



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim



Für eine lebenswerte Zukunft

Fachbereich
Ingenieurwissenschaften
Studiengang Umwelttechnik

BACHELORARBEIT
Zur Erlangung des Grades Bachelor of Engineering

Ressourcenschutz in der Abfallwirtschaft
—
**MVA-Aschen als Sekundärrohstoffquelle für
Metalle**

Name:	Tilman Euler
Matrikelnummer:	173981
Referentin:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrike Stadtmüller
Korreferent:	Dipl.-Ing. (FH) Volker Kummer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen. Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Datum, Ort

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Untersuchungsrahmen	2
1.3 Begriffsbestimmungen	3
2 Grundlagen	4
2.1 Müllverbrennung	4
2.1.1 Nassentschlackung	6
2.1.2 Trockenentschlackung	7
2.1.3 Stoffströme	7
2.2 MVA-Schlacken	10
2.2.1 Zusammensetzung	10
2.2.2 Metalle	12
2.2.3 Seltene Erden	13
2.2.4 Metallpotenzial der Feinfraktion	13
2.2.5 Qualität der Schlacken	14
2.3 Rechtsgrundlagen	16
2.3.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz	16
2.3.2 LAGA Merkblätter	17
2.3.3 Mantelverordnung	18
2.4 Konventionelle Aufbereitung	20
2.4.1 Separationstechniken	20
2.4.2 Alterung	21
2.4.3 Metallentfrachtung	22
2.5 Weitergehende Aufbereitungsverfahren	24
2.5.1 Verglasung	24
2.5.2 Waschverfahren	25
2.5.3 Trocken- mechanische Verfahren	25
2.5.4 Bioleaching und Bioakkumulation	26
2.5.5 Elektrodynamische Fragmentierung	27
2.5.6 Elektrodynamische Fragmentierung im Vergleich	28
2.6 Verwertungswege	30

2.6.1	Metalle	30
2.6.2	Fertigschlacken	30
3	Situationsanalyse Hessen	33
3.1	Befragung der Betreiber der hessischen Müllheizkraftwerke	34
3.2	Befragung der hessischen Aufbereitungsunternehmen	35
3.3	Plausibilitätsprüfung.....	36
3.3.1	Umfragedaten zum Schlackenaufkommen	36
3.3.2	Umfragedaten zur Schlackenaufbereitung.....	37
3.4	Metallpotenzial.....	39
3.4.1	Gesamtmetallpotenzial aus MVA-Schlacken der hessischen MHKW.....	39
3.4.2	Metallpotenzial in der Feinfraktion – Bsp. Kupfer	39
3.4.3	Schwierigkeiten in der Abschätzung des Metallpotenzials	40
3.5	Metallrückgewinnung.....	42
3.6	Verwertung der Fertigschlacken	44
3.7	Diskussion der Umfrageergebnisse	44
4	Weiterentwicklung und Forschungsprojekte	45
4.1	Ressourceneffizienzprogramm.....	46
4.2	BMBF-Forschungsprojekte	46
4.2.1	VeMRec	46
4.2.2	ATR.....	47
4.2.3	OPTIMIN	48
4.3	ReNe-Adapt-Verfahren	49
4.4	Hybridverfahren	50
4.5	Niederlande	51
4.5.1	Schlackenwäsche	52
4.5.2	Advanced Dry Recovery	52
4.6	Schweiz	54
4.6.1	Vorgeschaltete Nassschlackenaufbereitung.....	54
4.6.2	supersort®-Verfahren	55
5	Fazit und Ausblick.....	57
6	Zusammenfassung	61
7	Literaturverzeichnis.....	62
<u>Anhang</u>		
A	Fragebogen für MHKW-Betreiber	74
B	Fragebogen für Schlackenaufbereiter.....	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des MHKW Offenbach [Energieversorgung Offenbach AG, 2013]	4
Abbildung 2:	Aufbau der Kessel-/Feuerungsanlage des MHKW Offenbach inklusive Müllaufgabeschacht und Nassentschlacker [Energieversorgung Offenbach AG]	5
Abbildung 3:	Stoffströme und spezifische Mengen der Sekundärabfälle aus der Verbrennung von einem Megagramm Siedlungsabfall. rot: nach Thomé-Kozmiensky [2013]; blau: nach [ITAD]	8
Abbildung 4:	Verwertungswege des Abfalls aus Haushalten und Kleingewerbe in Hessen 2014 und Zusammensetzung des energetisch verwerteten Abfalls. Daten aus [HMUKLV, 2015a]	8
Abbildung 5:	Abfallmengenentwicklung des MHKW Kassel in den Jahren 2010 bis 2015. Die Differenz zwischen Anlieferungs- und Verbrennungsmenge ist begründet durch die Aussortierung und gesonderte Verwertung verschiedener Wertstoffe durch die vorgeschaaltete Abfallsortier- und-Zerkleinerungsanlage. [Müllheizkraftwerk Kassel GmbH]	10
Abbildung 6:	Siebrückstandslinie zweier Rostaschepoben [Grünbein et al., 2015].....	14
Abbildung 7:	Schematische Darstellung einer beispielhaften konventionellen Schlackenaufbereitung [Krüger et al., 2016].....	21
Abbildung 8:	Prinzipskizze der Gutbettwalze [UMTEC, 2016]	25
Abbildung 9:	Prinzip des mechanischen Trennens von Materialkonglomeraten aus Materialien unterschiedlicher Dichte mittels Hochgeschwindigkeitsaufschlussverfahren [Gronholz, 2011]	26
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer bzw. der Entladungszeit der Kondensatoren. Der grau hinterlegte Bereich (< 500 ns) ist für die elektrodynamische Fragmentierung in Wasser geeignet.	28
Abbildung 11:	Verwertungswege von MVA-Schlacken in Deutschland. Daten aus [ITAD e. V., 2009] zitiert in [Alwast et al., 2010].....	31
Abbildung 12:	Durchschnittlich pro Jahr behandelte Menge an Abfällen und dabei durchschnittlich anfallende Menge an Rohschlacken der hessischen MHKW nach Angaben der Betreiber.	34

