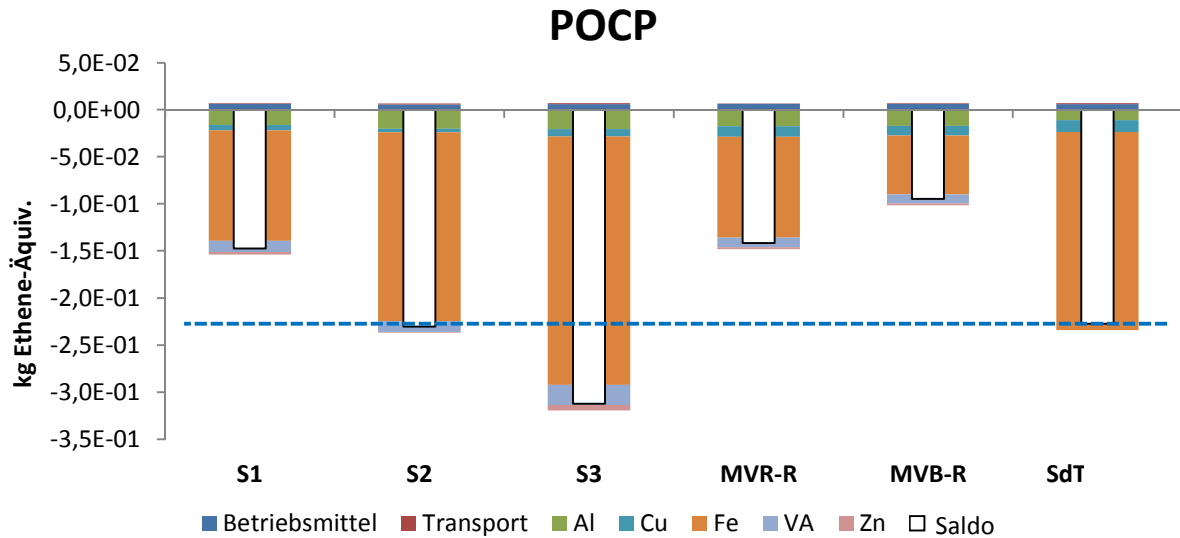


Abbildung 16: Szenario Rohaschen (α-Linie) - photochemische Oxidationspotenzial (POCP).

In Abbildung 17 enthält die Wirkungsabschätzung für das Humantoxizitätspotenzial. Der größte Teil der Gutschriften entfällt bei den in der TARTECH-Anlage aufbereiteten Aschen auf die Rückgewinnung von VA-Stahl. Für das Modell SdT wurde aufgrund der Rechercheergebnisse definiert, dass VA-Stahl nicht separiert wird. Gutschriften entfallen deshalb zum größten Teil auf Kupfer und Eisen.

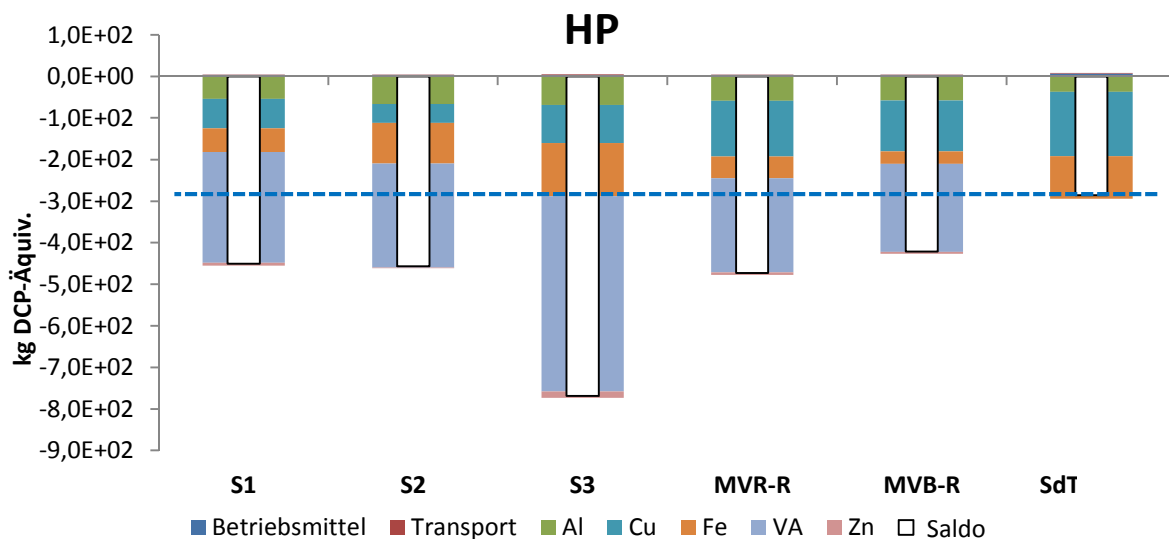


Abbildung 17: Szenario Rohaschen (α-Linie) – Humantoxizitätspotenzial (HP).

In Abbildung 18 und Abbildung 19 ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung bei Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial Ähnlichkeiten zur Wirkungsabschätzung des Treibhauspotenzials aufweisen. Den größten Anteil an den Gutschriften haben beim Versauerungspotenzial die Metalle Eisen, Aluminium und Kupfer, beim Eutrophierungspotenzial sind vor allem die Eisen- und Kupfergehalte der verschiedenen Aschen ausschlaggebend. Im Fall des abiotischen Ressourcenverbrauchs (ADP(e)) (Abbildung 20) bewirken Zink, Kupfer und Aluminium den größten Teil der Gutschriften.

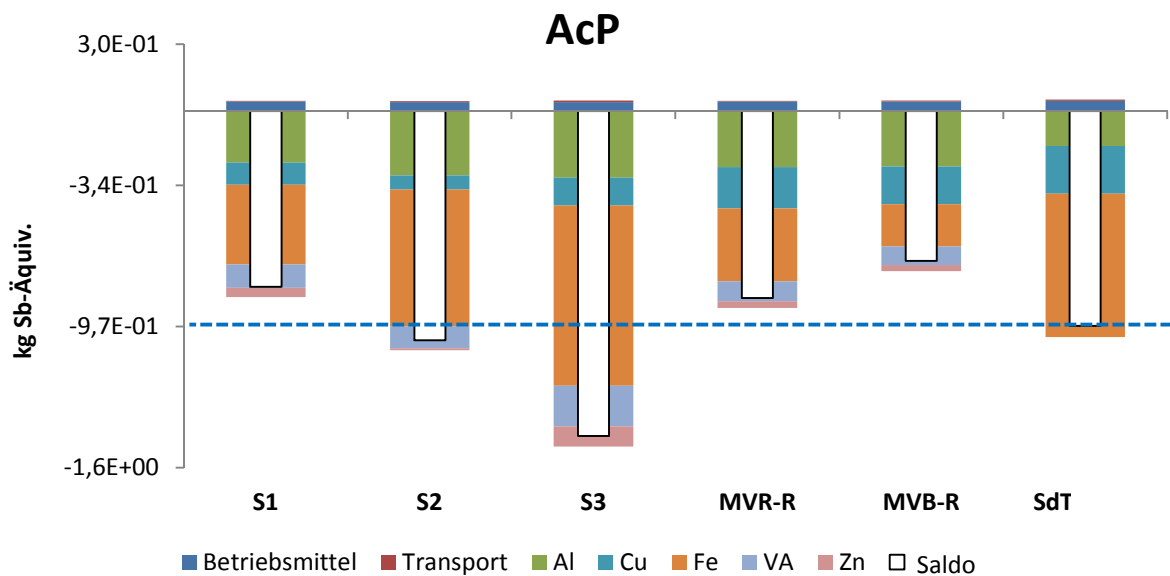


Abbildung 18: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Versauerungspotenzial (AcP).

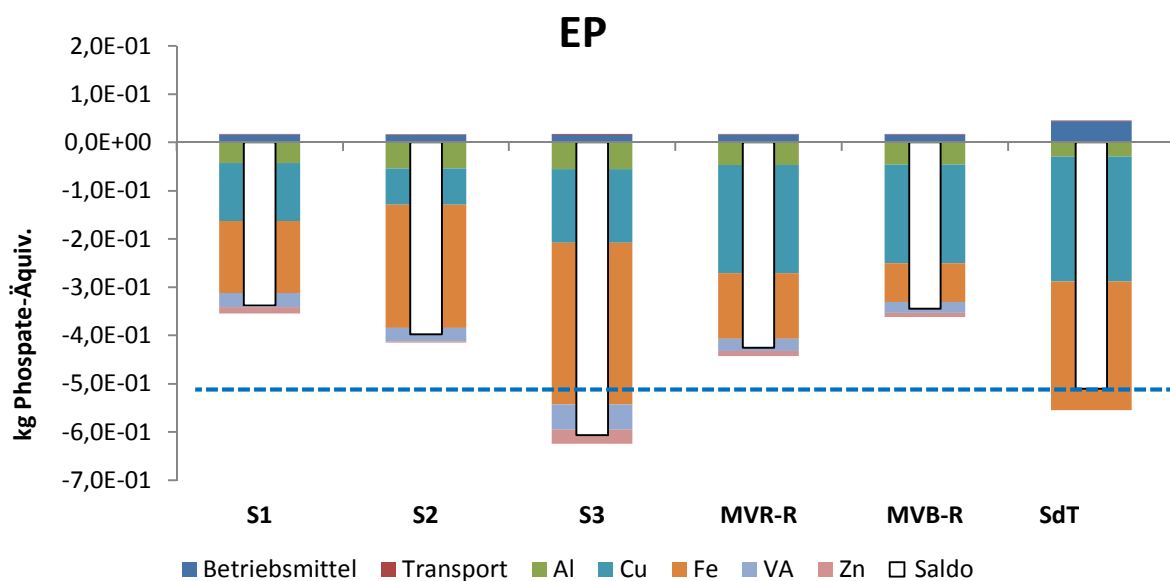


Abbildung 19: Szenario Rohaschen (α -Linie) – Eutrophierungspotenzial (EP).

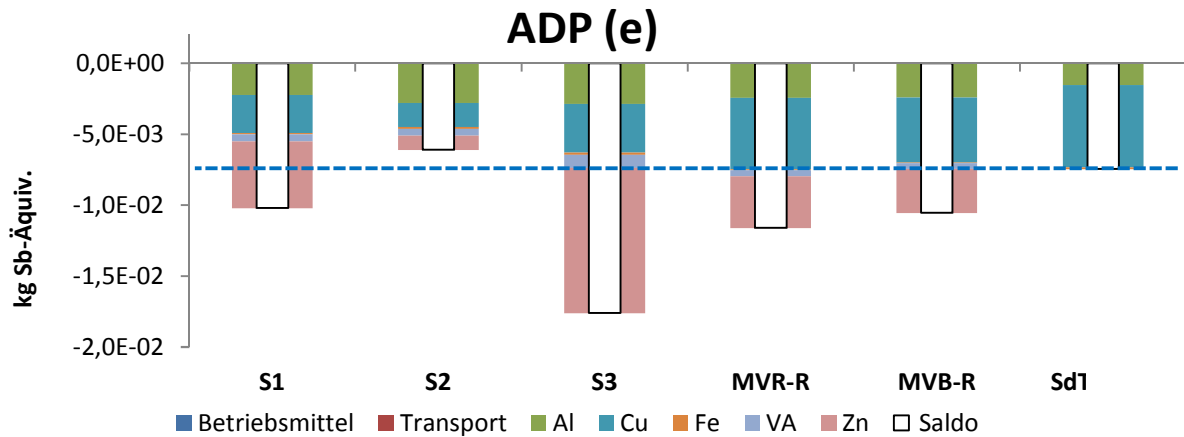


Abbildung 20: Szenario Rohaschen (α -Linie) - abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).

b.2.4.3. Szenario: Rohasche - „ α “- versus „ $\alpha + \beta$ “-Behandlung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Aufbereitung der Asche MVB-R näher betrachtet. Dabei werden die Ergebnisse zur Aufbereitung in der α -Linie (MVB-R(A)) mit einer Aufbereitung in beiden Linien (α - und β -Linie, MVB-R(A+B)) in den Abbildung 21 bis Abbildung 23 gegenübergestellt. Durch den Einsatz in der β -Linie wird aus der Fraktion < 2 mm zusätzliches Cu zurückgewonnen. Das Vergleichsszenario dient somit der Untersuchung der Auswirkungen einer zusätzlichen Aufbereitung mit Hilfe der β -Linie. Deshalb werden die Gutschriften in den folgenden Abbildungen nach α - und β -Linie aufgegliedert. Abbildung 21 zeigt die Auswirkungen der beiden Aufbereitungsschritte auf das Treibhauspotenzial. Es ist zu erkennen, dass die Metallrückgewinnung der α -Linie den deutlich größten Anteil an den Gutschriften einnimmt. Die Gutschrift für die zusätzliche Rückgewinnung von Kupfer mit Hilfe der β -Linie fällt relativ gering aus. Der gesteigerte Aufwand ist jedoch mit zusätzlichen Belastungen durch den Verbrauch von Betriebsmitteln und das erhöhte Transportaufkommen verbunden. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigen, dass durch die Metallrückgewinnung in der α -Linie etwa 11 mal so viel Emissionen eingespart werden als durch den Betrieb der Anlage emittiert werden. Durch eine zusätzliche Aufbereitung in der β -Linie sinkt dieser Wert insgesamt auf den Faktor 7. Die Zunahme des Treibhauspotenzials kann in diesem Fall folglich nicht durch die Gutschriften für den zusätzlichen Metallaustrag ausgeglichen werden. Im Saldo sind die Gutschriften für die Aufbereitung in der α -Linie und eine Aufbereitung in α - und β -Linie näherungsweise gleich. Letzteres verhält sich ähnlich bei der Wirkungskategorie Ozonabbaupotenzial (Abbildung 22).

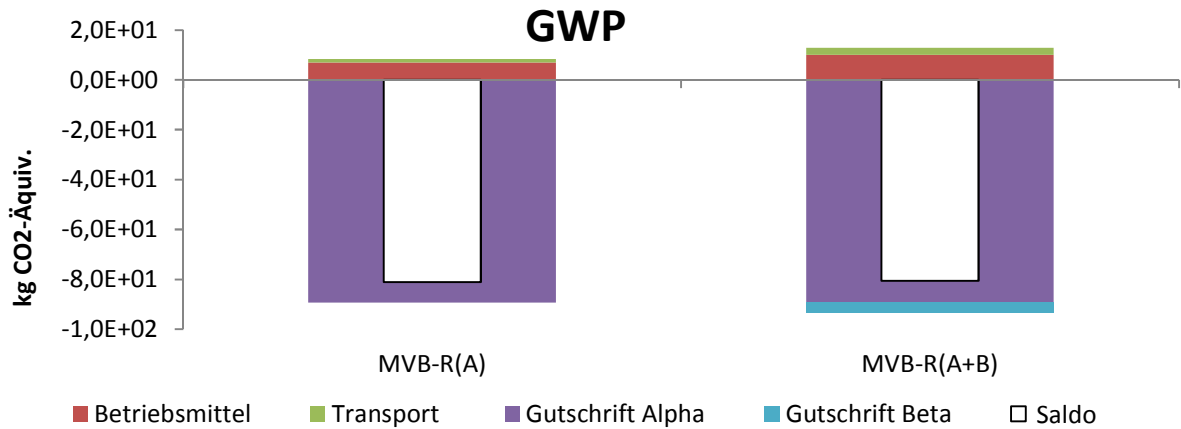


Abbildung 21: Szenario Rohasche („α“- versus „α + β“-Behandlung) – Treibhauspotenzial (GWP).

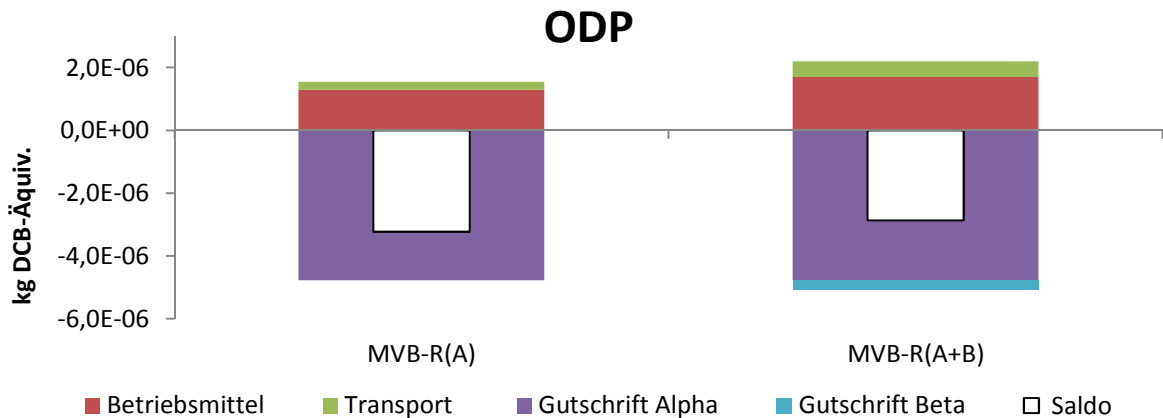


Abbildung 22: Szenario Rohasche („α“- versus „α + β“-Behandlung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).

In den Wirkungskategorien ADP(e), AP, EP, HP und POCP (siehe Tabelle 11) ergeben sich, anders als bei GWP und ODP, deutlich höhere Gutschriften durch die gesteigerte Metallausbringung mit Hilfe der β -Linie. Die höchsten Einsparung durch eine weiterführende Aufbereitung der Fraktion < 2 mm wurde dabei in der Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial festgestellt (Abbildung 23).

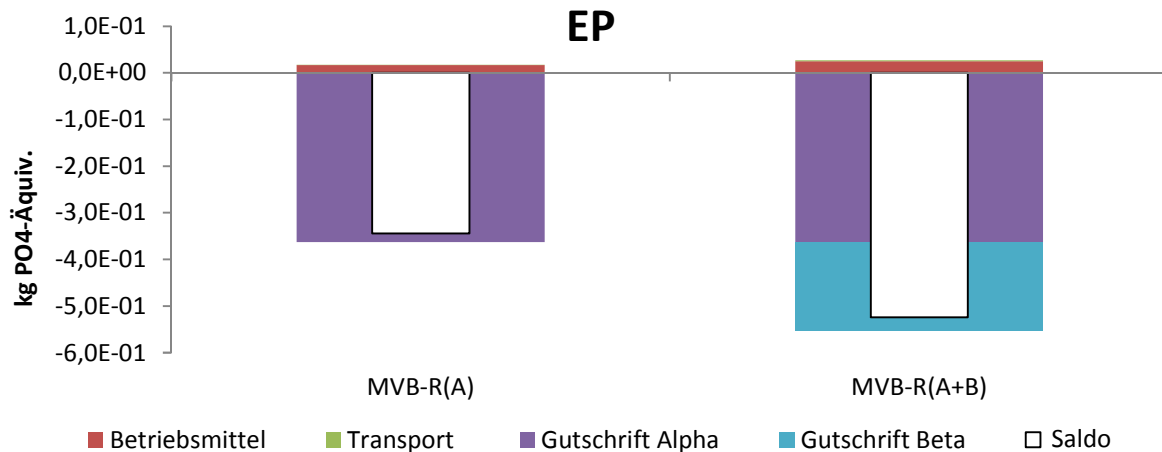


Abbildung 23: Szenario Rohasche („α“- versus „α + β“-Behandlung) – Eutrophierungspotenzial (EP).

Tabelle 13: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von MVB-R(A) und MVB-R(A+B).

		MVB-R	MVB-R (A+B)
ADP	kg Sb-Äquiv	-1,1E-02	-1,5E-02
AP	Kg SO ₂ -Äquiv	-6,7E-01	-8,1E-01
EP	kg PO ₄ -Äquiv.	-3,4E-01	-5,2E-01
GWP	kg CO ₂ -Äquiv	-8,1E+01	-8,1E+01
HP	kg DCB-Äquiv.	-4,2E+02	-5,3E+02
ODP	kg R11-Äquiv.	-3,2E-06	-2,9E-06
POCP	kg Ethen-Äquiv.	-9,5E-02	-1,0E-01

b.2.4.4. Szenario: vorbehandelte Asche/Schlacke - Aufbereitung α – Linie versus Deponierung

Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke - Aufbereitung α – Linie versus Deponierung untersucht die Umweltwirkungen der Aufbereitung von bereits entfrachteten Aschen/Schlacken (MVB-V und D-S) mittels der α-Linie (Abbildung 24 bis Abbildung 29). Bei der Schlacke D-S handelt es sich um eine bereits vorbehandelte, abgelagerte und rückgebaute Schlacke (Deponieschlacke). Zum Vergleich verdeutlicht das Szenario außerdem die Wirkungsabschätzung der Aufbereitung einer nicht vorbehandelten Rohasche (MVB-R). Es zeigt sich auf Ebene aller untersuchten Wirkungskategorien, dass die Aufbereitung der beiden vorbehandelten Aschen/Schlacken gegenüber einer Deponierung mit ökologischen Vorteilen verbunden ist. Der Betrieb der α-Linie ist zwar gegenüber der Deponierung mit zusätzlichen Emissionen verbunden, die jedoch durch die Gutschriften der Metalle aufgewogen werden und im Saldo zu einer Einsparung führen. Einzige Ausnahme bildet hierbei das Ozonabbaupotenzial (Abbildung 27), das im Saldo auch bei der Aufbereitung der vorbehandelten Aschen Umweltbelastungen ausweist. Diese sind jedoch in ihrem Betrag geringer als die aus der Deponierung erwachsenden Belastungen. Die Ergebnisse machen zudem

deutlich, dass die Gutschriften für Metallrückgewinnung aus Rohaschen auf Ebene aller Wirkungskategorien deutlich höher sind als jene aus bereits vorbehandelten Aschen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die vorbehandelten Aschen einen geringeren Metallgehalt aufweisen als Rohasche.

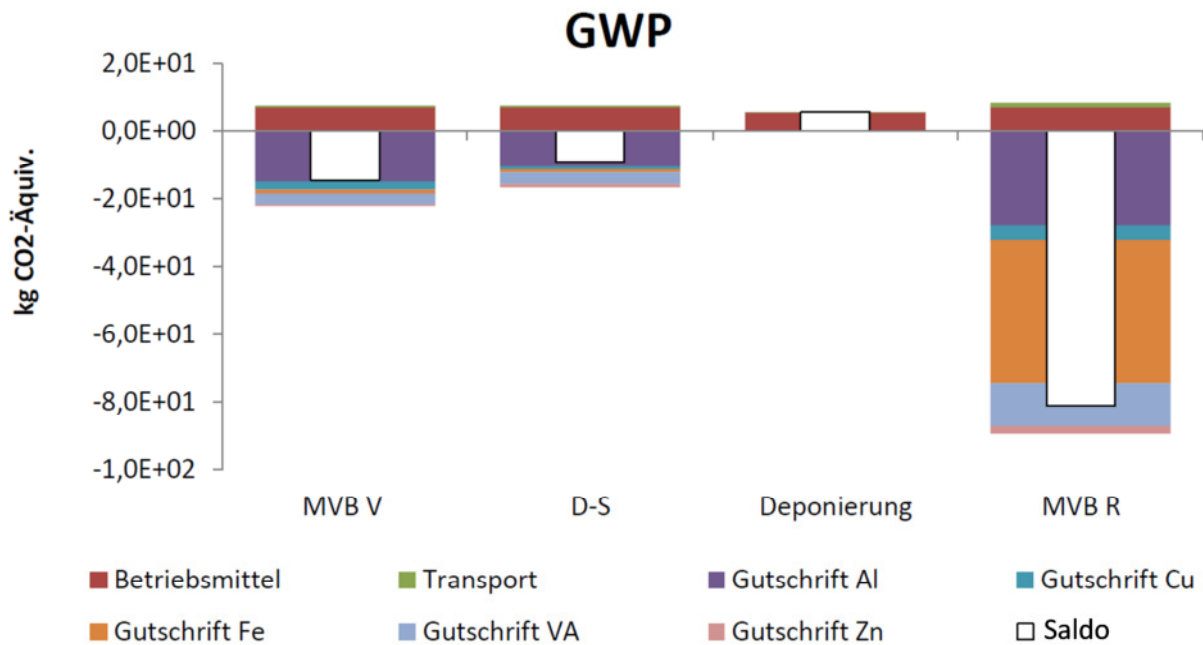


Abbildung 24: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Treibhauspotenzial (GWP).

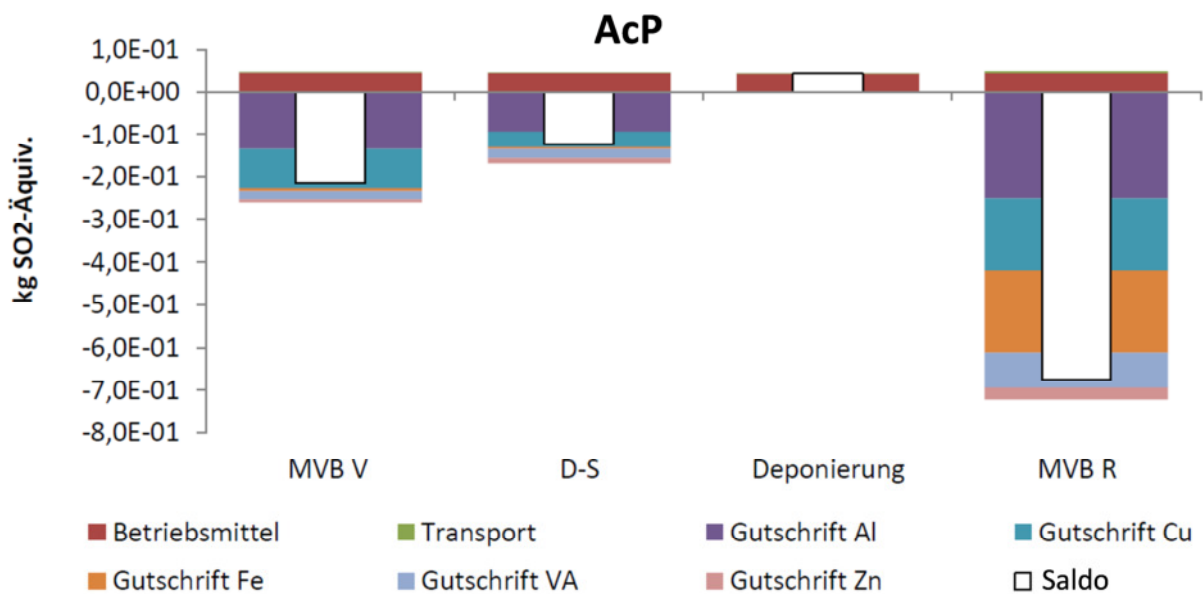


Abbildung 25: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Versauerungspotenzial (AcP).

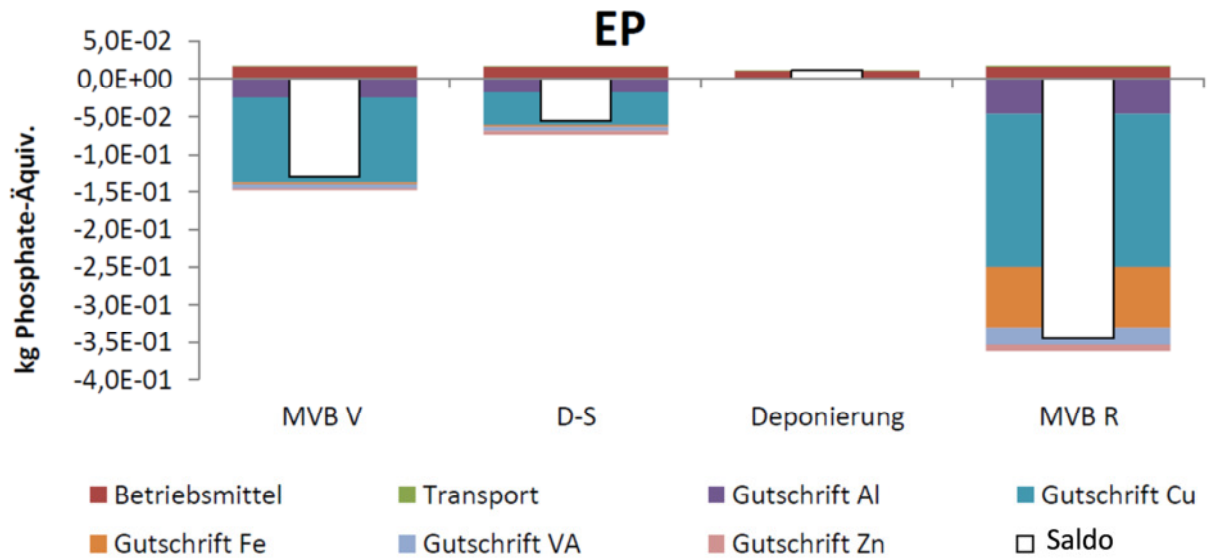


Abbildung 26: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Eutrophierungspotenzial (EP).

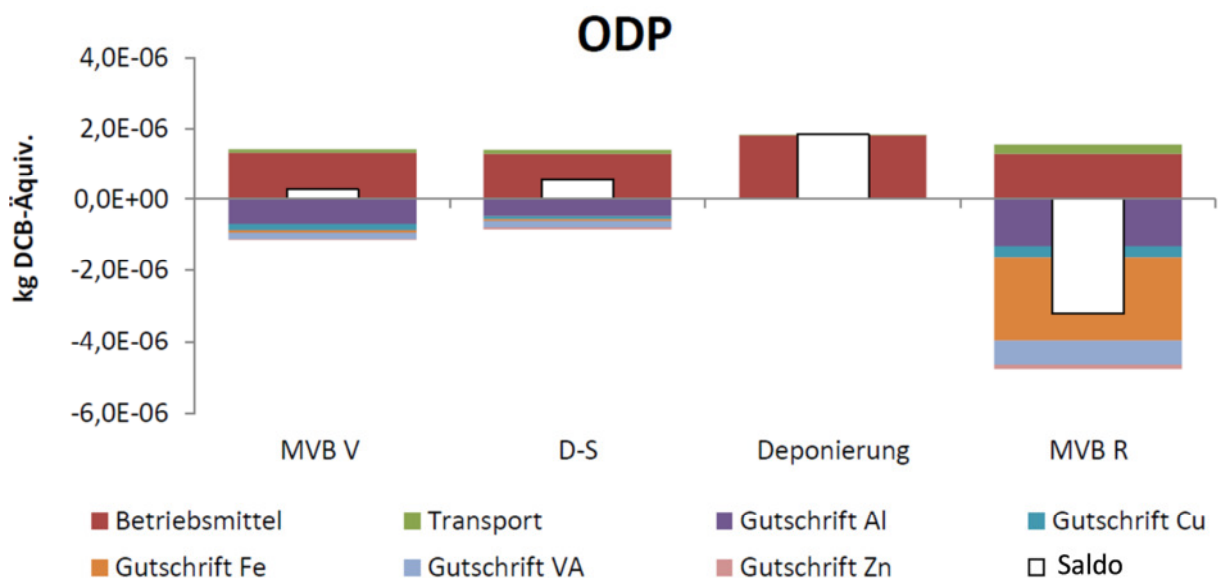


Abbildung 27: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).

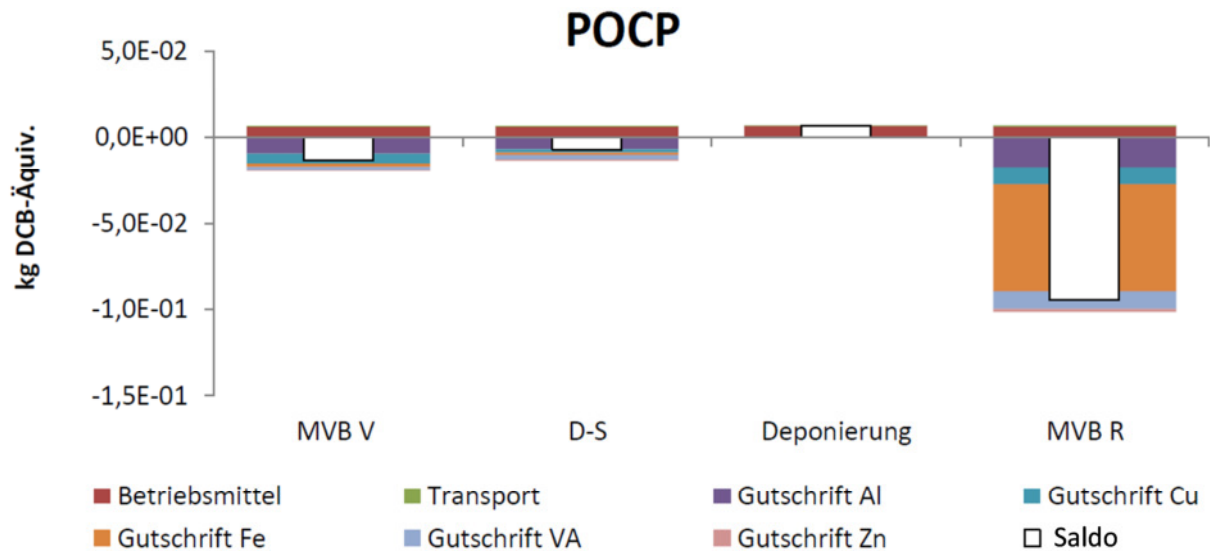


Abbildung 28: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) - photochemisches Oxidationspotenzial (POCP).

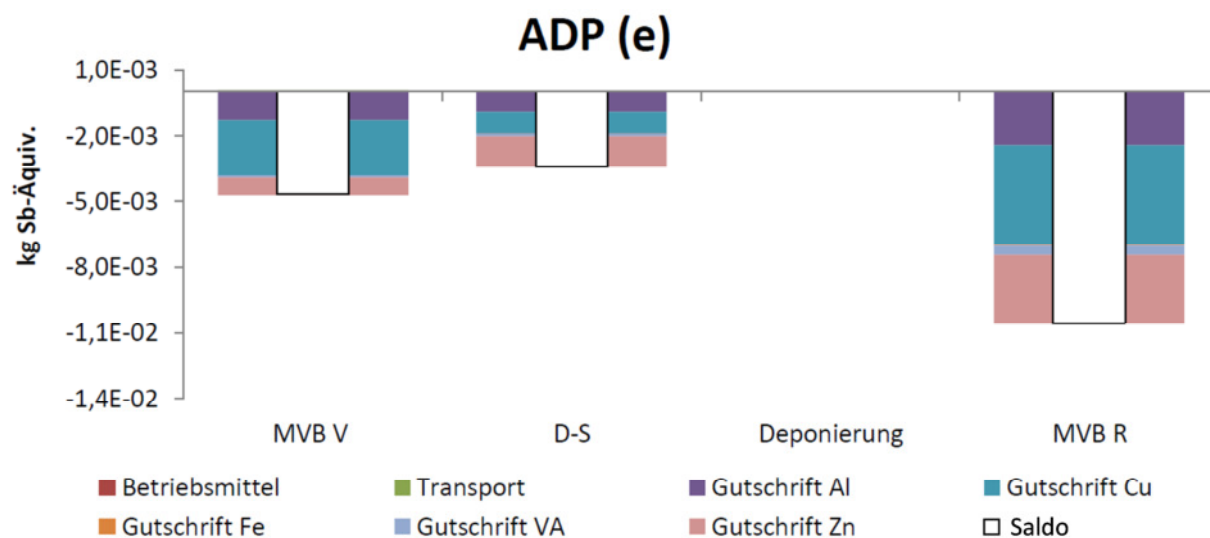


Abbildung 29: Szenario vorbehandelte Asche/Schlacke (Aufbereitung (α -Linie) versus Deponierung) - abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).

b.2.4.5. Szenario: EAG-Asche - Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung

Die Ergebnisse dieses Szenarios weisen auf Ebene aller Wirkungskategorien ökologische Vorteile einer Aufbereitung von EAG-Asche im TARTECH-Prozess (α - und β -Linie) gegenüber der Deponierung aus. Die Aufbereitung ist dabei im Saldo durchgehend mit der Einsparung von Emissionen verbunden, während die Deponierung ohne Metallrückgewinnung im Saldo jeweils Emissionen hervorruft. Da für die EAG-Asche eine größere Anzahl an Metalle berücksichtigt wurde (siehe auch Kapitel II.b.2.3.4), werden die Gutschriften der einzelnen Metallfraktionen

aus Gründen der Überschaubarkeit in den Abbildung 30 bis Abbildung 33 aggregiert dargestellt („Gutschrift Metallrückgewinnung“).

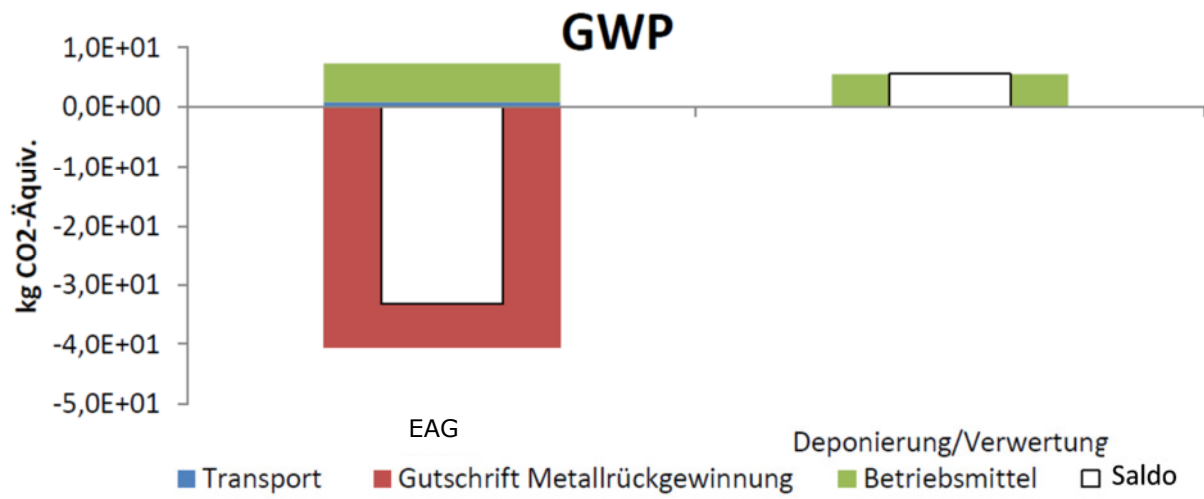


Abbildung 30: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α- und β-Linie versus Deponierung) – Treibhauspotenzial (GWP).

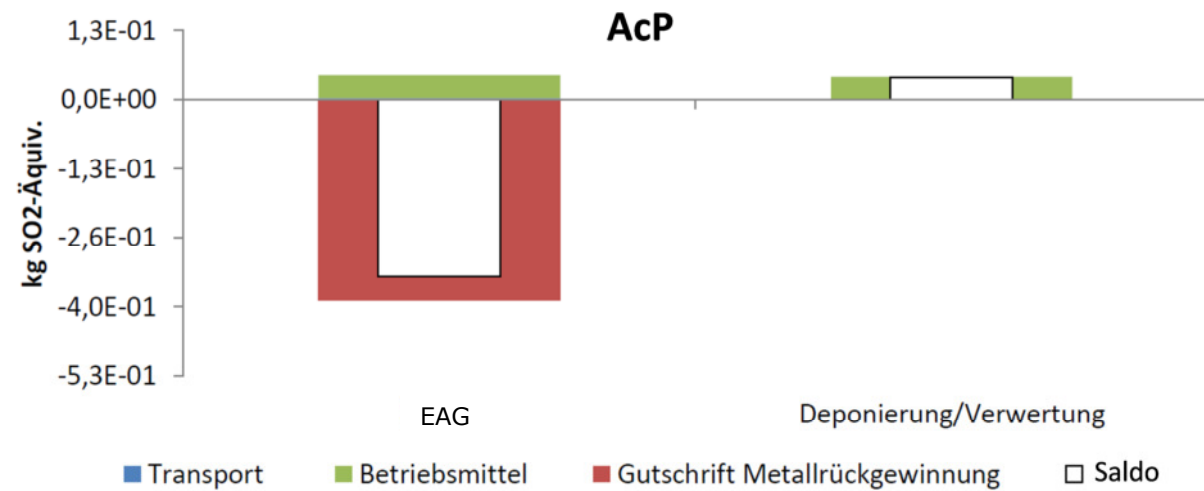


Abbildung 31: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α- und β-Linie versus Deponierung) – Versauerungspotenzial (AcP).

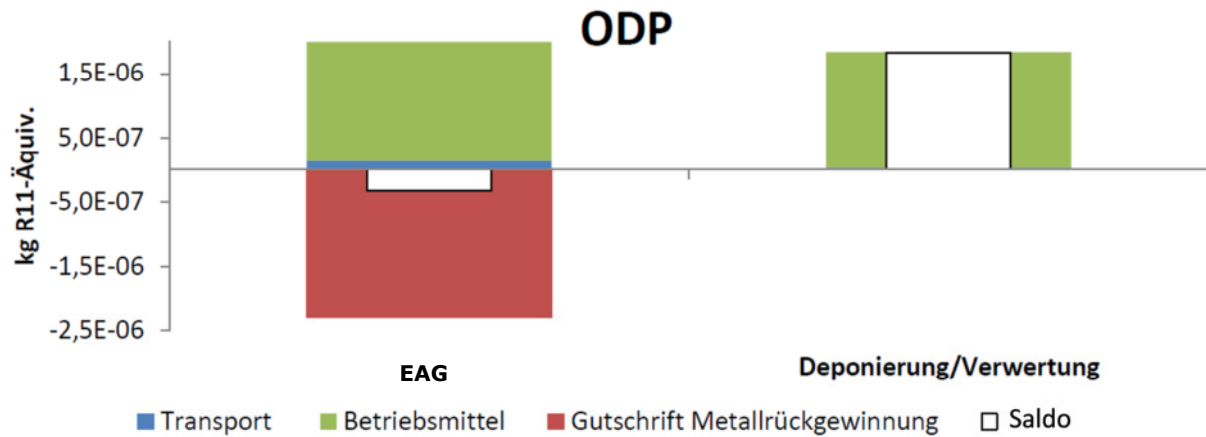


Abbildung 32: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) – Ozonabbaupotenzial (ODP).

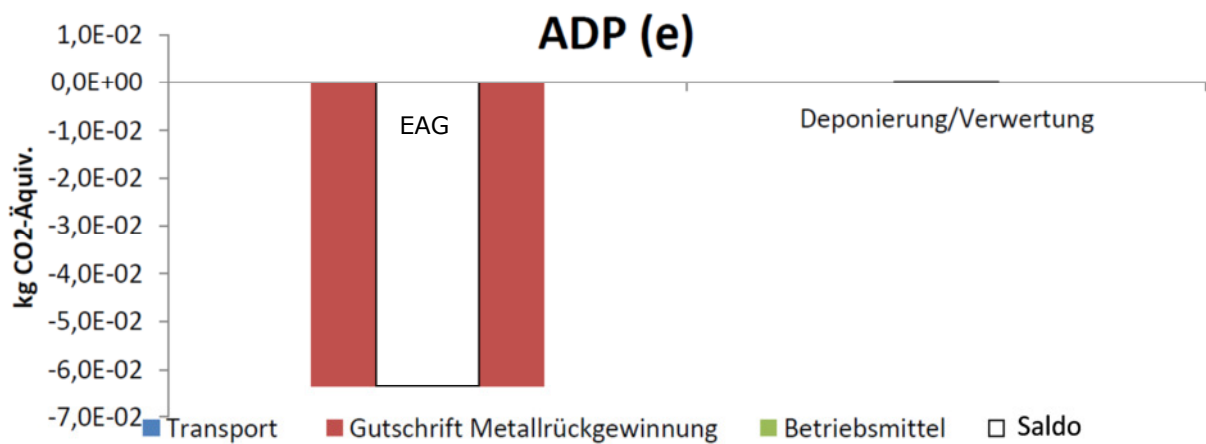


Abbildung 33: Szenario EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung) – abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP(e)).

Abbildung 34 veranschaulicht zusammenfassend, welche Metalle auf Ebene der betrachteten Wirkungskategorien den höchsten Anteil an den Gutschriften aufweisen. In Bezug auf Treibhaus-, Ozonabbau- und photochemisches Oxidationspotenzial ist der Gehalt an zurückgewonnenem Silber für den Großteil der Gutschriften verantwortlich. Bei Eutrophierung und Humantoxizität spielt die Rückgewinnung von Kupfer eine entscheidende Rolle, bei Versauerung bewirken Kupfer und Silber gemeinsam in etwa die höchsten Gutschriften. Beim abiotischen Ressourcenverbrauch bewirkt hingegen der Austrag von Antimon den entscheidenden ökologischen Vorteil.

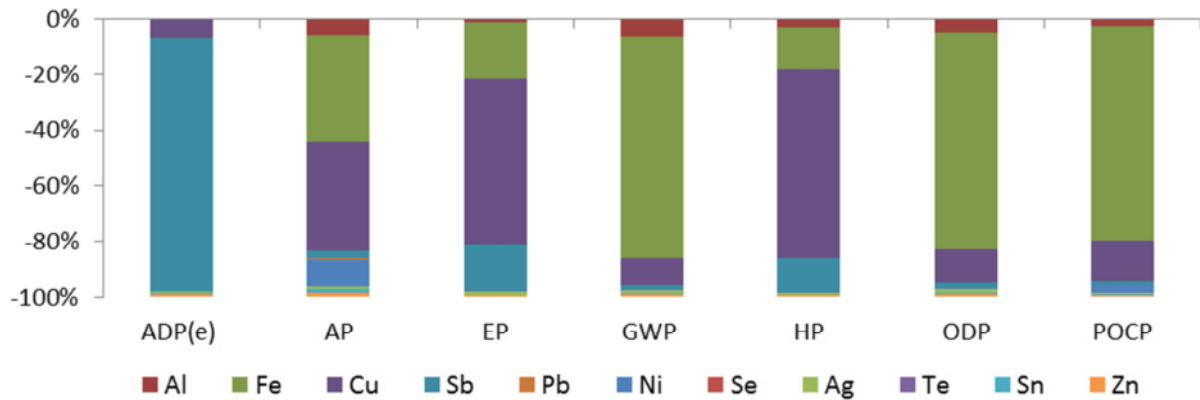


Abbildung 34: Zusammensetzung der Gutschriften des Szenarios EAG-Asche (Aufbereitung α - und β -Linie versus Deponierung).

In Abbildung 35 sind die anteiligen Umweltauswirkungen der beiden Aufbereitungslinien des TARTECH-Prozesses separat dargestellt. Mit Ausnahme des Ozonabbaupotenzials weisen alle Wirkungskategorien im Saldo positive Umweltwirkungen für beide Aufbereitungslinien aus. Bei abiotischem Ressourcenverbrauch und Versauerungspotenzial halten sich die Anteile an den Umweltwirkungen beider Aufbereitungslinien in etwa die Waage. Bei Eutrophierung und Humantoxizität ist der Betrieb der β -Linie zum größten Teil für die positive Bilanz verantwortlich. Bei photochemischem Oxidationspotenzial und Treibhauspotenzial fällt wiederum die Aufbereitung durch die α -Linie am meisten ins Gewicht.

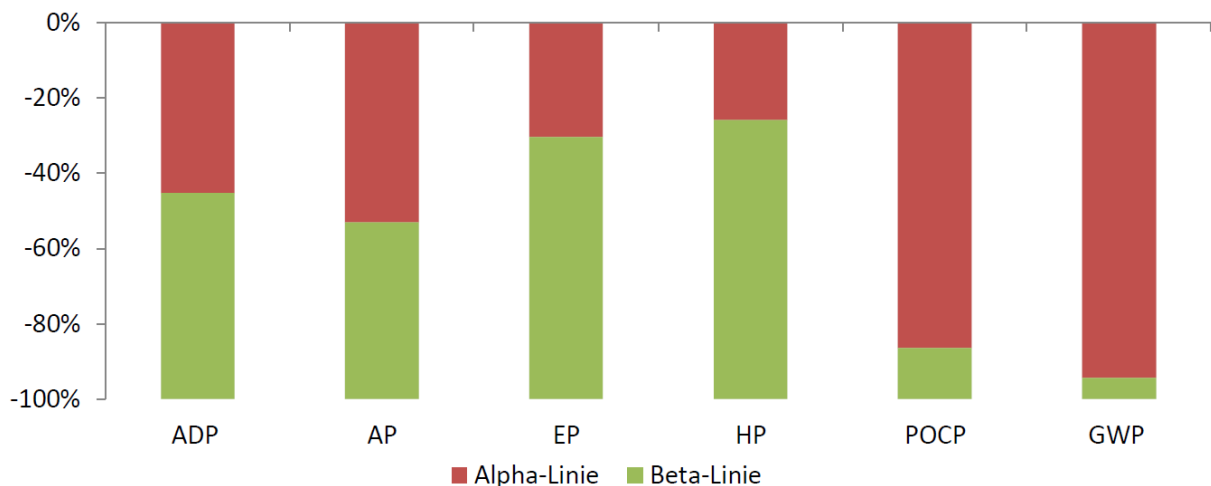


Abbildung 35: Anteilige Auswirkungen der α - und β -Linie auf die betrachteten Wirkungskategorien.

Anders als der Betrieb der α -Linie war der Betrieb der β -Linie im Falle einer Wirkungskategorie in der Bilanz nicht mit positiven Umweltwirkungen verbunden. Bei der Wirkungskategorie Ozonabbaupotenzial ist gemäß Abbildung 36 nur der Betrieb der α -Linie mit der Einsparung von Emissionen verbunden, während der

Betrieb der β -Linie insgesamt mit Umweltbelastungen aus der Bilanz hervorgeht. Im Saldo sind die Gutschriften im Falle dieser Wirkungskategorie höher bei alleinigem Betrieb der α -Linie als bei Betrieb beider Aufbereitungslinien.

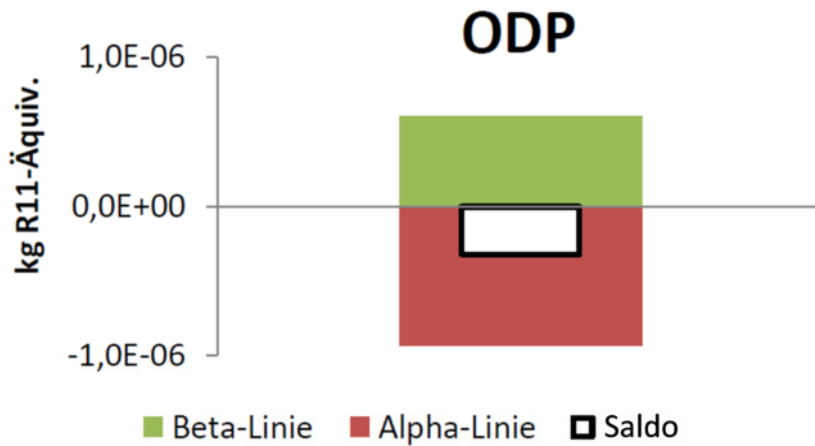


Abbildung 36: Einflüsse der α - und β -Linie auf das Ozonabbaupotenzial (ODP).

b.2.4.6. Ergebnisse der ESSENZ-Methode

Im Rahmen der ESSENZ-Methode wurden die Teildimensionen „Physikalische Verfügbarkeit“ und der „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ mittels definierter Charakterisierungsfaktoren berechnet (Tabelle 2). Für die Bewertung der Verfügbarkeiten wurden die Materialien des Mengengerüsts betrachtet. Das Mengengerüst setzt sich aus den zurückgewonnenen Metallen zusammen. Bei der Betrachtung der EAG-Asche waren jedoch für die Metalle As, Bi und Sb keine Daten vorhanden. In Abbildung 37 sind die zurückgewonnenen Metalle aufgeführt, die auf Grundlage der verfügbaren Daten bei der Berechnung der Teildimensionen berücksichtigt werden konnten.

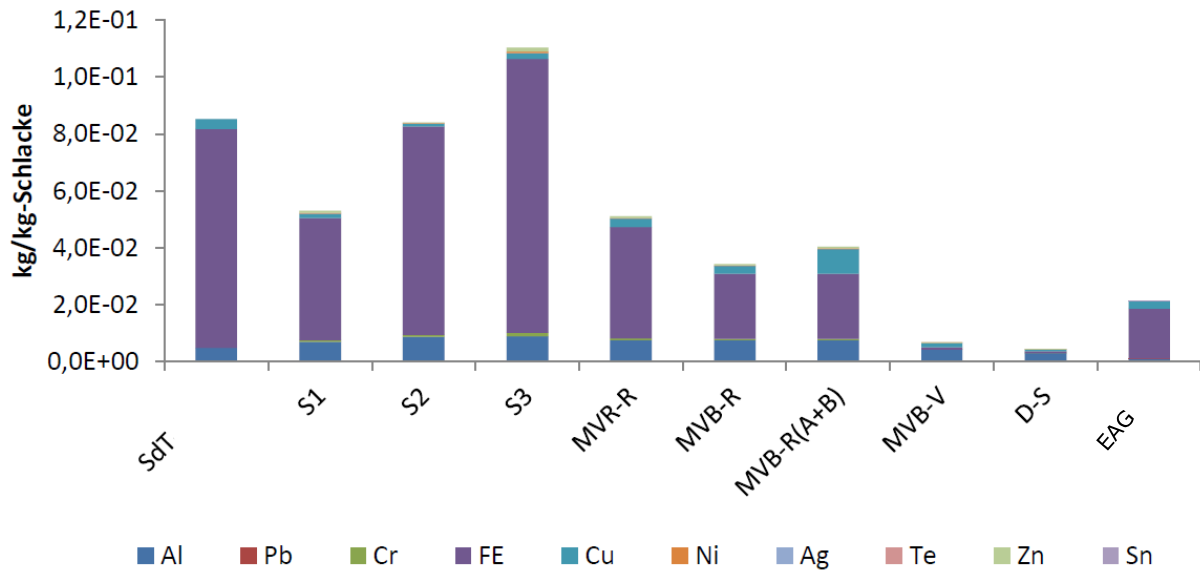


Abbildung 37: Übersicht über die im Rahmen der ESSENZ-Methode berücksichtigten Metalle.

Um die physikalische Verfügbarkeit zu bewerten, wurden die Indikatoren $ADP_{\text{elementar}}^8$ und AADP verwendet. Die Indikatoren wurden angewandt, um Aussagen über den abiotischen Ressourcenverbrauch treffen zu können. Die Umweltwirkungen bei der Betrachtung von $ADP_{\text{elementar}}$ sind gemäß Abbildung 38 vor allem auf die Rückgewinnung von Kupfer, Zink und Aluminium zurückzuführen. Der größte Einfluss entfällt dabei auf die Aufbereitung von Rohasche mittels α - und β -Linie.

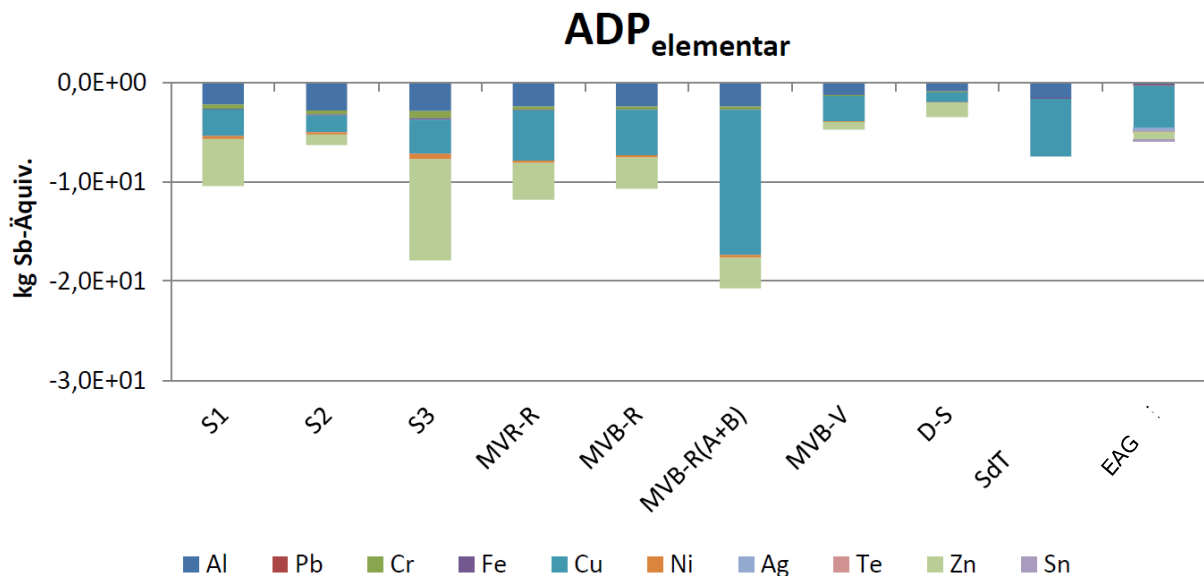


Abbildung 38: $ADP_{\text{elementar}}$ -Werte, basierend auf den zurückgewonnenen Metallen (Mengengerüst).

⁸ $ADP_{\text{elementar}}$ ist nicht zu verwechseln mit $ADP(e)$. $ADP_{\text{elementar}}$ bezieht sich auf das Mengengerüst, $ADP(e)$ hingegen auf die Ergebnisse der Sachbilanz.

In der Bewertung der Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch mit Hilfe des AADP (Abbildung 39) zeigt sich, dass die positiven Umweltwirkungen fast ausschließlich auf das zurückgewonnene Eisen zurückzuführen sind. Entsprechend weisen vor allem Aschen/Schlacken mit relativ hohem Eisengehalt wie S3 nennenswerte Beträge bei AADP auf.

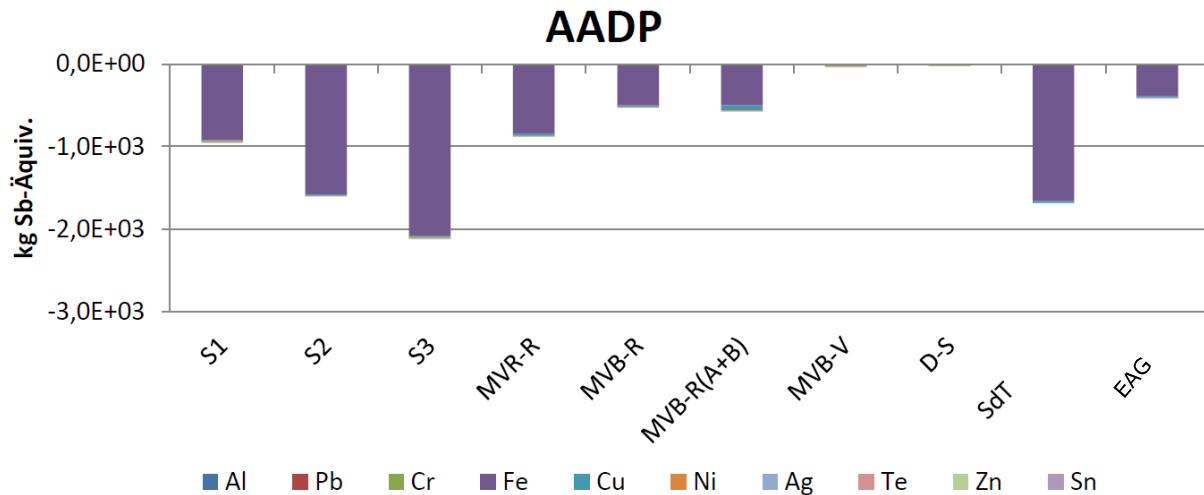


Abbildung 39: AADP-Werte, basierend auf den zurückgewonnenen Metallen (Mengengerüst).

Für die Teildimension der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit gilt ebenso wie für die physikalische Verfügbarkeit: je negativer der Wert, desto höher ist das Einsparpotenzial. In Abbildung 40 und Abbildung 41 wird der Einfluss von elf Kategorien hinsichtlich der zurückgewonnenen Menge an Metallen dargestellt. In den beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Kategorie Preisentwicklung (PRS) den höchsten Einfluss auf die sozio-ökonomische Verfügbarkeit hat. Dieser Effekt ist vor allem bei Aschen/Schlacken mit hohen Kupferanteilen zu beobachten. Außerdem nehmen die Kategorien Politische Stabilität (PS) und Handelshemmnisse (HH) einen relativ hohen Anteil ein. Bei der Aufbereitung der EAG-Asche sind die Kategorien anders verteilt: Dort weisen die Koppelproduktion (Kopp) und die Konzentration der Reserven (Konz_R) den zweithöchsten Anteil auf.

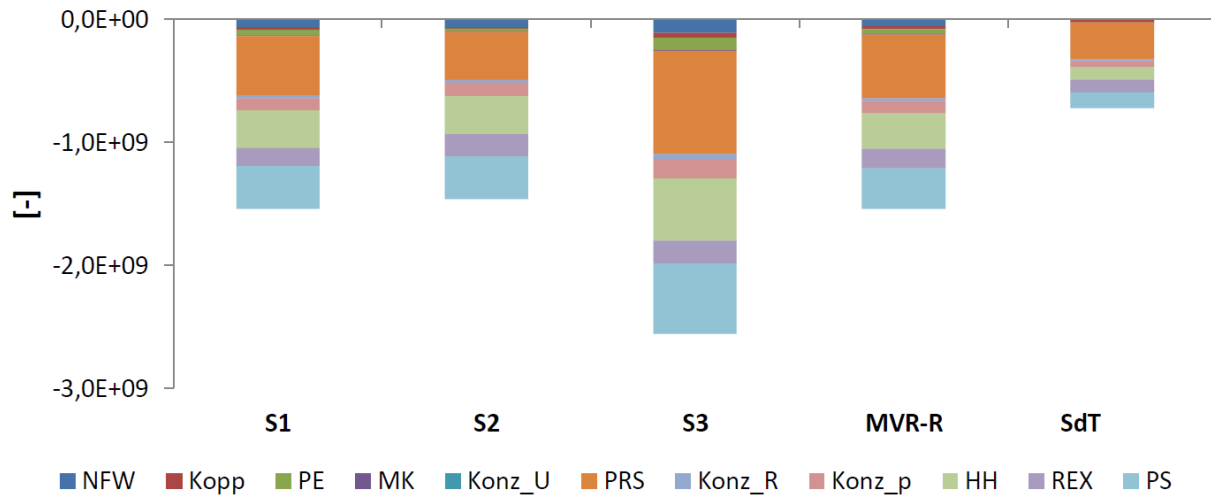


Abbildung 40: Ergebnisse für die Aschen/Schlacken S1, S2, S3, MVR-R, SdT - Einfluss der Kategorien auf die sozio-ökonomische Verfügbarkeit.

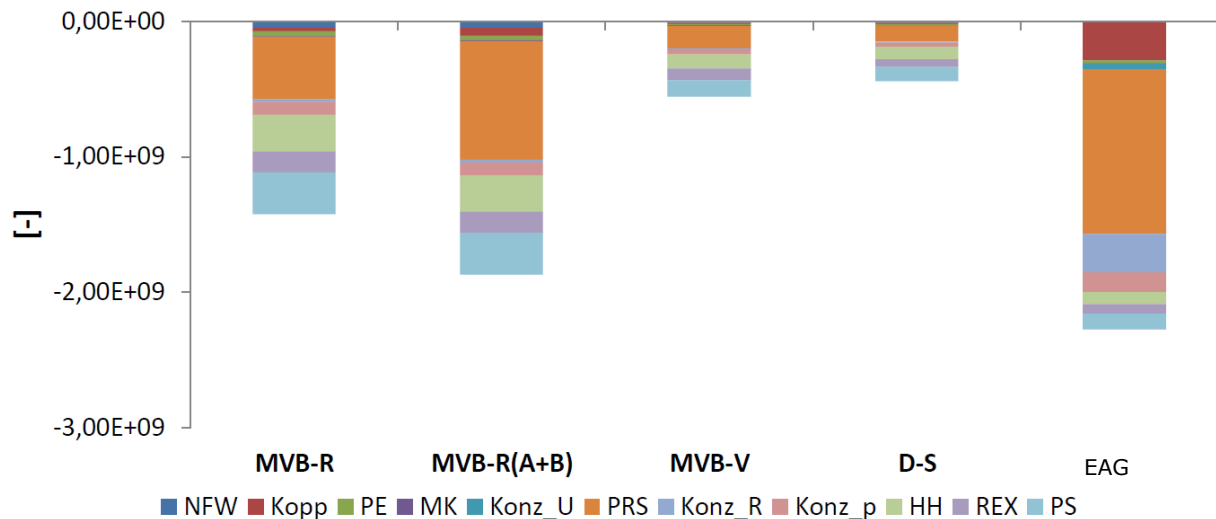


Abbildung 41: Ergebnis für die Aschen/Schlacken MVB-R, MVB-R A+B, MVB-V, D-S, EAG - Einfluss der Kategorien auf die sozio-ökonomische Verfügbarkeit.

Die Einflüsse der zurückgewonnenen Metalle auf die Teildimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ werden in Abbildung 42 hinsichtlich sozialer Standards und in Abbildung 43 hinsichtlich Umweltstandards dargestellt. Für die „Gesellschaftliche Akzeptanz“ gilt: Je größer der Wert, desto niedriger ist die gesellschaftliche Akzeptanz der Gewinnung bzw. Anwendung des Materials. Es zeigt sich, dass Pb die geringste Akzeptanz hinsichtlich sozialer Standards aufweist. Al, Fe und Cr weisen ebenfalls geringe Akzeptanzen auf. Bei der Betrachtung der Einhaltung von Umweltstandard ist zu erkennen, dass neben Fe wiederum Pb im Vergleich am wenigsten Akzeptanz aufweist, während Cr die größte Akzeptanz unter den untersuchten Metallen hat.

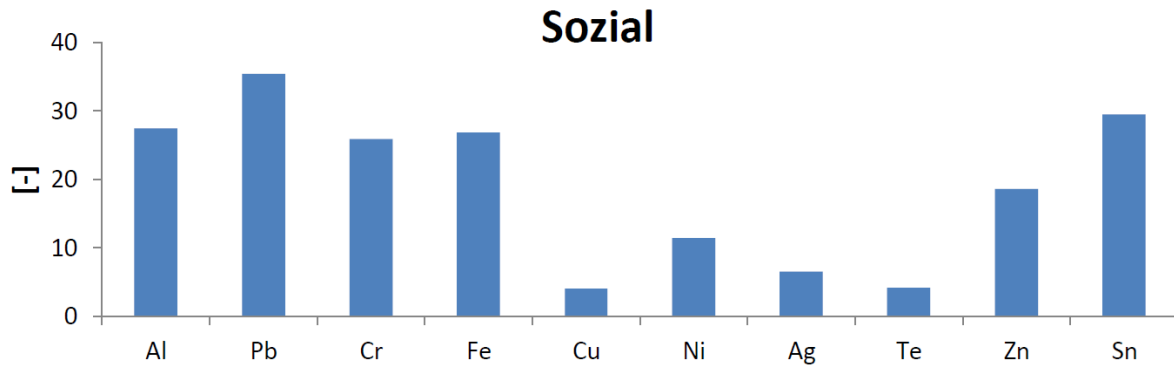


Abbildung 42: Gesellschaftlichen Akzeptanz der zurückgewonnenen Metalle hinsichtlich sozialer Standards.

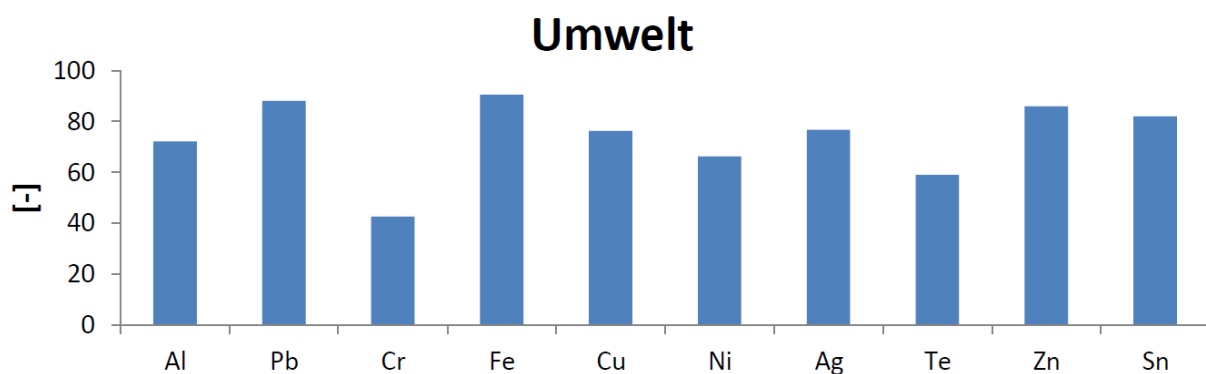


Abbildung 43: Gesellschaftlichen Akzeptanz der zurückgewonnenen Metalle hinsichtlich Umweltstandards.

Im Anschluss an die Betrachtung der drei Teildimensionen wurde die Ressourceneffizienz der Behandlung von verschiedenen Aschen/Schlacken mittels TARTECH-Verfahren bzw. mittels der definierten Anlagenkonfiguration nach dem SdT ermittelt. Bei der Ermittlung der Ressourceneffizienz gilt, je größer der berechnete Wert, desto größer ist die Ressourceneffizienz. Da durch die Aufbereitung Ressourcen zurückgewonnen werden, sind die berechneten Werte der Ressourceneffizienz negativ und erreichen maximal einen Wert von Null (d.h. der Wertebereich ist < 0). Je mehr Ressourcen zurückgewonnen werden, desto größer ist der berechnete Wert bzw. desto näher liegt dieser an Null. In Abbildung 44 ist die Ressourceneffizienz für die untersuchten Aschen/Schlacken in der Dimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ abgebildet. Für S3 wird der höchste Wert ausgewiesen, da auf Grundlage der genutzten Daten die Metallausbringung hier am größten ist.

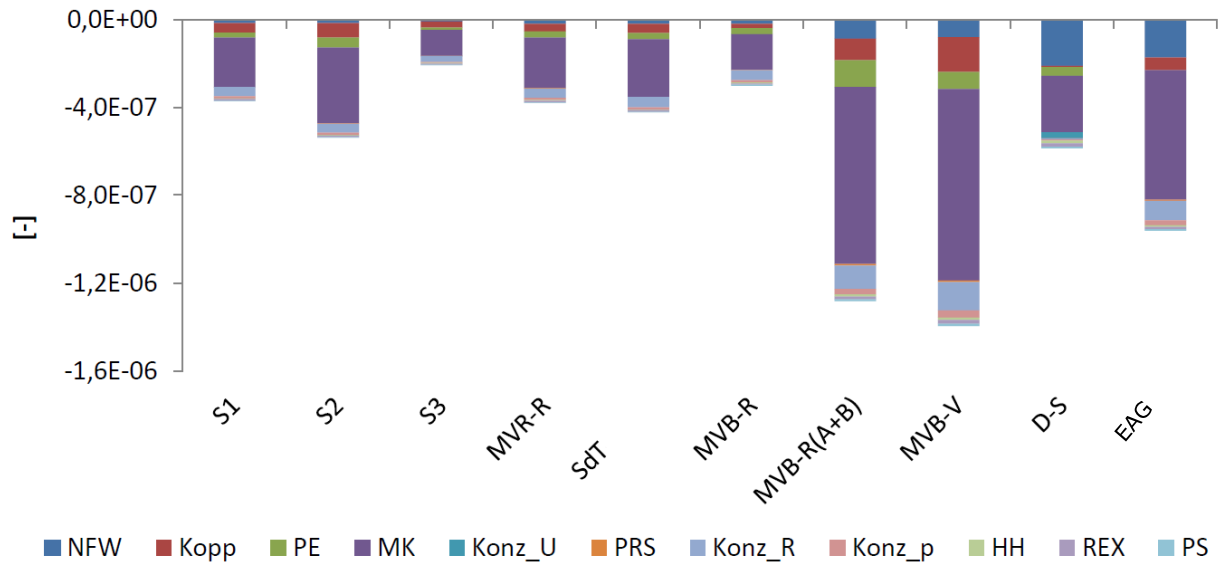


Abbildung 44: Ressourceneffizienz „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“.

b.2.5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung zeigen, dass eine Aufbereitung metallhaltiger Aschen/Schlacken grundsätzlich mit ökologischen, sozialen bzw. sozio-ökonomischen Vorteilen verbunden ist. Die Untersuchung einer Aschen-/Schlackenaufbereitung nach dem SdT zeigte, dass die Aufbereitung von durchschnittlich zusammengesetzten Aschen/Schlacken nach dem SdT bereits mit deutlichen Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle verbunden ist, was im Saldo zu einer Einsparung von Emissionen führt. Generell ist jedoch zu beachten, dass die derzeit betriebenen Asche-/Schlackenaufbereitungsanlagen zum Teil sehr unterschiedliche Anlagenkonfigurationen aufweisen. Eine eindeutige Definition des Stands der Technik von Aschen-/Schlackenaufbereitungsanlagen ist deshalb nur schwer möglich. Ein direkter Vergleich von Anlagen ist zudem nur dann sinnvoll, wenn die eingesetzten Aschen/Schlacken in beiden Anlagen in etwa dieselben Eigenschaften und Zusammensetzung aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Beschaffenheit von Aschen/Schlacken aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung der verbrannten Abfälle sowohl saisonal als auch regional erheblichen Schwankungen unterworfen ist. So verdeutlicht auch die Bilanzierung der TARTECH-Versuchskampagnen, dass das Ausmaß der Entlastung für Umwelt und Gesellschaft vor allem vom Metallgehalt der behandelten Aschen/Schlacken abhängt. Die ökologischen Vorteile lassen sich auf die Schonung primärer Rohstoffe durch die Nutzung des in Aschen/Schlacken enthaltenen Sekundärrohstoffpotenzials zurückführen. Deshalb ist vor allem die hochwertige Aufbereitung unbehandelter Rohaschen mit hohen Gehalten an Eisen, Kupfer und Aluminium mit ökologischen Vorteilen verbunden, wie die Ergebnisse des Szenarios Rohaschen verdeutlichen.

In Hinblick auf die TARTECH-Technologie stellt sich zusätzlich die Frage, inwieweit der Betrieb von beiden Aufbereitungslinien sinnvoll ist. Damit geht die

Fragestellung einher, ob eine Erschließung des Rohstoffpotenzials von Aschen/Schlacken in der Korngrößenfraktion < 2 mm den zusätzlichen verfahrenstechnischen Aufwand der β -Linie unter ökologischen, sozialen und ökonomischen Gesichtspunkten rechtfertigt. In Bezug auf Umweltgesichtspunkte zeigen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, dass auf Ebene der meisten untersuchten Wirkungskategorien die Gutschriften höher ausfallen als die mit dem zusätzlichen Aufbereitungsaufwand verbundenen Emissionen. Bei der Betrachtung des Treibhauspotenzials hält sich der zusätzliche Aufwand für den Betrieb der β -Linie mit der damit verbundenen Emissionsminderung die Waage. Beim Ozonabbaupotenzial bringt die zusätzliche Aufbereitung mittels β -Linie im Saldo sogar zusätzliche Emissionen mit sich.

Für bereits vorbehandelte, z.T. von Metallen entfrachtete Aschen/Schlacken gilt, dass die Aufbereitung bei niedrigen Metallgehalten mit Hilfe des TARTECH-Verfahrens ökologisch sinnvoller ist als die Verbringung bzw. der Verbleib auf der Deponie. Allerdings sind die Gutschriften für die Einsparung von Primärrohstoffen deutlich geringer als bei Rohaschen mit hohen Metallgehalten.

Noch deutlicher zeigen die Ergebnisse, dass die Rückgewinnung von Metallen aus Aschen/Schlacken aus der thermischen Behandlung von EAG-Behandlungsrückständen gegenüber einer Deponierung ohne Aufbereitung aus ökologischer Sicht mit klaren Vorteilen verbunden ist. Sollten in Zukunft vermehrt Fraktionen aus der EAG-Aufbereitung in thermischen Behandlungsanlagen eingesetzt werden, ist aus Sicht des Metallrecyclings eine Verbrennung in Mono-Chargen anzustreben.

Die Bewertung anhand der ESSENZ-Methode gibt Einblicke in die Bedeutung der Metallrückgewinnung aus Aschen/Schlacken in Bezug auf die Rohstoffverfügbarkeit (siehe Teildimension „Physikalische Verfügbarkeit“), auf sozio-ökonomische Aspekte (siehe Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“) und auf soziale Aspekte (siehe Teildimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“). Für die Rohstoffverfügbarkeit und die sozio-ökonomische Verfügbarkeit zeigte sich auf Ebene aller betrachteten Wirkungsindikatoren, dass Rohaschen mit hohen Metallgehalten die besten Ergebnisse erzielen (z.B. Asche S3). Für die „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ist vor allem die Art der ausgebrachten Metalle entscheidend. Die Akzeptanz eines Metalls und dessen Einsatz in Produkten hängt beispielsweise mit den Bedingungen beim Abbau der Erze zusammen [Bach et al. 2015]. Da durch die Rückgewinnung von Metallen aus Aschen/Schlacken der Abbau von Primärmetallen teilweise substituiert werden kann, sind vor allem jene Metalle relevant, die bei sozialen Standards und Umweltstandards eine geringe gesellschaftliche Akzeptanz aufweisen. Den Ergebnissen zufolge ist dieser Umstand vor allem bei Blei, Eisen, Zinn und Aluminium gegeben. Betrachtet man schließlich die Ressourceneffizienz im Rahmen der ESSENZ-Methode, erzielen die Aschen S3, MVR-R und MVB-R die besten Ergebnisse. Schlechter schneidet die Aufbereitung von Rohaschen in α - und β -Linie und von bereits entfrachteten Aschen/Schlacken in der α -Linie ab. Die Ergebnisse hängen dabei in erster Linie vom Metallgehalt der Aschen/Schlacken ab.

Generell wurde die Nachhaltigkeitsbetrachtung auf der Grundlage von Versuchsdaten erhoben, die während der sukzessiven Ausbau- und Inbetriebnahmephase der TARTECH-Anlage stammen. Insbesondere stand die β -Linie im Technikumsmaßstab nur zum Teil zur Verfügung, so dass deren Leistungsfähigkeit und Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit des Gesamtverfahrens nur eingeschränkt beurteilt werden konnte.

c. Zusammenfassung

In den Verbrennungsversuchen mit verschiedenen Anlagen konnte nachgewiesen werden, dass EAG-Behandlungsrückstände als Monobrennstoff thermisch behandelbar sind. In Kleinversuchen wurde zudem gezeigt, dass die Zugabe von Holzpellets bis zu einem Anteil von 50 Ma.-% dazu beiträgt, das Ausbrandverhalten zu verbessern, die Emissionswerte zu verringern und den Anteil sowie die Härte von Agglomeraten in den Aschen zu steigern.

Die Behandlung der EAG-Aschen in der TARTECH-Anlage im Ausbauzustand von September 2015 zeigte, dass insbesondere mit Hilfe der β -Linie hochkonzentrierte Metallfraktionen gewonnen werden können. Insbesondere die NE-Fraktion < 2 mm bestand hauptsächlich (ca. 79 Ma.-%) aus den untersuchten Metallarten und dabei vor allem aus Aluminium (ca. 55 Ma.-%) und Kupfer (ca. 20 Ma.-%). Die NE-Fraktion 2-5 mm enthielt ca. 38 Ma.-% der untersuchten Metalle und dabei insbesondere ca. 29 Ma.-% Aluminium und ca. 5 Ma.-% Kupfer. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass sowohl die NE-Fraktion < 2 mm mit ca. 1,3 Ma.-% (TS) als auch die NE-Fraktion 2-5 mm mit ca. 0,2 Ma.-% (TS) nur sehr geringe Anteile an der Gesamtmasse der Asche einnahmen. Sämtliche NE-Fraktionen (inklusive Fraktion > 5 mm) hatten nur einen Masseanteil von ca. 1,7 Ma.-% (TS) am gesamten Stoffstrom. Folglich betrug der Massenanteil der Restmineralikfraktion ca. 98 Ma.-% (TS). In diesem Material kamen ca. 19 Ma.-% der untersuchten Metalle vor. Dabei wurden hauptsächlich Kupfer (ca. 8 Ma.-%), Aluminium (ca. 5 Ma.-%) und Eisen (ca. 2 Ma.-%) festgestellt, die durch weitere Optimierungen der TARTECH-Anlagenteile aus der Restmineralikfraktion separiert werden sollten.

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtungen zeigten, dass die Aufbereitung metallhaltiger Aschen/Schlacken grundsätzlich ökologische, soziale bzw. sozio-ökonomische Vorteile erbringt. Die Untersuchung einer beispielhaften Aschen-/Schlackenaufbereitung nach dem SdT ergab bereits, dass die Aufbereitung von durchschnittlich zusammengesetzten Aschen/Schlacken mit deutlichen Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle verbunden ist, was im Vergleich zu den dabei erzeugten Emissionen im Saldo zu einer Einsparung führt. Generell ist jedoch zu beachten, dass die derzeit betriebenen Asche-/Schlackenaufbereitungsanlagen zum Teil sehr unterschiedliche Anlagenkonfigurationen aufweisen. Eine eindeutige Definition des Stands der Technik von Aschen-/Schlackenaufbereitungsanlagen ist deshalb nur schwer möglich. Auch die Beschaffenheit der Aschen/Schlacken kann aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung der verbrannten Abfälle sowohl saisonal als auch regional schwanken.

Die Untersuchung bzw. Bilanzierung der TARTECH-Versuchskampagnen unterstreicht, dass das Ausmaß der Entlastung für Umwelt und Gesellschaft vor allem vom Metallgehalt der behandelten Aschen/Schlacken abhängt. Dabei lassen

sich die ökologischen Vorteile auf die Schonung primärer Rohstoffe durch die Nutzung des in Aschen/Schlacken enthaltenen Sekundärrohstoffpotenzials zurückführen. Deshalb ist vor allem die hochwertige Aufbereitung unbehandelter Rohaschen mit hohen Gehalten an Eisen, Kupfer und Aluminium mit ökologischen Vorteilen verbunden. Allerdings zeigten die Untersuchungen, dass die Erschließung des Rohstoffpotenzials von Aschen/Schlacken in der Korngrößenfraktion < 2 mm durch den verfahrenstechnischen Mehraufwand in Form der β -Linie im untersuchten Ausbauzustand nicht eindeutig als positiv oder negativ bewertet werden kann. So zeigten die Ergebnisse der ökologischen Wirkungsabschätzung zwar, dass auf Ebene der meisten Wirkungskategorien die Gutschriften höher ausfallen als die mit dem zusätzlichen Aufbereitungsaufwand verbundenen Emissionen. Bei zwei der Wirkungskategorien sind die Umweltwirkungen bei dieser Betrachtung jedoch ausgeglichen (Treibhausgaspotenzial) oder schneiden im Saldo schlechter ab als der Verzicht auf den zusätzlichen Aufschluss dieser Fraktion.

Auch für bereits vorbehandelte, z.T. von Metallen entfrachtete Aschen/Schlacken gilt, dass die Aufbereitung bei niedrigen Metallgehalten mit Hilfe des TARTECH-Verfahrens ökologisch sinnvoller ist als die Verbringung bzw. der Verbleib auf der Deponie. Allerdings sind die Gutschriften für die Einsparung von Primärrohstoffen deutlich geringer als bei Rohaschen mit hohen Metallgehalten.

Noch deutlicher zeigen die Ergebnisse, dass die Rückgewinnung von Metallen aus Aschen/Schlacken aus der thermischen Behandlung von EAG-Behandlungsrückständen gegenüber einer Deponierung ohne Aufbereitung aus ökologischer Sicht mit klaren Vorteilen verbunden ist. Zur Erzeugung von höherkonzentrierten Metallgehalten würde sich zudem empfehlen, EAG-Abfälle zukünftig als Monochargen d.h. ohne Vermischung mit anderen Abfällen in thermischen Behandlungsanlagen einzusetzen, um damit die Konzentrationen relevanter Metalle in den Aschen zu erhöhen.

Die Bewertung anhand der ESSENZ-Methode gibt Einblicke in die Bedeutung der Metallrückgewinnung aus Aschen/Schlacken in Bezug auf die Rohstoffverfügbarkeit, auf sozio-ökonomische Aspekte und auf soziale Aspekte. Für die Rohstoffverfügbarkeit und die sozio-ökonomische Verfügbarkeit zeigte sich auf Ebene aller betrachteten Wirkungsindikatoren, dass Rohaschen mit hohen Metallgehalten die besten Ergebnisse erzielen. Für die „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ist vor allem die Art der ausgebrachten Metalle entscheidend. Die Akzeptanz eines Metalls und dessen Einsatz in Produkten hängen beispielsweise mit den Bedingungen beim Abbau der Erze zusammen. Da durch die Rückgewinnung von Metallen aus Aschen/Schlacken der Abbau von Primärmetallen teilweise substituiert werden kann, sind vor allem jene Metalle relevant, die bei sozialen Standards und Umweltstandards eine geringe gesellschaftliche Akzeptanz aufweisen. Den Ergebnissen zufolge ist dieser Umstand vor allem bei Blei, Eisen, Zinn und Aluminium gegeben. Betrachtet man schließlich die Ressourceneffizienz im Rahmen der ESSENZ-Methode, erzielen die unvorbehandelten Rohaschen die besten Ergebnisse.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Vergleich des Schlussverwendungsnachweises vom 11.04.2016 und dem Änderungsbescheid vom 02.07.2015 (siehe auch Tabelle 14) wird deutlich, dass über die gesamte Projektlaufzeit um ca. 20.224 € erhöhte **Personalkosten (0837)** entstanden waren. Diese lassen sich auf die erheblich verzögerte Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage zurückführen, die z.B. ersatzweise Aufbereitungsversuche durch Fraunhofer UMSICHT (siehe auch Kapitel I.3) erforderten, aber insbesondere bei den Modellierungen für die Nachhaltigkeitsbewertung (AP 6) aufgrund fehlender Realdaten einen höheren personellen Aufwand als ursprünglich geplant verursachten. Fraunhofer UMSICHT beantragte deshalb zudem im Juni 2015 eine kostenneutrale Projektverlängerung um 9 Monate bis Ende März 2016 und eine Mittelumwidmung (Genehmigung des Projektträgers mit Änderungsbescheid 02.07.2015).

Die erhöhten Personalkosten wurden durch Einsparungen bei allen anderen Kostenarten (mit Ausnahme der sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (0850): Mehrkosten von ca. 902 € (Erläuterung dazu weiter unten)) kompensiert. Insbesondere die Kosten für **Fremdleistungen (0823)** fielen um 10.640 € geringer aus, da viele der ursprünglich geplanten externen Materialanalysen in institutseigenen Laboren - allerdings unter Erhöhung der Personalkosten - durchgeführt wurden. Zudem wurden Kosten (ca. 1.390 €) für externe Analysen unter der Kostengruppe **sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (0850)** verbucht. Auch die **Materialkosten (0813)** blieben deutlich (ca. 4.092 €) unter dem geplanten Wert, weil Verschleißerscheinungen ausblieben, die an den Verbrennungsapparaten aufgrund der hohen Halogenfrachten der Verbrennungsmaterialien erwartet worden waren.

Tabelle 14: Darstellung der wichtigsten zahlenmäßigen Positionen, Vergleich Änderungsbescheid vom 02.07.2015 und Schlussverwendungsnachweis vom 11.04.2016.

	(a) Kosten laut Änderungs- bescheid vom 02.07.2015	(b) Kosten laut Schlussver- wendungs- nachweis vom 11.04.2016	Differenz (b)-(a)
Personalkosten (0837)	245.831,00 €	266.055,07 €	+ 20.224,07 €
Reisekosten (0838)	14.830,00 €	12.143,47 €	- 2.686,53 €
Material (0813)	12.008,00 €	7.915,77 €	- 4.092,23 €
Fremdleistungen (0823)	13.290,00 €	2.650,00 €	- 10.640,00 €
vorhabensspezi- fische Abschreibung (Investitionen) (0847)	3.292,00 €	1.948,35 €	- 1.343,65 €
sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (0850)	5.384,00 €	6.285,72 €	+ 901,72 €
Summe	294.635,00 €	296.998,38 €	2.363,38 €⁹

⁹ Kostenüberschreitung aus Eigenmitteln.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die von Fraunhofer UMSICHT geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Im Rahmen von AP 3 wurden umfangreiche Vorversuche und Verbrennungsversuche mit EAG-Behandlungsrückständen (ca. 1.730 kg) mit verschiedenen Verbrennungsanlagen im institutseigenen Technikum durchgeführt. Daraus wurden fast 300 kg Asche erzeugt und untersucht, die wiederum die notwendige Grundlage für den Behandlungsversuch in der TARTECH-Anlage darstellten.

Im AP 6 wurden das TARTECH-Verfahren aufgrund der Ergebnisse von Behandlungsversuchen mit verschiedenen Aschen und Schlacken im Vergleich zu Anlagen nach dem SdT bewertet. Dazu mussten zunächst aus einem breit gefächerten Spektrum Daten über Anlagen zum SdT recherchiert werden. Des Weiteren wurden nach Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage gezielt über einen Fragebogen Kennzahlen zum allgemeinen Betrieb und insbesondere für die Behandlungsversuche erhoben. Die gesammelten Informationen flossen danach in die durch Fraunhofer UMSICHT entwickelten Modelle zur gesamtheitlichen Beurteilung der Nachhaltigkeit unter Einbezug ökobilanzieller, ökonomischer und sozialer Aspekte ein.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Im vorliegenden Vorhaben sollte untersucht werden, ob mit dem neuartigen TARTECH-Verfahren die Rückgewinnung von NE-Metallen aus Verbrennungsaschen/-schlacken in Quantität und Qualität gesteigert werden kann. Dazu wurden verschiedene Stoffströme wie z.B. HMVA oder bereits abgelagerte Schlacken untersucht.