Abbildung 13: Eisen- und NE-Metallrückgewinnung aus Rostaschen der hessischen Aufbereitungsanlagen bezogen auf den Gesamtschlacken-Input. Gestrichelt dargestellt ist der Durchschnitt deutscher Anlagen nach Kuchta et al. [2015].	42
Abbildung 14: NE-Ausbringung der drei hessischen MVA-Schlacken-Aufbereitungsanlagen in absoluten Werten. Die schmalen Balken stellen das NE-Potenzial für einen NE-Gehalt von 4 % der Rohschlacke dar.	43
Abbildung 15: Flussschema des ReNe-Verfahrens nach Breitenstein et al. [2013]. Die Verfahrensschritte sind farblich kenntlich gemacht (erster – blau, zweiter – grün, dritter – rot).	49
Abbildung 16: Stoffströme nach konventioneller trockenen Vorbehandlung (Fe- und NE-Abscheidung), Nassfraktionierung und Waschvorgang der MVA-Schlacken-Aufbereitungsanlage von Boskalis Dolman [Born, 2015b]	52
Abbildung 17: Skizze der Funktionsweise des Prallsichters zur Auftrennung der Schlacke in zwei Korngrößenspektren	53
Abbildung 18: Verfahrensschema der vorgeschalteten Nassschlacken-Aufbereitungsanlage und der nachgeschalteten NE-Separierung. [Weippert, 2015]	55
Abbildung 19: Erste Verfahrensstufe der Metallaufbereitungsanlage supersort. Grün dargestellt sind Output-Fraktionen, braun Rückstände und schwarz Prozessschritte. [Eberhard et al., 2015]	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Durchschnittliche Zusammensetzung von MVA-Aschen [Schoppmeier, 1988] zitiert in [Pretz et al., 2000; Alwast et al., 2010; Thomé-Kozmiensky, 2013]	11
Tabelle 2:	Chemische Zusammensetzung von MV-Schlacke nach Thomé-Kozmiensky [2013] und die entsprechend potenziellen Jahresfrachten an Schwermetallen und Salzbildnern in Hessen bei einem angenommenen jährlichen Anfall von 300.000 Mg MVA-Schlacke.	12
Tabelle 3:	Schwankungsbreiten der Schwermetalle (Feststoffgehalte) in MV-Schlacken im Vergleich zu den mittleren Konzentrationen in der Erdkruste. Untersuchung an 13 MVA mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik. [Pfrang-Stotz et al., 1999] zitiert in [Pfrang-Stotz et al., 2005]	13
Tabelle 4:	Vergleich des mechanischen Aufbereitungsverfahrens mit der elektrodynamischen Fragmentierung [Thome, 2012]	29
Tabelle 5:	Genehmigte Verbrennungskapazitäten der hessischen MHKW. Daten aus „Abfallwirtschaftsplan Hessen - Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle“, [HMUKLV, 2015b]	33
Tabelle 6:	Durchschnittlich pro Jahr verbrannte Abfallmengen der hessischen MHKW und dabei anfallende Schlackenmenge	36
Tabelle 7:	Jährlich durchschnittlich aufbereitete Menge an Rohschlacken mit den zugehörigen Metallgehalten nach Angabe der Anlagenbetreiber.	37
Tabelle 8:	Metallpotenzial des Feinschlackenanteils (in kg) aus 280.000 Mg Rohschlacke nach Schmidt et al. [2016, S. 201]	40

Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	<i>Abfallablagerungsverordnung</i>
Al	<i>Aluminium</i>
ARA	<i>Abwasserreinigungsanlage</i>
BBodSchG	<i>Bundesbodenschutzgesetz</i>
BBodSchV	<i>Bundesbodenschutzverordnung</i>
BImSchV	<i>Bundesimmissionsschutzverordnung</i>
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>
BMKW	<i>Biomassekraftwerk</i>
Ca	<i>Calcium</i>
Cu	<i>Kupfer</i>
DepV	<i>Deponieverordnung</i>
DepVerwV	<i>Deponieverwertungsverordnung</i>
DK	<i>Deponieklasse</i>
EBS	<i>Ersatzbrennstoff</i>
EDF	<i>Elektrodynamische Fragmentierung</i>
Fe	<i>Eisen</i>
GBWM	<i>Gutbettwalzenmühle</i>
GPa	<i>Gigapascal = 10^9 Pa</i>
H	<i>Wasserstoff</i>
HMV	<i>Hausmüllverbrennung</i>
HMVA	<i>Hausmüllverbrennungsgasche</i>
ITAD	<i>Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.</i>
K	<i>Kelvin</i>
KEA	<i>kumulierter energetischer Aufwand</i>
KrWG	<i>Kreislaufwirtschaftsgesetz</i>
KW	<i>Kohlenwasserstoffe</i>
LAGA	<i>Länderarbeitsgemeinschaft Abfall</i>
MantelV	<i>Mantelverordnung</i>
MEB	<i>mineralischer Ersatzbaustoff</i>
Mg	<i>Megagramm = 1000 kg</i>
Mg	<i>Magnesium</i>
MHKW	<i>Müllheizkraftwerk</i>

MO	<i>Mikroorganismen</i>
MV	<i>Müllverbrennung</i>
NE	<i>Nicht-Eisen-Metalle</i>
ns	<i>Nanosekunden</i>
O	<i>Sauerstoff</i>
örE	<i>öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger</i>
ppm	<i>parts per million = 10⁻⁶</i>
SEM	<i>Seltenerdmetalle, Seltene Erden</i>
TA	<i>Technische Anleitung</i>
TASi	<i>Technische Anleitung Siedlungsabfall</i>
TOC	<i>organischer Gesamtkohlenstoffgehalt, aus Engl. total organic carbon</i>
TrinkwV	<i>Trinkwasserverordnung</i>
WHG	<i>Wasserhaushaltsgesetz</i>

1 Einleitung

Ein Ziel des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) ist, neben der Ressourceneffizienz, die Abfallwirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft umzuformen. Ressourcen sollen nicht mehr verbraucht, sondern nach ihrer Nutzung erneut genutzt werden. Vor diesem Hintergrund ist die reine Abfallverbrennung überholt. Während die organischen Bestandteile des Abfalls verbrennen und die dabei entstehenden Abgase nach sehr hohen Standards gereinigt werden, erfolgt die Entsorgung der festen, oft hochbelasteten Verbrennungsrückstände zwar gesetzkonform, aber meist ohne hohe umweltschutztechnische Ambition [Thomé-Kozmiensky, 2013]. Zunehmend wird erkannt, dass die stoffliche Aufbereitung der enthaltenen mineralischen und metallischen Elemente auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit eine lukrative Lösung darstellt. Denn trotz flächendeckender Getrennsammlung von Metallschrott, Batterien, Bauschutt und anderen Wertstoffen gelangt weiterhin eine erhebliche Menge an Wertstoffen in den Siedlungsabfall, welcher zu einem hohen Anteil verbrannt wird. Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen bilden sich in der Asche Verbackungen und Konglomerate, die nur durch spezielle Aufbereitungsverfahren in ihre Bestandteile aufgetrennt werden können. Um eine bessere Verwendung der Müllverbrennungsschlacken (MVA-Schlacken) als Baustoff zu ermöglichen, wurde schon früher Eisen (Fe) abgetrennt. Heute liegt der Fokus nicht mehr allein auf der mineralischen Restfraktion (Fertigschlacke), die mit bis zu 85 % den größten Anteil der Schlacke ausmacht. Er verschiebt sich aufgrund des höheren wirtschaftlichen Gewinns zunehmend in Richtung der Nichteisenmetalle (NE-Metalle). Die eingesetzten Aufbereitungsverfahren erfassen jedoch keine chemisch gebundenen Metalle, wie beispielsweise Oxide oder Carbonate und stoßen vor allem im Feinkornbereich an ihre Grenzen. Diese Fraktion wird trotz bedeutender Metallgehalte in der Regel noch auf Deponien entsorgt.