Ein weiterer, eigens für das Projekt durch Fraunhofer UMSICHT erzeugter neuer Stoffstrom sind Aschen aus der Verbrennung von Resten aus der Vorbehandlung von EAG. Im Rahmen der dazu in AP 3 ausgeführten Verbrennungsversuche mit Monochargen an EAG-Behandlungsrückständen bzw. Mischungen von EAG-Behandlungsrückständen mit Holzpellets (u.a. zur Verbesserung des Ausbrandverhaltens und der Emissionswerte) konnten wertvolle Erfahrungen zur thermischen Behandlung (geeignete Feuerungstechnik, Verbrennungsparameter, etc.) gesammelt werden. Mit dem Behandlungsversuch der EAG-Asche in der TARTECH-Anlage wurde zudem festgestellt, dass erzeugte Fraktionen reichhaltig an z.B. Kupfer und Aluminium sind, die wiederum wirtschaftlich interessante Stoffströme darstellen.

Da sich Fraunhofer UMSICHT aktuell aus kommerzieller Sicht nicht mit der Aufbereitung von Aschen/Schlacken beschäftigt, dagegen aber weiterhin mit der thermischen Behandlung von EAG zur Rückgewinnung von Technologiemetallen, könnte die Kooperationen mit Partnern, die innovative und leistungsstarke Verfahren wie z.B. die TARTECH-Anlage betreiben, zukünftig eine wirtschaftlich interessante Verfahrenskopplung darstellen.

Das zur Beurteilung der Nachhaltigkeit des TARTECH-Verfahrens im AP 6 entwickelte gesamtheitliche Bewertungsmodell schließt soziale, ökonomische (wirtschaftliche) und ökobilanzielle Aspekte ein. Die auf diesen 3 Säulen basierende umfassende Prozess- oder Verfahrensbewertung kann durch Fraunhofer UMSICHT zukünftig - ggf. in weiterentwickelter bzw. adaptierter Form - wirtschaftlich verwertet werden.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

An dieser Stelle wird auf die Ausführungen in Kapitel II.4.1 verwiesen.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die ATR-Projektpartner haben während der Projektbearbeitung und den wiederholten gemeinsamen Projekttreffen eine intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit aufgebaut. Fraunhofer UMSICHT brachte dabei sein Know-how auf dem Gebiet der umfassenden Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für technologisch komplizierte Verfahren im Bereich der Kreislaufwirtschaft, in diesem Fall die mehrstufige Aufbereitung und Verwertung von Abfallverbrennungsrückständen, ein. Dabei wurden eigens ein neues und maßgeschneidertes Modell zur Bewertung komplexer Verfahren zur Aschen- und Schlackenbehandlung entwickelt (AP 6) und im Projektkonsortium und darüber hinaus verbreitet. Damit bieten sich Fraunhofer UMSICHT zukünftig neue Kooperationsmöglichkeiten in ähnlichen oder anderen Bereichen der Abfall- und Recyclingwirtschaft (Kreislaufwirtschaft). Da die Fraunhofer-Gesellschaft eine Internationalisierung ihrer Geschäftstätigkeiten anstrebt und im Bereich der Kreislaufwirtschaft im europäischen wie auch weltweiten Rahmen im Vergleich zu Deutschland oftmals ein großer Nachholbedarf besteht, kann Fraunhofer UMSICHT - ggf. in Zusammenarbeit mit einzelnen Projektpartnern - das im Projekt gesammelte Know-how zur Etablierung angepasster, bestgeeigneter Technologie gewinnbringend einsetzen.

Zudem wurden umfangreiche Erkenntnisse zur thermischen Behandlung von Resten aus der EAG-Aufbereitung durch die Versuche im eigenen Technikum gesammelt (AP 3), die zukünftig zur Weiterentwicklung von möglichen Projektansätzen zur Verwertung dieses oder ähnlicher, wertvoller Stoffströme zusammen mit spezialisierten Wirtschaftspartnern genutzt werden können.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Zum Stand der Technik und aktuellen Entwicklungen bei der Aufbereitung von Aschen und Schlacken wird an dieser Stelle auf Veröffentlichungen von [Kuchta und Enzner 2015] oder [Lübben 2015] verwiesen.

Zur thermischen Behandlung von EAG-Abfällen bzw. Rückständen aus der Aufbereitung (AP 3) an anderen Stellen liegen aktuell keine gesicherten Erkenntnisse vor. Es ist zwar aus Expertengesprächen bekannt, dass z.B. Shredder-Rückstände, die bei der EAG-Aufbereitung als nicht weiter stofflich und rohstofflich verwertbare Fraktionen anfallen, thermisch in MVA behandelt werden, jedoch nicht in Form von Monochargen. Aus diesem Grund gibt es derzeit keine entsprechenden Monoaschen und -schlacken von Rückständen der EAG-Aufbereitung.

Die Nachhaltigkeitsbewertung von neuartigen Verfahren und Technologien kann anhand von ökobilanziellen, ökonomischen (wirtschaftlichen) und sozialen Kenndaten durchgeführt werden. Dazu sind unter Einbezug der individuellen Randbedingungen jeweils neue prozess- oder verfahrensspezifische Modelle zu entwickeln. Vergleichbare Arbeiten an anderen Stellen zur Nachhaltigkeitsbewertung innovativer Asche- oder Schlackeaufbereitungssysteme wie z.B. dem TARTECH-Verfahren (AP 6) sind den Autoren aktuell nicht bekannt.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Vorträge

- Matyschik, J. (2012): Ökologischer Nutzen durch verbesserte Rückgewinnung von NE-Metallen aus MVA-Schlacken. 8. Ökobilanzwerkstatt, Fraunhofer IBP, Stuttgart (04.-06.09.2012).
- Matyschik, J. (2013): Optimierte Metallrückgewinnung aus mineralischen Schlacken als Beispiel für eine Quantifizierung von Ressourceneffizienz. 9. Ökobilanzwerkstatt, TU Graz, Österreich (23.-25.09.2013).

Poster

- Hense, P., Matyschik, J. und Franke, M. (2014): Integrativer Ansatz zur Quantifizierung der Ressourceneffizienz in der Aschen- und Schlackenaufbereitung. 5. Urban Mining Kongress und Statusseminar r³ - Strategische Metalle und Mineralien, Essen.
- Hense, P., Matyschik, J. und Kroop, S. (2014): Bewertungsmodell zur Metallgewinnung aus Verbrennungsrückständen. 12. DepoTech Abfallwirtschaftstagung an der Montanuniversität Leoben, Österreich.

Bachelor- und Masterarbeiten

- Hense, P. (2013): Erstellung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Metallgewinnung aus mineralischen Rückständen, Technische Universität München und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Masterarbeit, 113 S.
- Beck, O. (2015): Thermische Vorbehandlung von Aufbereitungsresten der Elektro- und Elektronikschrottbehandlung zur erweiterten Wertstoffrückgewinnung. Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Bachelorarbeit, 61 S.
- Kretschmann, R. (2015): Soziale Bewertung eines Aufschlussverfahrens für mineralische Rückstände. Hochschule Hamm-Lippstadt und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Bachelorarbeit, 45 S.
- Hoffmann, V. (2016): Ökonomische Bewertung eines innovativen Verfahrens für Aschen und Schlacken aus der thermischen Abfallbehandlung zur Rückgewinnung von Metallen. Technische Universität München und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Masterarbeit, 119 S.
- Mancke, R. (2016): Ökobilanzielle Bewertung eines innovativen Verfahrens zur Metallrückgewinnung aus Schlacken der thermischen Abfallbehandlung. Technische Universität Berlin und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Masterarbeit, 131 S.

Ehrungen

- VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU) auf Hannover Messe 2014: Preis für umweltrelevante Master- bzw. Diplomarbeiten im Jahr 2013 für Masterarbeit von P. Hense zum Thema „Erstellung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Metallgewinnung aus mineralischen Rückständen“, Hannover, 07.04.2014.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

Es sind aktuell keine weiteren Veröffentlichungen geplant.

Quellen

- Auhagen 2015 Auhagen, T.: Arbeiten am Standort Schöneicher Plan. Schlussbericht Teilprojekt F (Förderkennzeichen 033R086 F) der Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR), Berlin, BMBF-Forschungsvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren, 9 S.
- Bach et al. 2015 Bach, V., Berger, M., Finkbeiner, M., Henssler, M., Kirchner, M. und Leiser, S.: Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/Messung von Ressourceneffizienz (ESSENZ-Methode). In: Recycling und Rohstoffe, Band 9, D. Goldmann (Hrsg.), TK Verlag, Nietwerder-Neuruppin, S. 243-250.
- Beck 2015 Beck, O.: Thermische Vorbehandlung von Aufbereitungsresten der Elektro- und Elektronikschrottbehandlung zur erweiterten Wertstoffrückgewinnung. Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 61 S.
- Beckmann und Scholz 2003 Beckmann, M. und Scholz, R.: Verfahrenstechnische Möglichkeiten der Optimierung bei Rostfeuerungen zur Abfallbehandlung. In: Optimierungspotential der Abfallverbrennung, K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag, Nietwerder-Neuruppin.
- Bongardt et al. Bongardt, B., Buchgeister, J., Denz, W., Giegrich, J., Kosmol, J. und Niebaum, A.: VDI-Richtlinie - Ressourceneffizienz. Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag, Berlin.
- Enzner 2015 Enzner, V.: Übermittlung von Ergebnissen zu den Behandlungsversuchen mit Aschen der SRH in der TARTECH-Anlage.
- Gronholz 2015 Gronholz, C.: Datenerhebung zur Aschen- bzw. Schlackenaufbereitung mit der TARTECH-Anlage in Wiesbaden. Mündliche Auskunft und Beantwortung Fragebogen.
- Gronholz und Schmidt 2015 Gronholz, C. und Schmidt, M.: Industriepartner für innovative Verfahren. Schlussbericht Teilprojekt B (Förderkennzeichen 033R086 B) der TARTECH eco industries AG, Berlin, BMBF-Forschungsvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten

-
- Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren, 73 S.
- Guinée 1995 Guinée, J.: Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines. Leiden.
- Hense 2013 Hense, P.: Erstellung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Metallgewinnung aus mineralischen Rückständen, Technische Universität München und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 113 S.
- Hoffmann 2016 Hoffmann, V.: Ökonomische Bewertung eines innovativen Verfahrens für Aschen und Schlacken aus der thermischen Abfallbehandlung zur Rückgewinnung von Metallen. Technische Universität München und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 119 S.
- IHK Nürnberg 2015 Industrie- und Handelskammer (IHK) Nürnberg für Mittelfranken: Lexikon der Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter:
https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1_3_a_drei_saeulen_modell_1531.htm?sid=rj9tmd1nudchl6mjkn7q09v7j0
(letzter Download am 22.09.16).
- Karpf und Conrad 2014 Karpf, R. und Conrad, Y.: Kennwerte zur Bewertung von Trockensorptionsverfahren auf Kalkbasis. In: Energie aus Abfall. TK Verlag, Nietwerder-Neuruppin, S. 1-15
- Kersting 2015 Kersting D.: Situation der Hausmüllverbrennungsaschen. Industrie-Technik-Kosten und Markt. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag, Nietwerder-Neuruppin, S. 275-289.
- Kretschmann 2015 Kretschmann, R.: Soziale Bewertung eines Aufschlussverfahrens für mineralische Rückstände. Hochschule Hamm-Lippstadt und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 45 S.
- Kuchta und Enzner 2015 Kuchta, K. und Enzner, V.: Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen - Bewertung der Ressourceneffizienz. Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (EdDE), Köln, EdDE-Dokumentation Nr. 17, 56 S.
- Lübben 2015 Lübben, S.: Verwertung von Abfallverbrennungsasche als Zuschlagstoff in der Beton-, Asphalt- und Zementindustrie. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag, Nietwerder-Neuruppin, S. 321-334.
-

-
- Lübben und Enzner 2016 Lübben, S. und Enzner, V.: Arbeiten in der Metropolregion Hamburg. Schlussbericht Teilprojekt E (Förderkennzeichen 033R086 E), Stadtreinigung Hamburg AöR (SRH) und Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Hamburg, BMBF-Forschungsvorhaben: Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren, 108 S.
- Mancke 2016 Mancke, R.: Ökobilanzielle Bewertung eines innovativen Verfahrens zur Metallrückgewinnung aus Schlacken der thermischen Abfallbehandlung. Technische Universität Berlin und Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 131 S.
- Martens 2011 Martens H.: Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg, 364 S.
- van Oers et al. 2002 van Oers, L., de Koning, A., Guinée, J. B. und Huppes, G.: Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook.
- Quicker et. al 2014 Quicker, P., Zayat-Vogel, B., Pretz, T., Garth, A., Koralewska, R. und Malek, S.: Nasse und trockene Entaschung in Abfallverbrennungsanlagen – Erkenntnisse für die Überarbeitung des BVT-Merkblatts Abfallverbrennung. Online verfügbar unter: http://vivis.de/phocadownload/2014_mna/2014_mna_151_172_quicker.pdf (letzter Download am 12.11.2014).
- Schmidt 2015 Schmidt, W.: Datenerhebung zur Aschen- bzw. Schlackenaufbereitung einer Beispielanlage nach dem Stand der Technik. Mündliche Auskunft und Beantwortung Fragebogen.
- Schneider et al. 2011 Schneider, L., Berger, M. und Finkbeiner, M.: The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. In: Int J Life Cycle Assess 16 (9), S. 929–936.
- Weimann et al. 2013 Weimann, K., Matyschik, J. Adam, C., Schulz, T., Linß, E. und Müller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbesondere Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Forschungskennzahl 3709 33 317, UBA-FB 001676, Dessau-Roßlau, 211 S.

Anhang

Abbildungen von vier Siebfraktionen der Feinfraktionen (< 10 mm) aus Rückständen der EAG-Behandlung vor den Verbrennungsversuchen im AP3:

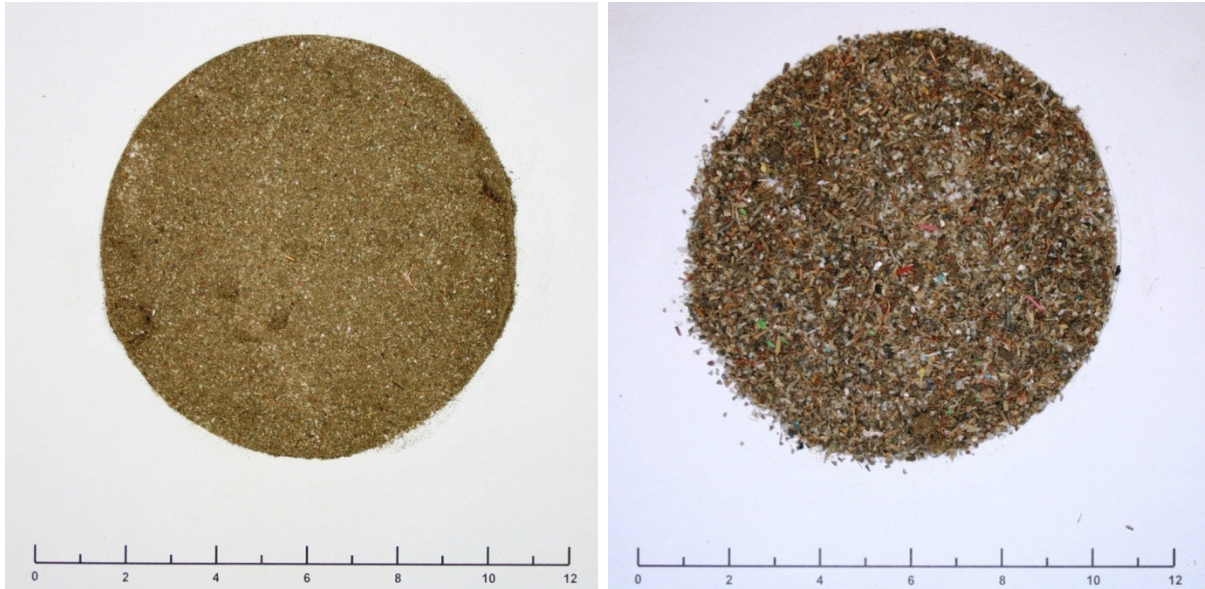


Abbildung 45: Siebfraktion $< 0,5$ mm (links) und $0,5-1,0$ mm (rechts).



Abbildung 46: Siebfraktion $1,0-2,0$ mm (links) und > 2 mm (rechts).

Abbildungen der im AP3 verwendeten Brennstoffe bzw. Brennstoffgemische aus Rückständen der EAG-Behandlung und Holzpellets sowie die entstandenen Aschen:



Abbildung 47: 100 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände (links: Brennstoff, rechts: Asche).



Abbildung 48: 75 Ma.-% EAG- Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets (links: Brennstoff, rechts: Asche).

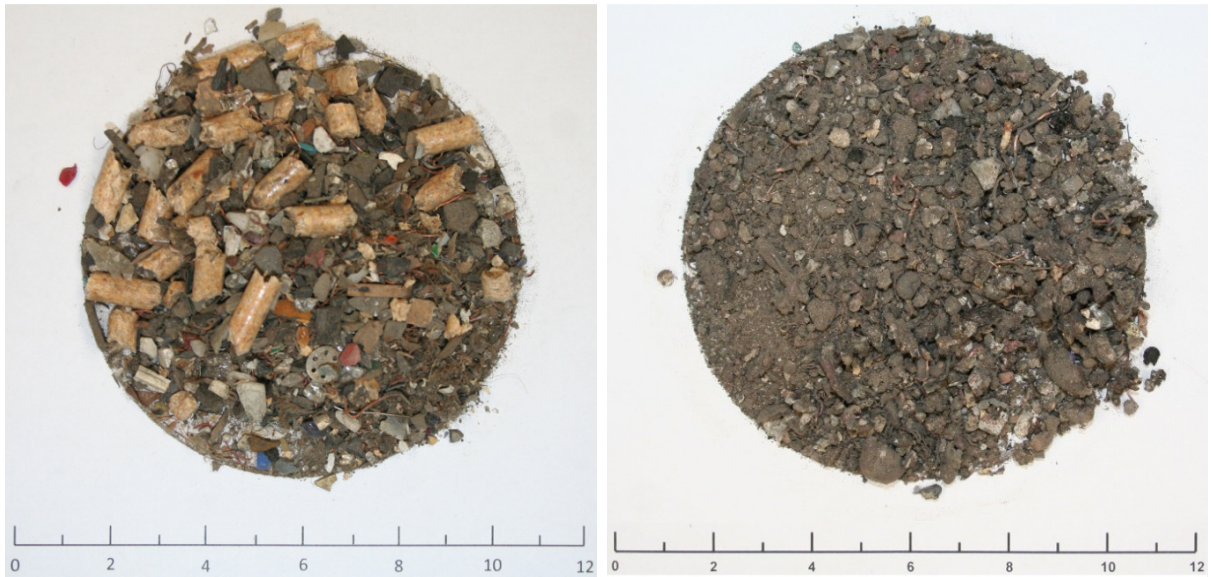


Abbildung 49: 50 Ma.- % EAG- Behandlungsrückstände + 50 Ma.-% Holzpellets (links: Brennstoff, rechts: Asche).

Abbildungen der erzeugten Legierungen aus den gemahlene und geschmolzenen Aschefractionen 250-500 μm und $> 500 \mu\text{m}$:



Abbildung 50: Schmelzversuch Nr. 1 (250-500 μm).



Abbildung 51: Schmelzversuch Nr. 2 (250-500 μm).

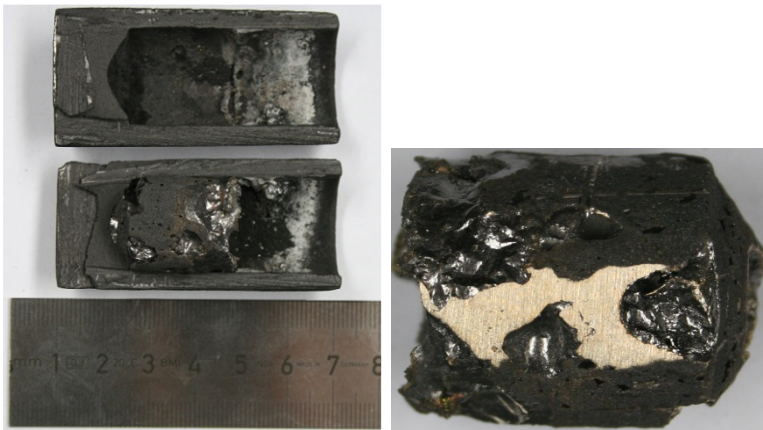


Abbildung 52: Schmelzversuch Nr. 5 (> 500 μm).

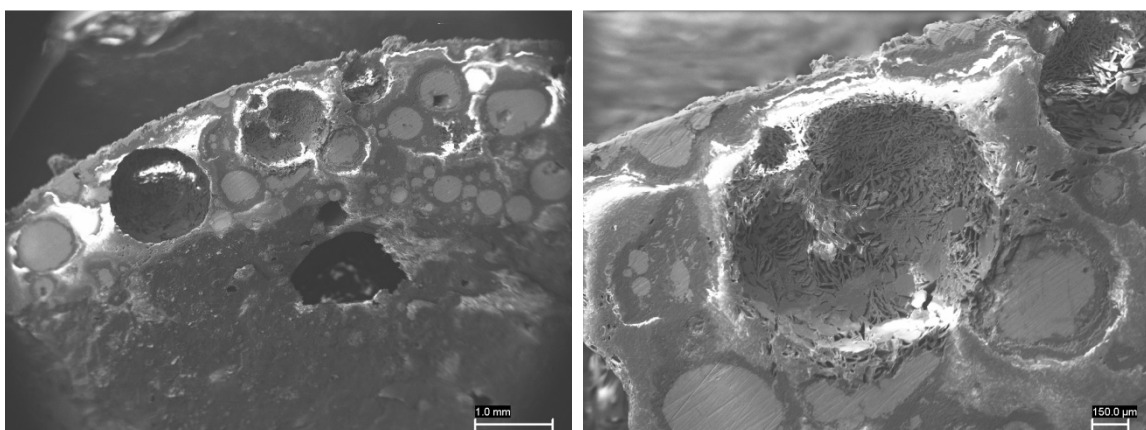


Abbildung 53: Schlacke des Schmelzversuchs Nr. 2 (links: Zoom x16; rechts: Zoom x50).

Abbildungen von Agglomerationen Verbrennungsvorversuch 2:



Abbildung 54: Kleinere Agglomerationen (Brennstoffmischung 75 Ma.-% EAG-Behandlungsrückstände + 25 Ma.-% Holzpellets).

Abbildungen zum Hauptverbrennungsversuch mit der MAWERA-Rostfeuerung:

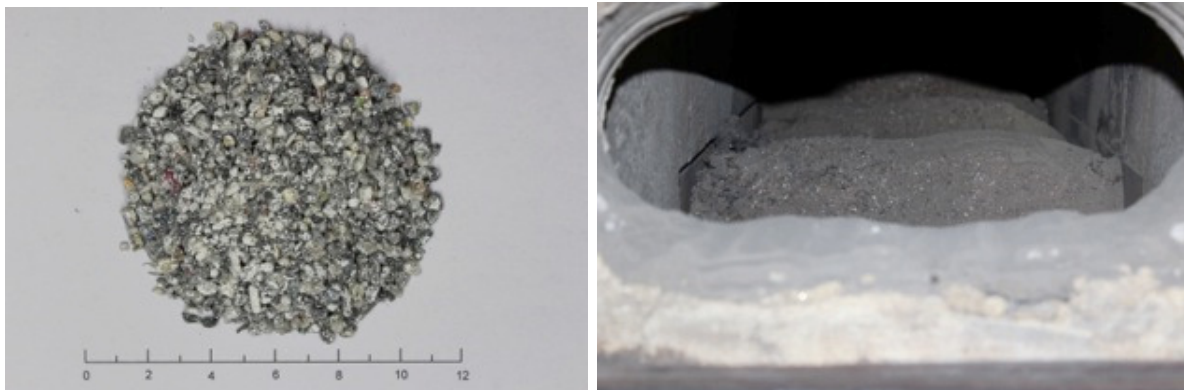


Abbildung 55: EAG-Behandlungsrückstände mit Kalk gemischt (links) und Asche am Rostende (rechts).

Ergebnisse der EDX-Elementaranalysen für die Siebfraktionen der Verbrennungsaschen

Tabelle 15 im Anhang gibt die elementare Zusammensetzung der verschiedenen aufgemahlten Aschefraktionen wieder.

Anmerkung zur Berechnung der Fraktionen 250-500 μm , > 500 μm und „Gesamt“:

Die Berechnung basiert auf den Ergebniswerten der EDX-Elementaranalysen der erzeugten Legierungen und Schlacken. Durch das Erhitzen und Schmelzen der Siebfraktionen konnten Elemente mit Siedepunkten unterhalb der Siedetemperatur verloren gehen und nicht quantifiziert werden. Neben der direkten Emission können Verbindungen mit diesen Elementen aufgebrochen werden und so die jeweiligen Atome / Moleküle ebenfalls emittieren. Die Auswirkungen zeigen sich sehr deutlich an Elementen wie Sauerstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Barium oder Strontium.

**Tabelle 15: Ergebnisse der EDX-Elementaranalysen für die Aschesiebfraktionen
Verbrennungsvorversuch (in Ma.-%).**

	Al	Ba	Ca	Cl	Cr	Cu	Fe	K
< 63 µm	3,49	2,29	5,38	1,17		6,24	6,54	1,97
63-125 µm	3,26	2,48	4,85	1,07		5,38	6,2	2,1
125-250 µm	3	2,23	4,9	1,21		9,52	6,62	1,8
250-500* µm	3,37	0,13	0,36	0,07	0,07	67,6	2,7	0,03
> 500* µm	11,82	0,13	0,36		1,48	47,32	19,78	
Gesamt**	4,95	1,85	3,90	0,86	0,29	16,92	8,85	1,53
	Mg	Mn	Na	Ni	O	P	Pb	S
< 63 µm	2,14	0,4	2,7	0,2	42,46	0,25	2,34	0,34
63-125 µm	2,03	0,46	2,85	0,21	43,34	0,28	2,95	0,28
125-250 µm	2,01	0,37	3	0,15	41,78	0,24	2,09	0,28
250-500* µm	0,34	0,13		0,45	8,95		2,59	0,02
> 500* µm	0,25	0,22		0,89	7,57		0,07	0,02
Gesamt**	1,63	0,37	2,17	0,34	34,52	0,20	2,12	0,23
	Si	Sn	Sr	Ti	Zn	Zr		
< 63 µm	16,16	0,8	1,85	1,23	2,02			
63-125 µm	16,19	1,38	2,16	0,82	1,76			
125-250 µm	15,41	0,83	2,07	0,83	1,66			
250-500* µm	1,74	3,27	0,11	0,11	0,39	0,02		
> 500* µm	2,08	2,28	0,11	0,15		0,02		
Gesamt**	12,71	1,44	1,60	0,74	1,39	0,00		

* errechnete Werte aus Legierung- und Schlackenzusammensetzung.

** gewichtet nach den Anteilen der Siebfraktionen.

Tabelle 16: Zusammenfassende Darstellung der Recherchen zum SdT, Spannbreiten aus der Literatur, Festlegung des Stands der Technik und Einordnung einer Beispielanlage nach SdT [Hoffmann 2016; Mancke 2016].

Spannbreiten aus der Literatur	[Kuchta und Enzner 2015]	Beispielanlage SdT	Definition SdT
Zusammensetzung Aschen/Schlacken			
85-90 % Mineralik	89 % Mineralik	-	89 % Mineralik
1-5 % Unverbranntes	0-6 %, 0,9% Unverbranntes	-	1-4 % Unverbranntes
7-10 % Fe und NE	7-10 % Metalle	13,7 % Fe und NE	7-10 % Metalle
Rückgewinnung Fe			
5-11 %	7,7 % (ohne Schutt)	10,69 % (106,9 kg/Mg)	7,7 %
Zwischen 7 und 8 % am häufigsten genannt			
Recyclingquote Fe			
55-92,5 %.	Rückgewinnungseffizienz: 92,5 %	90-94 %	82-92,5 %
92,5 % am häufigsten genannt	82 % (Mittel)		
Rückgewinnung NE			
0,7-3,5 %.	1,3 % (ohne Schutt)	1,3 % (13 kg/Mg)	1,3 %
zwischen 1 und 2 % am häufigsten genannt			
Recyclingquote NE			
11-50 %.	11 %	60-63 %	11-63 %
11-34 % oft genannt	56 % (Mittel)		
Verfahren			

MVA => Nassentschlackung	MVA => Nassentschlackung + Abscheidung Fe grob	MVA => Abscheidung Fe grob in 1. Stufe	Nassent- schlackung + Abscheidung Fe grob an MVA
keine Vorlagerung oder max. 4 Wochen	sofortige Weiterbehandlung; Alterung: 4 Wochen (max. 3 Monate)	Alterung vor 2. Stufe	0-12 Wochen 4 Wochen
2 bis 4 Magnetabscheider	5 Fe-Abscheider	4 Fe-Abscheider	5 Fe- Abscheider
2 bis 3 NE- Abscheider	5 NE-Abscheider	3 NE-Abscheider	5 NE- Abscheider
3 bis 4 Siebe	4-5 Fraktionen => 1-2 Siebe	2 Fraktionen, 3 Siebe	2 Siebe
1x Windsichtung	1 Windsichter		1 Windsichter
1x Prallmühle	Zerkleinerung nur bei 20 % (weitergehende Technik nur bei 20 %)	2 Prallmühlen	Keine Prallmühle
erzeugte Korngrößen zu Behandlung => feinste Siebgröße			
Absiebung kleinste Fraktion bei 2-4 mm. Weitere Siebungen bei 10-15 mm, ab 30 mm und größer Gängige Fraktionen 0-4 mm, 4-15 mm, 15-32 mm, > 32 mm (Kersting 2015)	> 2 mm	> 32 (40) mm 12 - 32 (40) mm 0 - 12 mm	> 2 mm
Schuttabzüge (Verschmutzungsgrade)			
NE 15-60 %, durchschnittlich 35 %	1,1 % (Summe Output) NE: 10-60 %,	NE: 35 %	NE: 35 %

	30 %		
Fe bis zu 30 %		Fe: 10 %	Fe: bis zu 30%
Entledigung Mineralik			
Straßenbau, Deponiebau, Lärmschutzwände, Auffüllungen im Industrie- und Gewerbebau, Deponierung	Keine Angabe	Mineralischer Ersatzbaustoff	Mineralischer Ersatzbau- stoff oder Deponierung
Anlagendurchsatz			
	4,4 Mio. Mg Aschen/Schlacken pro Jahr in Deutschland und Behandlung in 36 Anlagen; „hoher“ Durchsatz: > 220.000 Mg/a	75.000 Mg/a	120.000 Mg/a (rechnerischer Durchschnitt)
	rechnerischer MW: ca. 120.000 Mg/a (ca. 75 Mg/h bei 230 Ad/a, 7 h/d)		

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 D

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt D:

Metallurgische Verwertung

ausführende Stelle:

**HZG- Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und
Küstenforschung GmbH, Institut für Werkstoffforschung, Abteilung
Nanotechnologie**

Projektleiter:	Dr. Martin Dornheim
Autor und Projektwissenschaftler:	Dr. Jose M. Bellosta von Colbe
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2012 - 30.06.2015,

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	4
1 Aufgabenstellung	4
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
II Eingehende Darstellung	6
1 Resultate des Forschungsvorhabens	6
a. AP 4	6
a.1. Herstellung von NaAlH_4	6
a.1.1. Charakterisierung der Al-Fraktion	6
a.1.2. NaAlH_4 Herstellungsprozess	7
a.1.3. Charakterisierung des hergestellten Produktes	8
a.1.3.1. Röntgendiffraktometrie	8
a.1.3.2. DSC	9
a.2. Synthese von Wasserstoff mittels Hydrolyse von Al	10
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	12
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	12
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	12
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	12
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende	13
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	13
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	13
6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	13
6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	13
6.2 Geplante Veröffentlichungen	13

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Röntgendiffraktogramm der gemahlene und gesiebte MV-Schlacke (metallgraue Fraktion). Die drei Spitzen rechts sind als Aluminium indexiert.....	6
Abb. 2: Aufzählung der Gewichtsprozente an verschiedenen Atomen auf Basis eines EDX-Spektrum der Fläche der Probenfraktion, die im Röntgendiffraktometer einen hohen Anteil an Al aufgewiesen hatte.....	7
Abb. 3: Aufzählung der Gewichtsprozente an verschiedenen Atomen auf Basis eines EDX-Spektrum der Fläche der Probenfraktion, die im Röntgendiffraktometer keinen hohen Anteil an Al aufgewiesen hatte und deswegen nicht für die weitere Nutzung als Wasserstoffspeichermaterial oder zur Generierung von Wasserstoff genutzt werden kann. .	7
Abb. 4: Druck und Temperatur vs. Zeit für den Mahlvorgang der aluminiumreiche Fraktion.	8
Abb. 5: Röntgendiffraktogramme einer Probe von Tartech nach erfolgreicher Hochdruckmahlung mit NaH unter Wasserstoffatmosphäre.	9
Abb. 6: DSC Kurven für Proben, die während des Mahlens von einer Tartech Al-Probe und NaH nach unterschiedlichen Mahlzeiten entnommen wurden.	10
Abb. 7: Graphik der Stabilität von Aluminium unter verschiedenen pH-Werte als flächenbezogene Massenverlustrate vs. pH.....	11

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des ATR Projektes wurde unter anderem die Verwertung von verschiedenen Metallen, die sich in den Rostaschen wiederfinden, untersucht. Von Interesse für das HZG ist Aluminium. Da sich Al < 3 mm nicht mehr für eine direkte Verwertung durch Einschmelzen eignet (zu hoher Anteil an Al_2O_3) werden bei HZG alternative Verwertungswege untersucht: Synthetisierung von Wasserstoffspeichermaterialien und Gewinnung von Wasserstoff.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Rostaschen, die mittels des Prallzerkleinerungsverfahrens, welches von Tarteck entwickelt wurde, behandelt wurden, ergeben eine Fraktion, die hauptsächlich aus Aluminiumpartikeln mit einer Größe unter 3 mm besteht. Diese Partikel können nicht wieder in den Aluminiumherstellungsverfahren verwertet werden, da ihr Anteil an Al_2O_3 zu groß ist. Die Unterbringung dieser Fraktion in einer Mülldeponie führt zur Emission von Wasserstoff, da Regenwasser sich den Weg zu den Partikeln bahnt und dort, unter Bildung eines basischen Milieus, mit dem Aluminium reagiert. Diese Reaktion ist exotherm, weswegen die Deponieteile, wo das Aluminium untergebracht worden ist, für mehrere Monate auffallend warm werden. Außerdem stellt die Mischung von Wasserstoff und Umgebungsluft ein Explosionsrisiko dar.

Unter diesen Voraussetzungen wurde das Vorhaben durchgeführt mit dem Ziel, eine Verwertung dieser Aluminiumfraktion zu finden und gleichzeitig die bisher bekannten Risiken und Unannehmlichkeiten zu vermeiden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde, aufgrund der geringen finanziellen Mitteln, die für HZG zur Verfügung standen (und die Kürzung, die bei diesen Mitteln während des Projektes stattfand), auf einfachste Art und Weise geplant und durchgeführt:

- Beschaffung einer Probe (ca. 1 kg) der Al Fraktion < 3mm aus den mit dem neuartigen Prallzerkleinerungsprozess verarbeiteten Rostaschen.
- Test der Verwertung dieser Al-Fraktion zur Herstellung von Wasserstoffspeichermaterialien (in diesem Fall, NaAlH_4):
 - Vermahlen zusammen mit den anderen Rohmaterialien (NaH und TiCl_3 als Additiv) unter Wasserstoffatmosphäre und Messung der Druckminderung als Signal für die Synthese von NaAlH_4 .

- Analyse des Produktes:
 - Röntgendiffraktometrie.
 - EDX.
 - Zyklisierung in einer Sievert'sche Apparatur mit Röntgendiffraktometrie nach bestimmten Intervallen, um die Phasenbildung zu verfolgen.
- Die Verwertung des Aluminiums zur Produktion von Wasserstoff konnte nur im Rahmen einer bibliographischen Suche untersucht werden, da die Mittel, die für die Beschaffung der Apparaturen, mit denen diese Tests durchgeführt werden sollten, gestrichen wurden.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Vor Projektbeginn war bekannt, dass Al, zermahlen mit NaH und ein geeigneter Additiv (wie z. B. TiCl_3), zur Bildung eines Gemisches führt, welches unter Wasserstoffatmosphäre und den geeigneten Druck- und Temperaturbedingungen in der Lage ist, bis zu 4,5 Gew.% Wasserstoff einzulagern. Diese Wasserstoffspeicherreaktion ist reversibel. Es wurde außerdem gezeigt, dass das Mahlen unter Wasserstoffdruck (ca. 100 bar) direkt zur Bildung von NaAlH_4 führt, ohne eine Temperierung des Gemisches zu bewerkstelligen.

Die unbekannte Frage zu Beginn des Projektes bezüglich der Verwendung von Schlacke-Al zur Herstellung von Wasserstoffspeichermaterialien war, wieviel von dem Al, welches in der Asche (auch genannt MV-Schlacke) vorhanden ist, in der Lage ist, zu NaAlH_4 zu reagieren. Es war überhaupt unbekannt, ob derart verunreinigtes Aluminium reagieren würde und wenn ja, mit welcher Geschwindigkeit. Die Speicherkapazität des entstandenen Produktes war auch eine unbekannte Größe.

Die Verwertung des Aluminiums < 3 mm zur Herstellung von Wasserstoff durch Reaktion mit Wasser wurde angestoßen, da es den Betreibern von Mülldeponien bekannt war, dass dieses Aluminium in der Deponie nach einiger Zeit die Emission von Wasserstoff unter Mitwirkung des Regens hervorrief. Diese in der Mülldeponie wegen der Gefahr von Explosionen und die Wärmeentwicklung unerwünschte Reaktion könnte unter kontrollierten Bedingungen aber zu einer zusätzlichen Einkommensquelle werden, wenn sie denn wirtschaftlich durchgeführt werden könnte. Wissenschaftlich-technisch wird mit dieser Art der Verwendung von Abfallstoffen aber Neuland betreten.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

HZG hat die Aluminium Probe von Partner Tarteck bekommen. Ansonsten war keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen notwendig.

II Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. AP 4

Die Arbeiten von HZG im Projekt ATR waren gänzlich auf Arbeitspaket 4 konzentriert. Wie schon in der kurzen Beschreibung der Planung und Durchführung des Projektes oben erwähnt, sind zwei Aktivitäten zur Verwertung der Al-Fraktion < 3 mm hauptsächlich verfolgt worden: die Herstellung von NaAlH_4 und die Synthese von Wasserstoff.

a.1. Herstellung von NaAlH_4

Die Untersuchungen zur Herstellung von NaAlH_4 wurden mit den folgenden Resultaten durchgeführt:

a.1.1. Charakterisierung der Al-Fraktion

Die ersten Proben Aluminium-haltiger MV-Schlacke wurden an das HZG von Tarteck eigenhändig übergeben worden. Ein Teil davon wurde in einem ersten Schritt für 30 Sek. in einer SPEX Mühle vermahlen. Das resultierende Pulver wurde einer Röntgendiffraktionsanalyse unterzogen. Leider ergab die Analyse, dass die untersuchten Proben keine nennenswerten Anteile an Aluminium aufwiesen.

Da die Proben aus einem Los kamen, was eindeutig Al enthielt und daher eine signifikanter Gehalt an Aluminium zu erwarten war (Aussage von Tarteck), ist in einen zweiten Schritt ein Teil der Probe mit geringerer Energie wieder 30 Sek. lang vermahlen worden. Das Material wurde danach gesiebt und zwei unterschiedliche Fraktionen konnten identifiziert werden. Die eine war ein helles Pulver, das vermutlich Oxyde enthielt. Die andere Fraktion bestand aus linsengroßen, metallgrauen Partikeln. Diese wurden wieder mittels Röntgendiffraktion analysiert. Das Ergebnis war, dass sie zu fast 100 % aus Aluminium bestanden (siehe Abb. 1).

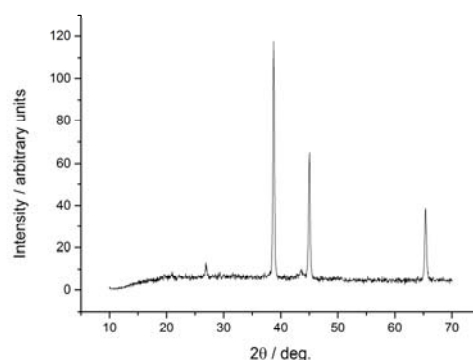


Abb. 1: Röntgendiffraktogramm der gemahlten und gesiebten MV-Schlacke (metallgraue Fraktion). Die drei Spitzen rechts sind als Aluminium indexiert.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Proben wurde mittels EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) gemessen. Wie in der Aufzählung nach Atomen (ohne Sauerstoff

und Kohlenstoff) des Probesteils mit hohem Anteil an Aluminium zu sehen ist (**Abb. 2**), ist der Anteil an Al auf der Oberfläche sehr hoch.

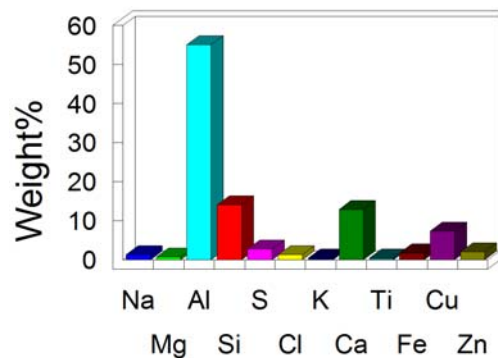


Abb. 2: Aufzählung der Gewichtsprozent an verschiedenen Atomen auf Basis eines EDX-Spektrum der Fläche der Probenfraktion, die im Röntgendiffraktometer einen hohen Anteil an Al aufgewiesen hatte.

Allerdings sind auch relativ hohe Anteile an Silizium und Kalzium zu verzeichnen. Dies ist zu erklären, in dem das EDX-Spektrum des Probesteils, was abgesiebt worden war, als Vergleich hinzugezogen wird. Diese „Kruste“, die vorher abgetrennt wurde, besteht zum größten Teil aus Silizium und Kalzium (vermutlich in Form von Oxiden), siehe Abb. 3. Daher ist es nicht verwunderlich, dass auf der Oberfläche der linsengroßen Partikeln, die in Zukunft im Fokus unserer Studie stehen werden, noch Überreste von diesen Atomen zu detektieren sind.

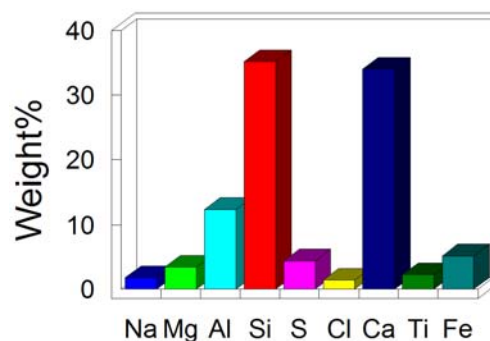


Abb. 3: Aufzählung der Gewichtsprozent an verschiedenen Atomen auf Basis eines EDX-Spektrum der Fläche der Probenfraktion, die im Röntgendiffraktometer keinen hohen Anteil an Al aufgewiesen hatte und deswegen nicht für die weitere Nutzung als Wasserstoffspeichermaterial oder zur Generierung von Wasserstoff genutzt werden kann.

Im nächsten Schritt des Vorhabens wurde nun die Eignung dieser Al-haltigen Schlackenfraktion zur Wasserstoffspeicherung untersucht.

a.1.2. NaAlH_4 Herstellungsprozess

Die aluminiumreiche Fraktion wurde zur Synthese von Natriumalanat verwendet. Dafür wurde sie in einer Hochenergiemühle unter Wasserstoff zusammen mit Natriumhydrid und TiCl_3 gemahlen. Die Entwicklung von Druck und Temperatur während dieses Vorganges wurde mitgeschnitten und kann in Abb. 4 gesehen werden.

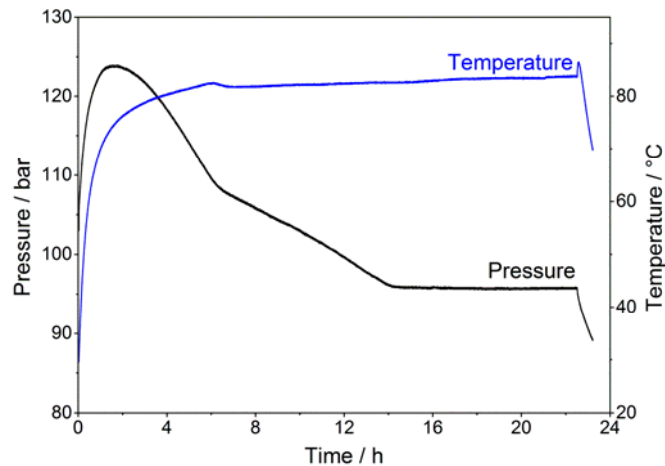


Abb. 4: Druck und Temperatur vs. Zeit für den Mahlvorgang der aluminiumreiche Fraktion.

Die Druckkurve zeigt 4 Bereiche:

1. Ein Anstieg des Druckes von 0 bis ca. 2 Stunden. Der Ursprung dieses Anstieges ist die Reibenergie zwischen Kugeln und Mahlgut, die auch die Temperatur ansteigen lässt.
2. Ein steiler Abfall des Druckes zwischen 2 und ca. 6 Stunden zeigt die Bildung von Na_3AlH_6 , der erste Schritt der Bildung von Natriumalanat.
3. Ein weiterer Abfall des Druckes zwischen 6 und ca. 14 Stunden: es korrespondiert zur Bildung von NaAlH_4 , Natriumalanat. Diese Reaktion ist langsamer, daher die geringere Steigung der Kurve.
4. Nach ca. 15 Stunden stabilisiert sich der Druck, ein Zeichen davon, dass die Reaktion zu Ende ist.

damit ist gezeigt worden, dass es möglich ist, mit der aluminiumreiche Fraktion der Schlacke ein Wasserstoffspeichermaterial zu synthetisieren.

Im nächsten Schritt des Vorhabens wurde über die Charakterisierung der gemahlten Probe der Beweis der Synthese von Natriumalanat erbracht, welches während der Mahlung klar angedeutet wurde.

a.1.3. Charakterisierung des hergestellten Produktes

a.1.3.1. Röntgendiffraktometrie

Die Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie (**Abb. 5**) wurde so durchgeführt, dass geringfügige Mengen aus dem Mahlbehälter nach 5, 10 und 24 Stunden entnommen wurden.

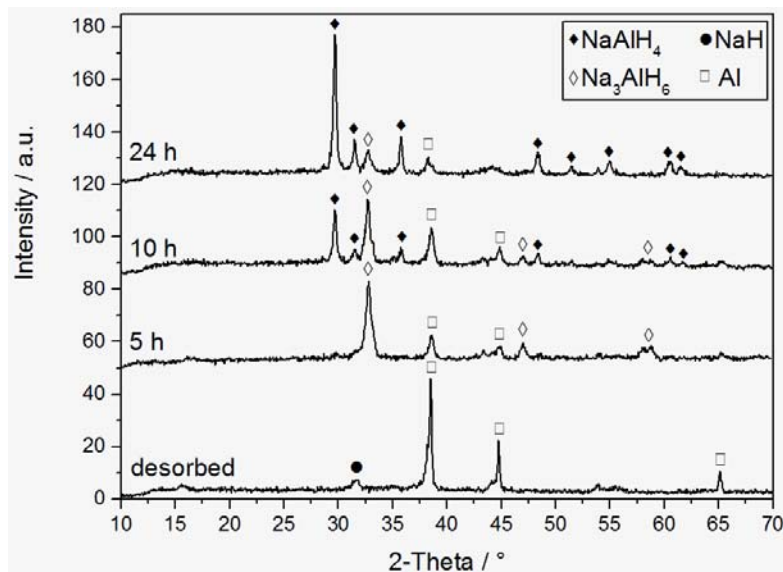


Abb. 5: Röntgendiffraktogramme einer Probe von Tartech nach erfolgreicher Hochdruckmahlung mit NaH unter Wasserstoffatmosphäre.

Die Menge wurde bewusst auf wenige Milligramm reduziert, um die Dynamik (Ratio von Bällen zu Materialprobe) nicht während des Mahlens zu verändern. Das Diffraktogramm zeigt, dass die Probe nach 5 Stunden hauptsächlich aus der Zwischenstufe Na_3AlH_6 besteht, zusammen mit nicht konvertiertem Aluminium. Nach 10 Stunden sind schon deutliche Signale von NaAlH_4 zu sehen. Nach 24 Stunden hat sich der größte Teil der Probe in NaAlH_4 verwandelt. Es gibt aber noch kleine Mengen von Al und Na_3AlH_6 . Nach einer Desorption in der DSC Apparatur von HZG ist zu sehen, dass die Probe vollständig entladen ist und nur noch NaH und Al detektierbar sind.

a.1.3.2. DSC

Die DSC Analyse der Probe (Abb. 6) zeigt, dass sie sich wie erwartet entladen lässt, wenn die Temperatur ca. 180 °C erreicht, sofern sie hauptsächlich aus Na_3AlH_6 besteht. Dies ist der Fall für die Proben, die nach 5 und 7,5 Stunden aus dem Mahlbehälter entnommen wurden. Die Entladung zeigt sich durch ein endothermisches Peak nach oben. Nach 10 Stunden Mahlzeit zeigt die DSC-Kurve, dass eine kleine Menge NaAlH_4 schon bei ca. 140 °C ihr Wasserstoff abgibt. Dies ist bei der Probe, die nach 24 Stunden entnommen wurde, ganz deutlich. Das Signal von Na_3AlH_6 ist aber in beiden Fällen immer noch überwiegend vorhanden, was auf die unvollständige Konversion von NaH und Al in NaAlH_4 während des Mahlprozesses hinweist.

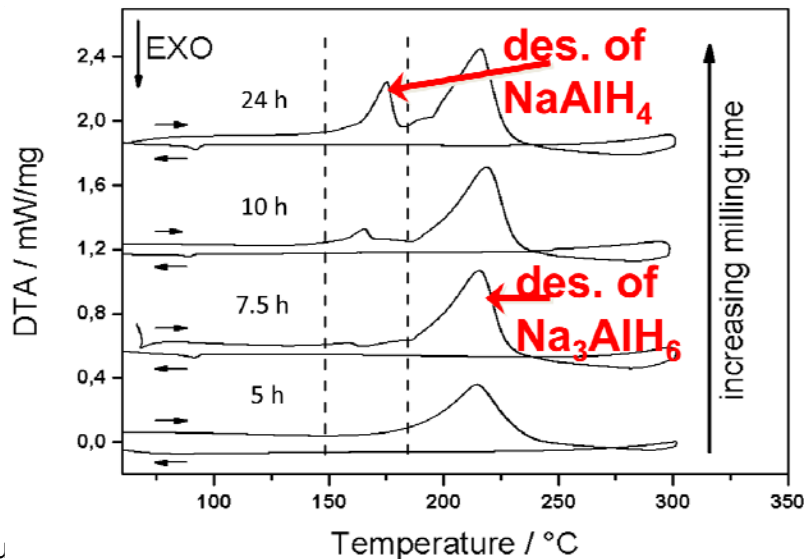


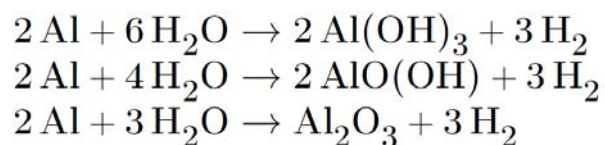
Abb. 6: DSC Kurve von Al-Probe und NaH nach unterschiedlichen Mahlzeiten entnommen wurden.

Al-Probe und

a.2. Synthese von Wasserstoff mittels Hydrolyse von Al

Die zweite Verwendung von Aluminium aus dem TARTECH-Verfahren ist die Herstellung von Wasserstoff. Dieser Prozess findet spontan statt, wenn das Aluminium unter den bisher üblichen Bedingungen entsorgt wird. Dafür wird das Material in großen Haufen unter freiem Himmel gelagert und mit Erde bedeckt. Es ist bekannt, dass durch das durchsickernde Wasser ein Milieu entsteht, in dem das Aluminium oxidiert und Wasserstoff entsteht. Es ist auch bekannt, dass dabei große Mengen Wärme entstehen. Die Prozesse, die dabei stattfinden, gilt es hier zu untersuchen. Das Ziel ist, ein Prozess so weit zu definieren, dass die Reaktanden, die eine vollständige Umsetzung des Aluminiums und eine Maximierung der Wasserstoffproduktion erlauben, bekannt werden. Außerdem sollen die Bedingungen und die Produkte definiert werden, insbesondere was ihre Toxizität bzw. Umweltverträglichkeit angeht. Leider ist die Literatur in dieser Hinsicht etwas unzureichend bzw. die Chemie so komplex, dass die Vorbereitungen umfangreicher gewesen sind, als erwartet.

Die Reaktionen, die zu erwarten sind, sind unterschiedlich, je nach Umgebung. Die reine Oxidation von Aluminium kann in wässriger Lösung schon mindestens drei Wege einschlagen:



Dabei ist bemerkenswert, dass in alle drei Fällen nur die Menge an Wasser, die in der Reaktion umgesetzt wird, variiert. Sowohl die Aluminiummenge, die aufgebraucht wird, wie auch die Wasserstoffmenge, die produziert wird, sind gleich. Das bedeutet dass, unter Überschuss Wasser, es a priori nicht möglich ist, anhand der Menge Wasserstoff, die produziert worden ist zu unterscheiden, welche Reaktion stattgefunden hat.

In der Praxis ist aber die reine Oxidierung von Al nicht unter Zimmerbedingungen möglich (was erklärt, warum Al als Strukturwerkstoff auch regenresistent ist). Der Grund ist die Aluminiumoxidschicht, die sich auf der Oberfläche von Aluminium in Kontakt mit Luft bildet (wenige Mikrometer stark), welche verhindert, dass der Rest des Aluminiums oxidiert wird, da sie luftundurchlässig ist. Diese bei Strukturwerkstoffen wünschenswerte Eigenschaft ist in

unserem Fall hinderlich. Es gilt deshalb, Bedingungen zu finden, unter welchem diese Schicht instabil wird. Die entscheidende Variable dafür ist der pH-Wert (siehe Abb. 7).

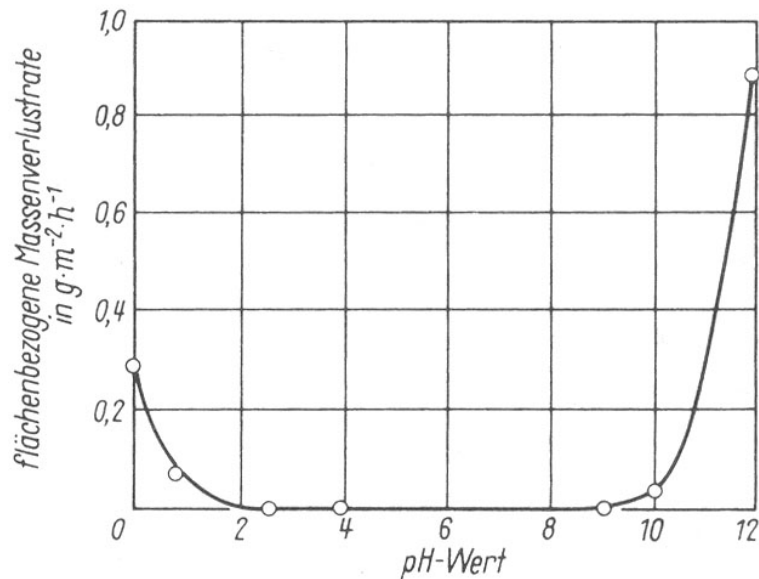
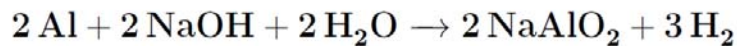


Abb. 7: Graphik der Stabilität von Aluminium unter verschiedenen pH-Werte als flächenbezogene Massenverlustrate vs. pH.

Bei neutralem pH (ca. 3 bis 8,5) ist Al extrem stabil und verliert Masse wegen Oxidation in nicht nennenswertem Maße. In säuerlichem oder insbesondere basischem Milieu dagegen, können die Oxidierung von Aluminium und die Produktion von Wasserstoff zügig vorangehen.

Aus diesem Grunde war es geplant, die Versuche, die die Charakterisierung der Wasserstoffproduktion zum Ziel haben, in basischer Lösung / Suspension stattfinden zu lassen. Bei Nutzung von NaOH als pH-Wert Setzer kann aber eine andere Reaktion stattfinden:



Das Produkt ist dann kein Aluminium Oxid, Hydroxid oder Oxid-Hydroxid wie oben beschrieben sondern Natriumaluminat. Die Reaktion ist auch exothermisch und, in Lösung, wird vermutlich zu Spezies wie $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ oder $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_4]^-$ führen. Das bedeutet, dass die Trocknung der Produkte auch von Bedeutung ist: Welche Salze unter welchen Bedingungen generiert werden war einer der Aufgaben dieser Untersuchung.

Aufgrund der Mittelkürzung, die während des Projektes stattfand, war es nicht möglich, die oben genannten Untersuchungen zu durchführen.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

1	2	3	4
Position Gesamtvor- kalkulation	Entstandene Kosten insgesamt bis einschl.2015	Anerkannte Kosten insgesamt bis einschl. 2014	Gesamtvorkalkulation
0813	5.310,26		6.356,25
0823	0,00		0,00
0837	54.116,88		44.502,15
0838	4.563,02		5.000,00
0847	0,00		0,00
0848	0,00		0,00
0850	0,00		0,00
0856	0,00		0,00
0860	6.399,02		7.038,75
Summe:	70.389,18		62.897,15

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren Notwendig, da es extrem wichtig ist, günstige Rohstoffe für die Metallhydride zu finden, wenn diese Technologie etabliert und für die Zwecke einer nachhaltigen Energieversorgung eingesetzt werden soll. Angemessen waren sie auch, da sie einen übersichtlichen Umfang hatten und trotzdem die gewünschten Informationen lieferten. Nur die aus Gründen der Budgetkürzung nicht durchgeführten Arbeiten im Bereich der Wasserstoffherstellung durch Hydrolyse von Aluminium sind logischerweise ohne experimentelle Ergebnisse geblieben. Die Literaturrecherche hat aber vielversprechende Resultate ergeben, die vermuten lassen, dass diese Art der Verwertung durchaus möglich und effizient sein könnte.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Da die Ergebnisse von HZG ausschließlich wissenschaftlich ausgewertet werden, liegt es an den anderen Teilnehmer des Projektes zu entscheiden, ob sie an einer wirtschaftlichen Verwertung interessiert sind. Momentan ist damit nicht zu rechnen, da die Firmen, für die diese Ergebnisse bekannt geworden sind, Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden nicht als Kerngeschäft zählen. In Zukunft aber, wenn Energieunternehmen von der Möglichkeit erfahren, durch extrem günstige Rohmaterialien wie die, die aus den Rostaschen kommen, erschwingliche Wasserstoffspeicher zu bauen, sind die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten gut.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projekt-ende

Die wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten sind hervorragend, da die gute Ergebnisse dieser Untersuchungen schon zu einer ersten Publikation geführt haben (siehe unten), sondern auch dazu, dass andere, als „Müll“ zu bezeichnende Materialien für die Herstellung von Wasserstoffspeicher in Betracht gezogen wurden.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Wie oben erwähnt, sind schon bei HZG Arbeiten angelaufen, die andere, sich im Abfall befindende Materialien für die Herstellung von Wasserstoffspeicher verwerten. Darüber hinaus ist es geplant, außerhalb von ATR die Untersuchungen zur Verwertbarkeit der Al Proben für die Herstellung von Wasserstoff zu Ende zu bringen und zu publizieren. Ein weiteres Projekt in dieser Richtung ist nicht ausgeschlossen.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Es sind keine anderen Stellen bekannt, bei welchen auf dem Gebiet des Auftrags irgendwelche Aktivitäten unternommen werden.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

N. Bergemann, C. Pistidda, C. Milanese, A. Girella, B.R.S. Hansen, J. Wurr, J.M. Bellosta von Colbe, J. Jepsen, T.R. Jensen, A. Marini, T. Klassen, M. Dornheim, NaAlH₄ production from waste aluminum by reactive ball milling, Int. J. Hydrogen Energy, (2014). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.025>

6.2 Geplante Veröffentlichungen

Es sind keine weiteren Veröffentlichungen im Rahmen von ATR geplant.

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 E

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt E:

Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

ausführende Stelle:

**Stadtreinigung Hamburg AöR
Bullerdeich 19, 20357 Hamburg**

in Zusammenarbeit mit:

**Technische Universität Hamburg-Harburg
Abfallressourcenwirtschaft
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
Harburger Schlosstraße 36, 21079 Hamburg**

Projektleiter:	Dr. Stefan Lübben
Autor und Projektwissenschaftler:	Dr. Stefan Lübben, M.Sc. Verena Enzner
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2012 - 30.06.2015, kostenneutral verlängert bis 31.12.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	9
1 Aufgabenstellung	9
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	10
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	13
3.1 Methodik	16
3.1.1 α -Linie	17
3.1.1.1 Probenahme.....	17
3.1.1.2 Probenaufbereitung – Qualitätsbestimmung.....	17
3.1.2 β -Linien.....	19
4. Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	21
4.1 Schlackezusammensetzung	21
4.2 Abgelagerte Schlacken	22
4.3 Schlackeaufbereitung	22
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	24
II Eingehende Darstellung	25
1 Resultate des Forschungsvorhabens	25
a. Eingesetzte Schlackemengen	25
a.1. Versuch 1	25
a.2. Versuch 2	25
a.3. Versuch 3	26
a.4. Versuch 4	26
a.5. Versuch 5	27
a.6. Versuch 6 (Referenzversuch)	28
a.7. Versuch 7	30
b. Eingesetzte Schlackequitäten	31
b.1. Versuch 1-3 (SI, SII und SII)	31
b.2. Versuche 4 und 5 (MVR-R und MVR-V)	32
b.3. Versuche 6 und 7 (MVB-R und MVB-V)	32
c. Versuchsdurchführung	32
d. Beschreibung der Alpha-Linie.....	33
d.1. Anlagen- und Verfahrensbeschreibung.....	33
d.2. Grundfließbild / Verfahrensfliessbild	38

e.	Versuchsergebnisse Massenbilanz.....	39
e.1.	Versuch 1	39
e.2.	Versuch 2	41
e.3.	Versuch 3	42
e.4.	Versuch 4	43
e.5.	Versuch 5	44
e.6.	Versuch 6 (Referenzversuch)	46
e.7.	Versuch 7	48
f.	Versuchsergebnisse Qualität.....	49
f.1.	Versuch 1 (SI)	50
f.1.1.	Eisen fein	50
f.1.2.	Eisen grob	51
f.1.3.	NE-Metalle	52
f.1.4.	Rostfreier Stahl (VA)	52
f.1.5.	Oxide	53
f.1.6.	Inert	53
f.1.7.	Unverbranntes	54
f.2.	Versuch 2 (SII)	55
f.2.1.	Eisen fein	55
f.2.2.	Eisen grob	55
f.2.3.	NE-Metalle	56
f.2.4.	Rostfreier Stahl (VA)	56
f.2.5.	Oxide	57
f.2.6.	Inert	57
f.2.7.	Unverbranntes	58
f.3.	Versuch 3 (SIII)	58
f.3.1.	Eisen fein	58
f.3.2.	Eisen grob	59
f.3.3.	NE-Metalle	59
f.3.4.	Rostfreier Stahl (VA)	60
f.3.5.	Oxide	60
f.3.6.	Inert	61
f.3.7.	Unverbranntes	61

f.4.	Versuch 4 (MVR R)	61
f.4.1.	Eisen fein	62
f.4.2.	Eisen grob	62
f.4.3.	NE-Metalle	62
f.4.4.	Rostfreier Stahl (VA)	63
f.4.5.	Oxide	63
f.4.6.	Inert	63
f.4.7.	Unverbranntes	64
f.5.	Versuch 5 (MVR V)	64
f.6.	Versuch 6 (MVB R)	64
f.6.1.	Eisen fein	66
f.6.2.	Eisen grob	66
f.6.3.	NE-Metalle	67
f.6.4.	Rostfreier Stahl (VA)	67
f.6.5.	Oxide	67
f.6.6.	Inert	68
f.7.	Versuch 7 (MVB V)	68
f.7.1.	Eisen fein	68
f.7.2.	Eisen grob	69
f.7.3.	NE-Metalle	69
f.7.4.	Rostfreier Stahl (VA)	70
f.7.5.	Oxide	70
f.7.6.	Inert	70
f.7.7.	Unverbranntes	71
f.8.	Zusammenfassung qualitative Bilanzierung	72
f.8.1.	Eisen fein	72
f.8.2.	NE-Metalle	72
f.8.3.	Oxide	75
f.8.4.	Inert	76
f.9.	Berechnung Gesamtmetallanteil	78
g.	Versuchsergebnisse Energiebilanz	80
h.	Beschreibung der Beta-Linie	81
h.1.	Anlagen- und Verfahrensbeschreibung	81

h.2.	Grundfließfließbild / Verfahrensfließbild.....	84
i.	Versuchsergebnisse Massenbilanz	86
j.	Versuchsergebnisse Qualität.....	88
j.1.	Beta I Linie.....	88
j.1.1.	Wassergehalt	88
j.1.2.	Siebkenlinien.....	88
j.1.3.	Manuelle Sortierung	90
j.2.	Beta II Linie	91
j.2.1.	Wassergehalt	91
j.2.2.	β II.....	91
j.2.2.1.	Siebkenlinien.....	91
j.2.2.2.	Magnetische Trennung Oxidfraktion.....	93
j.2.2.3.	XRD-Analyse	94
j.2.2.4.	Nasschemische Analyse	96
k.	Versuchsergebnisse Energiebilanz	97
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	99
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	100
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungs-plans	100
4.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	100
4.2	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projekt-ende	101
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	101
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	101
6	Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge.....	103
6.1	Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	103
6.2	Geplante Veröffentlichungen.....	104
7.	Quellen	104
8.	Anhang	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schlackeaufbereitung in Stapelfeld 2012.....	23
Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Inputlager Bewirtschaftung	35
Abbildung 3: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Alpha-Linie) mit beispielhafter Mengenbilanzierung	38
Abbildung 4: Verfahrensfliessbild TARTECH-Anlage	39
Abbildung 5: Wassergehalt Proben alpha-Linie	50
Abbildung 6: Beispiele Eisen fein	51
Abbildung 7: vereinzelt Anhaftungen Eisen fein	51
Abbildung 8: Eindrücke Eisen grob	51
Abbildung 9: Eindrücke SI VA	52
Abbildung 10: Restmetallgehalte Kupfer und Silber in der Inertfraktion SI	54
Abbildung 11: Leicht- (links) und Schwerfraktion (rechts) S I Unverbranntes	54
Abbildung 12: Weiteres Unverbranntes S I	55
Abbildung 13: Eisen grob SII	56
Abbildung 14: Eindrücke rostfreier Stahl SII	57
Abbildung 15: Restmetallgehalte SII Inert	58
Abbildung 16: Eindrücke Unverbranntes SII.....	58
Abbildung 17: Eindrücke Eisen grob SIII	59
Abbildung 18: Eindrücke VA SIII	60
Abbildung 19: Restmetallgehalte SIII Inert.....	61
Abbildung 20: Eindruck Unverbranntes SIII	61
Abbildung 21: Eindrücke Eisen grob MVR R.....	62
Abbildung 22: Eindrücke rostfreier Stahl MVR R	63
Abbildung 23: Restmetallgehalte Inertfraktion MVR R	64
Abbildung 24: Eindruck Unverbranntes MVR R	64
Abbildung 25: Siebkennlinien MVB R Inert, NE 2-5, Oxide.....	65
Abbildung 26: Eindruck Eisen grob MVB R	66
Abbildung 27: Eindrücke des rostfreien Stahls MVB R.....	67
Abbildung 28: Restmetallgehalt Inertfraktion MVB R	68
Abbildung 29: Eindruck Eisen grob MVB V	69
Abbildung 30: Eindruck rostfreier Stahl MVB V	70
Abbildung 31: Restmetallgehalte Inertfraktion MVB V.....	71
Abbildung 32: Eindrücke Unverbranntes MVB V	71
Abbildung 33: magnetische Trennung Eisen fein alle Versuchsreihen	72
Abbildung 34: manuelle Sortierung NE 2-5 mm alle Versuchsreihen	73
Abbildung 35: manuelle Sortierung NE 5-18 mm alle Versuchsreihen	74
Abbildung 36: manuelle Sortierung NE 18-45 mm alle Versuchsreihen	75
Abbildung 37: magnetische Trennung Oxide 2-5 mm alle Versuchsreihen	75
Abbildung 38: magnetische Trennung Oxide 5-45 mm alle Versuchsreihen.....	76
Abbildung 39: Restkupfergehalt Inertfraktionen alle Versuchsreihen.....	77
Abbildung 40: Silberkonzentrationen in den Inertfraktionen alle Versuchsreihen ..	77
Abbildung 41: gemeinsame Darstellung Fremdanteile	78
Abbildung 42: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie), Versuchszustand	84

Abbildung 43: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie), aktualisierter Zustand	85
Abbildung 44: Verfahrensfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie)	85
Abbildung 45: ermittelte Wassergehalte β 1-Linie	88
Abbildung 46: Siebkennlinien β 1-Linie.....	89
Abbildung 47: manuelle Sortierung Schwer- (links) und Leichtfraktion β 1-Linie ...	90
Abbildung 48: Wassergehalt β II-Linie	91
Abbildung 49: Siebkennlinie β IIA	92
Abbildung 50: Siebkennlinien β IIB-Linie	93
Abbildung 51: XRD-Analyse NE angereichert β II.....	94
Abbildung 52: XRD-Analyse NE abgereichert β II.....	95
Abbildung 53: XRD-Analyse Leichtfraktion β II	95
Abbildung 54: XRD-Analyse Schwerfraktion β II	96
Abbildung 55: Darstellung der Schlackebehandlung innerhalb der MVR.....	106
Abbildung 56: Darstellung der Schlackebehandlung innerhalb der MVR.....	107
Abbildung 57: Optimierte Schlackenaufbereitung in der MVB // Quelle unveröffentlicht / pers. Mitteilung MVB.....	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herkunft und Zustand der bearbeiteten Rostaschen	17
Tabelle 2: Probenahmeplan, -umfang α -Linie	18
Tabelle 3: Probenaufbereitung α -Linie	19
Tabelle 4: Probenaufbereitung β 1-Linie	20
Tabelle 5: Probenaufbereitung β 2-Linie	20
Tabelle 6: Metallgehalte in Schlacken aus verschiedenen Untersuchungen	22
Tabelle 7: magnetischen Trennung der Fraktion S I Eisen fein	51
Tabelle 8: manuellen Sortierung S I NE-Metalle.....	52
Tabelle 9: magnetischen Trennung SI Oxide	53
Tabelle 10: magnetischen Trennung S II Eisen fein.....	55
Tabelle 11: Manuelle Sortierung S II NE-Metalle.....	56
Tabelle 12: magnetischen Trennung S II Oxide	57
Tabelle 13: magnetische Trennung SIII Eisen fein	59
Tabelle 14: manuelle Sortierung S III NE	60
Tabelle 15: magnetische Trennung SIII Oxide.....	60
Tabelle 16: magnetische Trennung MVR R Eisen fein.....	62
Tabelle 17: manuelle Sortierung MVR R NE-Metalle.....	62
Tabelle 18: magnetische Trennung MVR R Oxide	63
Tabelle 19: magnetische Trennung MVB R Eisen fein.....	66
Tabelle 20: manuelle Sortierung MVB R NE-Metalle.....	67
Tabelle 21: magnetische Trennung MVB R Oxide	68
Tabelle 22: magnetische Trennung MVB V Eisen fein.....	69
Tabelle 23: manuelle Sortierung MVB V NE-Metalle.....	69
Tabelle 24: magnetische Trennung MVB V Oxide	70
Tabelle 25: Zusammenfassung der quantitativen Bilanzierung der Outputströme .	78
Tabelle 26: Bilanz Eisen unter Einbezug des Fremdstoffanteils und des Wasseranteils	79
Tabelle 27: Bilanz Eisen unter Einbezug des nur schwach magnetischen Anteils und des Wasseranteils	79
Tabelle 28: Bilanz NE Metalle unter Einbezug des Fremdstoffanteils und des Wasseranteils.....	79
Tabelle 29: Korrekturen zur Metallvorentfrachtung aller Versuchsreihen	80
Tabelle 30: Bilanz alpha-Linie (inkl. Korrekturen)	80
Tabelle 31: Ergebnisse der manuellen Sortierung NE-Outputströme β I-Linie nach Durchlauf durch alpha-Linie.....	90
Tabelle 32: manuelle Sortierung β I Schwer- und Leichtfraktion	90
Tabelle 33: magnetische Trennung Oxide β II	94
Tabelle 34: Ergebnisse Metallgehalte β II	97
Tabelle 35: Rückgewinnungsmengen, Anzahl Abscheider, Siebgrenze: Ergebnisse einer Fragebogenauswertung.....	102

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Maßnahmen der Abfallgetrennthaltung sowie der Schlackenaufbereitung und der Wiederfindungsrate von strategischen Metallen in den Schlacken aus Verbrennungsanlagen in Hamburg.

Aufgrund der beantragten Vorgehensweise zur Vorhabensdurchführung waren folgende wesentliche Ergebnisse erwartet worden:

- Welche Gehalte an Fe- und NE-Metallen, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle, sind aus der Schlacke einer Restabfallverbrennung mittels der TARTECH-Technologie insgesamt separierbar.
- Welche Gehalte an Fe- und NE-Metallen, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle, sind aus einer bereits vorbehandelten Schlacke einer Restabfallverbrennung mittels der TARTECH-Technologie insgesamt separierbar und welche Rückschlüsse lassen sich hieraus in Bezug auf die Leistungsfähigkeit bestehender Schlackenaufbereitungstechnologien ziehen.
- Können mittels der TARTECH-Technologie auch aus bereits abgelagerten, in Deponien verbauten Schlacken Gehalte an Fe- und NE-Metallen, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle, separiert werden.
- Können aus der Monoverbrennung von E-Schrott mittels der TARTECH-Technologie wesentliche Gehalte an Fe- und NE-Metallen, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle, zurückgewonnen werden, und wenn ja, mit welcher Wiederfindungsquote.
- Über welche bauphysikalischen und chemischen Eigenschaften verfügt die nach der TARTECH-Technologie aufbereitete verbleibende Restschlacke und welche Verwertungs- und Entsorgungswege sind aufgrund der erzielten Ergebnisse gangbar.

Das Vorhaben sollte mit verschiedenen Schlackenqualitäten mit einer neu zu errichtenden Schlackenaufbereitungsanlage der TARTECH-Technologie am Standort der Deponie Damsdorf (nördlich von Hamburg) durchgeführt werden.

Insgesamt war ursprünglich am Standort Damsdorf der Durchsatz von 40.000 Mg an unterschiedlichen Schlackenqualitäten aus Hamburger Müllverbrennungsanlagen vorgesehen.

Die eigentliche Schlackenaufbereitung am Standort Damsdorf war mit einem Beginn im IV. Quartal 2013 über einen Zeitraum von 9 Monaten und einem Abschluss im II. Quartal 2014 geplant.

Die geplante Untersuchung von bereits auf der Deponie Damsdorf abgelagerten Schlacken wurde in Abstimmung mit dem Projektträger Jülich (PTJ) nicht durchgeführt (siehe hierzu auch Punkt 2.).

Auf die Durchführung der Versuche aus der Monoverbrennung von E-Schrott wurde in diesem Teilprojekt in Abstimmung mit dem PTJ verzichtet. Diese Versuche wurden alternativ im Rahmen des Teilprojektes vom Fraunhofer UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg durchgeführt.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund umfangreicher Verzögerungen bei der Standortfindung, der Finanzierung und der Realisierung der Schlackenaufbereitungsanlage hat sich die Errichtung der geplanten TARTECH-Aufbereitungsanlage und davon abhängig die gesamte Projektdurchführung erheblich verschoben.

Letztendlich wurde das Vorhaben in der neu zu errichtenden Schlackenaufbereitungsanlage der TARTECH-Technologie am Standort der TARTECH Mineralikaufbereitung GmbH in Wiesbaden durchgeführt.

Die verbleibenden vorhabenswesentlichen Versuche wurden im IV. Quartal 2014 begonnen und im III. Quartal 2015 abgeschlossen.

Die TARTECH-Anlage wurde in einem hierfür vorgehaltenen und geeigneten Bereich auf einer Nebenfläche der Deponie Dykerhoffbruch aufgestellt und betrieben.

Die nach den Versuchen verbleibende Restmineralik wurde im Wesentlichen auf den geeigneten Einbauf Flächen der Deponie Dykerhoffbruch deponietechnisch verwertet.

Im Rahmen des Teilprojektes E werden folgende unterschiedliche Schlackequalitäten eingesetzt und untersucht:

- Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingermoor (unberaubte Schlacke, Sommermüll, ca. 1.025 Mg),
- Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingermoor (unberaubte Schlacke, Herbstmüll, ca. 495 Mg),
- Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingermoor (unberaubte Schlacke, Wintermüll, ca. 350 Mg),
- Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Rugenberger Damm (unberaubte Schlacke, ca. 910 Mg),

- Vorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Rugenberger Damm (beraubte Schlacke, ca. 500 Mg) nach 3-monatiger Carbonatisierung und zweifacher Vorentfrachtung,
- Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Borsigstraße (unberaubte Schlacke, ca. 730 Mg) (**Referenzversuch**) und
- Vorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Borsigstraße (beraubte Schlacke, ca. 350 Mg) nach Teilcarbonatisierung und Vorentfrachtung.

Insgesamt wurden im Rahmen des Vorhabens somit ca. 4.360 Mg Schlacken durchgesetzt.

Die in Wiesbaden realisierte TARTECH-Anlage besteht aus den wesentlichen Anlagenbereichen der **Alpha-Linie** und der **Beta-Linie**.

In der **Alpha-Linie** mit einer Kapazität von ca. 220.000 Mg/a (werktätlich, einschichtig mit 10 h/Tag und 220 d/Jahr) entsprechend einer Durchsatzleistung von ca. 100 Mg/h werden die carbonatisierten Schlacken mechanisch aufbereitet.

Wesentliches Kernaggregat ist der sog. TAR-Prozessor, ein Hochgeschwindigkeitsaufschluss der Schlacken, bei dem mineralische und Metallbestandteile physikalisch aufgetrennt werden (weiteres hierzu siehe Punkt II.1).

Die **Alpha-Linie** der TARTECH Mineralikaufbereitung GmbH in Wiesbaden wurde im I. Quartal 2014 in Betrieb genommen.

Alle im Rahmen des Teilprojektes E untersuchten Schlackenqualitäten wurden durch die Alpha-Linie gefahren, wobei mindestens folgende Parameter bewertet wurden:

- Mengenzbilanzierung des Gesamtprozesses (Input- und Outputbilanzierung),
- Inputanalytik der der Alpha-Linie zugeführten Schlacken auf den Wassergehalt. Auf die Bestimmung weiterer Parameter wurde wegen der sehr schwierigen, repräsentativen Probenahme verzichtet.
- Outputanalytik der der Alpha-Linie entnommenen Stoffströme auf alle vorhabensrelevanten Parameter, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle,
- Outputanalytik der in der Alpha-Linie separierten Fe- und NE-Metalle, insbesondere der strategischen Metalle sowie
- Bauphysikalische Beurteilung der der Alpha-Linie entnommenen mineralischen Reststoffe in Bezug auf zukünftige stoffliche Verwertungsmöglichkeiten (Straßenbau usw.) sowie auf veränderte Einbaueigenschaften in Bezug auf den Deponiebau.

In 2015 wurde parallel die sog. **Beta-Linie** realisiert. Sie verfügt über mehrere Aufbereitungsschritte für die weitergehende Aufbereitung der in der Alpha-Linie erzeugten Feinfraktion < 2 mm mit einer Durchsatzleistung von bis zu 8 Mg/h (weiteres hierzu siehe Punkt II.1).

Die **Beta-Linie** der TARTECH Mineralikaufbereitung GmbH in Wiesbaden wurde im Juni / Juli 2015 in Betrieb genommen.

Im Rahmen des Teilprojektes E wurde die Feinfraktion aus dem Referenzversuch (unvorbehandelte Schlacke aus der MVA Borsigstraße) in der **Beta-Linie** anteilig untersucht, wobei mindestens folgende Parameter bewertet wurden:

- Mengenzbilanzierung des Gesamtprozesses (Input- und Outputbilanzierung),
- Inputanalytik der der Beta-Linie zugeführten Feinfraktion auf alle vorhabensrelevanten Parameter, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle,
- Outputanalytik der der Beta-Linie entnommenen Stoffströme auf alle vorhabensrelevanten Parameter, insbesondere in Bezug auf strategische Metalle,
- Outputanalytik der in der Beta-Linie separierten Fe- und NE-Metalle, insbesondere der strategischen Metalle sowie
- Bauphysikalische Beurteilung der der Beta-Linie entnommenen mineralischen Reststoffe in Bezug auf zukünftige stoffliche Verwertungsmöglichkeiten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zu Vorhabensbeginn war die Realisierung und der Betrieb der TARTECH-Anlage auf der Deponie Damsdorf vorgesehen, deren Eigentümer der Wegezweckverband Segeberg (WZV) ist.

Bereits seit 2005 werden Schlacken der MVA Stelling Moor und der MVA Stapelfeld nach vorheriger Carbonatisierung und Aufbereitung auf der Deponie Damsdorf endgelagert. Insoweit war die Deponie Damsdorf aus Sicht der SRH sowohl aus logistischen als auch aus verwertungsseitigen Gründen der bevorzugte Standort für die Realisierung der TARTECH-Anlage.

Im Rahmen der ersten Projektphase, in der Zeit vom IV. Quartal 2012 bis zum IV. Quartal 2013 wurden seitens der SRH in Kooperation mit dem (WZV) und der TARTECH-AG die erforderliche Planung und Genehmigung für die Errichtung und den Betrieb der TARTECH-Anlage vorangetrieben, bis hin zur finalen Abstimmung des Genehmigungsantrages.

Auf Wunsch der TARTECH konnte dann aber eine Realisierung der TARTECH-Anlage auf der Deponie Damsdorf nicht weiterverfolgt werden.

Hintergrund hierfür waren ungeklärte Nachnutzungsvereinbarungen für die TARTECH-Anlage nach Ablauf des Vorhabens in Verbindung mit daraus resultierenden Problemen bei der Anlagenfinanzierung. Im Ergebnis musste die Realisierung der TARTECH-Anlage auf der Deponie Damsdorf verworfen werden.

Alternativ wurde seitens der TARTECH die Planung, Genehmigung und Errichtung einer TARTECH-Anlage in einem geeigneten Bereich auf einer Nebenfläche der Deponie Dykerhoffbruch vorangetrieben.

Als Ergebnis dieser Veränderungen mussten die Finanzierungs- und Terminpläne des Vorhabens mehrfach angepasst werden.

U.a. wurde auch aufgrund der veränderten Logistikanforderungen der ehemals geplante Einsatz von 40.000 Mg Schlacken aus Hamburger Verbrennungsanlagen auf ca. 4.400 Mg reduziert.

Weiterhin konnte der ursprünglich geplante Einsatz von bereits endgelagerten Schlacken der Deponie Damsdorf unter den veränderten Randbedingungen aus genehmigungsrechtlichen Gründen nicht mehr umgesetzt werden.

Die im Rahmen dieses Teilprojektes noch während der Antragsphase angedachte Erzeugung und Untersuchung von Schlacken aus der Monoverbrennung von E-Schrott wurden in Abstimmung mit dem PTJ in ein anderes Teilprojekt (Fraunhofer UMSICHT) verschoben.

Im Ergebnis verbleibt für das hier in Rede stehende Teilprojekt die Untersuchung der oben genannten unterschiedlichen Schlackenqualitäten in der Anlage der TARTECH Mineralikaufbereitung GmbH am Standort Wiesbaden.

Dabei wurden folgende Schlackenqualitäten untersucht:

Versuch 1: Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingener Moor

Schlackenqualität: Sommermüll, unberaubte Schlacke
Schlackenmenge: ca. 1.025 Mg
Anlieferdatum: KW 38 – 40 / 2014
Versuchsdatum: KW 49 / 2014
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik

Versuch 2: Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingener Moor

Schlackenqualität: Herbstmüll, unberaubte Schlacke
Schlackenmenge: ca. 495 Mg
Anlieferdatum: KW 51 - 52 / 2014
Versuchsdatum: KW 8 / 2015
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik

Versuch 3: Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Stellingener Moor

Schlackenqualität: Wintermüll, unberaubte Schlacke
Schlackenmenge: ca. 350 Mg
Anlieferdatum: KW 7 / 2015
Versuchsdatum: KW 21 / 2015
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik

Versuch 4: Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Rugenberger Damm (MVR)

Schlackenqualität: Frühjahrmüll, unberaubte Schlacke
Schlackenmenge: ca. 910 Mg
Anlieferdatum: KW 9 - 10 / 2015
Versuchsdatum: KW 21 / 2015
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik

Versuch 5: Vorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Rugenberger Damm (MVR)

Schlackenqualität: Frühjahrmüll, beraubte Schlacke nach 3-monatiger Carbonatisierung und zweifacher MVR - Aufbereitung
Schlackenmenge: ca. 500 Mg
Anlieferdatum: KW 20 - 21 / 2015
Versuchsdatum: KW 21 / 2015
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik

Versuch 6: Unvorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Borsigstraße (MVB) (Referenzversuch)

Schlackenqualität: Frühjahrmüll, unberaubte Schlacke
Schlackenmenge: ca. 730 Mg
Anlieferdatum: KW 10 / 2015
Versuchsdatum: KW 21 / 2015 (Alpha-Linie)
KW 30 / 2015 (Beta-Linie)
Anlagenteil: **Alpha-Linie und Beta-Linie**
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik / Feinfraktion

Versuch 7: Vorbehandelte Schlacke aus der Restmüllverbrennung der MVA Borsigstraße (MVB)

Schlackenqualität: Frühjahrmüll, beraubte Schlacke nach 4-wöchiger Carbonatisierung und einfacher MVB - Aufbereitung
Schlackenmenge: ca. 350 Mg
Anlieferdatum: KW 14 / 2015
Versuchsdatum: KW 21 / 2015
Anlagenteil: nur Alpha-Linie
Untersuchungsumfang: komplett, inkl. separierter Restmineralik reduziert, ohne separierte Restmineralik

Mittels der untersuchten Schlackenqualitäten sollten folgende wesentlichen Erkenntnisse gewonnen werden:

- Welchen Einfluss hat die jahreszeitabhängige Veränderung der Abfallqualität auf die Schlackenqualität, insbesondere auch auf Art und Umfang von Fe- und NE-Metallen, insbesondere von strategischen Metallen (Versuche 1 – 3) und
- Welchen Einfluss hat eine bestehende Schlackenaufbereitung entsprechend dem heutigen ‚Stand der Technik‘ auf die Separierung von Fe- und NE-Metallen, insbesondere von strategischen Metallen und welche Potenziale können durch eine weitergehende Schlackenaufbereitung mit der TARTECH-Technologie zusätzlich gehoben werden (Versuche 4 – 7).

Bei den Versuchen 1 – 5 sowie beim Versuch 7 wurden die Schlacken jeweils nur über die Alpha-Linie aufbereitet. Eine weitergehende Aufbereitung der Feinfraktion kleiner 2 mm erfolgte nicht.

In den Versuchen 1 – 7 wurden neben der Bilanzierung der Anlage von den erzeugten Metall- und Restmineralikfraktionen repräsentative Proben gezogen und weitergehend analytisch untersucht.

Der Referenzversuch 6 wurde analog zu den anderen Versuchen durchgeführt, darüber hinaus wurde aber eine Teilmenge der dabei erzeugten Feinfraktion kleiner 2 mm zusätzlich über die Beta-Linie gefahren. Dabei wurde die Feinfraktion weiter unterteilt in die Fraktionen 1 – 2 mm, 0,71 – 1 mm und < 0,71 mm. Aus den Fraktionen 1 – 2 mm und 0,71 – 1 mm wurden getrennte Schwer- bzw. Leichtfraktionen erzeugt, welche repräsentativ beprobt und anschließend analytisch untersucht wurden. Die Fraktion < 0,71 mm wurde nicht weitergehend aufgetrennt und als Ganzes analytisch untersucht.

Der Betrieb der Beta-Linie wurde ebenfalls bilanziert.

Mittels der Untersuchung der Feinfraktion in der Beta-Linie sollte folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden:

- Lassen sich aus der Feinfraktion im nennenswerten Umfang weitere NE-Metalle, insbesondere aber auch strategische Metalle und seltene Erden separieren und
- Ist eine stoffliche Verwertung der verbleibenden Restmineralik aus der Feinfraktion möglich, und wenn ja, welche Möglichkeiten bestehen.

Der Versuch 6 wird aus Sicht der SRH als Referenzversuch angesehen, da im Rahmen dieses Versuches einerseits die Möglichkeiten der Separierung von Fe- und NE-Metallen sowie von strategischen Metallen und seltenen Erden ermittelt werden sollen und andererseits zukunftsfähige Wege für die stoffliche Verwertung von erzeugten mineralischen Restfraktionen aufgezeigt werden können. Nur im Versuch 6 wurde auch das Feinkorn < 2mm betrachtet, welches besonders innovative Technologie bei der Behandlung erfordert und zudem einen beachtlichen Masseanteil der Schlacke umfasst.

Eine weitergehende Beschreibung der Versuchsabläufe, der eingesetzten Technik, der eingesetzten und erzeugten Stoffströme, der Beprobungsumfänge und der durchgeführten Analytik erfolgt in Kapitel II und ist auch den jeweiligen anliegenden Anhängen zu Kapitel II zu entnehmen.