1.1 Aufgabenstellung

Im Folgenden werden das Fe- und NE-Metall-Potenzial in MVA-Schlacken sowie der Stand der Technik der MVA-Schlacken-Aufbereitung dargestellt. Anschließend sollen das durchschnittliche Aufkommen an MVA-Schlacken in Hessen sowie das sich daraus ergebende Metallpotenzial ermittelt werden. Des Weiteren werden der aktuelle Stand der Aufbereitung von MVA-Aschen sowie Mengenflüsse in Hessen eruiert. Im

letzten Schritt werden bestehende Forschungsansätze zur weitergehenden Aufbereitung der Schlacken dargestellt und Adaptionmöglichkeiten erörtert.

1.2 Untersuchungsrahmen

Schlacke fällt nicht nur bei der direkten Müllverbrennung an, sondern auch bei der Verbrennung von Ersatzbrennstoffen (EBS) aus Siedlungsabfällen sowie bei der Verbrennung von Biomasse in BMKW. Nach Kersting [2015] und Gosten [2013] unterliegen Metallgehalt und Qualität von EBS-Schlacken großen Schwankungen, können aber mit dem der MVA-Schlacken bzw. des unbehandelten Siedlungsabfalls verglichen werden. Einzelbefunde zeigen, dass auch Schlacken aus BMKW höhere Fe- / NE-Anteile aufweisen. Trotz zum Teil ähnlicher Metallgehalte werden in dieser Arbeit ausschließlich Schlacken aus MVA betrachtet.

Betrachtungsschwerpunkt ist das Bundesland Hessen. Die Stoffstromanalyse für MVA-Schlacke basiert auf den Angaben der hessischen MVA-Betreiber und einem Abgleich der erfragten Daten mit der Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2014. Um zusätzlich mögliche Schlackenaufbereitungsanlagen zu erfassen, die nicht von den hessischen MVA beliefert werden, wurden außerdem die hessischen Regierungspräsidien Kassel, Gießen und Darmstadt befragt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich demnach in folgende Schritte:

- Darstellung des aktuellen Stands der Fachliteratur zum Thema Müllverbrennung, MVA-Schlacken und Aufbereitungstechniken
- Befragung der Betreiber der hessischen Müllverbrennungsanlagen
- Abgleich der Ergebnisse mit öffentlich zugänglichen Daten (Abfallmengenbilanz des Landes Hessen, Veröffentlichungen der ITAD etc.)
- Befragung der Aufbereitungsunternehmen der Schlacke aus den befragten MVA
- zusätzliche Rechercheergebnisse zu Aufbereitungsanlagen in Hessen
- Recherche zu weitergehenden Aufbereitungsverfahren, fortschrittlichen Anlagen, Technologien bezüglich der Metallrückgewinnung
- Erörterung von Adaptionmöglichkeiten auf Hessen

1.3 Begriffsbestimmungen

Der Verbrennungsrückstand aus Müllverbrennungsanlagen wird im Allgemeinen MVA-Asche oder -Schlacke¹ genannt. Die synonyme Verwendung dieser Begriffe ist wissenschaftlich nicht korrekt. Asche, die über ihren Erweichungspunkt hinaus erhitzt wurde, wird als Schlacke bezeichnet. Im Gegensatz zu Asche ist sie deshalb meist zäh oder fest. Entsprechend dem BVT-Merkblatt über die Abfallverbrennung [Umweltbundesamt, 2005] wurde im Titel die Bezeichnung MVA-Aschen gewählt. Mit laufenden Recherchen befand der Verfasser den Begriff Schlacke jedoch für geeigneter, da dieser sowohl im Sprachgebrauch, als auch in der Literatur geläufiger ist. So ist u. a. in den LAGA Merkblättern 19 und 20 von Schlacke die Rede. Zugleich grenzt sich dieser Begriff deutlicher von Kessel- und Filterasche ab und minimiert damit die Verwechslungsgefahr.

Je nach Aufbereitungsstand wird Schlacke nach Deike et al. [2012] untergliedert in:

- **Rohschlacke:** Schlacke nach Austrag, noch keiner Aufbereitung unterzogen
- **Frische Schlacke:** noch nicht gealterte Schlacke, direkt nach dem Aufbereitungsprozess
- **Fertigschlacke:** aufbereitete und gealterte Schlacke

Die IGENASS² [Bunge, 2016] definiert außerdem:

- **Primärschlacke:** trockene Schlacke vor dem Austrag (ab Rost)
- **Feinschlacke:** Schlacke < 2 mm
Hierbei ist die Korngröße der Schlackenbestandteile gemeint. Der Anteil also, der bei einem Sieb mit der Maschenweite 2 mm durchfällt.

¹ Teilweise ist auch die Rede von Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA), Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) oder, v. a. in der Schweiz, Kehrichtverbrennungsanlagenschlacke, kurz KVA-Schlacke.

² Interessengemeinschaft der nass austragenden Schweizer MVA

2 Grundlagen

Im Folgenden werden zunächst die Bestandteile von konventionellen MVA sowie die wichtigsten Prozesse der Müllverbrennung beschrieben. Ein besonderer Fokus liegt auf den Faktoren, die die Entstehung von Schlacke beeinflussen. Anschließend wird die Zusammensetzung der MVA-Schlacken dargestellt und explizit auf die darin enthaltenen Metalle eingegangen. Bevor verschiedene Aufbereitungsverfahren und die, an die Aufbereitung anschließenden typischen Verwertungswege aufgezeigt werden, werden die Rechtsgrundlagen beschrieben, die bei der Aufbereitung von MVA-Schlacken von Bedeutung sind.

2.1 Müllverbrennung

MVA-Schlacken entstehen bei der Verbrennung von Abfällen in Müllverbrennungsanlagen.

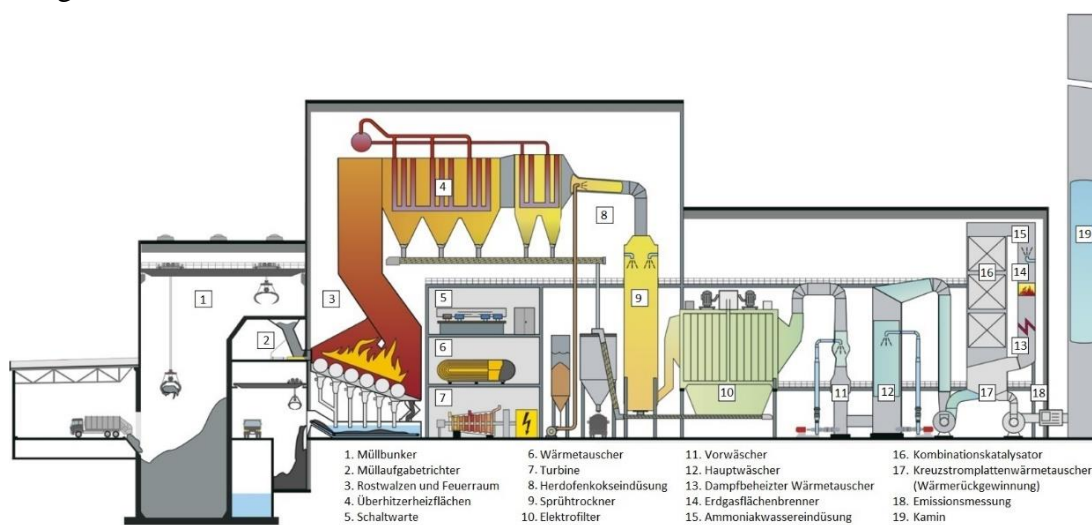


Abbildung 1: Schematische Darstellung des MHKW Offenbach
[Energieversorgung Offenbach AG, 2013]

Ursprünglich als Hygienemaßnahme im Zuge der Ausbreitung von Infektionskrankheiten wie Cholera, Pest oder Typhus in der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt, hat sich die Abfallverbrennung heute zur wichtigsten Vorbehandlungsmethode von Siedlungsabfällen entwickelt.³ Die Bedeutung und Akzeptanz der Verbrennungsanlagen

³ Neben der direkten Abfallverbrennung zur Restabfallbehandlung gibt es die Möglichkeit der mechanisch-biologische Abfallbehandlung. Die Abfälle werden in eine heizwertreiche und eine heizwertarme Fraktion aufgetrennt. Aus der heizwertreichen Fraktion werden Ersatzbrennstoffe (EBS) hergestellt, während die heizwertarme Fraktion biologisch stabilisiert und dann deponiert wird. Abfälle werden also vermehrt thermisch nachbehandelt. [Martens, 2011]

wuchs durch effektive Abgasreinigungsstufen, zusätzliche Stromerzeugung und Wärmerückgewinnung sowie die Einhaltung strenger Emissionswerte. Vor dem Hintergrund des knapper werdenden Deponieraums, des steigenden Abfallaufkommens und der aktuellen Politik ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Abfallverbrennung künftig weiter zunehmen wird. [Kleppmann, 2015; Meinfelder et al., 2008]

MVA behandeln in der Regel nur eine bestimmte Auswahl an Abfällen. Konventionelle Verbrennungsanlagen nehmen fast ausschließlich Siedlungsabfälle, wie Haus- und Sperrmüll an, während gefährliche Abfälle nur von speziell ausgelegten Anlagen angenommen werden.

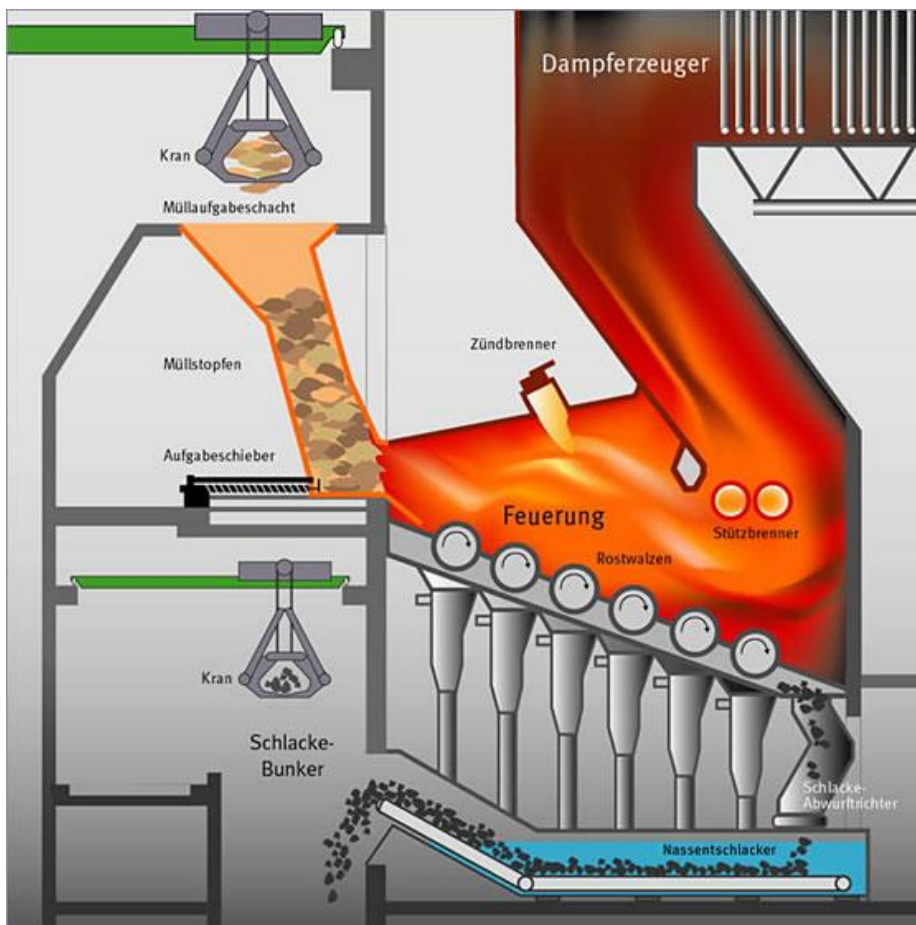


Abbildung 2: Aufbau der Kessel-/Feuerungsanlage des MHKW Offenbach inklusive Müllaufgabeschacht und Nassentschlacker [Energieversorgung Offenbach AG]

Ein kontinuierlicher Betrieb der Anlage muss auch nach mehreren Tagen ohne Abfallanlieferung gewährleistet werden, da das Anfahren der Verbrennung sehr energie- und zeitaufwändig ist. Die angelieferten Abfälle werden deshalb zunächst im Müllbunker vorgelagert. Ein Abfallkran transportiert den Abfall aus dem Bunker in den Feuerungsraum. In konventionellen MVA wird der Abfall über einen Verbrennungsrost geführt

und unter optimierter Luftzufuhr bei 850-1000 °C verbrannt. Dabei umfasst die Verbrennung vier Teilprozesse:

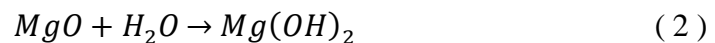
1. Trocknung des Abfalls
2. Entgasung flüchtiger Bestandteile, wie Schwefelgase oder Kohlenwasserstoffe (KW) bei > 250 °C
3. Vergasung von KWs in Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) bei 500-600 °C
4. Oxidation zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) bei > 800 °C

[Marb et al., 2002, S. 7-8]

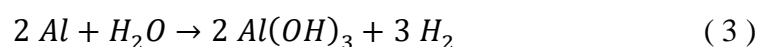
Mineralik, Glas und Metalle, deren Siedetemperaturen höher liegen, bleiben auf dem Rost zurück. Teilweise kommt es zum Aufschmelzen des zurückbleibenden Abfalls und zu Verbackungen mit Aschepartikeln. Am Ende des Rosts fällt dieser Verbrennungsrückstand als Rostabwurf an oder wird über die Verbrennungsgase in die Abgasreinigung getragen und als Filterstaub abgeschieden. Je nach Abfallzusammensetzung und Verbrennungsbedingungen finden sich auch unverbrannte Reste von Kunststoffen, Pappe, Papier und Ähnlichem im Rostabwurf.