3.1 Methodik

Tabelle 1 zeigt die Herkunft und den Zustand der verschiedenen in der Aufbereitungsanlage der TARTECH Eco Industrie in Wiesbaden aufbereiteten Rostaschen.

Tabelle 1: Herkunft und Zustand der bearbeiteten Rostaschen

		Kürzel	α -Linie inkl. Beprobung	β -Linie
Stellinger Moor	Sommerabfall	S I	X	
	Herbstabfall	S II	X	
	Winterabfall	S III	X	
MVB	Rohschlacke	MVB R	X	X
	entfrachtet	MVB V	X	
MVR	Rohschlacke	MVR R	X	
	entfrachtet	MVR V	X	

3.1.1 α -Linie

3.1.1.1 Probenahme

Zur qualitativen Outputbestimmung fand eine Probenahme in Anlehnung an die LAGA PN 98 statt. Für die NE-Metalle und Eisen fein fand die Beprobung immer aus dem Haufwerk statt und wurde deswegen zweimal täglich vorgenommen. Da die Oxide aufgrund der lokalen Gegebenheiten des Öfteren abtransportiert wurden, wurde bei der ersten Probenahme eine an der Stoffstrommenge orientierte, halbstündliche Probenahme durchgeführt. Aus 4 Einzelproben wurde jeweils eine Mischprobe erstellt. Nach Auswertung der ersten Probenahme wurde die Häufigkeit auf zwei Mischproben á 4 Einzelproben reduziert. Die Inertströme wurden jeweils direkt vom Band mit 2 Mischproben á 4 Einzelproben beprobt. Die Outputströme der Sortierkabine (VA, Unverbranntes (schwer und leicht)) sowie die Eisen grob wurden photographisch dokumentiert. Die Probenmatrix zeigt Tabelle 2, die Aufbereitung der Proben Tabelle 3.

3.1.1.2 Probenaufbereitung – Qualitätsbestimmung

Im Folgenden sind die einzelnen Schritte dargestellt. Den Fraktionen zugeordnet fasst Tabelle 3 die angewendeten Methoden zusammen.

Trocknung mit Bestimmung des Wassergehaltes

Zur Bestimmung des Wassergehaltes und zur Probenkonservierung fand zunächst eine Trocknung aller Proben bei 105 C nach DIN EN 14346 statt.

Korngrößenbestimmung

Eine Korngrößenbestimmung fand mit einem Siebturm (RETSCH) nach DIN 18123 statt.

Tabelle 2: Probenahmeplan, -umfang α -Linie

α -Linie	Inert					Oxide			NE				Eisen	
	0-2 mm vor TAR	0-2 mm nach TAR	2-5 mm	5-18 mm	18-45 mm	2-5mm	5-18 mm	18-45mm	2-5mm	5-18mmI	18-45 mm	>45	fein	grob
Stellungen I	2	2	2	2	2	8	8	8	2	2	2	Foto	2	Foto
Stellungen II	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto
Stellungen III	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto
MVB Rohschlacke	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto
MVR Rohschlacke	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto
MVR entfrachtet	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto
MVB enfrachtet	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Foto	2	Foto

Bestimmung Restmetallgehalte

In den Inertfraktionen wurde der Restmetallgehalt bestimmt. Dafür fand zunächst eine Probenzerkleinerung statt. Die größeren Fraktionen wurden zunächst mit dem Backenbrecher (RETSCH BB100) vorzerkleinert. Alle Proben wurden mit einer Planetenkugelmühle (Fritsch Planetenkugelmühle Pulverisette 5) in die erforderliche Analysefeinheit gebracht.

Im Anschluss wurde der Probenaufschluss nach DIN EN 16174 durchgeführt. Mit der Mikrowelle (CEM MARS 6) fand ein Königswasseraufschluss (6 ml HCl (12 mol/l), 2 ml HNO₃ (16 mol/l), 2 ml H₂O) statt. Nach einer Druckfiltration zur Abtrennung von mineralischen Resten und entsprechender Verdünnung konnte die Analyse nach DIN 22022-2 mit der ICP-OES (Agilent Technologies ICP OES 5100) durchgeführt werden.

Magnetische Trennung

Zur Bestimmung der Zusammensetzung der Oxide und Eisen fein fand eine magnetische Trennung nach schwach magnetisch (handelsüblicher Magnet), stark magnetisch (Festplattenmagnet Neodymeisenbormagnet) und unmagnetisch statt.

Manuelle Sortierung NE-Metalle

Die NE-Metalle wurden händisch in die einzelnen NE-Metalle bzw. -Legierungen (im Wesentlichen Aluminium, Kupfer und Messing) und Fremdbestandteile sortiert. Neben organoleptischer Begutachtung stand ein RFA-Handgerät (analyticon NITON XL3t) zur Überprüfung einzelner Metalle zur Verfügung. Die Fraktionen kleiner 5 mm wurden zudem nach folgender Vorgehensweise gewaschen: Nach dem Tauchen in Salzsäure (19:1, H₂O:HCl_{konz}) für eine Minute und anschließenden Wasserbad fand eine Trocknung und anschließende Sortierung mit Pinzette statt.

Fotodokumentation

Da eine Probenahme aufgrund der Größe wenig repräsentativ ist, fand für die Fraktion VA, Eisen fein und Unverbranntes lediglich eine Fotodokumentation statt. Diese wurde 2 bis 3 mal täglich für die besagten Fraktionen vorgenommen.

Tabelle 3: Probenaufbereitung α -Linie

Inert	Trocknung, Bestimmung Wassergehalt	Korngrößenbestimmung Siebkennlinien	Bestimmung Restmetallgehalte - Nasschemische Analyse <ul style="list-style-type: none"> • Probenzerkleinerung: Backenbrecher, Planetenkugelmühle • Probenaufschluss: Königswasser nach DIN EN 16174 • Analyse mit ICP-OES DIN 22022-2
Oxide			Manuelle Trennung mit Magneten verschiedener Stärke
NE			Manuelle Sortierung mit Unterstützung eines RFA-Handgerätes
Eisen fein			Magnetische Trennung, Fotodokumentation

3.1.2 β -Linien

Die verschiedenen β -Linien stellen die Nachaufbereitung bereits gewonnener Fraktionen sowie insbesondere die Aufbereitung der Fraktion 0-2 mm dar. Im Kap. II j wird der Aufbau der β -Linien genauer beschrieben. Bei den β 1-Linien handelt es sich um die Nachaufbereitung der NE-Metalle > 2mm, bei den β 2-Linien geht es um die Gewinnung von Metallen aus dem Schlackestrom < 2mm.

Da kein kontinuierlicher Betrieb der β -Linien stattfand, konnte der Probenahmeplan nicht eingehalten werden. Für die β 1-Linie wurde für jeden Stoffstrom mindestens eine Probe genommen.

Tabelle 4 zeigt die verschiedenen Proben sowie deren Aufbereitung der β 1-Linie.

Tabelle 4: Probenaufbereitung β 1-Linie

Voraufbereitung α-Linie		Trocknung, Bestimmung Wassergehalt	Korngrößenbestimmung, Siebkennlinie	Manuelle Sortierung mit Unterstützung eines RFA-Handgerätes
verschiedene NE-Auswürfe	2-5 mm I			
	2-5 mm II			
	5-18 mm			
	18-45 mm			
Inertstrom	nasschemische Analyse (siehe α -Linie)			
β1	Manuelle Sortierung mit Unterstützung eines RFA-Handgerätes			
Leichtfraktion				
Schwerfraktion				

Tabelle 5 zeigt die Proben sowie deren Aufbereitung der β 2-Linie.

Tabelle 5: Probenaufbereitung β 2-Linie

Input	jeweils eine Probe	Trocknung, Bestimmung Wassergehalt	Korngrößenbestimmung, Siebkennlinie	Nasschemische Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Probenzerkleinerung: Planetenkugelmühle, Mörser • Probenaufschluss: Königswasser nach DIN EN 16174 • Analyse mit ICP-OES
Oxide					
getrocknet					
TAR-Prozessor	jeweils eine Probe				
0-0,71 mm					
0,71-1 mm					
1-2mm	jeweils drei Proben				
Wirbelstromabscheider					
1-2 mm NE angereichert					
1-2 mm NE abgereichert	jeweils drei Proben				
Wendelscheider					
0,71-1 mm Schwerfraktion					
0,71-1 mm Leichtfraktion					

XRD

4. Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

(Teile dieses Kapitels sind in Enzner; Kuchta 2014a (siehe Publikationsliste) erschienen)

In Deutschland wurden im Jahr 2010 24 Mio. Mg Abfall thermisch verwertet (Statistisches Bundesamt 2012). Durch unsachgemäße Trennung auf Seiten der Abfallerzeuger bzw. durch Materialverbünde gelangt ein beträchtlicher Anteil der Metalle in die Verbrennung. Im Durchschnitt bestehen Rostaschen zu 7 bis 10 % aus Metallen (Alwast und Riemann 2010). Der Hauptbestandteil ist hierbei Eisen, daneben Aluminium, Zink, Kupfer und anderen Schwermetallen. Als Spurenelemente treten auch Edelmetalle und seltene Erden auf. Die konventionelle Schlackeaufbereitung erreicht bei Eisen eine Rückgewinnungsrate von 96 %, für die NE-Metalle sind es jedoch nur 11 bis 75 % (Alwast und Riemann 2010; Pretz und Meier-Kortwig 2000), was auch durch die deutlich kleinere Partikelgröße der NE-Metalle begründet ist. Die aufbereitete Schlacke wird entweder als Baumaterial verwertet oder deponiert.

4.1 Schlackezusammensetzung

Die Zusammensetzung der Rohschlacke ist im Wesentlichen abhängig von den eingesetzten Abfällen.

Da während der Verbrennung nahezu die komplette organische Substanz umgesetzt wird, verbleiben als Rückstände die Flugasche, Reste der Rauchgasreinigung sowie die Rostasche oder Rostschlacke. Für deutsche Schlacken werden folgende Schwankungsbreiten in der Literatur angegeben: 1 - 5 % Unverbranntes, 7 - 10 % Metallschrott sowie 85 - 90 % (jeweils in Masseprozenten) mineralische Fraktion (Alwast, Riemann 2010). Aktuelle Ergebnisse aus einer norddeutschen MVA über eine Zeitreihe von 20 Jahren zeigen aber auch auf, dass die Gehalte an Fe-Schrott von 12 % in 1997 über die Jahre kontinuierlich auf 3 % in 2014 zurückgegangen sind (Lübben 2015)

Einige Metalle sind in den Schlacken in rückgewinnungs-relevanten Größenordnungen vorhanden. Neben den Basismetallen Eisen, Kupfer oder Aluminium stehen heute vor allem die strategischen Metalle, z.B. Edelmetalle oder seltene Erden, im Fokus. So wurden zum Beispiel in der Schlacke der Amsterdamer Hausmüllverbrennung verschiedene Edelmetalle untersucht (Muchova 2009). Dabei konnten in der Fraktion kleiner 2 mm eine Silberkonzentration von 2,1 g/Mg und eine Goldkonzentration von 0,11 g/Mg gemessen werden.

Tabelle 6 zeigt verschiedene Ergebnisse zur Bestimmung der Metallkonzentrationen in Hausmüllverbrennungsschlacken (Klein 2002, Shen 2003). Um Vergleichbarkeit herzustellen, sind hier nur Konzentrationen aufgeführt, die sich auf die gesamte Schlacke beziehen und nicht auf einzelne Fraktionen. Für Edelmetalle und seltene Erden gibt es bisher nur wenige Messungen, welche oft sehr spezifisch für einzelne Fraktionen sind.

Tabelle 6: Metallgehalte in Schlacken aus verschiedenen Untersuchungen

Metall [mg/kg]	Klein 2002 [5]	Shen 2003 [6]
Eisen (Fe)	40 000 – 230 000	27 000 – 150 000
Aluminium (Al)	12 000 – 180 000	47 000 – 72 000
Kupfer (Cu)	400 – 4 000	900 – 4 800
Zink (Zn)	3000 – 15 000	1 800 – 6 200

4.2 Abgelagerte Schlacken

Neben den kontinuierlich anfallenden Verbrennungsschlacken müssen auch historische Schlacken in Betracht gezogen werden. Ein Großteil der Schlacken wurde und wird als Baumaterial verwertet. Die darin vorhandenen Rohstoffe sind damit erst einmal festgelegt. Für die weitergehende Rückgewinnung von Metallen sind deshalb auch die abgelagerten Schlacken relevant. Unter dem Aspekt des Ressourcenpotenzials sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Die historischen Schlacken weisen vermutlich ein höheres Metallpotenzial auf, da die Abscheidung in den letzten Jahren wesentlich intensiviert und technologisch verbessert wurde. So ist zum Beispiel die Abtrennung von nicht-magnetischen Metallen erst in den letzten 20 Jahren flächendeckend umgesetzt worden. Das bedeutet, dass in älteren Schlacken höhere Metallgehalte vermutet werden können. Gleichzeitig haben sich auch die Trenn-Anforderungen an der Quelle, d.h. im Haushalt, verändert. Wesentliche Meilensteine in der Verringerung der Metallgehalte im Restmüll waren die Einführung des „gelben Sacks“, die Getrenntsammlung von Elektro- und Elektronikgeräten und die in einigen Bundesländern umgesetzte Wertstofftonne.

Stehen jedoch die Edelmetalle und seltenen Erden im Fokus, so müssen vor allem die technischen Entwicklungen im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte berücksichtigt werden. Trotz des Trends zur Miniaturisierung und damit geringeren Mengen eines Stoffes in den Geräten gibt es insgesamt eine zunehmende Verwendung seltener Metalle wie strategischer Metalle und seltener Erden. Ein wesentlicher Punkt ist natürlich auch die gestiegene Verbreitung dieser Geräte. Im Gegensatz zu Elektrogroßgeräten wie Waschmaschinen, die eher selten in den Hausmüll geraten, finden sich Kleingeräte wie Mobiltelefone, Ladegeräte, USB-Sticks oder Taschenrechner vermehrt dort. Solche Fehlwürfe gelten als Hauptquelle für Edelmetalle und seltene Erden in Hausmüllverbrennungsschlacken.

4.3 Schlackeaufbereitung

Die konventionelle Schlackeaufbereitung beginnt in Deutschland mit dem Austrag aus dem Nassentschlacker. Nach einer Alterung von ca. drei Monaten erfolgt die Aufteilung in verschiedene Korngrößen und Materialfraktionen. Innerhalb dieses Aufteilungsprozesses werden verschiedene Magnetabscheider, Windsichter und

Wirbelstromabscheider eingesetzt. Gegebenenfalls werden zusätzlich Zerkleinerungsaggregate genutzt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Schlackeaufbereitung in Stapelfeld bei Hamburg.

Um eine erhöhte Abscheidung der NE-Metalle bei gleichzeitig höherer Qualität sowie eine weitergehende Klassierung der mineralischen Schlackeprodukte zu erreichen, kann die konventionelle Schlackeaufbereitung ergänzt oder alternative, innovative Behandlungsverfahren entwickelt und genutzt werden. Ein zusätzlicher innovativer Prozessschritt ist zum Beispiel der Hydrobandabscheider. Der Trockenentschlacker als alternativer Prozessschritt zum Nassentschlacker weist eine bessere Qualität bezüglich der in der Schlackenaufbereitung gewonnenen Metalle auf. Durch den geringeren Wassergehalt der ausgetragenen Schlacke kommt es zu keiner Verklumpung mit der mineralischen Fraktion und Schwermetalle können trockenmechanisch abgetrennt werden (Alwast, Riemann 2010; Mocker et al. 2010). Alternative Behandlungsverfahren könnten z.B. das ATZ-Eisenbadreaktorverfahren, das RCP (Recycled Clean Products)-Verfahren oder das INASHCO-Verfahren darstellen.

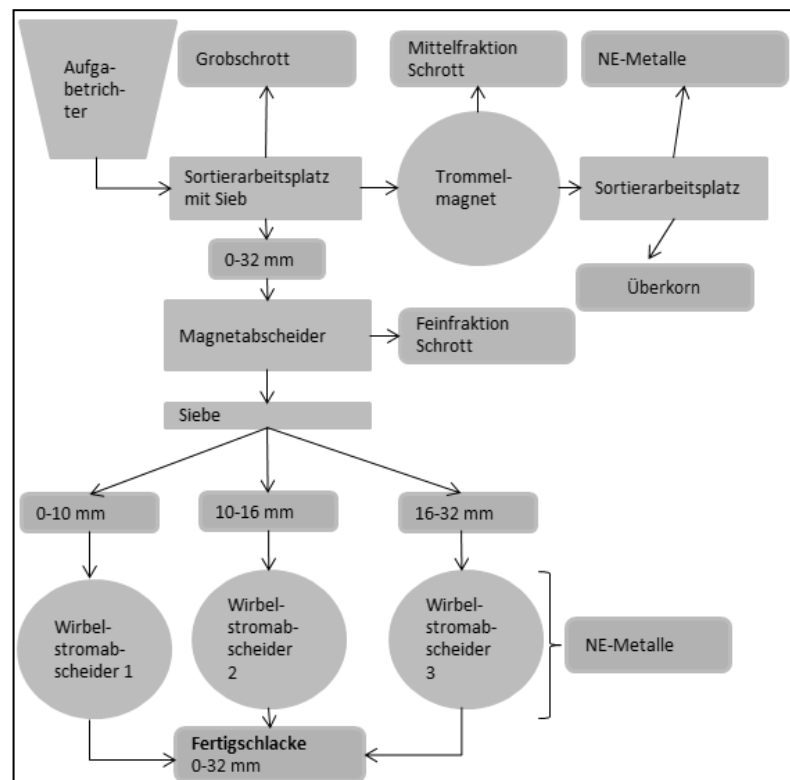


Abbildung 1: Schlackeaufbereitung in Stapelfeld 2012

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die SRH möchte in den kommenden Jahren die Schlackenaufbereitung für die beiden Müllverbrennungsanlagen Borsigstraße und Rugenberger Damm optimieren. Die SRH ist daher seit 2011 sehr darum bemüht, Know-How im eigenen Unternehmen dazu aufzubauen und künftig die Schlackenaufbereitung nicht mehr vollständig zu vergeben, sondern wenigstens anteilig selbst oder aber über Tochterunternehmen zu bewerkstelligen.

Im Rahmen dieses Projektes fand ein häufigerer Austausch zwischen der SRH und den MVA-Betreibern der Borsigstraße (seit 1.1.2014 ein Tochterunternehmen der SRH) und des Rugenberger Damms (bis 2013 hatte SRH hier 25% Anteil, seit 2014 45% Anteil) statt. Beide Verbrennungsanlagen betreiben eigene Aufbereitungsanlagen, vermarkten die Schlacke jedoch gemeinsam über das Hanseatische Schlackenkontor (HSK-GmbH). An dieser Gesellschaft ist die SRH zu 16,67% beteiligt. Da das HSK die Verbindungsstelle zwischen Schlackenerzeugern und Schlackenabnehmern (als Baustoff) ist, ist dem HSK stark an der Qualität der fertig aufbereiteten Schlacke gelegen. Die SRH steht mit dem HSK in regelmäßigem Austausch, wobei die Steigerung der Schlackenqualität zur Sicherung des Schlackenabsatzes als Baustoff immer im Vordergrund steht.

Mit der Berliner Stadtreinigung (BSR) fand im Projekt ebenso ein häufigerer Austausch statt, da beide kommunalen Unternehmen auch in vielen anderen Bereichen gut kooperieren und sich austauschen.

Diverse Besuche in anderen Aufbereitungsanlagen (z.B. von INASHCO, REMEX, MDSU, Stork-Umweltdienste, Heidemann-Recycling) dienten der Information darüber, was andere Anlagen leisten können und welche Konzepte dort jeweils verfolgt werden. Diese Zusatzinformationen ermöglichen es der SRH, die Leistungen der TARTECH-Anlagentechnologie besser und objektiver zu bewerten.

Die Kooperation mit der TU Hamburg-Harburg erfolgte in diesem Projekt in Form einer Beauftragung der TU durch die SRH.

Die Schlackentransporte von Hamburg zur Aufbereitungsanlage nach Wiesbaden wurden durch beauftragte Dritte ausgeführt, welche von der TARTECH AG beauftragt wurden. Der Fuhrpark der SRH hätte für diese umfangreichen Transporte keine ausreichenden Kapazitäten zur Verfügung stellen können.

Wissenschaftliche Zusammenarbeit fand hauptsächlich innerhalb der Projektgruppe statt. Neben Probenaustausch zu Beginn der Projektphase (BSR) fand vor allem ein Erfahrungsaustausch im Hinblick auf die Analytik (LMU, BAM) und Geräten (UDE) statt. Zusätzlicher genereller Austausch fand bei den Verbundprojekttreffen mit anderen Projektgruppen vor allem auf der Doktorandenebene statt.

II Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Eingesetzte Schlackemengen

a.1. Versuch 1

Im Rahmen des Versuches 1 wurde unberaubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Sommermüll (Anfallzeit Mitte September) in einer üblichen Zusammensetzung aus der MVA Stellingener Moor eingesetzt. Die MVA Stellingener Moor befindet sich zu 100 % im Eigentum der Stadtreinigung Hamburg AöR (SRH). Die Anlage wurde im Sommer 2015 stillgelegt.

Der eingesetzte Müll setzt sich aus kommunalen Abfällen (überlassungspflichtige Siedlungsabfälle) und gewerblichen Abfällen im Verhältnis von ca. 80 % zu 20 % zusammen und entspricht insoweit der zu erwartenden üblichen Abfallzusammensetzung der Stadt Hamburg und auch anderer kommunaler MVAen. Der Hausmüll stammte weitgehend aus den westlichen Stadtteilen, zu kleinen Anteilen auch aus der Region Mitte (Hamburger Zentrum) und den Landkreisen Pinneberg und Bad Segeberg.

Die bei der Verbrennung anfallende Schlacke wurde in einem Nassentschlacker abgekühlt und nachfolgend einer Grobentschrottung / Grobabtrennung per Stangensizer zugeführt.

Nach der Grobentschrottung wurde die Rohschlacke direkt in Sattelaufleger verladen und nach Verwiegung nach Wiesbaden gefahren. Der zugehörige separierte Grobschrott wurde ebenfalls nach Verladung verwogen und nach Wiesbaden verbracht.

Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 38 – 40 / 2014 ca. 1.025 Mg Rohschlacke inkl. Grobschrott erzeugt und nach Wiesbaden verbracht. Die angelieferte Rohschlacke inkl. Grobschrott wurde in Wiesbaden eingangsverwogen und anschließend für ca. 10 Wochen zur Carbonatisierung abgelagert.

Nach Abschluss der Carbonatisierung wurde die Rohschlacke inkl. Grobschrott der TARTECH-Anlage, hier jedoch nur der Alpha-Linie zugeführt. Im Rahmen des Versuches in der KW 49 / 2014 wurden an zwei Versuchstagen insgesamt 975 Mg Rohschlacke inkl. Grobschrott eingesetzt.

a.2. Versuch 2

Im Rahmen des Versuches 2 wurde unberaubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Herbstmüll in einer Zusammensetzung ähnlich dem Versuch 1, jedoch mit erhöhtem Laubanteil (Anfallzeit Mitte Dezember, ohne Frost oder Schnee) aus der MVA Stellingener Moor eingesetzt. Hinsichtlich der Randbedingungen wird auf die Ausführungen zu Versuch 1 verwiesen.

Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 51 - 52 / 2014 ca. 495 Mg Rohschlacke, diesmal jedoch ohne die nachträgliche Wiederaufbereitung des Grobschrotts erzeugt und nach Wiesbaden verbracht. Die angelieferte Rohschlacke ohne Grobschrott wurde in Wiesbaden eingangsverwogen und anschließend zur Carbonatisierung abgelagert. Die Carbonatisierung der Rohschlacke erfolgte dann über einen Zeitraum von ca. 9 Wochen.

Nach Abschluss der Carbonatisierung wurde die Rohschlacke ohne Grobschrott der TARTECH-Anlage, hier jedoch ebenfalls nur der Alpha-Linie zugeführt. In der KW 8 / 2015 wurden insgesamt ca. 470 Mg Rohschlacke ohne Grobschrott aufbereitet.

a.3. Versuch 3

Im Rahmen des Versuches 3 wurde unberaubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Wintermüll mit einem geringen Anteil an Gartenorganik (Anfallzeit Anfang Februar mit leichtem Dauerfrost über ca. 2 Wochen) aus der MVA Stellingener Moor eingesetzt. Hinsichtlich der weiteren Randbedingungen wird auf die Ausführungen zu Versuch 1 verwiesen.

Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 7 / 2015 ca. 350 Mg Rohschlacke ohne Grobschrottrückführung in die Schlacke erzeugt und nach Wiesbaden verbracht. Die in Wiesbaden angelieferte Rohschlacke wurde eingangsverwogen und zur Carbonatisierung abgelagert. Die Carbonatisierung erfolgte dann über einen Zeitraum von ca. 14 Wochen. Nach Abschluss der Carbonatisierung wurde die Rohschlacke ohne Grobschrott der TARTECH-Anlage, hier jedoch ebenfalls nur der Alpha-Linie, zugeführt und in der KW 21 / 2015 aufbereitet.

a.4. Versuch 4

Im Rahmen des Versuches 4 wurde unberaubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Hausmüll in einer üblichen Zusammensetzung aus der MVA Rugenberger Damm (MVR) eingesetzt. Die MVR befand sich am Versuchstermin zu 20 % im Eigentum der SRH, zu 25 % im Eigentum der EWE und zu 55 % im Eigentum der Vattenfall Europe New Energy.

Der eingesetzte Müll setzt sich aus kommunalen Abfällen (überlassungspflichtige Siedlungsabfälle) und gewerblichen Abfällen im Verhältnis von ca. 80% zu 20% zusammen und entspricht insoweit der zu erwartenden üblichen Abfallzusammensetzung der Stadt Hamburg und auch anderer kommunaler MVAen. Eine Besonderheit beim Abfall der MVR ist jedoch, dass ein Drittel des angelieferten Hausmülls aus den sog. südlichen Landkreisen Harburg, Stade, Rotenburg / Wümme und Soltau-Fallingb. (Heidekreis) stammt.

Die bei der Verbrennung anfallende Schlacke wurde in einem Nassentschlacker, der als Schlackenwäsche ausgeführt ist, abgekühlt und nachfolgend einer Grobschrottrückführung / Grobschrottabtrennung zugeführt.

Die nach der Grobschrottrückführung (Fe-Schrott) wurde die Rohschlacke direkt in Container verladen und nach Verwiegung nach Wiesbaden gefahren.

Der separierte Grobschrott wurde nicht verwogen und nicht nach Wiesbaden verbracht. Es wurden Jahresdurchschnittswerte für das Grobschrottaufkommen je Mg Rohschlacke ermittelt und so Korrekturfaktoren für die spätere Bilanzierung erstellt.

Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 9 - 10 / 2015 908,64 Mg Rohschlacke erzeugt und nach Wiesbaden verbracht. Die angelieferte Rohschlacke wurde in Wiesbaden eingangsverwogen und anschließend für 12 Wochen zur Carbonatisierung abgelagert. Nach Abschluss der Carbonatisierung wurden in der KW 21 / 2015 908,7 Mg Rohschlacke der TARTECH-Anlage, hier jedoch nur der Alpha-Linie zugeführt und aufbereitet.

a.5. Versuch 5

Im Rahmen des Versuches 5 wurde beraubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Hausmüll in einer üblichen Zusammensetzung aus der MVA Rugenberger Damm (MVR) eingesetzt.

Hinsichtlich der weiteren Randbedingungen wird auf die Ausführungen zu Versuch 4 verwiesen. Nach erfolgter Grobentschrottung wurde die Rohschlacke der MVR in Hamburg über einen Zeitraum von ca. 12 Wochen carbonatisiert. Während dieser Phase wurde die Rohschlacke zweimal über die vorhandene Schlackenaufbereitung der MVR gefahren, einmal einen Tag nach Austrag aus dem Nassentschlacker / der Grobentschrottung in Verbindung mit einem Brechen der Rohschlacke vor Beginn der Carbonatisierung und einmal nach der 12-wöchigen Carbonatisierung. Dieses entspricht der üblichen Vorgehensweise der Schlackenaufbereitung in der MVR.

Der separierte Grobschrott wurde nicht verwogen und nicht nach Wiesbaden verbracht. Es wurden Jahresdurchschnittswerte für das Grobschrottaufkommen je Mg Rohschlacke ermittelt und so Korrekturfaktoren für die spätere Bilanzierung erstellt.

Schlackenaufbereitung MVR (Bestandsanlage)

Die Schlackenaufbereitung der MVR besteht aus einer integrierten Schlackenwäsche und einer Aufbereitung der grob entschrotteten verbleibenden Rohschlacke.

Die Schlackenwäsche ist in den Nassentschlacker integriert. Dieser wird mit einem definierten Wasserdurchlauf (Wasserüberschuss) gefahren, so dass lösliche Salze bereits im Entschlacker von der Rohschlacke getrennt werden können. Das mit den löslichen Salzen befrachtete Abwasser wird, nach einer weitergehenden Nachbehandlung, der vorhandenen Abgasreinigung als Prozesswasser zugeführt.

Die nach der integrierten Schlackenwäsche verbleibende Rohschlacke wird anschließend von Grobteilen, einerseits Grobschrott, andererseits Unverbranntem, befreit. Das Unverbrannte wird in den Müllbunker rückgeführt, der Grobschrott einer Verwertung zugeführt.

Nachfolgend wird die erzeugte Rohschlacke, nach einem Tag Zwischenlagerung, der eigentlichen Schlackenaufbereitung zugeführt.

Nach einer Siebung (32 mm) wird das Grobkorn gebrochen, nachfolgend einer Fe- / NE- Abscheidung zugeführt und abschließend nochmals gesiebt (32 mm). Das Überkorn wird in den Müllbunker rückgeführt, der Siebdurchgang mit dem Durchgang aus der ersten Siebung vereint, nachdem dieser Teilstrom ebenfalls Fe- / NE- entfrachtet wurde.

Der so vereinte Siebdurchgang wird einer weiteren Siebung (10 mm) zugeführt. Der Überlauf wird windgesichtet, die dabei anfallenden Leichtstoffe werden ebenfalls in den Müllbunker rückgeführt.

Die verbleibenden Stoffströme werden gelagert (carbonatisiert) und nach einer Carbonatisierungsdauer von ca. 12 Wochen ein weiteres Mal über die Schlackenaufbereitung gefahren und dann ausgelagert.

Die nach einer Carbonatisierungsdauer von ca. 12 Wochen verbleibende Fertigschlacke wird einer nachfolgenden Verwertung in der TARTECH-Anlage zugeführt. Insgesamt wurden auf diesem Wege 520,24 Mg bereits vorbehandelte und carbonatisierte Restschlacke erzeugt und in der KW 20- 21 / 2015 nach Wiesbaden verbracht und dort eingangsverwogen.

Diese Schlacke wurde der TARTECH-Anlage, hier jedoch nur der Alpha-Linie, zugeführt. Im Rahmen des Versuches in der KW 21 / 2015 wurden lediglich ca. 120 Mg der beschriebenen Restschlacke eingesetzt, die Aufbereitung musste aufgrund der zu hohen Feuchte des Materials abgebrochen werden. In der KW 31 / 2015 wurden weitere 386 Mg aufbereitet, womit im Ergebnis ca. 506 Mg der beschriebenen Schlacke eingesetzt wurden.

Die bereits in der MVR in Hamburg erzeugten Stoffströme (Schlackenmenge vor der Aufbereitung, separierte Stoffströme wie Unverbranntes, Grobschrott, Fe- / NE-Metalle) wurden nicht bilanziert.

a.6. Versuch 6 (Referenzversuch)

Im Rahmen des Versuches 6 wurde unberaubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Hausmüll in einer üblichen Zusammensetzung aus der MVA Borsigstraße (MVB) eingesetzt.

Die MVA Borsigstraße befand sich am Versuchstermin zu ca. 85 % im Eigentum der Vattenfall Europe New Energy und zu ca. 15 % im Eigentum der EEW. Ende 2014 wurde die Anlage rückwirkend zum 1.01.2014 von der Stadtreinigung Hamburg gekauft.

Der eingesetzte Müll setzt sich aus kommunalen Abfällen (überlassungspflichtige Siedlungsabfälle) und gewerblichen Abfällen im Verhältnis von ca. 80 % zu 20 % zusammen und entspricht insoweit der zu erwartenden üblichen Abfallzusammensetzung der Stadt Hamburg und auch anderer kommunaler MVAen.

Die bei der Verbrennung anfallende Schlacke wurde in einem Nassentschlacker, der als Schlackenwäsche ausgeführt ist, abgekühlt und nachfolgend einer Abtrennung von Grobschrott und Unverbranntem mittels Stangensizer zugeführt. Danach wurde die Rohschlacke direkt in Container verladen, verwogen und nach Wiesbaden gefahren. Der separierte Grobschrott wurde nicht verwogen und nicht nach Wiesbaden verbracht. Es wurden Jahresdurchschnittswerte für das Grobschrottaufkommen je Mg Rohschlacke ermittelt und so Korrekturfaktoren für die spätere Bilanzierung erstellt. In diesem Korrekturfaktor ist berücksichtigt, dass bei der Anlieferung von Gewerbe- und Baustellenabfällen der Abfall in der Kipphalle vorgekippt, auf kritische Bestandteile überprüft und dabei auch bereits Grobschrott händisch entnommen wird.

Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 10/11 / 2015 733,16 Mg Rohschlacke erzeugt und nach Wiesbaden verbracht. Nach der Eingangsverwiegung wurde die Rohschlacke für einen Zeitraum von ca. 11 Wochen zur Carbonatisierung abgelagert.

Nach Abschluss der Carbonatisierung wurde die Rohschlacke der TARTECH-Anlage, hier jedoch der Alpha-Linie zugeführt. Im Rahmen des Versuches in der KW 21 / 2015 wurden insgesamt 718,8 Mg Rohschlacke eingesetzt.

Da zum geplanten Versuchsdatum die Beta-Linie noch nicht vollständig im Betrieb war, wurde die gesamte von Metallen in der Alpha-Linie entfrachtete Mineralik ausgeschleust (als Restmineralikfraktion) und nachfolgend mittels Siebung (Trommelsieb) die Fraktion 0-2 mm wieder hergestellt und zwischengelagert. Ein wesentlicher Anteil der so erzeugten Feinfraktion aus dem Referenzversuch 6 wurde nach vollständiger Inbetriebnahme der Beta-Linie in der KW 30 abschließend untersucht.

Insgesamt wurden über mehrere Tage 216,07 Mg Feinfraktion in der Beta-Linie aufbereitet, was einem Anteil von gut 30 % der eingesetzten Rohschlackenmenge entspricht. Dabei wurde die Feinfraktion durch die Taumelsiebanlage weiter unterteilt in die Fraktionen 1 – 2 mm, 0,71 – 1 mm und < 0,71 mm. Aus den so erzeugten Teilfraktionen 1 -2 mm und 0,71 – 1 mm wurden durch Dichtentrennung Schwer- und Leichtfraktionen und aus der Teilfraktion 1 – 2 mm zusätzlich noch eine Mineralikfraktion erzeugt, die repräsentativ beprobt und anschließend analytisch untersucht wurden. Der Stoffstrom < 0,71 mm wurde in der Beta-Linie nicht weiter aufbereitet. Der Betrieb der Beta-Linie wurde bilanziert.

Allerdings wurden die unterschiedlichen Anlagenbereiche der Beta – Linie (Beta II A, B und C) z.T. zu unterschiedlichen Zeiten und unter nicht immer eindeutigen Rahmenbedingungen sowie z.T. auch unter eingeschränkten Betriebsbedingungen betrieben, was eine Bilanzierung des Versuches in Teilbereichen erschwert.

a.7. Versuch 7

Im Rahmen des Versuches 7 wurde beraubte Schlacke aus der thermischen Behandlung von Hausmüll in einer üblichen Zusammensetzung aus der MVA Borsigstraße (MVB) eingesetzt. Hinsichtlich der weiteren Randbedingungen wird auf die Ausführungen zu Versuch 6 verwiesen.

Die bei der Verbrennung anfallende Schlacke wurde in einem Nassentschlacker, der als Schlackenwäsche ausgeführt ist, abgekühlt und nachfolgend einer Grobentschrottung und Abtrennung von unverbrannten Grobstoffen per Stangensizer zugeführt. Danach wurde die Rohschlacke über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen carbonatisiert. Nach dieser vierwöchigen Phase wurde die Rohschlacke über die vorhandene Schlackenaufbereitung der MVB gefahren. Dieses entspricht der üblichen Vorgehensweise der Schlackenaufbereitung in der MVB. Der separierte Grobschrott wurde nicht verwogen und nicht nach Wiesbaden verbracht. Es wurden Jahresdurchschnittswerte für das Grobschrottaufkommen je Mg Rohschlacke ermittelt und so Korrekturfaktoren für die spätere Bilanzierung erstellt. In diesem Korrekturfaktor ist berücksichtigt, dass bei der Anlieferung von Gewerbe- und Baustellenabfällen der Abfall in der Kipphalle vorgekippt, auf kritische Bestandteile überprüft und dabei auch bereits Grobschrott händisch entnommen wird.

Schlackenaufbereitung MVB (Bestandsanlage)

Die Schlackenaufbereitung der MVB besteht aus einer integrierten Schlackenwäsche und einer Aufbereitung der verbleibenden Rohschlacke.

Die Schlackenwäsche ist in den Nassentschlacker integriert. Dieser wird mit Wasserüberschuss gefahren, so dass lösliche Salze zu wesentlichen Anteilen bereits im Entschlacker von der Rohschlacke getrennt werden können. Das mit den löslichen Salzen befrachtete Abwasser wird, nach einer weitergehenden Nachbehandlung, der vorhandenen Abgasreinigung als Prozesswasser zugeführt.

Die nach der integrierten Schlackenwäsche gewonnene Rohschlacke wird anschließend von Grobteilen, einerseits Grobschrott, andererseits Unverbranntem, befreit. Das Unverbrannte wird in den Müllbunker rückgeführt, der Grobschrott einer Verwertung zugeführt.

Nach einer vierwöchigen Zwischenlagerung (Carbonatisierung) wird die erzeugte Rohschlacke der eigentlichen Schlackenaufbereitung zugeführt. Dabei wird die Schlacke gebrochen und gesiebt. Aus den erzeugten Teilströmen (erst 0 – 40 mm, danach nochmals 0 – 12 mm und 12 – 40 mm) werden mittels Fe-Abscheidung (Überbandmagnet) und NE-Abscheidung (Wirbelstromscheider) Fe- und NE-Metalle weitgehend abgeschieden.

Die danach verbleibende, teilcarbonatisierte Restschlacke wurde nachfolgend einer abschließenden, siebenwöchigen Carbonatisierung in Wiesbaden zugeführt. Insgesamt wurden auf diesem Wege in der KW 13/14 / 2015 340,4 Mg teilcarbonatisierte und beraubte Schlacke erzeugt und nach Wiesbaden verbracht.

Nach Abschluss der Carbonatisierung wurde die Restschlacke der TARTECH-Anlage, hier jedoch nur der Alpha-Linie zugeführt. Im Rahmen des Versuches in der KW 21 / 2015 wurden insgesamt 348,6 Mg der beschriebenen Restschlacke eingesetzt

Die in der MVB erzeugten Stoffströme (Schlackenmenge vor der Aufbereitung, separierte Stoffströme Unverbranntes, Grobschrott, Fe- / NE-Metalle) wurden nicht bilanziert.

b. Eingesetzte Schlackequalitäten

Der Metallgehalt im Restabfall betrug in Hamburg im Jahr 2013 2 % (Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH 2014). Dies liegt im Durchschnitt deutscher Abfalluntersuchungen (Kuchta, Enzner 2015). Für Sperrmüll und Gewerbeabfall gibt es keine hamburgspezifischen Untersuchungen der letzten Jahre, deswegen wird 4,1 % für Gewerbeabfall und 5,4 % für Sperrmüll angesetzt (Kuchta, Enzner 2015).

b.1. Versuch 1-3 (SI, SII und SIII)

Für die Versuchsreihen 1-3 wurde in der Abfallverbrennung Stellingener Moor verbrannter Abfall (September, Dezember und Februar) aufbereitet. Dort wurde Restabfall gemischt mit Gewerbeabfall verbrannt. Die Mischung wird vom Kranfahrer vorgenommen, deswegen kann die Mischung nicht genau bestimmt werden. Dies liegt aber bei 80 bis 95 % Restabfall und 5-20 % Gewerbeabfall. Der Restabfall stammt zu 90 % aus der Region Mitte und 10 % Region Süd. Im Hausmüllbericht 2012 wird nach Region Süd und Mitte unterschieden. Region Süd hat dabei 2 % Metall und Region West 1,9 % Metall (Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH 2012). Aufgrund dieser geringen Unterschiede liegt das noch im Rahmen der Ungenauigkeit bei der Übertragung auf andere Jahre, sowie der Mischunschärfe und wird deswegen nicht berücksichtigt.

Aufgrund schlechter Repräsentativität wurden keine Beprobungen der Rostaschen vor dem Transport nach Wiesbaden unternommen mit Ausnahme der ersten Versuchsreihe (17 %) zur Bestimmung des Wassergehaltes.

Am Tag der Aufbereitung lag der Wassergehalt vor der Aufbereitung bei folgenden Werten:

- Versuch 1 (SI): 8,34 %
- Versuch 2 (SII) 8,45 %
- Versuch 3 (SIII): 5,48 %

Der Grobschrott wird direkt nach dem Nassentschlacker mittels Stangensizer vor dem Austrag in die „Schlackehalle“ abgetrennt. Der abgetrennte Grobschrott musste demnach nachträglich der Rostasche wieder zugeführt werden. Da es sich bei der Verbrennung natürlich um einen kontinuierlichen Prozess ohne Unterbrechung nach

der erforderlichen Probemenge handelt, birgt das Fehler. Durchschnittlich wurden in der MVA Stelling Moor 0,42 % Grobschrott abgetrennt. Für die Versuchsreihe 1 (SI) wurde der Rostasche wieder Grobschrott zugeführt. Da aber in Wiesbaden 0,54 % abgetrennt wurden, war dies rechnerisch zu viel. Für die Versuchsreihen SII und SIII wurde kein Grobschrott zugeführt.

b.2. Versuche 4 und 5 (MVR-R und MVR-V)

Für die Versuche 4 und 5 wurde in der Müllverwertung Rugenberger Damm verbrannter Abfall aufbereitet. Am Tag der Aufbereitung lag der Wassergehalt vor der Aufbereitung in der Rostasche bei Versuch 4 bei 9,3 %.

Für beide Versuchsreihen wurde der Grobschrott bereits in Hamburg abgetrennt und nicht wieder nachträglich hinzugefügt. Es werden im Durchschnitt 17,6 kg/Mg Rohschlacke (1,8 %) abgetrennt. Versuchsreihe 5 (MVR-V) durchlief die Schlackeaufbereitung am Rugenberger Damm. Dabei werden durchschnittlich 83,5 kg/Mg Rohschlacke (8,4 %) Eisen und 1,3 bis 1,7 % NE-Metalle inklusive 30 % Fremdanteil gewonnen.

b.3. Versuche 6 und 7 (MVB-R und MVB-V)

Für die Versuche 6 und 7 wurde in der Müllverwertung Borsigstraße verbrannter Abfall aufbereitet. Die Mischung war 80 % Restabfall und 20 % Gewerbeabfall.

Am Tag der Aufbereitung lagen folgende Wassergehalte vor:

- Versuch 6 (MVB-R): 9,3 %
- Versuch 7 (MVB-V): 9,7 %

Metall wurde im Vorfeld für beide Versuchsreihen an folgenden Punkten und Mengen entnommen

- Grobschrottung Kesselhaus Schüttelrinne (Stangensizer): 15.41 kg/Mg Rohschlacke (1,5 %)
- Aussortierung des Abfalles in der Anlieferhalle (für „Container-Fahrzeuge“ Gewerbeabfall und Baustellenabfall): 1,95 kg/Mg Rohschlacke (0,2 %)

Die Rostasche des Versuches 7 (MVB-V) durchlief die Schlackeaufbereitung in der Borsigstraße dabei gehen folgende Metallströme im Durchschnitt heraus:

- Eisenabtrennung: 89,5 kg/Mg Rohschlacke (9,0 %)
- Metallabtrennung aus dem Überkorn: 2,3 kg/Mg Rohschlacke
- NE-Metalle: 1,3 bis 1,7 % inklusive 30 % Fremdanteil

c. Versuchsdurchführung

Das während der jeweiligen Versuchskampagnen in

- KW 49 / 2014, Versuch 1

- KW 8 / 2015, Versuch 2
- KW 21 / 2015, Versuch 3, 4, 5 (anteilig), 6 (anteilig) und 7
- KW 30 / 2015, Versuch 6 (Beta-Linie) und
- KW 31 / 2015, Versuch 5 (Restmenge MVR - Schlacke)

durchgeführte Versuchsprogramm in Verbindung mit der jeweiligen Probenahmeplanung ist in Tabelle 3 und im Kapitel II 1 a detailliert dargestellt.

Wesentlich ist dabei, dass allein im Versuch 6 (Referenzversuch) anteilige Mengen der Feinfraktion über die Beta-Linie gefahren wurden und dass allein während der Versuche 1 und 6 (Referenzversuch) neben den Fe- / NE- Metallen und den Oxiden auch die vollständige mineralische Fraktion, differenziert in die Stoffströme

- Feinfraktion 0 – 2 mm vor TAR-Prozessor,
- Feinfraktion 0 – 2 mm nach TAR-Prozessor,
- Fraktion 2 – 5 mm nach TAR-Prozessor,
- Fraktion 5 – 18 mm nach TAR-Prozessor und
- Fraktion > 18 mm nach TAR-Prozessor

vollständig mit beprobt worden ist.

Während des Versuches an der Beta-Linie wurden neben dem Input alle relevanten anlageninternen Massenströme erfasst. Des Weiteren wurden die Teilströme 1 – 2 mm sowie 0,71 – 1 mm in der Beta-Linie weitergehend aufbereitet und bilanziert. Das entsprechende Versuchs- und Probenahmeprogramm ist in den Tabelle 4 und 5 zusammengestellt.

d. Beschreibung der Alpha-Linie

d.1. Anlagen- und Verfahrensbeschreibung

Bei der Aufbereitungsanlage handelt es sich um eine hochmoderne 4/7 - Linien Anlage. Die Anlage verfügt über 4 - Linien Fe - Gewinnung und 7 - Linien NE - Gewinnung. Die NE - Gewinnung erfolgt in der Alpha-Linie ab einer Korngröße von 2 mm.

Das Besondere an dieser Anlage ist der TAR - PROZESSOR, mit ihm werden feinste Metallpartikel aus der Versinterung (Schlacke) herausgelöst. Auf diese Weise ist eine maximale Metallentfrachtung der Schlacken / Aschen garantiert. Die hochmoderne Aufbereitungsanlage wird durch einen Computer gesteuert und überwacht.

Technische Daten

Kapazität:	220.000 Mg/a im Einschichtbetrieb, werktätig (10/5)
Durchsatzleistung:	80 Mg/h - 180 Mg/h (Regelleistung 80 – 100 Mg/h)
Abmessungen:	54 m x 63 m
Siebschnitte:	6
Fe - Abscheider:	4
NE - Abscheider:	7

Die Aufbereitungsanlage wurde aufgrund ihrer innovativen technischen Einrichtungen als Advanced Technology eingestuft.

Darstellung/Beschreibung der Betriebseinheiten und des Verfahrensablaufes

Eingangs-/Ausgangserfassung / Verwiegung

Die Schlacke wird per LKW angeliefert und über die Waage im Empfangsbereich eingangsverwogen und einer Sichtkontrolle unterzogen.

Bei der Verwiegung/Eingangserfassung werden die wesentlichen Daten erfasst (AVV-Schlüssel, Abfallerzeuger/Kundennummer, LKW-Kennzeichen, Datum, Wiegezeit, Gewichtsangaben). Die anliefernden LKW werden anschließend der vorgesehenen Abkipfstelle im Inputlager zugewiesen.

Die Waage wird auch zur Verwiegung der Ausgangsfraktionen genutzt, sowie bedarfsweise auch zur Rückverwiegung von Leerfahrzeugen.

Im ersten Betriebsjahr erfolgt die Probennahme (PN 98) und Analytik (Annahme-Parameter wie vorstehend benannt) alle 500 Mg. Soweit sich im ersten Betriebsjahr keine Auffälligkeiten ergeben, ist eine Erweiterung des Probenrasters auf die Vorgaben der Deponieverordnung, d.h. alle 1.000 Mg geplant.

Nach dem ersten Betriebsjahr wird dann - in Abstimmung mit der Behörde - eine Reduzierung der Probenahmehäufigkeit, z.B. auf eine Probenahme/Analytik auf der Grundlage eines Massenabfallstroms gem. Deponieverordnung nur noch alle 3 Monate angestrebt / vorgesehen.

Inputlager

Als Inputlager der Schlacken steht hinter dem Hallenbauwerk eine Fläche von ca. 3.700 m² zur Verfügung. Die Schlacken werden an der zugewiesenen Stelle im Inputlager abgekippt und dann mittels mobilem Umschlaggerät (Radlader / Bagger) aufgehaldet (Haufwerke bis zu Höhe von max. 9 m).

Das Inputlager dient nicht nur der Bevorratung der Schlacken vor der Aufbereitung (Bereitstellungs-/Pufferkapazität), sondern auch der Alterung der Schlacken über einen Zeitraum von ca. 2 Monaten.

Die Bewirtschaftung des Inputlagers erfolgt vor diesem Hintergrund in Form von „Wanderhalden“, d.h. die Belegung und der Abbau der Halden erfolgt entsprechend richtungsbezogen. Die Aufteilung im Inputlager erfolgt in mindestens zwei Haufwerken (Wanderhalden), ggf. auch mehreren Haufwerken (s. beispielhafte Darstellung in nachfolgender Systemskizze (Abbildung 2)).

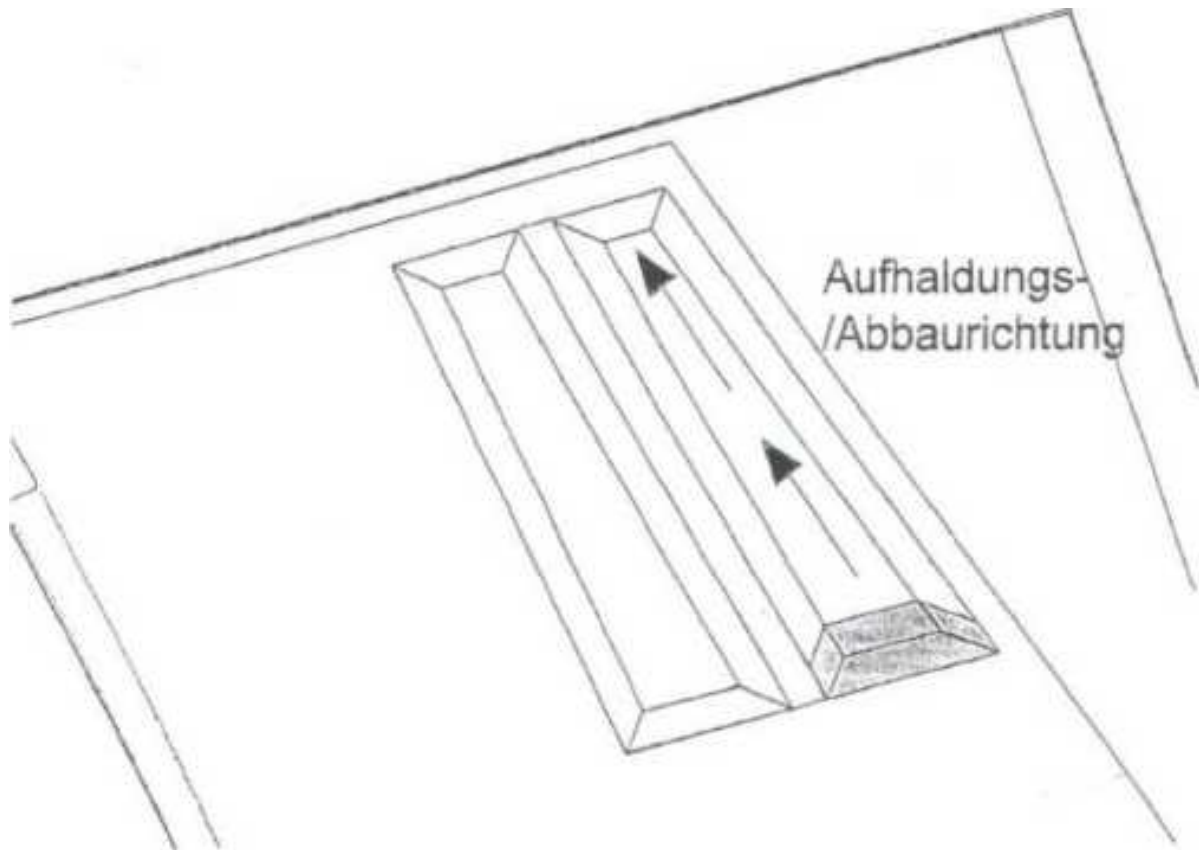


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Inputlager Bewirtschaftung

Mineralikaufbereitung

Die Aufbereitung der Schlacken erfolgt mit dem Ziel, Metallfraktionen aus der Schlacke für die stoffliche Verwertung zurückzugewinnen und die mineralischen Anteile soweit zu separieren/ klassieren, dass sie als Ersatzbaustoffe eingesetzt werden können.

In der angelieferten Schlacke sind neben größeren Störstoffen in der Schlackenmatrix stofflich bisher nicht verwertbare NE-Metalle eingebunden. Weiterhin enthält sie auch freie und eingebundene VA-Metalle, die mit herkömmlicher Technik bislang weder erfasst noch separiert werden konnten.

Die Hauptkomponenten des Verfahrens sind die Wirbelstromabscheider (NEODym), der Hochgeschwindigkeitsprallzerkleinerer (TAR-Prozessor) sowie mehrere Klassieranlagen zur Siebung.

Der Bereich der Materialaufgabe auf die Aufbereitungsanlage (inkl. Brecheranlage) sowie der Haupt-Schlackenausrag (Fraktion 0-32 mm) wird durch ein Hallenbauwerk umschlossen.

Verfahrensbeschreibung

Beschreibung des Prozesses nach dem Grundfließbild des Prozesses der TKM (siehe unten, Abbildung 3).

Die Beschickung der Anlage mit Rost-/ und Kesselaschen erfolgt in den Aufgabebunker der Prallbrecheranlage.

Mit dem Abzugsband wird die zerkleinerte Rost-/ und Kesselasche mit den darin enthaltenen Metallen dem Fe-Abscheider 1 zugeführt.

Der Fe-Abscheider 1 entzieht dem Stoffstrom alle freien nicht verzünderten Fe-Metalle.

Mit den beiden Zuführbändern und wird der Stoffstrom auf die KT- Siebmaschine transportiert.

Auf der KT-Siebmaschine wird der Stoffstrom in die Fraktionen / Korngrößen 0-2 mm; 2-60 mm und > 60 mm siebtechnisch getrennt.

Der Stoffstrom > 60 mm wird durch das Leseband in die Sortierkabine gefördert.

In der Sortierkabine wird manuell aus dem Stoffstrom > 60 mm das VA-Metall und NE- Metall aussortiert und in den dafür bereitgestellten Container geworfen. Die verbleibenden Störstoffe (unverbrannter Abfall) fördert das Leseband in einen dafür breitgestellten Container. Die Störstoffe werden zurück zur MVA transportiert und dort thermisch verwertet.

Der Stoffstrom 0-2 mm (Inertmaterial) wird durch zwei Austragsbänder in das Output-Lager gefördert.

Der Stoffstrom 2-60 mm wird über das Beschickungsband in den TAR-Prozessor, ein neuartiges innovatives Aufschluss-System, gefördert (weiteres hierzu siehe Teilprojekt B „Industriepartner für innovative Verfahren“).

In dem TAR-Prozessor werden die eingeschlossenen, verzünderten, feinen Metallpartikel aufgeschlossen, so dass sie frei in dem behandelten Stoffgemisch vorliegen.

Über das Abzugsband wird das behandelte Stoffgemisch dem Fe-Abscheider 2 zugeführt. Der Fe-Abscheider 2 entzieht dem Stoffstrom die freien Fe-Metalle.

Das Förderband fördert den Stoffstrom auf die DD-Siebstation, mit der der Stoffstrom in die Fraktionen/Korngrößen 0-2 mm; 2-5 mm; 5-18 mm und 18-60 mm siebtechnisch getrennt wird.

Die Fraktion 0-2 mm wird mit den Austragsbändern in das Output-Lager gefördert. Der Stoffstrom 2-5 mm wird mit dem Austragsband 2 auf die Schwingrinne 1 gefördert.

Die Schwingrinne verteilt den Stoffstrom 2-5 mm und führt ihn dem DSRP 1 zu. Das DSRP-System ist ein dynamisches Starkfeldmagnetsystem, über das dem Stoffstrom die Fe- Oxide entzogen werden. Die Fe-Oxide werden mit dem Austragsband Fe in einen Container gefördert.

Das Austragsband 1 fördert den oxidfreien Stoffstrom auf einen Flow-Divider, über den der Stoffstrom in zwei gleichgroße Stoffströme aufgeteilt wird.

Die Austragsbänder 2 und 3 fördern die gleichgroßen Stoffströme auf die Schwingrinnen 2 und 3 der NE-Abscheider T-VIS 1 und T-VIS 2.

Auf diesen parallel angeordneten T-VIS Anlagen werden aus den Stoffströmen 2-5 mm die NE-Metalle abgeschieden und mit den Austragsbändern 1 und 2 in einen Container gefördert. Das verbleibende Inertmaterial wird über die Austragsbänder in das Output-Lager gefördert.

Der Stoffstrom 5-18 mm wird über das Austragsband 4 auf die Schwingrinne 5 geführt. Mit der Schwingrinne 5 wird der Stoffstrom verteilt und auf den DSRP 2 gefördert.

Das dynamische Starkfeldmagnetsystem DSRP 2 entzieht dem Stoffstrom die Fe-Metalle und Fe-Oxide.

Mit dem Austragsband wird das Gemisch aus Fe-Metallen und Fe-Oxiden dem Fe-Abscheider 3 zugeführt. Der Fe-Abscheider 3 entzieht dem Gemisch die Fe(+) - Partikel und wirft sie in einen Container ab.

Die Fe-Oxide (Fe(-)) Partikel werden mit den Austragsbändern 1 und 2 in den Container Fe(-) gefördert. Der Fe- und oxidfreie Stoffstrom 5-18 mm gelangt direkt vom DSRP 2 auf den NE-Abscheider VIS.

Mit dem VIS NE-Abscheider werden aus dem Stoffstrom die NE-Metalle abgeschieden und mit dem Austragsband in einen Container gefördert.

Der verbleibende Stoffstrom wird mit dem Zuführband auf das Rüttelsieb 2 gefördert. Mit dem Rüttelsieb 2 werden aus dem Stoffstrom die VA-Metalle siebtechnisch abgetrennt.

Diese VA-Metalle werden mit den Austragsbändern 1 und 2 in einen Container gefördert. Das verbleibende Inertmaterial der Körnung 5-18 mm wird mit den Austragsbändern in das Output - Lager gefördert.

Die Fraktion 18-60 mm wird über das Austragsband 3, sowie den Zuführbändern auf die Schwingrinne 4 gefördert.

Mit der Schwingrinne 4 wird der Stoffstrom verteilt und auf den NE-Abscheider SIS gefördert. Mit dem SIS NE-Abscheider werden aus dem Stoffstrom die NE-Metalle (18-60 mm) abgeschieden und mit dem Austragsband in einen Container gefördert.

Der verbleibende Stoffstrom wird mit dem Zuführband auf das Rüttelsieb1 gefördert. Mit dem Rüttelsieb 1 wird siebtechnisch aus dem Stoffstrom das VA-Metall abgeschieden und über die Austragsbänder in den VA-Container gefördert. Das verbleibende Inertmaterial wird mit den Austragsbändern in das Output-Lager gefördert.

d.2. Grundfließbild / Verfahrenfließbild

Grundfließbild

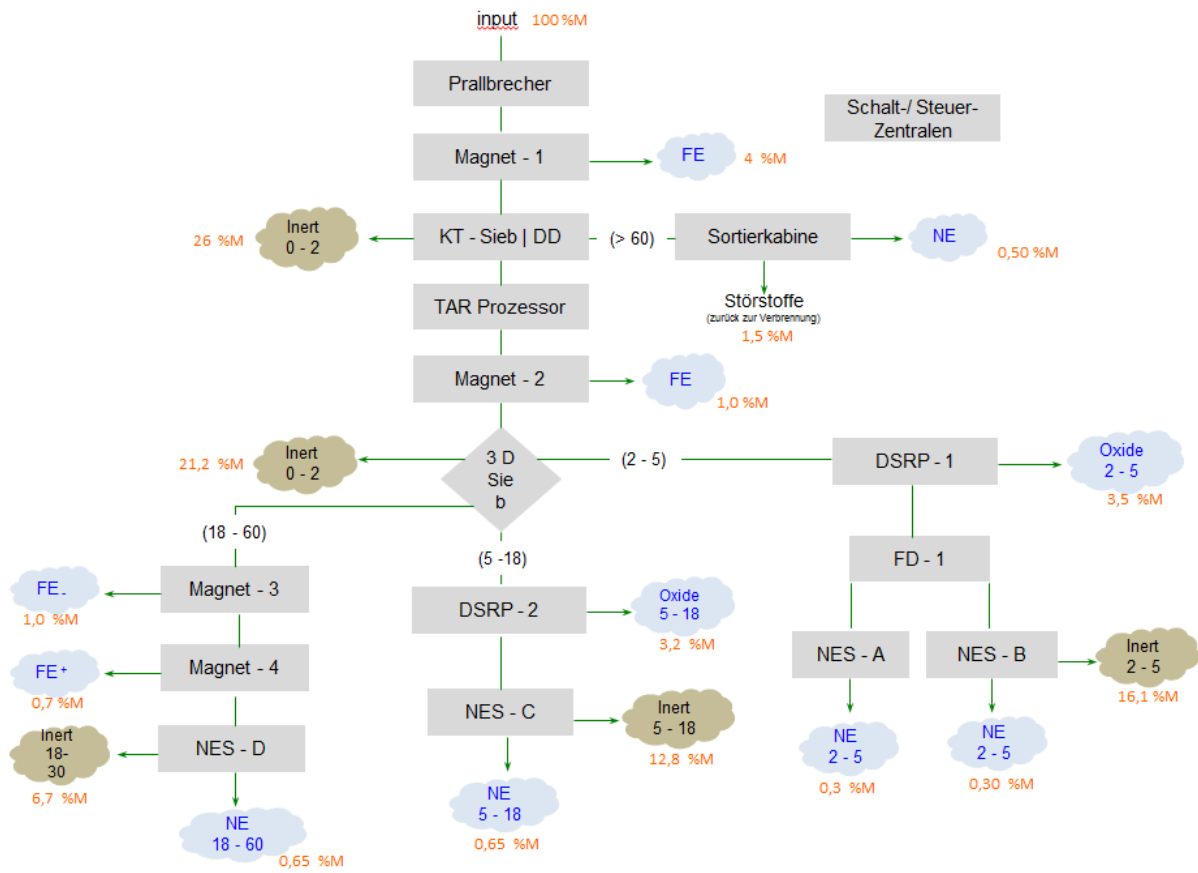


Abbildung 3: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Alpha-Linie) mit beispielhafter Mengenbilanzierung

Verfahrensfließbild

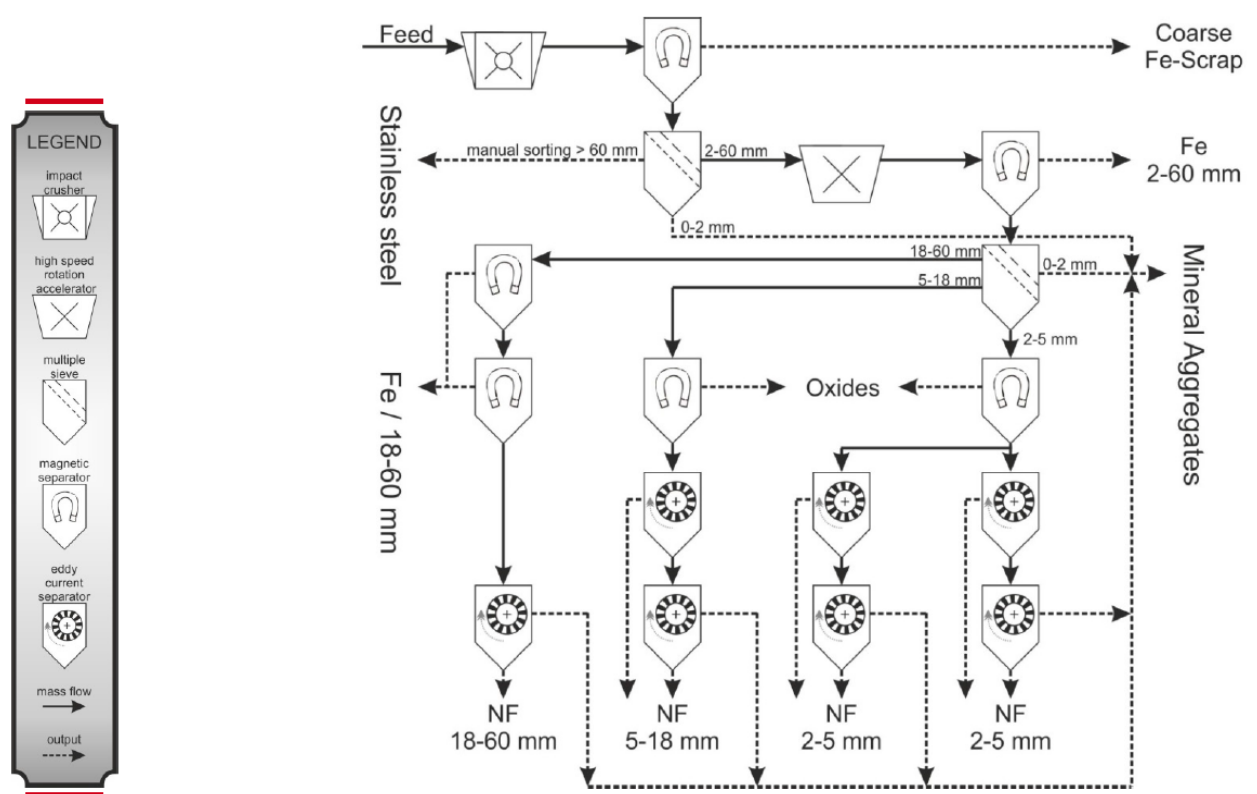


Abbildung 4: Verfahrensfließbild TARTECH-Anlage

e. Versuchsergebnisse Massenbilanz

e.1. Versuch 1

Während des Versuches 1 wurde eine unberaubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle), hier Sommermüll, aus der MVA Stellingier Moor während zweier Versuchstage in der Alpha - Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **974,62 Mg** Rohschlacke inkl. Grobschrott verwendet.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH wurden dabei folgende Outputströme bilanziert (Grundlage: Grundfließbild gemäß: Abbildung 3)

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 37,27 Mg entsprechend 3,824 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 5,50 Mg entsprechend 0,564 %

Oxide (18 - 60)

- 5,38 Mg entsprechend 0,552 %

Oxide (5 - 18)

- 25,90 Mg entsprechend 2,657 %

Oxide (2 - 5)

- 18,78 Mg entsprechend 1,927 %

NE (18 - 60)

- 6,19 Mg entsprechend 0,635 %

NE (5 - 18)

- 7,08 Mg entsprechend 0,726 %

NE (2 - 5)

- 2,00 Mg entsprechend 0,205 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 3,16 Mg entsprechend 0,324 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 1,90 Mg entsprechend 0,195 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 113,16 Mg entsprechend 11,61 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 15,27 Mg entsprechend 1,567 % an NE-Metallen und
- 42,77 Mg entsprechend 4,388 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 861,46 Mg entsprechend 88,39 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht, jedoch wurden diese Stoffströme im Rahmen des Versuches 1 repräsentativ beprobt. Für die Verteilung dieser Stoffströme wurde die mittlere Verteilung gemäß Grundfließbild angenommen:

- Feinmineralik 0 - 2 mm vor TAR-Prozessor (mit 26,0 Ma.-% bewertet),
- Feinmineralik 0-2 mm nach TAR-Prozessor (mit 21,2 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 2 - 5 mm (mit 16,1 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 5 - 18 mm (mit 12,8 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 18 - 60 mm (mit 6,7 Ma.-% bewertet),

Ziel dieser Beprobungen der mineralischen Reststoffe war es, im Rahmen weiterer Untersuchungen etwaige bautechnische und sonstige Eigenschaften in Bezug auf zukünftige Verwertungswege untersuchen zu können.

e.2. Versuch 2

Während des Versuches 2 wurde eine unberaubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle), hier Herbstmüll mit erhöhtem Laubanteil, aus der MVA Stelling Moor während eines Versuchstages in der Alpha – Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **471,18 Mg** Rohschlacke inkl. Grobschrott verwendet.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH wurden dabei folgende Outputströme bilanziert (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abbildung 3):

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 29,10 Mg entsprechend 6,176 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 6,38 Mg entsprechend 1,354 %

Oxide (5 – 60)

- 23,26 Mg entsprechend 4,937 %

Oxide (2 - 5)

- 32,96 Mg entsprechend 6,995 %

NE (18 – 60)

- 4,78 Mg entsprechend 1,014 %

NE (5 – 18)

- 3,60 Mg entsprechend 0,764 %

NE (2 – 5)

- 1,82 Mg entsprechend 0,386 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 2,56 Mg entsprechend 0,543 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 0,40 Mg entsprechend 0,085 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 104,86 Mg entsprechend 22,26 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 10,20 Mg entsprechend 2,165 % an NE-Metallen und
- 35,48 Mg entsprechend 7,530 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 366,32 Mg entsprechend 77,75 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht.

Die im Vergleich zum Versuch 1 deutlich erhöhten abgetrennten Anteile an Fe- und NE-Metallen werden im Rahmen der weiteren Untersuchungen bewertet. Mögliche Gründe hierfür sind eine veränderte Abfallzusammensetzung, eine verbesserte Abtrennung in der Alpha-Linie aufgrund von Optimierungseffekten oder ggf. auch ein erhöhter Fremdstoffanteil.

e.3. Versuch 3

Während des Versuches 3 wurde eine unberaubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle), hier Wintermüll mit geringem Biomasseanteil, aus der MVA Stellingener Moor während eines Versuchstages in der Alpha - Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **355,6 Mg** Rohschlacke inkl. Grobschrott verwendet.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH wurden dabei folgende Outputströme bilanziert (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abbildung 3):

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 30,50 Mg entsprechend 8,577 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 5,08 Mg entsprechend 1,429 %

Oxide (5 - 60)

- 10,74 Mg entsprechend 3,020 %

Oxide (2 - 5)

- 14,70 Mg entsprechend 4,134 %

NE (18 - 60)

- 4,02 Mg entsprechend 1,130 %

NE (5 - 18)

- 1,92 Mg entsprechend 0,540 %

NE (2 - 5)

- 1,88 Mg entsprechend 0,527 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 2,13 Mg entsprechend 0,599 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 1,86 Mg entsprechend 0,523 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 72,83 Mg entsprechend 20,481 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 7,82 Mg entsprechend 2,199 % an NE-Metallen und
- 35,58 Mg entsprechend 10,006 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 282,77 Mg entsprechend 79,52 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht.

Die Ergebnisse der abgetrennten Anteile an Fe- und NE-Metallen korrespondieren mit denen des Versuches 2.

e.4. Versuch 4

Während des Versuches 4 wurde eine unberaubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle) aus der MVA Rugenberger Damm (MVR) während eines Versuchstages in der Alpha - Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **908,7 Mg** Rohschlacke, jedoch ohne Grobschrott, verwendet.

Hilfsweise wurde die separierte Grobschrottmenge aus der Bilanzierung der MVR zugrunde gelegt. Danach betrug der mittlere, separierte Grobschrottanteil in 2014 ca. 15,41 kg/Mg Rohschlacke.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH in Verbindung mit der zu erwartenden, vorseparierten Grobschrottmenge, können dabei folgende Outputströme bilanziert werden (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abb. 2):

Fe-Grob (Grobabscheidung MVR):

- 14,00 Mg entsprechend 1,541 %

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 15,06 Mg entsprechend 1,657 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 5,36 Mg entsprechend 0,590 %

Oxide (5 - 60)

- 29,99 Mg entsprechend 3,300 %

Oxide (2 - 5)

- 47,70 Mg entsprechend 5,249 %

NE (18 - 60)

- 6,72 Mg entsprechend 0,740 %

NE (5 – 18)

- 4,45 Mg entsprechend 0,490 %

NE (2 – 5)

- 4,73 Mg entsprechend 0,521 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 2,45 Mg entsprechend 0,270 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 6,10 Mg entsprechend 0,671 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 136,56 Mg entsprechend 15,028 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 15,90 Mg entsprechend 1,750 % an NE-Metallen und
- 34,42 Mg entsprechend 3,788 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 772,14 Mg entsprechend 84,97 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht.

Der im Vergleich zu den Versuchen 2 und 3 reduzierte Anteil an Fe-Metallen ist nicht erklärbar, korrespondiert jedoch mit den vergleichbaren Ergebnissen aus Versuch 1.

e.5. Versuch 5

Während des Versuches 5 wurde eine beraubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle) aus der MVA Rugenberger Damm während zweier Versuchstage in der Alpha – Linie eingesetzt (siehe hierzu auch Erläuterungen in Punkt a.5).

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **506,0 Mg** Rohschlacke, jedoch ohne Grobschrott, verwendet.

Hilfsweise wurde die separierte Grobschrottmenge aus der Bilanzierung der MVR zugrunde gelegt. Danach betrug der mittlere, separierte Grobschrottanteil in 2014 ca. 17,60 kg/Mg Rohschlacke.

Des Weiteren wurde die Rohschlacke nach Grobentschrottung zweimal über die vorhandene Schlackenaufbereitung der MVR gefahren, einmal einen Tag nach Austrag aus dem Nassentschlacker / der Grobentschrottung in Verbindung mit einem Brechen der Rohschlacke vor Beginn der Carbonatisierung und einmal während der Carbonatisierung, ca. 4 Wochen nach Carbonatisierungsbeginn.

Während dieser Aufbereitung werden auf der Grundlage einer Bilanzierung der MVR auf Basis der Betriebsergebnisse 2014 folgende Stoffströme separiert:

- Fe-Abtrennung aus der Schlackenaufbereitung: 83,5 kg/Mg und
- NE-Abtrennung: 1,3 % entsprechend 13 kg/Mg.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH in Verbindung mit der zu erwartenden, vorseparierten Stoffströme, können dabei folgende Outputströme bilanziert werden (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abbildung 3:

Fe-Grob (Grobabscheidung MVR):

- 8,91 Mg entsprechend 1,760 %

Fe (Schlackenaufbereitung MVR):

- 42,25 Mg entsprechend 8,350 %

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 0,40 Mg entsprechend 0,079 %

Oxide (5 – 60)

- 6,48 Mg entsprechend 1,280 % (nur teilweise erfasst)

Oxide (2 - 5)

- 9,41 Mg entsprechend 1,860 % (nur teilweise erfasst)

NE (Schlackenaufbereitung MVR exkl. 30 % Anbackungen):

- 4,60 Mg entsprechend 1,300 %

NE (18 – 60)

- 0,70 Mg entsprechend 0,138 %

NE (5 – 18)

- 2,36 Mg entsprechend 0,466 %

NE (2 – 5)

- 3,34 Mg entsprechend 0,660 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 78,45 Mg entsprechend 15,50 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 11,00 Mg entsprechend 2,175 % an NE-Metallen und
- 51,56 Mg entsprechend 10,19 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 427,55 Mg entsprechend 84,5 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht.

e.6. Versuch 6 (Referenzversuch)

Während des Versuches 6 wurde eine unberaubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle) aus der MVA Borsigstraße (MVB) während eines Versuchstages in der Alpha-Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **718,8 Mg** Rohschlacke, jedoch ohne Grobschrott, verwendet.

Hilfsweise wurde die separierte Grobschrottmenge aus der Bilanzierung der MVR zugrunde gelegt. Danach betrug der mittlere, separierte Grobschrottanteil in 2014 ca. 15,41 kg/Mg Rohschlacke.

Im Zusammenhang mit der Gesamtbilanzierung der Metalle ist anzumerken, dass im Rahmen einer Vorsortierung in der Anlieferhalle ca. 1,95 kg/Mg Rohschlacke separiert werden, welche aber in der vergleichenden Bewertung der Aufbereitung unberücksichtigt bleiben.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH in Verbindung mit der zu erwartenden, vorseparierten Grobschrottmenge, können dabei folgende Outputströme bilanziert werden (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abbildung 3:

Fe-Grob (Grobabscheidung MVR):

- 11,08 Mg entsprechend 1,541 %

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 24,58 Mg entsprechend 3,412 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 5,46 Mg entsprechend 0,760 %

Oxide (5 - 60)

- 23,98 Mg entsprechend 3,336 %

Oxide (2 - 5)

- 32,96 Mg entsprechend 5,585 %

NE (18 – 60)

- 5,54 Mg entsprechend 0,771 %

NE (5 – 18)

- 3,45 Mg entsprechend 0,480 %

NE (2 – 5)

- 3,67 Mg entsprechend 0,511 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 2,10 Mg entsprechend 0,292 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 6,83 Mg entsprechend 0,950 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 119,65 Mg entsprechend 16,646 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 12,66 Mg entsprechend 1,761 % an NE-Metallen und
- 41,12 Mg entsprechend 5,721 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 599,15 Mg entsprechend 83,35 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht, jedoch wurden diese Stoffströme im Rahmen des Versuches 6 repräsentativ beprobt. Für die Verteilung dieser Stoffströme wurde die mittlere Verteilung gemäß Grundfließbild (Abb. 3) angenommen:

- Feinmineralik 0 – 2 mm vor TAR-Prozessor (mit 26,0 Ma.-% bewertet),
- Feinmineralik 0–2 mm nach TAR-Prozessor (mit 21,2 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 2 – 5 mm (mit 16,1 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 5 – 18 mm (mit 12,8 Ma.-% bewertet),
- Mineralik 18 – 60 mm (mit 6,7 Ma.-% bewertet),

Ziel dieser Beprobungen der mineralischen Reststoffe war es, im Rahmen weiterer Untersuchungen etwaige bautechnische und sonstige Eigenschaften in Bezug auf zukünftige Verwertungswege untersuchen zu können.

Die beprobten mineralischen Reststoffe wurden vorerst wieder vereint.

In einem zweiten Schritt wurde dann die Feinfraktion kleiner 2 mm mittels Trommelsieb wieder abgetrennt und nachfolgend in der KW 30 der Beta – Linie zugeführt. Die damit in Verbindung stehende repräsentative Versuchsfahrt mit der Beta – Linie erfolgte am 23.07.2015.

e.7. Versuch 7

Während des Versuches 7 wurde eine beraubte Schlacke aus einer üblichen Abfallzusammensetzung (ca. 80 % Hausmüll und 20 % Gewerbeabfälle) aus der MVA Borsigstraße (MVB) während eines Versuchstage in der Alpha-Linie eingesetzt.

Insgesamt wurden gemäß Eingangsverwiegung der TARTECH **348,6 Mg** Rohschlacke, jedoch ohne Grobschrott, verwendet.

Hilfsweise wurde die separierte Grobschrottmenge aus der Bilanzierung der MVR zugrunde gelegt. Danach betrug der mittlere, separierte Grobschrottanteil in 2014 ca. 15,41 kg/Mg Rohschlacke.

Im Zusammenhang mit der Gesamtbilanzierung der Metalle ist anzumerken, dass im Rahmen einer Vorsortierung in der Anlieferhalle ca. 1,95 kg/Mg Rohschlacke separiert werden (analog zu Versuch 6), welche aber in der vergleichenden Bewertung der Aufbereitung unberücksichtigt bleiben.

Nach einer vierwöchigen Carbonatisierungsphase wurde die Rohschlacke über die vorhandene Schlackenaufbereitung der MVB gefahren. Dieses entspricht der üblichen Vorgehensweise der Schlackenaufbereitung in der MVB.

Während dieser Aufbereitung werden auf der Grundlage einer Bilanzierung der MVR auf Basis der Betriebsergebnisse 2014 folgende Stoffströme separiert:

- Fe-Abtrennung aus der Schlackenaufbereitung: 89,5 kg/Mg
- Fe-Metalle aus dem Überkorn: 2,3 kg/Mg und
- NE-Abtrennung: 1,3 % entsprechend 13 kg/Mg.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH in Verbindung mit der zu erwartenden, vorseparierten Stoffströme, können dabei folgende Outputströme bilanziert werden (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abbildung 3):

Fe-Grob (Grobabscheidung MVB):

- 5,37 Mg entsprechend 1,541 %

Fe (Schlackenaufbereitung MVB):

- 31,20 Mg entsprechend 8,950 %

Fe (Überkorn MVB):

- 0,80 Mg entsprechend 0,230 %

Fe-Grob (Magnet 1, Fe-Abscheidung nach Prallbrecher):

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Fe-Fein (Magnet 2, 3 und 4, Fe-Abscheidung nach TAR-Prozessor und Sieb)

- 0,26 Mg entsprechend 0,075 %

Oxide (5 – 60)

- 6,14 Mg entsprechend 1,761 %

Oxide (2 - 5)

- 8,44 Mg entsprechend 2,421 %

NE (Schlackenaufbereitung MVB exkl. 30 % Anbackungen):

- 3,17 Mg entsprechend 1,300 %

NE (18 – 60)

- 1,11 Mg entsprechend 0,318 %

NE (5 – 18)

- 1,50 Mg entsprechend 0,430 %

NE (2 – 5)

- 1,71 Mg entsprechend 0,491 %

VA (> 60 aus Sortierkabine)

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Unverbranntes (> 60 aus Sortierkabine)

- 0,00 Mg entsprechend 0,000 %

Insgesamt wurden über die Alpha-Linie während des Versuches damit 59,70 Mg entsprechend 17,126 % an unterschiedlicher Stoffströmen abgetrennt, davon

- 7,49 Mg entsprechend 2,149 % an NE-Metallen und
- 37,63 Mg entsprechend 10,795 % an Fe-Metallen.

Der rechnerisch verbleibende Massenstrom in Höhe von 288,90 Mg entsprechend 82,87 % verbleibt als mineralische Restfraktion.

Eine weitergehende Bilanzierung der mineralischen Restfraktion in die unterschiedlichen Korngrößen erfolgte nicht.

f. Versuchsergebnisse Qualität

Um die Qualität der Outputströme zu ermitteln wurden die genommenen Proben nach der Methodik (siehe I 3.2) untersucht. Im Folgenden sollen die Ergebnisse dessen dargestellt werden. Um die Übersichtlichkeit zu wahren werden die Siebkennlinien nur für die Versuchsreihe MVB R (Referenzversuch) dargestellt.

Zur Darstellung des Rostaschezustands in die Aufbereitungsanlage ist der Wassergehalt in Abbildung 5 dargestellt. Wurden mehrere Proben pro Fraktion genommen (im Wesentlichen Mischprobe (MP) 1 und 2) so ist ein gemittelter Wert dargestellt.

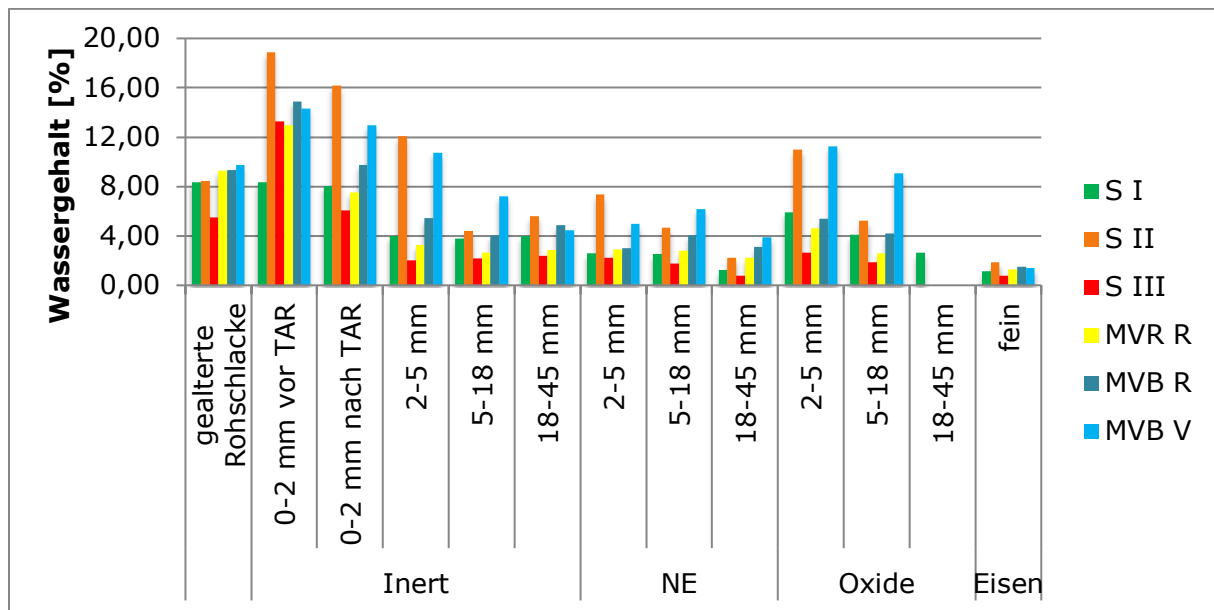


Abbildung 5: Wassergehalt Proben alpha-Linie

Betrachtet man die ermittelten Wassergehalte, so ist auffällig, dass der Trend für alle Versuchsreihen nahezu gleich ist. Die reinen Metallfraktionen zeigen sehr niedrige Wassergehalte meist unter 5 %. Während die Oxide bereits höhere Wassergehalte aufweisen, sind die höchsten Wassergehalte im Inertstrom zu finden. Im Besonderen in den beiden Fraktionen kleiner 2 mm. Die durchwegs höchsten Wassergehalte zeigen S II und MVB-V. Im Fall von S II lässt sich das auf die Aufbereitung im Februar zurückführen. Durch die Alterung im Freien ist die Rostasche der Witterung ausgesetzt. Der höhere Wassergehalt lässt sich auf die erhöhten Niederschläge in der Winterperiode zurückführen. Die erhöhten Wassergehalte der Versuchsreihe MVB-V lassen sich auf weniger Alterung zurückführen.

f.1. Versuch 1 (SI)

Die Versuchsreihe S I wurde im Dezember 2014 aufbereitet und stammt von der Verbrennungsanlage Stellingor Moor mit Sommerabfall.

f.1.1. Eisen fein

Die Fraktion Eisen fein zeigt sich sehr rein. Über 99 % der Fraktion ist schwach magnetisch (Tabelle 7). Da eine weitere Auftrennung nicht möglich war, wird hier stellvertretend für alle Versuchsreihen die Qualität der schwach magnetischen Fraktion dargestellt. Abbildung 6 zeigen Eindrücke der Fraktion. Obwohl die Fraktionen größtenteils sehr sauber und vorhandene Hohlräume meist leer und ohne Schlackeanhaftungen sind, sind einzelne Anhaftungen wie in Abbildung 7 trotzdem vorhanden. Aufgrund dieser aber eher wenig vertretenden Anhaftungen und der hohen Dichte von Eisen leistet dies gewichtsmäßig einen geringen Beitrag und findet deswegen bei der weiteren Berechnung innerhalb der Bilanzierung keine Berücksichtigung.

Tabelle 7: magnetischen Trennung der Fraktion S I Eisen fein

[%]	MP1	MP2
schwach magnetisch	99,1	99,4
stark magnetisch	0,9	0,5
Fremdanteil	0,0	0,0



Abbildung 6: Beispiele Eisen fein



Abbildung 7: vereinzelt Anhaftungen Eisen fein

f.1.2. Eisen grob

Die Fraktion Eisen grob wurde mit Hilfe von Fotos dokumentiert. Der Output zeigt sich relativ rein mit nur leichten Verschmutzungen. Der Fremdstoffanteil wird bei der Gesamtbilanzierung mit einem Prozent berücksichtigt.



Abbildung 8: Eindrücke Eisen grob

f.1.3. NE-Metalle

Tabelle 8 zeigt die Versuchsergebnisse für die NE-Metalle. Der Fremdstoffanteil ist innerhalb der verschiedenen Korngrößenfraktionen sehr unterschiedlich. Liegt der Fremdstoffanteil in der Fraktion 2-5 mm bei 40 bzw. 55 %, so wird dieser bei der nächstgrößeren Fraktion 5-18 mm mit 22 bzw. 24 % schon deutlich weniger und ist am geringsten in der größten Fraktion 18-45 mm mit 16 bzw. 17 %. Innerhalb der verschiedenen Fraktionen ist das unterschiedliche Verhältnis Aluminium / Kupfer / Messing sehr deutlich. Ist Kupfer mit in den beiden größeren Fraktionen nur mit 2 bis 3 % vorhanden, zeigt die kleinste Fraktion einen Kupferanteil von ca. 25 %. Bezieht man den Fremdstoffanteil mit ein, so liegt der Kupferanteil bei 50 %. Aluminium stellt fast immer die größte Fraktion dar, variiert aber im Anteil. Messing ist auch in der größten Fraktion am deutlichsten vertreten.