2.1.1 Nassentschlackung

Der in einer MVA anfallende Rostabwurf muss gekühlt und noch brennende Teile gelöscht werden. In allen konventionellen MVA in Deutschland werden dafür Nassentschlacker eingesetzt. Der Verbrennungsrückstand fällt in ein Wasserbad, das neben der Abkühlung für die notwendige luftdichte Verschiebung des Feuerraums sorgt. Bei Wassertemperaturen von durchschnittlich 60 °C wird die Schlacke nach dem Rostabwurf für ca. 15 Minuten gewaschen. Dabei werden Calcium- und Magnesiumoxide gelöscht:



Das entstehende Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ ist stark basisch, weswegen unedle Metalle, wie z. B. Aluminium oxidieren:



[Simon et al., 2011; Thomé-Kozmiensky, 2013; Sabbas et al., 1998]

Chemisch gebundene Inhaltsstoffe wie Blei und Salze gehen teilweise in Lösung. Die Salzentfrachtung kann um ca. 50 % gesteigert werden, wenn der Nassentschlacker mit

Wasserüberschuss betrieben wird [Zwahr, 2004; Greinert, 2012]. Diese Möglichkeit wird in der Praxis aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit jedoch kaum genutzt [Lübben, 2015a]. Eine Ausnahme bildet die Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg. Hier wird das überschüssige Wasser *„danach in einer aufwendigen Apparatur so weit gereinigt, dass es anschließend als Prozesswasser in der Abgasreinigung weiter verwendet werden kann. Die gelösten Salze, insbesondere Chloride, werden über die HCl (Salzsäure)-Rektifikationsanlage aus dem Prozess ausgeschleust.“* [MVR Rugenberger Damm, 2015]

2.1.2 Trockenentschlackung

Alternativ zur Nassentschlackung werden in Europa vereinzelt (z. B. Kehrlichtverwertung Züricher Oberland KEZO oder KVA Satom in der Schweiz), in Japan fast ausschließlich Anlagen trocken betrieben [Koralewska et al., 2010]. Bei der Trockenentschlackung entstehen deutlich weniger Versinterungen, die den Aufbereitungsprozess erschweren. Eine anschließende Sortierung nach Farbe, Gewicht und Größe wird erheblich erleichtert. Schwermetalle, die sich hauptsächlich in der Feinfraktion der Schlacke anreichern, lassen sich durch Absieben dieser Fraktion relativ einfach reduzieren. Die Metallrückgewinnung kann effektiver und in einer höheren Reinheit durchgeführt werden. [Thomé-Kozmiensky, 2013] Die hydraulischen Eigenschaften des mineralischen Schlackenanteils bleiben unbeeinträchtigt. Ein großer Nachteil des Verfahrens ist die hohe Staubentwicklung. Zur Staubminderung sind aufwendige zusätzliche Maßnahmen zu treffen.

Die KEZO in Hinwil (CH) bereitet seit 2012 Rohschlacken bis zu einer Korngrößenfraktion von 0,2 mm auf. Auch Edelmetalle werden angereichert und zurückgewonnen. Seit 2015 ist die Anlage komplett auf trocken ausgetragene Schlacken umgestellt. Zwei in Reihe geschaltete Wirbelstromscheider sorgen für einen NE-Abscheidungsgrad von mehr als 90 %. Die NE-Metalle werden anschließend nach ihrer Dichte in Aluminium und ein NE-Schwermetallgemisch separiert. [Baudirektion des Kantons Zürich, 2015]

2.1.3 Stoffströme

Die Stoffströme einer MVA lassen sich nach Thomé-Kozmiensky [2013] wie folgt unterteilen:

- Primärabfälle (z. B. Hausmüll oder Sperrmüll),
- Sekundärabfälle (z. B. Rohaschen, Filterstaub) und

- Tertiärabfälle (z. B. NE-Metalle, Fe-Schrott, Glasschmelze aus der Aufbereitung von MVA-Rohschlacken).

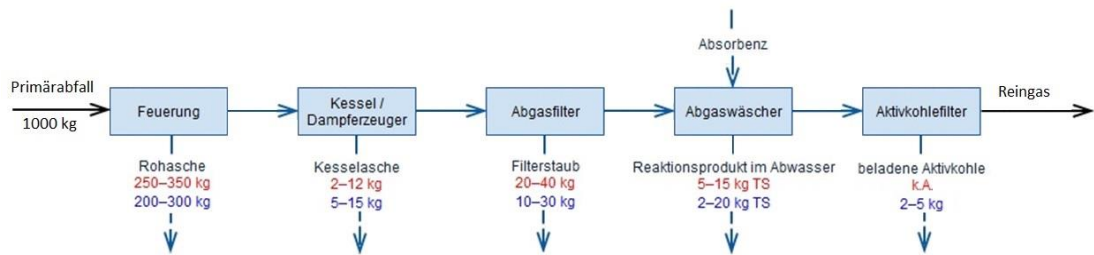


Abbildung 3: Stoffströme und spezifische Mengen der Sekundärabfälle aus der Verbrennung von einem Megagramm Siedlungsabfall.
 rot: nach Thomé-Kozmiensky [2013]; blau: nach [ITAD]

Das Gewicht des Primärabfalls wird bei der Verbrennung in einer MVA um 65-75 %, das Volumen bis zu 90 % reduziert. Abbildung 3 zeigt die Menge an Sekundärabfällen, die durchschnittlich bei der Verbrennung von einem Megagramm Siedlungsabfall (= Primärabfall) anfällt.

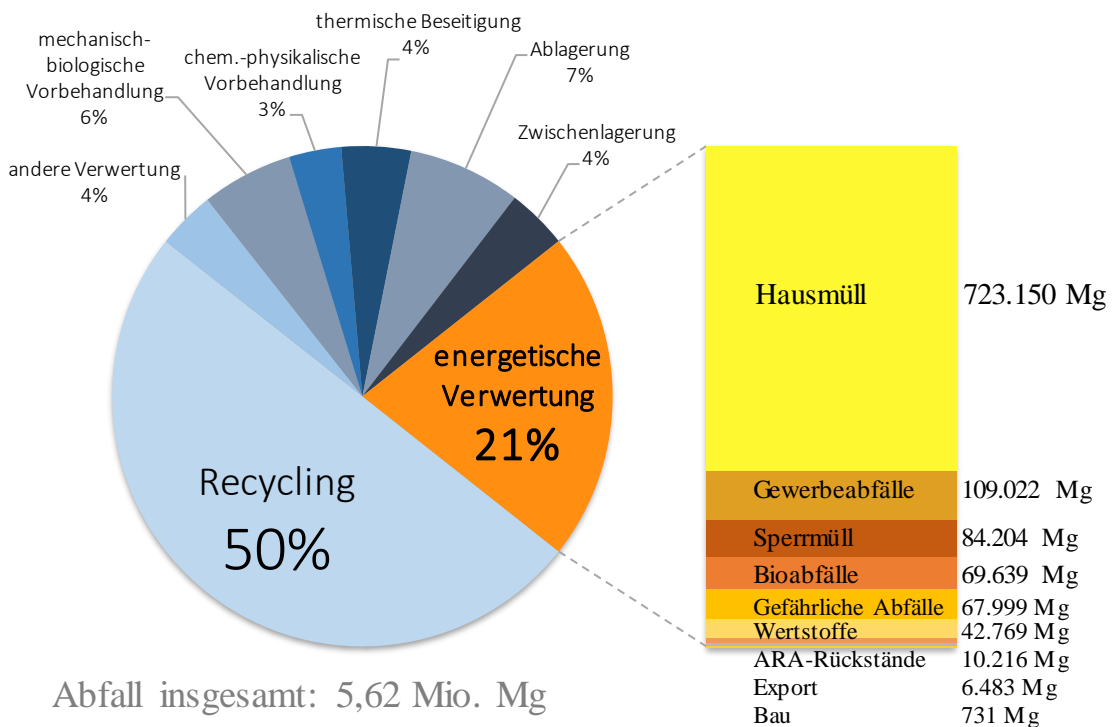


Abbildung 4: Verwertungswege des Abfalls aus Haushalten und Kleingewerbe in Hessen 2014 und Zusammensetzung des energetisch verwerteten Abfalls.
 Daten aus [HMUKLV, 2015a]

Nach Gillner et al. [2011] sind 85 % der in MVA behandelten Abfälle dem Hausmüll zuzuordnen. Für den Fall, dass Gillner et al. nicht nur Hausmüll, sondern Abfälle aus Haushalten und Kleingewerbe⁴ meinen, trifft dieser Wert auch annähernd für Hessen zu (82,55 %). Allein der Hausmüll macht im Jahr 2014 hingegen nur 64,9 % der in den MHKW verbrannten Abfälle aus (vgl. Abbildung 4).

⁴ Abfälle aus Haushalten und Kleingewerbe gliedern sich auf in Hausmüll, Sperrmüll, Bioabfälle (aus der Biotonne, Garten- und Parkanlagen), verwertbare Abfälle (grafisches Altpapier, Holz, Metall, EAG, etc.) und Verpackungen [HMUKLV, 2015a].

2.2 MVA-Schlacken

In Deutschland wird im Gegensatz zur Reduzierung der Abfallmenge mit einem erhöhten jährlichen Aufkommen an Schlacke gerechnet [Wiemer et al., 2011]. Dies kann u. a. auf den seit 2005 gestiegenen Anteil der thermisch energetischen Müllverwertung zurückgeführt werden. Beispielhaft zeigt sich das in der vom MHKW Kassel veröffentlichten Abfallmengenentwicklung (Abbildung 5), die auch aufführt, welche Menge an Abfällen für die Verbrennung im MHKW vorgesehen sind.

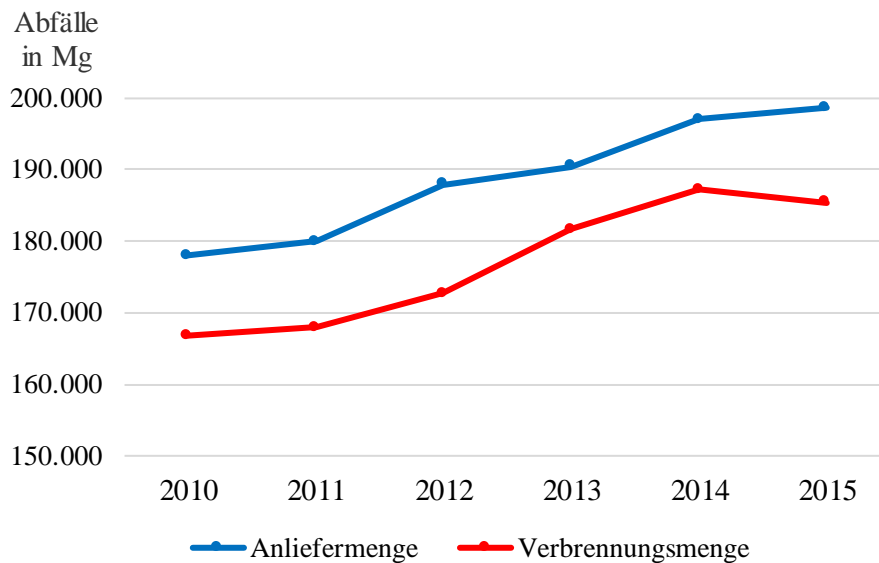


Abbildung 5: Abfallmengenentwicklung des MHKW Kassel in den Jahren 2010 bis 2015. Die Differenz zwischen Anlieferungs- und Verbrennungsmenge ist begründet durch die Aus-sortierung und gesonderte Verwertung verschiedener Wertstoffe durch die vorge-schaltete Abfallsortier-und-Zerkleinerungsanlage.
[Müllheizkraftwerk Kassel GmbH]

2.2.1 Zusammensetzung

Rohschlacke ist ein inhomogenes Stoffgemisch, bestehend aus Metallen, Mineralien und un- bzw. teilverbrannten organischen Reststoffen. Oft liegen diese in Konglomeraten⁵ vor, da sich während der Verbrennung neue Festphasen und anschließend durch die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten der Materialien oberflächliche Ver-backungen bilden.

Die stoffliche Zusammensetzung der Rohschlacke beruht auf der des verbrannten Ab-falls. Somit unterscheidet sich Rohschlacke nicht nur von Anlage zu Anlage, sondern kann auch nach Entstehungszeitpunkt variieren. In Tabelle 1 ist die durchschnittliche

⁵ Zusammenballungen verschiedener Materialien

Zusammensetzung von MVA-Schlacken dargestellt, wie sie in der Literatur im Allgemeinen angegeben wird. NE-Metalle machen einen deutlich geringeren Anteil aus als Eisen. Nach Zwahr [2006]⁶ befinden sich in MVA-Schlacke ca. 9 % Eisen und ca. 1 % NE-Metalle. Schmeisky et al. [2011, S. 24] schätzen den Gehalt an Fe auf 7-10 % und an NE auf 1-2 %.