Tabelle 8: manuellen Sortierung S I NE-Metalle

[%]	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	59,1	50,5	75,9	78,0	84,0	82,6
Kupfer	27,9	19,4	2,2	2,6	2,8	1,9
Aluminium	27,0	29,9	64,2	64,8	53,6	58,3
Messing	4,2	1,3	8,8	10,6	24,2	20,8
Fremdanteil und Waschverlust	40,2	55,1	24,1	22,0	16,0	17,4
Stark magnetisch	0	0	1,4	0,9	5,9	2,7

f.1.4. Rostfreier Stahl (VA)

Eindrücke der VA-Fraktion zeigt Abbildung 9. Diese handsortierte Fraktion ist durchweg sehr rein. Es wird für weitere Berechnungen kein Fremdstoffanteil berücksichtigt.



Abbildung 9: Eindrücke S I VA

f.1.5. Oxide

Tabelle 9 zeigt die magnetische Trennung der Oxidfraktion. Der schwach magnetische Anteil mit einem höheren Anteil an gediegenen Eisen liegt in der kleinsten Form etwa gleichverteilt wie der starkmagnetische Anteil vor. In dieser Fraktion ist ein höherer Anteil in oxidischer Form vorhanden. Der nicht-magnetische Fremdanteil liegt bei um die 2 %. Bei der nächstgrößeren Fraktion liegt die Aufteilung im Schnitt ähnlich verteilt wie der kleineren Fraktion. In der Fraktion 18-45 mm ist der schwach magnetische Anteil allerdings viel geringer. Gründe hierfür könnte die bessere Entfrachtung in diesen Größenbereich durch die Magnetscheider von Eisen grob und Eisen fein sein. Zudem ist ein höherer Fremdanteil in der groben Fraktion zu verzeichnen.

Tabelle 9: magnetischen Trennung SI Oxide

Oxide	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP 1-4	MP 5-8	MP 1-4	MP 5-8	MP 1-4	MP 5-8
schwach magnetisch	49,4	49,3	52,7	46,7	38,0	38,6
stark magnetisch	48,1	49,0	45,0	51,5	53,4	51,4
Fremdanteil	2,5	1,7	2,4	1,7	8,6	8,6

f.1.6. Inert

In der Inertfraktion wurden verschiedene Restmetallgehalte bestimmt. Da vor allem Aluminium und Eisen in dieser Fraktion meist in mineralischer und nicht in gediegener Form vorliegt, soll hier für die Basismetalle nur Kupfer aufgeführt werden. Stellvertretend für die Edelmetalle steht Silber. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 10 aufgeführt. In der Darstellung sind die unterschiedlichen Einheiten für die beiden Metalle zu berücksichtigen. Für Kupfer zeigt sich folgendes Bild: Die Konzentration ist am höchsten in den beiden nicht entfrachteten Fraktionen 0-2 mm und liegt da etwa bei 3 bis 4 g/kg. Die beiden nächst größeren Outputgrößen weisen nur noch lediglich ca. 1 g/kg auf und können als gut entfrachtet angesehen werden. In der größten Fraktion ist jedoch wieder mehr Kupfer vorhanden. Auffällig ist dies auch im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus f.1.3 da genau in diesem Korngrößenbereich weniger Kupfer zu finden ist. Silber weist mit 8 mg in der vor dem TAR-Prozessor abgetrennten Inertfraktion die höchste Konzentration auf. Lediglich im Korngrößenbereich 5-18 mm sind nochmal erhöhte Silberkonzentrationen zu finden.

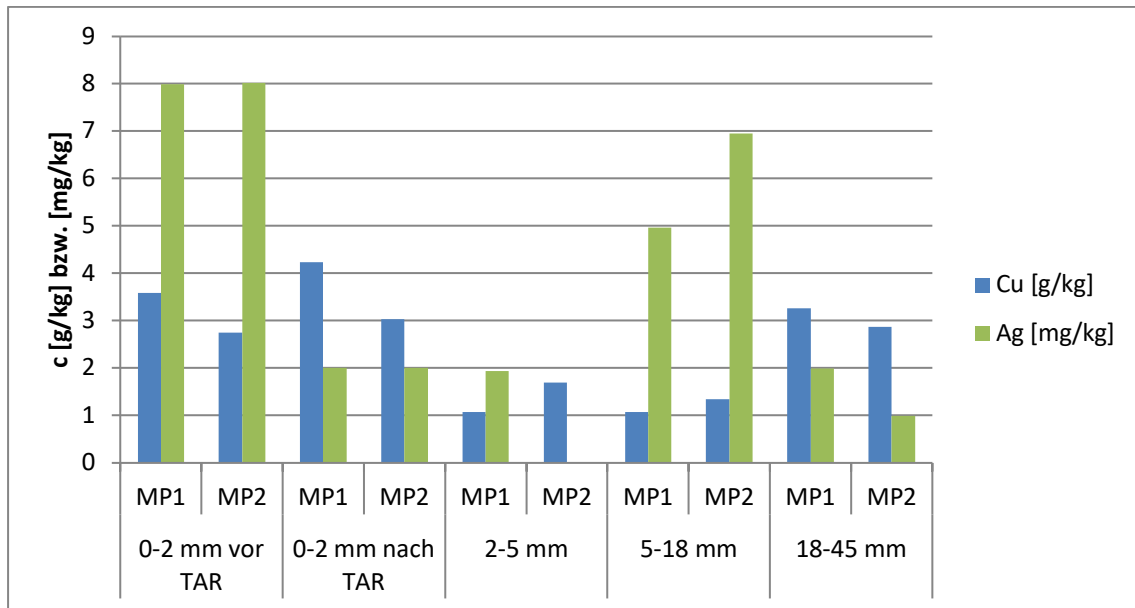


Abbildung 10: Restmetallgehalte Kupfer und Silber in der Inertfraktion SI

f.1.7. Unverbranntes

Unverbranntes fällt an unterschiedlichen Stellen der Aufbereitungsanlage an. Neben Schwer- und Leichtfraktion aus der Sortierkabine (Abbildung 11), wird in vereinzelt aufgestellten Abfalltonnen (Abbildung 12) Unverbranntes gesammelt. Im Weiteren werden nur Bilder vom Unverbrannten gezeigt.



Abbildung 11: Leicht- (links) und Schwerfraktion (rechts) SI Unverbranntes



Abbildung 12: Weiteres Unverbranntes S I

f.2. Versuch 2 (SII)

Bei dieser Versuchsreihe wurde in der Abfallverbrennungsanlage Stellingher Moor verbrannter Herbstabfall aufbereitet und beprobt.

f.2.1. Eisen fein

Die Ergebnisse der magnetischen Trennung des Eisens fein ist in Tabelle 10 dargestellt. Hier zeigt sich ein etwas niedrigerer schwach magnetischer Anteil. Dieser liegt hier bei etwa 98,5 %. Der stark magnetische Anteil liegt bei etwas über einem Prozent und der Fremdanteil ist gering und variiert bis zu 0,8 %.

Tabelle 10: magnetischen Trennung S II Eisen fein

[%]	<i>MP1</i>	<i>MP2</i>
schwach magnetisch	98,7	98,2
stark magnetisch	1,2	1,0
Fremdanteil	0,1	0,8

f.2.2. Eisen grob

Eindrücke der groben Eisen-Fraktion dieser Versuchsreihe zeigt Abbildung 13. Diese Fraktion zeigt nach wie vor gute Qualität und der Fremdstoffanteil wird mit einem Prozent angesetzt.



Abbildung 13: Eisen grob SII

f.2.3. NE-Metalle

Die manuelle Sortierung der NE-Metalle für die Versuchsreihe SII zeigt Tabelle 11. Hier wurden die nun installierten zwei verschiedenen Wirbelstromabscheider für die Fraktion 5-18 mm einzeln beprobt. Der Fremdstoffanteil ist vor allem in den größeren Fraktionen deutlich höher als bei der vorherigen Versuchsreihe. Der deutlich höhere Wasseranteil (siehe Abbildung 5) könnte Ursache für die schlechtere Trennleistung der Wirbelstromabscheider sein.

Tabelle 11: Manuelle Sortierung S II NE-Metalle

[%]	2-5 mm		5-18 mm I		5-18 mm II		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	61,2	55,8	69,4	67,8	49,6	60,4	68,4	83,3
Kupfer	26,9	24,4	6,9	4,9	2,2	0,2	0,9	0,5
Aluminium	31,4	29,0	61,2	59,8	46,9	56,8	61,8	80,9
Messing	3,0	2,4	0,8	3,0	0,5	3,4	5,7	0,7
Fremdanteil und Waschverlust	39,7	36,8	31,1	32,2	50,4	39,6	31,7	16,7
stark magnetisch			1,6	2,1	0,9	7,4	25,9	12,9

f.2.4. Rostfreier Stahl (VA)

Der rostfreie Stahl ist in Abbildung 14 dargestellt und zeigt gleichbleibende gute Qualität. Ein Fremdstoffanteil wird nicht berücksichtigt.



Abbildung 14: Eindrücke rostfreier Stahl SII

f.2.5. Oxide

Ab dem Zeitpunkt der Aufbereitung von S II werden die größeren beiden Oxidfraktionen an einem Punkt gesammelt. Der Output 2-5 mm liefert ähnliche Ergebnisse wie in der vorherigen Versuchsreihe, etwa gleichverteilte Anteile an magnetischen und nicht magnetischen Anteilen sowie ein nur geringer Fremdanteil. In der größeren Fraktion ist der schwach magnetische Anteil etwas geringer.

Tabelle 12: magnetischen Trennung S II Oxide

[%]	2-5 mm		5-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2
schwach magnetisch	46,3	49,4	45,5	44,5
stark magnetisch	49,8	50,5	52,0	53,4
Fremdanteil	3,9	0,1	2,4	1,9

f.2.6. Inert

Die Kupfergehalte in der Inertfraktion (Abbildung 15) zeigen in dem Bereich der noch keiner Aufbereitung unterzogen wurde ähnliche Werte wie in der ersten Versuchsreihe mit in etwa 4 g/kg Kupfer. Deutlich höhere Werte sind allerdings in der vorher viel besser entfrachteten Fraktionen 2-5 mm und 5-18 mm zu finden. Hier werden mindestens doppelt so hohe Kupfergehalte mit 2-4 g/kg gemessen. Neben evtl. höherem Kupfereintrag im Herbstabfall wird hier, wie bereits im Abschnitt f.2.3, für die NE-Metalle der deutlich höhere Wasseranteil in der gesamten Rostasche sein. Die Silberkonzentrationen sind in der Inertfraktion vor TAR gleich, ansonsten deutlich höher.

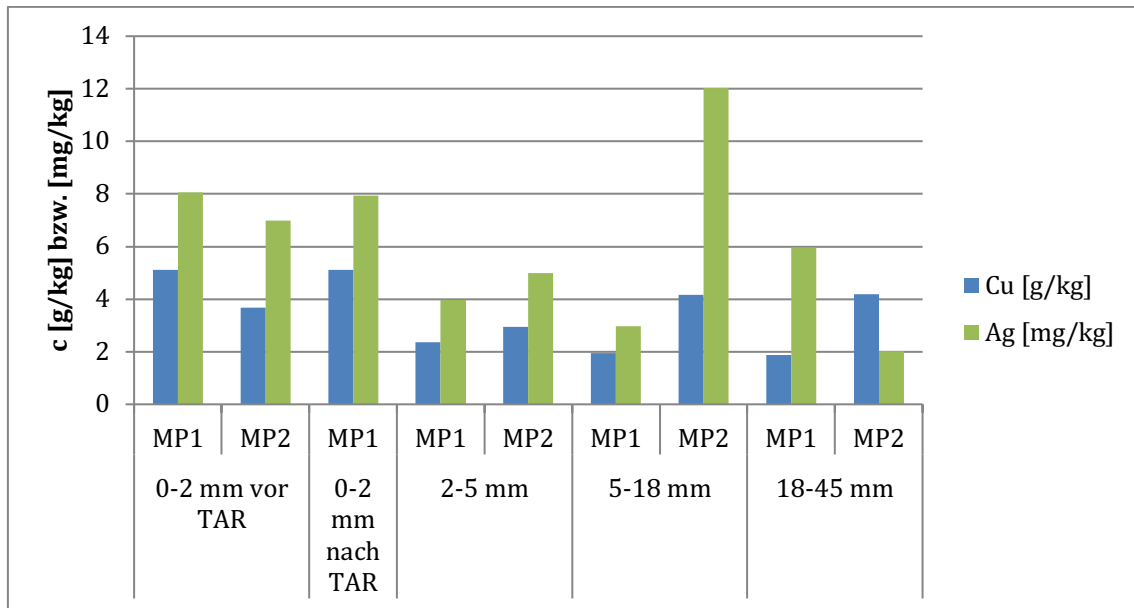


Abbildung 15: Restmetallgehalte SII Inert

f.2.7. Unverbranntes

Eindrücke des Unverbrannten dieser Versuchsreihe zeigt Abbildung 16



Abbildung 16: Eindrücke Unverbranntes SII

f.3. Versuch 3 (SIII)

Bei dieser Versuchsreihe wurde in der Abfallverbrennungsanlage Stellingr Moor verbrannter Winterabfall aufbereitet und beprobt.

f.3.1. Eisen fein

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der magnetischen Sortierung der Fraktion Eisen fein. Die zwei verschiedenen Mischproben zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Während die erste Mischprobe eine Reinheit von über 97 % aufweist, ist in der zweiten nur 78 % schwach magnetisches Material. Allerdings entfällt die Differenz nicht auf direkten Fremdanteil, sondern auf stark magnetisches Material. Für die

weitere Bilanzierung findet MP2 keine Berücksichtigung. Da es sich bei der Abweichung um eine größere stark magnetische Komponente handelt.

Tabelle 13: magnetische Trennung SIII Eisen fein

[%]	MP1	MP2
schwach magnetisch	97,3	78,0
stark magnetisch	2,4	22,0
Fremdanteil	0,4	0,1

f.3.2. Eisen grob

Eindrücke der groben Eisen-Fraktion dieser Versuchsreihe zeigt Abbildung 17. Diese Fraktion zeigt nach wie vor gute Qualität und der Fremdstoffanteil wird mit einem Prozent angesetzt.



Abbildung 17: Eindrücke Eisen grob SIII

f.3.3. NE-Metalle

Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der manuellen Sortierung der NE-Metalle. Der Fremdstoffanteil variiert zwischen 15,4 % in der groben Fraktion 18-45 mm und 36,5 % in der Fraktion 2-5 mm. Auffällig ist dabei der hohe stark magnetische Anteil in der Fraktion 18-45 mm. Die Verteilung in die einzelnen NE-Metalle zeigt sich ähnlich wie in den beiden vorherigen Versuchsreihen wie folgt: Während in der groben Fraktion um die 80 % Aluminium vorhanden ist, reduziert sich dies in der Mittelfraktion und in der feinen Fraktion (2-5 mm) liegt der Aluminiumanteil bei etwas mehr als der Hälfte. Der Messinganteil ist auch in der groben Fraktion am größten. Der Kupferanteil ist in der groben Fraktion gering und erreicht in der feinen Fraktion dann etwa die Hälfte des NE-Anteils.

Tabelle 14: manuelle Sortierung S III NE

[%]	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	63,5	64,3	69,6	66,1	71,2	84,6
Kupfer	18,2	32,0	5,1	5,2	1,4	2,1
Aluminium	44,6	32,3	55,8	50,9	55,8	70,7
Messing	0,7	0,0	8,3	9,8	13,4	10,9
Fremdanteil und Waschverlust	36,5	35,7	30,4	33,9	28,8	15,4
Stark magnetisch	0,0	0,0	0,94	4,5	15,7	3,7

f.3.4. Rostfreier Stahl (VA)

Der rostfreie Stahl ist in Abbildung 18 dargestellt und zeigt gleichbleibende gute Qualität. Ein Fremdstoffanteil wird nicht berücksichtigt.



Abbildung 18: Eindrücke VA SIII

f.3.5. Oxide

Die Ergebnisse der magnetischen Trennung der Oxide sind in Tabelle 15 dargestellt. In der Fraktion 2-5 mm ist der schwach und stark magnetische Anteil etwa gleich verteilt. In der groben Fraktion sind etwa 60 % schwach und 40 % stark magnetischer Anteil vorhanden.

Tabelle 15: magnetische Trennung SIII Oxide

[%]	2-5 mm		5-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2
schwach magnetisch	47,2	50,2	55,4	63,0
stark magnetisch	52,5	49,4	44,0	36,8
Fremdanteil	0,3	0,3	0,5	0,2

f.3.6. Inert

In Abbildung 19 sind die Restmetallgehalte an Kupfer und Silber in der Inertfraktion dargestellt. In der nicht aufbereiteten Fraktion liegt der Kupfergehalt bei 3 bis 4 g/kg. Mit Ausnahme eines Ausreißers liegen die restlichen Werte deutlich geringer. Dieser eine abweichende Wert ist auf die Heterogenität der Probe zurückzuführen. Evtl. wurde bei der Einwaage für diesen Aufschluss ein größerer Kupferpartikel miterfasst.

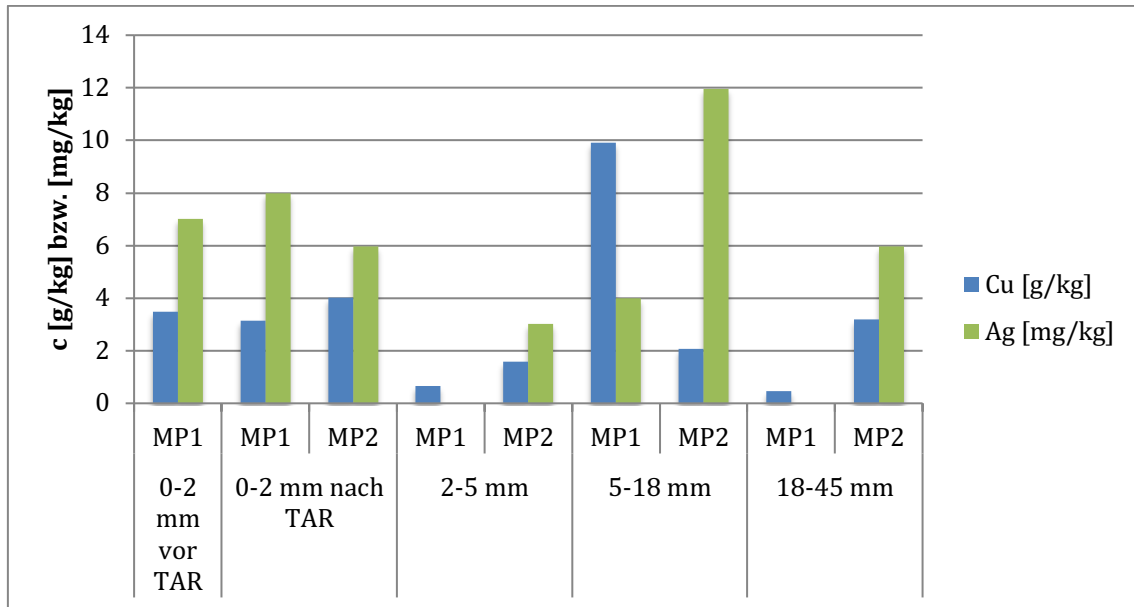


Abbildung 19: Restmetallgehalte SIII Inert

f.3.7. Unverbranntes



Abbildung 20: Eindruck Unverbranntes SIII

f.4. Versuch 4 (MVR R)

Für diese Versuchsreihe wurde Hamburger Abfall in der Müllverbrennungsanlage Rugenberger Damm verbrannt.

f.4.1. Eisen fein

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der magnetischen Trennung der feinen Eisen-Fraktion für diese Versuchsreihe. Hier zeigt sich eine reine Fraktion mit einem schwach magnetischen Anteil von 96,8 und 99,4 %. Der echte Fremdanteil ist sehr gering.

Tabelle 16: magnetische Trennung MVR R Eisen fein

[%]	MP1	MP2
schwach magnetisch	96,8	99,4
stark magnetisch	3,1	0,6
Fremdanteil	0,02	0,01

f.4.2. Eisen grob

Abbildung 21 zeigt Eindrücke des groben Eisens. Es wird auch hier ein Fremdanteil von maximal einem Prozent geschätzt.



Abbildung 21: Eindrücke Eisen grob MVR R

f.4.3. NE-Metalle

Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der manuellen Sortierung der NE-Metalle für diese Versuchsreihe. Der NE-Anteil variiert von 73 % bis 82 %. Auch in dieser Versuchsreihe ist der Fremdstoffanteil in der kleinsten Fraktion größer, jedoch geringer als in den vorherigen Versuchsreihen.

Tabelle 17: manuelle Sortierung MVR R NE-Metalle

[%]	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	72,7	74,9	78,44	81,88	81,64	81,9
Kupfer	38,6	47,6	3,08	2,84	5,04	2,8
Aluminium	31,7	25,2	66,90	64,94	61,70	64,9
Messing	2,5	2,1	8,14	13,69	14,89	13,7
Fremdanteil und Waschverlust	27,3	25,1	21,56	18,12	15,30	18,1
Stark magnetisch	0,0	0,0	1,35	7,26	0,00	7,3

f.4.4. Rostfreier Stahl (VA)

Der rostfreie Stahl ist in Abbildung 22 dargestellt und zeigt gleichbleibende gute Qualität. Ein Fremdstoffanteil wird nicht berücksichtigt.



Abbildung 22: Eindrücke rostfreier Stahl MVR R

f.4.5. Oxide

Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse der magnetischen Trennung der Oxide. Das Verhältnis von stark magnetisch zu schwach magnetisch verhält sich in den beiden Fraktionen umgekehrt. Während in der kleineren Fraktion etwa 60 % stark magnetisches Material zu finden ist, ist in der größeren etwa der gleiche Anteil schwach magnetisches Material vorhanden. Grund dafür ist die erweiterte Erfassung der größeren Fraktionen durch die vorherigen Eisenabtrennungsschritte.

Tabelle 18: magnetische Trennung MVR R Oxide

[%]	2-5 mm		5-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2
schwach magnetisch	39,5	37,1	60,4	62,0
stark magnetisch	59,8	62,6	39,1	37,8
Fremdanteil	0,7	0,3	0,6	0,3

f.4.6. Inert

Die Ergebnisse der Kupfer- und Silberbestimmung in der Inertfraktion sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Kupfergehalte in der unaufbereiteten Fraktion 0-2 mm liegen mit Ausnahme eines Ausreißers im Bereich vorheriger Versuchsreihen. In den Fraktionen 2-5 mm und 5-18 mm ist nach der Entfrachtung ein Kupfergehalt bis zu 2 g/kg vorhanden. Ein etwas höherer Wert ist in der größten Fraktion vorhanden.

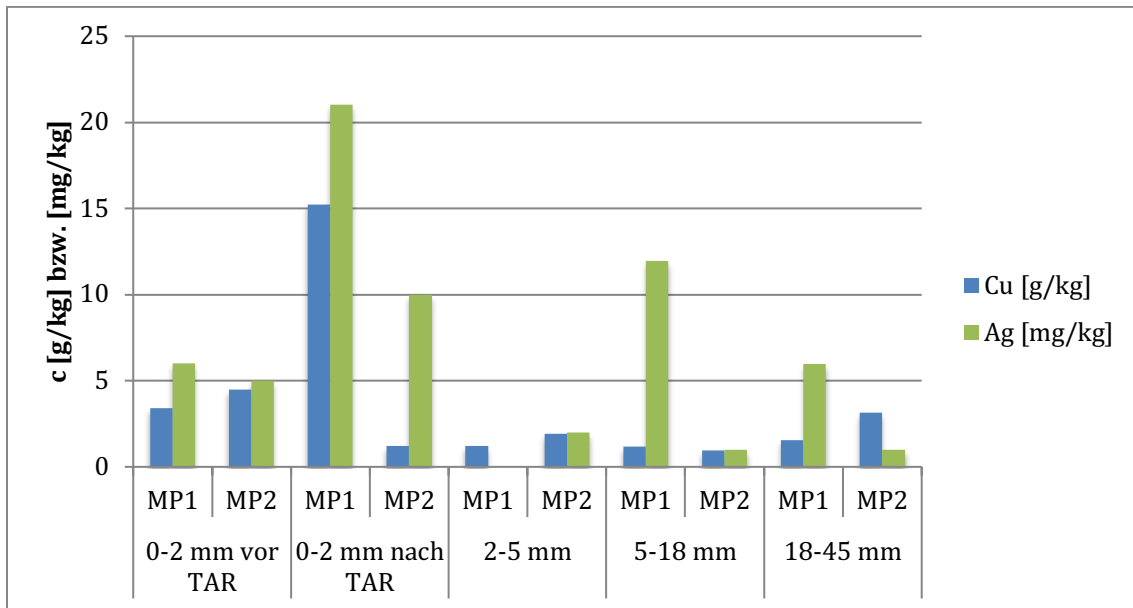


Abbildung 23: Restmetallgehalte Inertfraktion MVR R

f.4.7. Unverbranntes



Abbildung 24: Eindruck Unverbranntes MVR R

f.5. Versuch 5 (MVR V)

Aufgrund der Umsetzung beim Projektpartner TARTECH konnte dieser Versuch leider nicht beprobt werden.

f.6. Versuch 6 (MVB R)

Für diese Versuchsreihe wurde Hamburger Abfall in der Müllverbrennung Borsigstraße verbrannt. Diese Versuchsreihe dient als Referenzversuch, mit dem Output dieser Versuchsreihe aus der alpha-Linie wurden die beiden beta-Linien betrieben. Repräsentativ für alle Versuchsreihen der alpha-Linie ist die Korngrößenbestimmung hier für die Versuchsreihe MVB R dargestellt (Abbildung 25). Die Darstellung erfolgt hier neben den fünf Inertströmen, NE 2-5 mm sowie für die beiden Oxidströme.

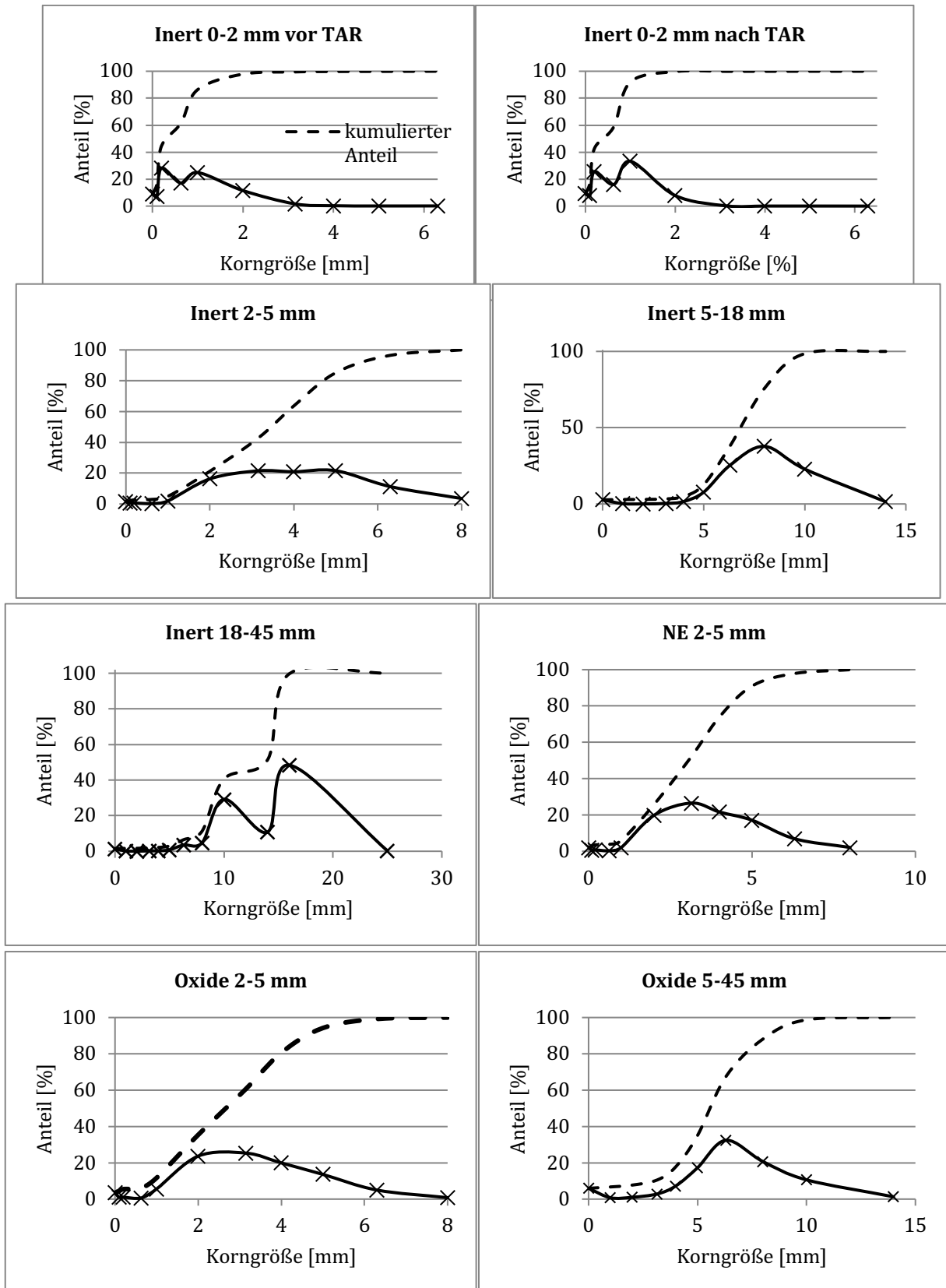


Abbildung 25: Siebkennlinien MVB R Inert, NE 2-5, Oxide

Sowohl Inert 0-2 mm vor TAR als auch nach TAR zeigen in der Siebkennlinie einen Knick bei 0,63 mm. Im Vergleich beider wird deutlich, dass in der Fraktion nach TAR ein größerer Anteil über 0,63 mm liegt. Die nach dem Zerkleinerungsschritt entstandene Fraktion weist eine ähnliche aber nicht gleiche Korngrößenzusammensetzung auf.

Im Inertstrom 2-5 mm wird eine gleichmäßige Verteilung auf die verschiedenen Korngrößen erreicht. Die nächstgrößere Fraktion zeigt das Maximum bei 8 mm. Die größte Inertfraktion 18-45 mm zeigt ein Maximum bei 10 mm und das zweite etwas größere bei 16 mm. Zwischen diesen beiden ist ein deutlicher Abfall zu erkennen. Im Wesentlichen sind keine Partikel größer 16 mm zu erkennen.

Die NE-Fraktion 2-5 mm zeigt sich relativ gleichverteilt.

Ähnliches ist in der Oxidfraktion 2-5 mm zu erkennen. Die größere Oxidfraktion zeigt ein deutliches Maximum bei 6 mm.

f.6.1. Eisen fein

Die Ergebnisse der magnetischen Trennung der feinen Eisen-Fraktion ist in Tabelle 19 dargestellt. Es wird ein metallischer Eisenanteil von etwa 89 % erreicht. Der stark magnetische Anteil ist mit etwa 11 % sehr hoch.

Tabelle 19: magnetische Trennung MVB R Eisen fein

[%]	MP1	MP2
schwach magnetisch	88,6	89,1
stark magnetisch	11,3	10,8
Fremdanteil	0,2	0,1

f.6.2. Eisen grob

Abbildung 26 zeigt Eindrücke des Eisens grob. Es wird ein Fremdanteil von maximal einem Prozent geschätzt.



Abbildung 26: Eindruck Eisen grob MVB R

f.6.3. NE-Metalle

Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der manuellen Sortierung der NE-Metalle. Der Fremdanteil liegt zwischen 17 und 30 %. Auffällig ist der höhere Anteil an Kupfer in der Fraktion 2-5 mm im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen.

Tabelle 20: manuelle Sortierung MVB R NE-Metalle

[%]	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	70,5	76,5	81,42	75,52	81,39	81,5
Kupfer	45,0	43,4	7,71	5,34	3,59	2,7
Aluminium	25,5	32,4	53,18	62,78	63,83	70,9
Messing	0,0	0,7	20,53	7,40	12,41	7,9
Fremdanteil und Waschverlust	29,5	23,5	18,57	21,72	17,20	18,6
Stark magnetisch	0,0	0,0	1,53	1,45	0,00	3,5

f.6.4. Rostfreier Stahl (VA)

Der rostfreie Stahl ist in Abbildung 27 dargestellt und zeigt gleichbleibende gute Qualität. Ein Fremdstoffanteil wird nicht berücksichtigt.



Abbildung 27: Eindrücke des rostfreien Stahls MVB R

f.6.5. Oxide

In Tabelle 21 ist die magnetische Trennung der oxidischen Fraktion dargestellt. Der Fremdstoffanteil ist sehr gering. Die Verteilung in schwach und stark magnetisches Material verhält sich 35 zu 65 % in der kleinen Fraktion und 55 zu 45 % in der größeren Fraktion.

Tabelle 21: magnetische Trennung MVB R Oxide

[%]	2-5 mm		5-18 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2
schwach magnetisch	33,4	36,2	53,0	56,1
stark magnetisch	65,4	63,7	46,5	43,8
Fremdanteil	0,7	0,1	0,5	0,1

f.6.6. Inert

Abbildung 28 zeigt die Restmetallgehalte in den Inertfraktion. Für die Kupfergehalte zeigt sich ein ähnlicher Trend wie in den vorherigen Versuchsreihen. In den nicht entfrachteten Outputströmen 0-2 mm wird ein Kupfergehalt von 2,7 bis 4 g/kg erreicht. Die Fraktion 2-5 mm hat einen Wert von 1 bis 1,5 g/kg, 5-18 mm 2 bis 2,5 g/kg und 18-45 mm 3 g/kg. Die Silberkonzentrationen sind in den beiden Fraktionen 0-2 mm deutlich höher.

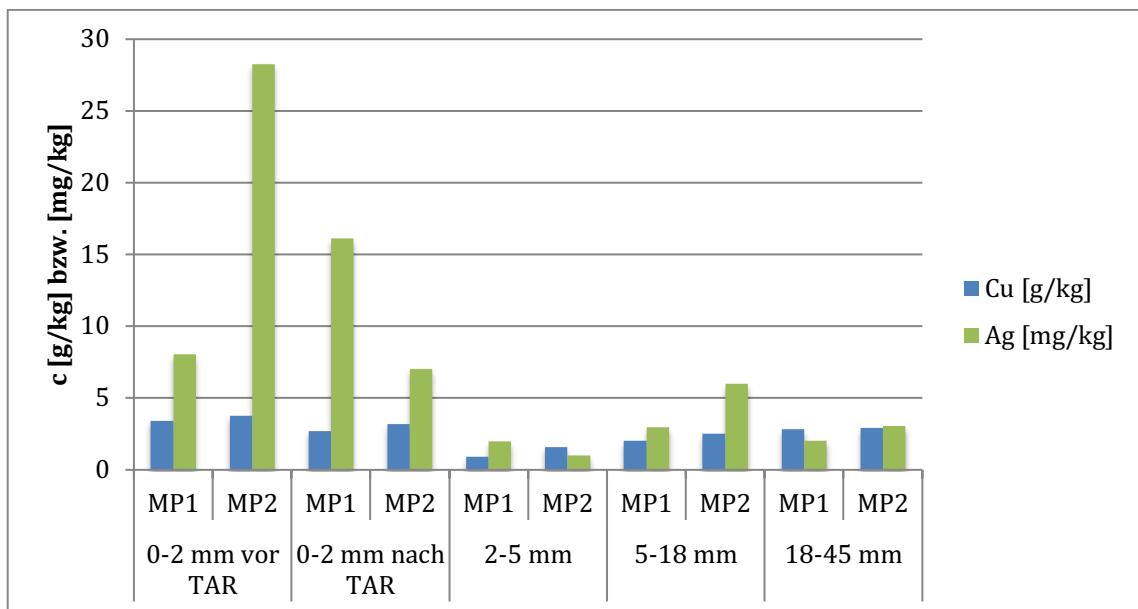


Abbildung 28: Restmetallgehalt Inertfraktion MVB R

f.7. Versuch 7 (MVB V)

Für diese Versuchsreihe wurde Hamburger Abfall in der Müllverbrennungsanlage Borsigstraße aufbereitet und der dortigen Schlackeaufbereitung unterzogen.

f.7.1. Eisen fein

Die Ergebnisse der magnetischen Sortierung der Eisen-Feinfraktion sind in Tabelle 19 zu sehen. Es ist nur ein geringer Fremdanteil vorhanden. Der schwach magnetische Anteil liegt bei 98,4 bzw. 98,2 %.

Tabelle 22: magnetische Trennung MVB V Eisen fein

[%]	MP1	MP2
schwach magnetisch	98,4	98,2
stark magnetisch	1,6	1,7
Fremdanteil	0,04	0,2

f.7.2. Eisen grob

Abbildung 29 zeigt Eindrücke des Eisens grob. Es wird ein Fremdanteil von maximal einem Prozent geschätzt.



Abbildung 29: Eindruck Eisen grob MVB V

f.7.3. NE-Metalle

Die manuelle Sortierung der NE-Metalle ist in Tabelle 23 dargestellt. Der NE-Anteil variiert zwischen 60 und 80 %. Es besteht eine etwas andere Aufteilung der einzelnen NE-Metalle. Überraschend gleich verteilt ist jedoch die Aufteilung in der kleinsten Fraktion 2-5 mm. Dies deutet auf eine Schwäche der bestehenden MVB-Anlage in diesem Bereich hin.

Tabelle 23: manuelle Sortierung MVB V NE-Metalle

[%]	2-5 mm		5-18 mm		18-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
NE	66,8	69,8	79,2	77,0	78,5	61,6
Kupfer	33,0	41,4	2,9	2,3	2,4	3,5
Aluminium	30,4	23,0	73,3	71,8	43,9	26,8
Messing	3,4	5,3	2,9	2,9	3,6	1,7
VA					28,6	29,5
Fremdanteil und Waschverlust	33,2	30,2	20,8	23,0	21,5	38,4
Stark magnetisch	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

f.7.4. Rostfreier Stahl (VA)

Der rostfreie Stahl ist in Abbildung 27 dargestellt und zeigt gleichbleibende gute Qualität. Ein Fremdstoffanteil wird nicht berücksichtigt.



Abbildung 30: Eindruck rostfreier Stahl MVB V

f.7.5. Oxide

Die magnetische Trennung der Oxide zeigt Tabelle 24. Auffällig ist ein hoher schwach magnetischer Anteil in der Fraktion. Zudem ist auch der Fremdanteil wesentlich höher.

Tabelle 24: magnetische Trennung MVB V Oxide

[%]	2-5 mm		5-45 mm	
	MP1	MP2	MP1	MP2
schwach magnetisch	44,36	48,78	59,99	61,33
stark magnetisch	50,53	46,66	34,05	34,37
Fremdanteil	5,10	4,55	5,96	4,30

f.7.6. Inert

Die Ergebnisse der Restmetallgehaltsbestimmungen sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Metallgehalte unterscheiden sich stark von den anderen Fraktionen. Neben der vorherigen Entfrachtung in der MVB muss hierbei aber auch der erhöhte Wassergehalt, der die Metallabscheidung deutlich erschwert, Berücksichtigung finden.

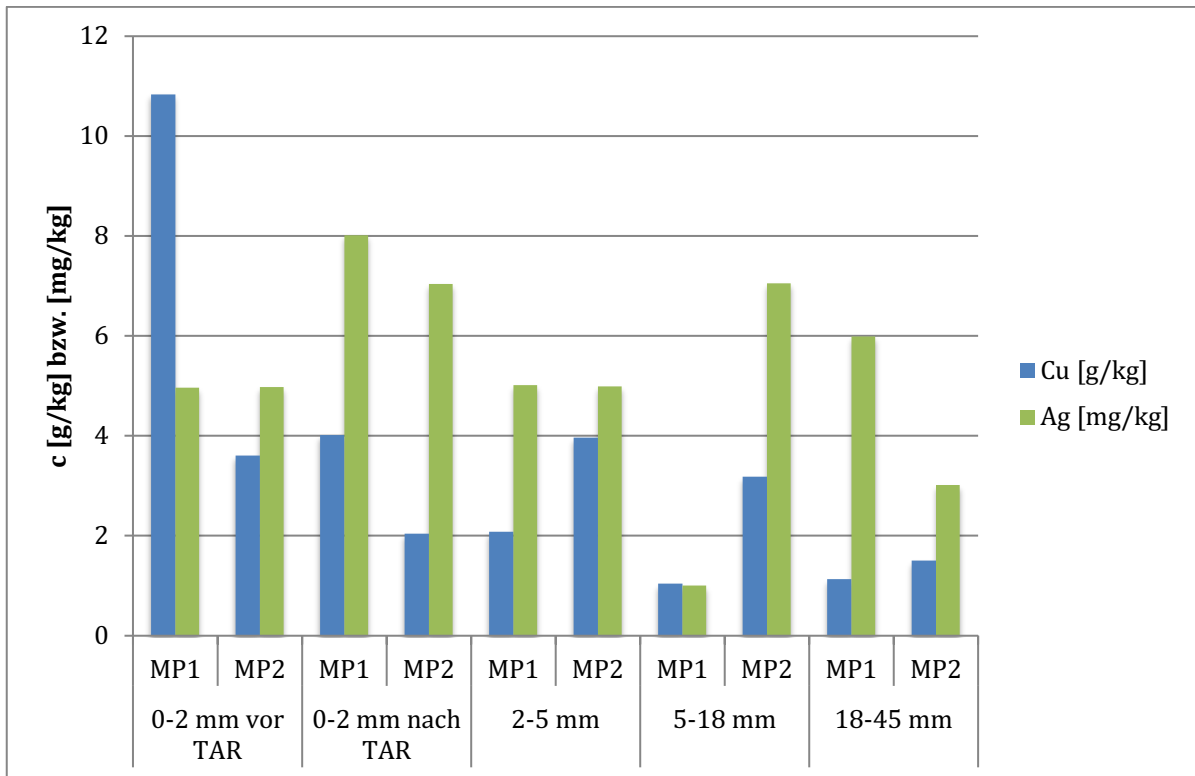


Abbildung 31: Restmetallgehalte Inertfraktion MVB V

f.7.7. Unverbranntes



Abbildung 32: Eindrücke Unverbranntes MVB V

f.8. Zusammenfassung qualitative Bilanzierung

Im zurückliegenden Kapitel wurde für jede Versuchsreihe jeder Outputstrom einzeln diskutiert. Auch wenn dort auf andere Versuchsreihen Bezug genommen wurde, soll im Folgenden die Zusammensetzung in Diagrammen gemeinsam dargestellt werden.

f.8.1. Eisen fein

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse aller sechs beprobten Versuchsreihen gemeinsam an. Die Ergebnisse zeigen sich ähnlich. MP 2 SIII zeigt eine starke Abweichung, wie bereits oben (f.3.1) beschrieben handelt es sich dabei um eine abweichende Komponente. Deutlich wird die Abweichung von beiden Mischproben der Versuchsreihe MVB R.

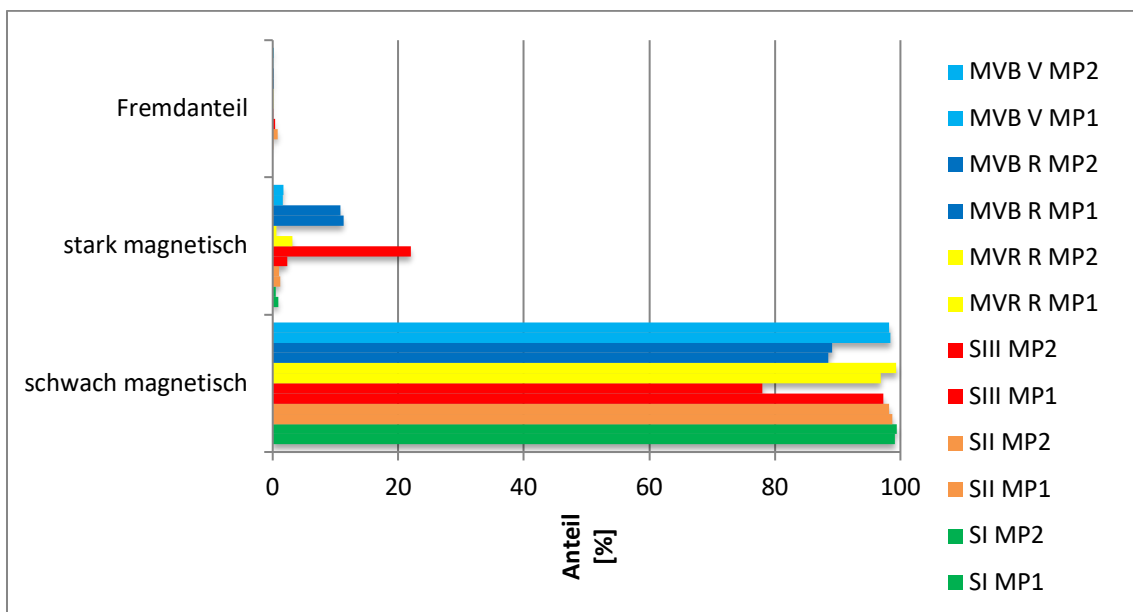


Abbildung 33: magnetische Trennung Eisen fein alle Versuchsreihen

f.8.2. NE-Metalle

Abbildung 34 stellt die Ergebnisse der manuellen Sortierung der NE-Metalle 2-5 mm gemeinsam für alle Versuchsreihen dar. Es wird deutlich, dass die Versuchsreihen aus der Abfallverbrennungsanlage Stellingier Moor einen größeren Fremdanteil aufweisen. Dies könnte aber auch teilweise (zumindest für SI und SII) an der technologischen Entwicklung der Anlage liegen. Bei der Zusammensetzung der in die verschiedenen NE-Metalle verhalten sich vor allem die drei Versuchsreihen MVR R, MVB R und MVB V gleich. Deutlich wird, dass in der Versuchsreihe SIII im Vergleich mehr Aluminium und weniger Kupfer vorhanden ist.

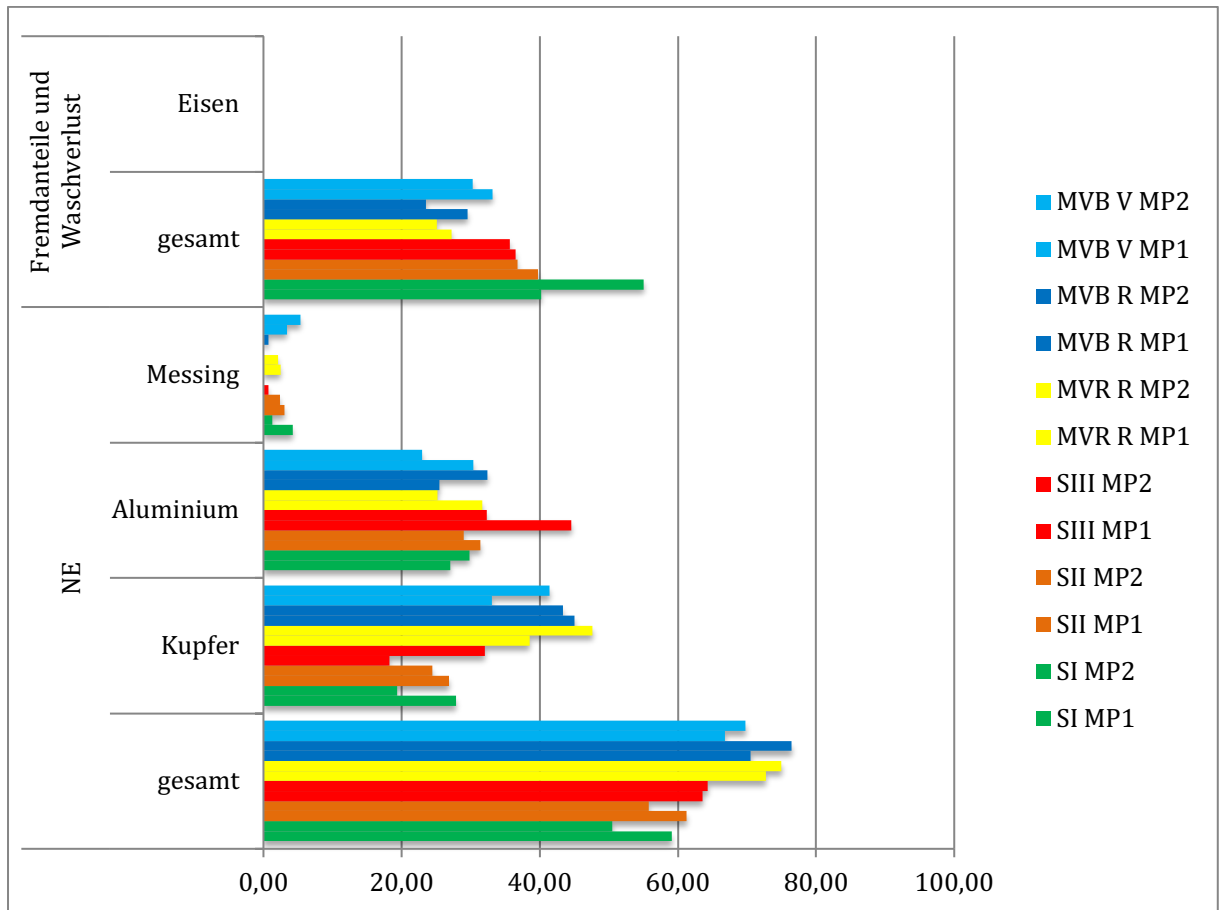


Abbildung 34: manuelle Sortierung NE 2-5 mm alle Versuchsreihen

Abbildung 34 zeigt gemeinsam die Ergebnisse aller Versuchsreihen für die Fraktion NE 5-18 mm. Die Fremdanteile sind vor allem in der Versuchsreihe S II besonders hoch. In allen Versuchsreihen stellt Aluminium den Hauptanteil dar. Am deutlichsten wird dies in der Versuchsreihe MVB V.

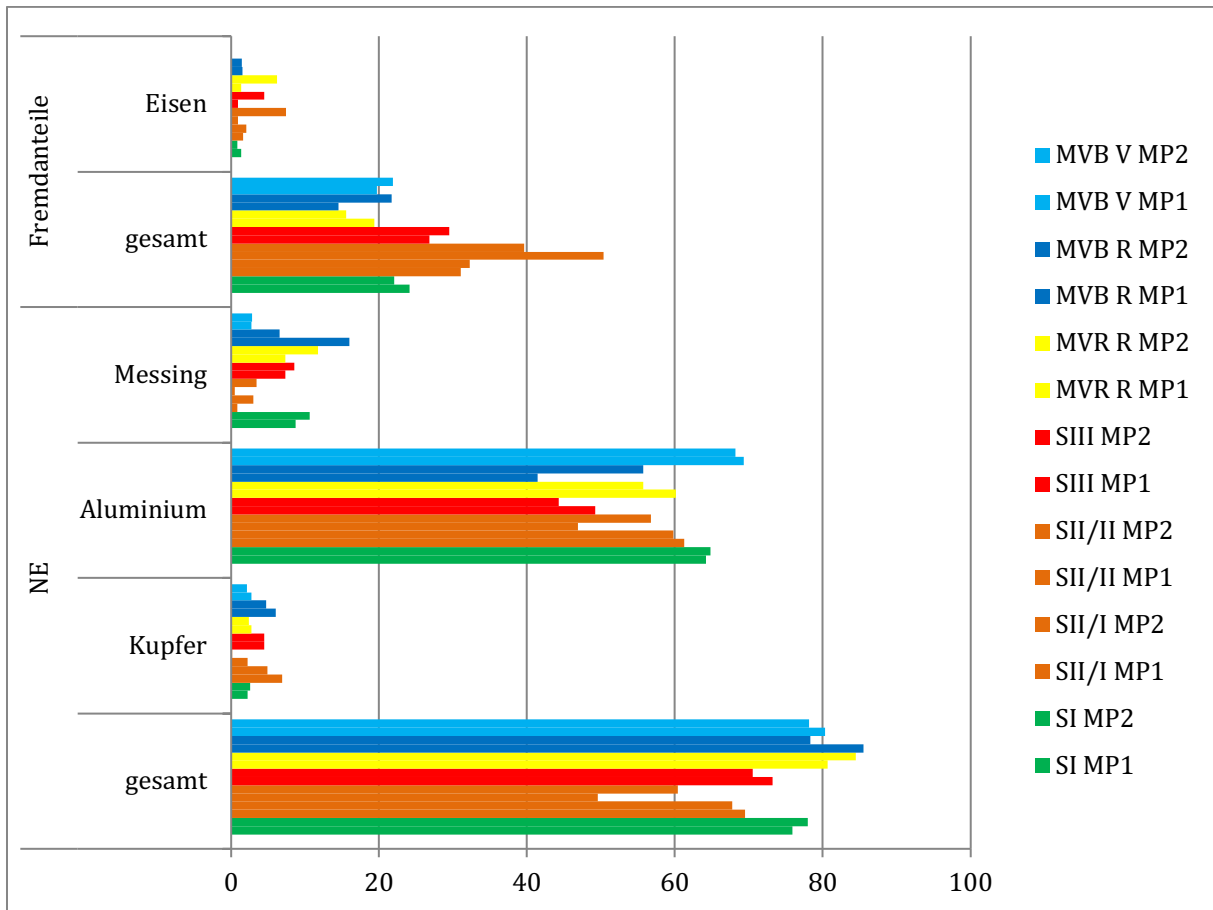


Abbildung 35: manuelle Sortierung NE 5-18 mm alle Versuchsreihen

Abbildung 36 zeigt gemeinsam die Ergebnisse der manuellen Sortierung der NE-Fraktion 18-45 mm dar. In dieser NE-Fraktion wird der Unterschied der bereits aufbereiteten Versuchsreihe MVB V am deutlichsten. Wesentlich weniger Aluminium wird zurückgewonnen. Kupfer ist gleich den anderen Versuchsreihen, obwohl der Fremdanteil höher ist. Auffällig ist zudem der hohe Messinganteil Sommerabfall vom Stelling Moor (SI).

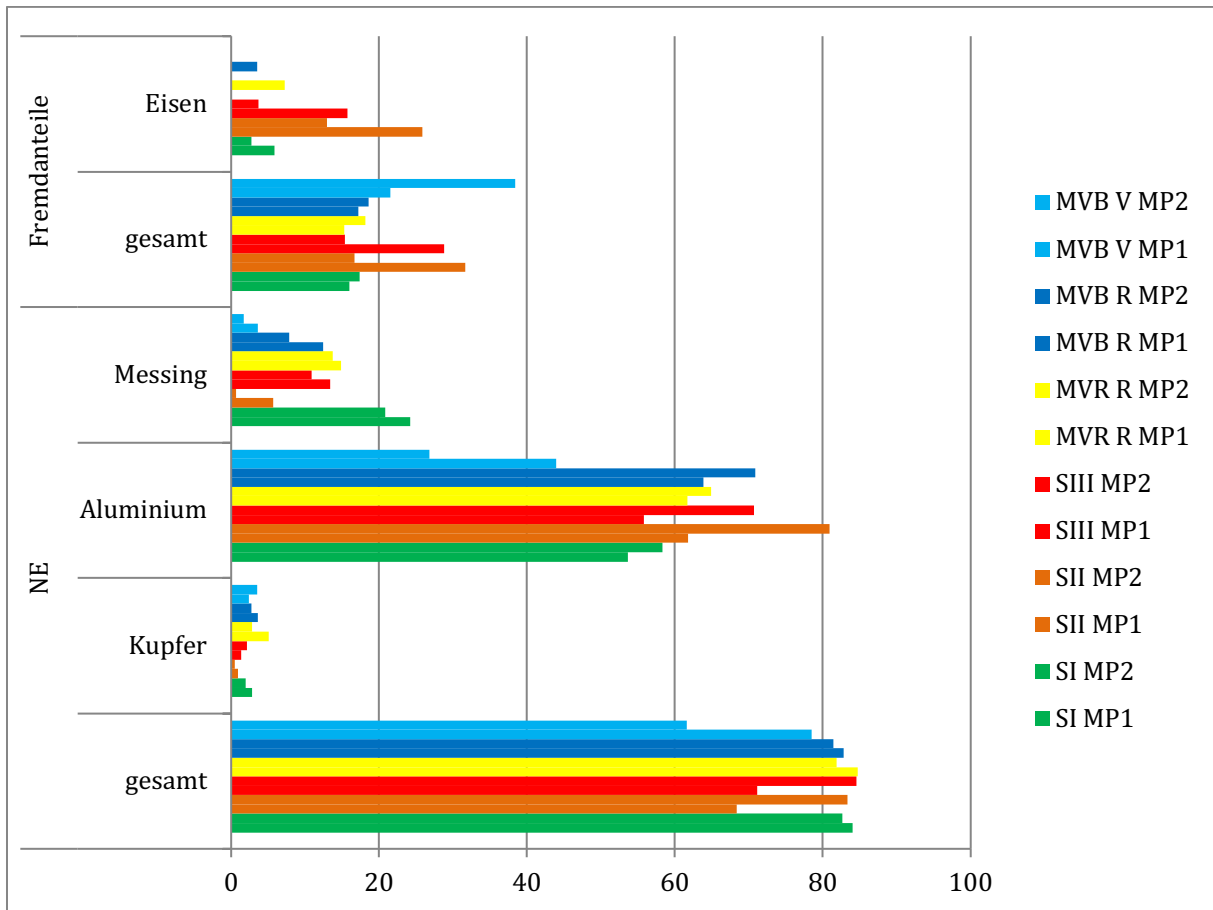


Abbildung 36: manuelle Sortierung NE 18-45 mm alle Versuchsreihen

f.8.3. Oxide

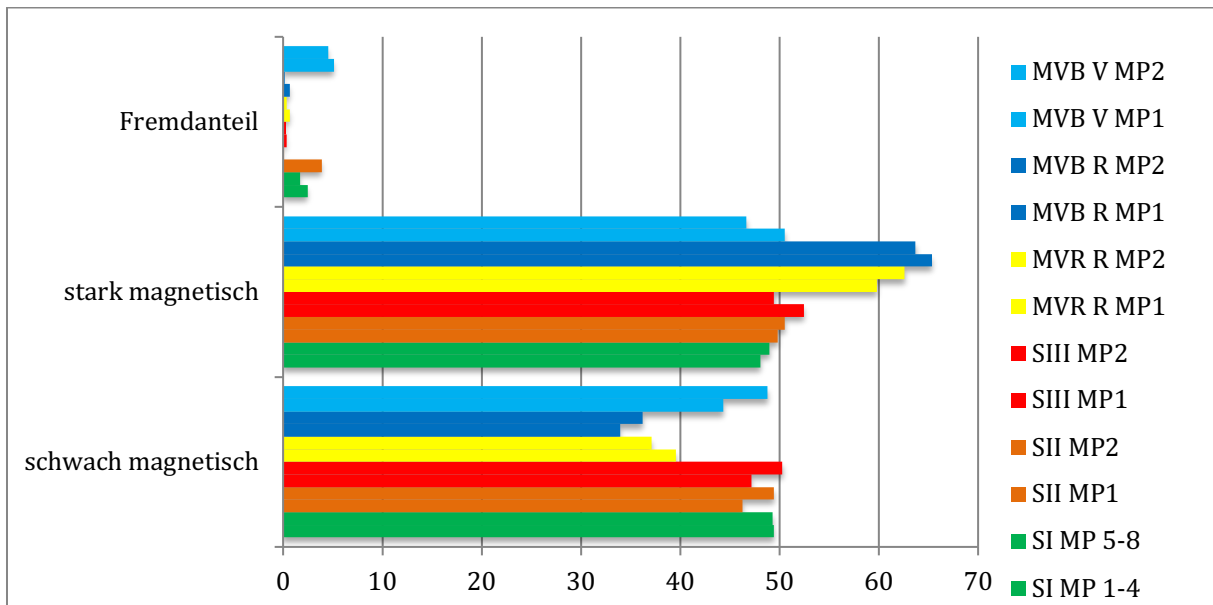


Abbildung 37: magnetische Trennung Oxide 2-5 mm alle Versuchsreihen

In Abbildung 37 ist gemeinsam die magnetische Trennung der Oxide 2-5 mm für alle Versuchsreihen dargestellt. Neben homogenen Ergebnissen für die Versuchsreihen aus der Abfallverbrennung Stellingner Moor weichen MVR B und MVB R gemeinsam

ab. Und haben einen geringeren schwach magnetischen Anteil. MVB V zeigt neben einem höheren Fremdanteil ansonsten wieder eine ähnliche Zusammensetzung wie die ersten drei Versuchsreihen.

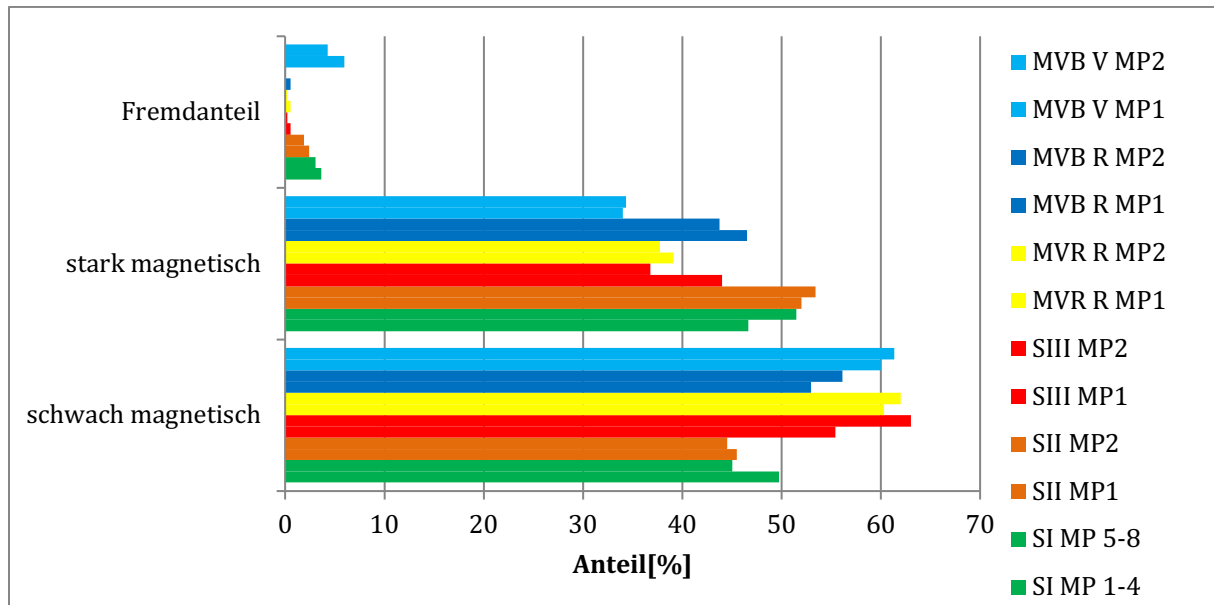


Abbildung 38: magnetische Trennung Oxide 5-45 mm alle Versuchsreihen

Abbildung 38 zeigt die magnetische Trennung der Oxide 5-45 mm. Für die Vergleichbarkeit ist für SI ein gewichtetes Mittel dargestellt, da in der ersten Versuchsreihe diese Fraktion als zwei Outputströme gewonnen wurde. Auffällig ist, dass die ersten beiden Versuchsreihen einen geringeren Anteil schwach magnetischen Anteils zeigen. Dieser Anteil zeigt sich relativ gleich in den folgenden vier Versuchsreihen. Da diese in der gleichen Woche durchgeführt wurden, könnte dies auch auf eine veränderte Einstellung zurückzuführen sein.

f.8.4. Inert

Abbildung 39 zeigt Restgehalte an Kupfer in den Inertfraktionen. Es ist zunächst ein relativ heterogenes Bild zu erkennen. Grund dafür ist unter anderem die Heterogenität der Proben. Obwohl durch Mahlen und Mischen Schritte zur Homogenisierung unternommen werden, besteht bei der Aufschlussmasse von 0,5 g die Gefahr, dass einzelne größere Partikel das Ergebnis verfälschen. Bei genauerem Hinsehen ist neben diesen einzelnen „Ausreißern“ mit Ausnahme von MVB V folgender Trend zu erkennen: Inertströme 0-2 mm vor TAR und 0-2 mm nach TAR zeigen die höchsten Kupfergehalte. Die Fraktion 2-5 mm weist die niedrigsten Kupfergehalte auf. Danach steigt die Kupferkonzentration nach Größe wieder an.

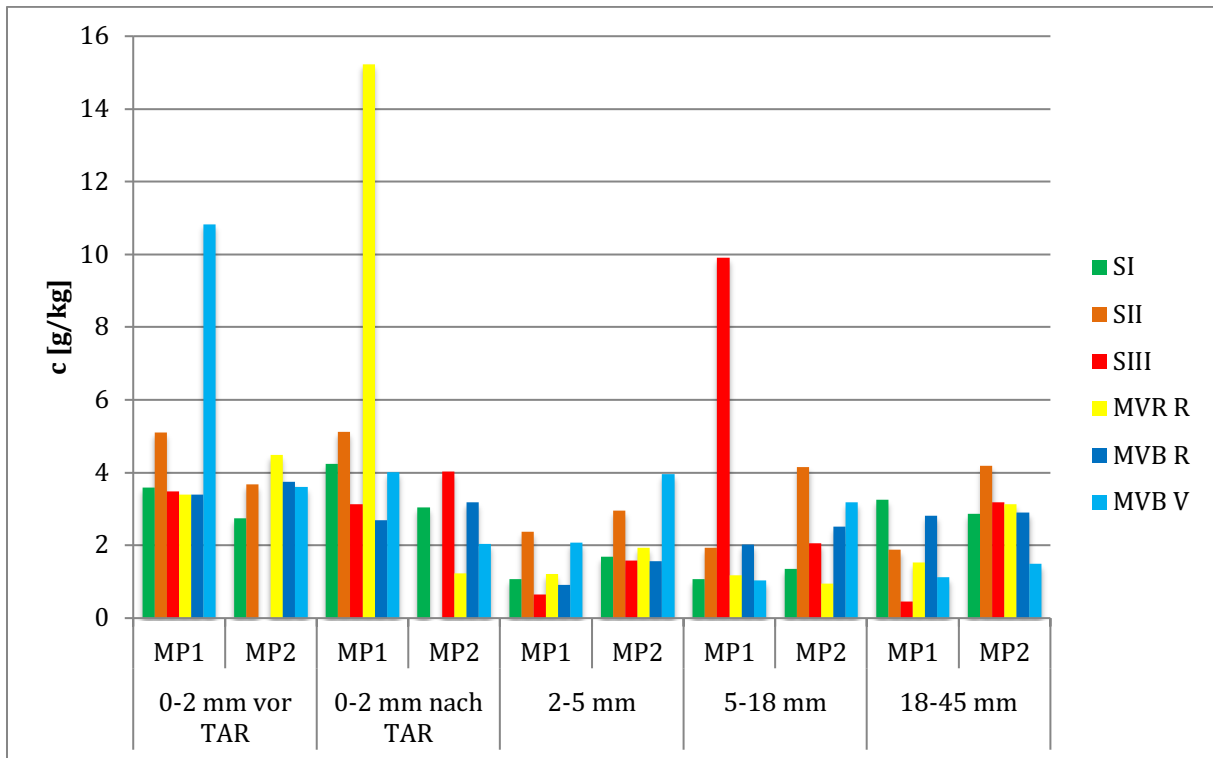


Abbildung 39: Restkupfergehalt Inertfraktionen alle Versuchsreihen

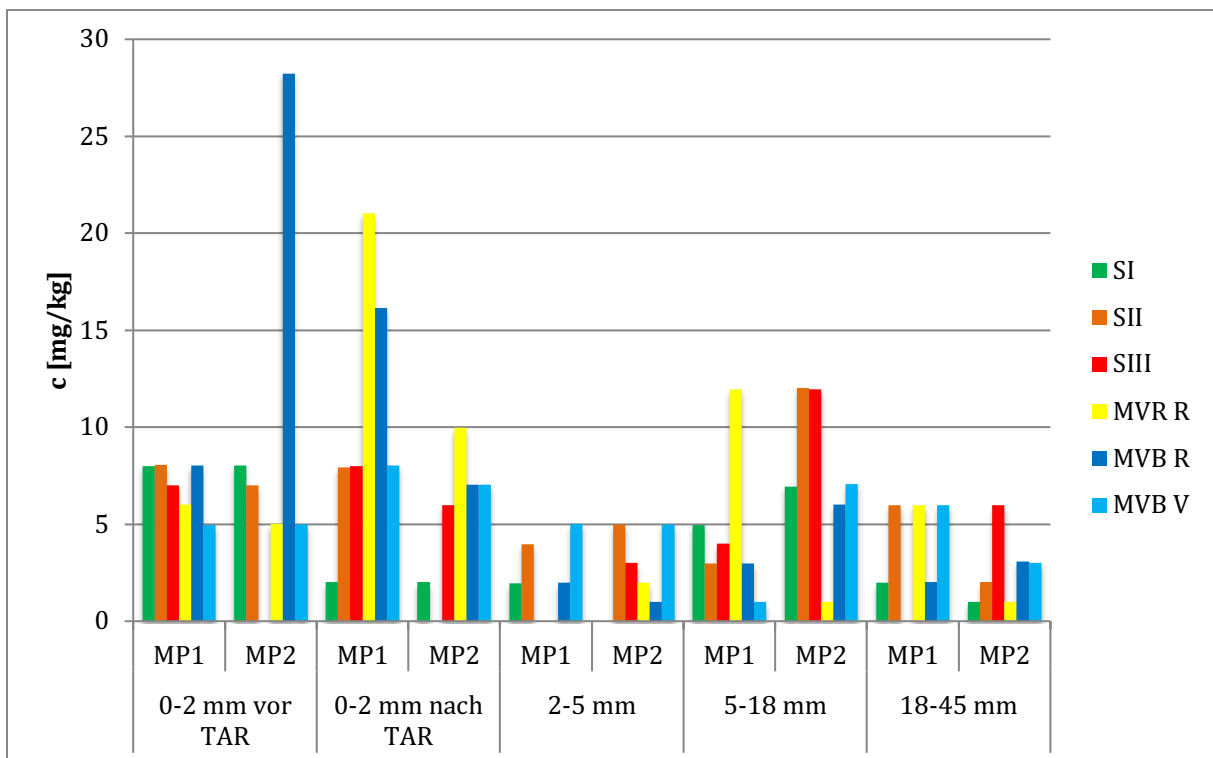


Abbildung 40: Silberkonzentrationen in den Inertfraktionen alle Versuchsreihen

In Abbildung 40 sind die Silberkonzentrationen dargestellt. Auch hier gibt es den oben beschriebenen Heterogenitätseffekt, verursacht durch einzelne Abweichler. Zudem ist auch sonst kein so klarer Trend zu erkennen. Die Konzentrationen variieren im Mittel zwischen 1 und 10 mg/kg. Eine geringfügige Akkumulation in der Feinfraktion ist zu erkennen.

f.9. Berechnung Gesamtmetallanteil

Für die Berechnung des Gesamtmetallanteils müssen nun einige Faktoren Berücksichtigung finden. Die gesammelten in der Versuchsanlage ermittelten Massenbilanzen sind zusammenfassend in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Zusammenfassung der quantitativen Bilanzierung der Outputströme
(vor Einbezug der Fremdanteile)

[%] (feucht)	Eisen		NE				Oxide		
	<i>grob</i>	<i>fein</i>	<i>2-5 mm</i>	<i>5-18 mm</i>	<i>18-60 mm</i>	<i>VA</i>	<i>2-5 mm</i>	<i>5-18 mm</i>	<i>18-45 mm</i>
S I	3,82	0,56	0,21	0,73	0,64	0,34	1,92	2,55	0,64
S II	6,18	1,35	0,39	0,76	1,01	0,32	7	4,94	
S III	8,45	1,43	0,53	0,54	1,13	0,6	4,14	3,02	
MVR R	1,66	0,59	0,52	0,49	0,74	0,27	5,25	3,3	
MVB R	3,42	0,76	0,51	0,48	0,77	0,29	4,59	3,34	
MVB V	0	0,07	0,49	0,43	0,32	0	2,42	1,76	

Zusätzlich zu dieser Bilanz müssen nun die in den Kapiteln f.1 bis f.7 dargestellten Fremdstoffanteile, das heißt der Schuttabzug Berücksichtigung finden. Gesammelt sind diese in Abbildung 41 dargestellt. Um die Versuchsreihen vergleichbar zu machen und die trockene Qualitätsbestimmung zur berücksichtigen wird zudem der Wassergehalt einbezogen (vgl. Abbildung 5).

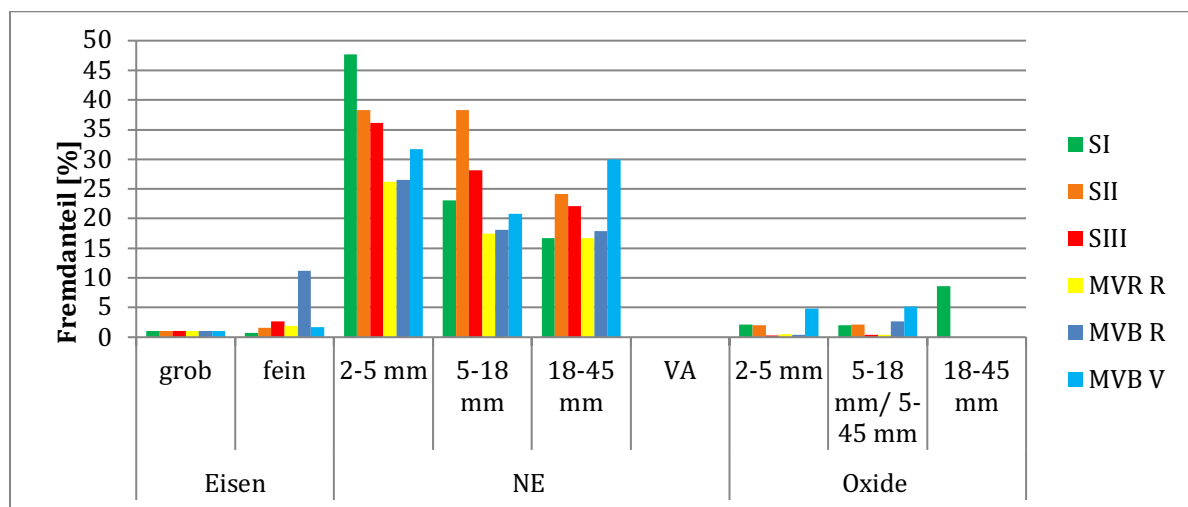


Abbildung 41: gemeinsame Darstellung Fremdanteile

Die ermittelten Werte unter Berücksichtigung der beiden oben genannten Faktoren sind in der Bilanzierung in Tabelle 26 und Tabelle 27 für Eisen dargestellt und in Tabelle 28 für NE-Metalle. Mit der Oxidfraktion wird sowohl mineralisches als auch gediegenes Eisen gewollt zur Effizienzsteigerung der Wirbelstromabscheider zurückgewonnen. Da aber (wie oben zu sehen) auch ein erheblicher schwach magnetischer Anteil vorhanden ist, aber nur das gediegene Metall direkt in gewöhnliche Bilanzen von Rostaschenaufbereitungsanlagen eingeht, sind in zwei Tabellen einmal das Eisen mit der schwach und stark magnetischen Oxidfraktion (Tabelle 26) und einmal nur mit der dem schwach magnetischen Anteil (Tabelle 27) dargestellt.

Tabelle 26: Bilanz Eisen unter Einbezug des Fremdstoffanteils und des Wasseranteils

[%]	Eisen		Oxide (nur exkl. Fremdanteil)			Gesamt (Oxide nur exkl. Fremdanteil)
	<i>grob</i>	<i>fein</i>	<i>2-5 mm</i>	<i>5-18 mm</i>	<i>18-45 mm</i>	
SI	3,78	0,55	1,77	2,40	0,57	9,07
SII	6,12	1,30	6,11	4,58		18,11
SIII	8,37	1,38	4,02	2,95		16,71
MVR R	3,39	0,57	4,36	3,24		11,56
MVB R	1,64	0,67	4,95	3,08		10,33
MVB V	0,00	0,07	2,04	1,52		3,63

Tabelle 27: Bilanz Eisen unter Einbezug des nur schwach magnetischen Anteils und des Wasseranteils

[%]	Eisen		schwach magnetischer Anteil Oxide			Gesamt (nur schwach magnetischer Oxidanteil)
	<i>grob</i>	<i>fein</i>	<i>2-5 mm</i>	<i>5-18 mm</i>	<i>18-45 mm</i>	
SI	3,78	0,55	0,89	1,22	0,24	6,68
SII	6,12	1,30	2,98	2,11		12,51
SIII	8,37	1,38	1,96	1,76		13,46
MVR R	3,39	0,57	1,92	1,97		7,84
MVB R	1,64	0,67	1,52	1,74		5,58
MVB V	0,00	0,07	1,00	0,97		2,04

Tabelle 28: Bilanz NE Metalle unter Einbezug des Fremdstoffanteils und des Wasseranteils

[%]	NE-Metalle				Gesamt
	<i>2-5 mm</i>	<i>5-18 mm</i>	<i>18-45 mm</i>	<i>VA</i>	
SI	0,11	0,55	0,53	0,34	1,52
SII	0,22	0,45	0,75	0,32	1,74
SIII	0,33	0,38	0,87	0,60	2,19
MVR R	0,37	0,39	0,60	0,29	1,66
MVB R	0,36	0,38	0,61	0,27	1,62
MVB V	0,32	0,32	0,22	0,00	0,85

Die beiden Tabellen berücksichtigen nur die Bilanzierung in der Anlage und qualitative Auswertung. Bei der Versuchsreihe MVB V wurde bewusst vorher die dort übliche Rostaschenaufbereitung durchgeführt. Außerdem wurde festgestellt, dass insbesondere für den Grobschrott vor dem Transport nach Wiesbaden teilweise eine Entfrachtung stattgefunden hat. Tabelle 29 fasst die erforderlichen Korrekturen zusammen. Die Anmerkung aus SI wird nicht berücksichtigt. Da Metalle aus dem Überkorn zwar mehrheitlich Eisen, aber teilweise auch NE (v.a. VA) sind, ist dies hier extra aufgeführt. Für die Endbilanz werden entsprechend MVB-R 0,3 % den NE-Metallen und der Rest dem Eisen zugerechnet.

Tabelle 29: Korrekturen zur Metallvorentfrachtung aller Versuchsreihen

Versuchsreihe	Eisen	NE	Metalle aus Überkorn
S I			
S II	0,42 %		
S III	0,42 %		
MVR-R	1,8 %		
MVR-V	10,1 %*	0,9-1,2 %	
MVB-R	1,7 %		
MVB-V	10,7 %*	0,9-1,2 %	2,3 %

*ohne Berücksichtigung von Fremdanteilen

Tabelle 30 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus Tabelle 27, Tabelle 28 und Tabelle 29.

Tabelle 30: Bilanz alpha-Linie (inkl. Korrekturen)

[%]	Eisen	NE
SI	6,68	1,52
SII	12,93	1,74
SIII	13,88	2,19
MVR R	9,64	1,66
MVB R	7,28	1,62
MVB V	14,74*	2,05

*ohne Berücksichtigung von Fremdanteilen

g. Versuchsergebnisse Energiebilanz

Eine Energiebilanzierung der Alpha - Linie ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nur begrenzt möglich, da der Energiebedarf der Anlage in einem nicht unerheblichen Umfang vom jeweiligen Anlagendurchsatz, gekennzeichnet durch die jeweilige Anlagenlast, abhängig ist.

Die elektrischen Verbrauchsdaten wie auch der zu diesem Zeitpunkt wurden während der Versuche stündlich aus dem Leitsystem der Anlage ausgelesen. Eine summarische Gesamterfassung über den jeweiligen Versuchszeitraum war aufgrund der in der Leittechnik verfügbaren Daten nicht möglich.

Auch der jeweilige, dem elektrischen Anlagenverbrauch zuzuordnende Anlagendurchsatz konnte aufgrund einer fehlenden automatischen Mengenerfassung nicht erfasst werden. Allerdings war im Leitsystem die sog. Lasteinstellung der Anlage hinterlegt, die einen Rückschluss auf die Durchsatzleistung zulässt.

Weiterhin wurde über die jeweiligen Versuche sowohl die versuchsspezifische Gesamtdurchsatzleistung (über Eingangsverwiegung vor Aufgabe) als auch die jeweilige, protokollierte Versuchsdauer dokumentiert.

Auf dieser Grundlage lässt sich über die Versuche ein mittlerer Anlagendurchsatz in Verbindung mit einem Lastzustand der Anlage ableiten.

Im Ergebnis dieser Informationen konnte für die Alpha-Linie bei einem spezifischen Durchsatz von ca. 80 – 100 Mg/h ein mittlerer Energieverbrauch von ca. 180 – 200 kWh ermittelt werden. Dieses entspricht einem spezifischen elektrischen Energiebedarf **von ca. 1,8 – 2,5 kWh/Mg Rohschlacke.**

h. Beschreibung der Beta-Linie

h.1. Anlagen- und Verfahrensbeschreibung

Die Beta - Linie besteht im Wesentlichen aus drei Einzelanlagen, die jede für sich betrieben werden kann. Insgesamt wird dieser Anlagenbereich von TARTECH als BETA-II - Linie bezeichnet.

(Hinweis: als Beta I – Linie wird das nochmalige Durchfahren der abgetrennten NE-Metalle durch die Alpha – Linie zur Aufkonzentration des NE – Gehaltes (weitergehende Restmineralikabscheidung) verstanden).

Technische Daten der Beta II - Linie

Kapazität: ca. 17.600 Mg/a im Einschichtbetrieb, werktäglich (10/5)
bei 220 Tagen/Jahr

Durchsatzleistung: ca. 8 Mg/h

Die Beta-Linie ist wesentlicher Bestandteil des Gesamtvorhabens, ist aber als großtechnische Anlage nicht für die Verarbeitung der gesamten erzeugten Feinfraktion ausgelegt.

Setzt man gemäß Grundfließbild einen Feinanteil von ca. 47,2 % bei einer Auslegungsleistung der Alpha – Linie von 100 Mg/h an, so müsste eine zur Auslegung der Alpha-Linie passende Beta-Linie eine Durchsatz von ca. 47,2 Mg/h

aufweisen. Insoweit ist die während des Vorhabens eingesetzte Beta-Linie in der Lage, ca. 16,5 % der in der Alpha-Linie erzeugten Feinfraktion zu verarbeiten.

In der ersten Teilanlage (BETA-II A) wird die Mineralik 0 - 2 mm (vor und nach TAR) getrocknet, hochgeschwindigkeitszerkleinert und mittels eines Taumelsiebes gesiebt. Dabei entstehen drei Teilfraktionen (0 - 0,71 mm, 0,71 - 1 mm und 1 - 2 mm).

In der zweiten Teilanlage (BETA-II B) werden die so erzeugten Fraktionen jeweils separat über einen Hochfrequenz - NE - Scheider in NE - angereicherte und NE - abgereicherte Fraktionen aufgetrennt.

Die NE - abgereicherten Fraktionen gehen als Restmineralik vorerst in die deponietechnische Verwertung, alternative Verwertungswege befinden sich aktuell noch in der Entwicklung.

Die erzeugten NE - angereicherten Fraktionen werden in der dritten Teilanlage weiterverarbeitet.

In der dritten Teilanlage (BETA-II C) werden die erzeugten NE - angereicherten Teilfraktionen 0,71 - 1 mm sowie z.T. auch 0 - 0,71 mm mittels Wendelscheider in jeweils eine NE -Leichtfraktion (überwiegend Al) und eine NE - Schwerfraktion (überwiegend Cu) aufgetrennt.

Bei der Fraktion 1 - 2 mm erfolgt dieses über eine Schwingsetzmaschine.

In diesem Teil der dritten Teilanlage (Schwingsetzmaschine) können auch die separierten NE-Metalle aus den Grobfraktionen (oberhalb 2 mm aus der Alpha-Linie, teilweise erst nach vorheriger Zerkleinerung mittels Granulator) in eine Schwer- und eine Leichtfraktion aufgetrennt werden.

Diese separate Aufgabe für die in der Alpha-Linie separierten und mittels Granulator nachbehandelten NE-Metalle in die BETA-II C - Linie bezeichnet TARTECH als BETA-I - Linie.

Die BETA-I - Linie dient insoweit der Aufreinigung der NE-Metalle aus der Alpha-Linie und deren Auftrennung in eine Leicht- und Schwerfraktion.

Dort wird keine Mineralik mehr abgetrennt, sie verbleibt in der NE-Leichtfraktion.

Im Ergebnis haben wir aus der BETA-II - Linie damit folgende Stoffströme:

Erste Teilanlage (BETA-II A)

- Zwischenprodukt 0 - 0,71 mm
- Zwischenprodukt 0,71 - 1 mm
- Zwischenprodukt 1 - 2 mm

Zweite Teilanlage (BETA-II B)

- Abfallprodukt 0 - 0,71 mm (NE - abgereichert)
- Abfallprodukt 0,71 - 1 mm (NE - abgereichert)
- Abfallprodukt 1 - 2 mm (NE - abgereichert)
- Zwischenprodukt 0 - 0,71 mm (NE - angereichert)
- Zwischenprodukt 0,71 - 1 mm (NE - angereichert)
- Zwischenprodukt 1 - 2 mm (NE - angereichert)

Dritte Teilanlage (BETA-II C)

- Endprodukt 0 - 0,71 mm (Schwerfaktion)
- Endprodukt 0,71 - 1 mm (Schwerfaktion)
- Endprodukt 1 - 2 mm (Schwerfaktion)
- Endprodukt 0 - 0,71 mm (Leichtfaktion)
- Endprodukt 0,71 - 1 mm (Leichtfaktion)
- Endprodukt 1 - 2 mm (Leichtfaktion)

Bestehende Unterschiede in der Verfahrensbeschreibung sowie den nachfolgenden Fließbildern resultieren aus dem Sachverhalt, dass sich die Beta-Linie während der Versuche in einem regelmäßigen Optimierungszustand befand.

Dabei sind neuere Erkenntnisse aus dem Betrieb der Beta-Linie jeweils direkt in die Anlagenoptimierung eingeflossen.

Der dargestellte Zustand entspricht demjenigen, der während des Versuches bestand und insoweit Grundlage für die nachfolgenden Versuchsergebnisse war (siehe hierzu auch Abb. 4, Grundfließbild Versuchszustand).

Die anderen, z.T. aktuelleren Fließbilder spiegeln den jeweiligen Entwicklungsstand der Beta-Linie wieder.

h.2. Grundfließfließbild / Verfahrensließbild

Grundfließbild Versuchszustand

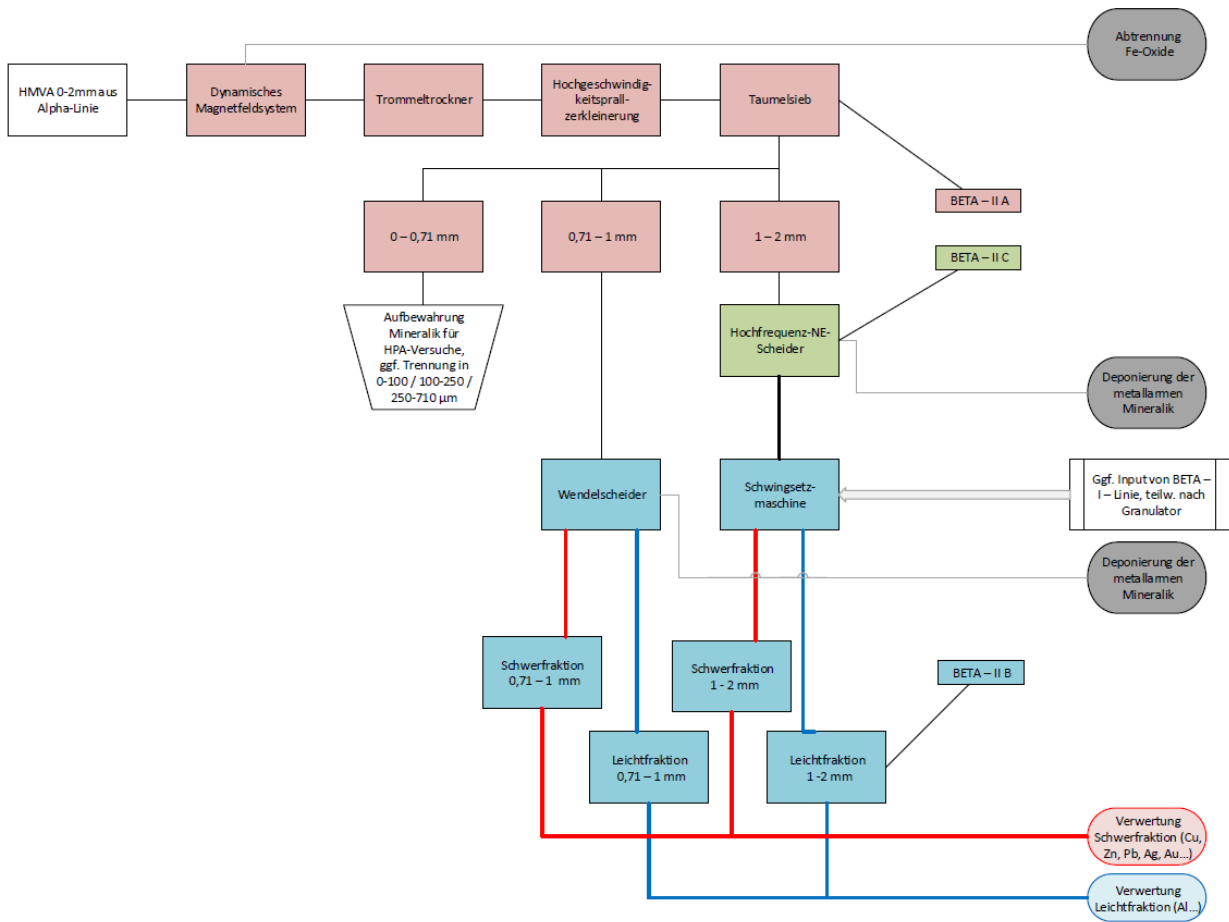


Abbildung 42: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie), Versuchszustand

Grundfließbild aktualisierter Zustand

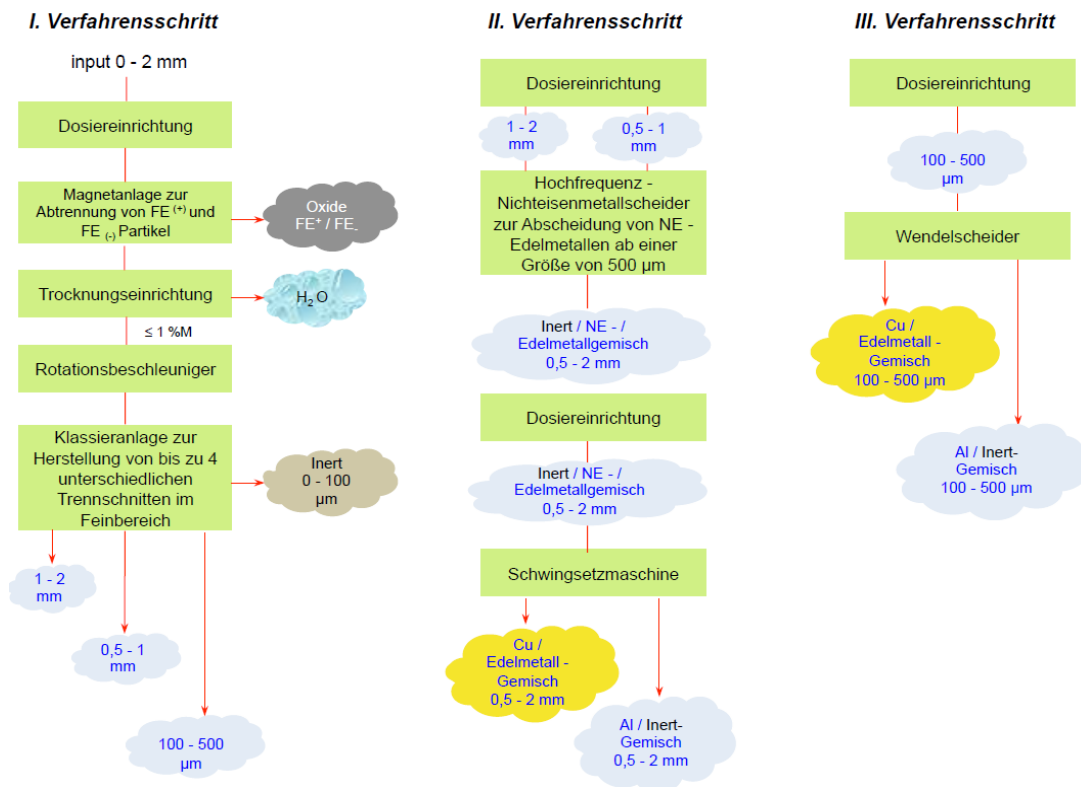


Abbildung 43: Grundfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie), aktualisierter Zustand

Verfahrensfließbild

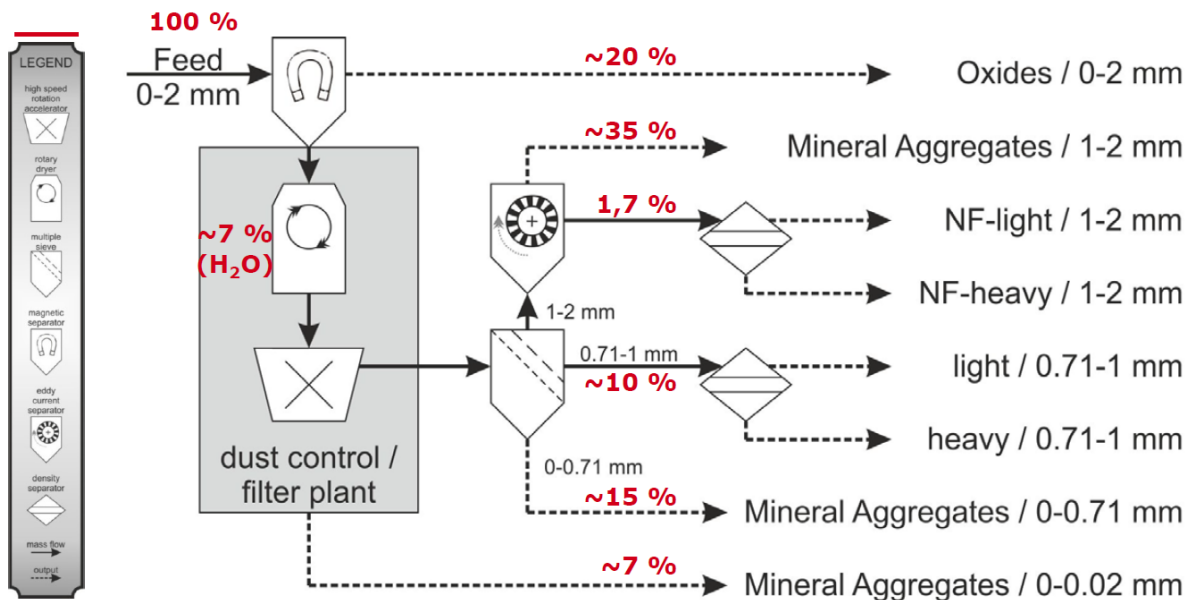


Abbildung 44: Verfahrensfließbild TARTECH-Anlage (Beta-Linie)

i. Versuchsergebnisse Massenbilanz

Insgesamt wurde über mehrere Tage die Feinfraktion des Referenzversuches 6 verarbeitet.

Von dieser Gesamtmenge an Feinfraktion wurde eine repräsentative Menge von 6,07 Mg durch die Beta II A - Linie und 2,25 Mg durch die Beta II B - Linie durchgesetzt und begleitend untersucht.

Dabei wurde die Feinfraktion weiter unterteilt in die Fraktionen 1 – 2 mm, 0,71 – 1 mm und < 0,71 mm.

Allerdings wurden die unterschiedlichen Anlagenbereiche der Beta – Linie (Beta II A, B und C) z.T. zu unterschiedlichen Zeiten unter nicht eindeutigen Rahmenbedingungen sowie z.T. auch unter eingeschränkten Betriebsbedingungen beprobt. Dieses erschwert eine Bilanzierung des Versuches in seinen Teilbereichen, insbesondere auch die Beta II C – Linie.

Gemäß der vorliegenden Auswertung der TARTECH können dabei folgende Outputströme für die Beta – Linie bilanziert werden (Grundlage: Grundfließbild gemäß Abb. 5):

Beta II A – Linie (Aufteilung der Feinfraktion mit Trocknung und Taumelsieb)

Input (Feinfraktion 0 – 2 mm)

- 6,07 Mg entsprechend 100 %

Oxide (Fe)

- 1,24 Mg entsprechend 20,428 %

H₂O (Verluste aus der Trocknung)

- 0,52 Mg entsprechend 8,567 %

Filterstaub (Feinststaubabtrennung < 0,02 mm):

- 0,44 Mg entsprechend 7,249 %

Feinfraktion (0 – 0,71 mm)

- 0,95 Mg entsprechend 15,507 %

Feinfraktion (0,71 - 1 mm)

- 0,64 Mg entsprechend 10,544 %

Feinfraktion (1 – 2 mm)

- 2,25 Mg entsprechend 37,068 %

Beta II B – Linie (Aufbereitung der Feinfraktion 1 – 2 mm)

Input (Feinfraktion 1 – 2 mm)

- 2,25 Mg entsprechend 100 %

Inertes (Mineralik)

- 2,143 Mg entsprechend 25,305 % (bezogen auf Input Beta II A)

NE - Metalle

- 0,102 Mg entsprechend 1,680 %

Eine weitergehende Bilanzierung der Beta II – C Linie erfolgte nicht, hier erfolgten lediglich qualitative Untersuchungen.

Die in der Beta II B – Linie zusätzlich separierten NE – Metalle von 0,102 Mg basieren auf einer Durchsatzmenge an Feinfraktion von 6,07 Mg.

Während des Referenzversuches 6 wurden aus 718,8 Mg Rohschlacke ca. 339,3 Mg Feinfraktion (0 – 2 mm) erzeugt (Grundlage: Anteil der Feinfraktion 47,2 % gemäß Grundfließbild der Alpha – Linie (siehe Punkt d.2).

Die Durchsatzleistung des Versuches in der Beta II A – Linie betrug insoweit ca. 1,79 % der im Referenzversuch erzeugten gesamten Feinfraktion.

Normiert man auf dieser Grundlage die Ergebnisse der in der Beta II B – Linie zusätzlich separierten NE – Metalle von 0,102 Mg auf die gesamte Feinfraktion, und damit auf die im Referenzversuche eingesetzte Rohschlackenmenge von 718,8 Mg, so ergibt sich aus der Feinfraktion (1 – 2 mm) ein zusätzliches Potenzial an NE-Metallen von ca. 5,70 Mg.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Beta – Linie kann damit die separierte Menge an NE – Metallen von

- 12,66 Mg entsprechend 1,761 % an NE-Metallen (Alpha – Linie)

um

- 5,70 Mg entsprechend 0,793 % an NE-Metallen (Beta II B – Linie)

auf in der Summe dann

- 18,36 Mg entsprechend 2,554 % an NE-Metallen (Alpha + Beta–Linie)

erhöht werden.

Im Ergebnis kann somit das Potenzial an erschließbaren NE-Metallen durch den Einsatz der Feinfraktion 1 – 2 mm in der Beta II B – Linie um ca. 45 % gesteigert werden. Oder anders ausgedrückt, werden ca. 31% der NE-Metalle in der Beta II B – Linie gewonnen.

j. Versuchsergebnisse Qualität

j.1. Beta I Linie

Die β I-Linie dient wie oben beschrieben der Aufreinigung der NE-Fraktion. Für diesen Versuch wurde die Fraktion NE 2-5 mm der Versuchsreihe MVB R aufbereitet.

j.1.1. Wassergehalt

Abbildung 45 zeigt die ermittelten Wassergehalte für die β I-Linie. Die Zwischenprodukte unterscheiden sich kaum und haben einen Wassergehalt von 2 %. Deutlich ist, dass die Leichtfraktion mit 7 % einen deutlichen höheren Wassergehalt hat, während die Schwerfraktion einen niedrigeren hat.

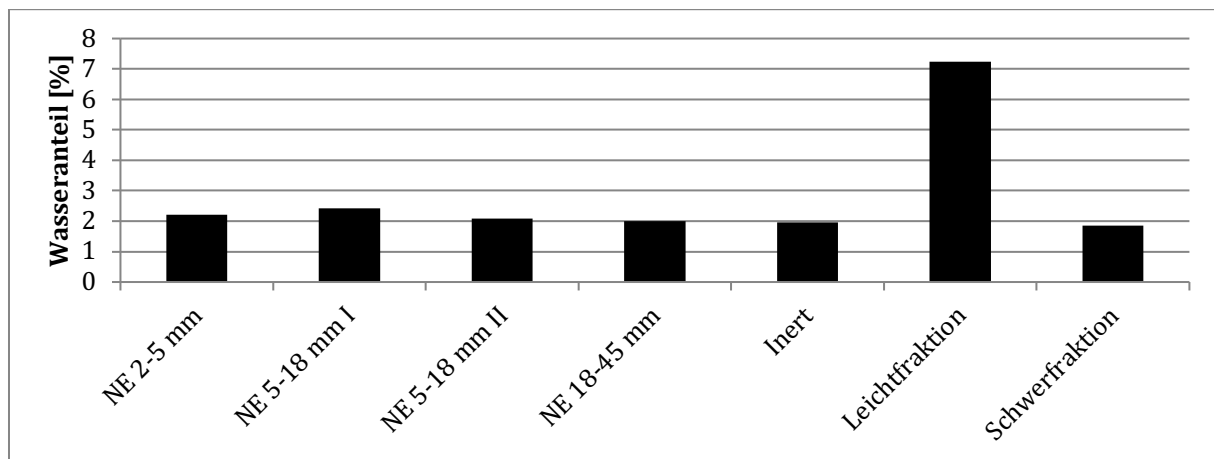


Abbildung 45: ermittelte Wassergehalte β I-Linie

j.1.2. Siebkennlinien

Abbildung 46 zeigt die Korngrößenbestimmung. Die NE-Output-Fractionen aus der alpha-Linie zeigen unauffällige Kurven. Die Kurve verschiebt sich von NE 2-5 mm über NE 5-18 mm II und NE mm 5-18 mm I zu NE-18-45 mm jeweils leicht nach rechts in den größeren Korngrößenbereich. Auffällig ist der Inertstrom, der durch Absplitterung von den Metallen entstanden ist. Es ist ein hoher Anteil zwischen 1 und 2 mm vorhanden und wiederum ein ähnlich hoher zwischen 3,15 mm und 4 mm, dazwischen knickt die Kurve ein. Nach 4 mm fällt die Kurve dann ab.

Bei der Schwer- und Leichtfraktion fällt auf, dass für die Schwerfraktion eine gleichmäßige Kurve mit einem Maximum bei 4 mm entsteht. Zu beiden Seiten fallen die Anteile gleichmäßig ab. Bei der Leichtfraktion hingegen ist das Maximum zwar auch bei 4 mm, 5 mm ist aber ähnlich hoch und die Kurve fällt zum größeren Kornbereich flacher ab als zum kleineren.

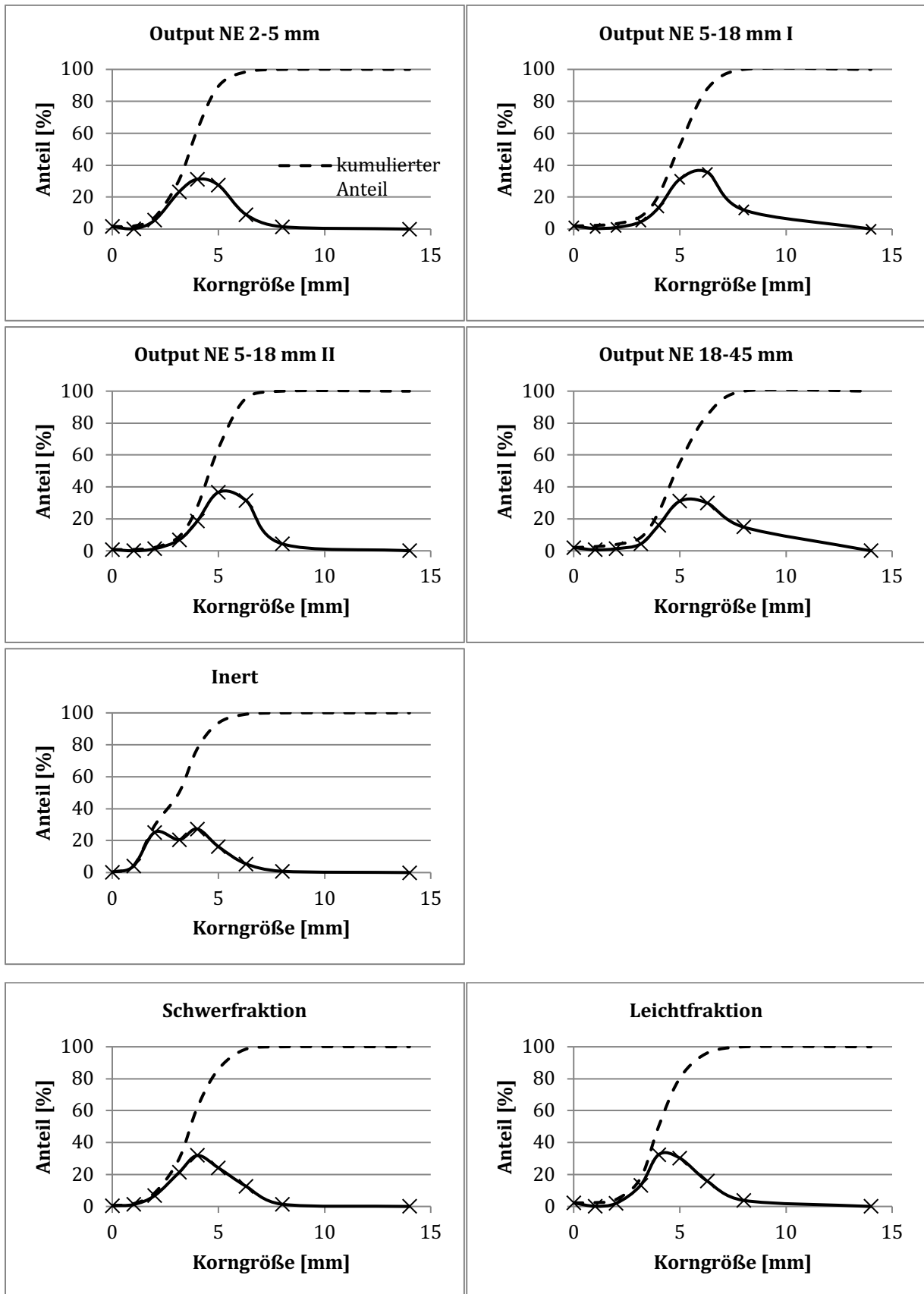


Abbildung 46: Siebkennlinien $\beta 1$ -Linie

j.1.3. Manuelle Sortierung

Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse der manuellen Sortierung für die Zwischenprodukte nach der erneuten Aufbereitung in der alpha-Linie. Die Sortierung wurde mit jeweils zwei Stichproben aus der Probe mit 70 g durchgeführt. Es wird deutlich, dass sich in die Fraktionen 5-18 mm einen höheren Aluminiumgehalt aufweisen.

Tabelle 31: Ergebnisse der manuellen Sortierung NE-Outputströme β I-Linie nach Durchlauf durch alpha-Linie

[%] (n=2)	Aluminium	Kupfer	Messing	fremd
2-5 mm	60,74 \pm 1,87	30,17 \pm 5,16	6,98 \pm 2,37	0,80 \pm 0,46
5-18 mm I	72,57 \pm 5,07	11,83 \pm 0,70	12,24 \pm 5,62	0,94 \pm 0,35
5-18 mm II	74,28 \pm 0,81	17,36 \pm 0,69	4,68 \pm 0,71	1,22 \pm 0,33
18-45 mm	68,67 \pm 2,37	17,01 \pm 2,81	9,80 \pm 2,06	0,17 \pm 0

*eine Sortierung 3,78 % Zink

Auch die Endprodukte Schwer- und Leichtfraktion wurden manuell sortiert. Es wurden jeweils Teilproben (Leichtfraktion á 70 g, Schwerfraktion á 100 g) sortiert. Eindrücke der Trennung zeigt Abbildung 47.



Abbildung 47: manuelle Sortierung Schwer- (links) und Leichtfraktion β I-Linie

Die Ergebnisse der Sortierung sind in Tabelle 32 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Leichtfraktion zu 94 % aus Aluminium besteht. Fremdanteile um die 4 % sind auch in der Leichtfraktion, dabei handelt es sich im Wesentlichen um mit ausgetragene Glas- und Keramikteile. Die Schwerfraktion besteht zu etwa zwei Drittel aus Kupfer und etwas über ein Fünftel Messing. Um die 9 % Aluminium sind vorhanden. Insgesamt sind beide Fraktionen von ziemlich reiner und guter Qualität.

Tabelle 32: manuelle Sortierung β I Schwer- und Leichtfraktion

[%] (n=3)	Aluminium	Kupfer	Messing	fremd
Leichtfraktion	94,08 \pm 0,85	0,81 \pm 0,63	0,06 \pm 0,09	4,27 \pm 1,96
Schwerfraktion	8,68 \pm 1,80	69,28 \pm 9,95	21,52 \pm 7,91	0,57 \pm 1,6

j.2. Beta II Linie

Die BII-Linie dient wie oben beschrieben der Aufbereitung der Fraktion 0-2 mm. Die Aufbereitung wurde mit dem erneut gesiebten Inertstrom aus der alpha-Linie der Versuchsreihe MVB R durchgeführt.

j.2.1. Wassergehalt

Abbildung 48 zeigt die Wassergehalte des Inputs, der Zwischenprodukte und der Outputs der β II-Linie. Die anfänglich relativ nasse Feinfraktion wird nach Abtrennung der Oxidfraktion getrocknet. Die Trennung in Schwer- und Leichtfraktion im Wendelscheider (nasses Verfahren) führt dazu, dass die beiden Outputströme wieder deutlich sind.

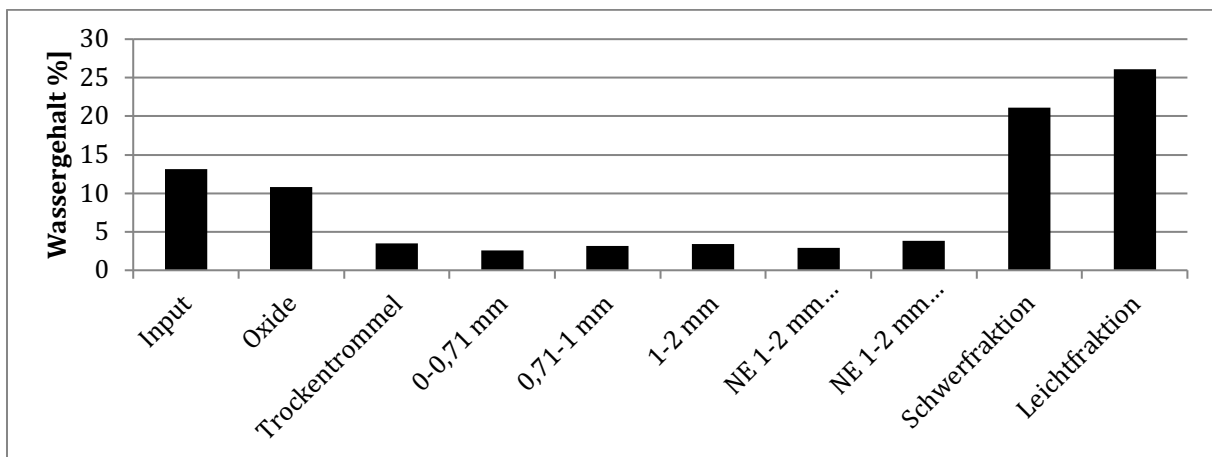


Abbildung 48: Wassergehalt β II-Linie

j.2.2. β II

Zur Vorbereitung der NE-Abscheidung durchläuft die Feinfraktion die β -II-A-Linie. Hierbei entstehen nur Zwischenprodukte bzw. Abfallprodukte. Die Zwischenprodukte werden in der β -II-B-Linie behandelt.

j.2.2.1. Siebkennlinien

Abbildung 48 zeigt die Korngrößenverteilung für den Input und die Zwischenprodukte der β II-Linie. Im Input zeigt sich folgendes Bild: Während nur etwa 6 % unter 0,1 mm liegen, liegen 26 % zwischen 0,1 mm und 0,63 mm. Etwa 24 % liegen zwischen 0,63 mm und 1 mm. Etwa 30 % liegen noch darüber. Damit ergibt sich eine gute Gleichverteilung. Ähnliches zeigt sich bei den Oxiden und nach der Trockentrommel. In der Feinfraktion 0-0,71 mm konzentriert sich ein Großteil auf die Fraktion 0,1-0,63 mm. Für die nächstgrößere Fraktion waren leider keine Zwischensiebe vorhanden. Neben 15 % kleiner 0,63 mm befindet sich der Rest zwischen 0,63 mm und 1 mm. In der Fraktion 1-2 mm sind 9 % kleiner 1 mm und 35 % größer 2 mm.

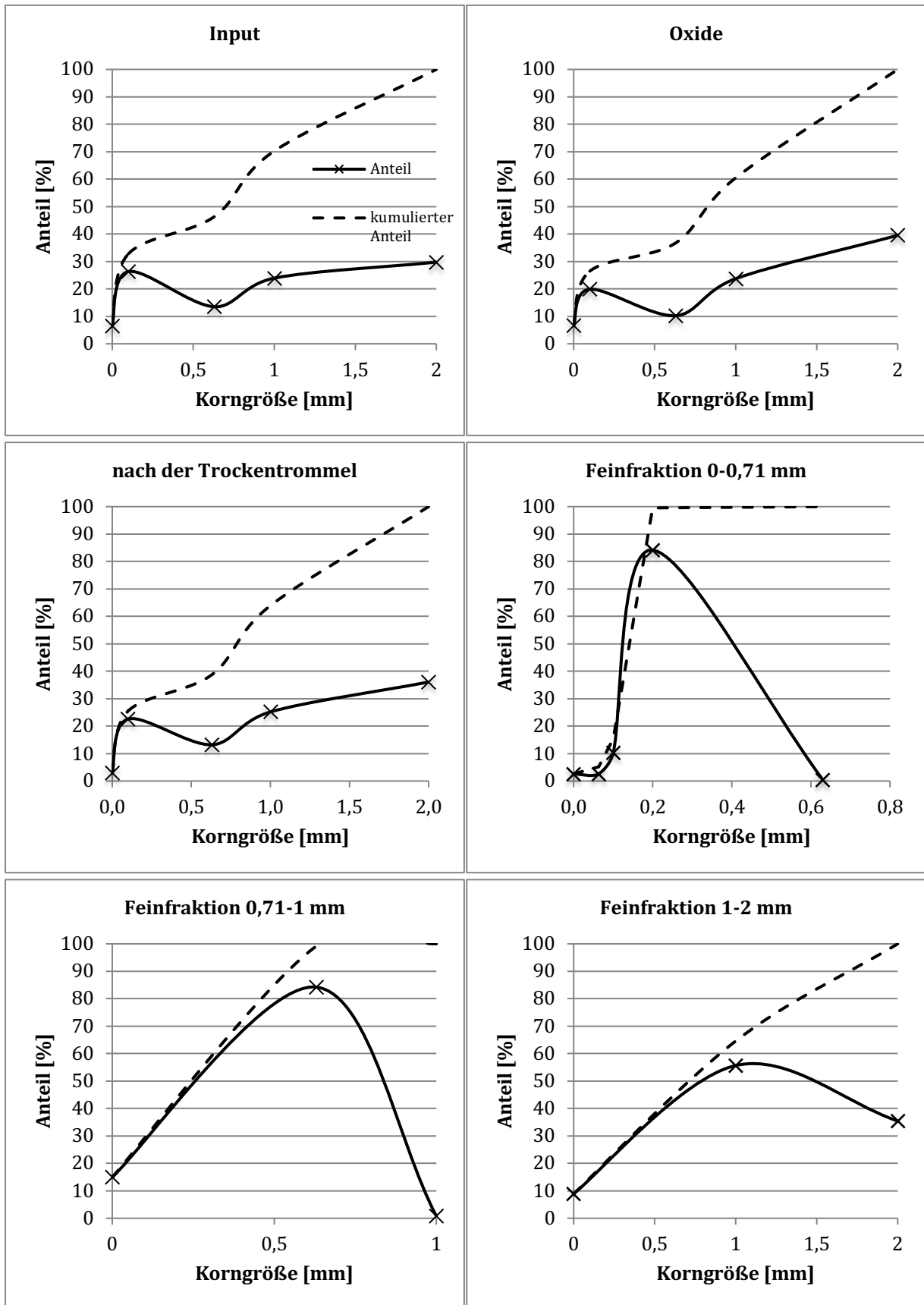


Abbildung 49: Siebkennlinie β IIA

Die Siebkennlinien der β -II-B-Linie sind in Abbildung 50 dargestellt. Es wird deutlich, dass die NE ANgereicherte Fraktion im Durchschnitt größer ist als die NE ABgereicherte Fraktion. Die Leichtfraktion ist deutlich größer als die Schwerfraktion.

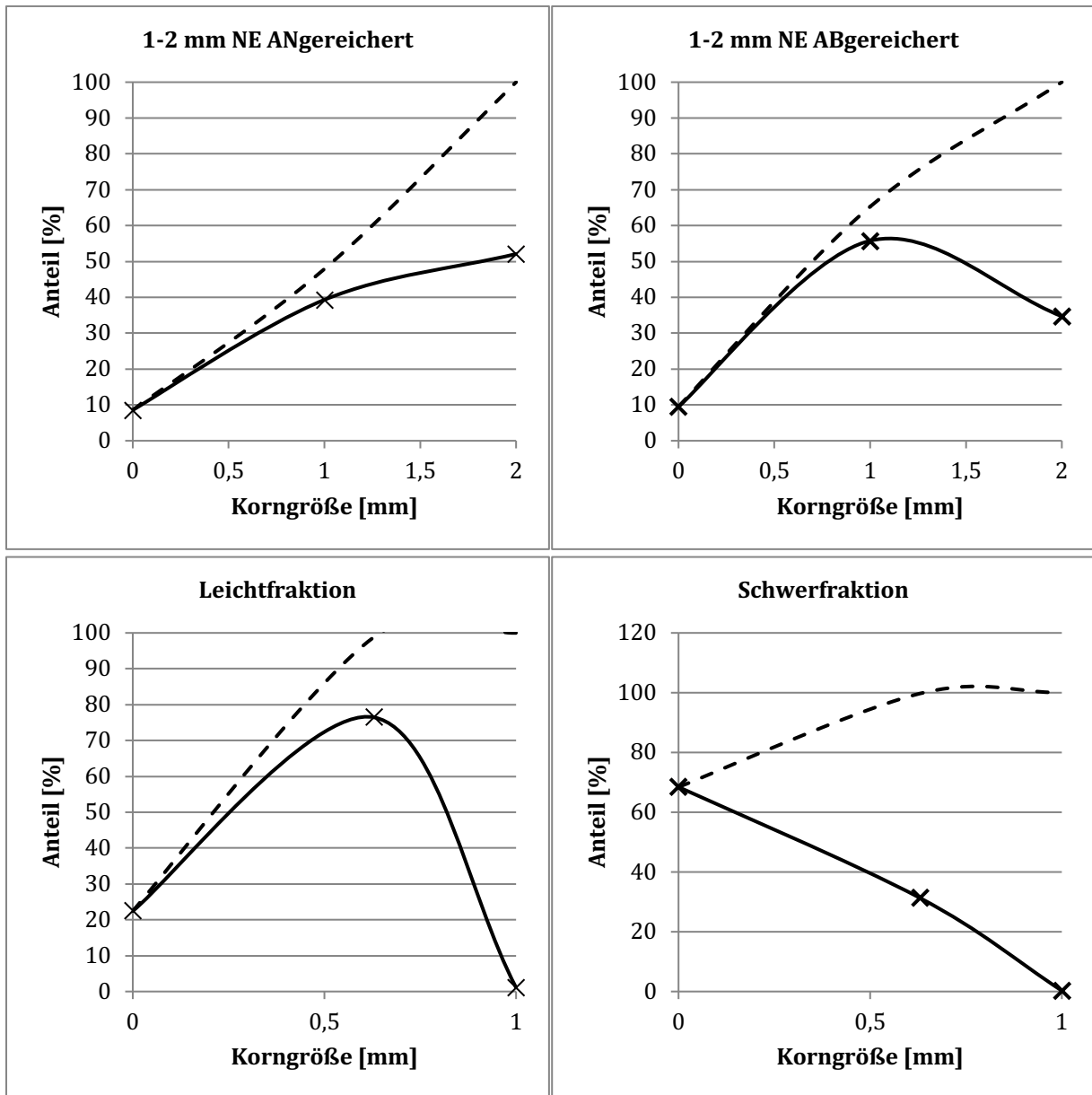


Abbildung 50: Siebkennlinien β IIB-Linie

j.2.2.2. Magnetische Trennung Oxidfraktion

Tabelle 33 zeigt die magnetische Trennung der Oxide der β II-Fraktion: 77 % schwach magnetischen Anteil und etwa 23 % stark magnetischen Anteil. Der Fremdanteil ist sehr gering. Deutlich wird der hohe schwach magnetische Anteil vor allem im Vergleich zu den Ergebnissen aus der alpha-Linie.

Tabelle 33: magnetische Trennung Oxide β II

Anteil [%] (n=3)	Schwach magnetisch	Stark magnetisch	Rest
	77,27±0,86	22,51±0,85	0,21±0,4

j.2.2.3. XRD-Analyse

Im Folgenden sind die Messungen mit der Röntgenfluoreszenzanalyse dargestellt.

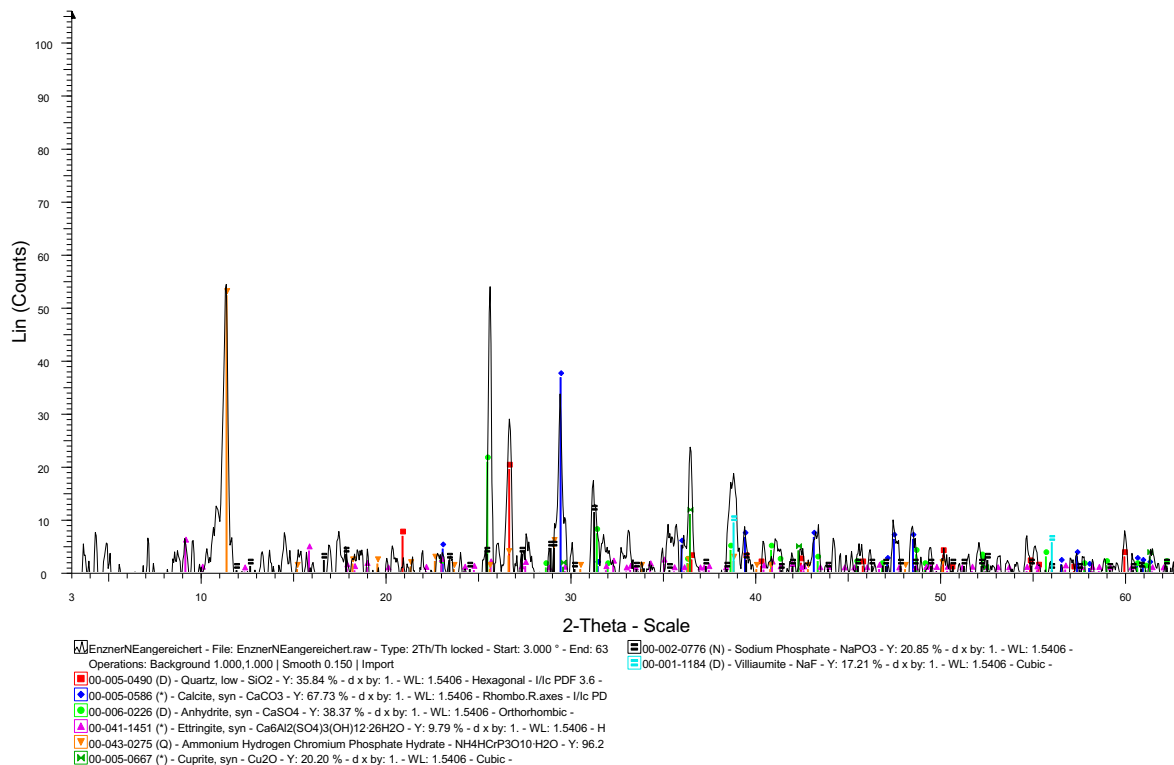


Abbildung 51: XRD-Analyse NE angereichert β II

Abbildung 51 stellt die Messung für die NE angereicherte Fraktion dar. Es dominieren verschiedene Minerale wie Quarz, Calcite, Anhydrite, Ettringite, Ammonium Hydrogen Chromium Phosphate Hydrate, Cuprite, Sodium Phosphate und Villiaumite. Es ist kein Metall in gediegener Form zu erkennen. Die Nachweisgrenze liegt bei etwa einem Prozent. Dennoch wird aber deutlich, dass im Vergleich zur nachfolgenden Messung Cuprite (Cu_2O) detektiert werden konnte.

Abbildung 52 stellt die Messung der NE abgereicherten Fraktion dar. Hier ist eine etwas andere Zusammensetzung als in der vorhergehenden Messung zu erkennen. Folgende Mineralien sind vorhanden: Quarz, Calcite, Titanium Hydrogen Oxide Silicate Hydrate, Buetschliite, Anhydrite und Ettringite. Auch hier sind keine Metalle in gediegener Form zu erkennen.

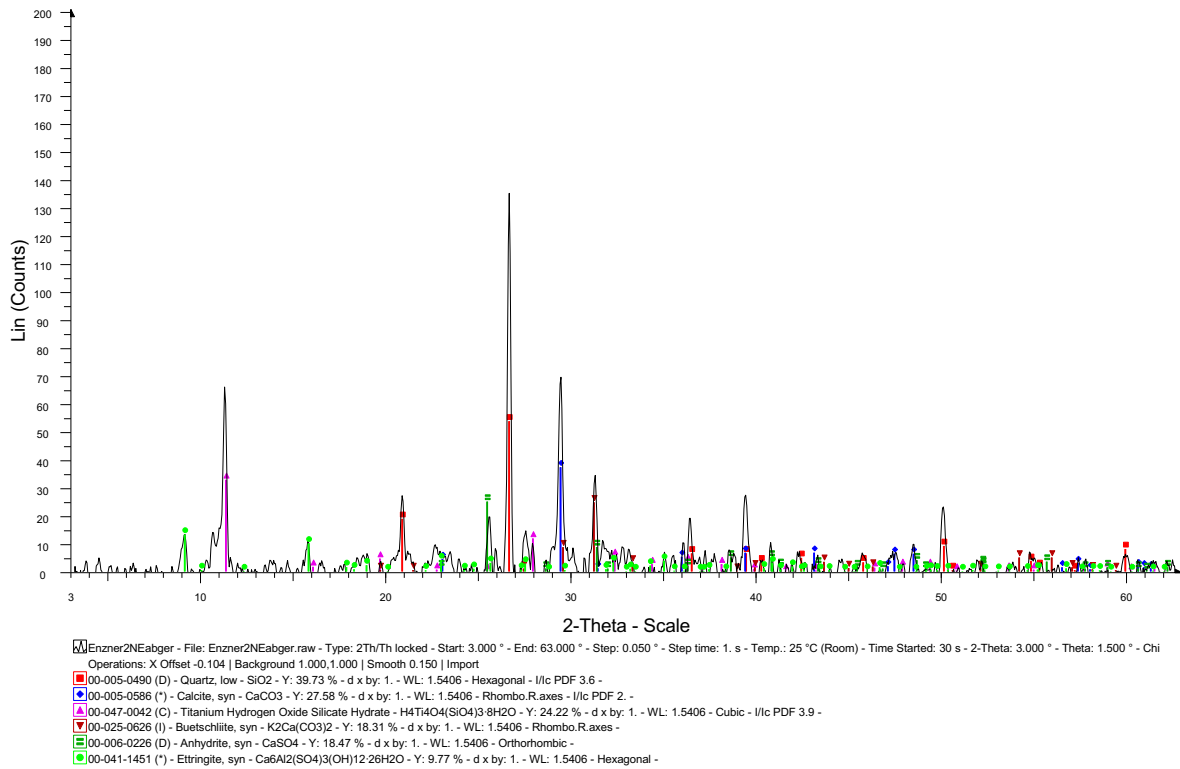


Abbildung 52: XRD-Analyse NE abgereichert β II

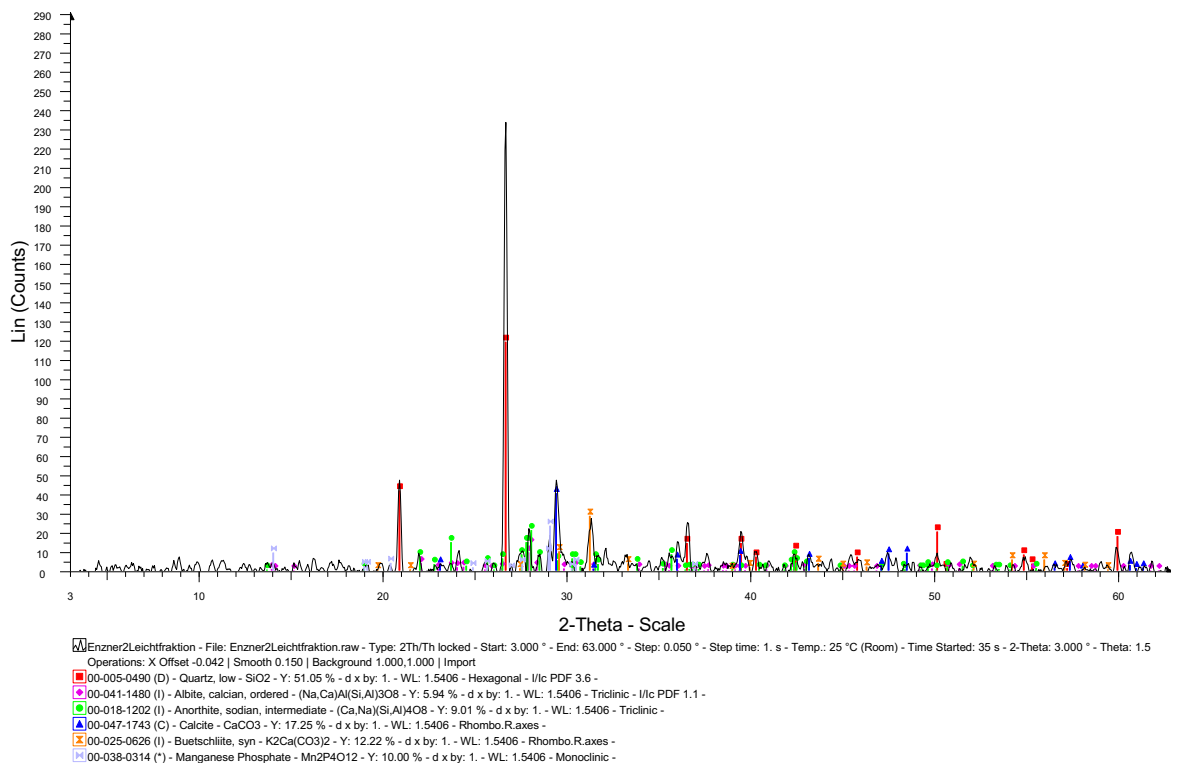


Abbildung 53: XRD-Analyse Leichtfraktion β II

Abbildung 53 stellt die XRD-Messung für die Leichtfraktion der β II-Fraktion dar. Neben den auf Silizium, Calcium, Natrium und Kalium basierenden Mineralen tritt hier Seite **95** von **108**

in relativ deutlicher Ausprägung Albit ((Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈) auf. Metall in gediegener Form konnte aber auch hier nicht detektiert werden.

Abbildung 54 zeigt die Messung für die Schwerfraktion. Hier wird deutlich, dass Rutile (TiO₂), Neodymium Tellurate (Nd₁₀Te₆O) und Copper Phosphate Fluoride (CuPO₃F) gemessen wurde. D.h. deutlich mehr Mineralien mit schweren NE-Metallen, allerdings auch keine Metalle in gediegener Form.

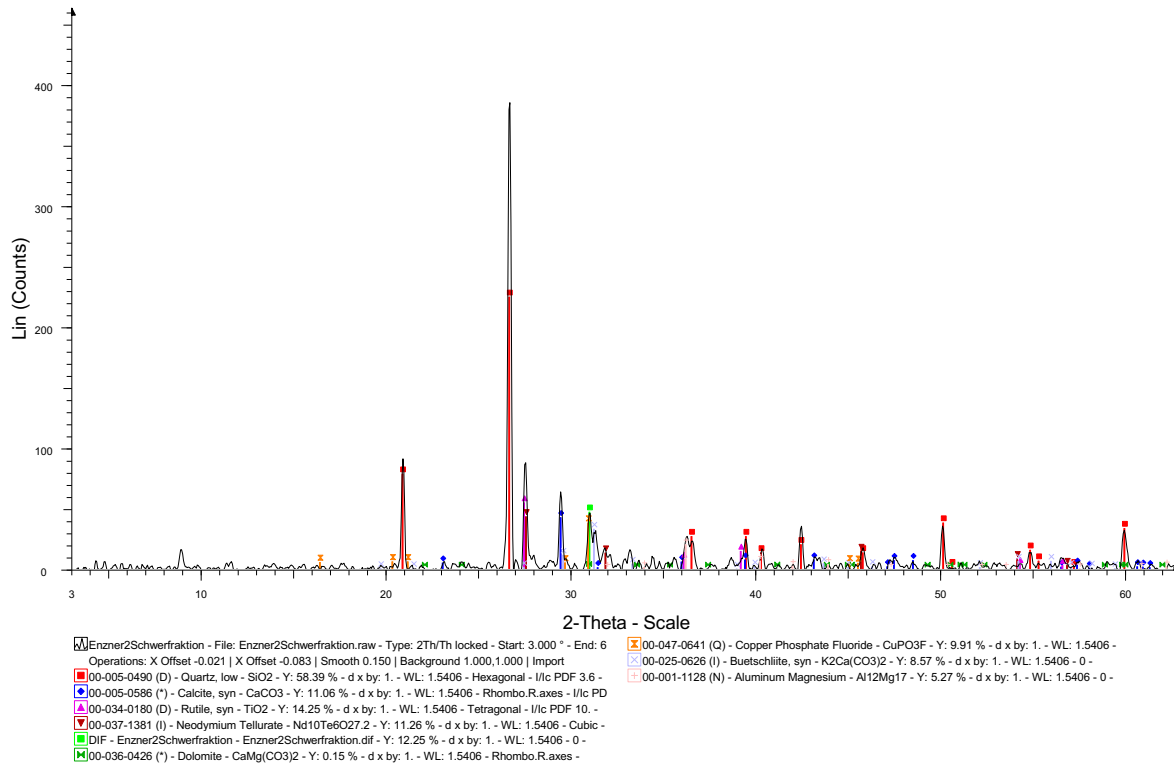


Abbildung 54: XRD-Analyse Schwerfraktion β II

j.2.2.4. Nasschemische Analyse

Tabelle 34 zeigt die nasschemische Analyse der β II-Linie. Es wird deutlich, dass eine Anreicherung von Aluminium und Kupfer in der NE ANgereicherten Fraktion zu erkennen ist. Jedoch erfährt auch die ABgereicherte Fraktion eine Anreicherung im Vergleich zu Fraktion 1-2 mm. Die Anreicherung von Kupfer in der Schwerfraktion und Aluminium in der Leichtfraktion funktioniert nicht. Die Anlage war zum Versuchszeitpunkt noch im Testlauf.

Tabelle 34: Ergebnisse Metallgehalte β II

	Aluminium	Kupfer	Silber
	g/kg	g/kg	mg/kg
β 2 Input	1,00	0,26	2,00
β 2 0-0,71 mm	4,02	0,51	7,99
β 2 0,71-1 mm	4,57	1,14	3,00
β 2 1-2 mm	4,69	0,12	6,96
β 2 NE ANgereichert 1-2 mm	50,50	30,66	1,01
β 2 NE ABgereichert 1-2 mm	9,57	19,27	10,95
β 2 Leichtfraktion 0,71-1 mm	3,70	0,07	1,00
β 2 Schwerfraktion 0,71-1 mm	2,28	4,45	2,00

k. Versuchsergebnisse Energiebilanz

Eine Energiebilanzierung der Beta-Linie ist nur eingeschränkt möglich.

Dieses begründet sich einerseits in der nicht eindeutig zuzuordnenden Massenbilanzierung in Verbindung mit den z.T. unterschiedlichen Laufzeiten während des Versuchsbetriebes (siehe hierzu auch Massenbilanz).

Der elektrische Bedarf der unterschiedlichen Bereiche der Beta – Linie wurde analog zur Bedarfserfassung der Alpha – Linie durch Differenzbetrachtung ermittelt.

Dabei wurde während der Betriebszeiten der unterschiedlichen Teilbereiche der Beta-Linie (Beta II A, B und C) der elektrische Gesamtbedarf der Anlage (Alpha- und Beta – Linie) erfasst und der Bedarf der einzelnen Teilbereiche durch Differenzbildung zwischen Gesamtbedarf und Bedarf für die Alpha – Linie (siehe hierzu auch Punkt f.) errechnet.

Danach stellt sich der elektrische Bedarf für die Teilbereiche der Beta – Linie wie folgt dar:

- Beta II A: ca. 35 – 40 kW
- Beta II B: ca. 25 – 30 kW
- Beta II C: nicht ermittelt, da nur unvollständig in Betrieb.

Während des Versuches mit der Beta II A – Linie wurden 6,07 Mg Feinfraktion durchgesetzt. Dieses entspricht, wie auch der Durchsatz der Beta II B – Linie von 2,25 Mg nach Informationen der TARTECH dem erwarteten stündlichen Auslegungsdurchsatz der beiden betrachteten Teillinien (8 Mg/h für die Beta II A – Linie).

Gemäß vorliegender Massenbilanz aus dem Grundfließbild der Alpha – Linie wurden im Referenzversuch 6 aus 718,8 Mg Rohschlacke 47,2 % entsprechend ca. 339,3 Mg Feinfraktion (0 – 2 mm) erzeugt.

Setzt man für die Alpha – Linie während des Referenzversuches 6 einen mittleren stündlichen Durchsatz von im Mittel ca. 90 Mg/h an, so würde sich für die eingesetzte MVB-Schlacke unter Beachtung des oben ermittelten Anteils der Feinfraktion eine rechnerische Menge von ca. 42,48 Mg/h Feinfraktion (0 – 2 mm) ergeben.

Unter Beachtung der o.g. Grundlagen kann die vorhandene Beta – Linie damit ca. 12,52 % der in der Alpha – Linie erzeugten Feinfraktion verarbeiten, was einer rechnerischen Rohschlackenbezugsmenge von ca. 90 Mg entspricht.

Auf Grundlage der während des Referenzversuches erzielten Ergebnisse ergeben sich für die beiden Teilanlagen (Beta II A und B) folgende spezifische elektrische Energieverbräuche (bezogen auf die Rohschlacke)

- Beta II A: **ca. 0,39 – 0,44 kWh/Mg** Rohschlacke
- Beta II B: **ca. 0,28– 0,2 kWh/Mg** Rohschlacke
- Beta II C: nicht ermittelt, da nur unvollständig in Betrieb.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Vorbehaltlich leichter Verschiebungen durch Veränderungen der Stundensätze bei der Nachkalkulation ergibt sich bei der SRH folgendes Bild:

Aufgrund der Entscheidung, die TARTECH-Anlage nicht im Raum Hamburg, sondern in Wiesbaden zu errichten, war die Behandlung von 40.000 Mg HMVA in dieser Anlage in Wiesbaden insbesondere aufgrund der Transportentfernungen nicht mehr sinnvoll. Die aufzubereitende Menge an Hamburger HMVA wurde auf ca. 4.400 Mg reduziert. Da die SRH nun nicht mehr die Fläche für die Aufstellung der Aufbereitungsanlage anmieten musste (27.000 € Plankosten) und auch die geplanten Maschinen (Radlader und Bagger, 97.860 € Plankosten) samt Kraftstoff (48.480 € Plankosten) und Bedienpersonal (76.255 € Plankosten) nicht mehr erforderlich waren, kam es zu Einsparungen in der Größenordnung von ca. 249.600 €. Dem entgegen stand jedoch, dass erwartete Einsparungen in der Größenordnung von ca. 180.000 € durch die Behandlung von 40.000 Mg HMVA in der TARTECH-Anlage nicht mehr realisiert werden konnten und durch das angeschobene Genehmigungsverfahren für die Anlagenerrichtung in Damsdorf Kosten in der Größenordnung von 31.000 € entstanden, denen letztendlich durch die Verlagerung des Anlagenstandortes keinerlei Nutzen mehr gegenüberstand.

Im SRH – Teilprojekt kam es daher insgesamt zu einer Reduzierung der unmittelbaren Vorhabenkosten in der Größenordnung von ca. 261.000 €. Die Förderquote wurde während der Antragsphase mit 40% angenommen und letztendlich auf 28,34% festgesetzt um die erwartete Einsparung von 180.000 € abbilden zu können. Aufgrund der erheblichen Kostenreduzierung und der Tatsache, dass es nicht mehr zu Einsparungen bei der HMVA-Behandlung kam, wurde in 2013 die Förderquote rückwirkend wieder auf 40% hochgesetzt. Die anfänglich bewilligte Zuwendung (als Maximalbetrag) wurde trotzdem nur zu ca. 80% ausgeschöpft, ca. 34.000 € bereitgestellte Fördermittel wurden nicht abgerufen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die geleisteten Arbeiten sind aus Sicht der SRH in jedem Fall angemessen und notwendig gewesen. Die TARTECH-Anlage hat sich in jeder Hinsicht als eine sehr innovative und leistungsfähige Anlage erwiesen, es war daher sinnvoll, diese neue Technologie mit verschiedenen HMVA-Chargen aus verschiedenen Quellen zu beschicken und so die Einflüsse der jahreszeitlich variierenden Abfallzusammensetzung, aber auch die unterschiedlichen HMVA-Qualitäten in Abhängigkeit von der Anlagensteuerung während des Verbrennungsprozesses herauszuarbeiten. Durch die sehr späte Inbetriebnahme der TARTECH-Anlage, insbesondere der Beta-Linie, wurden speziell die technischen Möglichkeiten der Beta-Linie noch nicht in ausreichender Tiefe herausgearbeitet. Der Bereich der Alpha-Linie hingegen konnte ausreichend erprobt und bewertet werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die Erprobung der TARTECH-Technologie hat gezeigt, dass durch die innovative Technologie eine deutliche Steigerung der Rückgewinnung von NE-Metallen aus HMVA möglich ist. Obwohl die beiden aktuell in Betrieb befindlichen Hamburger Müllverbrennungsanlagen ihre HMVA-Aufbereitung in den letzten zwei Jahren durch moderne NE-Abscheidungstechnologien nachgerüstet haben, kann dort das Niveau der NE-Abscheidung durch TARTECH-Technologie nicht erreicht werden. Es wird daher bei der SRH zeitnah darüber zu entscheiden sein, ob die jetzt in Hamburg in Betrieb befindliche Aufbereitungstechnik durch eine Technik entsprechend der TARTECH-Technologie zu ergänzen oder zu ersetzen ist.

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Erste Erkenntnisse zeigen, dass die Nach- oder Umrüstung der in Hamburg vorhandenen HMVA-Aufbereitungstechnologie mit einer Technologie entsprechend der TARTECH-Technik zu einer Steigerung der NE-Abtrennung von mehr als 0,5% führen wird. Nach Berechnungen von TARTECH, aber auch nach Einschätzungen anderer, leistungsfähiger HMVA-Aufbereiter ist daher davon auszugehen, dass so eine Anlagenoptimierung wirtschaftlich ist. Die SRH wird dieses noch in 2016 mit den Hamburger Rahmenbedingungen überprüfen und sich im Falle der Bestätigung dieser Einschätzungen voraussichtlich zu einer Nach- oder Umrüstung der vorhandenen HMVA-Aufbereitungsanlagen entscheiden.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die SRH ist ein eher wirtschaftlich arbeitendes Unternehmen und daher nicht auf den Zugewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen ausgerichtet. Die SRH hat jedoch eine enge Kooperation mit der TUHH und unterstützt daher die wissenschaftlichen Arbeiten an abfalltechnischen Fragestellungen. Dabei hat die SRH das Interesse, durch neue Erkenntnisse mehr für Umweltschutz und Nachhaltigkeit tun zu können. Geeignete und wirtschaftliche Technologien werden von der SRH gerne in den Praxisbetrieb übernommen.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Die SRH sieht Risiken in der zukünftigen Vermarktung der HMVA als Gesamtgemisch in der Funktion eines Ersatzbaustoffs. Obwohl es nicht Arbeitsschwerpunkt im ATR-Projekt war, hat sich gezeigt, dass die Stoffstromtrennung in Korngrößenbereiche 0/2, 2/5, 5/18 und >18mm viele Optionen öffnet, aus den weitestgehend metallentfrachteten mineralischen Reststoffen gezielt definierte Baustoffkomponenten als Zuschlagstoffe für die Beton-, Asphalt- und Zementindustrie zu erzeugen. Im o.g. neuen Projekt (OPTIMIN) werden sich BAM und SRH zusammen mit der TUHH und anderen Partnern dieser Fragestellung zuwenden. So eröffnet die umfassende Stoffstromtrennung der TARTECH-Technologie zur Optimierung der NE-Metallabtrennung den Weg in eine nachgeschaltete Verbesserung der Verwertung der mineralischen Reststoffe aus der HMVA-Aufbereitung.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

TP E (SRH): Arbeiten in der Metropolregion Hamburg

Aktuelle Ergebnisse aus einer norddeutschen MVA über eine Zeitreihe von 20 Jahren zeigen, dass die Gehalte an Fe-Schrott von 12 % in 1997 über die Jahre kontinuierlich auf 3 % in 2014 zurückgegangen sind. Durch technische Nachrüstung konnten im gleichen Zeitraum die Rückgewinnungsraten bei NE-Metallen von 0,3 % nach erster Installation von Wirbelstromabscheidern auf 1,2 % gesteigert werden (Lübben 2015). In einer anderen norddeutschen Anlage konnte durch eine weitergehende Schlackenaufbereitung die NE-Rückgewinnung auf 1,3 % - bezogen auf die Frisch-HMVA - gesteigert werden.

Innerhalb der Projektzeit fand eine Fortentwicklung des Standes der Technik und der bestverfügbaren Technik statt. Eine Befragung deutscher Schlackeaufbereiter aus dem Jahr 2014 zeigt Tabelle 35. Im Durchschnitt werden 7,7 % Eisen mit 5 Eisenabscheidern und 1,3 % NE-Metalle mit 5 NE-Abscheidern gewonnen.

Tabelle 35: Rückgewinnungsmengen, Anzahl Abscheider, Siebgrenze: Ergebnisse einer Fragebogenauswertung

(Kuchta, Enzner 2015)

	Median	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
Eisenquote ¹ [%]	8,0	7,7	4,8	10,7
Anzahl Eisenabscheider	4	5	2	11
NE-Quote ¹ [%]	1,1	1,3	0,8	1,7
Anzahl NE-Abscheider	3	5	2	12
Mineralik-Quote ² [%]	89,4	89,0	84,3	91,4
Unverbranntes-Quote [%]	0,4	0,9	0	1,6
Siebgrenze [mm]	2		0	5

Innerhalb der Projektzeit fand insbesondere im Bereich der NE-Abscheidung eine erhebliche Technisierung statt. Wurde im Bilanzjahr 2009 lediglich in 50-85 % der Anlagen eine NE-Separation durchgeführt (Gillner 2011), führen heute alle Anlagen eine NE-Separation mit mindestens 2 NE-Abscheidern durch. Die durchschnittliche NE-Abtrennung lag 2010 noch bei 29 % (Gillner 2011). Der Stand der Technik 2014 liegt bei 56 % (Kuchta; Enzner 2015). Zudem wurde auch die Fe-Separation erhöht und die Aufbereitungstiefe bis runter auf 2 mm gesteigert. Die durchschnittliche Aufbereitungszeit liegt heute nicht mehr bei 12 Wochen, sondern bei 4 Wochen (Kuchta; Enzner 2015).

Neben der deutlichen Fortentwicklung des Standes der Technik kam es auch im Bereich der innovativen Verfahren (nasse Aufbereitung, Sensortechnik, etc) und der bestverfügbaren Technik bei der konventionellen Aufbereitungstechnik zu erheblichen Fortschritten. Durch die geschickte Kombination klassischer Aufbereitungstechniken kann dabei oft mehr erreicht werden, als durch noch zusätzliche Technisierung.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolge und eingereichte Veröffentlichungen

- Kuchta, K: (2012): Rückgewinnung von Metallen aus Schlackedeponien und potentielle Verwertungswege. In: Deponietechnik 2012, R. Stegmann; G. Rettenberger; K. Fricke, K. Kuchta, K-U. Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.
- Kücükler, M.; Westphal, L.; Kuchta, K.: Bottom Ash from Municipal solid waste incineration plants in Hamburg In: IWWG International Waste Working Group (Hg.): Sardinia_2013. Cossu, Pinjing He, Kjeldsen, Matsufuji, Reinhart und Stegmann. 14th International Waste Management and Landfill Symposium, 30.9.2013 - 4.10.2013, S. 372
- Kuchta, K. (2014): Schlackeaufbereitung zur Separierung von Metallen und Seltenen Erden. In: Deponietechnik 2014. R. Stegmann; G. Rettenberger; R. Siechau; K. Fricke; K. Kuchta; K.-U. Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.
- Enzner, V., Kuchta, K. (2014a): Metallrückgewinnung aus Hausmüllverbrennungsschlacken. In: 3. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Nürnberg 5. und 6. Februar 2014, S.299-306. (Beitrag im Tagungsband und Posterpräsentation)
- Enzner, V.; Kuchta, K. (2014b): Nicht-Eisen-Metallgehalte in Abfallverbrennungsschlacken. In: DGAW 4. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 27. und 28. März 2014, S.113-117
- Enzner, V.; Ritzkowski, M; Kuchta, K (2014): Metals in bottom ash landfills – resource potential and recovery options. In: Crete 2014. 4th International Conference – Industrial and Hazardous Waste Management. September 2nd – 5th 2014. Chania/ Crete/ Greece. (Beitrag im Tagungsband und Präsentation)
- Lübben, S. (2015): Verwertung von Abfallverbrennungsschlacke als Zuschlagstoff in der Beton-, Asphalt- und Zementindustrie. In: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen – Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, Berliner Schlackenkonferenz – K. J. Thomé-Kozmiensky. Neuruppin, TK-Verlag, 321-335

Vorträge

- Lübben, S. (2013), *Entwicklung des Schlackerecyclings am Beispiel der MVA*, Hamburg T.R.E.N.D, Hamburg, Präsentation
- Lübben, S. (2013), *Wertstoffe aus der Müllverbrennungsschlacke*, 22. Kölner Abfalltage, Köln, Präsentation
- Lübben, S. (2014), *Wertstoffe aus der MVA-Schlacke gestern – heute – morgen*, Workshop Asche – Schlacken – Stäube vom Wirtschaftsförderungszentrum Ruhr für Entsorgung- und Verwertungstechnik e.V., Präsentation
- Enzner, V. und K. Kuchta, (2014), *Nicht-Eisen-Metallgehalte in Abfallverbrennungsschlacken*, DGAW 4. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 27. und 28. März 2014, S.113-117
- Lübben, S. (2015), *Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals*, ISWA Beacon Conference Resources from Waste: Sorting and Treatment Techniques, Hamburg, Präsentation

- Lübben, S. (2015), *Forschungsaktivitäten der Stadtreinigung Hamburg auf dem Gebiet der Müllverbrennungsschlacken*, Vortrag im Rahmen der Vorlesungsreihe TUHH goes sustainable, TU Hamburg-Harburg, Präsentation
- Lübben, S. (2016), *Schlacke aus der Müllverbrennung – Mehr drin als man denkt!*, Vortrag im Rahmen der Vorlesung Umweltpolitik und Nachhaltigkeit an der TU Hamburg-Harburg, Präsentation
- Lübben, S. (2016), *Schlacke als Quelle für mineralische Baustoffe*, Hamburg T.R.E.N.D, Hamburg, Präsentation

6.2 Geplante Veröffentlichungen

- Enzner, Verena; Kuchta, Kerstin: Aufbereitung von Rostaschen mittels Hochgeschwindigkeitsprallzerkleinerer. 4. Symposium „Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovation“. 17. Und 18.2.2016 Tutzing. Angenommen als Vortrag mit Beitrag im Tagungsband.
- Enzner, Verena; Kuchta, Kerstin: Bottom ash treatment – „state-of-the-art“ in Germany in comparison to an innovative method“. EurAsia Waste Management Symposium 2016. 2.-4.5.2016 Istanbul. Angenommen als Vortrag mit Beitrag im Tagungsband.
- Enzner, V. und K. Kuchta (2016), Substitution von Primärrohstoffen durch die mineralische Restfraktion aus Rostaschen, 6. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ der DGAW, Berlin, Poster und Beitrag Tagungsband

7. Quellen

Alwast, Holger; Riemann, Axel (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. UBA-FB 001409. 50/2010. Hg. v. UBA. Dessau-Roßlau.

Gillner, Ronald (2011): *Nichteisenmetallpotential aus Siedlungsabfällen in Deutschland. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung Band 40. Dissertationsschrift. RWTH Aachen, Aachen.*

Klein, Ralf (2002): Wasser-, Stoff- und Energiebilanz von Deponien aus Müllverbrennungsschlacken. Dissertation TU München. Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie.

Kuchta, Kerstin; Enzner, Verena (2015): *Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. EdDE-Dokumentation Nr. 17. Oktober 2015.*

Lübben, Stefan (2015): Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals. Vortrag ISWA Beacon-Conference in Hamburg.

Mocker, Mario; Löh, Ingrid; Stenzel, Fabian; Deng, Peipei (2010): Verbrennungsrückstände - Herkunft und neue Nutzungsstrategien. In: Bernd Bilitewski, Martin Faulstich und A. Urban (Hg.): 15. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung. 15. Fachtagung

Muchova, Lenka; Bakker, Erwin; Rem, Peter (2009): Precious Metals in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. In: *Water Air Soil Pollut: Focus* 9 (1-2), S. 107–116.

Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH (2012): Hausmüllmenge und Hausmüllzusammensetzung in der Freien und Hansestadt Hamburg im Jahr 2012. Hg. v. Stadtreinigung Hamburg. Hamburg.

Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH (2014): Hausmüllmenge und Hausmüllzusammensetzung in der Freien und Hansestadt Hamburg im Jahr 2013. Hg. v. Stadtreinigung Hamburg. Hamburg.

Pretz, Th.; Meier-Kortwig, J. (2000): Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung. 41. Jahrgang, Aachen. Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfälle.

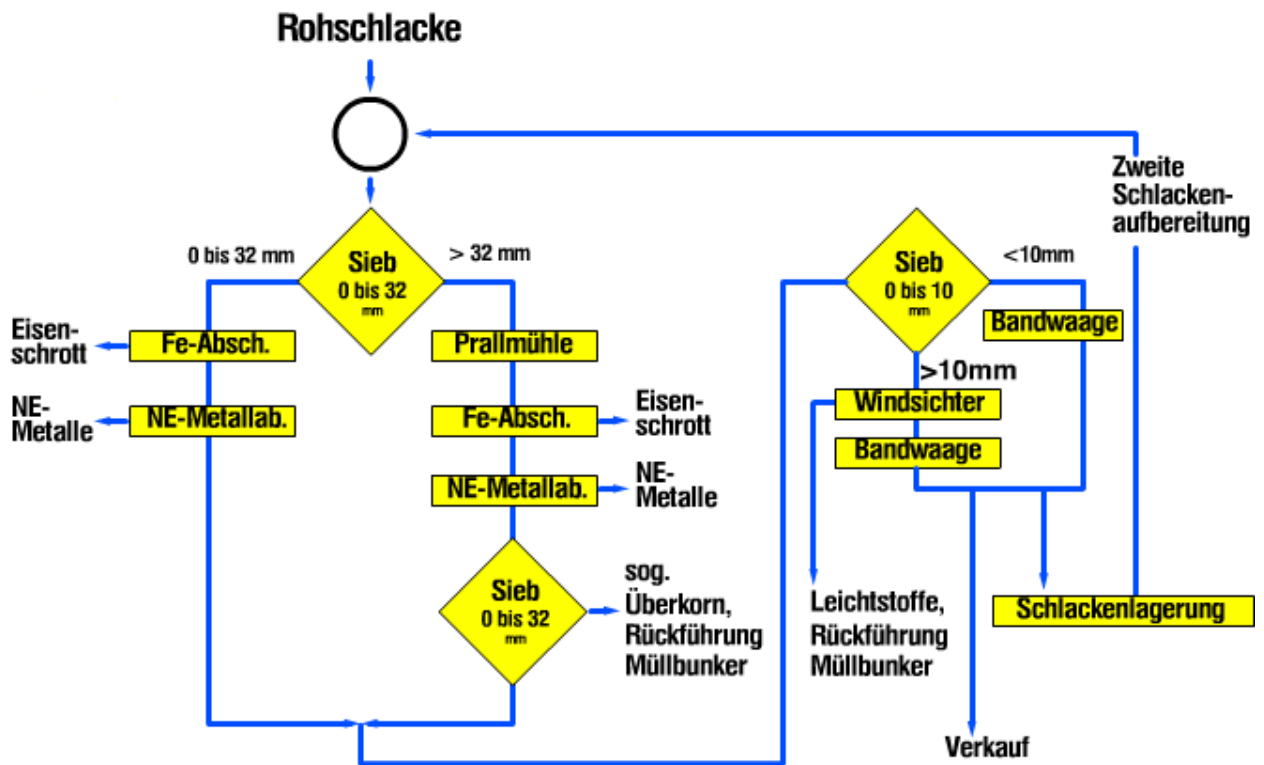
Shen, Huiting; Forssberg, E. (2003): An overview of recovery of metals from slags. In: *Waste Management* 23, S. 933–949.

Statistisches Bundesamt (2012): Umwelt: Abfallentsorgung - Abfallmengen nach Verwertungs- und Beseitigungsverfahren 2010. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/Beseitigung_Verwertung_AE.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt aktualisiert am 19.10.2012, zuletzt geprüft am 14.10.2013.

8. Anhang

Ablaufdiagramme zur Schlackenaufbereitung in der MVR (Quelle www.mvr-hh.de)

Schlackeaufbereitung



Schlackewäsche

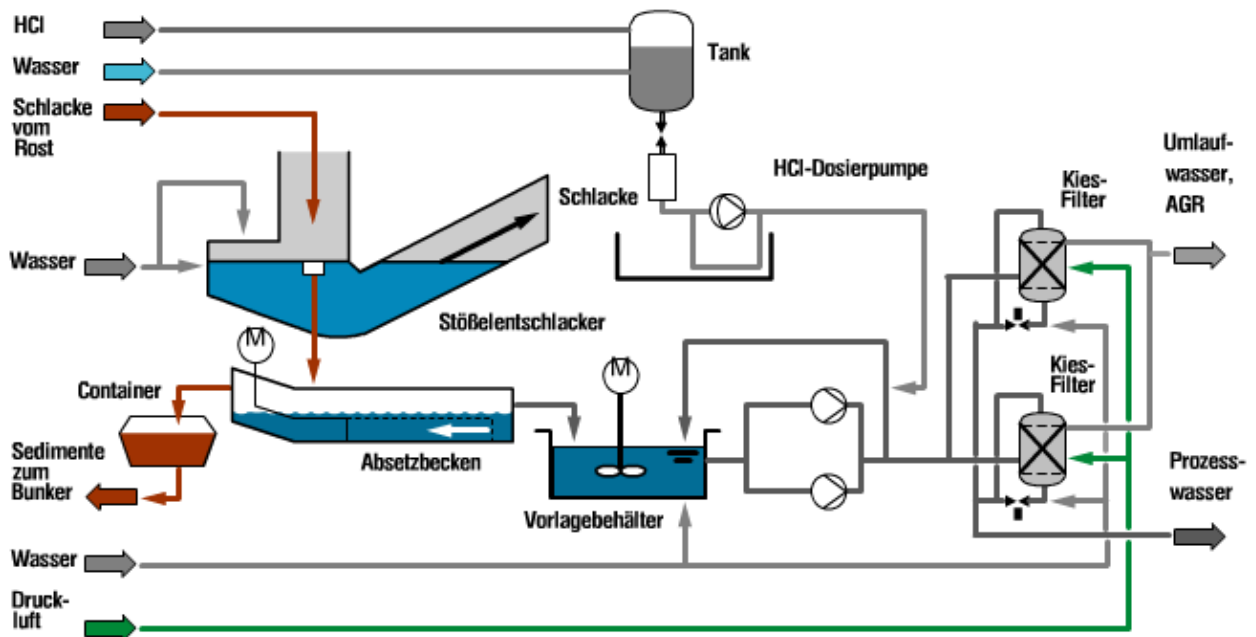


Abbildung 55: Darstellung der Schlackebehandlung innerhalb der MVR

(Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg)

(www.mvr-hh.de/uploads/pics/kessel_01.png)

Schlackeaufbereitung im Kesselbereich

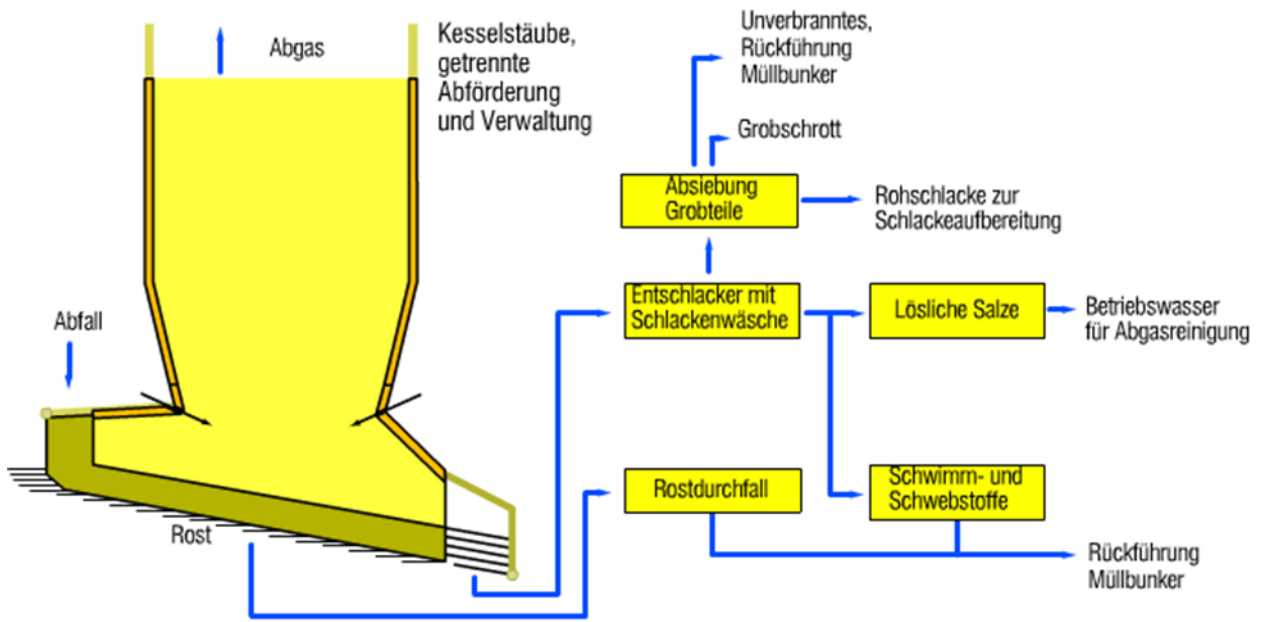


Abbildung 56: Darstellung der Schlackebehandlung innerhalb der MVR

(www.mvr-hh.de/uploads/pics/kessel_01.png)

Ablaufschema MVB

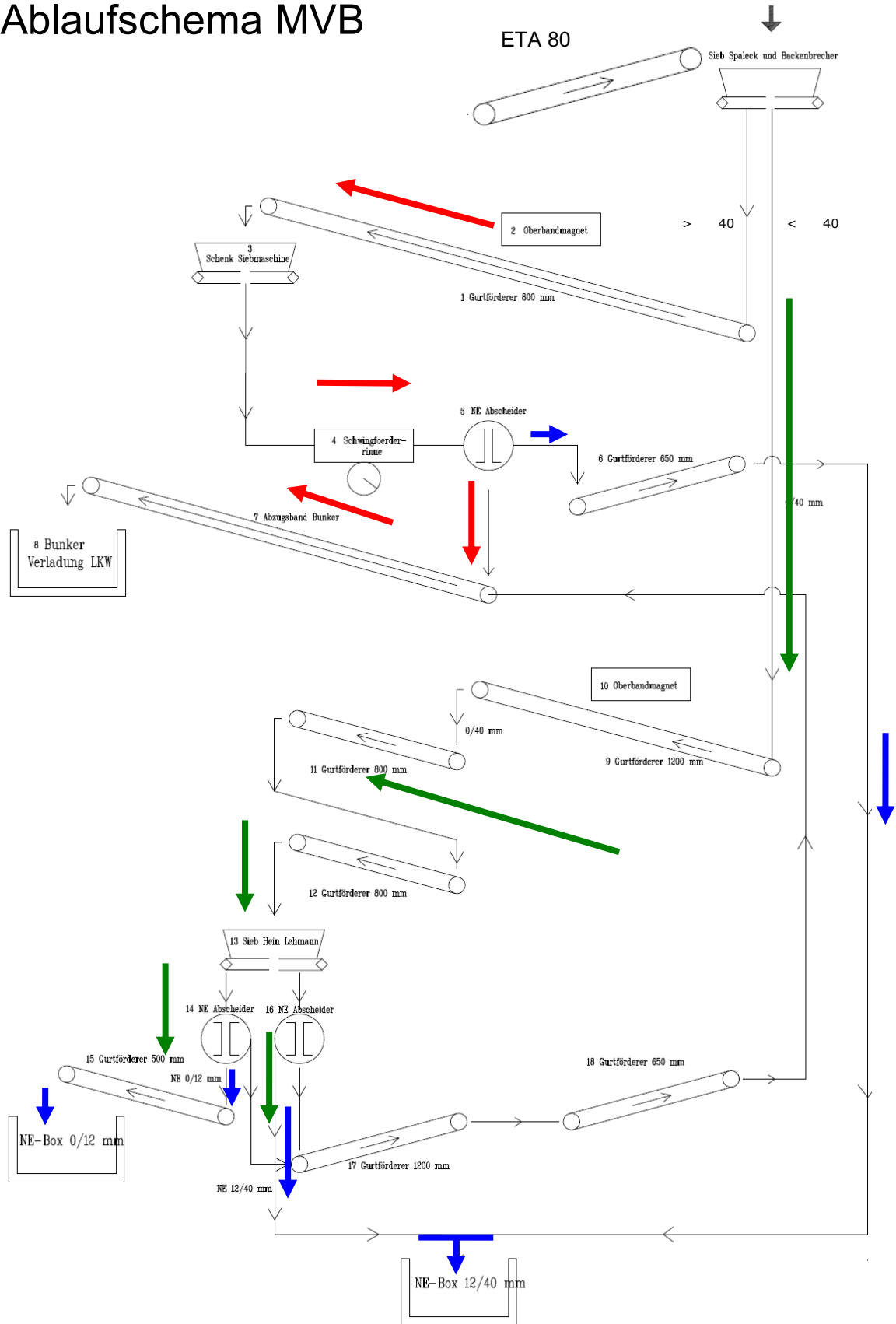


Abbildung 57: Optimierte Schlackenaufbereitung in der MVB // Quelle unveröffentlicht / pers. Mitteilung MVB

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 F

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt F:

Arbeiten am Standort Schöneicher Plan

ausführende Stelle:

**BSR – Berliner Stadtreinigungsbetriebe
Geschäftseinheit Abfallverwertung und Beseitigung
Abteilung Deponien und Altablagerungen**

Projektleiter: Dipl.-Ing. Tjado Auhagen

Autor und Projektwissenschaftler: Dipl.-Ing. Tjado Auhagen

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	3
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
II. Eingehende Darstellung	6
1 Resultate des Forschungsvorhabens.....	6
a. Ergebnisse des Aufbereitungsversuch in Wiesbaden	6
b. Beurteilung der Verwertbarkeit der mineralischen Fraktion.....	7
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	8
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	8
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	8
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	8
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende	8
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	8
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	9
6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge.....	9
6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	9
6.2 Geplante Veröffentlichungen.....	9
Quellen	9

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Anteile unterschiedlicher Bestandteile in Rohasche und in Ruhleben behandelte Asche [1]	6
Tabelle 2. Massenbilanz bereits behandelter und abgelagerter HMVA von der Deponie Schöneicher Plan nach der Aufbereitung in Wiesbaden[2]	7
Tabelle 3. Bestimmung der Metallgehalte in den drei NE- und zwei FE-Fractionen aus der Aufbereitung in Wiesbaden [3]	7

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes war zu untersuchen, ob die seit 2009 auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagerte Hausmüllverbrennungssasche (HMVA) ausgebaut und die darin enthaltenen Metalle mit der innovativen Anlage des Industriepartners TARTECH eco industries (TARTECH) separiert werden können. Zu untersuchen war, welche Metalle in welcher Qualität und welche Anteile der noch enthaltenen Metallmengen nach der mehrjährigen Lagerung noch zurückgewonnen werden können. Für die Berliner Stadtreinigung (BSR) war außerdem von Interesse, ob die mineralische Fraktion nach einer derartigen Behandlung noch zur Verwertung bei der Deponiesanierung einsetzbar ist. Für die Verwertbarkeit sind einerseits die Zuordnungswerte der Deponieverordnung für Schadstoffe im Feststoff und im Eluat einzuhalten und andererseits ist die durch das Körnungsband bestimmte Gasdurchlässigkeit maßgeblich.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Siedlungsabfalldeponie Schöneicher Plan musste nach den Anforderungen des Deponierechts zum 01.06.2005 stillgelegt werden, da sie weder über eine geologische Barriere, noch über ein Basisabdichtungssystem verfügt. Nach Schließung sind Deponien (ebenfalls nach Deponierecht) zwingend mit einer Oberflächenabdichtung zu versehen. Um das auf dieser Dichtung gesammelte Niederschlagswasser geordnet abzuführen, muss der Abfallkörper zu einer Kubatur profiliert werden, von der das Oberflächenwasser im freien Gefälle ablaufen kann. Die erforderlichen Sammel- und Versickerungseinrichtungen im Umfeld der Deponie können nur dort gebaut werden, wo das Platzangebot ausreichend ist und die geologische Beschaffenheit des Untergrunds die Versickerung zulässt. Die Profilierung muss also bewirken, dass das Wasser von jedem beliebigen Punkt auf dem Deponiekörper im freien Gefälle - auch nach Abschluss der zu erwartenden Setzungen - den Sammel- und Versickerungseinrichtungen zufließt. Dafür muss der Deponiekörper einer ingenieurtechnischen Planung entsprechend profiliert werden.

Da die Deponie Schöneicher Plan am 01.06.2005 noch erhebliches Restvolumen hatte und die Endkubatur aufgrund der darunter liegenden Tongruben nicht allein durch Umlagerung herstellbar war, wird (unter anderem) die HMVA aus dem Müllheizkraftwerk (MHKW) Ruhleben als Profilierungsmaterial eingesetzt. Außerdem wird die HMVA für den Bau der untersten Schicht des Oberflächenabdichtungssystems, der Trag- und Ausgleichsschicht verwendet. Die Trag- und Ausgleichsschicht liegt direkt unter den Dichtungselementen und muss in horizontaler Richtung durchlässig für die in Siedlungsabfalldeponien durch mikrobielle Prozesse

entstehenden Faulgase (Deponiegas) sein. Nur so kann das Deponiegas seitlich zu den Brunnen abgesaugt und ein Einstau unter den Dichtungsschichten vermieden werden.

Daneben hat die Asche die für den Deponiebau sehr günstige Eigenschaft, durch Verfestigung auf den Böschungen eine deutlich erosionsresistentere Oberfläche zu bilden, als alle Böden, die statt dessen als gasgängige Trag- und Ausgleichsschicht eingesetzt werden könnten. So wird der Aufwand für die Nachbearbeitung der fertig hergerichteten Flächen vor dem Oberflächenabdichtungsbau deutlich reduziert. Außerdem stellt sich auch störender Grünbewuchs auf der Schlacke erst später ein als auf den meisten anderen Materialien für die Trag- und Ausgleichsschicht.

Die Arbeiten zur Oberflächenabdichtung bei stillgelegten Deponien müssen gemäß Deponieverordnung „unverzüglich“ erfolgen, weil der Grundwasserschutz rechtlich die höchste Priorität besitzt. Daher wird die auf der Deponie Schöneicher Plan eingelagerte HMVA kontinuierlich als Baustoff für die fertig zu stellenden Flächen verwendet bzw. durch weitere Anlieferungen überschüttet. Diese Arbeiten erfolgen durch Eigenleistungen der BSR. Nach Fertigstellung der profilierten Flächen und Erstellung der gasgängigen Trag- und Ausgleichsschicht aus HMVA werden Baufirmen beauftragt, darauf das Oberflächenabdichtungssystem zu errichten. Durch die laufenden Arbeiten zum Bau der Dichtung wurden bereits Flächen endgültig rekultiviert. Es geht also bei dem Versuch mit der HMVA von der Deponie Schöneicher Plan aus dem MHKW Ruhleben nicht um die Frage, ob diese noch mal behandelt werden sollte. Das ist - insbesondere nach den Verzögerungen im r³-Projektlauf - aus Gründen des Bauablaufs und der vordringlichen Pflicht zur Deponieabdichtung nicht möglich. Stattdessen sollte stellvertretend für Aschen auf Monodeponien untersucht werden, ob es generell möglich und sinnvoll ist, bereits seit mehreren Jahren eingelagerte Asche wieder auszubauen, um Eisenmetalle (Fe-Metalle) und Nichteisenmetalle (NE-Metalle) zurückzugewinnen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bei Beantragung des Projekts war geplant, dass die TARTECH-Anlage nach dem Betrieb auf der Deponie Damsdorf umgesetzt wird und neben der Deponie Schöneicher Plan aufgebaut wird. Rund 40.000 Mg HMVA verschiedener Einlagerungszeiten sollten dann in dieser Anlage aufbereitet werden.

Aufgrund der im Gesamtbericht dargestellten Entwicklungen entschied sich TARTECH, den Versuch in einer in Wiesbaden ohnehin errichteten Anlage durchzuführen. Bis zur Inbetriebnahme der Anlage entstand eine Verzögerung gegenüber der beantragten Projektplanung. Aufgrund des weiten Transportweges von der Deponie Schöneicher Plan nach Wiesbaden wurde das Versuchskonzept geändert. Es erschien nicht vertretbar, derartige Mengen HMVA so weit zu transportieren. Der Behandlungsversuch wurde auf bereits vorentschröttete HMVA, eingelagert in der Zeit ab 2009, beschränkt. Die für repräsentative Ergebnisse erforderliche Menge wurde mit etwa 500 Mg bestimmt. Tatsächlich im Versuch behandelt wurden 534,38 Mg HMVA.

Die Behandlung der 534 Mg HMVA erfolgte am 18.12.2014. Im Verlauf des Versuchs entnahm die beauftragte Fa. SGS Institut Fresenius Proben aus dem HMVA-Input sowie aus allen Output-Fractionen um die Qualitäten zu bestimmen und daraus den Erfolg der Behandlung bemessen zu können.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Durch die während der Einlagerungszeit entstehenden Verbackungen zwischen Metallen und mineralischen Partikeln gilt die Abscheidung von Metallen aus bereits abgelagerter HMVA als schwierig. Die abgetrennten Metallfraktionen enthalten derartig hohe Anteile an Verunreinigungen, dass auf dem Markt dafür nur deutlich reduzierte Preise erzielt werden können.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Nur mit den Projektpartnern und mit dem Auftragnehmer SGS Institut Fresenius

II. Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Ergebnisse des Aufbereitungsversuch in Wiesbaden

Aus einer Untersuchung der HMVA aus dem MHKW-Ruhleben vom Mai 2011 ist bekannt, dass mit der Abtrennungstechnik der BSR etwa folgende Abscheideraten erreicht wurden:

Tabelle 1. Anteile unterschiedlicher Bestandteile in Rohasche und in Ruhleben behandelte Asche [1]

Fraktion	Rohasche [%]	Behandelte Asche [%]
Fe-Metalle	6,57	1,05
Spulen	0,18	-
magnetisierbare Stoffe	5,76	5,02
Aluminium	0,38	0,01
sonstige NE-Metalle	0,56	0,30
Edelstahl	0,21	0,24
Mineralik	86,34	93,37
Summe	100	100

Die im Rahmen des Projektes durch die TARTECH in Wiesbaden behandelte HMVA wurde mit der gleichen Technik behandelt, die auch im Rahmen dieser Untersuchung angewendet wurde. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass in etwa gleiche Abscheideraten erreicht wurden, bevor die HMVA auf der Deponie Schöneicher Plan abgelagert wurde. Die durch SGS Fresenius im Asche-Input für den Versuch in Wiesbaden ermittelten Gehalte sind aus der Anlage 2 ersichtlich. Die bei TARTECH in Wiesbaden erzielten Abscheideraten sind in Tabelle 2 zusammengestellt (s. auch Anlage 1). Die Eisengehalte sind vergleichsweise gering, da es sich um eine bereits von Metallen entfrachtete HMVA handelte. Der Gehalt der NE-Metallfraktion ist mit 0,94 % (Summe aller drei Korngrößen) jedoch noch beachtlich hoch. Allerdings sind die Verunreinigungen in den einzelnen Fraktionen z.T. ebenfalls sehr hoch, insbesondere in der Fraktion NE (2-5mm) mit einem mineralischen Anteil von 63 % (vgl. Tabelle 3). Die von TARTECH ermittelten Abscheideraten beziehen sich auf die Gesamtfraktion inklusive mineralischer Verschmutzungen. Deshalb müssen die einzelnen Fraktionen mit dem von Fresenius ermittelten tatsächlichen Metallgehalten verrechnet werden [3], um die tatsächliche Ausbeute an Metallen zu ermitteln (s. auch Anlage 2). Nach Fresenius sind die Gehalte an Fe- und NE-Metallen im Ausgangsmaterial 0,53 bzw. 0,58 %. In der HMVA-Probe nach der Aufbereitung wurden für NE- und Fe-Metalle Gehalte von jeweils 0,19 % ermittelt. Damit liegt die Abscheidung für Fe-Metalle bei 64 % und für NE-Metalle bei 67 %.