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung von MVA-Aschen [Schoppmeier, 1988] zitiert in [Pretz et al., 2000; Alwast et al., 2010; Thomé-Kozmiensky, 2013]

Fraktion	Gehalt (Gew.-%)
Mineralische Fraktion	85 – 90
Un- oder Teilverbranntes	1 – 5
Fe- und NE-Metalle	7 – 10

MVA-Schlacke besteht überwiegend aus Oxiden, Sulfaten und Chloriden [Thomé-Kozmiensky, 2013]. Bricht man die Zusammensetzung dennoch auf Elementarebene herunter, liegen zum großen Teil die Hauptelemente Eisen, Silizium, Aluminium und Calcium vor. Außerdem treten Natrium, Kalium, Magnesium und in Spuren die Schwermetalle Blei, Zink, Chrom, Kupfer, Nickel und Cadmium auf. Ebenfalls im Spurenbereich finden sich Barium, Rubidium, Strontium, Mangan und Titan. Chlorid und Sulfat sind die hauptsächlich vorzufindenden Anionen. [Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, 2015; Pfrang-Stotz et al., 2005]

⁶ zitiert in Simon et al. [2011]

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von MV-Schlacke nach Thomé-Kozmiensky [2013] und die entsprechend potenziellen Jahresfrachten an Schwermetallen und Salzbildnern in Hessen bei einem angenommenen jährlichen Anfall von 300.000 Mg MVA-Schlacke.

	g/kg		Mg/a	
	Min	Max	Min	Max
Eisen	40	230	12.000	69.000
Silicium	10	215	3.000	64.500
Aluminium	80	180	24.000	54.000
Calcium	25	100	7.500	30.000
Natrium	10	60	3.000	18.000
Kohlenstoff	15	40	4.500	12.000
Kalium	5	20	1.500	6.000
Magnesium	6	18	1.800	5.400
Blei	1	17	300	5.100
Zink	4	15	1.200	4.500
Carbonat (als C)	7	15	2.100	4.500
Phosphat (als P)	7	14	2.100	4.200
Chrom	1	10	300	3.000
Chlorid	3	6	900	1.800
Kupfer	1	4	300	1.200
Sulfat (als S)	2	4	600	1.200
Nickel	0,1	0,3	30	90
Cadmium	0,01	0,03	3	9
Quecksilber	0,0001	0,007	0,03	2,1

2.2.2 Metalle

15 % der ausgebrachten Rohschlacke bestehen aus erstarrten oder gesinterten Schlackebrocken. Metallstücke liegen zum einen eingeschlossen in diesen Schlackebrocken vor oder in Mineralik, die sich nach dem Nassaustrag neu bildet. Mit konventioneller Aufbereitungstechnik lassen sich bisher nur Metallstücke > 2 mm verlässlich separieren. Diese Fraktion setzt sich überwiegend aus Getränke- und Konservendosen, Wasserhähnen, Ölfiltern, Elektromotoren, Schrauben und anderen metallischen Gegenständen zusammen [Thomé-Kozmiensky, 2013]. Edelmetalle in dieser Größenordnung stammen hauptsächlich aus Schmuckstücken, während diese in der Feinfraktion auf Elektroschrott zurückzuführen sind.

Die Rückgewinnung von Gold und anderen Edelmetallen ist derzeit noch nicht wirtschaftlich. NE-Konzentrate mit höherem Edelmetallgehalt werden in der Regel aber zusätzlich vergütet. Bunge [2014] beschreibt eine mögliche Erlössteigerung um 50 % bei einer zusätzlichen Erschließung des Goldpotenzials durch „unkonventionelle Mittel“.

Der Verbrennungsprozess stellt eine Aufkonzentrierung der nichtbrennbaren Materialien dar. Schwermetalle reichern sich im Abgas und in der Rohschlacke an. MVA-Rohschlacke weist dadurch durchschnittlich einen zehnfachen bis einhundertfachen höheren Schwermetallgehalt auf als Erdkruste [Johnson, 1993]. Schwermetalle und Salzbildner liegen jedoch selten elementar vor und lassen sich auch mit technisch neuen Aufbereitungsverfahren nicht vollständig zurückgewinnen.

Tabelle 3: Schwankungsbreiten der Schwermetalle (Feststoffgehalte) in MV-Schlacken im Vergleich zu den mittleren Konzentrationen in der Erdkruste. Untersuchung an 13 MVA mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik.

[Pfrang-Stotz et al., 1999] zitiert in [Pfrang-Stotz et al., 2005]

	MV-Schlacke (ppm)	Erdkruste (ppm)
Zink	1.795 bis 5.255	70
Kupfer	1.245 bis 5.823	60
Blei	1.108 bis 3.900	14
Chrom	295 bis 1.617	6
Nickel	90 bis 260	2,4

2.2.3 Seltene Erden

Siebzehn Metalle befinden sich in der dritten Nebengruppe des Periodensystems der Elemente und zählen zu den Seltenerdmetallen (SEM). Diese Elemente gelten als besonders wertvoll, da ihr Vorkommen auf wenige Länder begrenzt ist. Die großen Industrienationen (USA, Japan, Europa) sind beispielsweise mit über 90 % von einem Import aus China abhängig. Verstärkt eingesetzt werden SEM in Hochtechnologiebereichen, u. a. in Elektro- und Elektronikgeräten, in Leuchtmitteln, Neodym-Magneten, Katalysatoren etc. Überwiegend durch falsche Entsorgung gelangen SEM auch in die Müllverbrennung und dementsprechend letztlich in die MVA-Schlacken. Aufgrund der geringen Konzentrationen von SEM in den Abfallprodukten und der zusätzlichen Vermischung mit dem Verbrennungsmüll ist eine wirtschaftliche Rückgewinnung aus MVA-Schlacken derzeit nicht zu erwarten. [Schmeisky et al., 2011]

2.2.4 Metallpotenzial der Feinfraktion

Heutige Aufbereitungsanlagen für MVA-Schlacken nutzen zum Großteil mechanische Verfahren. Die Erfassung von kleineren Partikeln und chemisch gebundenen Metallen wie z. B. von Oxiden oder Carbonaten erfolgt relativ selten [Simon et al., 2011], da hier die klassischen mechanischen Verfahren an ihre Grenzen stoßen. So werden Schlacken bis zu einer Korngröße von 2 mm, in einigen Anlagen nur bis zu einem Bereich von 6 mm aufbereitet. Kleinere Partikel werden auf Deponien entsorgt.

Nach Grünbein et al. [2015, S. 149-150] entfallen 30-40 %, Gronholz und Schmidt [2016] zufolge ca. 48 % der Rohschlackenmasse auf die Feinfraktion.