Tabelle 2. Massenbilanz bereits behandelter und abgelagerter HMVA von der Deponie Schöneicher Plan nach der Aufbereitung in Wiesbaden[2]

Fraktion	Abgetrennte Masse [kg]	Relativer Anteil [%]
FE – grob	60	0.01
FE - fein	220	0.04
Oxide (2-5mm)	17020	3.18
Oxide (5-18mm)	12800	2.40
Oxide (18-60mm)	1100	0.21
NE (2-5mm)	900	0.17
NE(5-18mm)	2760	0.52
NE (18–60mm)	1380	0.26
Edelstahl (> 60mm)	380	0.07
unverbranntes (> 60)	70	0.01
Mineralik	497690	93.13
Summe	534380	100

Tabelle 3. Bestimmung der Metallgehalte in den drei NE- und zwei FE-Fractionen aus der Aufbereitung in Wiesbaden [3]

Probe	NE 2-5mm	NE 5-18mm	NE 18-60mm	FE fein	FE grob
Eisen	0.4%	1.1%	4.6%	92.0%	91.1%
Stahl	1.4%	3.4%	6.3%	0.0%	0.0%
NE-Metall	35.0%	51.3%	61.8%	0.1%	1.1%
Schlacke	63.2%	44.2%	27.4%	7.8%	7.8%
Summe	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Verglichen mit den Aufbereitungsergebnissen frischer HMVA der Stadtreinigung Hamburg (lediglich gealtert nach LAGA M20) in der gleichen TARTECH-Anlage, ergeben sich deutlich geringere Reinheiten der metallischen Fraktionen.

b. Beurteilung der Verwertbarkeit der mineralischen Fraktion

Die chemische Untersuchung der Eluate der verbliebenen mineralischen Fraktion nach der Aufbereitung in der TARTECH-Anlage ergab, dass die Zuordnungswerte der Deponieverordnung eingehalten wurden. Damit ist die Verwertung der HMVA für den Deponieabschluss auch nach der Behandlung in der TARTECH-Anlage möglich (s. Anlage 2, Schlacke Output nach Deponieverordnung).

Die Ermittlung der Kornsummenkurve nach DIN 18 123 des Outputs derselben mineralischen Fraktion ergab, dass die Korngrößenverteilung durch die Behandlung nicht nachteilig verändert wurde. Damit wäre die Verwertung der mineralischen Fraktion nach der Behandlung mit der TARTECH-Anlage auch in der gasgängigen Trag- und Ausgleichsschicht möglich (s. Anlage 2, Siebkurven).

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größten Posten der Abrechnung der BSR sind die Fremdleistung durch SGS Fresenius für Probenahmen und Analysen. Hinzu kommen die Personaleinzelkosten, zum einen für die Kraftfahrer für den Ausbau, die Zerkleinerung und die Verladung der HMVA und zum anderen für die Projektleitung für die Versuchsbegleitung und Auswertung der Ergebnisse.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeit der BSR bestand aus

- dem Ausbau der Asche aus dem Deponiekörper und der Zerkleinerung der verbackten größeren Brocken durch Überfahung mit der Raupe sowie die Verladung auf die vom Partner TARTECH bereitgestellten Transportfahrzeuge,
- der Begleitung der Aufbereitung der HMVA durch einen Ingenieur in Wiesbaden,
- der Beauftragung des Instituts SGS Fresenius mit Probenahmen und Untersuchungen des Eingangsmaterials, der abgeschiedenen Wertstofffraktionen sowie der verbliebenen mineralischen Fraktion,
- der Annahme und dem Wiedereinbau der behandelten Asche, da die Verwertung vor Ort nicht möglich war und
- der Teilnahme des Projektleiters an den Arbeitstreffen mit dem PTJ.

Alle Arbeiten waren unbedingt erforderlich, um die dargestellten Ergebnisse zu erzielen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die Verzögerungen im Projektablauf wurde ein erheblicher Teil der HMVA auf der Deponie Schöneicher Plan bereits verbaut oder überbaut. Die Ergebnisse haben daher keine Relevanz mehr in Bezug auf eine etwaige Nachbehandlung der dort abgelagerten HMVA. Da die Abscheidung aus der bereits über Jahre gelagerten HMVA mit geringen Reinheiten einhergeht, hat die BSR die Anstrengungen erhöht, die Abscheidung aus der frischen Asche weiter zu verbessern. Dies geschah durch einen weiteren Ausbau der bestehenden Metallabscheidungsanlage und soll zukünftig durch weitere Veränderungen fortgesetzt werden.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Seitens der BSR wurden keine wissenschaftlichen Interessen verfolgt.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Anschlussuntersuchungen sind bei der BSR aufgrund oben vorgestellter Ergebnisse nicht vorgesehen.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Projekte oder Veröffentlichungen, die sich gezielt mit der Aufbereitung bereits abgelagerter HMVA beschäftigen, sind nicht bekannt.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

Durch die BSR wurden weder eigene Veröffentlichungen erstellt noch Vorträge gehalten. Es gab lediglich Zuarbeiten zu Vorträgen für das Gesamtprojekt durch die Projektkoordination.

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Keine

6.2 Geplante Veröffentlichungen

Keine

Quellen

- [1] Kanthak & Adam, Gutachten für BSR vom 23.05.2011
- [2] Massenbilanz der Fa. TARTECH für den Aufbereitungsversuch am 17. und 18.12.2014 in Wiesbaden.
- [3] SGS Fresenius, Probenahme und Analytik von 500 t MV-Schlacke vom Input und Output einer Schlackeaufbereitungsanlage in Wiesbaden, 26.01.2015

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 G

Verbundvorhaben:

ATR Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt G: Enzymatische Verfahren

ausführende Stelle:
SpiCon GmbH

Projektleiter: Dr. Thorsten Spirgath

Autor und Projektwissenschaftler: Dr. Michael Siegfried Quednau

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015, kostenneutral verlängert bis 31.12.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung.....	3
1. Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	3
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
II. Eingehende Darstellung	5
1 Resultate des Forschungsvorhabens	5
a. Versuchsdurchführung	5
b. Ergebnisse	5
c. Bilanzierung	6
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	6
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	7
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	7
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende .	7
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	7
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen.....	7
6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	7
6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen.....	7
6.2 Geplante Veröffentlichungen	7

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die Zielsetzung des Arbeitspaketes der Spicon GmbH war die biogene Extraktion von Metallen (i.e. Cu) durch Ganzzellverfahren. Ein Gebrauch ausgewählter Mikroorganismen, ausgestattet mit den gewünschten Enzymen, ist nach heutigem Stand der Technik preisgünstiger als eine konventionelle Extraktion.

Zudem sollten alle technischen, physikalischen und chemischen Parameter beschrieben und auf Optimierungsmöglichkeiten hin abgeschätzt werden. Mittels geeigneter Zeitreihenmessungen sollten die Wechselwirkungen zwischen den Enzymen und den metallhaltigen Ausgangssubstanzen, die Bildungsgeschwindigkeit und die Beständigkeit bzw. Störanfälligkeit der Synthese untersucht werden.

Alle Untersuchungen unterlagen den Kriterien wissenschaftlicher sowie wirtschaftlicher Erfolgsaussichten sowie Anschlussfähigkeit.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bislang wird die mikrobielle Austragung von metallischen Komponenten im Bergbau durch Biomining großtechnisch zur Extraktion von Au, Co, Cu, Ni und U eingesetzt. Durch eigene Experimente im Labormaßstab konnten aus Schlämmen der Galvanikindustrie drei metallische Wertstoffe selektiv extrahiert sowie angereichert werden. Ersten und vorläufigen Kalkulationen zufolge deuteten sich gegenüber konventionellen Techniken günstigere Bilanzierungen an.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Es wurden Experimente zur enzymatischen Extraktion und Anreicherung von Metallen (Bioleaching) von der Fa. Spicon GmbH durchgeführt. Aufbauend auf den eigenen Vorarbeiten wurde eine Methodik für die Behandlung von MVA-Schlacken mit Hilfe folgender Arbeitsschritte entwickelt:

- Entwurf der Versuchsanordnung zur gezielten Extraktion der Metalle,
- selektive Ausfällung von Metallen,
- Auswertung des Datenmaterials,
- Modellierung von Stoffflüssen und
- Energiebilanzen betreffs Erweiterung des geplanten Anwendungsbereichs.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Verschiedene Forschungsarbeiten haben bereits untersucht, inwieweit Verfahren der Biotechnologie ausgenutzt werden können, um Wertstoffe wie z. B. Metalle in die geeigneten Wirtschaftskreisläufe zurückzuführen. Dabei wurden Verfahren der Biohydrometallurgie, auch als Bioleaching oder Biooxidation bezeichnet, angewendet. Bioleaching wird definiert als die Lösung von Metallen aus ihren mineralischen Quellen mit Hilfe natürlich vorkommender Mikroorganismen oder als der Gebrauch von Mikroorganismen um Elemente zu transformieren, so dass diese aus dem Material extrahiert werden können. So bieten eine Vielzahl

sehr unterschiedlicher Mikroorganismen aufgrund ihrer Stoffwechselforgänge Affinitäten mit präziser Selektivität zu bestimmten Metallen. Beispielsweise werden *Acidithiobacillus ferrooxidans* und *Acidithiobacillus thiooxidans* erfolgreich zur Gewinnung von Cu und Zn eingesetzt. Hierbei katalysieren Enzyme/Proteine Redoxprozesse, die als Produkte u. a. durch Biotransformation Metalle synthetisieren. Diese Vorgänge, z. B. Biohydrometallurgie, werden bereits im Bergbau wirtschaftlich erfolgreich bei der Gewinnung von Au, Cu, Ni, U und Zn angewendet und werden auch als Biomining bezeichnet.

Die Mitarbeiter der Fa. Spicon haben im Rahmen der Rückführung von NE-Metallen aus Galvanik-Schlamm ein kombiniertes Verfahren, welches verfahrenstechnisch Bioleaching, Biooxidation und die außenstromlose bioelektrochemische Abscheidung der NE-Metalle kombiniert, entwickelt. Dabei wurden für diese Matrix biokatalytische Reaktionskinetiken optimiert, z. B. nachgeschalteter Enzymeinsatz. Daneben wurde ein Verfahrensschritt entwickelt, der eine gleichzeitige Abscheidung sowie die Beschichtung einer Kunststoffoberfläche mit Kupfer ermöglicht. Eine mikroskopische Untersuchung zeigte eine durchgängige, fehlerlose Beschichtung der Kunststoffoberfläche. Weiterhin wurden Verfahren zur selektiven Fixierung bestimmter Metalle aus Mehrstoffsystemen untersucht. Hierzu wurden funktionalisierte, planar auskristallisierende, selbstorganisierende Proteingitter mit einer Auflösung bis hin zur nm-Skala mit exakten geometrischer Strukturierung eingesetzt. Mittels der eingesetzten Biotemplate ließen sich über Redoxprozesse u. a. Au-Nanopartikel organisiert in räumlichen Strukturen herstellen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Ausgangsmaterial für die durchgeführten Untersuchungen wurde vom Projektpartner BSR gewonnen und zur Verfügung gestellt.

Weiterhin wurden die technischen Parameter der TARTECH Aufpralltechnik auf Schnittstellen berücksichtigt, d.h. inwieweit die Feinstfraktion durch ein Andocken der Biomining wirtschaftlich zur Erhöhung der Wertschöpfungskette beiträgt.

An externer indirekter Zusammenarbeit wurden Daten der BGR (Bundeanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) sowie der TU Berlin bei der Modellierung berücksichtigt und durch Expertengespräche begleitet.

II. Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Versuchsdurchführung

Die experimentellen Arbeiten orientierten sich an den innerhalb der Geobiotechnologie eingesetzten Techniken. Als Geräteausstattung erweist sich gegenüber einer Haufenlaugung im Labormaßstab der Einsatz eines Bioreaktors zur enzymatisch gesteuerten Prozesskette zur Gewinnung von Cu als vorteilhafter.

Alle eingesetzten, auf biologischen Methoden beruhenden Vorgehensweisen, verzichteten auf pathogene oder gentechnisch veränderten Mikroorganismen, die ansonsten häufig in Laborversuchen eingesetzt werden und mit denen erfolgreiche selektive Extraktions- und Konzentrationsraten erzielt werden können.

Ohne Ausnahme stützen sich alle Prozessschritte, im Gegensatz zu bislang vorliegenden Informationen, ausschließlich auf biologische Reaktionssequenzen:

1. Vorbereitend wird in einem ersten Schritt mittels der Mikroorganismen und sekretierter Säuren das in der Asche befindliche Cu als Cu-Komplex in Lösung überführt, d.h. es erfolgt eine biogene Produktion der Ausgangsstoffe.
2. Eine selektive Extraktion von Cu kann durch Unterschiede im elektrochemischen Verhalten ausgenutzt werden. Hierzu kommt das Ganzzellverfahren in Betracht, da Mikroorganismen gegenüber Cu evolutionsbedingt eine spezielle Affinität gegenüber positiv geladenen Metallkationen und somit elektrochemisches Potentialgefälle mit dem Resultat der Erzeugung eines elektrischen Stromes, entwickelt haben, d.h. eine biogene Bereitstellung der erforderlichen Energieeingabe.
3. In einem dritten Schritt überführen geeignete isolierte Enzyme über Redoxreaktionen die in Lösung befindliche Cu^{2+} -Spezifikation in elementares Cu durch enzymatisch implementierte Biokatalyse. Die Enzyme selbst können wiederum mikrobiell synthetisiert werden und sukzessive in den Verfahrensablauf eingetragen werden.

b. Ergebnisse

Als verkaufsfähiges Produkt entsteht CuCl_2 . Die biogenen Extraktionstechniken und enzymatischen Katalysen offenbaren einen sehr hohen Selektions- und somit Ausbringungsgrad, d.h. es konnten nahezu 60 % des ursprünglich in der Schlacke befindlichen Cu ausgebracht werden. Das am Ende stehende Cu-haltige Produkt weist nur geringe Verunreinigungen durch Zn, Al, Na und Ca auf. Alle genannten Metalle sind Hauptbestandteile der Aschen. Ein weiterer Nebeneffekt der Arbeiten ist, durch die Extraktion von Cu sowie Cl mögliche toxischer Effekte seitens der Aschen zu verringern.

Zwecks rechnergestützter Arbeiten zur Evaluation und Modellierung der Stoffströme erwiesen sich Zeitreihenmessungen, Boole'sche Algebra sowie Methoden der ANOVA als geeignet. Ein vorausgegangenes Design of Experiments (DOE) verhalf zu einer erheblichen Zeit- und somit Kostenersparnis. Die Analytik erfasste unbehandelte Asche, Laugungsfluid, Eluat, Konzentrat sowie gelaugtes Probenmaterial. Die hieraus resultierende Datenbasis liefert zu Vergleichszwecken sowie Modellierung belastbare Aussagen. Die gewählte gerätetechnische Analytik erwies sich als brauchbar. Die Feststoffphase wurde via RDA ermittelt, der Chemismus mit RFA und ICP. Die gewählte Präparation des Probenmaterials, d.h. Trocknung nach DIN 18121-1, Siebung nach DIN 18123, genügt den sukzessiven Ansprüchen an statistischer Aussagekraft.

c. Bilanzierung

Das Ganzzellverfahren inkl. des betroffenen Enzyms erweist sich zeitlich langsamer als der Einsatz der in Frage kommenden isolierten Enzyme. Auch sind beim ersten Verfahren die Abfallströme umfangreicher. Im Experiment wurden als den Gesamtprozess beeinflussende Kenn- und Einflussgrößen für die experimentellen Laborarbeiten Korngröße, pH-Wert, Zeit sowie Art des Substrats ermittelt. Die vorausgehende Modellierung und der darauf beruhende sukzessive experimentelle Aufbau sowie die Bestimmung der optimalen Produktionsbedingungen stimmen in ihren Ergebnissen weitgehend überein und gestatten Einflussgrößen gezielt zu identifizieren und entsprechend zu regulieren.

Die Kalkulationen zum Energieaufwand, der Massenströme wie z.B. der Menge der biologischen Komponenten und der Reststoffe in Form von Feststoff- und Fluidphasen, ergeben den Trend einer verbesserten Bilanzierung, durch z.B. den nahezu vollständigen Wegfall externer Energieversorgung und die einfache Handhabung der Abfallstoffe, da diese biologisch unbedenklich sind, d.h. keine toxikologische Effekte auslösen bzw. als Nebenprodukte ebenfalls verwertbar sind, z.B. als aufgereinigter Quarzsand.

Aufgrund der Ergebnisse ergeben sich durch die Resultate weiterführende Fragen nach Mobilitätsmechanismen, großtechnisches Down-Stream-Processing, Up-scaling der laborbezogenen Versuchsanordnung sowie Maßnahmen der Qualitätskontrolle, z.B. nach DIN EN ISO 9001 oder DIN EN ISO 50001 (Energiemanagementsysteme).

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Arbeiten stützen sich auf vom Unternehmen entwickelten Techniken, die an die Bedingungen und Zielsetzungen des Vorhabens angepasst und optimiert werden. Hierzu sind speziell die organischen und anorganischen Komponenten und deren Wechselwirkungen aufeinander abzustimmen.

Personalkosten: € 40.905,02; Verbrauchsmittel: € 1.909,67 (Laborchemikalien, Geschäftsbedarf); Reisen: € 95,87 (Verbundtreffen); Analytik 2.100,-; Gesamt: € 45.010,56

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bislang liegen keine über Laborversuche hinausgehende Daten zur biogenen selektiven Generierung metallischer Phasen vor. Dies ist, im unternehmerischen Sinne, eine Grundvoraussetzung für die Schaffung von kommerziell verwertbaren Wertschöpfungsketten.

Bei Arbeiten mit biologischen Stoffen mussten bestimmte Vorkehrungen zum Arbeitsschutz getroffen werden. Es wurden daher technische Rahmenbedingungen geschaffen, die Sicherheit und Arbeitsschutz gewährleisten.

Weiterhin erforderten die biologischen Arbeiten aufgrund des Zeitbedarfs der biologischen Transformationsprozesse und Umsatzraten einen wesentlich höheren Zeitrahmen, als dies vergleichsweise bei konventionellen Prozessen der Fall ist.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Beitrag zur Schaffung neuer Märkte
- Innovative Dienst-/Beratungsleistung für Unternehmen auf dem Gebiet der Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen und somit Verbesserung der Wettbewerbssituation mit damit verbundener höherer Umsatzleistung
- Beitrag zur Effizienzsteigerung der Wertschöpfungskette auf dem Gebiete der Rückführung von Sekundärrohstoffen in geeignete Wirtschaftskreisläufe
- Nutzen der Technik für spezielle Anwendergruppen, z.B. Recyclingindustrie auf dem Gebiet metallhaltiger Schlämme
- Funktionale Vorteile gegenüber bislang eingesetzten Techniken zur Extraktion von Metallen aus geeigneten Reststoffen

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Schaffung von technischem Wissen zur Erhaltung und Steigerung der unternehmensbezogenen Kompetenzen

- Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Wissenschaftliche Schnittstellen zu Studien des Biofouling/-korrosion
- F&E-Aktivitäten zur Rückführung von metallischen Wertstoffen aus Elektronikschrott und Bergbauhalden möglich
- Eine technische Anschlussmöglichkeit wird im Bereich Recycling in Form eines Komplementärs erwartet, i.e. Kooperation mit anderen Unternehmen unter Anbietung eines für das betroffenen Unternehmen wichtigen „Know-how“, das zur Verringerung von Abfallströmen und somit zu einer Kostenreduzierung bei der Entsorgung von metallführenden Reststoffen führen kann.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Es kann aufgrund der generierten Daten eine Anfrage seitens eines Recyclingbetriebes aufgenommen und verhandelt werden.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

keine

6.2 Geplante Veröffentlichungen

“Bioprocessing of saleable copper chloride recovered from ashes of incineration plants.”

Schlussbericht

**BMBF-Forschungsvorhaben
Förderkennzeichen 033R086 H**

Verbundvorhaben:

ATR

**Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung
von ressourcenrelevanten Metallen
aus Rückständen thermischer Prozesse
mit innovativen Verfahren**

Teilprojekt H:

**Aschen aus der Monoverbrennung und
metallurgischer Schlacken**

Teil: Metallurgische Schlacken

ausführende Stelle:

**UDE – Universität Duisburg-Essen - Fakultät für
Ingenieurwissenschaften – Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und
Stahlerzeugung**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

Autor und Projektwissenschaftler: Dominik Ebert

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015,

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung	4
1 Aufgabenstellung	4
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
II Eingehende Darstellung	6
1 Resultate des Forschungsvorhabens	6
a. Arbeitspaket 3 – Aschen aus der Monoverbrennung von Elektronikschrott und metallurgische Schlacken	6
a.1. Teilbereich metallurgische Schlacken.....	6
a.1.1. Einleitung	6
a.1.2. Partikelgrößenverteilung der metallischen Fraktionen aus den Schlacken A und H.....	7
a.1.3. Bildanalytische Bestimmung des Metallanteils an metallographisch präparierten Proben	10
a.1.4. Untersuchungen der eingebetteten Proben am Rasterelektronenmikroskop mit EDX Analyse	13
a.1.5. Zusammenfassung.....	14
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	15
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungs-plans.....	16
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	16
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projekt-ende	16
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	16
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	17
6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge	17
6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	17
6.2 Geplante Veröffentlichungen.....	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Metallgranalien in einem Schlackepartikel	6
Abbildung 2: Metallische (links) und mineralische (rechts) Fraktion Probe A	8
Abbildung 3: Prozessablauf	8
Abbildung 4: Sieblinien der metallischen Fraktion der untersuchten Schlacken ...	9
Abbildung 5: Zusammengesetztes Bild einer Probe der Schlacke H.....	11
Abbildung 6: Freigeschnittene Probe	11
Abbildung 7: eingefärbte Probe	12
Abbildung 8: REM Aufnahme einer Probe der Schlacke H	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Metallanteile der untersuchten Proben.....	10
Tabelle 2: EDX Analysen ausgewählter Stellen	14

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Schlacken aus der Metallurgie enthalten ebenfalls Einschlüsse elementarer Metalle in Form kleinster Tröpfchen, die nicht mit klassischen mechanischen Trennverfahren vom mineralischen Anteil getrennt werden können. Die Universität Duisburg-Essen ermittelt im Rahmen des AP3 geeignete Schlacken aus der Stahl-, Edelstahl- und NE-Metallindustrie, die sich für eine Prallzerkleinerung nach der RoTAC-Technologie anbieten. Insbesondere die Schlacken aus der Edelstahl- und NE-Metallindustrie enthalten wertvolle Metalle wie Ni, Cu usw. Unter dem Aspekt des Recyclings ist es wichtig zu wissen, ob die Elemente als Oxide oder Metalle in der Schlacke vorliegen. Des Weiteren ist bekannt, dass sich die Zusammensetzungen von Schlacken in Abhängigkeit von der Korngröße ändern können. Vor diesem Hintergrund werden die Schlacken im Labormaßstab zerkleinert, klassiert und in den jeweiligen Fraktionen mit Hilfe der RFA analysiert. Im Weiteren werden die Schlacken lichtmikroskopisch untersucht, da man auf diese Weise sehr einfach die metallischen Anteile bestimmen und unter Umständen auch voneinander unterscheiden kann. Die auftretenden metallischen Phasen werden mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops bestimmt und ihre Anteile quantitativ bildanalytisch gemessen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Universität Duisburg-Essen verfügte über die für die Durchführung der Untersuchungen notwendigen Gerätschaften und über Kontakte zur Eisen- und Stahlindustrie. Somit konnten die erforderlichen Probenmaterialien beschafft und die Untersuchungen durchgeführt werden. Kenntnisse über den Metallgehalt des Probenmaterials lagen jedoch zu Beginn der Untersuchungen nicht vor. Jedoch konnte in Rücksprache mit dem Unternehmen bestätigt werden, dass die Zusammensetzung der untersuchten Metallgranalien in etwa der Analyse der erzeugten Schmelzen entspricht.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung dieses Metallinhaltes ist jedoch zu berücksichtigen, dass während der Projektlaufzeit die seit 2011 negative Preisentwicklung vieler, insbesondere metallischer, Wertstoffe anhielt.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das erforderliche Probenmaterial aus einem Stahlwerk und einer Gießerei konnte ohne Verzögerung beschafft werden. Die mechanischen Untersuchungsmethoden, wie die Zerkleinerung und magnetische Trennung

wurden erfolgreich durchgeführt. Auch die Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop waren erfolgreich. Die angestrebte Entwicklung einer bildanalytischen Methode konnte zwar grundsätzlich umgesetzt werden und wies in Bezug auf die analysierten Bilder durch die starke Vergrößerung von Auflichtmikroskopen eine hohe Genauigkeit auf, jedoch erwies sich der Aufwand aufgrund der notwendigen Probenanzahl als so hoch, dass eine solche Methode nur in Ausnahmefällen geeignet sein dürfte.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Metallurgische Schlacken aus der Eisen- und Stahlindustrie werden gezielt eingesetzt, um unerwünschte Elemente aus einer Metallschmelze zu entfernen. Durch mechanische Einflüsse wie Spühl- oder Rührprozesse und unterschiedliche Techniken zur Entfernung der Schlacke nach Abschluss des Vorgangs, werden jedoch metallische Partikel mit in die Schlacke transportiert. In der gängigen Aufbereitungstechnik großer Stahlwerke werden gröbere metallische Bestandteile der Schlacke entfernt, wohingegen die Aufbereitung und Entsorgung von Schlacken in der überwiegend klein- und mittelständischen Gießereiindustrie in der Regel an externe Fachfirmen vergeben wird. Somit könnte diesen Unternehmen ein finanzieller Verlust entstehen, der durch eine gezieltere Aufbereitung und eine damit einhergehend verbesserte Ressourceneffizienz vermieden werden könnte.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurden der UDE in Zusammenarbeit mit der Friedrich Lohmann GmbH Schlackeproben aus dem Stahlwerk und der Gießerei zur Verfügung gestellt.

II Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. **Arbeitspaket 3 – Aschen aus der Monoverbrennung von Elektronikschrott und metallurgische Schlacken**

a.1. **Teilbereich metallurgische Schlacken**

a.1.1. **Einleitung**

In der Eisen-, Stahl- und Gießereiindustrie wird mit Schlacken metallurgisch gearbeitet, d.h. über den Kontakt zwischen flüssigen Schlacken und Metallschmelzen werden Elemente aus den entsprechenden Metallschmelzen entfernt und sehr häufig in Form von Oxiden und Sulfiden in den Schlacken abgebunden. In Abhängigkeit von den jeweiligen Prozessen (Spül- und Rührvorgänge usw.) werden darüber hinaus aber auch in unterschiedlichem Ausmaß metallische Partikel in Form kleiner Granalien in die Schlacken transportiert (**Abbildung 1**). Außerdem werden in Abhängigkeit von den jeweiligen Verfahren bei den Trennvorgängen der flüssigen Schlacken von den Metallschmelzen metallische Bestandteile mit in die Schlacken gerissen. Metallische Bestandteile in der Schlacke stellen für die betreffenden Unternehmen materielle Verluste dar, die insbesondere bei legierten Werkstoffen eine erhebliche finanzielle Größenordnung annehmen können.

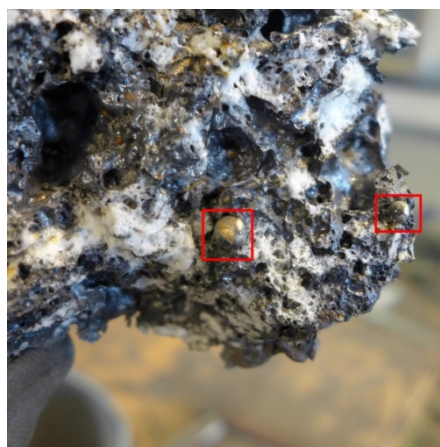


Abbildung 1: Metallgranalien in einem Schlackepartikel

Metallurgische Schlacken werden in der Regel von externen Unternehmen aufbereitet, wobei die gröberen metallischen Bestandteile aus der Schlacke entfernt werden. Aufgrund der größeren Schlackenmengen ist die Schlackenaufbereitung in der Stahlindustrie ein definierter Bestandteil des Prozesses. Demgegenüber ist die Aufbereitung von Schlacken in der überwiegend klein und mittelständisch strukturierten Gießereiindustrie bisher eher von sekundärer Bedeutung, da die Schlacken über Fachfirmen entsorgt werden.

Da sich in solchen Schlacken, je nach Prozess aber noch erhebliche Mengen an Metallen befinden können, sind mit der Entsorgung möglicherweise finanzielle Verluste für die Gießereien verbunden, die ihnen im Prinzip nicht wirklich bekannt sind. Vor diesem Hintergrund werden in dem vorliegenden Projekt metallurgische Schlacken aus überwiegend klein- und mittelständischen Eisen- und Stahlgießereien dahin gehend untersucht, in wieweit durch eine intensivere Aufbereitung die Wiedergewinnung der Metalle aus den Schlacken optimiert und damit die Ressourceneffizienz verbessert werden kann.

Die Schlacken werden bezüglich ihrer Metallinhalte in Menge, Korngröße und chemischer Zusammensetzung untersucht und charakterisiert, so dass auf der Basis dieser Erkenntnisse Abschätzungen möglich sind, bis zu welcher Korngröße eine Zerkleinerung der Schlacken notwendig ist, um die Metallausbeute unter wirtschaftlichen Bedingungen erhöhen zu können.

a.1.2. Partikelgrößenverteilung der metallischen Fraktionen aus den Schlacken A und H

In der vorliegenden Untersuchung wurden Schlacken aus Induktionstiegelöfen eines Stahlwerks (Probe H), in dem hochlegierte Spezialstähle hergestellt werden und Schlacken einer Stahlgießerei (Probe A) in einem Backenbrecher mit einem Spaltmaß von 20 mm gebrochen und anschließend gesiebt. Zum Einsatz kamen Siebe nach DIN 3310/1 mit Maschenweiten von 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm und 16 mm. Jede der entstandenen Fraktionen wurde durch Sichtprüfung von metallischen Partikeln befreit.

Im Weiteren wurde versucht, magnetische Partikel mittels starker Permanentmagneten abzutrennen. Da jedoch nicht alle metallischen Partikel infolge eines austenitischen Gefüge magnetisch waren und außerdem

magnetisches Eisenoxid in Form von Magnetit (Fe_3O_4) in den Proben existierte, wurde eine Magnetabscheidung als mögliches Trennverfahren verworfen.

Das restliche Material aller Korngrößen wurde im Backenbrecher auf ein Maß von 5 mm gebrochen, erneut gesiebt und anschließend erfolgte die Aussortierung der metallischen Partikel. Die daraus entstehende mineralische Fraktion ist klein genug, um in einer Kreuzschlagmühle zu feinem Pulver zermahlen zu werden.

Die noch in der mineralischen Fraktion (**Abbildung 2**) vorhandenen metallischen Partikel werden dabei nicht beschädigt und können im Anschluss ebenfalls abgeseibt werden.



Abbildung 2: Metallische (links) und mineralische (rechts) Fraktion Probe A

Dieses kaskadierte Verfahren ermöglicht eine nahezu vollständige Abtrennung der metallischen Partikel aus den untersuchten Schlacken und wird in **Abbildung 3** dargestellt.

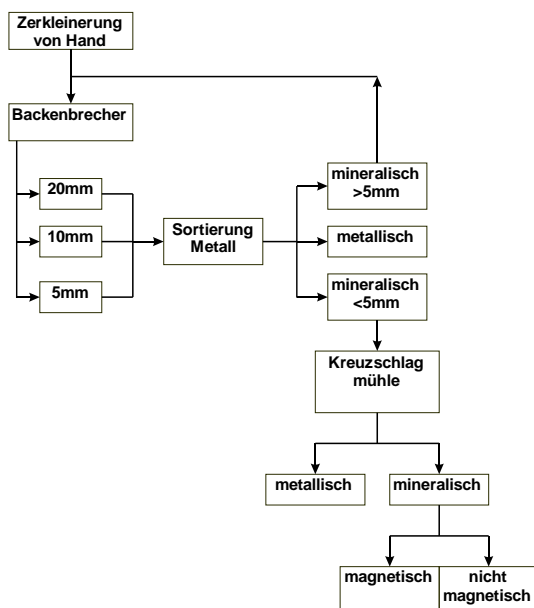


Abbildung 3: Prozessablauf

Von den metallischen Fraktionen der beiden Proben wurden die in **Abbildung 4** dargestellten Sieblinien (Maschenweiten 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 30 mm) aufgenommen.

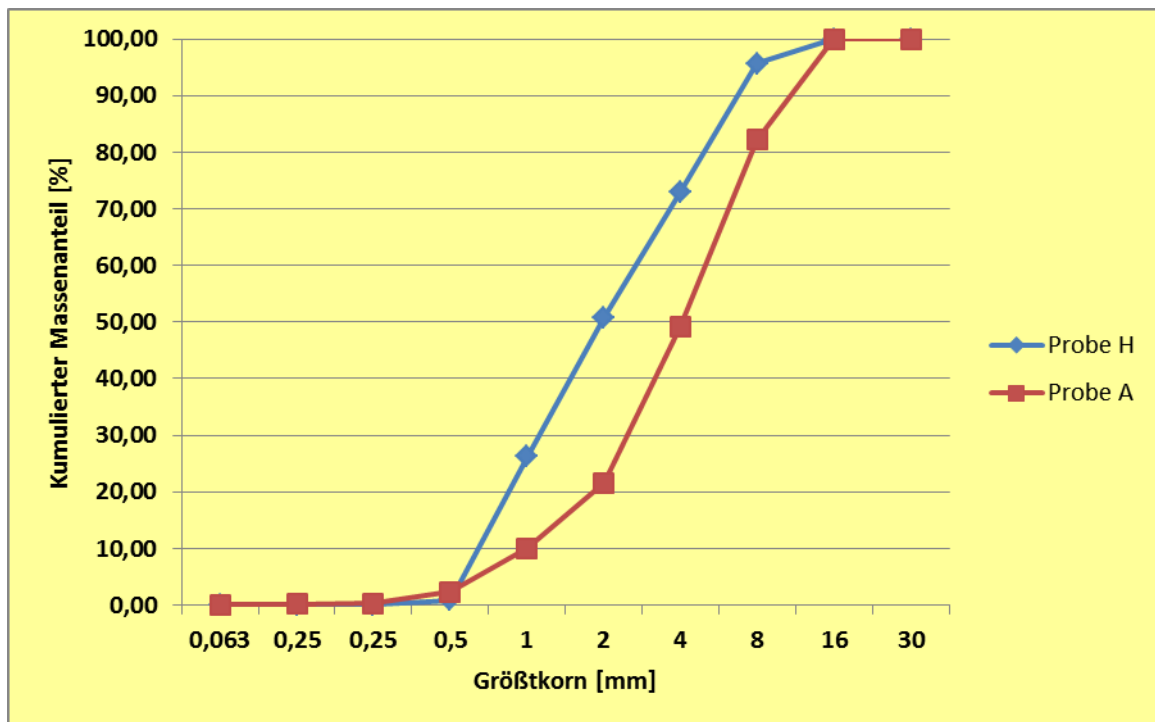


Abbildung 4: Sieblinien der metallischen Fraktion der untersuchten Schlacken

Beide Proben zeigen im Bereich kleiner 0,5 mm und größer 16 mm nur sehr geringe Mengen metallischer Partikel. In der Schlacke aus dem Stahlwerk (Probe H) entfallen auf diesen Bereich nur 0,88 Mass.-%, und in der Schlacke aus der Gießerei (Probe A) nur 2,3 Mass.-%.

Insgesamt betrug der Anteil der Metallmasse bezogen auf die Gesamteinwaage bei der Probe A 32,2 Mass.-%, bei der Probe H 12,1 Mass.-%.

Nach diesem Verfahren wurden insgesamt jeweils fünf Proben der Probe A und H mit einer Masse von ca. 1kg untersucht. Die Ergebnisse werden in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Metallanteile der untersuchten Proben

Probe	A	H
1	32,20%	12,10%
2	7,44%	49,25%
3	24,07%	22,82%
4	12,41%	19,47%
5	35,93%	25,17%
Mittel	22,41%	25,76%
SD	12,30%	14,02%
RSD	54,89%	54,44%

Der durchschnittliche Metallanteil der Schlacke A betrug demnach 22,4%, der der Probe H 25,8%. Die relative hohe relative Standardabweichung (RSD) von ca. 55% für beide Proben deutet jedoch auf eine für Schlacken typische hohe Inhomogenität hin. Um dieser Inhomogenität Rechnung zu tragen und präzisere Werte zu ermöglichen muss die Probenmasse wesentlich größer sein und würde somit den Rahmen dieses Teilvorhabens überschreiten.

a.1.3. Bildanalytische Bestimmung des Metallanteils an metallographisch präparierten Proben

Proben der beiden Schlacken wurden metallographisch präpariert und mittels eines Auflichtmikroskops untersucht. Um die metallischen Anteile im Schliffbild bestimmen zu können, wurde die gesamte Oberfläche einer jeweiligen Probe fotografiert und aus den 15 bis 25 Einzelbildern ein Gesamtbild der Probe zusammengesetzt. **Abbildung 5** zeigt exemplarisch eine solche zusammengesetzte Aufnahme.

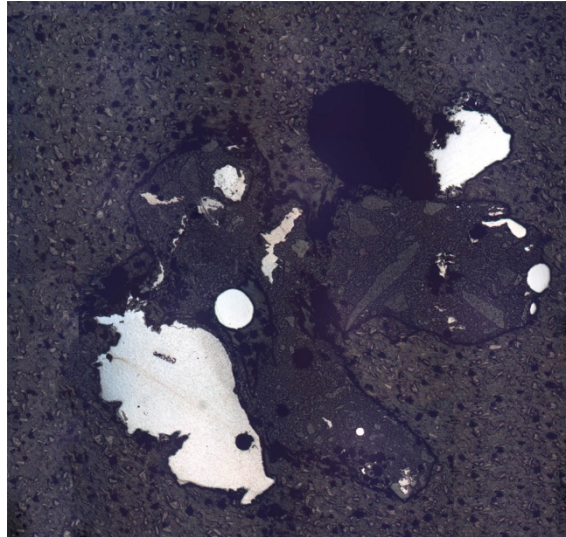


Abbildung 5: Zusammengesetztes Bild einer Probe der Schlacke H

Die grauen Bereiche im äußeren Bereich der Probe zeigen das Einbettmittel, während es sich bei den hellen Flächen um metallische Partikel handelt. Die Bereiche um die Metallpartikel herum, stellen die Schlacke dar.

Zur Bestimmung des Metallgehaltes in diesem Schliffbild wurde zunächst die eigentliche Probe freigeschnitten und der Bereich des Einbettmittels stark kontrastierend eingefärbt (**Abbildung 6**).

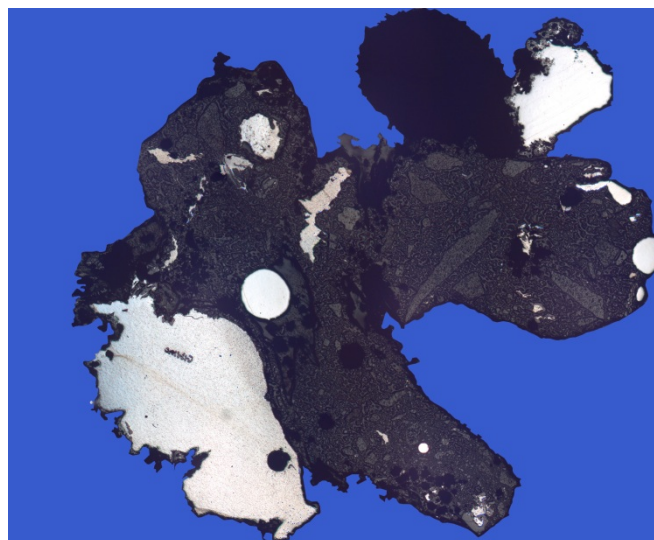


Abbildung 6: Freigeschnittene Probe

Das so vereinfachte Bild wurde mittels der Bildanalyse-Software Micr-O-Phase analysiert. Die Software basiert auf einer Schwellwertanalyse, die jedes Pixel des Bildes einfärbt, das in einem anpassbaren Bereich um einen Referenzpunkt im RGB-Farbraum, der ebenfalls vom Benutzer vorgegeben wird, liegt. Mit dieser

Methode können in diesem Fall alle hellgrauen, metallischen Flächen erfasst und eingefärbt werden (**Abbildung 7**).

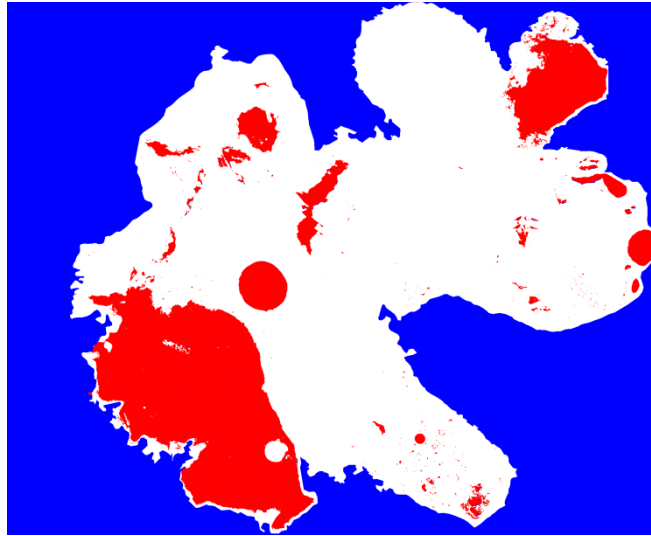


Abbildung 7: eingefärbte Probe

Darüber hinaus bietet die Software auch die Möglichkeit, das so eingefärbte Bild automatisch auf die Flächenanteile der verschiedenen Bereiche hin zu analysieren.

Für die vorliegende Probe der Schlacke H wurde auf diese Weise ein Flächenanteil der metallischen Partikel (rot eingefärbt) von 22,38% ermittelt.

Für weitere nach diesem Verfahren untersuchte Proben wurden jedoch stark abweichende Flächenanteile von 3,3%, bis 7,2% festgestellt. Die Ergebnisse der Probe A schwanken zwischen 2,7% und 27,4%.

Diese Methode bietet den Vorteil, dass zwar durch die starke Vergrößerung des Auflichtmikroskops sehr hohe Genauigkeiten erreicht, allerdings nur zufällig ausgewählte zweidimensionale Ausschnitte erfasst werden können. Die notwendige Menge an Proben, die vor dem Hintergrund statistisch signifikanter Aussagen untersucht werden muss, liegt demnach vermutlich so hoch, dass das entwickelte Untersuchungsverfahren nur in Ausnahmefällen, in denen eine mechanische Zerkleinerung unerwünscht oder unmöglich ist, geeignet ist.

a.1.4. Untersuchungen der eingebetteten Proben am Rasterelektronenmikroskop mit EDX Analyse

Die in Kapitel a.1.3 dargestellte Probe wurde mittels der EDX Analyse eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. **Abbildung 8** zeigt die Aufnahme einer Probe der Schlacke H mit der Lage der analysierten Bereiche (**Tabelle 1**).

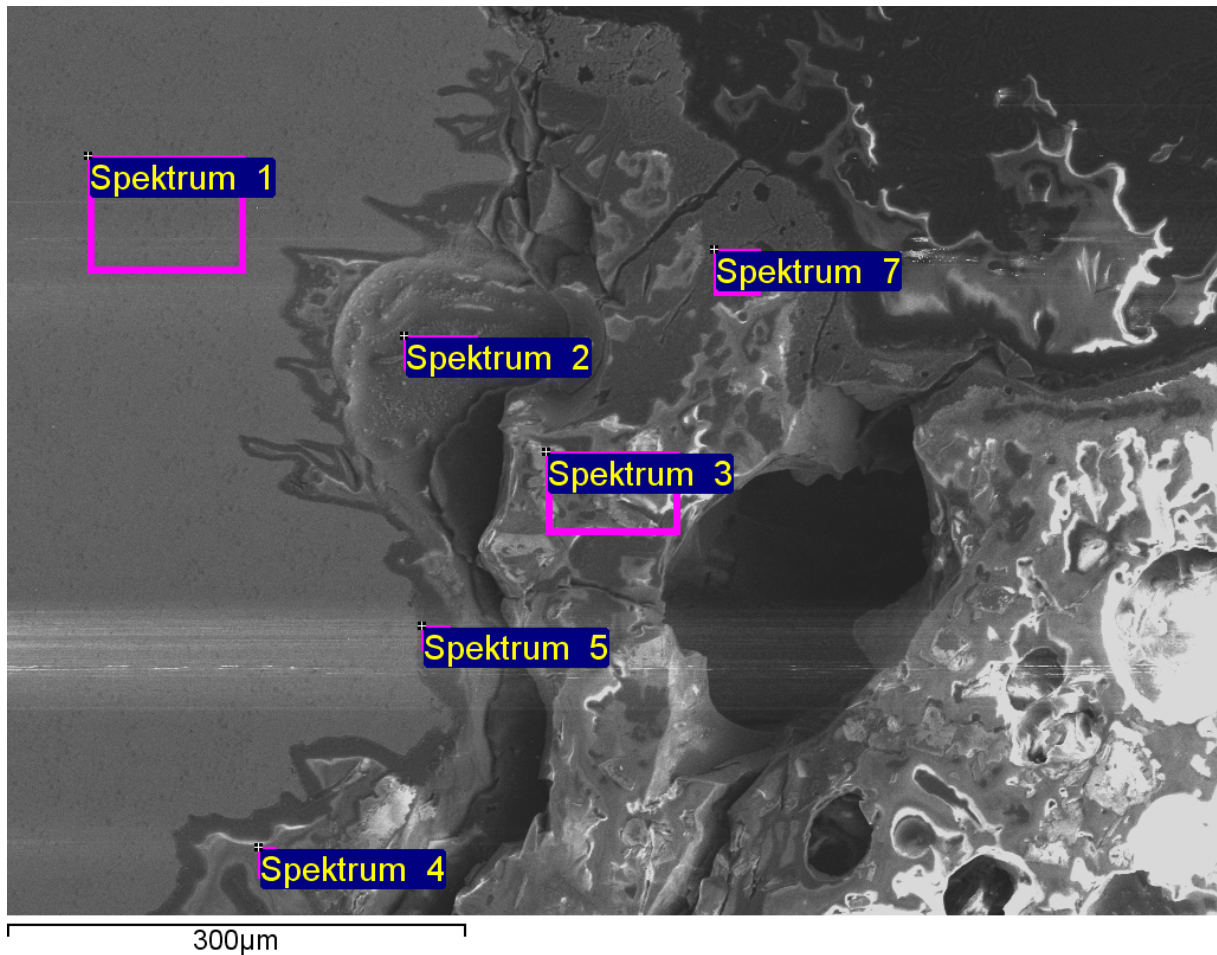


Abbildung 8: REM Aufnahme einer Probe der Schlacke H

Die gleichmäßige Fläche am linken Rand des Bildes (Spektrum 1) ist ein eingeschlossenes Metallpartikel. Dunkle Phasen, wie in der rechten oberen Ecke, entsprechen dem Einbettmittel, ein mit Graphitpartikeln versetzter Kunststoff. Die Bereiche der Spektren 2 bis 7 stellen Schlackenphasen dar.

Spektrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Summe
Spektrum 1	4,96					0,55		6,53	10,69		77,28	100,00
Spektrum 2	14,60	44,77		2,59	10,91	5,36	0,53	7,56	5,55	4,88	3,25	100,00
Spektrum 3	6,79	55,77		2,27	18,50	10,50	0,75		2,90	2,52		100,00
Spektrum 4		56,32	0,74	2,13	15,58	16,93	1,91		2,68	3,71		100,00
Spektrum 5		51,51	0,92	1,89	15,18	18,41	2,25	0,77	3,24	5,07	0,76	100,00
Spektrum 7		44,52	2,06	3,26	15,37	16,57	2,03	3,21	5,92	7,06		100,00

Tabelle 2: EDX Analysen ausgewählter Stellen

Die Analyse des metallischen Partikels (Spektrum 1) mit den hohen Chrom- und Vanadiumwerte zeigt, dass es sich bei diesem Stahl um einen entsprechend legierten Edelstahl handelt.

Die Analyse des Spektrum2 fällt durch relativ hohe Kohlenstoff-, Chrom- und Vandiumgehalte auf, so dass hier eventuell davon ausgegangen werden kann, dass Vandium- und Chromcarbide mit einer aluminiumreichen Schlacke vergesellschaftet vorliegen. Die restlichen Spektren zeigen überwiegend Schlackenphasen auf der Basis Al_2O_3 und SiO_2 mit variierenden Gehalten an MgO , MnO , CaO und Cr_2O_3 .

a.1.5. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der bisher vorliegenden Untersuchung zeigen, dass sich in den metallurgischen Schlacken Metallgranalien in Korngrößen von überwiegend 1 – 8 mm befinden. Durch eine entsprechend intensive Aufbereitung mit einem abschließenden Mahlvorgang lassen sich die metallischen Partikel sehr sauber von den mineralischen Schlackenphasen trennen. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Stahlwerkschlacke (Probe H) mit einem Metallgehalt in der Größenordnung von 25 % und in der Gießereischlacke (Probe A) mit einem Metallgehalt in der Größenordnung von 22% gerechnet werden kann. Im weiteren gilt es zu untersuchen, wie evtl. durch weitergehende Aufbereitungsverfahren die mineralischen Phasen in einem großtechnischen Prozess (z.B. Windsichtung) von dem Metallen getrennt werden können. Im Anschluss daran ist die Frage zu klären, ob unter Umständen auch die so gewonnenen Schlacken noch weiter verwertet werden können.

Die bildanalytische Untersuchung der Schlacken hat gezeigt, dass auf diese Weise die metallischen und mineralischen Phasen sehr gut getrennt voneinander

gemessen werden können. Die notwendige Menge an Proben, die vor dem Hintergrund statistisch signifikanter Aussagen untersucht werden muss, liegt demnach vermutlich so hoch, dass das entwickelte Untersuchungsverfahren nur in Ausnahmefällen, in denen eine mechanische Zerkleinerung unerwünscht oder unmöglich ist, geeignet ist.

Im Rahmen von REM-Untersuchungen deuten die Ergebnisse der EDX-Analysen darauf hin, dass die Metallgranalien im Wesentlichen der Zusammensetzung der Schmelze entsprechen. Im weiteren muss jetzt untersucht werden, in welcher Größenordnung evtl. mit Oxidationsverlusten beim Wiedereinschmelzen dieser Partikel zu rechnen ist. Auf der Basis dieser Daten lässt sich die Wirtschaftlichkeit des Recyclings der Schlacke durch die Gießerei selbst abschätzen. Darüber hinaus gilt es unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz zu untersuchen, in wie weit die mineralische Schlackenfraktion evtl. weiter verwertet werden kann.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position stellten die Personalmittel mit 25.817,60€ für wissenschaftliche Mitarbeiter und 3.692,91 € für studentische Hilfskräfte dar.

Darüber hinaus wurden 1.200€ für Aufträge an Dritte (externe Analysen) und 946,05€ für Material ausgegeben.

Zusammen mit einer Projektpauschale von 6.331,31€ ergibt sich eine Gesamtfördersumme von 37.987,87€

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie in Kapitel 2 dargestellt bestehen die Ausgaben nahezu vollständig aus Personalmitteln. Die Durchführung der dargestellten Arbeiten ist sehr zeitintensiv, so dass diese Verteilung der Mittel notwendig und angemessen ist. Die notwendigen Materialien und Geräte konnten nahezu vollständig durch die Grundausstattung des Lehrstuhls zur Verfügung gestellt werden, so dass sich die weiteren Ausgaben (externe Analysen, Material) in einem für Laborversuche sehr geringem Umfang bewegten und von einer Angemessenheit der Mittelverwendung ausgegangen werden kann.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Universität Duisburg-Essen verfolgt keine wirtschaftlichen Interessen. Eine genaue Kenntnis des Metallinhaltes von metallurgischen Schlacken könnte jedoch für Klein- und Mittelständische Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie in Zukunft von Interesse bei Verhandlungen mit Schlackeaufbereitern sein.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung dieses Metallinhaltes ist jedoch zu berücksichtigen, dass während der Projektlaufzeit die seit 2011 negative Preisentwicklung vieler, insbesondere metallischer, Wertstoffe anhielt.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Erfahrungen mit den untersuchten Schlacken und den dabei angewendeten Methoden sind für die Universität Duisburg-Essen bei der Entwicklung und Bearbeitung weiterer Projekte sehr hilfreich. Insbesondere die Erkenntnisse über die magnetischen Phasen im mineralischen Teil der Schlacken unterstützten die Antragsstellung eines Projektes im Programm r⁴ sowie eines Projektantrages bei der AiF zur Aufbereitung und Verwertung von HMVA in der Zementindustrie.

Die angestrebte Entwicklung einer bildanalytischen Methode mittels REM konnte grundsätzlich umgesetzt werden und wies in Bezug auf die analysierten Bilder durch die starke Vergrößerung von Auflichtmikroskopen eine hohe Genauigkeit auf. Allerdings erwies sich der Aufwand aufgrund der notwendigen Probenanzahl als so hoch, dass eine solche Methode nur in Ausnahmefällen geeignet sein dürfte.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Wie bereits in Kapitel 4.2 dargestellt kann die Universität Duisburg-Essen die in diesem Vorhaben gewonnenen Erfahrungen nutzen, um weitere Forschungsprojekte erfolgreich zu bearbeiten. Zwei bereits beantragte Projekte beschäftigen sich mit der zukünftigen Verwertung von oxidischen Reststoffen aus Hochtemperaturprozessen (Schmelzaggregate, bzw. HMVA). Diese Projekte betrachten sowohl das Recycling wirtschaftsstrategischer Rohstoffe als auch die Verwertung der mineralischen Fraktion vor dem Hintergrund der zu erwartenden Änderungen der rechtlichen Vorgaben bezüglich des Absatzes von HMVA auf bisherigem Weg.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Nach aktuellem Kenntnisstand sind keine Untersuchungen zur Ermittlung des Metallgehaltes metallurgischer Schlacken, insbesondere über optische Verfahren, bekannt.

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Deike, R., Ebert, D., Schubert, D., Ulum, R., Warnecke, R. und M. Vogell (2013), Reste in Schlacke und Asche – Beim Recycling von Metallen aus den Rückständen der Abfallverbrennung kommt es auf die Reinheit der Fraktionen an. ReSource 26(3): 24-30.

Deike, R., Ebert, D., Schubert, D., Ulum, R., Warnecke, R. und M. Vogell (2013), Metalle in HVM-Schlacke – Darstellung aktueller Abtrenngrade und Potenziale für ein wirtschaftliches und nachhaltiges Urban Mining. 16. ITAD Mitgliederversammlung, Düsseldorf, Präsentation.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

Keine weiteren geplant.

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R086 J

Verbundvorhaben:

ATR

Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren

Teilprojekt I:

Zink- und Blei-Rückgewinnung

ausführende Stelle:

**Ludwig-Maximilians-Universität München – Fakultät für Geowissenschaften – Department
für Geo- und Umweltwissenschaften – Sektion Mineralogie, Petrologie & Geochemie,
Theresienstraße 41, 80333 München**

Projektleiter: Prof. Dr. Karl Thomas Fehr/Dr. Amanda Günther

Autor und Projektwissenschaftler: Dr. Amanda Günther

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 - 30.06.2015, kostenneutral verlängert bis 31.10.2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R086J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	7
1 Aufgabenstellung	6
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	7
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
1 Resultate des Forschungsvorhabens.....	9
a. Methodischer Ansatz	9
a.1. Material	9
a.2. Versuchsdurchführung.....	10
a.2.1. Siebanalysen.....	10
a.2.2. Lasergranulometrie	10
a.2.3. Röntgenfluoreszenzanalyse RFA	10
a.2.4. Röntgenpulverdiffraktometrie XRD	10
a.2.5. Elektronenstrahlmikrosonde EMS.....	10
a.2.6. Rasterelektronenmikroskopie REM	11
a.2.7. Atomabsorptionsspektroskopie AAS	11
a.2.8. Elektrodynamische Fragmentierung EDF.....	11
a.2.9. Hydrothermalextraktion	13
a.2.10. Selektive Fällung von Pb und Zn	14
a.2.11. Numerische und hydrochemische Modellierung	14
b. Ergebnisse	15
b.1. Korngrößenverteilung	15
b.1.1. Korngrößenverteilung nach der Trockensiebung	15
b.1.2. Lasergranulometrie	16
b.2. Chemische Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Korngröße	18
b.3. Mineralogische Charakterisierung der Phasen	24
b.3.1. Röntgenpulverdiffraktometrie	24
b.3.2. Mikrosondenanalyse	25
b.3.3. Rasterelektronenmikroskop.....	32
b.4. Ergebnisse der Hydrothermalexperimente.....	33
b.4.1. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge.....	33
b.4.2. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Temperatur	36
b.4.3. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Zeit.....	39
b.5. Selektive Fällung von Pb und Zn.....	44
b.6. Charakterisierung der festen Rückstände.....	46
b.7. Numerische und hydrochemische Modellierung.....	48
c. Zusammenfassung.....	58
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	59
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	59
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	60
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	60
4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende	60
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	61
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	61

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge.....	61
6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen	61
6.2 Geplante Veröffentlichungen.....	61
Quellen	62

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: d_{50} und d_{90} -Werte für die Schlacken BSR, BSR_F, SC_MG und SC_MG_F.....	17
Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Schlacken SC, SC_F, SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F für die Fraktion <63 μ m.....	44
Tab. 3: Fällungs-pH von Metallhydroxiden (Blasius, 1995).....	45
Tab. 4: Parameter für die Ausgangsmodelllösung des Eluats.....	49
Tab. 5: Überblick der bewilligte Mittel.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.: a: Anlage zur elektrodynamischen Fragmentierung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen. b: Schematischer Aufbau der Fragmentierungsanlage (Quelle: Fraunhofer Institut für Bauphysik, IBP).....	12
Abb. 2: Elektrische Durchschlagfestigkeit verschiedener Substanzen in Abhängigkeit von der Pulsdauer. (Bluhm, et al., 2000)	12
Abb. 3: Makroskopische Zusammensetzung von MVA-Schlacke nach der elektrodynamischen Fragmentierung	13
Abb. 4: Schematische Darstellung des für die Hydrothermalexperimente genutzten Versuchsaufbaus.....	14
Abb. 5: Korngrößenverteilung der Schlacken SC, SC_MG, BSR, Tar nach der Trockensiebung	15
Abb. 6: Korngrößenverteilung der Schlacken SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F.....	16
Abb. 7: Verteilungsvolumen der Schlacken SC und SC_F.....	17
Abb. 8: Verteilungsvolumen der Schlacken SC_MG und SC_MG_F.....	18
Abb. 9: Verteilungsvolumen der Schlacken BSR und BSR_F	18
Abb. 10: Abhängigkeit der SiO ₂ -Konzentration von der Korngröße	19
Abb. 11: Abhängigkeit der CaO-Konzentration von der Korngröße	20

Abb. 12: Abhängigkeit der Fe ₂ O ₃ -Konzentration von der Korngröße	20
Abb. 13: Abhängigkeit der Al ₂ O ₃ -Konzentration von der Korngröße.....	21
Abb. 14: Abhängigkeit der Zn-Konzentration von der Korngröße	21
Abb. 15: Abhängigkeit der Pb-Konzentration von der Korngröße	22
Abb. 16: Abhängigkeit der Cl-Konzentration von der Korngröße	23
Abb. 17: Abhängigkeit der S-Konzentration von der Korngröße	23
Abb. 18: Röntgendiffraktogramm Schlacke SC_MG	24
Abb. 19: Rückstreuелектronenbild, Schlacke SC_MG.....	25
Abb. 20: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (20a), Ca (20b), Fe (20c), Mg (20d), Na (20e), S (20 f), Si (20g) und Zn (20h).....	26
Abb. 21: Rückstreuелектronenbild der Schlacke SC_MG	27
Abb. 22: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (22a), Ca (22b), Fe (22c), Mg (22d), Na (22e), Si (22f), S (22g) und K (22h).....	28
Abb. 23: Rückstreuелектronenbild der Schlacke SC_MG	29
Abb. 24: Elementverteilungsbilder der der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (24a), Ca (24b), Fe (24c), S (24d.), Si (24e) und Zn (24f).....	30
Abb. 25: Rückstreuелектronenbild der Probe SC_F.....	31
Abb. 26: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_F für die Elemente Ca (26a), Mg (26b), Si (26c) und Zn (26d)	31
Abb. 27: Rasterelektronenmikroskop-Rückstreuелектronenbild der Schlacke SC_MG.....	32
Abb. 28: Rasterelektronenmikroskop-Rückstreuелектronenbild der Schlacke SC_MG_F	33
Abb. 29: Konzentration von Pb und Zn der Schlacke SC, bei Verwendung von unverdünnter HCl und HNO ₃	33
Abb. 30: Eluierter Anteil von Pb in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge (Schlacke SC) 34	
Abb. 31: Eluierter Anteil von Zn in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge (Schlacke SC). 35	
Abb. 32: pH-Werte in Abhängigkeit von der Säureaddition (Schlacke SC)	35
Abb. 33: Eh-Werte in Abhängigkeit von der Säureaddition (Schlacke SC).....	36
Abb. 34: Eh-Werte in Abhängigkeit von pH-Werten (Schlacke SC).....	36
Abb. 35: Eluierter Anteil an Pb in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC, SC_MG und BSR	37
Abb. 36: Eluierter Anteil an Pb in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC_F, SC_MG_F und BSR_F.....	38
Abb. 37: Eluierter Anteil an Zn in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC, SC_MG und BSR	39
Abb. 38: Eluierter Anteil an Zn in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC_F, SC_MG_F und BSR_F.....	39
Abb. 39: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken SC und SC_F von der Zeit	40
Abb. 40: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken SC_MG und SC_MG_F von der Zeit	40

Abb. 41: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken BSR und BSR_F von der Zeit.....	41
Abb. 42: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb der Schlacken SC, SC_MG und BSR von der Zeit.....	42
Abb. 43: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb der Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F von der Zeit	42
Abb. 44: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Zn der Schlacken SC, SC_MG und BSR von der Zeit	43
Abb. 45: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Zn der Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F von der Zeit	43
Abb. 46: Titrationskurven von 15 ml H ₂ O + 1,5 ml HCl, BSR-Eluat.....	45
Abb. 47: Titrationskurven des Pb-freien Eluats	46
Abb. 48: Korngrößenverteilung der Schlacke SC_MG_F vor dem Hydrothermalexperiment, nach 45 min und 145 min Versuchsdauer.....	47
Abb. 49: a-c: Röntgendiffraktogramm der Schlacken SC_MG_F (49a), SC_MG_F_45 (49b), SC_MG_F_145 (49c)	48
Abb. 50: Speziesverteilung des bei niedrigen pH-Werten gelösten Zn	49
Abb. 51: Speziesverteilung des bei hohen pH-Werten gelösten Zn	50
Abb. 52: Speziesverteilung des bei niedrigen pH-Werten gelösten Pb	50
Abb. 53: Speziesverteilung des bei hohen pH-Werten gelösten Pb	51
Abb. 54: Speziesverteilung des bei mittleren bis basischen pH-Werten gelösten Pb	51
Abb. 55:a - f: Temperaturabhängigkeit des Sättigungsindex der Phasen Anglesit, Cerussit, Pb(OH) ₂ , Willemit, Smithsonit und Zn(OH) ₂	52
Abb. 56: a-f: Abhängigkeit des Sättigungsindex der Phasen Anglesit, Cerussit, Pb(OH) ₂ , Willemit, Smithsonit und Zn(OH) ₂ vom pH-Wert bei 50°C	53
Abb. 57: a-f: Prädominanzdiagramme für Zn unter Annahme verschiedener S-Spezies a-b → HSO ₄ ⁻ , c-d → SO ₄ ²⁻ , e-f → Al/CaSO ₄ ⁺	54
Abb. 58: a-f: Prädominanzdiagramme für Pb unter Annahme verschiedener P und C-Spezies	56

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Die Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse wird vor dem Hintergrund knapper werdender Rohstoffe immer wichtiger. Die Rückgewinnung von Eisen, Aluminium und Kupfer aus Aschen und Schlacken über marktverfügbare Trennverfahren, gilt als Stand der Technik. Bei der Rückgewinnung von NE-Metallen gibt es allerdings noch Verbesserungspotential. Durch das innovative Prallzerkleinerungsverfahren der Fa. Tarteck werden Verunreinigungen an metallischen Partikeln vollständig abgeschlagen. Feinste Metallpartikel können mit diesem Verfahren effizient abgetrennt werden. Das zerleinerte, von NE Metallen entfrachtete Material soll für die hydrothermale Extraktion von Blei und Zink verwendet werden. In der Projektstruktur ist die Hydrothermale Extraktion dem Arbeitspaket 5 zugeordnet. Ziel ist es mit hydrothormaler Extraktion einen möglichst hohen Anteil an Blei und Zink aus den Schlacken zu lösen und über Fällungsprozesse zurückzugewinnen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit den bisherigen konventionellen Techniken der Schlackeaufbereitung in Deutschland liegt der tatsächlich abgetrennten NE-Metall-Anteil der Schlacke bei 0,67%, wobei hier die Elemente Al, Cu, Zn, Cr und Ni betrachtet werden, dies entspricht etwa 34% der NE-Metalle (Alwast & Riemann, 2010). Mit Ausnahme von Al und Cu liegen die meisten anderen Elemente jedoch in nicht-metallischer Form vor und sind in Verbindungen, welche sich bevorzugt im Feinanteil von MVA-Schlacken befinden, eingebaut. Die Spezifizierung und die Mineralogie für die wenigsten Elemente sind bisher bekannt. Diese Elemente sind bei höheren pH-Werten löslich, wie sie MVA-Schlacken in Gegenwart von Wasser aufweisen, allerdings betragen die eluierbaren Anteile nur 1-3% des Gesamtanteils an den Metallen. Die Löslichkeit kann jedoch bei höheren Temperaturen unter hydrothermalen Bedingungen gesteigert werden. In der Natur führen diese Prozesse zur Anreicherung dieser Elemente und zur Bildung epithermaler Lagerstätten, wenn in Gegenwart von karbonatischen Anionen diese Metalle als Karbonate wieder ausgefällt werden, dies gilt insbesondere für Zn, Pb und Cu. Die karbonatischen Lagerstätten mit Smithsonit ($ZnCO_3$), Cerussit ($PbCO_3$) und Malachit ($Cu_2CO_3(OH)_2$) stehen im Fokus des Bergbaues weltweit.

In den Müllverbrennungsanlagen stehen je nach Bauart Restdampf mit Temperaturen von 80°C -130°C zur Verfügung. Außerdem fällt prozessbedingt und anlagenbedingt Salzsäure an. Es ist deshalb Ziel des Projektes, unter diesen hydrothermalen Bedingungen und dem Einsatz der anfallenden Salzsäure höhere Metallanteile aus dem Feinanteil von MVA-Schlacken zu eluieren und aus der mit Metallionen angereicherten Lösung die Metalle Pb und Zn auszufällen. Die Fällungsprodukte können dann einer Verhüttung zugeführt werden und führen dadurch zu einem geringeren Ressourcenbedarf, speziell der strategisch bedeutsamen Metalle. Durch die Verwendung von Restdampf entsteht eine positive Energiebilanz.

Zur Erreichung dieses Ziels ist die Kinetik von besonderer Bedeutung. Dazu müssen die Ratenkonstanten und ihre Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert ermittelt werden. Begleitend hierzu ist die Kenntnis der thermodynamischen Zustandsgleichungen notwendig.

Die Modellierungen basieren auf der Ermittlung der entsprechenden Lösungsgleichgewichte und –bedingungen der Speziierung der Elemente in den Schlackenphasen, die durch mikrochemische Analyse und quantitativen Elementverteilungsbildern mit der Elektronenstrahlmikrosonde bestimmt werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Untersuchungsmaterial sollte der mineralische Anteil von unterschiedlichen Schlacken sein, die über den Tartech-Prozess von Fe und NE-Metallen entfrachtet wurde. Fa. Tartech stellt eine entfrachtete Schlacke des EBS Karftwerkes E.ON –Energy from Waste – Heringen zur Verfügung. Weitere Schlacken konnten von Fa. Tartech nicht zur Verfügung gestellt werden. Die EBS-Schlacke wurde chemisch und mineralogisch charakterisiert. Es lagen keine Informationen darüber vor welches Material für diese Schlacke verbrannt wurde. Die analysierten Pb- und Zn-führenden Phasen wurden noch nie in Hausmüllverbrennungsschlacken beobachtet, daher wurden mit dieser Schlacke keine weiteren Versuche gemacht. Da die die Anlage der Fa. Tartech noch nicht betriebsbereit war, konnte kein weiteres Untersuchungsmaterial bereitgestellt werden. Deshalb wurden ab Januar 2013 Schlacken aus einer bayrischen Hausmüllverbrennungsanlage verwendet. Die Müllverbrennungsanlage verfügt über 4 Ofenlinien und hat einem Durchsatz von ca. 450.000 t pro Jahr. Ab Oktober 2013 stand zusätzlich eine MVA Schlacke der Berliner Stadtreinigung zur Verfügung. Die Schlacken wurden chemisch und mineralogisch charakterisiert und die hydrothermalen Lösungsexperimente bezüglich pH-Wert, Temperatur und Versuchsdauer optimiert. Da über den Tartech-Prozess kleinste metallische Teilchen, die in der mineralischen Fraktion einer MVA-Schlacke eingeschlossen sind frei gesetzt/geschlagen werden, erhöht sich durch den Tartech-Prozess der Feinanteil einer MVA-Schlacke. Auch die Anbackungen und Versinterungen, die während der Verbrennung entstehen, platzen von den metallischen Teilchen ab und erhöhen den Feinanteil zusätzlich. Da sich die Tartech-Anlage weiterhin im Aufbau befand und kein Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde zur Erhöhung des Feinanteils die elektrodynamische Fragmentierung eingesetzt. Über dieses Verfahren kann der Feinanteil einer MVA-Schlacke von 15% auf 70% angehoben werden. Die elektrodynamische Fragmentierung konnte im Mai 2014 am Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen durchgeführt werden. Die Schlacken wurden chemisch und mineralogisch charakterisiert und die hydrothermalen Lösungsexperimente bezüglich pH-Wert, Temperatur und Versuchsdauer optimiert. Ab Frühjahr 2015 wurde damit begonnen die in den Hydrothermalexperimenten gelösten Metalle Blei und Zink auszufällen. Da nach der Auswertung und Zusammenstellung aller Ergebnisse noch die hydrochemische Modellierung durchgeführt werden sollte, wurde bis Oktober 2015 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt.

4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Während über die Eigenschaften von MVA-Schlacken in Abhängigkeit von Lagerungszeit, Korngrößenfraktion und pH Untersuchungen vorliegen, gibt es in der Literatur keine Angaben zu hydrothermal behandelten MVA-Schlacken.

Bisherige Forschungsprojekte über die Extraktion von Schwermetallen aus MVA-Schlacken beziehen sich hauptsächlich auf umweltrelevante Kriterien. Dazu wird die Problematik von Deponiesickerwasser und Regenwasser als Eluent im Schlackedeponiekörper betrachtet. Andere Schwerpunkte liegen bei der Umweltverträglichkeit von MVA-Schlacken als bauphysikalische Komponenten (Travar et al. 2009). Dabei werden frische und gealterte Schlacken unterschieden. MVA-Schlacke besteht überwiegend aus Hochtemperaturphasen, die unter natürlichen Umweltbedingungen metastabil sind. Rohe Schlacke ist daher ein äußerst reaktives Material. Bereits beim Abkühlen/Abschrecken der MVA-Schlacke im Naßentschlacker verändern Umwandlungsprozesse den Mineralbestand. Die Mineralreaktionen sind nach der vorgeschriebenen Alterungsdauer von 3 Monaten bereits weit fortgeschritten (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2004). Vorwiegend handelt es sich um Karbonatisierungs- und Hydratisierungsreaktionen, die hauptsächlich am Feinstkorn ablaufen. Bei der Alterung bleiben die Schadstoffgehalte weitestgehend in der Schlacke. Jedoch wird mit der Mineralneubildung und der Karbonatisierung die Schadstofffreisetzung vermindert. Die Eluate gealterter MVA-Schlacken weisen weitestgehend eine geringere Schwermetallkonzentration auf.

Die in der Literatur aufgeführten Lösungsversuche an MVA-Schlacken behandeln die Immobilisierung von Gasen, Salzen, Sulfaten, Schadstoffen und Schwermetallen (Meima & Comans, 1999; Gade et al., 2001; Magel, 2003; Dijkstra et al. 2006; Pöllmann, 2007). Die Eluierbarkeit von Schwermetallen, insbesondere von Zn und Pb, aus frischen, wie auch aus gealterten MVA-Schlacken wurde mit unterschiedlichen Prozessen und Methoden untersucht. Für ein einheitliches Verfahren zur Beurteilung der Auslaugbarkeit wurden Eluate in Anlehnung an die DIN 38414 S4 (1984) angesetzt (Magel 2003). In verschiedenen gealterten Schlacken wurden geringere pH-Werte und Löslichkeiten von Schwermetallen, als in frischen Schlacken ermittelt (Meima & Comans 1999).

Dijkstra et al. (2006) stellten bei ihren Lösungsversuchen fest, dass eine Erniedrigung des pH-Wertes zu höheren Zn- und Pb-Gehalten im Eluat führen, während bei Langzeitlösungsversuchen geringere Zn- und Pb-Gehalte im Eluat zu messen sind.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit hat sich mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik IPB, Holzkirchen ergeben. Im Rahmen des Programms „Märkte von Übermorgen“ wurde im Fraunhofer-internen Projekt „Molecular Sorting“ seitens des IBP die innovative Methode der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF) zur Aufbereitung von Verbrennungsrückständen und Schlacken erforscht und weiterentwickelt.

II. Eingehende Darstellung

1 Resultate des Forschungsvorhabens

a. Methodischer Ansatz

a.1. Material

Untersuchungsmaterial soll Schlacke sein, die mit dem TAR-Prozess Fe und NE entfrachtet wurde. Deshalb wurde von der Firma TarTech Schlacke des EBS Kraftwerkes E.ON –Energy from Waste– Heringen zur Verfügung gestellt. Fe und NE entfrachtete Schlacke aus normaler Hausmüllverbrennung konnte von der Firma TarTech nicht zur Verfügung gestellt werden. Die EBS-Schlacke wurde vor der Aufbereitung mit dem Tar-Prozess 12 Wochen lang abgelagert und Fe und NE entfrachtet. Erst dann wurde sie 1 x mit einem Prallbrecher und 1 x im Tar-Prozessor aufgeschlossen. Es lagen keine Informationen darüber vor, welches Ausgangsmaterial für diese Schlacke verbrannt wurde. Im Verlauf der mineralogischen Untersuchungen stellte sich heraus, dass die analysierten Pb- und Zn- führenden Phasen in normalen Hausmüllschlacken noch nie beobachtet wurden, daher wurden mit dieser Schlacke keine Hydrothermalexperimente durchgeführt. Da sich die Anlage der Fa. Tartech noch in der Planungs- und Aufbauphase befand, konnte die Fa. Tartech kein weiteres Untersuchungsmaterial zur Verfügung stellen. Deshalb wurden für die hydrothermalen Extraktionsexperimente zwei Schlacken aus einer bayerischen Müllverbrennungsanlage, sowie eine Schlacke der Berliner Stadtreinigung verwendet. Bei den Schlacken aus der bayerischen Müllverbrennungsanlage handelt es sich zum einen um eine frische, von groben Eisenteilen entfrachtete Schlacke, die direkt dem Schlackebunker (Schlacke SC) entnommen wurde und zum anderen um Schlacke, die nach dreimonatiger Ablagerung über Magnetscheider, Sichtung und Handsortierung Fe und NE entfrachtet (Schlacke SC_MG) wurde. Die Schlacke der Berliner Stadtreinigung ist ebenfalls Fe- und NE-entfrachtet (Schlacke BSR).

Müllverbrennungsschlacken sind ein heterogenes Phasengemisch, wobei sich makroskopisch vier Stoffgruppen unterscheiden lassen: Aschen, Schmelzprodukte, unverbrannter Restmüll und Metalle. Den Hauptanteil umfassen die Aschen und Schmelzprodukte mit ca. 80 %, sie bilden die Schlackenmatrix. Die Aschen mit einer Korngröße < 2 mm sind ein Gemisch aus verschiedenen Partikeltypen, wie Glasabrieb, anorganische Rückstände, Ruß- und Staubpartikel. Die Schmelzprodukte treten als mm- bis cm-große, unregelmäßig geformte Stücke auf. Der unverbrannte Restmüll besteht aus Altglas, Keramik, Steinen und organischen Resten. Die mengenmäßig größten Anteile der Metalle sind Eisen, Aluminium und Kupfer.

Die Metalle, wie auch der unverbrannte Restmüll werden mit maximal 20 % des Schlackeanteils als Durchläufermaterial bezeichnet, da sie den Brennprozess nahezu unbeschadet bestehen.

a.2. Versuchsdurchführung

a.2.1. Siebanalysen

Die chemische und mineralogische Zusammensetzung von MVA-Schlacken ist stark abhängig von ihrer Korngröße (Deike, 2012). Daher wurden die Schlacken mit einem Rüttelsieb in Kornfraktionen $< 63\mu\text{m}$, $63\mu\text{m}$, $125\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ und $1000\mu\text{m}$ getrennt. Vor der Siebung wurden die Schlacken bei 40°C für 5 Tage getrocknet.

a.2.2. Lasergranulometrie

Die Korngrößenverteilung der gesiebten Schlacken $< 63\mu\text{m}$ wurden mit Laserdiffraktometrie bestimmt. Es wurden, pro Probe, fünf Messzyklen mit je 60 Sekunden Messzeit durchlaufen. Um eine Agglomeration zwischen feinen Schlackepartikeln zu vermeiden, wurde eine Spatelspitze der zu messenden Probe mit einer identische Menge Graham'schem Salz (Natriumpolyphosphat) vermengt und unter mehrmaligem starkem Schütteln mit ca. 5 ml destilliertem Wasser vermischt. Die Auswertung der Streulichtdaten wurde nach den Grundlagen der Fraunhofer'schen Beugung durchgeführt.

a.2.3. Röntgenfluoreszenzanalyse RFA

Die Bestimmung des Gesamtchemismus wurde mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) durchgeführt. Für die Herstellung der Pulverpresstabletten wurden alle Siebfraktionen $> 250\mu\text{m}$ 10 min. in einer Kugelmühle und anschließend ebenso wie die Siebfraktionen $125\mu\text{m}$ und $63\mu\text{m}$ 4 min. in einer Mikroschnellmühle gemahlen. Die Siebfraktionen $< 63\mu\text{m}$ wurden nicht weiter auf gemahlen. 8g Probe wurde mit 2g Höchst Wachs C vermischt und zu einer homogenen Tablette gepresst. Zur Bestimmung des Glühverlusts wurden die Proben bei 1050°C für 2 Std. getempert.

a.2.4. Röntgenpulverdiffraktometrie XRD

Der mineralogische Phasenbestand wurde mit Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) ermittelt. Gemessen wurde im Winkelbereich $5 - 85^\circ 2\text{Theta}$, mit einem Goniometervorschub von $0,01^\circ 2\text{Theta}$ und 2sec Verweilzeit pro Messpunkt.

a.2.5. Elektronenstrahlmikrosonde EMS

Die Nachweisgrenze mit XRD liegt bei 4-5 Vol. %, daher können die Blei- und Zinkführenden Phasen mit dieser Methode nicht uneindeutig bestimmt werden. Deshalb wurden Analysen mit der Elektronenstrahlmikrosonde (EMS) durchgeführt, aufgrund der geringen Korngröße des nicht konsolidierten Probenmaterials mussten spezielle Analyseverfahren entwickelt werden. Dafür wurden die ungemahlene Siebfraktionen $< 63\mu\text{m}$ und $63\mu\text{m}$ in AralditF eingebettet und poliert. Es wurde eine Anregungsspannung von 10keV gewählt, um mit hochauflösender Bildverarbeitung erste Informationen über die Elementverteilung im Probenmaterial zu erhalten. Unter diesen Bedingungen erscheinen Phasen mit Elementen höherer Ordnungszahl im Elektronenbild heller. Die Partikel sind meist nur einige wenige μm groß, deshalb konnten keine Einzelmessungen durchgeführt werden, um trotzdem die

chemische Zusammensetzung der kleinen Partikel bestimmen zu können wurden Kleinbereiche von $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ mit einer Auflösung von 256×256 Messpunkten abgerastert und für jeden Messpunkt eine vollständige Matrixkorrektur berechnet (Pouchou & Pichoir (1984)).

a.2.6. Rasterelektronenmikroskopie REM

Zur Abbildung der Oberflächen der Partikel $<63\mu\text{m}$ wurde von Schlacke SC_MG und SC_MG_F rasterelektronenmikroskopische Bilder aufgenommen.

a.2.7. Atomabsorptionsspektroskopie AAS

Zur Bestimmung, der in den Hydrothermalversuchen herausgelösten Pb- und Zn-Gehalte wurden die Eluate mit einer Zentrifuge vom verbleibenden festen Rückstand getrennt. Entsprechend ihrer Zink- und Bleikonzentrationen wurden die Eluate für die AAS Messungen verdünnt. Als Standards dienten wässrige Lösungen, die je nach Bedarf verdünnt und gemischt wurden. Alle Messungen wurden an auf 22°C temperierten Proben und Standards durchgeführt.

a.2.8. Elektrodynamische Fragmentierung EDF

Da über den Tar-Prozess kleinste metallische Teilchen, die in der mineralischen Fraktion einer MVA-Schlacke eingeschlossen sind frei geegesetzt/geschlagen werden, erhöht sich durch den Tar-Prozess der Feinanteil der MVA-Schlacke. Auch die Anbackungen und Versinterungen, die während der Verbrennung entstehen, platzen von den metallischen Teilchen ab und erhöhen den Feinanteil zusätzlich. Da aus der TarTech-Anlage während der Projektlaufzeit kein Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde zur Erhöhung des Feinanteils einer MVA-Schlacke die elektrodynamische Fragmentierung eingesetzt. Als Material diente die nicht Fe und NE entfrachtete Schlacke SC, sowie die bereits Fe- und NE entfrachtete Schlacken SC_MG und BSR. Das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung beruht auf dem Prinzip, dass die Durchschlagsfestigkeit eines Materials gegenüber elektrischer Entladungen keine physikalische Konstante ist. Die elektrische Durchschlagsfestigkeit ist abhängig von der Pulsdauer des elektrischen Schlags und somit umgekehrt proportional zur Leitfähigkeit der meisten Materialien. Auf Basis dieses physikalischen Effekts, ist es möglich einen elektrischen Impuls kontrolliert in ein festes Material zu zwingen. Eine Impulsentladung durchläuft einen Festkörper entlang von Korngrenzen, da diese den Weg des geringsten Widerstandes darstellen. Durch Abgabe von mehreren gepulsten elektrischen Entladungen kann ein Verbundwerkstoff wie z.B. MVA-Schlacke selektiv aufgetrennt werden. Besonders die Metalle werden effektiv von Asche- und Schlackeresten befreit. Die Asche- und Schlackereste befinden sich nach dem Prozess in der Feinfraktion. Die Anlage wird mit einer Spannung von $90 - 200 \text{ kV}$, einer Energie von $4-6 \text{ kWh/t}$ und einer Pulsfrequenz von $1 - 5 \text{ Hz}$ betrieben. Die Impulsdauer wurde mit 150 nsec festgesetzt. (http://www.abw-recycling.de/r13/Woidasky_IBP_MolecularSorting_R13.pdf). Abb. 1a und b zeigt die Anlage der elektrodynamischen Fragmentierung, des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, sowie den schematischen Aufbau der Anlage.

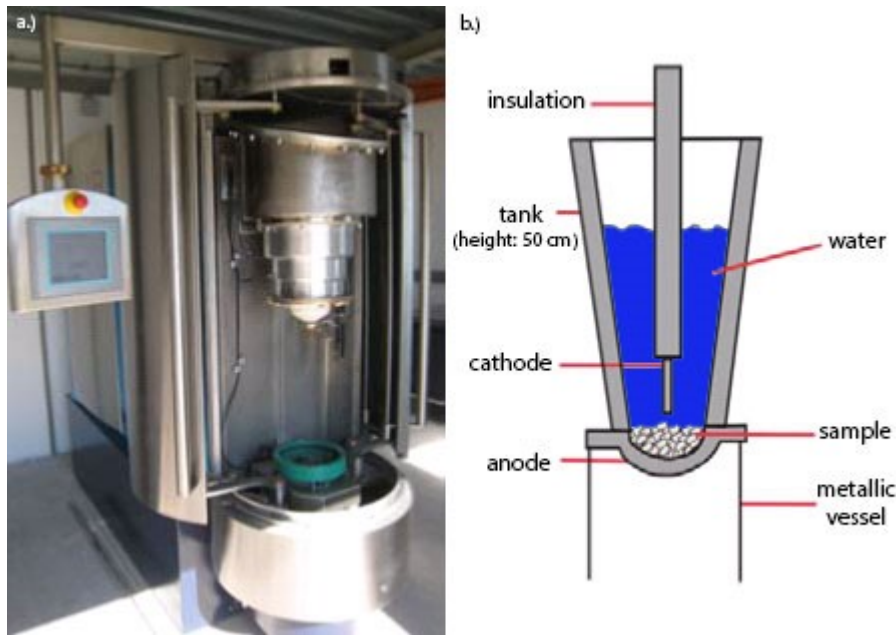


Abb. 1: a: Anlage zur elektrodynamischen Fragmentierung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen. b: Schematischer Aufbau der Fragmentierungsanlage (Quelle: Fraunhofer Institut für Bauphysik, IBP)

Den für die Fragmentierung von Festkörpern geeigneten Bereich der Pulsdauer zeigt Abb. 2. Bei einer Pulsdauer von $< 500\text{ ns}$ liegt die Durchbruchfeldstärke von Festkörpern über denen von Wasser.

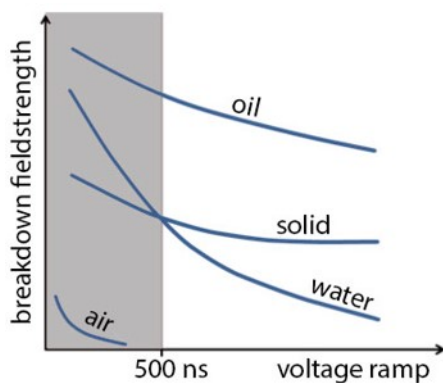


Abb. 2: Elektrische Durchschlagfestigkeit verschiedener Substanzen in Abhängigkeit von der Pulsdauer. (Blum, et al., 2000)

Die makroskopische Zusammensetzung einer MVA-Schlacke nach der elektrodynamischen Fragmentierung zeigt Abb. 3. Zu erkennen sind Schmelzprodukte, Durchläufermaterial wie Altglas, Steine und Keramik, Eisenteile und NE-Metalle. Der Feinanteil $< 100\ \mu\text{m}$ beträgt bei den MVA-Schlacken ca. 15 %. Nach der elektrodynamischen Fragmentierung steigt der Feinanteil $< 100\ \mu\text{m}$ auf über 70 % an. Die Anbacksäume und Versinterungen sind nach der elektrodynamischen Fragmentierung vollkommen abgetrennt.

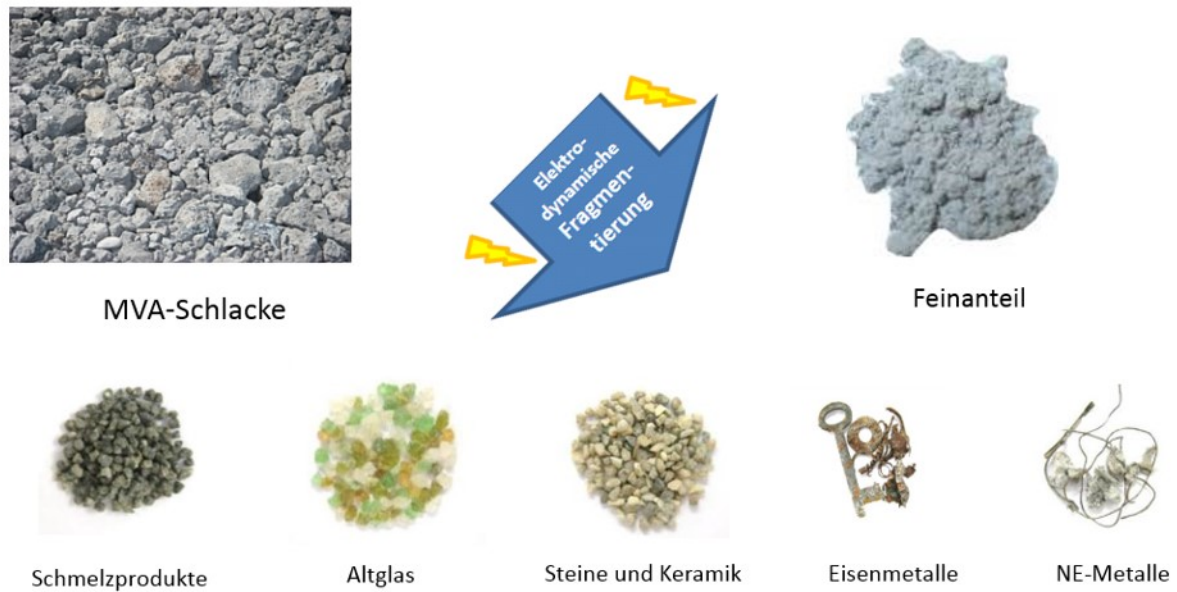


Abb. 3: Makroskopische Zusammensetzung von MVA-Schlacke nach der elektrodynamischen Fragmentierung

a.2.9. Hydrothermalextraktion

Unter hydrothermalen Bedingungen können Materialien, die bei Raumtemperatur und Normaldruck schwerlöslich sind, in Lösung gebracht werden. Die Lösungsreaktionen finden in geschlossenen Systemen meist bei Temperaturen $>100^{\circ}\text{C}$ und Drucken $> 1\text{bar}$ in wässrigen Lösungen statt.

Das Verfahren eignet sich zur Extraktion von Schwermetallen z.B. Blei und Zink aus Rückständen der thermischen Abfallbehandlung (Feinanteil der Rostaschen, Filterstäube). MVA Filterstäube sowie deren industrielle Äquivalente wie Bypass-Stäube aus der Zementherstellung weisen neben hohen Gehalten an Schwermetallen auch höhere Gehalte an polychlorierten Kohlenwasserstoffen wie Dioxin und Furan (PCDD, PCDF) auf. Sie gelten deshalb als Gefahrstoff und müssen in der Regel kostenintensiv untertage verbracht werden. Sie können jedoch einer hydrothermalen Metallextraktion zugeführt werden, da die vorhandenen polychlorierten Kohlenwasserstoffe (PCDD, PCDF) unter höheren Temperaturen und in Anwesenheit einer oxyhydrischen Gasphase zerstört werden (Hu et. al. Aus einem Gefahrstoff wird ein Material, das weiteren Anwendung in der Bau-/Zementindustrie zugeführt werden kann.

Die hydrothermalen Lösungsreaktionen laufen schnell ab und verbrauchen wenig Energie. So kann z.B. die Restdampfwärme einer MVA genutzt werden. Desweiteren kann die bei MVA's prozessbedingt anfallende HCl zur Einstellung des pH-Wertes genutzt werden.

Die Hydrothermalversuche wurden in mit Tefloneinsätzen ausgestatteten Aluminiumautoklaven durchgeführt. Für die Versuche wurde der Feinanteil ($<63\mu\text{m}$) der Schlacken verwendet. Das Lösungsverhalten von Blei und Zink wurde in Abhängigkeit vom eingestellten pH-Wert, von der Temperatur und der Versuchsdauer bestimmt. In den Autoklaven stellte sich in Abhängigkeit von der Temperatur ein gesättigter Dampfdruck ein. Der Versuchsaufbau zur Durchführung der hydrothermalen Extraktionsexperimente ist in Abb. 4 schematisch dargestellt.

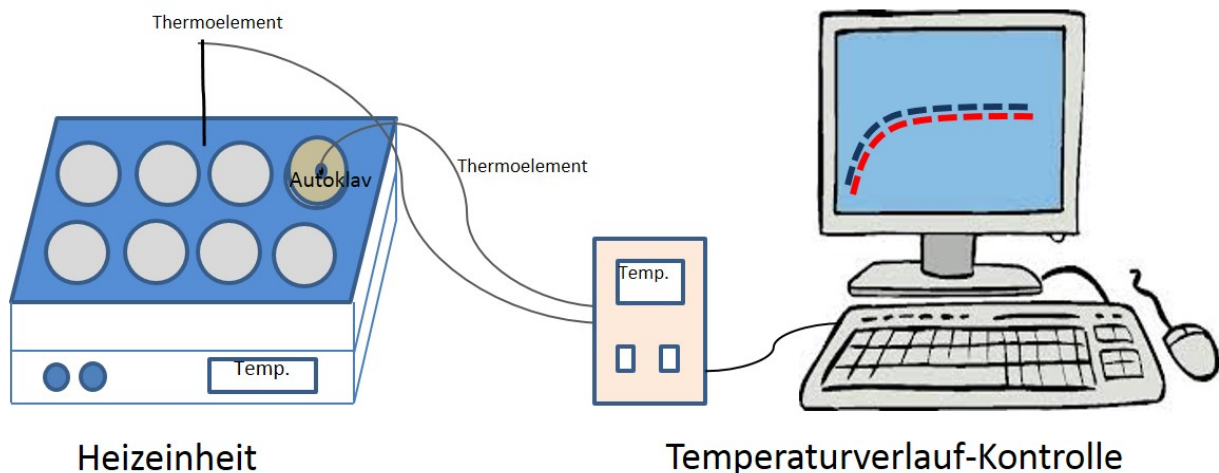


Abb. 4: Schematische Darstellung des für die Hydrothermalexperimente genutzten Versuchsaufbaus

Für die Lösungsexperimente wurden die Teflonbehälter mit einem Innenraumvolumen von 30 ml mit einer festgelegten Menge abgewogener Schlacke befüllt. Daraufhin wurde eine definierte Menge an H_2O zugegeben und konzentrierte Säure zupipettiert. Anschließend wurden die Autoklaven in den, bereits auf seine endgültige Zieltemperatur vorgeheizten, Aluminiumblock versenkt. Nach Ablauf der jeweiligen Versuchszeit wurden die Autoklaven auf Raumtemperatur abgekühlt. Der Inhalt der Autoklaven wurde zentrifugiert, um die Eluate vom festen Rückstand zu trennen.

a.2.10. Selektive Fällung von Pb und Zn

Die Fällung der Zielwertstoff Blei und Zn erfolgte durch zu pipettieren von NaOH zu den Eluaten. Für die selektive Fällung von Blei und Zink wurden Titrationskurven aufgenommen.

a.2.11. Numerische und hydrochemische Modellierung

Die numerische Modellierung erfolgte über Pourbaix-Diagrammen, die für jedes Redox-System dominierende Spezies bei verschiedenen pH- und Eh-Bedingungen dargestellt. Die Diagramme werden daher auch als Prädominanzdiagramme oder pH-Eh-Diagramme bezeichnet. Die Einteilung der Felder ist extrem abhängig davon, welche Elemente mit welcher Konzentration und welcher Ionenstärke berücksichtigt werden. Im Normalfall wird die, in Lösung vorliegende, dominante Spezies ihrem jeweiligen Feld zugeordnet, es besteht jedoch beim Erstellen eines solchen Diagramms auch die Möglichkeit, bestimmte Konzentrationen oder Aktivitäten eines Elements in der Lösung als Untergrenze festzulegen. Bei Unterschreitung dieses Wertes wird in diesen Feldern die dominierende, ausfallende Mineralphase dargestellt (Garrels & Christ, 1965). Die ein Feld begrenzenden Linien entsprechen einem Bereich in dem die Aktivitäten der jeweiligen Spezies der angrenzenden Felder identisch sind. Das entspricht, bei konstanten Druck und Temperaturbedingungen, einem Gleichgewicht.

Das Programm PHREEQC wird zur Simulation von diversen Reaktionen und Prozessen sowohl in natürlichen Wässern als auch von Experimenten unter Laborbedingungen genutzt. Generell benötigt PHREEQC einen Eingabefile, welches das zu behandelnde Problem möglichst exakt charakterisiert. Die zu lösende Aufgabe wird, mit Hilfe von sogenannten Schlüsselwörtern und damit verbundenen Datenblocks, beschrieben. Die Modellierungen wurden mit der Version phreeqi-3.0.6-7757.msi durchgeführt. Spezielle Anwendungen, wie die Konstruktion von Pourbaix-Diagrammen für unterschiedlich zusammengesetzte Ausgangslösungen, werden durch die zusätzliche Nutzungen des Programms PhreePlot vereinfacht.

Zusätzlich zu dem Programm PHREEQC, wurde zur Erstellung von pH-Eh-Diagrammen von stark vereinfachten Modellsystemen, die Software Geochemist's Workbench verwendet. Das Programm beinhaltet mehrere Anwendungen zur Lösung von unterschiedlichen, in der Chemie von Wässern auftretenden, Problemen.

b. Ergebnisse

b.1. Korngrößenverteilung

b.1.1. Korngrößenverteilung nach der Trockensiebung

Das Ergebnis der Trockensiebung der Schlacken SC, SC_MG, BSR und Tar zeigt Abb. 5. In den Siebkurven wird der kumulierte Massenanteil der Gesamtprobe dargestellt, der das 1000 µm Sieb passiert hat. Wie Abb. 5 zeigt, ist die Schlacke SC, die direkt dem Schlackebunker entnommen wurde und keine mechanische Aufbereitung durchlaufen hat am grössten. Die Schlacke Tar, die mit einem Prallbrecher und dem Tar-Prozess behandelt wurde ist im Vergleich zu den Schlacken SC, SC_MG und BSR am feinsten. Die Schlacke SC_MG zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie Schlacke SC, allerdings zu feineren Werten hin verschoben. Der Feinanteil der Schlacke BSR liegt bei einer Maschenweite <125µm, wie der von Schlacke Tar bei ca. 20%, bei einer Maschenweite < 500µm liegt der kumulierte Massenanteil der Schlacke BSR bei ca. 50% und der kumulierte Massenanteil der Schlacke Tar bei ca. 70%.

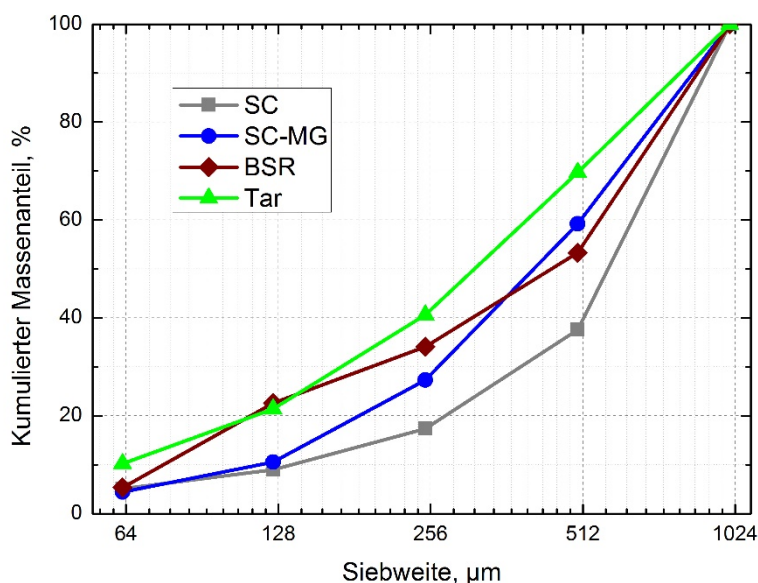


Abb. 5: Korngrößenverteilung der Schlacken SC, SC_MG, BSR, Tar nach der Trockensiebung

b.1.2. Lasergranulometrie

Die Trockensiebfraktionen der Schlacken SC_MG und BSR <63µm sowie der Feinstanteil aus der elektrodynamischen Fragmentierung dieser Schlacken wurden mit dem Lasergranulometer untersucht.

Die Verteilungssummenkurven der Schlacken BSR, BSR_F (fragmentierte BSR Schlacke), SC_MG und SC_MG_F (fragmentierte SC_MG Schlacke) zeigt Abb. 6. Die d_{50} und d_{90} -Werte sind in Tab. 1 aufgelistet

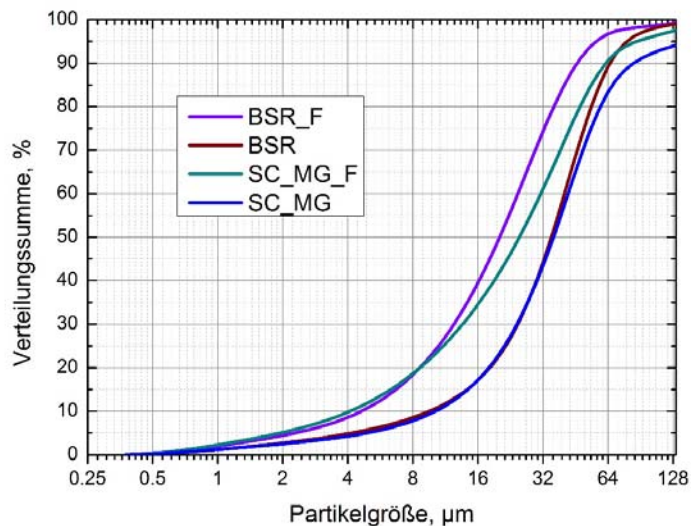


Abb. 6: Korngrößenverteilung der Schlacken SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F

Der Anteil des Feinstmaterials steigt durch den Fragmentierungsprozess bei den Schlacken von ca. 15% vor der Fragmentierung auf ca. 70% nach der Fragmentierung an. In Tab. 1 sind die d_{90} und d_{50} -Werte aufgelistet. Die d_{90} und d_{50} -Werte geben an, dass 90% bzw. 50% aller Partikel kleiner einer bestimmten Korngröße sind. Für Schlacke BSR sind 50% aller Partikel <35µm, für Schlacke BSR_F sind 50% aller Partikel <19µm. Der d_{50} -Wert der Schlacke SC_MG mit 38µm liegt etwas höher wie der d_{50} -Wert der Schlacke BSR, der bei 35µm liegt, der d_{50} -Wert der Schlacke SC_MG_F liegt mit 25 µm über dem der Schlacke BSR_F. Bei Schlacke SC_MG sind 90% der Partikel <84µm bei Schlacke BSR sind 90% aller Partikel <63µm. Für die Schlacken BSR_F und SC_MG_F liegen die d_{90} -Werte bei <44µm bzw. <60µm.

In den Abb. 7 bis 9 sind die Volumenverteilungskurven der Schlacken SC und SC_F, SC_MG und SC_MG_F sowie BSR und BSR_F dargestellt. Alle Kurven zeigen eine monomodale Verteilung der Partikel. Die kleinen Moden bei den fragmentierten Schlacken der Abbildungen 7 bis 9 sind Agglomerationen von kleineren Partikelteilchen.

Tab. 1: d_{50} und d_{90} -Werte für die Schlacken BSR, BSR_F, SC_MG und SC_MG_F

	d_{50} , μm	d_{90} , μm
BSR	35	63
BSR_F	19	44
SC_MG	38	84
SC_MG_F	25	60

Der Kurvenvergleich von Ausgangsschlacken fragmentierten Schlacken zeigt, dass die Maxima der Kurven der fragmentierten Schlacken bei kleineren Korngrößen liegen. Auch die Symmetrie der Kurven zeigt eine Veränderung. Bei den fragmentierten Schlacken zeigen die Volumenverteilungskurven nicht wie bei den Ausgangsschlacken einen fast symmetrischen Verlauf. Zu kleinen Korngrößen hin zeigen die Volumenverteilungskurven der fragmentierten Schlacken eine deutlich flachere Steigung, wie bei den Ausgangsschlacken.

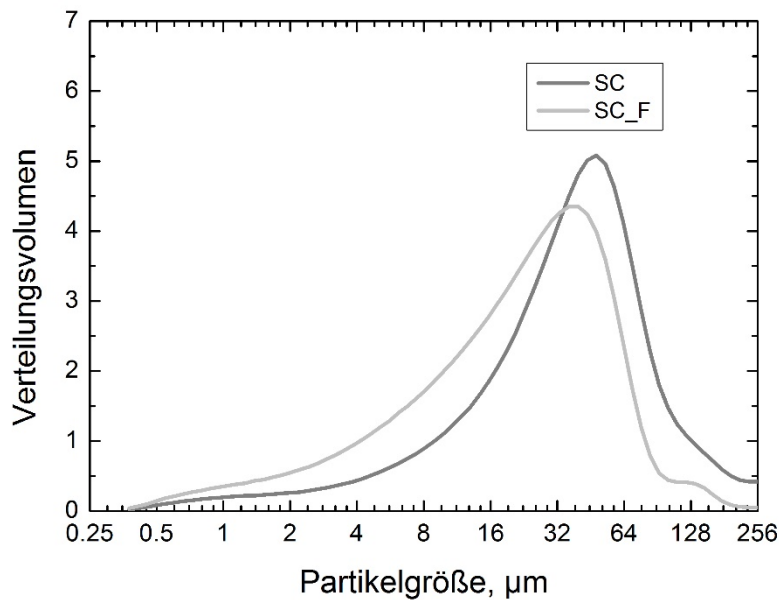


Abb. 7: Verteilungsvolumen der Schlacken SC und SC_F

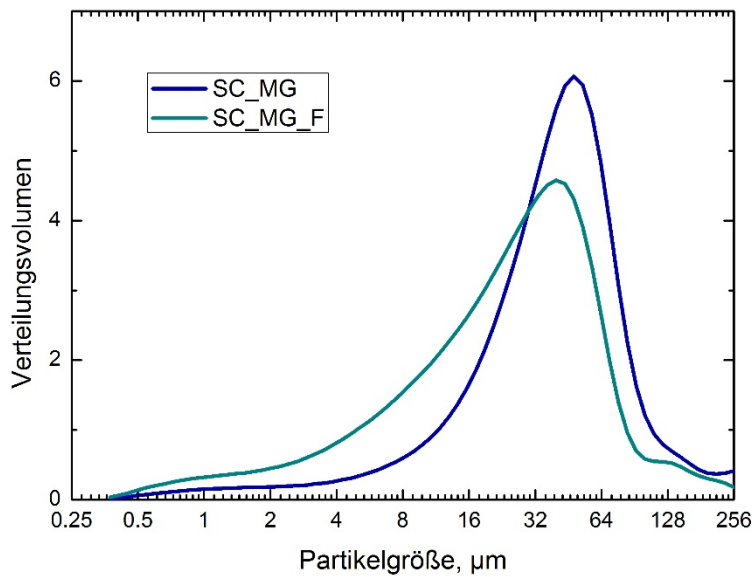


Abb. 8: Verteilungsvolumen der Schlacken SC_MG und SC_MG_F

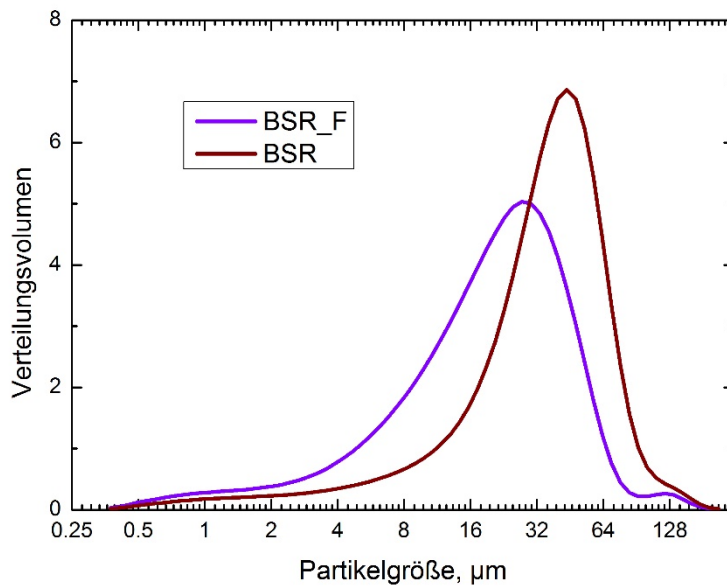


Abb. 9: Verteilungsvolumen der Schlacken BSR und BSR_F

b.2. Chemische Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Korngröße

Die chemischen Hauptbestandteile der Schlacken sind SiO_2 , CaO , Al_2O_3 und Fe_2O_3 (Abb. 10 - 13). Innerhalb der einzelnen Siebfractionen variieren die Konzentrationen an SiO_2 und CaO sehr stark (Abb. 10 und 11). Eine deutliche Abhängigkeit von der Korngröße zeigen auch die Nebenelemente Chlor und Schwefel (Abb. 16 und 17), sowie das Schwermetalle Zink (Abb. 14).

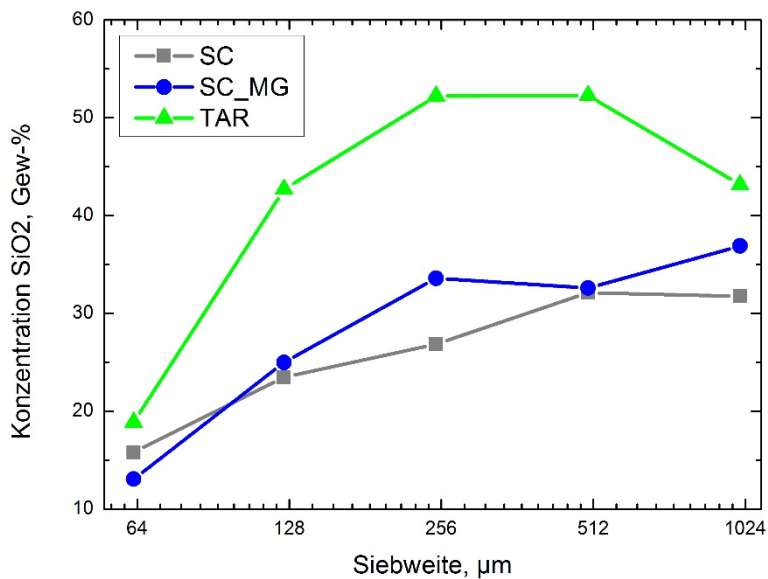


Abb. 10: Abhängigkeit der SiO₂-Konzentration von der Korngröße

Die Verteilung der SiO₂-Gehalte in Abhängigkeit von der Korngröße zeigen, dass mit kleiner werdender Korngröße die Gehalte an SiO₂ kleiner werden (Abb. 10). Schlacke Tar weist im Vergleich zu den Schlacken SC und SC_MG im Korngrößenbereich > 125µm SiO₂-Gehalte von bis zu 50 Gew-% auf. Bei einer Korngröße von 63µm liegen die SiO₂-Gehalte für die Schlacken SC und SC_MG bei 13 und 16 Gew-% für Schlacke Tar bei 19 Gew-%.

Im Gegensatz zum SiO₂ nehmen die CaO-Gehalte mit kleiner werdender Korngröße zu (Abb. 11). Im Korngrößenbereich von 1000µm bis 500µm nimmt der CaO-Gehalt von Schlacke SC und SC_MG von 22,5 Gew-% bei 1000µm auf 26 Gew-% bei 500µm zu, für Schlacke Tar bleibt der CaO-Gehalt in diesem Korngrößenbereich annähernd konstant bei 16 Gew-%. Im Korngrößenbereich von 500µm bis 63µm steigt der CaO-Gehalt von Schlacke Tar von 16 Gew-% auf 27 Gew-% an. Der CaO-Gehalt von Schlacke SC_MG steigt von 26 Gew-% auf 28 Gew-% an, der CaO-Gehalt von Schlacke SC erhöht sich von 26 Gew-% auf 34 Gew-%.

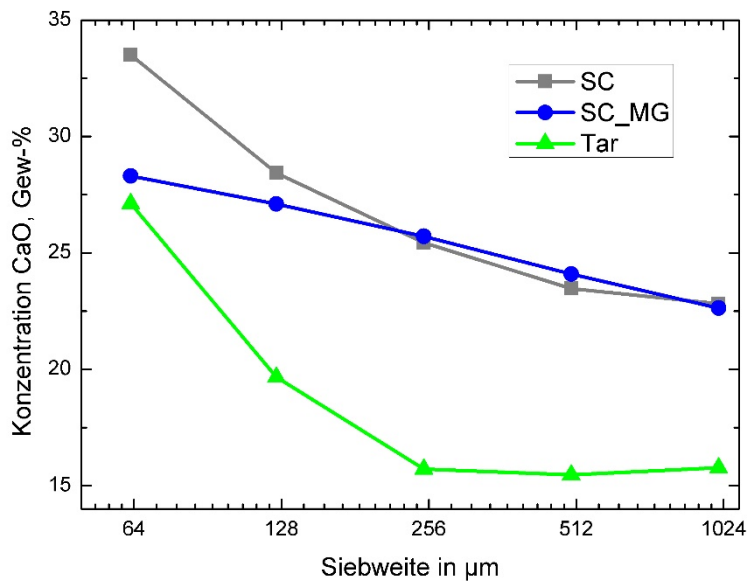


Abb. 11: Abhängigkeit der CaO-Konzentration von der Korngröße

Der Fe_2O_3 -Gehalt nimmt mit kleiner werdender Korngröße bei Schlacke Tar von 18 Gew-% bei einem Siebschnitt von 1000µm auf 15 Gew-% bei einem Siebschnitt von 63µm ab, bei Schlacke SC nimmt der Fe_2O_3 -Gehalt von 8 auf 7 Gew-% ab und bei Schlacke SC_MG von 10 auf 4 Gew-%. Die Fe_2O_3 -Gehalte der Schlacke Tar liegen um ca. 10 Gew-% höher, wie der Fe_2O_3 -Gehalt von Schlacke SC_MG (Abb. 12).

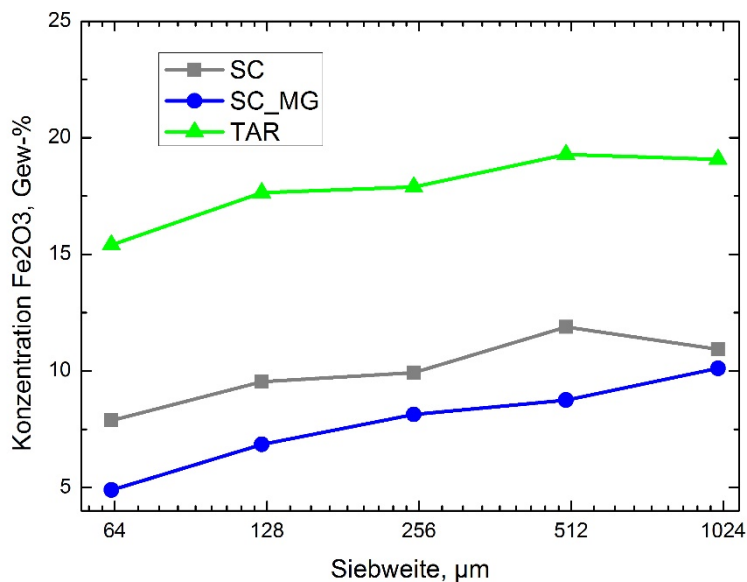


Abb. 12: Abhängigkeit der Fe_2O_3 -Konzentration von der Korngröße

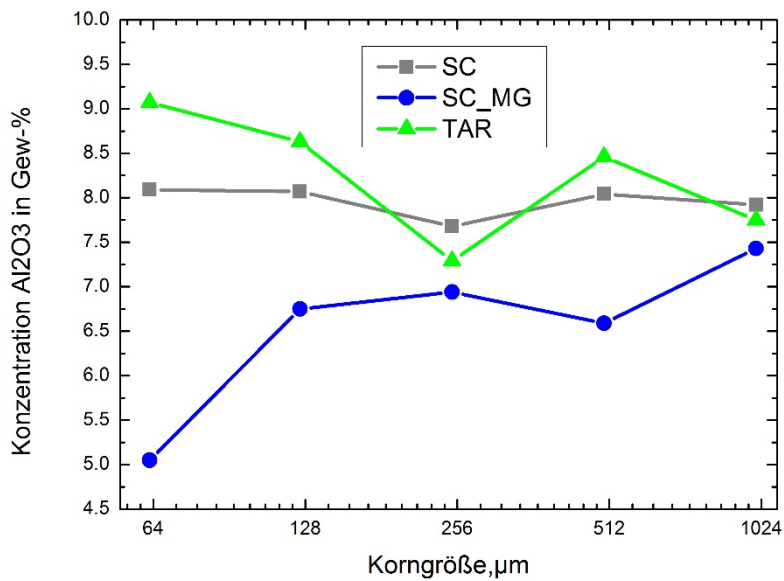


Abb. 13: Abhängigkeit der Al_2O_3 -Konzentration von der Korngröße

Bei den Al_2O_3 -Gehalten zeigen die Schlacken SC, SC_MG und Tar kein einheitliches Verhalten. Bei Schlacke SC_MG nimmt der Al_2O_3 -Gehalt mit kleiner werdender Korngröße von 7,5 Gew-% auf 5 Gew-% ab. Bei Schlacke SC liegt der Al_2O_3 -Gehalt unabhängig von der Korngröße bei 8 Gew-%. Bei Schlacke Tar nimmt der Al_2O_3 -Gehalt mit kleiner werdender Korngröße von 7,5 Gew-% auf 9 Gew-% zu (Abb. 13).

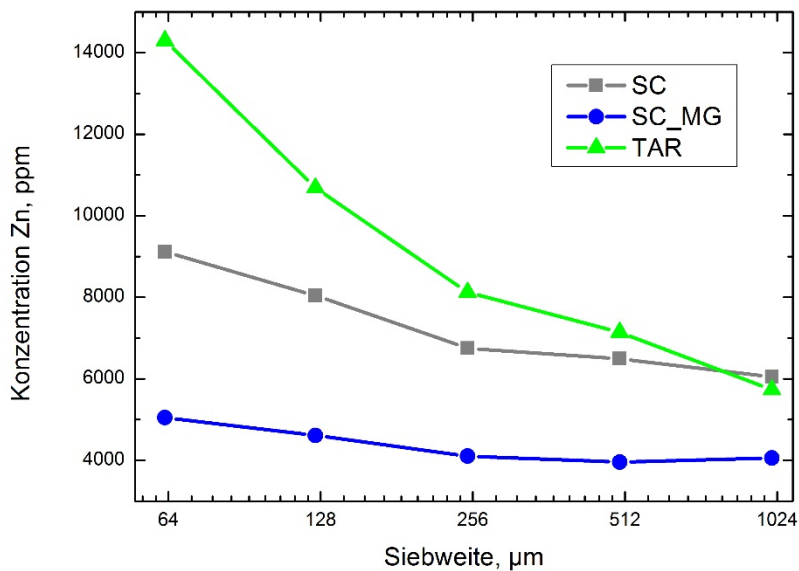


Abb. 14: Abhängigkeit der Zn-Konzentration von der Korngröße

Die Entwicklung der Zn-Gehalte in Abhängigkeit von der Korngröße zeigt Abb. 14. Mit kleiner werdender Korngröße steigen die Zn-Gehalte an. Bei Schlacke Tar steigt der Zn-Gehalt von 6000 ppm auf 14500 ppm an. Bei Schlacke SC und SC_MG ist der Anstieg der Zn-Gehalte

nicht so deutlich wie bei Schlacke Tar. Bei Schlacke SC steigt der Zn-Gehalt geringfügig von 4000 ppm auf 5000 ppm an, bei Schlacke SC_MG von 6000 ppm auf 9000 ppm.

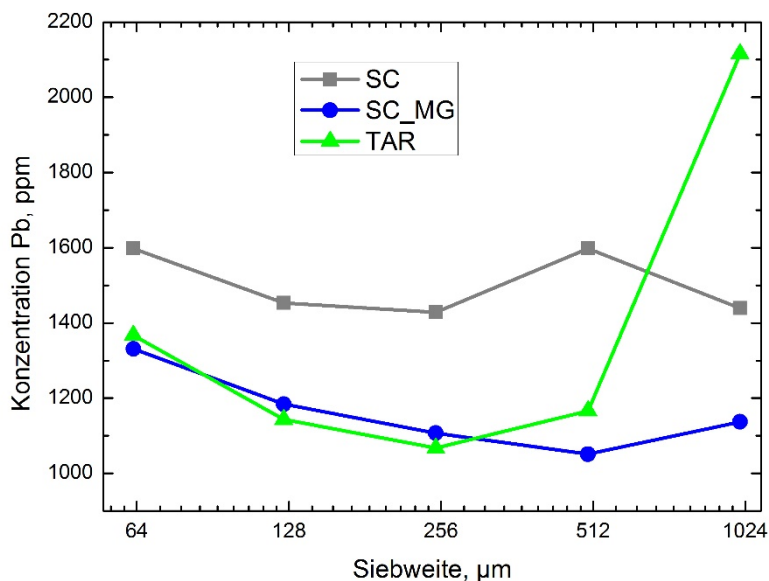


Abb. 15: Abhängigkeit der Pb-Konzentration von der Korngröße

Die Abhängigkeit der Pb-Gehalte von der Korngröße zeigt Abb. 15. Mit kleiner werdender Korngröße steigt der Pb-Gehalt leicht an. Bei Schlacke Tar ist der Pb-Gehalt in der Kornfraktion 1000 µm mit 2100 ppm Pb sehr hoch. Bei einer Korngröße 250 µm erreichen die Pb-Gehalte von Schlacke Tar noch 1100 ppm, die Gehalte steigen bis zu einer Korngröße von 63 µm auf 1380 ppm an. Bei der nur grob entfrachteten Schlacke SC liegen die Pb-Gehalte bei einer Korngröße von 1000 µm bei 1420 ppm bei einer Korngröße von 63 µm bei 1600 ppm. Auch bei Schlacke SC steigen die Pb-Gehalte mit kleiner werdender Korngröße an, liegen aber um ca 200 ppm höher, wie die Pb-Gehalte der Schlacken SC_MG und Tar.

Die Entwicklung der Cl- und S-Gehalte in Abhängigkeit von der Korngröße zeigen Abb. 16 und 17. Die Cl- und S-Gehalte steigen mit kleiner werdender Korngröße an.

Bei Schlacke SC steigen die Cl-Gehalte von 17000 ppm bei einer Korngröße von 1000 µm auf 29 000 ppm bei einer Korngröße von 63 µm an. Bei Schlacke SC_MG steigen die Cl-Gehalte von 12000 ppm auf 24000 ppm an. Bei Schlacke Tar steigen die Cl-Gehalte von 10000 ppm auf 22000 ppm an. Die niedrigsten Cl-Gehalte wurden für Schlacke Tar gemessen (Abb. 16).

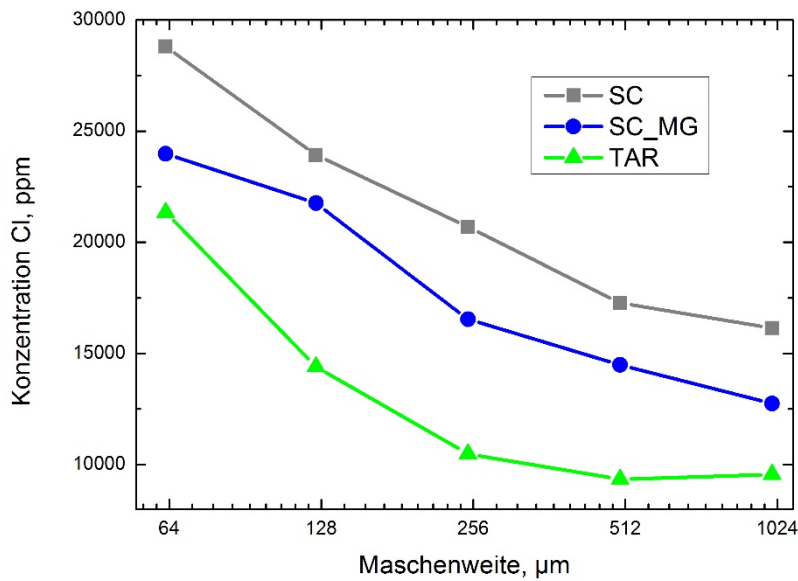


Abb. 16: Abhängigkeit der Cl-Konzentration von der Korngröße

Auch die S-Gehalte nehmen mit kleiner werdender Korngröße zu. Bis zu einer Korngröße von 250 μm steigen die S-Gehalte bei den Schlacken annähernd konstant und steigen bis zu einer Korngröße von 63 μm stark an. Bei Schlacke SC_MG und Tar von 11000 ppm und 9000 ppm bei einer Korngröße von 250 μm auf 24000 ppm bei einer Korngröße von 63 μm . Bei Schlacke SC von 11000 ppm bei einer Korngröße von 500 μm auf 15500ppm bei einer Korngröße von 63 μm (Abb. 17).

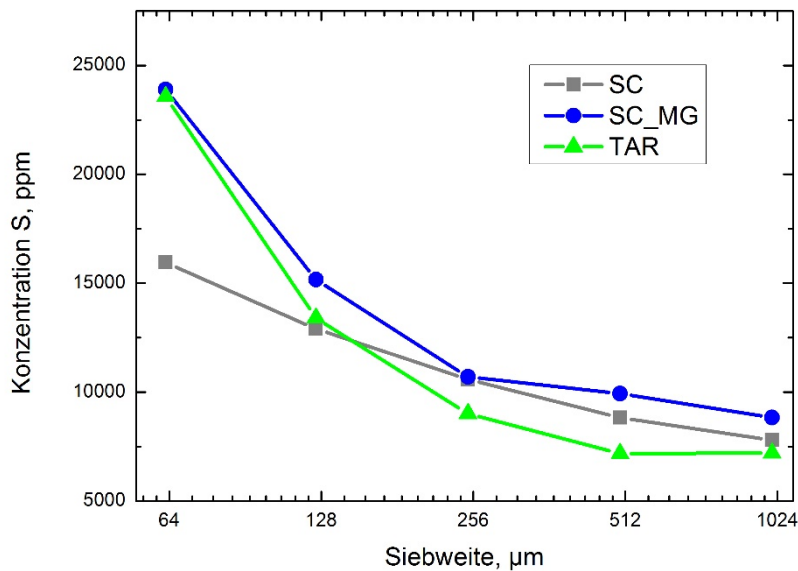


Abb. 17: Abhängigkeit der S-Konzentration von der Korngröße

b.3. Mineralogische Charakterisierung der Phasen

b.3.1. Röntgenpulverdiffraktometrie

Der röntgenographisch bestimmte mineralogische Phasenbestand für die Siebfraktion <63µm der Schlacke SC ist charakterisiert durch die vorherrschenden Phasen Quarz, Calcit, Anhydrit und die untergeordneten Phasen Larnit, Periklas, Sodalit, Zinkit, Hämatit, Spinell; Für Schlacke SC_MG durch die vorherrschenden Phasen Quarz, Calcit, Anhydrit, und die untergeordneten Phasen Larnit, Perovskit, Enstatit, Hämatit, Spinell, Willemit, Ettringit (Abb. 18). Für Schlacke BSR durch die vorherrschenden Phasen Quarz, Calcit, und die untergeordneten Phasen Hedenbergit, Hämatit, Fayalit, Perovskit, Larnit. Alle Pulverdiffraktogramme zeigen einen Buckel im Untergrund, der durch den in der Schlacke enthaltenen Glasanteil hervorgerufen wird. Das Maximum des Buckels liegt bei einem Streuwinkel von 28° 2Theta, was der Si-O-Bindungslänge von 3 Å entspricht, dies impliziert die Anwesenheit von silikatischen Gläsern. Zusätzlich zeigen die Schlacken einen etwas kleineren Buckel im höheren 2Theta Bereich, der auf das Vorhandensein von eisenreichen Gläsern hindeutet. Die Kontur der Röntgenreflexe lassen darauf schließen, dass bis auf Quarz und Calcit die Phasen schlecht kristallisiert sind. Die Zuordnung der Röntgenreflexe ist aufgrund des stark heterogenen Materials und der starken Überlappung von Reflexlagen der einzelnen Phasen nur zum Teil uneindeutig. Die Reflexüberlagerungen und die geringen Gehalte der einzelnen Phasen im einstelligen Prozentbereich machten eine Identifikation der untergeordneten Phasen und der Pb- und Zn-führenden Phasen kaum möglich.

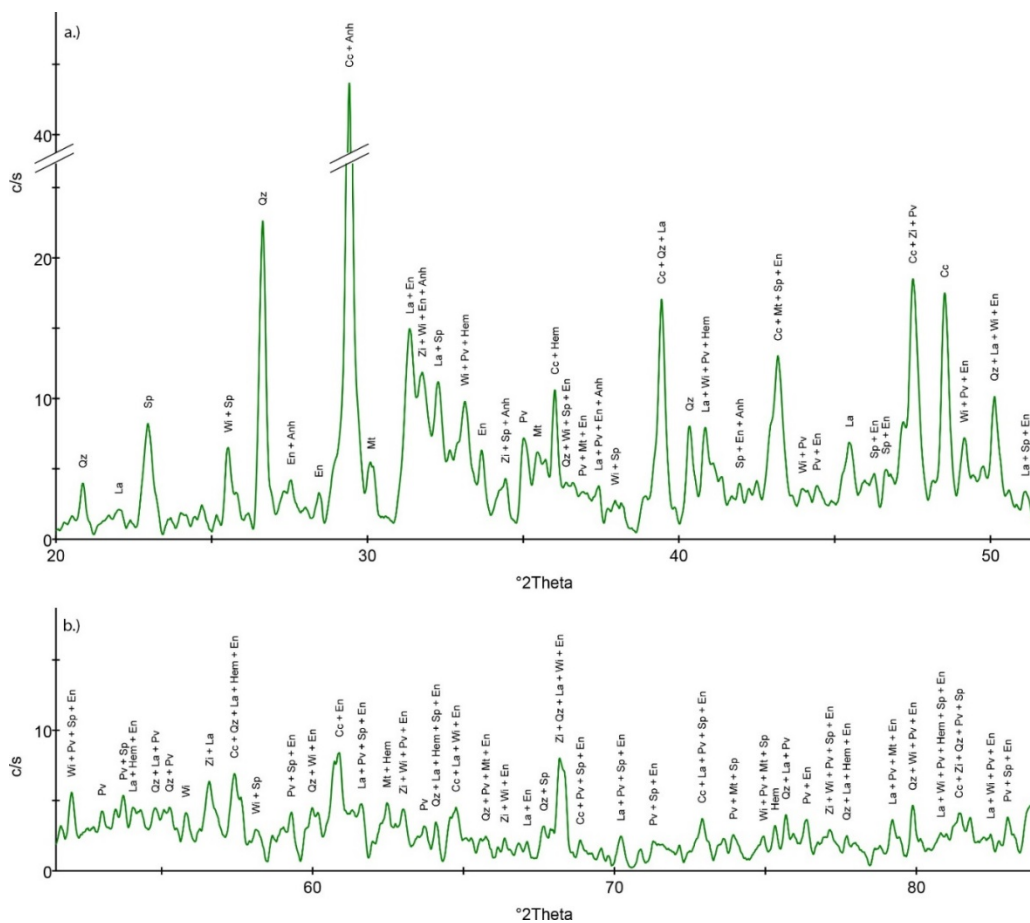


Abb. 18: Röntgendiffraktogramm Schlacke SC_MG

b.3.2. Mikrosondenanalyse

Da die Zn- und Pb-führenden Phasen röntgenographisch nicht eindeutig nachgewiesen werden konnten, wurden Analysen mit der Elektronenstrahlmikrosonde durchgeführt. Die Ergebnisse sind exemplarische für Schlacke SC_MG in Abb. 19 -24 und SC_F in Abb. 25 und 26 dargestellt. Ein 40 x 40 µm großer Bereich wurde jeweils für ein Elementmapping genutzt. In den Elementverteilungsbildern werden die Elemente gezeigt, die zur Phasenidentifizierung erforderlich waren.

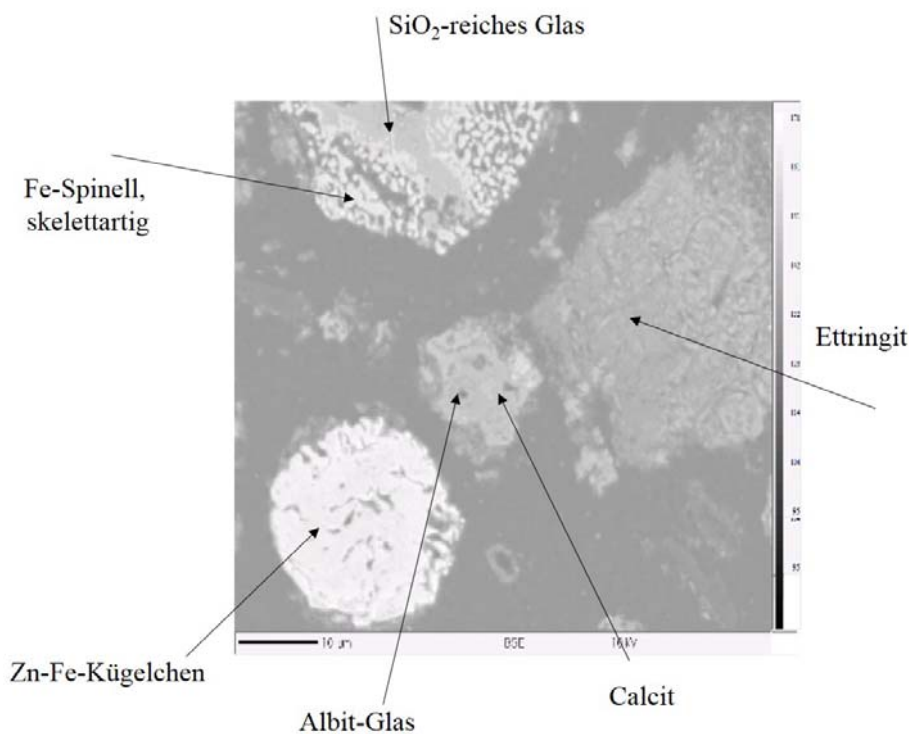


Abb. 19: Rückstreuelektronenbild, Schlacke SC_MG

In Schlacke SC_MG konnten Fe-Zn-Legierungen mit variablen Gehalten an Zn, als Zn-führende Phase identifiziert werden. Die Legierungen liegen, wie auch in den Abb.19 und 20 zu erkennen, immer in runder Form vor. Die sphärische Form ist typisch für die Erstarrungsprodukte von Schmelzen. Die chemische Zusammensetzung ist innerhalb des Kügelchens nicht gleichbleibend. Der Zn-Gehalt steigt vom Kern, mit 6-8 Gew-% Zn, zum Rand stark an. Im Randbereich des Kügelchens erreicht der Zn-Gehalt über 20 Gew-%. Dies ist auch den Elementverteilungsbildern in Abb. 20c. und 20h. zu entnehmen. In der oberen rechten Seite der Abb. 19 und 20 ist ein SiO₂-reiches Glas mit skelettartigen Fe-Spinell zu sehen. Die mittelgraue Phase auf der rechten Bildseite (Abb. 19 und 20) wurde aufgrund ihrer Stöchiometrie als Ettringit identifiziert, in der Mitte der Abb. 19 und 20 ist ein Calcitkorn und ein Schmelzkügelchen mit albitischer Zusammensetzung analysiert worden.

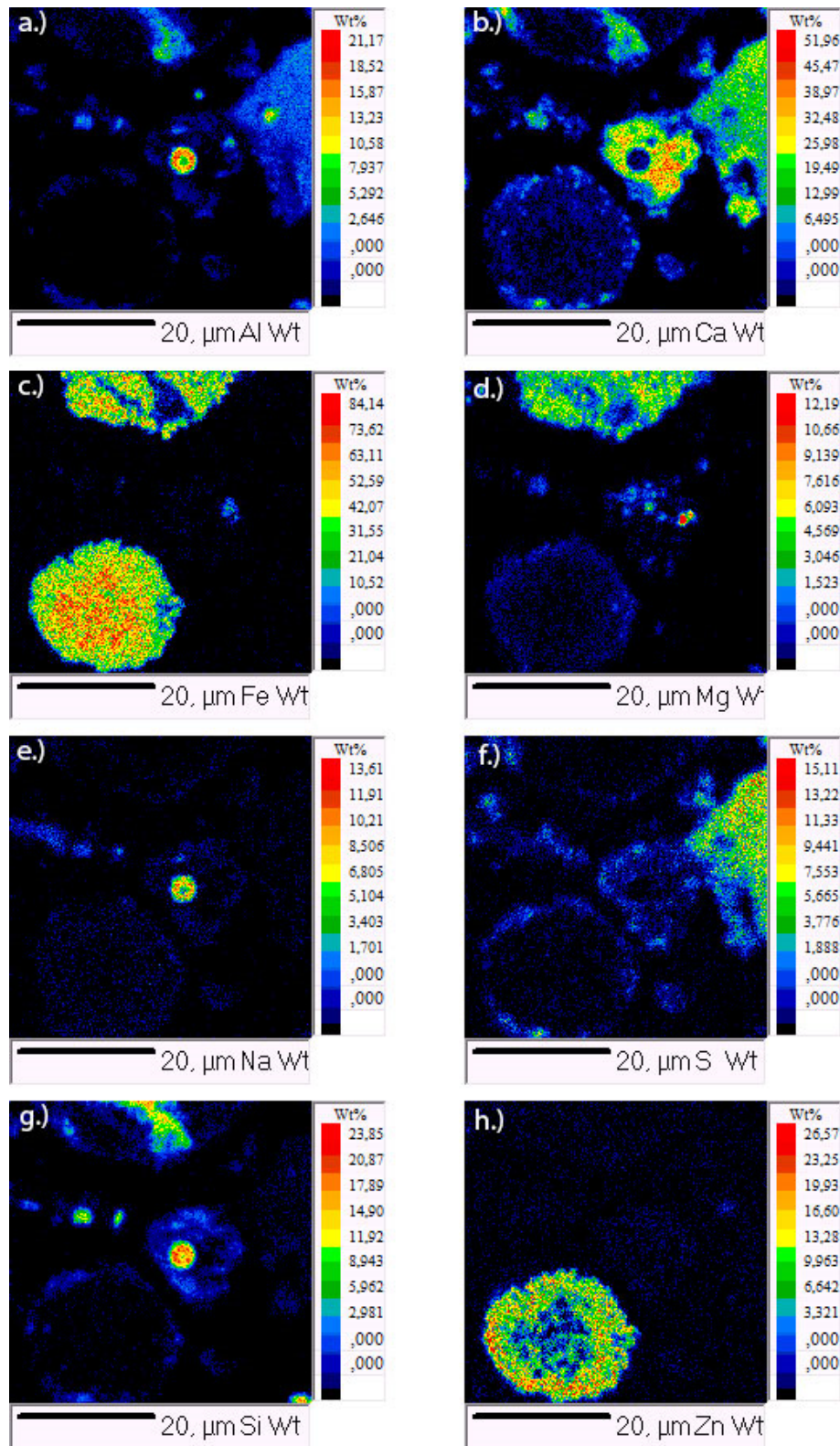


Abb. 20: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (20a), Ca (20b), Fe (20c), Mg (20d), Na (20e), S (20 f), Si (20g) und Zn (20h)

In Schlacke SC_MG wurden ebenfalls die Minerale Hämatit und Klinopyroxen identifiziert (Abb. 21 und 22). Aus der skelettartigen Struktur des Hämatit kann geschlossen werden, dass es sich bei Hämatit um eine Neukristallisation handelt. Klinopyroxen kristallisiert, wie in Abb. 21 und 22 zu erkennen, aus silikatischen Gläsern aus.

Das kantige Bruchstück im oberen Drittel der Abb. 21 und 22 ist Na-haltiges Glas. Es handelt sich hierbei um gewöhnliches Flaschenglas und wird als sogenannter Durchläufer bezeichnet. Im unteren Bildrand von Abb. 21 und 22 wurde Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) analysiert. Die Struktur der Ettringitnadeln lassen auf eine Neubildung oder eine Devitrifizierung schließen.

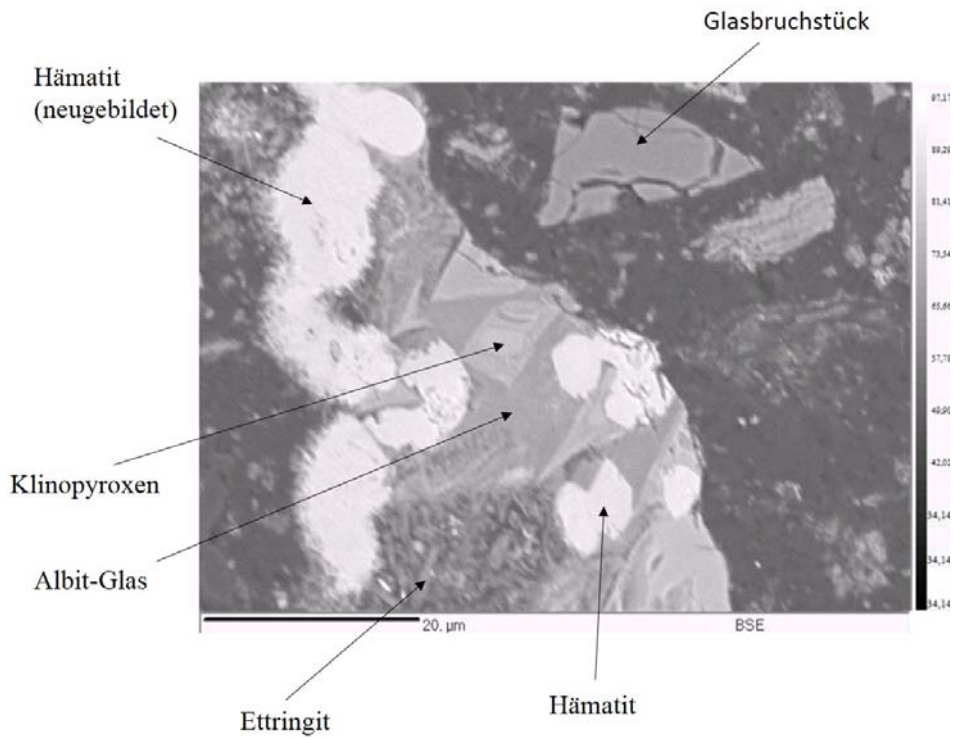


Abb. 21: Rückstreuelektronenbild der Schlacke SC_MG

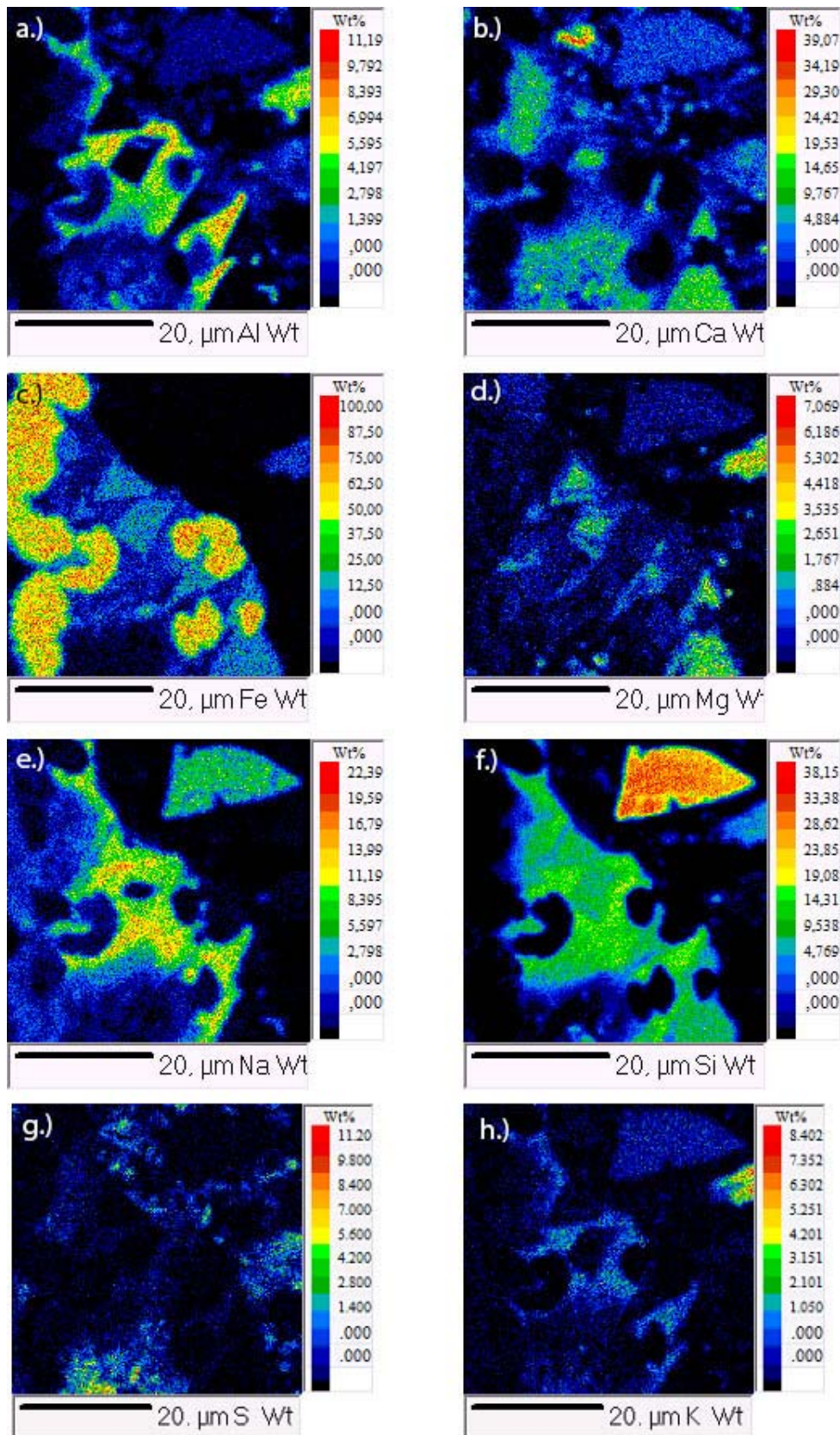


Abb. 22: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (22a), Ca (22b), Fe (22c), Mg (22d), Na (22e), Si (22f), S (22g) und K (22h)

Abb. 23 zeigt ein weiteres Elektronenrückstreubild von Schlacke SC_MG. Wie bereits in Abb. 19 und 20 ist ein Fe-Zn-Kügelchen zu erkennen. Die Gehalte an Zn sind jedoch mit 5 bis maximal 12 Gew-% Zn deutlich geringer, und beschränken sich, wie auch Abb. 24 zu entnehmen, auf den äußersten Bereich des Kügelchens. Um das Kügelchen hat sich ein Anbacksaum aus Ettringit und Gips gebildet.

Zusätzlich wurde ein Ca-Zn-Karbonat als Zn-tragende Phasen identifiziert. Darüber hinaus wurden die Minerale Calcit und Yeelimit ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}(\text{SO}_4)$) in Schlacke SC_MG analysiert. Yeelimit ist ein weiß bis farbloses Mineral, das leicht hydratisiert und sich in Wasser zu Ettringit umwandelt. Um Calcit hat sich ein silikatischer Anbacksaum gebildet (Abb. 24). Im linken unteren Bereich der Abb. 23 sind skelettartig auskristallisierte Strukturen von Spinell in einer Silikat-Glasmatrix zu erkennen. Skelettstrukturen können durch die schnelle Abkühlung der Schlacke bei der Austragung entstehen. Im rechten oberen Bereich konnte NaCl identifiziert werden. Es ist deutlich die kubische Form von NaCl zu erkennen. Um das Calcitkorn hat sich ein silikatischer Anbacksaum gebildet.

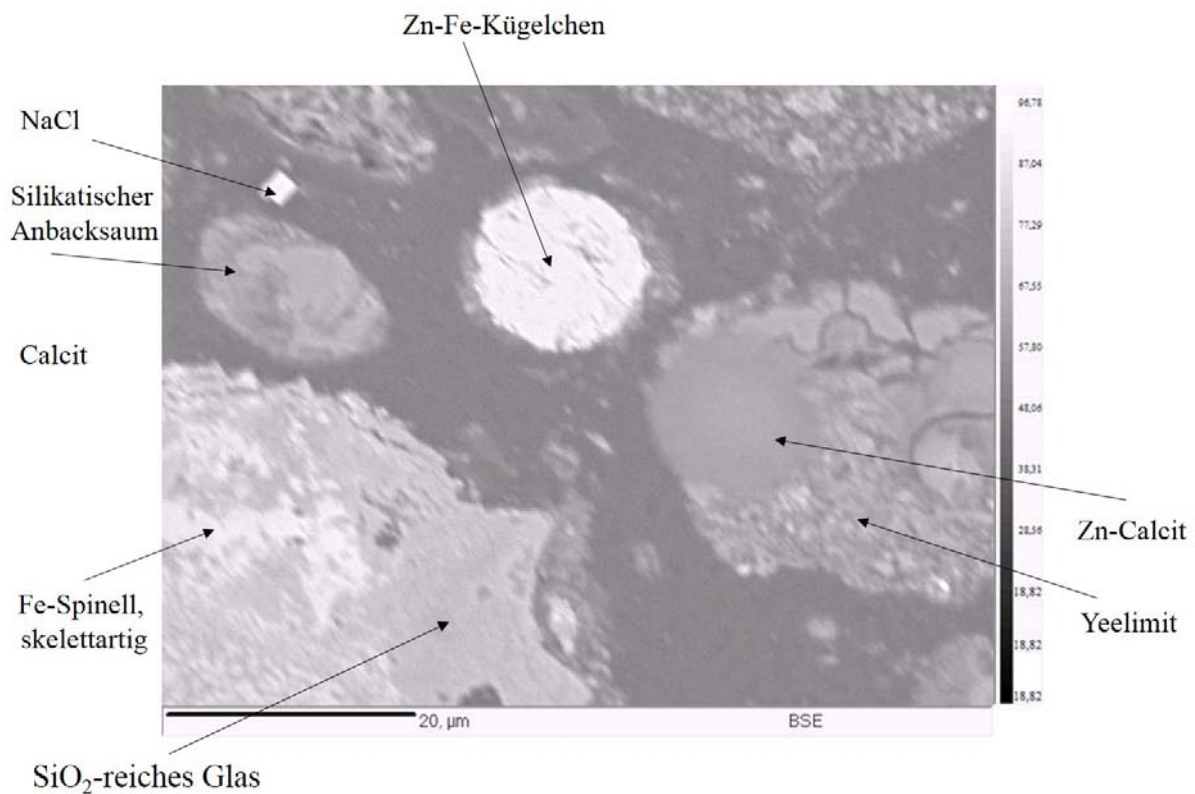


Abb. 23: Rückstreuelektronenbild der Schlacke SC_MG

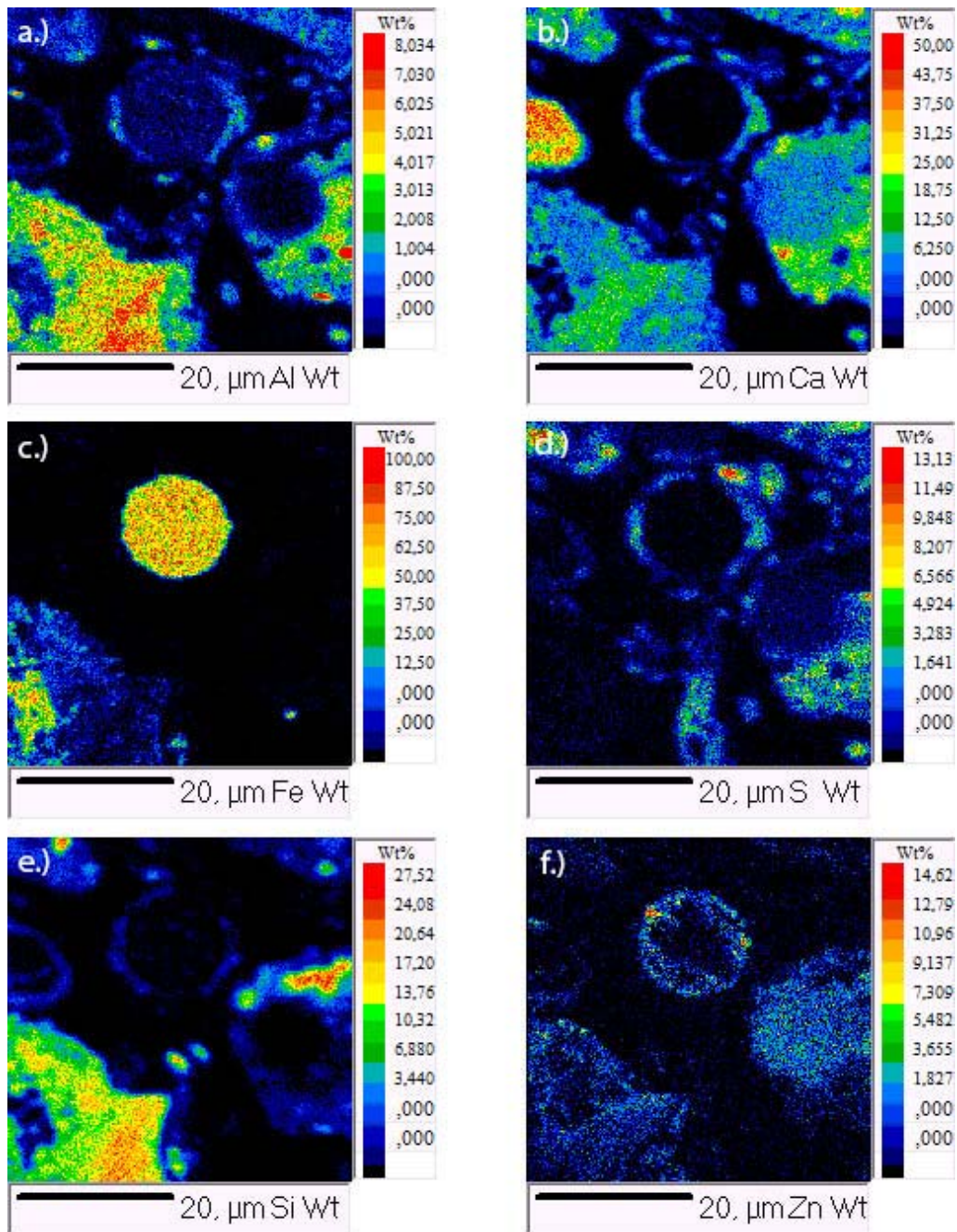


Abb. 24: Elementverteilungsbilder der der Schlacke SC_MG für die Elemente Al (24a), Ca (24b), Fe (24c), S (24d.), Si (24e) und Zn (24f)

Abb. 25 zeigt ein Rückstreuerelektronenbild von Schlacke SC_F. Es wurden die Minerale Zn-Larnit, Quarz und ein Mg-Ca-Silikat identifiziert. Zn-Larnit enthält durchschnittlich 13 Gew- % Zn. Bei Quarz handelt es sich um ein Durchläufermaterial. Bei dem Mg-Ca-Silikat, das sich zwischen den beiden oben genannten Phasen befindet, könnte es sich aufgrund der Lage und der Strukturen um ein Reaktionsprodukt handeln (Abb. 25 und 26).

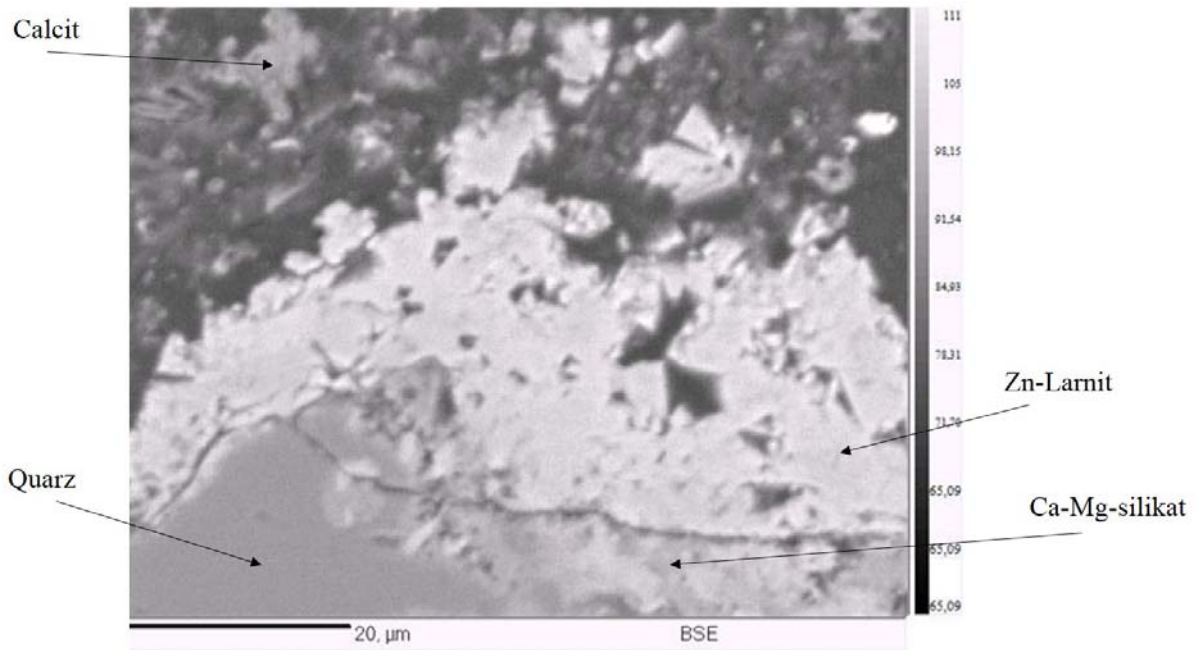


Abb. 25: Rückstreuelektronenbild der Probe SC_F

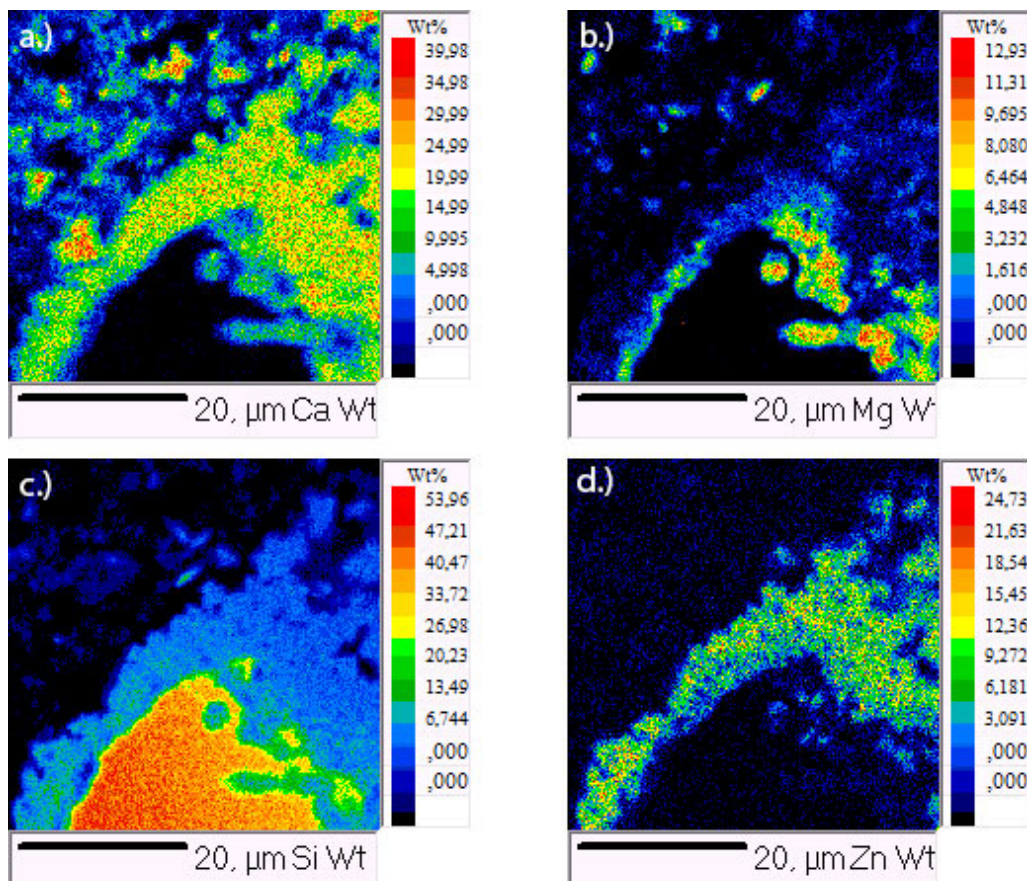


Abb. 26: Elementverteilungsbilder der Schlacke SC_F für die Elemente Ca (26a), Mg (26b), Si (26c) und Zn (26d)

In Schlacke SC_F wurde außerdem $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ identifiziert. $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ könnte sich aufgrund der Zusammensetzung der Gasphase im Ofenraum nach der Reaktion $2 \text{Zn} + 3 \text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 2 \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 + \text{N}_2$ gebildet haben.

Pb-haltige Phasen konnte in den Schlacken nur in Form von Pb-Metall und Plattnerit identifiziert werden.

b.3.3. Rasterelektronenmikroskop

Um einen besseren Eindruck über das Erscheinungsbild der einzelnen Phasen zu erhalten, wurden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gemacht. Diese sollen unter anderem die Oberflächenstrukturen und eventuelle Auf- oder Anwachsungen der Phasen zeigen. Die Aufnahmen wurden exemplarisch an den Feinstfraktionen $< 63 \mu\text{m}$ der Schlacken SC_MG und SC_MG_F durchgeführt.

Abb. 27 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Schlacke SC_MG.

Auffallend ist, dass auf den meisten Mineralen Anhaftungen von meist nur wenigen μm großen Partikeln zu erkennen sind. Durch die Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops wird bestätigt, dass lediglich wenige, frei bewegliche, nur wenige μm große Partikel in der Schlackeprobe SC_MG enthalten sind. So scheinen die meisten feinen Partikel sich mit größeren Aggregaten zu verbacken oder sich zumindest locker anzulagern.

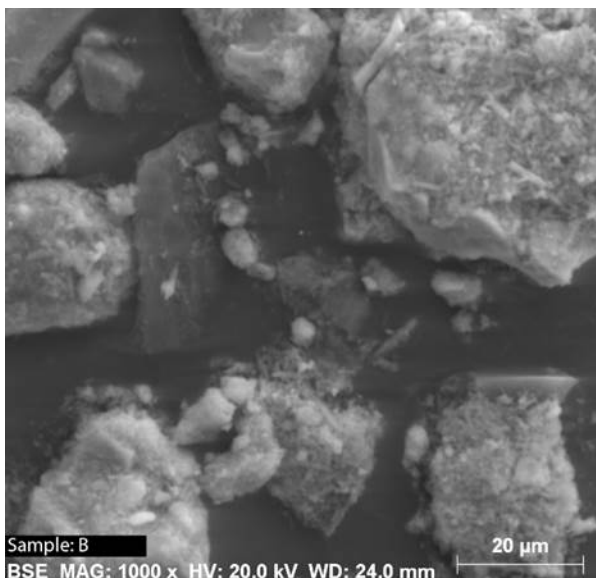


Abb. 27: Rasterelektronenmikroskop-Rückstreuelektronenbild der Schlacke SC_MG

Abb. 28 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Schlacke SC_MG_F. Beim Vergleich von Abb. 21 (Schlacke SC_MG) und Abb. 22 (Schlacke SC_MG_F) fällt deutlich auf, dass der Anteil, der nicht an anderen Mineraloberflächen anhaftenden Feinstpartikeln bei Schlacke SC_MG_F deutlich größer ist. Während die Oberflächen der Minerale in Schlacke SC_MG_F verhältnismäßig gleichförmig wirken, ist bei Schlacke SC_MG ein eher rauer Oberflächeneindruck zu gewinnen.

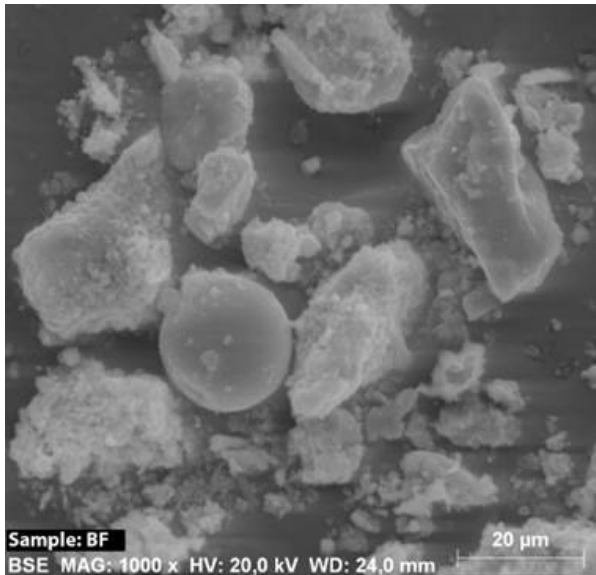


Abb. 28: Rasterelektronenmikroskop-Rückstreuerelektronenbild der Schlacke SC_MG_F

b.4. Ergebnisse der Hydrothermalexperimente

b.4.1. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge

Um einen ersten Eindruck zur Wirkungsweise der Säuren HCl und HNO₃ zu erhalten wurde ein Hydrothermalexperiment mit konzentrierten Säuren durchgeführt. Hierfür wurde 0,1 g der Probe SC mit 12 ml Säure im geschlossenen Autoklaven für 120 Minuten einer Temperatur von 110°C ausgesetzt. Bei diesen Versuchsbedingungen ist die Löslichkeit von Zn und Pb bei Verwendung von HCl höher als bei Verwendung von HNO₃. Der gelöste Anteil an Zn mit HCl liegt um 12% höher als der gelöste Anteil bei Verwendung von HNO₃. Der gelöste Anteil an Pb mit HCl liegt um 5% höher als der gelöste Anteil bei Verwendung von HNO₃ (Abb. 29)

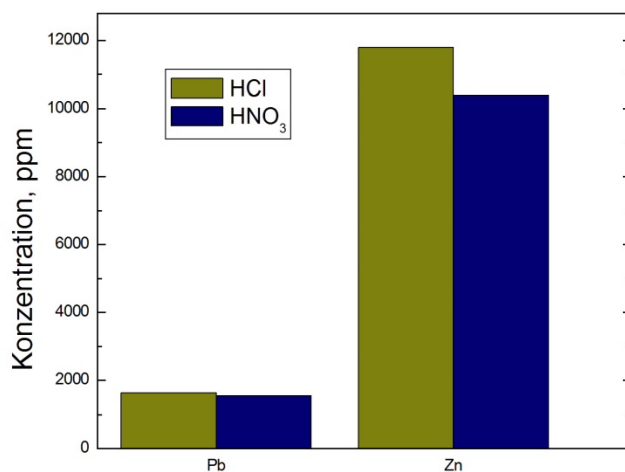


Abb. 29: Konzentration von Pb und Zn der Schlacke SC, bei Verwendung von unverdünnter HCl und HNO₃

Da in der Praxis nicht mit konzentrierten Säuren gearbeitet werden kann, wurden die Säuren auch in unterschiedlichen Verdünnungen getestet. Dafür wurden in 300 µl Abständen HCl und HNO₃ zu jeweils 1 g der Probe SC hinzugegeben. Die gesamte Flüssigkeitsmenge betrug in allen Autoklaven 16,5 ml, um gleiche Feststoff/Flüssigkeitsverhältnisse von 1/16,5 zu erhalten. Zu (16,5 ml - x ml Säure) H₂O wurde x ml Säure hinzugegeben. Die Versuchstemperatur war 110°C, die Versuchsdauer betrug 170 min.

In Abb. 30 ist zu erkennen, dass sich die Löslichkeit von Pb bei niedrigen Säuremengen bis zu 1200 µl von HCl und HNO₃ nahezu nicht unterscheidet. So wird bei einer Zugabe von 1200 µl HCl oder HNO₃ gleichermaßen 50 % Pb herausgelöst. Bei höheren Säuregehalten erhöhen sich die löslichen Anteile durch Verwendung von HNO₃ auf bis zu 78 %, während sie bei HCl Zugabe bei 68 % liegen. Die Kurve zeigt bei niedriger Zugabemenge beider Säuren einen steileren Anstieg. Die Kurve verläuft letztlich in eine Sättigung.

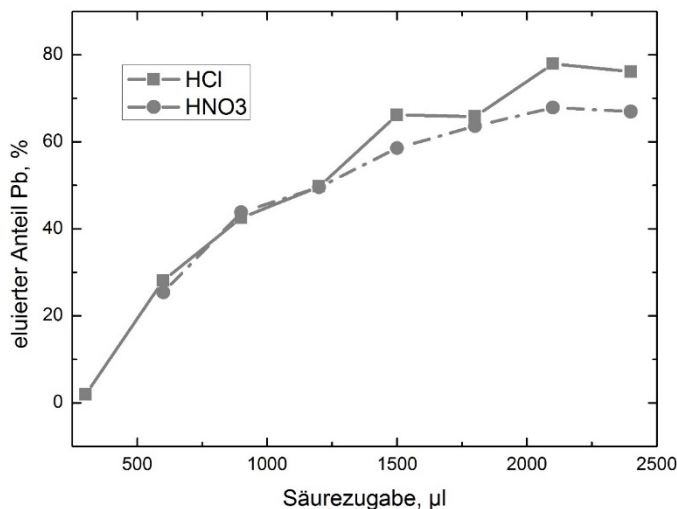


Abb. 30: Eluierter Anteil von Pb in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge (Schlacke SC)

Im Gegensatz zum ähnlichen Lösungsverhalten von Pb unter dem Einfluss der Säuren HCl und HNO₃ zeigt Abb. 31 eine unterschiedliche Mobilisierbarkeit von Zn. Die Unterschiede sind hier vor allem bei Addition von niedrigen Mengen an Säure zu erwähnen. So zeigt eine Zugabe von 600 µl HNO₃ einen eluierten Anteil von 65 %, bei Zugabe von 600 µl HCl beträgt der eluierte Anteil nur 36 %

Die HNO₃-Kurve zeigt ein Maximum bei einer Addition von 1800 µl während die HCl-Kurve stetig ansteigt. Eluierte Anteile von 70 % an Zn deuten auf eine gute Extrahierbarkeit in verdünnter Säure hin.

Während die Zugabe von HNO₃ bei niedrigen Zugabemengen im Allgemeinen als effektiver scheint, können bei höheren Säuremengen durch HCl bessere Lösungserfolge erzielt werden.

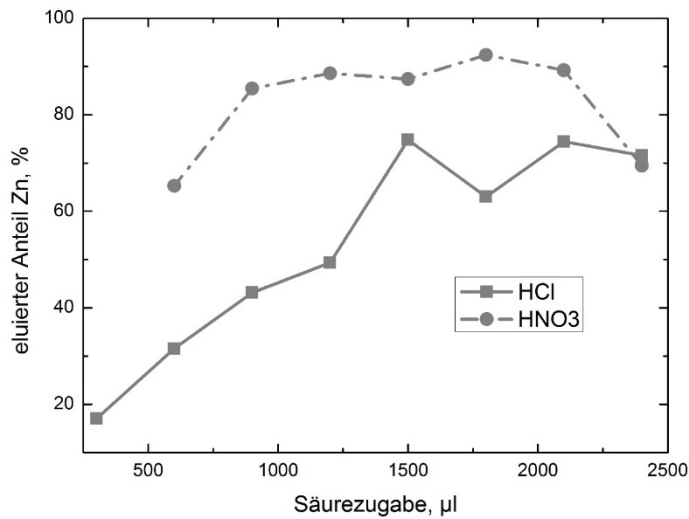


Abb. 31: Elutierter Anteil von Zn in Abhängigkeit von der Säurezugabemenge (Schlacke SC)

Um die Wirkungsweise der Säuren HCl und HNO₃ besser zu verstehen und Abhängigkeiten zu erkennen, wurden für die Eluate die pH- und die Eh-Werte gemessen.

Abb. 32 und 33 zeigen, dass sich die, durch die Säuren HCl und HNO₃ erzeugten, im Eluat gemessenen pH-Werte im Gegensatz zu den Eh-Werten nur geringfügig unterscheiden. Mit zunehmender Säurezugabe fällt der pH-Wert ab (Abb. 32).

Die Eluate der Schlacke SC, die mit HCl versetzt wurden, zeigen durchgehend einen geringeren Eh-Wert als die, die mit HNO₃ behandelt wurden. Die Eh-Werte der HCl-Kurve variieren zwischen 316 und 465 mV während der Eh-Wert für eine Zugabe von 600 µl HNO₃ bereits zu einem Wert von 572 mV führt (Abb. 33). Die mit HNO₃ behandelte Schlacke SC zeigt demnach ein stärker oxidatives Verhalten als mit HCl angesäuerte Schlacken SC. Beide Kurven steigen mit zunehmender Säureaddition stetig an.

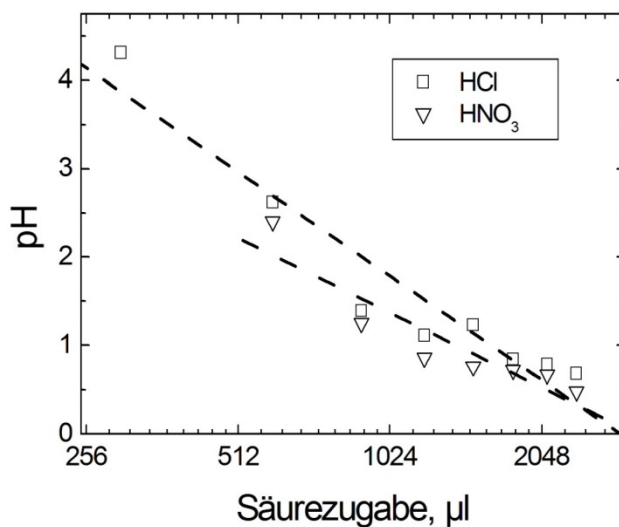


Abb. 32: pH-Werte in Abhängigkeit von der Säureaddition (Schlacke SC)

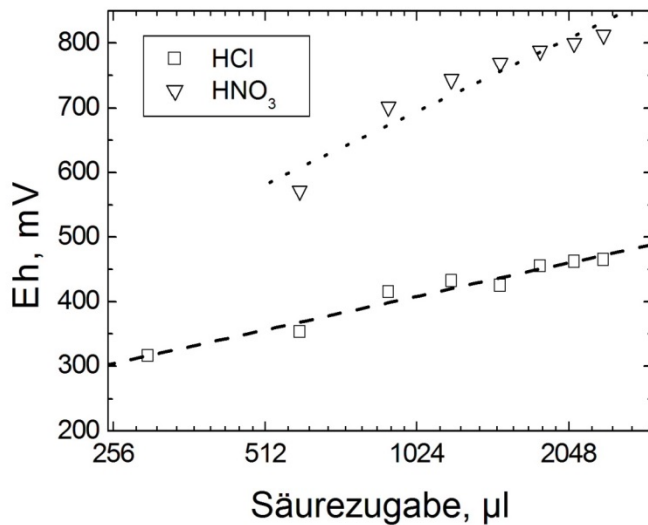


Abb. 33: Eh-Werte in Abhängigkeit von der Säureaddition (Schlacke SC)

In Abb. 34 sind die, durch die Zugabe von HCl bzw. HNO₃ erreichten pH-Werte in Abhängigkeit von den Eh-Werten dargestellt. Mit kleiner werdenden pH-Werten steigen die Eh-Werte an, wobei die Steigung der Geraden bei Verwendung von HCl kleiner ist, wie bei Verwendung von HNO₃.

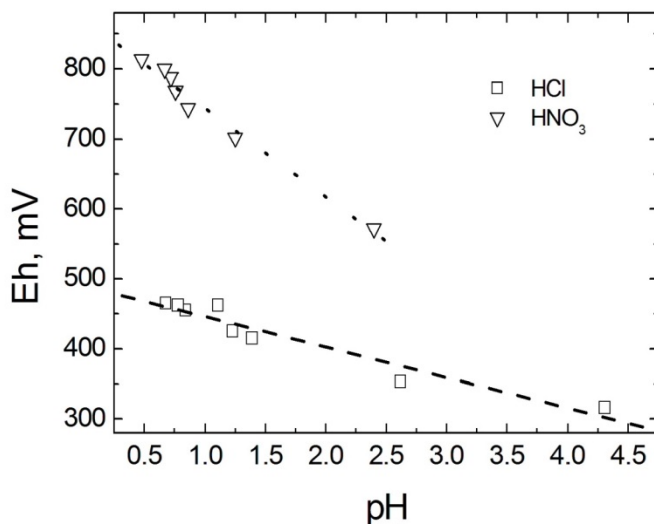


Abb. 34: Eh-Werte in Abhängigkeit von pH-Werten (Schlacke SC)

b.4.2. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Temperatur

Zur Bestimmung der Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Temperatur wurden Hydrothermalexperimente mit 170 minütiger Dauer durchgeführt. Die Schlackenmenge von 1g SC, SC_F, SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F wurde mit 15 ml H₂O + 1,5 ml HCl versetzt. Die Ergebnisse für die Eluierbarkeit von Pb in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Abb. 35 und 36 die Ergebnisse für Zn in Abb. 37 und 38 dargestellt.

Bei einer Versuchstemperatur von 95°C liegt der eluierte Anteil an Pb für Schlacke SC bei 34%, bei Schlacke SC_F liegt der eluierte Anteil bei 51%. Durch den Fragmentierungsprozess konnte der eluierte Anteil um 50 % erhöht werden. Der eluierte Anteil an Pb für Schlacke SC_MG liegt bei 42%, der von Schlacke SC_MG_F bei 49%. Durch den Fragmentierungsprozess hat sich die Eluierbarkeit nur um 16% erhöht. Für Schlacke BSR und BSR_F liegen die eluierten Anteile an Pb bei ca. 54% bzw. bei 53%, der Fragmentierungsprozess hat demnach keinen Einfluss auf die Eluierbarkeit von Pb bei einer Versuchstemperatur von 95°C.

Bei einer Versuchstemperatur von 110°C liegt der eluierte Anteil an Pb für Schlacke SC bei 41%, der für Schlacke SC_F bei 66%. Wie schon bei einer Versuchstemperatur von 95°C konnte auch bei 110°C der eluierte Anteil durch den Fragmentierungsprozess erheblich erhöht werden. Der eluierte Anteil an Pb für Schlacke SC_MG liegt bei 46%, der von Schlacke SC_MG_F bei 65%. Die Erhöhung des Feinanteils durch den Fragmentierungsprozess bewirkt eine Erhöhung des eluierten Anteils um 40%. Für Schlacke BSR wird mit einem eluierten Anteil von 87% der höchste Anteil an Pb im Vergleich mit den Temperaturen 95°C und 130°C erreicht. Für Schlacke BSR_F hat der Fragmentierungsprozess einen negativen Einfluss auf die Eluierbarkeit von Pb. Aus Schlacke BSR_F konnten lediglich 51% eluiert werden.

Bei einer Versuchstemperatur von 130°C liegt der eluierte Anteil an Pb für Schlacke SC bei 38%, der für Schlacke SC_F bei 63%, durch den Fragmentierungsprozess ergibt sich eine Erhöhung des eluierten Anteils an Pb um 66%. Für Schlacke SC_MG liegt der eluierte Anteil an Pb bei 35%, der von Schlacke SC_MG_F liegt bei 75%, dies ist eine Erhöhung von 114% durch den Fragmentierungsprozess. Für Schlacke BSR liegt der eluierte Anteil an Pb bei 64%, für Schlacke BSR_F bei 56%, der Fragmentierungsprozess hat für die Schlacke BSR_F eine Erniedrigung des eluierten Anteils an Pb von 15% zur Folge.

Während, wie in Abb. 35 und 36 zu erkennen, die maximalen Anteile an gelöstem Pb für Schlacke SC_MG_F mit 75% bei einer Versuchstemperatur von 130°C erreicht wurde, konnte bei Schlacke SC_MG bei dieser Temperatur nur 35% an Pb eluiert werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Versuchsparameter Temperatur für jede einzelne Schlacke optimiert werden muss, um die maximal zu eluierenden Anteile zu erreichen

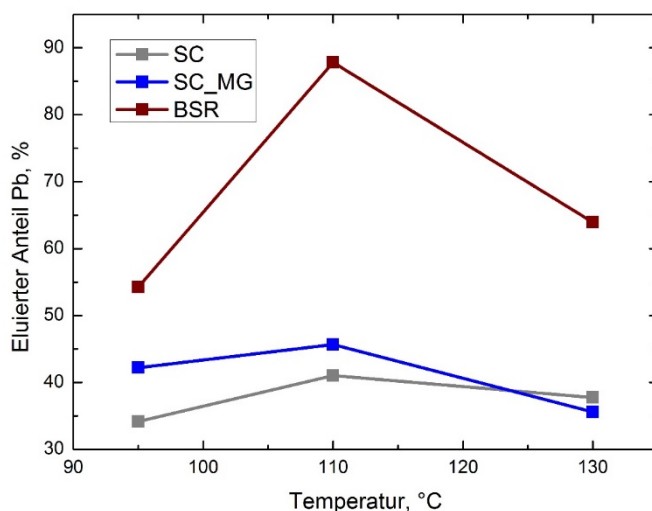


Abb. 35: Eluierter Anteil an Pb in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC, SC_MG und BSR

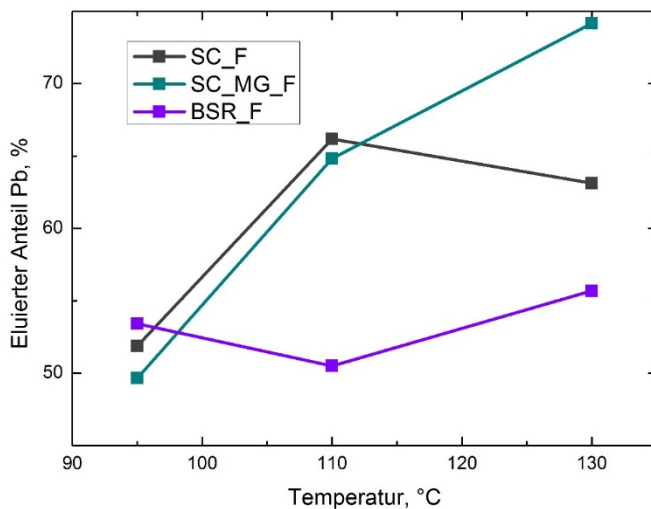


Abb. 36: Eluierter Anteil an Pb in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC_F, SC_MG_F und BSR_F

Abb. 36 und 37 zeigen die Temperaturabhängigkeit des eluierten Anteils an Zn für die Schlacken SC, SC_F, SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F.

Bei einer Versuchstemperatur von 95°C liegt der eluierte Anteil an Zn für Schlacke SC bei 46%, der für Schlacke SC_F bei 64%, der Fragmentierungsprozess bewirkt eine Steigerung der Eluierbarkeit an Zn von 18%. Für Schlacke SC_MG liegt der eluierte Anteil an Zn bei 49%, der für Schlacke SC_MG_F bei 71%, die Eluierbarkeit hat sich durch den Fragmentierungsprozess um 22% erhöht. Der eluierte Anteil an Zn für Schlacke BSR liegt bei 71%, der für Schlacke BSR_F bei 83%. Durch den Fragmentierungsprozess ergibt sich eine Steigerung von 16%.

Bei einer Versuchstemperatur von 110°C liegt für Schlacke SC der eluierte Anteil an Zn bei 46%, der für Schlacke SC_F bei 74%, dies entspricht einer Steigerung durch die Erhöhung des Feinanteils mittels elektrodynamischer Fragmentierung um 60%. Für Schlacke SC_MG liegt der eluierte Anteil an Zn bei 42%, für Schlacke SC_MG_F liegt er bei 72%, auch für diese Schlacke ergibt sich durch den Fragmentierungsprozess ein Erhöhung des eluierten Anteils um 71%. Für Schlacke BSR liegt der eluierte Anteil an Zn bei 87%, für BSR_F bei 65%, der Fragmentierungsprozess bewirkt eine Erniedrigung des eluierten Anteils an Zn um 25%.

Bei einer Versuchstemperatur von 130°C liegt der eluierte Anteil an Zn für Schlacke SC bei 42%, für Schlacke SC_F bei 80%, dies ist eine Erhöhung des eluierten Anteils durch den Fragmentierungsprozess um 90%. Für Schlacke SC_MG liegt der eluierte Anteil an Zn bei 40%, für Schlacke SC_MG_F bei 76%, durch den Fragmentierungsprozess erhöht sich der eluierte Anteil an Zn um 90%. Für Schlacke BSR liegt der eluierte Anteil an Zn bei 80%, für Schlacke BSR_F bei 78%, es ergibt sich eine geringfügige Abnahme der Eluierbarkeit von Zn von 2%.

Während der Temperaturanstieg von 95°C auf 130°C einen geringen Rückgang von 46% auf 42% des eluierten Anteiles an Zn bei Schlacke SC bewirkt, nimmt mit steigender Temperatur der eluierte Anteil von Zn für Schlacke SC_F von 64% auf 81% zu. Bei Schlacke SC_MG nimmt der eluierte Anteil an Zn mit steigender Temperatur von 49% auf 39% ab, der eluierte Anteil Zn für Schlacke SC_MG_F nimmt mit steigender Temperatur geringfügig von 71% auf 76% zu. Schlacke BSR verhält sich entgegengesetzt zu Schlacken SC und SC_MG, bei Schlacke BSR

nimmt mit steigender Temperatur der eluierte Anteil an Zn von 71% auf 80% zu. Der eluierte Anteil an Zn für Schlacke BSR_F nimmt hingegen mit steigender Temperatur von 83% auf 78% ab.

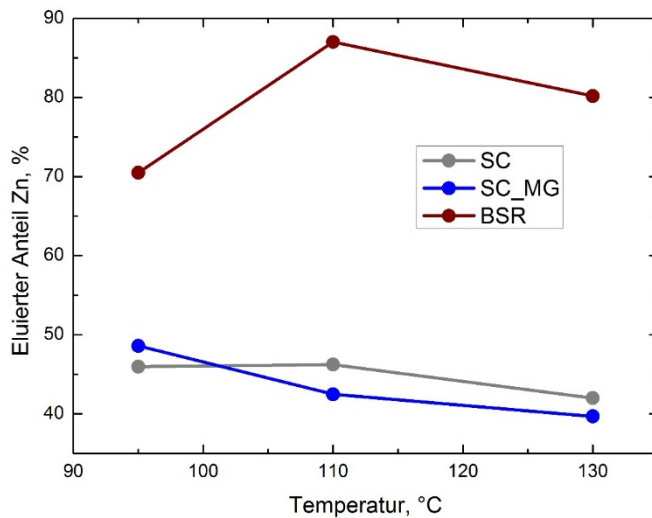


Abb. 37: Eluierter Anteil an Zn in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC, SC_MG und BSR

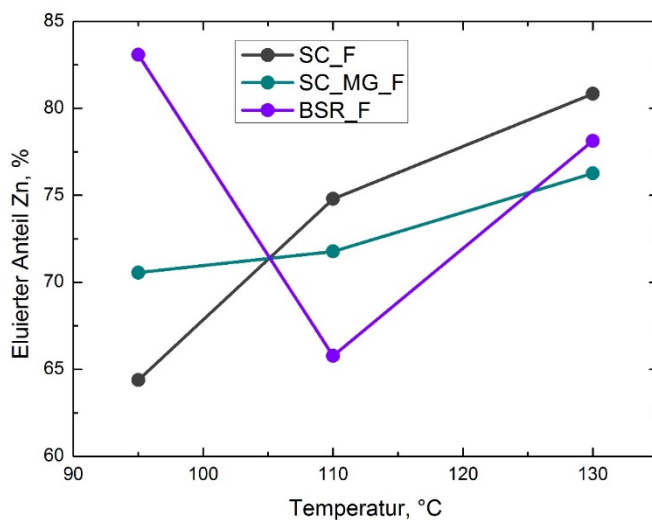


Abb. 38: Eluierter Anteil an Zn in Abhängigkeit von der Temperatur für Schlacke SC_F, SC_MG_F und BSR_F

b.4.3. Eluierbarkeit von Pb und Zn in Abhängigkeit von der Zeit

Für die Hydrothermalexperimente, mit denen der Einfluss der Zeit auf die Eluierbarkeit von Pb und Zn ermittelt werden sollten wurde 1g der Schlacken SC, SC_F, SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F mit 15 ml H₂O + 1,5 ml HCl versetzt, als Versuchstemperatur wurden 110°C eingestellt. Die Versuchsdauer betrug 45 min. bis 190 min. Die Ergebnisse zeigen Abb. 39 bis 41.

Der eluierte Anteil an Pb und Zn für Schlacke SC steigt mit zunehmender Versuchsdauer an (Abb. 39). Nach 45 min wird 37% Pb und 40% Zn herausgelöst, nach 195 min sind es 42% Pb und 46% Zn. Die Eluierbarkeit von Pb und Zn bei Schlacke SC_F ist wesentlich besser wie bei

Schlacke SC. Mit zunehmener Versuchsdauer steigt auch bei Schlacke SC_F der eluierte Anteil an Pb und Zn an. Nach 45 min wird 59% Pb und 62% Zn herausgelöst, nach 195 min sind es 75% Pb und 80% Zn (Abb. 39).

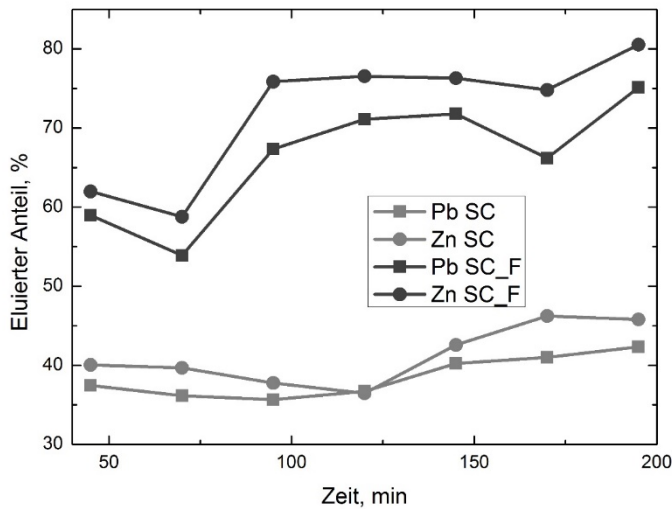


Abb. 39: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken SC und SC_F von der Zeit

Schlacke SC_MG und Schlacke SC_MG_F verhalten sich ähnlich, wie Schlacke SC und Schlacke SC_F (Abb. 40). Mit zunehmender Versuchszeit steigen die eluierten Werte für Pb und Zn an. Wobei die Eluierbarkeit von Schlacke SC_MG_F besser ist, wie bei Schlacke SC_MG. Der eluierten Anteile an Pb und Zn für Schlacke SC_MG liegen nach 45 min Versuchsdauer bei 46% und 45% nach 195 min Versuchsdauer bei 51% und 49%. Der eluierten Anteile an Pb und Zn für Schlacke SC_MG_F liegen nach 45 min Versuchsdauer bei 64% und 71% nach 195 min Versuchsdauer bei 71% und 77%.

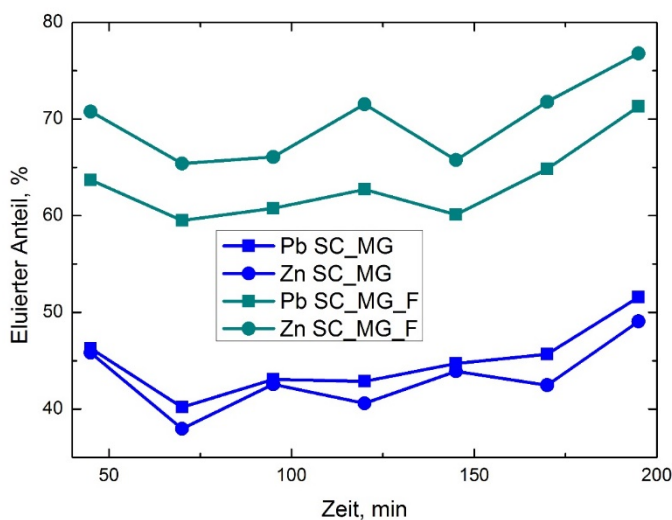


Abb. 40: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken SC_MG und SC_MG_F von der Zeit

In Abb. 41 ist das Eluierungsverhalten von Schlacke BSR und BSR_F dargestellt. Schlacke BSR und BSR_F verhalten sich anders wie Schlacke SC, SC_F, SC_MG und SC_MG_F. Während bei den Schlacken SC_F und SC_MG_F mehr Pb und Zn eluiert werden konnte, als bei ihren nichtfragmentierten Ausgangsschlacken SC und SC_MG, kann aus Schlacke BSR mehr Pb und Zn herausgelöst werden, wie bei Schlacke BSR_F. Nach 45 min Versuchsdauer kann aus Schlacke BSR 79% Pb und 83% Zn eluiert werden, aus Schlacke BSR_F konnten nach 45 min Versuchsdauer nur noch 51% Pb und 68% Zn eluiert werden. Nach 195 min Versuchsdauer waren es für Schlacke BSR 86% Pb und 87% Zn, für Schlacke BSR_F waren es 58% Pb und 70% Zn. Nach einer Versuchsdauer von 95 min gab es einen deutlichen Anstieg der eluierten Anteile auf 91% Pb und 98% Zn bei Schlacke BSR. Dies sind die höchsten eluierten Anteile, die bei allen durchgeführten Versuchsreihen erzielt werden konnten.

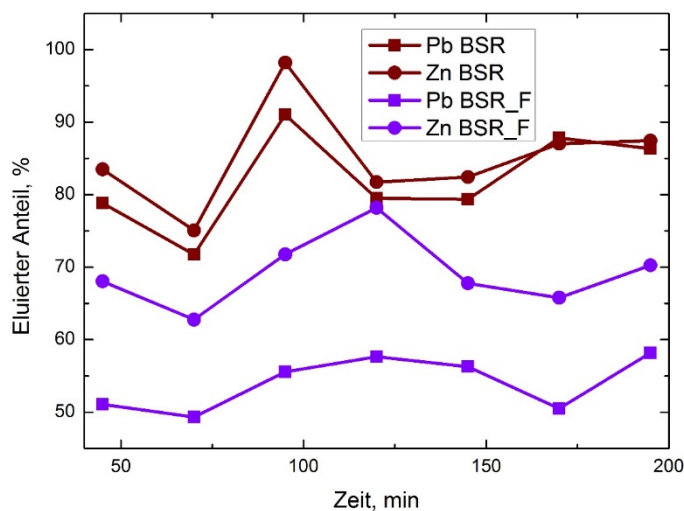


Abb. 41: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb und Zn der Schlacken BSR und BSR_F von der Zeit

In Abb. 42 sind die eluierten Anteile an Pb in Abhängigkeit von der Zeit für die Schlacken SC, SC_MG und BSR, zur Verdeutlichung gegenübergestellt. Die Eluierbarkeit für Pb der Schlacke SC liegt etwas niedriger wie die Pb-Eluierbarkeit von Schlacke SC_MG, wohingegen die Eluierbarkeit von Pb für Schlacke BSR deutlich höher liegt. Durch den Metallentfrachtungsprozess der Schlacke SC hat sich die Eluierbarkeit der Schlacke SC_MG nur um wenige % erhöht. Schlacke SC_MG wurde mit konventionellen Techniken, wie z.B. Magnetscheider, Sichtung usw. entfrachtet. Über die Entfrachtungstechnik der Schlacke BSR liegen keine Informationen vor. Die Aufbereitungsmethode der Schlacke könnte einen Einfluss auf das Lösungsverhalten haben. Schlacke SC wurde direkt nach dem Austrag aus dem Ofen dem Schlackebunker entnommen und hat somit keine Alterung erfahren. Schlacke SC_MG wurde vor der Entfrachtung 12 Wochen abgelagert. Die Schlacke BSR war 4 Wochen abgelagert. Der Alterungsprozess dürfte innerhalb der ersten 12 Ablagerungswochen keinen oder nur geringen Einfluss auf die Eluierbarkeit einer Schlacke haben.

Zum Vergleich ist in Abb. 43 die Eluierbarkeit von Pb der fragmentierten Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Auffällig ist der unruhige Kurvenverlauf der Eluierbarkeit in Abhängigkeit von der Zeit für Pb der fragmentierten Schlacken. Weiterhin fällt auf, dass nach 195 min Versuchsdauer die Eluierbarkeit der Schlacke SC_F mit 75% Pb am höchsten ist. Bei den nichtfragmentierten Ausgangsschlacken war die Eluierbarkeit von Pb der Schlacke SC mit 42% am niedrigsten. Die Erhöhung des

Feinanteils durch den Fragmentierungsprozess, bewirkt für Schlacke SC_F eine Erhöhung der Eluierbarkeit für Pb um 78% nach 195 min Versuchsdauer im Vergleich zur Ausgangsschlacke SC. Der Fragmentierungsprozess wirkt sich bei Schlacke BSR negativ aus. Eine Erklärung könnte sein, dass durch den Fragmentierungsprozess der Chemismus der Schlacke verändert wird (Tab. 2). Ein CaO/SiO₂-Verhältniss der Schlacke BSR_F von 0.9 könnte dazu führen, dass sich aufgrund des hohen SiO₂-Gehaltes der Schlacke BSR_F während der Hydrothermalversuche siliziumreiche Chelatkomplexe bilden, die die Eluierbarkeit negativ beeinflussen.

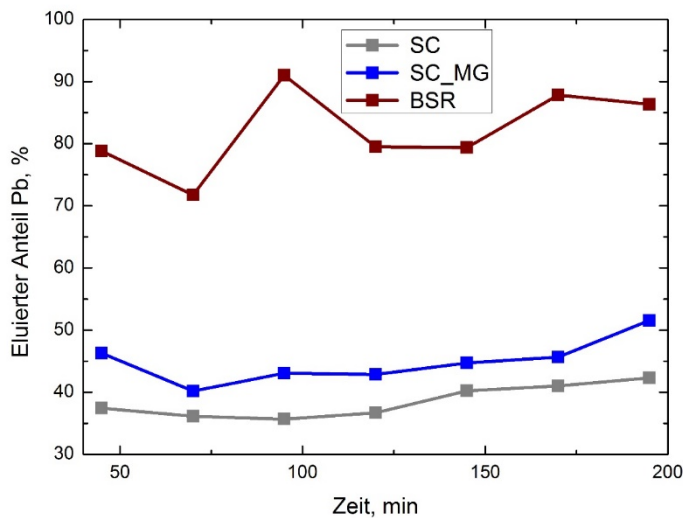


Abb. 42: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb der Schlacken SC, SC_MG und BSR von der Zeit

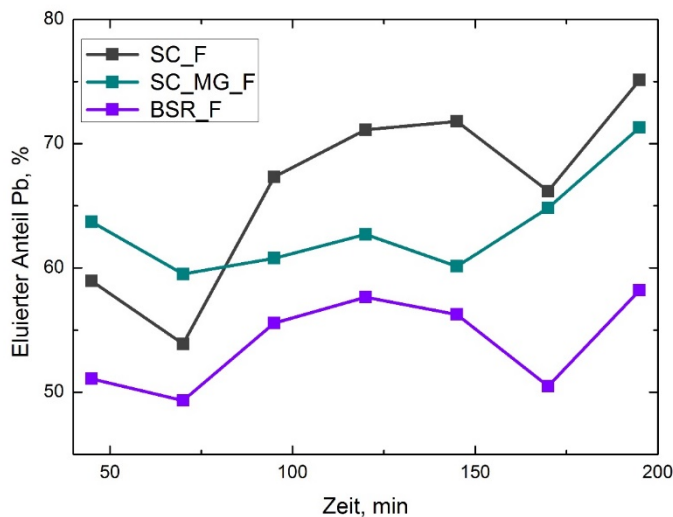


Abb. 43: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Pb der Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F von der Zeit

In Abb. 44 und 45 sind die eluierten Anteile an Zn in Abhängigkeit von der Zeit für die Schlacken SC, SC_MG und BSR, sowie für die Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F zur Verdeutlichung dargestellt.

Die Eluierbarkeit von Zn der Schlacken SC und SC_MG unterscheiden sich wie schon bei Pb nicht wesentlich voneinander, wohingegen die Eluierbarkeit von Zn für Schlacke BSR deutlich höher liegt (Abb. 44). Auch für die Eluierbarkeit von Zn scheint der Alterungsprozess der

Schlacke keinen Einfluss zu haben, die Fe- und NE-Entfrachtungprozesse könnte auch bei Zn eine Einflussgröße sein.

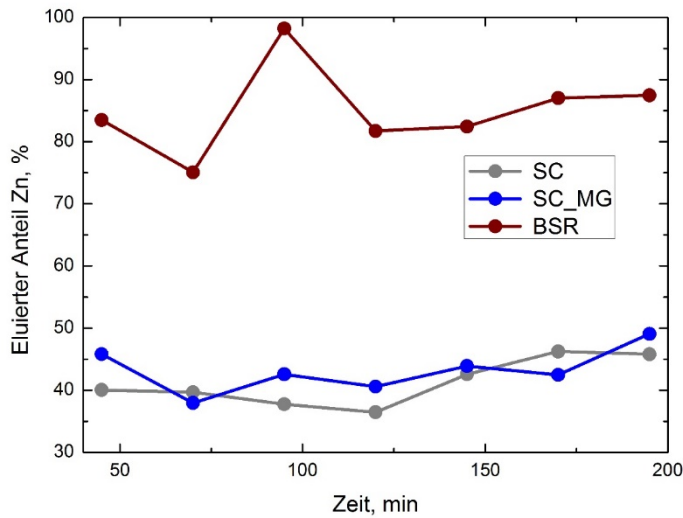


Abb. 44: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Zn der Schlacken SC, SC_MG und BSR von der Zeit

Abb. 45 zeigt die Eluierbarkeit von Zn in Abhängigkeit von der Zeit für Schlacke SC_F, SC_MG_F und BSR_F. Nach 45 min Versuchsdauer ist die Eluierbarkeit von Schlacke SC_F mit 61% im Vergleich am niedrigsten. Nach 95 min Versuchsdauer steigt der eluierte Anteil an Zn bei Schlacke SC_F auf 76% an und liegt im Vergleich über SC_MG_F und BSR_F. Wie schon bei der Eluierbarkeit von Pb ist auch für Zn nach 195 min Versuchsdauer die Eluierbarkeit von Zn am höchsten. Der Fragmentierungsprozess hat auch auf die Eluierbarkeit von Zn bei Schlacke BSR einen negativen Einfluß. Das niedrige CaO/SiO₂-Verhältniss von 0.9 könnte auch die Eluierbarkeit von Zn negativ beeinflussenden. Während des Fragmentierungsprozesses verändert sich der Gehalt von Cl. Vor der Fragmentierung lag der Cl-Gehalt bei 13895 ppm, nach der Fragmentierung liegt der Cl-Gehalt nur noch bei 2403 ppm.

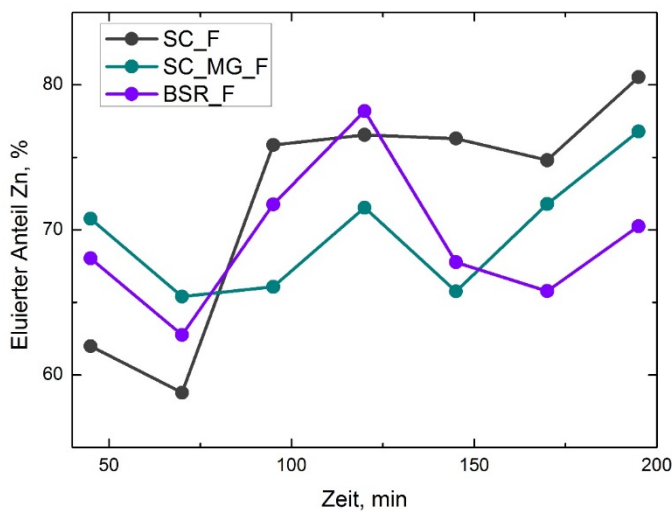


Abb. 45: Abhängigkeit der Eluierbarkeit von Zn der Schlacken SC_F, SC_MG_F und BSR_F von der Zeit

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Schlacken SC, SC_F, SC_MG, SC_MG_F, BSR und BSR_F für die Fraktion <63µm

	SC	SC_F	SC_MG	SC_MG_F	BSR	BSR_F
SiO ₂ , wt-%	13.59	18.01	164.18	14.99	20.88	26.74
Al ₂ O ₃ , wt-%	4.75	7.4	6.4	6.8	8.28	9.39
Fe ₂ O ₃ , wt-%	3.65	6.88	6.15	6.02	4.64	4.18
MnO, wt-%	0.45	0.18	0.33	0.3	0.18	0.14
MgO, wt-%	3.21	2.79	3.03	3.4	2.36	3.26
CaO, wt-%	34.83	24.83	28.29	28.02	27.47	25.02
Na ₂ O, wt-%	0.9	0.81	1.19	0.63	1.33	0.87
K ₂ O, wt-%	0.92	0.64	0.95	0.48	1.17	0.93
TiO ₂ , wt-%	2.02	1.79	1.92	1.67	1.53	1.25
P ₂ O ₅ , wt-%	0.619	0.839	0.608	0.626	0.87	0.824
As, ppm	23	23	23	23	23	23
Ba, ppm	4035	3082	3294	3130	1811	1426
Ce, ppm	59	97	65	44	82	83
Cl, ppm	27887	4721	24519	5454	13895	2403
Co, ppm	128	55	79	67	67	41
Cr, ppm	1791	2018	1880	1617	1389	1269
Cu, ppm	2432	3459	2972	2925	1693	2678
F, ppm	794	775	620	823	501	714
Hf, ppm	4	9	7	7	7	8
La, ppm	27	25	20	22	30	35
Mo, ppm	40	28	41	31	20	15
Nb, ppm	4	6	5	4	7	5
Ni, ppm	190	301	338	298	170	353
Pb, ppm	2899	4357	3115	3258	2559	2269
Rb, ppm	31	22	31	18	43	46
Sr, ppm	936	648	680	593	559	461
Th, ppm	44	42	50	42	38	30
V, ppm	232	195	211	181	171	145
Zn, ppm	4838	7338	9173	8723	4611	4200

b.5. Selektive Fällung von Pb und Zn

Bei der Neutralisation saurer Lösungen werden die Schwermetalle als Hydroxide ausgefällt (Tab. 3). Jedes Metallhydroxid hat einen spezifischen pH-Wert, bei dem die gelöst verbleibende Metallionenkonzentration den geringsten Wert hat. Da sich bei einer weiteren Zudosierung von Lauge einige Hydroxide (amphotere Hydroxide) wieder auflösen, muss bei der Schwermetallfällung auf die Einstellung eines geeigneten pH-Wertes geachtet werden

Die Fällungsexperimente wurden durch zu pipettieren von Na(OH) durchgeführt. Die Titrationskurve von 15ml H₂O + 1,5ml HCl zeigt Abb. 46. Der Äquivalenzpunkt liegt bei einem pH-Wert von 6,2. Im Vergleich zur Titrationskurve von 15 ml H₂O + 1,5 ml HCl ist in Abb. 46 auch die Titrationskurve eines BSR-Eluats dargestellt. Da durch Zugabe von Na(OH)

nacheinander Metallhydroxide ausfallen, gibt es für diese Kurve keinen bestimmaren Neutralisationspunkt. Als erstes fallen bei Zugabe von Na(OH) die dreiwertigen Metallhydroxide $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und $\text{Al}(\text{OH})_3$ aus. Danach fällt $\text{Cu}(\text{OH})_2$ aus, nachdem das ganze $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ausgefallen ist, gibt es einen Sprung im pH-Wert von 4,8 auf 5,4. Ab einem pH-Wert von 5,5 beginnt $\text{Zn}(\text{OH})_2$ auszufallen. Nach der Fällung von $\text{Zn}(\text{OH})_2$ macht der pH-Wert einen Sprung von 6,3 auf 7,1 und es beginnt $\text{Pb}(\text{OH})_2$ auszufallen. Nach der Fällung von $\text{Pb}(\text{OH})_2$ fallen nacheinander $\text{Mn}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus.

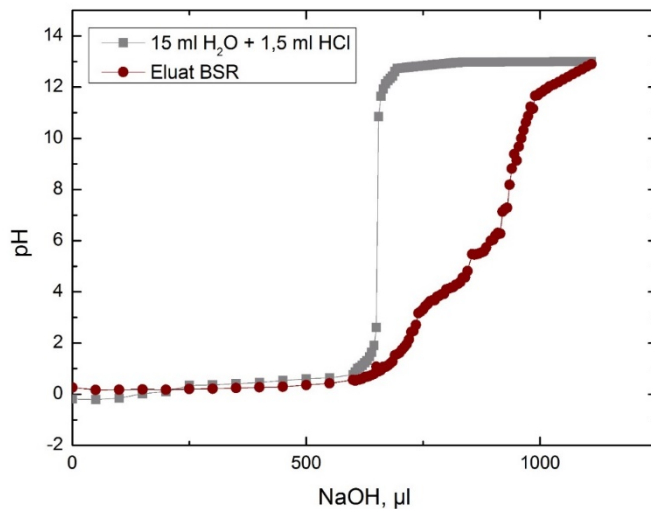
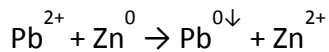


Abb. 46: Titrationskurven von 15 ml H₂O + 1,5 ml HCl, BSR-Eluat

Tab. 3: Fällungs-pH von Metallhydroxiden (Blasius, 1995)

Metall-Hydroxid	pH-Bereich
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	12,4-13,9
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	9,6-11,1
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	8,3-9,8
$\text{Mn}(\text{OH})_2$	7,9-9,4
$\text{Pb}(\text{OH})_2$	7,2-8,7
$\text{Zn}(\text{OH})_2$	6,6-8,1
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	5,1-6,6
$\text{Al}(\text{OH})_3$	3,8-4,8
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	2,2-3,2

Da es nicht möglich war, die nacheinander ausfallenden Metallhydroxide voneinander zu trennen, erfolgte die Fällung von Pb und Zn in zwei Schritten. Zunächst wurde mit feinst gemahlenem reinem Zinkpulver Pb auszementiert. Metallische Zn ist in der Lage gelöstes Blei abzuscheiden:



Neben PbO zeigt das Röntgendiffraktogramm des Zementierungsproduktes auch Anteile an Baryt und Gips. Die AAS-Analysen der Eluate ergaben, dass durch die Zugabe von Zn-Pulver das gesamte Pb auszementiert wurde.

Die Titrationskurve nach der Zementierung von Pb zeigt Abb. 47. Der Verbrauch von mehr Na(OH) bei der Titration des Pb-freien Eluats ist abhängig von der Schwermetallausfällung. Die Ausfällung von Zn(OH)₂ beginnt bei einem pH-Wert von 6. Zur Fällung von Zn wurde zum Pb-freien Eluat tropfenweise Na(OH) bis zu einem pH-Wert von 5,8 zupipettiert. Das Eluat wurde filtriert und zum filtrierten Eluat wurde tropfenweise Na(OH) bis zu einem pH-Wert von 6,6 zupipettiert. Nach Ablauf der Fällungsreaktion wurde Zn(OH)₂ abfiltriert. Die AAS-Analysen des Filtrats ergaben, dass das gesamte Zn ausgefällt wurde

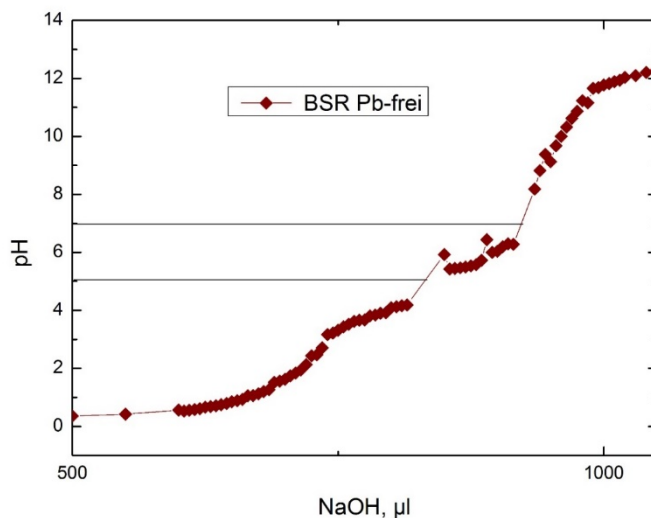


Abb. 47: Titrationskurven des Pb-freien Eluats

b.6. Charakterisierung der festen Rückstände

Von den festen Rückständen des zeitabhängigen Hydrothermalexperiments der Schlacke SC_MG_F wurden nach 45 min und 145 min Versuchszeit die Korngrößenverteilung und der Phasenbestand röntgenographische bestimmt.

Abb. 48 zeigt die Korngrößenverteilung der Rückstände von Schlacke SC_MG_F nach 45 min und 145 min Versuchsdauer im Vergleich zur Ausgangsschlacke. Die Versuchsbedingungen waren 110°C, 1g Schlacke versetzt mit 15 ml H₂O + 1,5 ml HCl.

Der Rückstand SC_MG_F_45 zeigt im Vergleich zur Ausgangsschlacke SC_MG_F eine deutliche Abnahme der kleinen Partikelgrößen. Der Rückstand SC_MG_F_145 zeigt im Vergleich zur Ausgangsschlacke ebenfalls einen geringeren Anteil an kleinen Partikeln. Im Vergleich zum Rückstand SC_MG_F_45 fällt eine Zunahme von kleinen Partikelgrößen auf. Dies könnte auf eine Neukristallisation von Partikeln hindeuten.

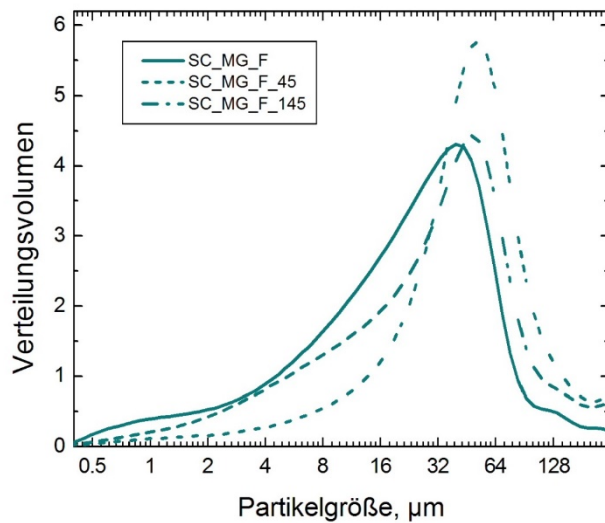


Abb. 48: Korngrößenverteilung der Schlacke SC_MG_F vor dem Hydrothermalexperiment, nach 45 min und 145 min Versuchsdauer

Um eine eventuelle Neukristallisation in den Rückständen oder auch Änderungen im Phasenbestand erkennen zu können, sind in Abb. 49 a-c die Röntgendiffraktogramme der Ausgangsschlacke SC_MG_F, des Rückstandes SC_MG_F_45 und SC_MG_F_145 gegenübergestellt. Durch den Vergleich der Röntgenreflexlagen und -höhen können Unterschiede im Phasenbestand festgestellt werden.

Während die in Schlacke SC_MG_F identifizierten Phasen Quarz, Olivin, Enstatit und Perovskit nahezu unverändert bleiben, ist bei Larnit eine deutliche Verringerung der Reflexintensität festzustellen. Dies lässt auf eine Teilauflösung der Phase schließen. Die Phasen Willemit und Calcit verschwinden völlig aus den Diffraktogrammen der Rückstände. Neukristallisierte Phasen in den Rückständen konnten nicht identifiziert werden.

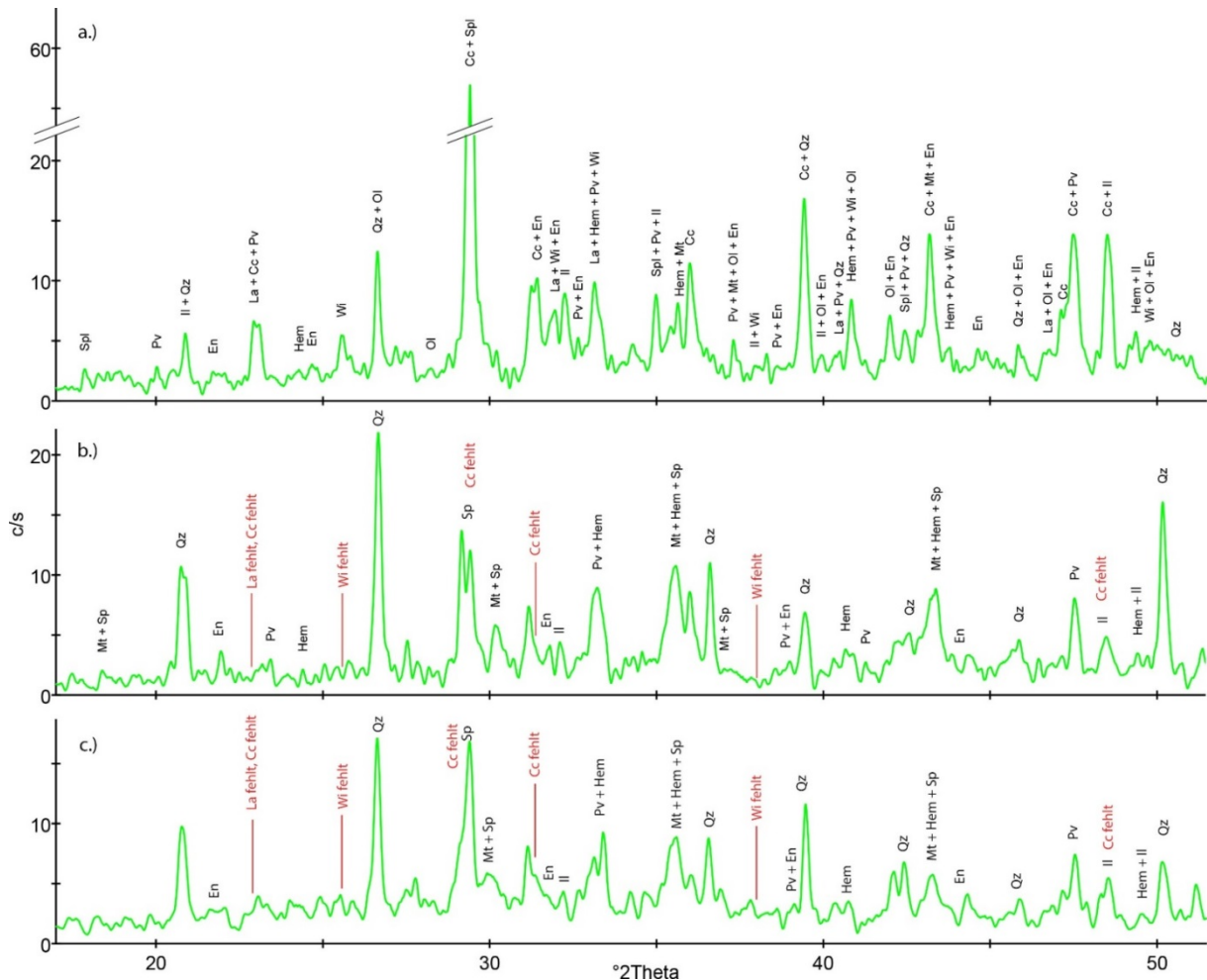


Abb. 49: a-c: Röntgendiffraktogramm der Schlacken SC_MG_F (49a), SC_MG_F_45 (49b), SC_MG_F_145 (43c)

b.7. Numerische und hydrochemische Modellierung

Die numerische und hydrogeochemische Modellierung wurde mit den Programmen Phreeqc und der Geochemist's Workbench durchgeführt. Auf die Einbeziehung von Kinetik oder Sorption wurde verzichtet

Daten zur Speziesverteilung und Löslichkeit einzelner Pb- und Zn-Phasen wurden durch hydrochemische Modellierungen generiert. Tab. 4 zeigt die Parameter, die für ein einfaches Modelleulat festgelegt wurden.

Mit dem Programm Phreeqc wurde eine Speziesverteilung, der sich in Lösung befindenden Ionen und eine Auflistung aller möglichen Phasen inklusive deren Sättigungsindizes, der hypothetischen Anfangslösung erstellt. Da es nicht möglich war das vollständige Schlacke-System zu untersuchen, werden exemplarische Ergebnisse für Pb und Zn dargestellt.

Tab. 4: Parameter für die Ausgangsmodelllösung des Eluats

Parameter	Wert	Einheit
pH	1	
Temperatur	25	°C
Al	800	mg/l
K	400	mg/l
Na	900	mg/l
Ca	8000	mg/l
Mg	100	mg/l
Fe	200	mg/l
Cu	200	mg/l
Mn	30	mg/l
Pb	60	mg/l
Si	200	mg/l
Zn	280	mg/l
Cl	11000	mg/l
S	1000	mg/l
P	300	mg/l
C	380	mg/l

Abb. 50 und 51 zeigen die, in höchster Konzentration vorliegenden, gelösten Spezies von Zn bzw. Pb in Abhängigkeit des pH-Wertes. Die Veränderung des pH-Wertes wurde durch Zugabe von Na(OH) oder von HCl, in mehreren Schritten bewirkt.

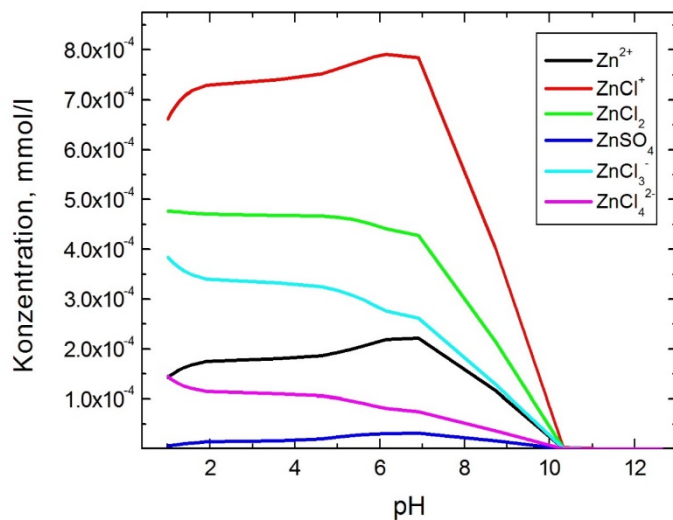


Abb. 50: Speziesverteilung des bei niedrigen pH-Werten gelösten Zn

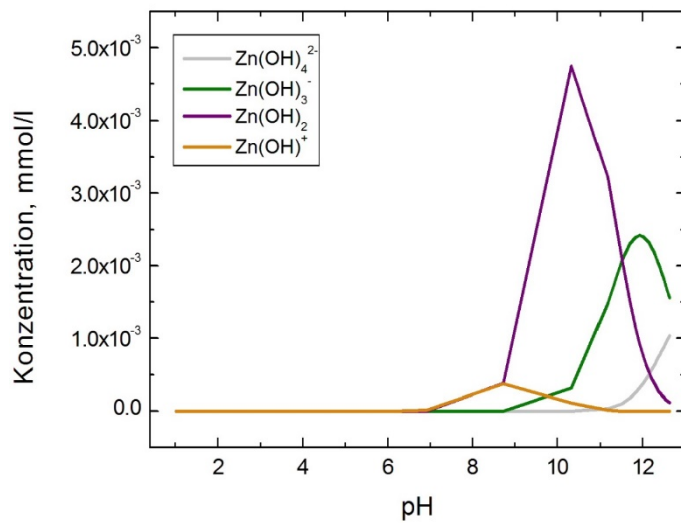


Abb. 51: Speziesverteilung des bei hohen pH-Werten gelösten Zn

Abb. 50 und 51 zeigen, dass Zn im Sauren vorzugsweise als Zn-Chlorid-Verbindung vorliegt, wohingegen die bei höheren pH-Werten vorherrschende Spezies verschiedene Zn-Hydroxide sind. Eine ähnliche Verteilung der Spezies lässt sich auch, in Abb. 52 - 54, für Pb erkennen. Es wurde in den Simulationen außerdem beobachtet, dass die Gesamtkonzentration an sich in Lösung befindendem Zn für leicht basische pH-Werte am geringsten ist. Eine Extraktion scheint demnach entweder im Sauren oder im basischen Milieu, bei einem pH-Wert höher als 9,5, am geeignetsten.

Zu den bei niedrigen pH-Werten vorzugsweise auftretenden Pb-Spezies, wurden in Abb. 54. auch die vorherrschenden Spezies für mittlere pH-Werte dargestellt. Es handelt sich hierbei um PbCO_3 , das hauptsächlich im pH-Wert-Bereich von 8-9 hohe Konzentrationen erreicht.

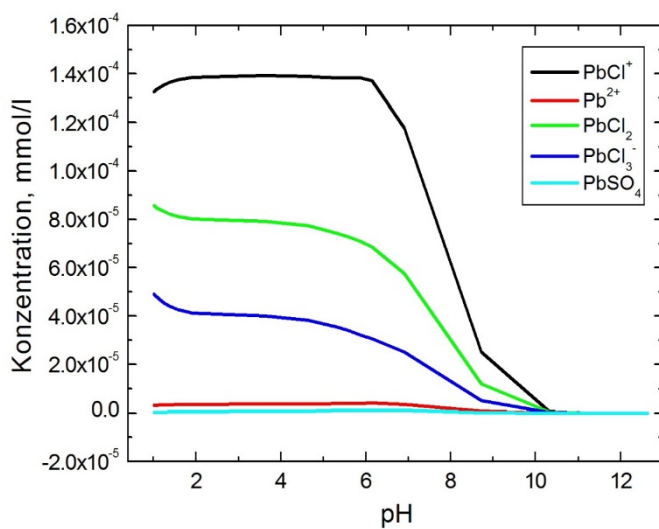


Abb. 52: Speziesverteilung des bei niedrigen pH-Werten gelösten Pb

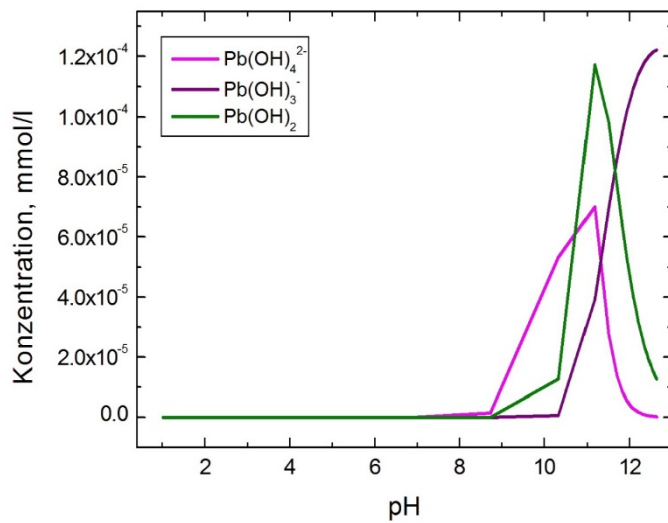


Abb. 53: Speziesverteilung des bei hohen pH-Werten gelösten Pb

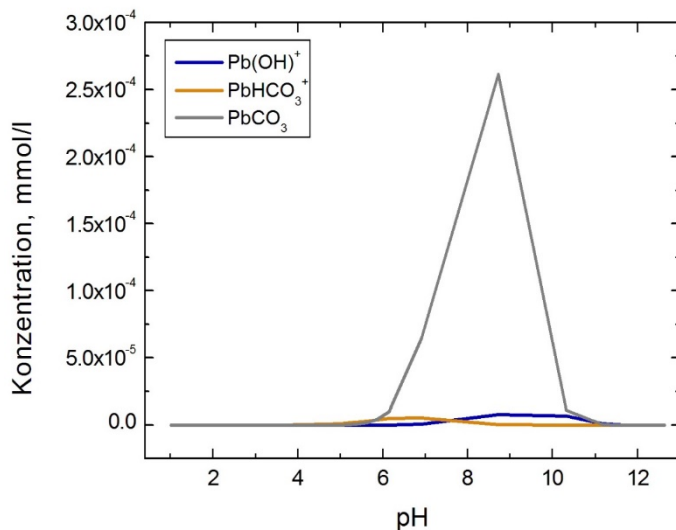


Abb. 54: Speziesverteilung des bei mittleren bis basischen pH-Werten gelösten Pb

Zusätzlich zu den Speziesverteilungen wurden, temperatur- und pH-Wert-abhängige, Modellierungen zum Verlauf der Sättigungsindizes, drei verschiedener Pb- und Zn-Phasen, durchgeführt.

Abb. 55 zeigt die Sättigungsindizes der Phasen Anglesit, Cerussit, Pb(OH)_2 , Willemit, Smithsonit und Zn(OH)_2 bei Temperaturen zwischen 20 und 100°C . Die Sättigungsindizes aller dargestellten Phasen liegen im negativen Bereich. Das bedeutet, dass die Lösung unabhängig von der Temperatur, mehr oder weniger stark, in Bezug auf die Phase untersättigt ist. Ein Sättigungsindex von 0 würde ein Gleichgewicht darstellen.

Es ist zu erkennen, dass, weder für die Zn-, noch für die Pb-Phasen ein einheitliches Verhalten der Phasen bei Temperaturerhöhung vorliegt. Während der Sättigungsindex von Anglesit und Cerussit (Abb.55), bei steigender Temperatur fällt, nimmt der Sättigungsindex von Pb(OH)_2 stetig zu. Dies bedeutet bei einem Temperaturanstieg nimmt die Löslichkeit von Anglesit und Cerussit zu, aber die von Pb(OH)_2 im Gegenzug dazu ab. Die Löslichkeit der

Zn-Phase Willemit nimmt ebenfalls mit Temperaturerhöhung ab. Kein näherungsweise lineares Verhalten der Temperaturabhängigkeit des Sättigungsindex lässt sich bei der Phase Smithsonit feststellen. In diesem Fall ist ein Minimum an Löslichkeit bei einer Temperatur von ca. 68°C zu erkennen. Der Sättigungsindex der Phase $\text{Zn}(\text{OH})_2$ fällt wiederum nahezu linear mit steigender Temperatur ab.

Im Gegensatz zu einer Variation der Temperatur, würde eine Veränderung des pH-Wertes der Modelllösung, bei einigen Phasen zu einer Überschreitung des Gleichgewichtszustandes (Sättigungsindex von 0) und damit zu einer Ausfällung der betreffenden Substanzen führen. Alle Modulationen wurden bei einer mittleren Temperatur von 50°C durchgeführt (Abb. 56). Auffällig ist, dass alle hier untersuchten Phasen, außer Anglesit, ein Löslichkeitsminimum bei pH-Werten zwischen 8 und 11 haben, und, im Gegensatz zu Anglesit, auch in einem unterschiedlich breiten pH-Bereich ausfallen würden. Während sich das Ausfallen der jeweiligen Phasen bei Cerussit, (für pH-Werte von 5,5 – 10,5) und Smithsonit (für pH-Werte von 6 – 10) auf den mittleren Bereich beschränkt, weisen die Phasen, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, ab einem pH-Wert von 8 als auch $\text{Pb}(\text{OH})_2$ und Willemit ab einem pH von 6 durchgängig positive Sättigungsindizes auf.

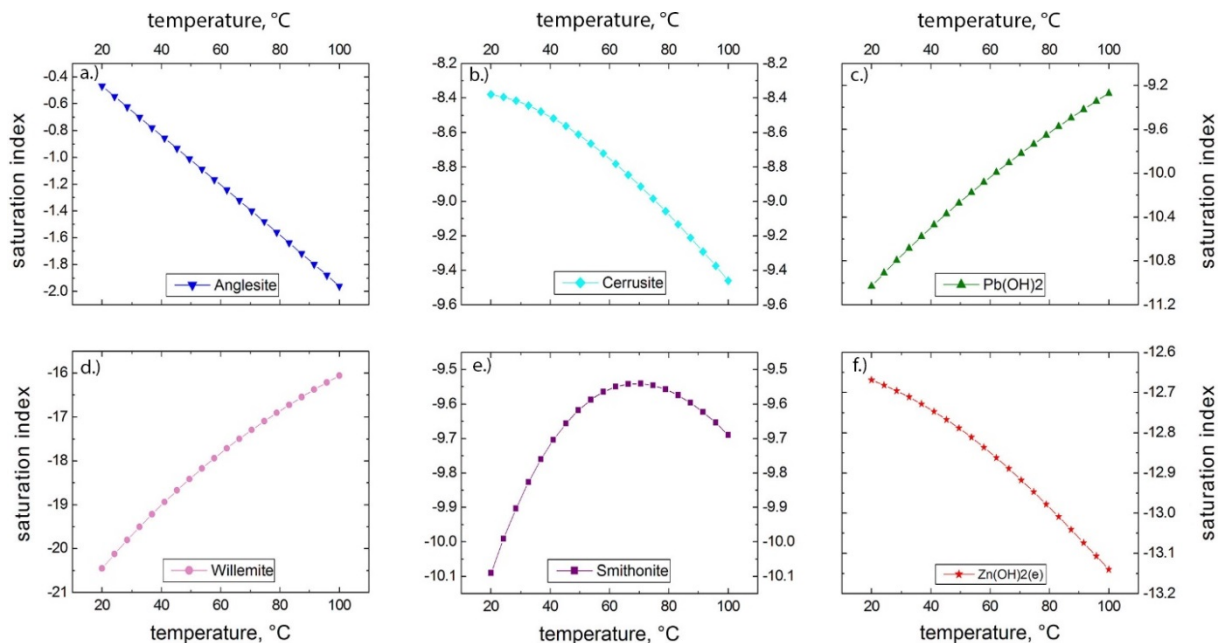


Abb. 55: a - f: Temperaturabhängigkeit des Sättigungsindex der Phasen Anglesit, Cerussit, $\text{Pb}(\text{OH})_2$, Willemit, Smithsonit und $\text{Zn}(\text{OH})_2$

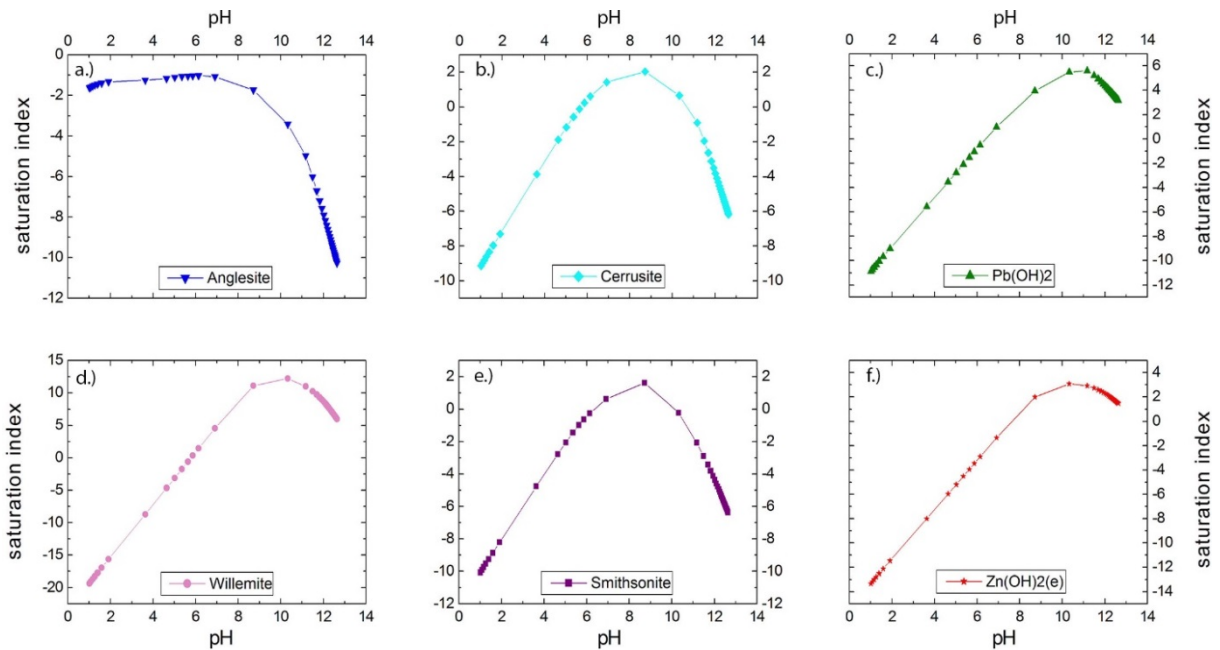


Abb. 56: a-f: Abhängigkeit des Sättigungsindex der Phasen Anglesit, Cerussit, $Pb(OH)_2$, Willemit, Smithsonit und $Zn(OH)_2$ vom pH-Wert bei 50°C

Für die Prädominanzdiagramme wurden die, mit PHREEQC errechneten, Aktivitäten der einzelnen sich in Lösung befindender Spezies des modellierten Eluats verwendet. Dieses System wurde, zur Vereinfachung, auf die Spezies mit den höchsten Aktivitäten beschränkt. Die Prädominanzdiagramme mit der Geochemist's Workbench erstellt.

Abb. 57a-f zeigt, unter Verwendung verschiedener Spezies, generierte pH-Eh-Diagramme für Zn. Die in Abb. 57a, c und e dargestellten Prädominanzdiagramme wurden mit Lösungen bei einer Temperatur von 25°C modelliert. Die Prädominanzdiagramme in Abb. 57 b, d und f wurden für auf 80 °C temperierte Lösungen berechnet. Abb. 58a-f zeigt unter Verwendung verschiedener Spezies, generierte pH-Eh-Diagramme für Pb bei 25°C und 80°C temperierten Lösungen. Die, in den Abb. 57 und 58, in blau markierten Prädominanzfelder zeigen gelöste Phasen, die in oliv gehaltenen Bereiche feste Phasen an.

Die Abb. 57a und b wurden unter Verwendung von HSO_4^- als dominante S-Spezies erstellt. Es fällt auf, dass sich die Grenzlinie zwischen den Prädominanzfeldern der in Lösung vorliegenden Phasen $ZnCl_4^{2-}$ und $ZnSO_4(aq)$ bei Temperaturerhöhung von 25°C auf 80°C in Richtung höherer pH-Werte verschiebt. Auch der Bereich in dem prädominant lösliche Phasen vorliegen ist bei niedrigen Temperaturen größer.

Da sich die berechneten Aktivitäten der einzelnen S-Spezies, auf HSO_4^- (Abb. 48a-b), SO_4^{2-} (Abb. 57c-d), $Ca/AlSO_4^+$ (Abb. 57e-f) aufteilen, variiert die S-Spezies mit der die Prädominanzdiagramme erstellt wurden.

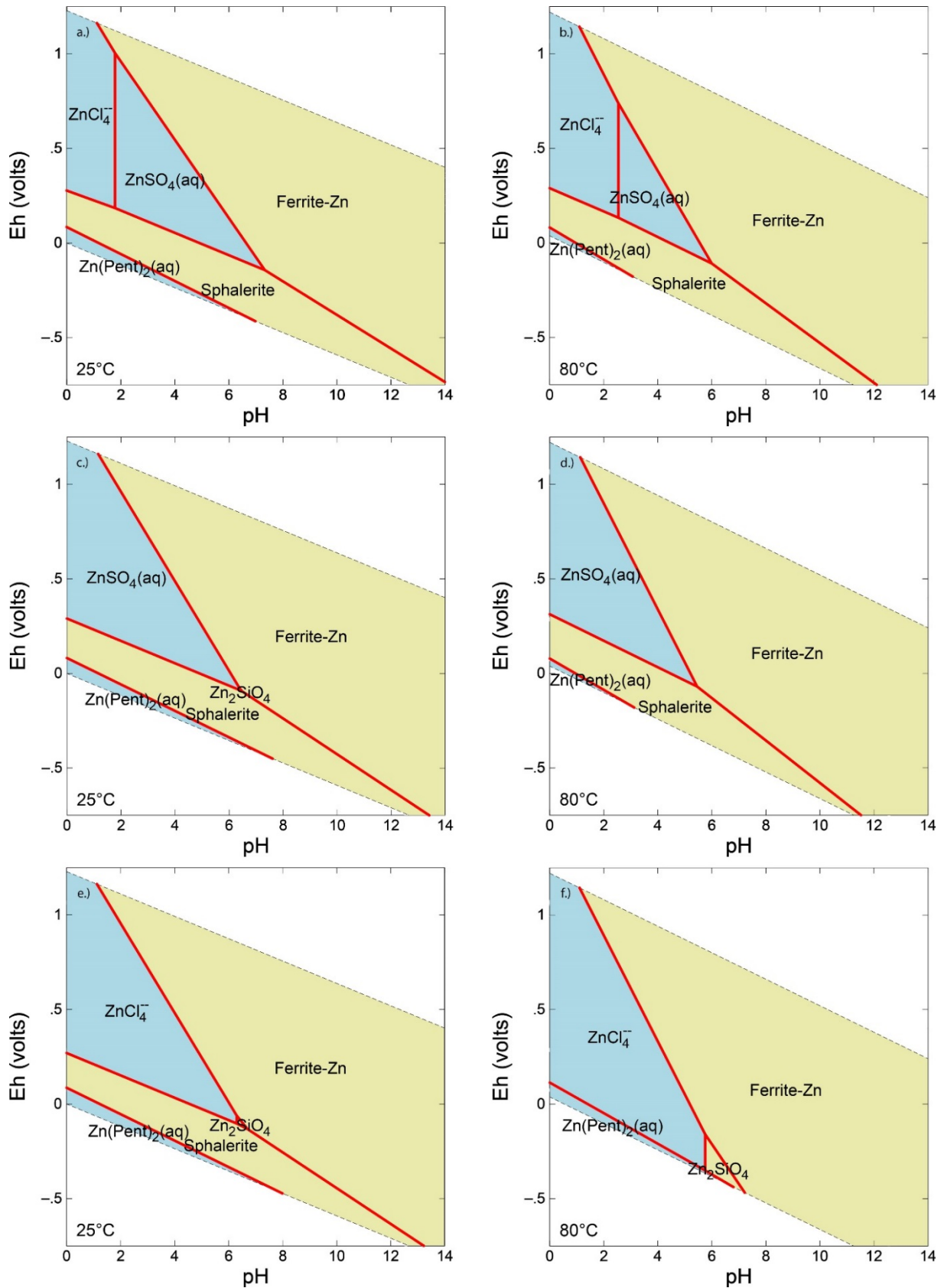


Abb. 57: a-f: Prädominanzdiagramme für Zn unter Annahme verschiedener S-Spezies a-b \rightarrow HSO_4^- , c-d \rightarrow SO_4^{2-} , e-f \rightarrow Al/CaSO_4^+

Unter Annahme von SO_4^{2-} als vorherrschende S-Spezies (Abb 48 c-d) ist zu erkennen, dass die Phase ZnCl_4^{2-} vollständig aus dem pH-Eh-Diagramm verschwunden ist und sich das

Prädominanzfeld von $\text{ZnSO}_4(\text{aq})$ dafür über den gesamten Bereich, zwischen einem Eh ab 0,3 Volt bis zu neutralen pH-Wert, erstreckt. Zusätzlich tritt bei 25°C neben den Festphasen Ferrite-Zn und Sphalerit, Willemit auf.

Für die Erstellung der Prädominanzdiagramme in Abb. 57e-f wurde AlSO_4^+ als dominante Spezies angenommen. Abb. 48e-f ist zu entnehmen, dass die Phase ZnCl_4^{2-} einen ähnlichen Bereich einnimmt, wie zuvor $\text{ZnSO}_4(\text{aq})$. Die dominierenden Festphasen im vorwiegend basischen pH-Bereich sind erneut Ferrite-Zn, Sphalerit und Willemit. Eine Zunahme der Temperatur würde zu einer Ausdehnung des Prädominanzbereichs von ZnCl_4^{2-} , unter Abnahme des Feldes von Sphalerit, führen. Die Phase Willemit stellt im negativen Eh-, und im neutralen bis leicht sauren pH-Bereich, über ein kleines Areal die prädominante Phase dar.

Die für CaSO_4 als dominante S-Spezies angefertigten Diagramme zeigen keinen Unterschied zu denen von AlSO_4^+ .

Im Gegensatz zu den Prädominanzdiagrammen für das Zn, zeigen die für Pb angefertigten pH-Eh-Diagramme hauptsächlich feste Phasen (Abb. 58a-f). Alle Prädominanzdiagramme wurden für HSO_4^- als dominante S-Spezies gerechnet. Durch den Wechsel der S-Spezies wurde jedoch in der Regel keine, aus den Berechnungen resultierende, Begrenzungslinie verschoben

Die Abb. 58a-b zeigen die, unter der Annahme von HCO_3^- als vorherrschende C-Spezies, erstellten Diagramme. Die einzige prädominante, gelöste Phase stellt sowohl bei 25°C als auch bei 80°C, $\text{Pb}(\text{Pent})_2(\text{aq})$ dar. Die Temperaturänderung hat jedoch einen großen Einfluss auf die dominierende Festphase. Während bei 25°C Corkite, PbHPO_4 und, über einen großen Bereich, Plumbogummite vorherrschen, sind die prädominanten Phasen bei 80°C Anglesit und Alamosit. Das Feld von Galena vergrößert sich bei Temperaturerhöhung auf den gesamten pH-Bereich.

Bei einem Wechsel der, für die Berechnung verwendeten, C-Spezies von HCO_3^- zu $\text{CO}(\text{aq})$ zeigt sich ein zum Teil verändertes Bild (Abb. 58 c-d). Bei 25°C fällt auf, dass die Festphasenfelder sich auf einen Eh-Bereich unter 0,5 Volt zurückgezogen haben und in dem gesamten oberhalb liegenden Areal die Phase $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ vorherrscht. Eine Temperaturanhebung auf 80°C führt wiederum zum Vorherrschen von Festphasen, nahezu im gesamten Areal. Die prädominanten Phasen sind hier Cerussit, Anglesit und Galena.

Für die, in Abb. 58 e-f dargestellten, pH-Eh-Diagrammen wurde, nicht wie in den vorangegangenen Berechnungen, $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$ als P-Spezies zu Grunde gelegt, sondern HPO_4^{2-} . Wie bereits für die meisten Pb-Prädominanzdiagramme festgestellt dominierten hier ebenfalls die festen Phasen. Zu den, bereits aus den vorangegangenen Berechnungen bekannten, Festphasen kommen bei 25°C das Mineral Hinsdalite und bei 80°C Alamosite hinzu. Die Phasen sind jeweils im stark basischen Bereich dominant.

Die unter realen, nicht im Zuge einer Modellierung vereinfachten, Bedingungen prädominanten Phasen, können durchaus in unterschiedlichen Reihenfolgen auftreten, so dass die Ergebnisse nur als Hinweise dienen, welche Phasen möglicherweise erwartet werden können.

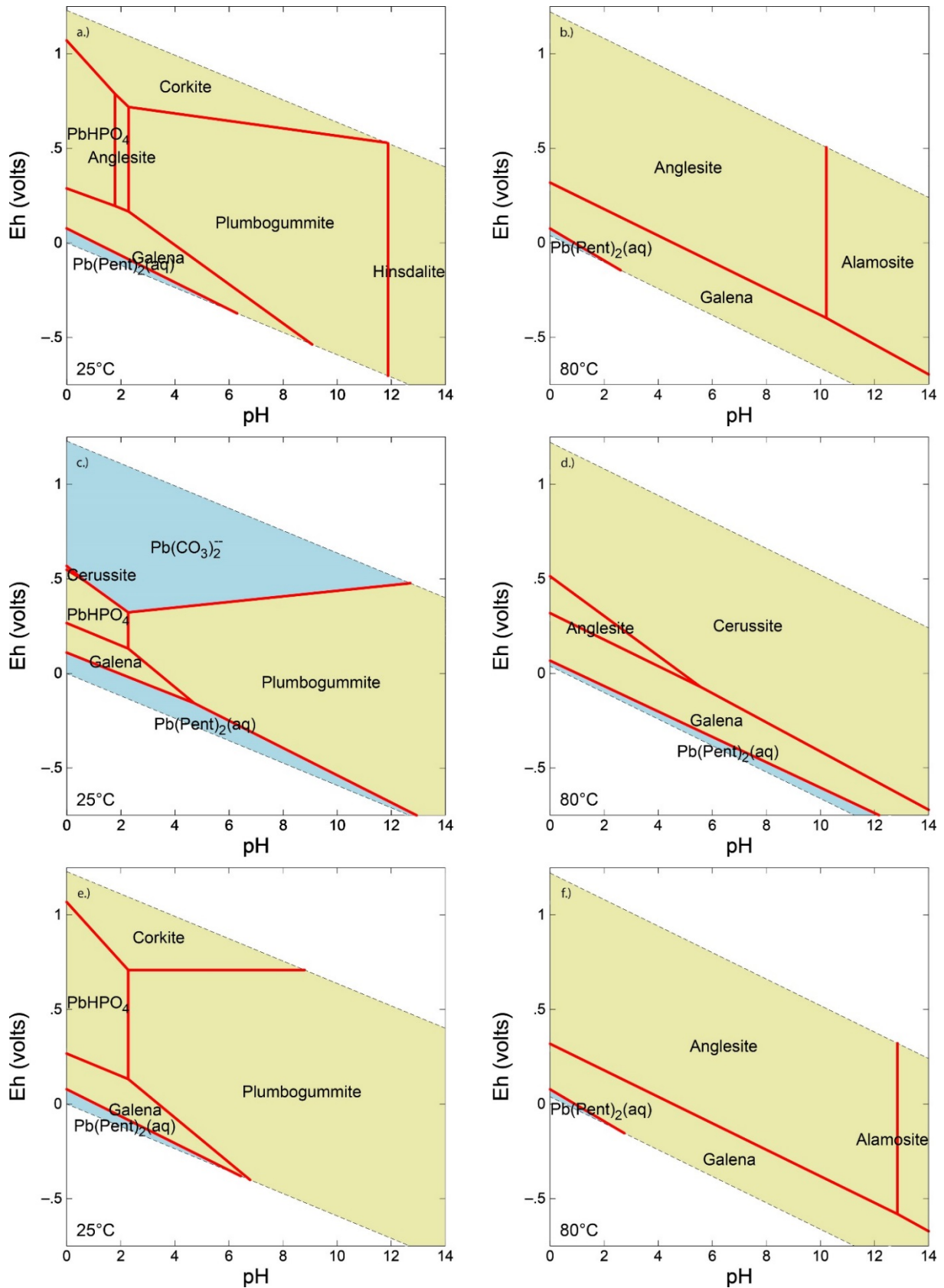


Abb. 58: a-f: Prädominanzdiagramme für Pb unter Annahme verschiedener P und C-Spezies

a-b \rightarrow HCO_3^- und HPO_4^{2-} , c-d \rightarrow $\text{CO}_2(\text{aq})$ und $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$, e-f \rightarrow HCO_3^- und $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$

Die pH-Wert abhängige Löslichkeit von Zn wurde bereits durch Dijkstra et al. (2006) durch ein Oberflächenabscheidungs-Modell beschrieben. Die Ergebnisse des Projektes werden

auch durch die von Meima & Comans (1998) und Dijkstra et al. (2002) gestützt. Allerdings kann das Lösungsverhalten von Zn auch durch die Löslichkeit des Minerals Willemit, Abb. 57 zu entnehmen, erklärt werden. Dieser Zusammenhang wurde von Dijkstra et al (2006) bereits, durch pH-abhängige Löslichkeitsversuche über einen pH Bereich von 2 – 14, festgestellt.

Die Röntgendiffraktogramme der Rückstände (Abb. 49 b und c) zeigen, dass die Phase Willemit, die im Ausgangsmaterial der Schlacken SC_MG und SC_MG_F eindeutig durch die Röntgendiffraktometrie nachgewiesen wurde, bei allen Rückständen nicht mehr nachzuweisen war. Die ebenfalls identifizierte Zn-Phase Zinkit, zeigt für hohe pH-Werte ein zu starkes Löslichkeitsverhalten (Dijkstra et al., 2006).

Die Phase Smithsonit zeigt, in der Modellierung, im sauren pH-Bereich ebenfalls ein passendes Lösungsverhalten, dies wurde allerdings nicht durch die Röntgendiffraktometrie bestätigt.

Zn zeigt in nahezu allen untersuchten Schlacken bei den meisten getesteten Bedingungen eine gute Löslichkeit von durchschnittlich um die 80%.

Im Gegensatz dazu ist die Löslichkeit von Pb im Allgemeinen, mit durchschnittlich um die 60% deutlich niedriger. Dies legt den Schluss nahe, dass Pb in schlechter löslichen Verbindungen vorliegt. Diese Schlussfolgerung wird auch dadurch gestützt dass in den Prädominanzdiagrammen (Abb. 58 a-f) nahezu keine prädominante, gelöste Spezies auftritt. Die Abb. 55 b und 56 b zeigen eine gute Löslichkeit für Cerussit sowohl im sauren pH-Bereich, als auch bei hohen Temperaturen. Ein Vorliegen des Elementes Pb als Cerussit müsste zu einer höheren, extrahierbaren Konzentration von Pb im Eluat führen. Auch Dijkstra et al. (2006) bestätigen in ihrer Arbeit eine starke Löslichkeit des Minerals Cerussit. Die Phase Anglesit stellt im Vergleich zu Cerussit eine merklich stabilere Pb-Verbindung dar. Allerdings ist eine gute Löslichkeit von Anglesit weitestgehend auf den stark basischen pH-Bereich beschränkt. Ein Vorliegen des Elements Pb in Schlacken als Anglesit dürfte zu schlechteren Eluationsverhalten im sauren pH-Bereich führen.

Durch die Röntgendiffraktometrie konnte, aufgrund des geringen Pb-Gehalts und der starken Heterogenität der Schlacken, keine Pb-Phase, mit Ausnahme eines Pb haltigen Spinells, bestimmt werden.

Auch die Elektronenmikrosondenergebnisse lassen keinen eindeutigen Schluss auf Pb-haltige Phasen zu. Es wurde lediglich in wenigen Fällen die Existenz von metallischem Pb und Plattnerit bestätigt. Das Vorliegen des Pb als Anglesit konnte nicht nachgewiesen werden, da SO_4^{2-} in den Mikrosondenanalysen in Verbindungen mit Ca oder Ba, als Anhydrit, Ettringit und Baryt auftritt. Metallisches Blei, Cotunnit und auch Anglesit wurden allerdings durch Pöllmann (2007) bereits nachgewiesen.

Zahlreiche durch Pöllmann (2007) nachgewiesene Pb- und Zn-haltige Phasen, wie beispielsweise Spencerit ($\text{Zn}_4(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$), Sphalerit, Wurzit, Hopeit ($\text{ZnSZn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$), Fiedlerit ($\text{Pb}_3\text{Cl}_4(\text{OH})_2$), konnten nicht nachgewiesen werden. Dies kann mit dem kurzen Alterungsprozess von maximal 12 Wochen der untersuchten Schlacken und mit kompositionellen Unterschieden des Verbrennungsmaterials zusammenhängen. Einige schwermetallhaltigen Speicherminerale bilden sich erst durch die Deponierung über einen längeren Zeitraum. In den mit Hilfe der Mikrosonde analysierten Proben SC_F und SC_MG konnten als Zn-führende Phasen Fe-Zn-Legierungen, Ca-Zn-Karbonat, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ sowie Zn-Larnit nachgewiesen werden. Pb liegt in den analysierten Proben entweder elementar vor, oder ist in sehr geringen Mengen an variablen Oberflächen adsorbiert.

Auch Chandler et al. 1997 weisen auf die Tatsache hin, dass die Mineralphasen einen wesentlichen Einfluss auf das Auslaugverhalten der Schlacken haben und dass die komplexen Zusammensetzungen der Schlacken die Vorgänge beim Auslaugen nur zum Teil erklärt werden können.

c. Zusammenfassung

Die Untersuchungen und Ergebnisse dieses Projektes haben gezeigt, dass sich die Chemismen von unterschiedlichen MVA-Schlacken in einer gewissen Bandbreite ähnlich sind, das sie aber in verdünnten Säuren durchaus ein unterschiedliches Eluationsverhalten zeigen.

Die Korngrößenverteilung der einzelnen MVA-Schlacken hängt davon ab, wie die Schlacke nach dem Austrag aus dem Ofenraum weiter behandelt wird. Nach dem heutigen Stand der Technik werden die MVA-Schlacken mit (elektro-)mechanischen Verfahren Fe und NE entfrachtet. Metalle, die chemisch z.B. in Silikaten gebunden sind, können nicht zurückgewonnen werden. Im AP5 des Projektes soll der Feinstanteil von MVA-Schlacken auf die Löslichkeit von Blei und Zink untersucht werden. Der Feinstfraktion, die bis zu 25% der gesamten Menge einer trockenen Schlacke ausmachen kann, wurde im Hinblick auf die Metallrückgewinnung bisher kein größerer Wert beigemessen. Da im Rahmen des Projektes kein Schlackenmaterial, das durch den Tar-Prozess aufbereitet wurde, untersucht werden konnte, wurde um den Feinanteil einer Schlacke zu erhöhen auf die elektrodynamische Fragmentierung zurückgegriffen.

In Abhängigkeit von der Korngröße zeigen die untersuchten MVA-Schlacken ein einheitliches Verhalten. Mit kleiner werdender Korngröße steigen die Gehalte an Calcium, Zink, Chlor und Schwefel an, während die Gehalte an Silizium kleiner werden. Bei den Metallen Eisen, Aluminium und Blei ist die Abhängigkeit von der Korngröße nicht sehr ausgeprägt.

Da die Zusammensetzung der Mineralphasen einen wesentlichen Einfluss auf das Lösungsverhalten von MVA-Schlacken hat, wurden die Mineralphasen röntgenographisch und mikrochemisch eingehend charakterisiert. Für die Korngrößenfraktion $<63\mu\text{m}$ sind die röntgenographischen Hauptphasen Quarz und Calcit. Die Identifikation der Pb- und Zn-führenden Phasen war röntgenographisch nicht uneindeutig. Die Mikrosondenanalysen ergaben, dass Zn in die Ca-reiche Phasen Calcit und Larnit eingebaut ist. Zn tritt auch legiert mit Fe-Schmelzkügelchen auf. Pb liegt elementar, als Oxid oder in sehr geringen Mengen an Oberflächen adsorbiert vor.

Bei den Eluationsexperimenten zeigten die untersuchten Schlacken kein einheitliches Verhalten. Die für eine Schlacke am besten geeignete Versuchstemperatur und Versuchsdauer muss zur Erreichung der höchsten Eluationsraten für jede Schlacke individuell ermittelt und angepasst werden. Während, unter Verwendung von HCl die Eluierbarkeit von Pb und Zn mit sinkendem pH-Wert stark ansteigen, lässt sich bei Verwendung von HNO_3 für die Elemente Zn ein Maximum der Eluierbarkeit bei einem pH-Wert zwischen 0,7 und 1 erkennen. Die Eluierbarkeit von Pb steigt hingegen bei Verringerung des pH-Wertes stetig an. Einen Einfluss auf die Eluierbarkeit von Pb und Zn hat auch die chemische Zusammensetzung der Schlacke. Bei einem CaO/SiO_2 -Verhältnis von <1 nimmt die Eluierbarkeit von Pb und Zn ab. Dies könnte daran liegen, dass sich Si-reiche Chelatkomplexe bilden, die die Eluierbarkeit sowohl von Pb als auch von Zn herabsetzen. Die Erhöhung des Feinanteils durch die elektrodynamische Fragmentierung zeigt für die Eluierbarkeit von Pb

und Zn bei den untersuchten Schlacken ein widersprüchliches Verhalten. Zum einen bewirkt der Fragmentierungsprozess eine erhebliche Steigerung des eluierten Anteils an Pb und Zn, zum anderen bewirkt er das genaue Gegenteil. Eine Erklärung hierfür könnte der Cl-Gehalt der Schlacke vor und nach der Fragmentierung sein. Durch den Fragmentierungsprozess wird ein Großteil des Chlors des Ausgangsmaterials im Prozesswasser der Fragmentierungsanlage gelöst.

Die Auszementierung von Pb und anschließende Fällung von Zn als $Zn(OH)_2$ führt zu einer Rückgewinnungsrate von 100%.

Die hydrochemischen Modellierungen zeigen, dass das Eluationsverhalten von Pb und Zn abhängig ist von den Pb und Zn-führenden Phasen in der MVA-Schlacke. Da die MVA-Schlacken sehr komplex zusammengesetzt sind können über die hydrochemische Modellierung die Eluationsmechanismen nur eingeschränkt erklärt werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dem Zuwendungsempfänger standen die in Tab. 5 aufgelisteten bewilligten Mittel zur Verfügung

Tab. 5: Überblick der bewilligte Mittel

Kostenart	843	846	812	
Zweck	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	Dienstreisen	Beschäftigte	Gesamt
Bewilligt €	12.000.-	2.550.-	80.400.-	94.950.-

Aufgrund des plötzlichen Todes des Projektleiters Prof. Dr. Fehr sind zusätzlich Reisen zu Tagungen und Konferenzen wie die DepoTech in Leoben oder die Schlackenkonferenz in Berlin angefallen. Die Reisen waren notwendig, da für Leoben bereits ein Vortrag angemeldet war. Die Schlackenkonferenzen in Berlin dienten dem Austausch mit Vertretern der Industrie und zur Diskussion und Repräsentation der eigenen Ergebnisse. Damit das Projekt erfolgreich zum Abschluss gebracht werden konnte, hat sich auch der zeitliche Aufwand erhöht, daher wurden die sonstigen allgemeinen Verwaltungsausgaben in Personalmittel umgewandelt.

Ausgegeben wurden insgesamt:

Kostenart 846 (Dienstreisen)	€ 5.623,40
Kostenart 812 (Personalkosten)	€ 88.819,60
Kostenart 843 (sonstige all. Verwaltungsausgaben)	€ 507,00

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die eingehende Charakterisierung der Pb- und Zn-führenden Phasen war für die Interpretation der Ergebnisse aus den hydrothermalen Experimenten von großer Wichtigkeit. Aufgrund der Feinheit des untersuchten Materials war es sehr zeitintensiv die röntgenographischen und mikrochemischen Analysen auszuwerten. Diese Ergebnisse und

die hydrochemische Modellierung machten es möglich ansatzweise die Vorgänge bei der hydrothermalen Extraktion von Metallen zu verstehen.

Die bei unterschiedlichen pH-Wert Bedingungen, Temperaturen und Versuchszeiten durchgeführten hydrothermalen Experimente hatten zum Ziel, die höchst möglichen Eluatiionsraten von Blei und Zink aus dem Feinstanteil einer Müllverbrennungsschlacke zu erreichen. Berücksichtigt wurde dabei, dass bei einer möglichen Übertragung der hydrothermalen Extraktion in den Industriemaßstab der anfallende Restdampf der Müllverbrennungsanlage und die prozessbedingt anfallende Salzsäure eingesetzt werden könnten.

Zur Erhöhung des Feinanteils der untersuchten Müllverbrennungsschlacken wurde die elektrodynamische Fragmentierung angewendet. Die Prozessparameter der Anlage des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen wurden auf die jeweilige Schlacke angepasst, um die Schlacken selektiv zu verkleinern.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Eine Übertragung der Hydrothermalexperimente vom Labormaßstab auf Pilot- und Industriemaßstab ist durchaus denkbar. Für industrielle Prozesse sind sowohl kurze Verweilzeiten als auch Energieeffizienz von großer Bedeutung. So könnte zur Erhitzung der Autoklaven die Restdampfwärme der Müllverbrennungsanlage genutzt werden. Einen großen Einfluss auf die Eluierbarkeit von Blei und Zink hat der eingestellte pH-Wert. Bei niedrigen pH-Werten könnte es zu Temperatur-Säure-Korrosion des Autoklavenmaterials (in der Industrie wird meist V5A-Stahl eingesetzt) kommen. Ein pH-Wert von 3 würde bei einem korrosionsbeständigen V5A-Stahl noch keine Oberflächenkorrosion verursachen. Welches Autoklavenmaterial für den industriellen Maßstab am besten geeignet wäre müsste noch getestet werden.

4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse des Projektes tragen dazu bei, das Rückgewinnungspotential von Blei und Zink aus den Müllverbrennungsschlacken zu verbessern. Nach einer Studie des IW von 2008 reicht die Menge an Blei und Zink, die mit verfügbaren Technologien wirtschaftlich abbaubar sind noch ca. 12 Jahre. Dies würde im schlimmsten Fall bedeuten, dass ab 2027 kein Blei und Zink mehr verfügbare wäre. Gehalte von bis zu 10000 ppm Zn in der Feinstfraktion von MVA-Schlacken könnten somit einen Beitrag zur Ressourcensicherheit leisten. Die Schwermetallgehalte in den verbleibenden festen Rückständen nach der hydrothermalen Extraktion sind geringer, so dass eine qualitative Aufwertung des Materials gegeben ist. Durch die hydrothermale Behandlung kann Blei und Zink zurückgewonnen werden, das in sehr fein verteilter Form vorliegt und mit mechanischen Aufbereitungstechniken nicht getrennt werden kann.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Da während der Müllverbrennung neben den Schlacken auch Filterstäube und Rauchgasreinigungsrückstände, die stark mit Schwermetallen wie Blei und Zink belastet sind, anfallen, können die Erkenntnisse des Projektes auf diese Rückstände ausgedehnt werden. Durch die hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus den Filterstäuben, könnte eine kostenintensive Verbringung der Filterstäube unter Tage vermieden werden. Die verbleibenden festen Rückstände würden für weitere Anwendungen z.B. in der Zementindustrie zur Verfügung stehen.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

In der Literatur gibt es keine Untersuchungsergebnisse die sich mit dem Thema hydrothermale Extraktion von Metallen bei MVA-Schlacken beschäftigen

6 Gesamtliste der Veröffentlichungen und Vorträge

6.1 Erfolgte und eingereichte Veröffentlichungen

Günther, A., Fehr, K.T. & John, M. (2014): Hydrothermale Extraktion von MVA Rückständen. DepoTech Tagungsband 2014.

Günther, A., & Fehr, K.T. (2014): Hydrothermal Solution of Heavy Metals from MSWI Fly Ashes. Abstract ISHA 2014.

Günther, A., Fehr, K.T. & Hochleitner, R. (2014): Hydrothermal Solution of Heavy Metals from MSWI Residues. Tagungsband DMG Jena 2014

Günther, A. Fehr, K.T. & John, M. (2014): Hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus MVA-Rückständen. Urban Mining Congress 2014.

Günther, A., Beck, A. & Fehr, K.T. (2013): Hydrothermal Recovery of Zn and Pb from MSWI Bottom Ashes and APC Residues. Abstract ISHA 2013.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

In Arbeit sind zwei Veröffentlichungen zum Thema Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken und zum Thema hydrothermale Extraktion von Blei und Zink aus MVA-Rückständen

Quellen

- Alwast, H., Riemann, A.; (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Hrsg. Umweltbundesamt; Texte 50/2010; <http://www.uba.de/uba-info-medien/4025.html>
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2004): Umweltrelevante Eigenschaften von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2004
- Blasius, J. (1995): Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie; S. Hirzel: Stuttgart-Leipzig
- Bluhm, H., W. Frey, H. Giese, P. Hoppé, C. Schultheiß, R. Sträßner (2000): Application of Pulsed HV Discharges to Material Fragmentation and Recycling
- Chandler, A.J.; Eighmy, T.T.; Hartlén, J. et al (1997): Municipal solid waste incinerator residues, (Hrsg. The International Ash Working Group IAWG), Elsevier Science B.V., Amsterdam
- Deike R., Ebert D., Warnecke R., Vogell M., (2012): Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“, Universität Duisburg-Essen
- Dijkstra, J.J., van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J. (2002): Process identification and model development of contaminant transport in MSWI bottom ash. Waste Manage. 22, 531-541
- Dijkstra, J.J., van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J. (2006): The leaching of major and trace elements from MSWI bottom ash as a function of pH and time, Applied Geochemistry 21, 335-351
- DIN 38414-S4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). In: Deutsches Institut für Normung
- Gade, B., Pöllmann, H., Heindl, A., Westermann, H. (2001): Long-term behaviour and mineralogical reactions in hazardous waste landfills: a comparison of observation and geochemical modelling, Environmental Geology 40, 248-256
- MAGEL, G. (2003): Mineralogische und chemische Untersuchungen zur abiotischen Wasserstoffentwicklung in Müllverbrennungsanlagen, Herbert Utz Verlag, München
- Garrels RM, Christ CL (1965) Solutions, Minerals and Equilibria – Jones and Barlett Publishers; Boston [Neuaufgabe: 1990]
- http://www.abw-recycling.de/r13/Woidasky_IBP_MolecularSorting_R13.pdf

Hu, Y., Zhang, P., Chen, D., Zhou, B., Li, J., & Li, X. W. (2012), „Hydrothermal treatment of municipal solid waste incineration fly ash for dioxin decomposition“, *Journal of hazardous materials*, 207, 79-85.

IW [Institut der deutschen Wirtschaft Köln] (Hg.) (2008): Rohstoffversorgung
Meima, J.A., Comans, R.N.J., (1998): Applicatin of surface complexation/precipitation modelling to contaminant leaching from weathered municipal solid waste incinerator bottom ash. *Environ. Sci. Technol.* 32, 688-693

Meima, J.A. & Comans, R.N.J. (1999): The leaching of trace elements from municipal solid waste incinerator bottom ash at different stages of weathering, *Applied Geochemistry* 14, 159-171

Pöllmann, H. (2007): Immobilisierung von Schadstoffen durch Speichermineralbildung, Shaker Verlag, Aachen

Pouchou, J.L. & F. Pichoir (1984) A new model for quantitative x-ray microanalysis, part I: application to the analysis of homogeneous sampes, *Pech Aérosp*, 3, 167-192

Travar, I., Lidelöw, S., Andreas, L., Tham, G., Lagerkvist, A. (2009): Assessing environmental impact of ashes used in a landfill cover construction, *Waste Management* 29, 1336-1346