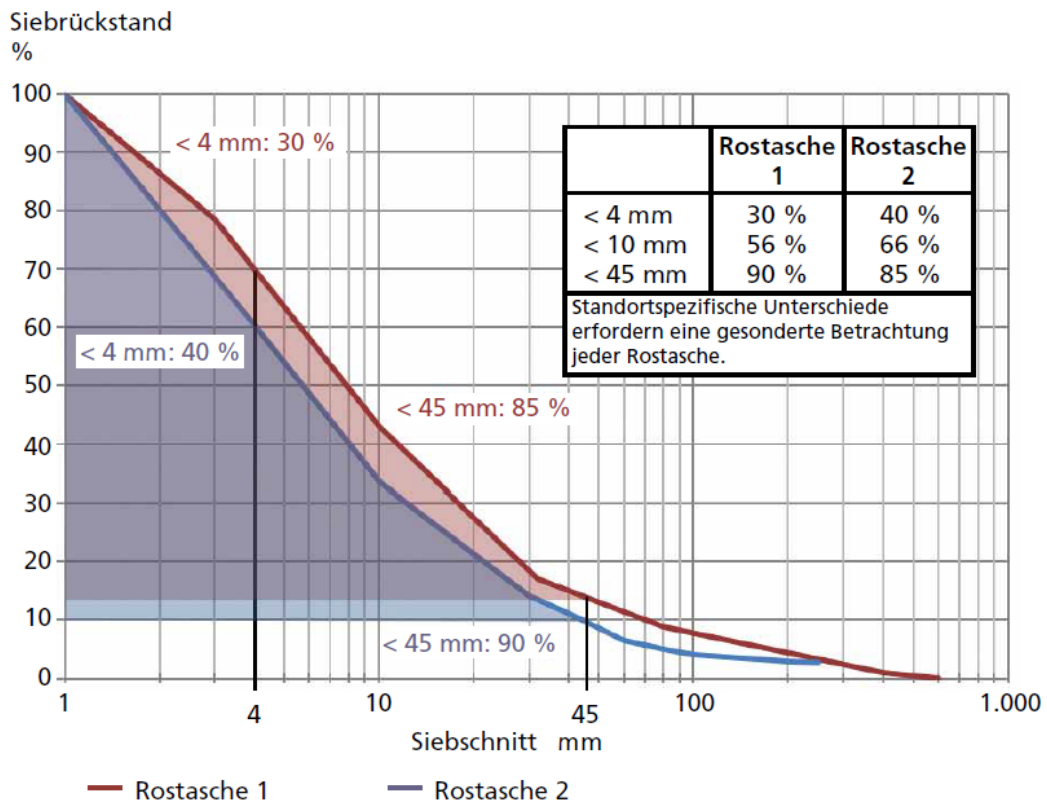


Abbildung 6: Siebrückstandslinie zweier Rostascheproben [Grünbein et al., 2015]

Schlackenanalysen in der Schweiz ergeben, dass 80 % der NE-Metalle in einer Korngröße kleiner 20 mm vorliegen [Bunge, 2014]. Hervorzuheben sind hier Aluminium und Kupfer. Aluminium macht ca. 50 % der NE-Metalle aus, wird in den Analysen nach LAGA M20 jedoch nicht berücksichtigt. Kupfer unterliegt einer hohen Nachfrage und kommt in ähnlichen Konzentrationen wie in abbauwürdigen Kupfererzen vor. [Breitenstein et al., 2015; Schmeisky et al., 2011]

2.2.5 Qualität der Schlacken

Für den weiteren Verwertungs- oder Entsorgungsweg der Schlacke spielt deren Qualität eine entscheidende Rolle. Diese variiert u. a. aufgrund der Abfallzusammensetzung, der Durchmischung der Abfälle und der Verbrennungsbedingungen [Wiemer et al., 2011; Thomé-Kozmiensky, 2013]. Um eine qualitativ hochwertige Schlacke zu bekommen, sollte ein möglichst vollständiger Ausbrand stattfinden. Erheblich beeinflussen lässt sich dieser durch die Regulierung der Durchsatzmenge. Die Art des Schla-

ckenaustrags (nass oder trocken) hat ebenfalls Einfluss auf die Schlackenqualität. Versinterungen beeinträchtigen eine nachfolgende NE-Abscheidung mittels Wirbelstromtechnik erheblich, was sich direkt auf die Qualität der Feinschlacken auswirkt. [Wiemer et al., 2011]

Je nach Verwertungsziel gibt es unterschiedliche rechtliche Vorgaben. Die Anforderungen sind u. a. in LAGA Merkblättern festgelegt (siehe Kapitel 2.3.2). Soll die Schlacke nur deponiert werden, muss in der Regel keine weitere Aufbereitung durchgeführt werden, das Volumen des Siedlungsabfalls wird durch die Verbrennung um 90 % verringert und dieser zudem hygenisiert. Die Kosten für die Deponierung von Abfällen sind nach Deponieklassen⁷ (DK) gestaffelt. Wo ein Abfall abgelagert werden darf, wird u. a. anhand der Eluatwerte entschieden. Lassen sich nach standardisierten Prüfverfahren nur geringe Mengen an Schadstoffen auswaschen, kann eine Deponierung in einer niedrigen DK erfolgen, die entsprechend günstiger ist. Die meisten Fertigschlacken erreichen im günstigsten Fall DK II – Kriterien. Im Rahmen eines Forschungsprojektes konnten nach erweiterter Aufbereitung mit einem Hochgeschwindigkeitsprallzerkleinerer jedoch auch die vorgeschriebenen Eluatwerte für eine Ablagerung im Bereich DK I, mit einzelnen Teilströmen sogar für eine DK 0 - Ablagerung erreicht werden. [Lübben, 2015a]

⁷ Die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) unterscheidet zwischen fünf Deponieklassen:

DK 0: Oberirdische Deponie für Inertabfälle mit geringem Schadstoffgehalt

DK I: Oberirdische Deponie für mäßig belastete (nicht gefährliche) Abfälle

DK II: Oberirdische Deponie für belastete, nicht gefährliche Abfälle

DK III: Oberirdische Deponie für gefährliche Abfälle

DK IV: Untertagedeponie (Bergwerk oder Kaverne) für besonders gefährliche Abfälle

2.3 Rechtsgrundlagen

Den Rahmen für Regelungen, die die Schlackenaufbereitung betreffen, bildet das Kreislaufwirtschaftsgesetz. Hier ist neben der Abfallhierarchie beispielsweise auch die Definition für das Ende der Abfalleigenschaft festgelegt. Detaillierte Anforderungen an die Qualität aufbereiteter Schlacken finden sich, gegliedert nach Verwertungsziel, in den LAGA Merkblättern. Diese sind zum Teil jedoch schon veraltet. Zukünftig sind durch die geplante Mantelverordnung höhere Anforderungen zu erwarten.

2.3.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Die Grundlage für eine bundesweit einheitlich geregelte Abfallwirtschaft bietet das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Es legt die folgende Abfallhierarchie fest:

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung
5. Beseitigung

Eine Vermeidung von Abfall, der bereits angefallen ist, ist nicht möglich. Auch der zweite Punkt der Abfallhierarchie spielt im Falle der Abfallverbrennung keine Rolle mehr. Ein Recycling, bzw. eine stoffliche Verwertung stellt demnach die vorrangige Behandlung dar. Unter stoffliche Verwertung zählt eine Benutzung der Abfälle, deren Hauptzweck nicht die Beseitigung ist [Beck et al., 2005]. Der Einsatz von MVA-Fertigschlacke als Deponiebaustoff wird also der stofflichen Verwertung zugerechnet, sofern nicht mehr Schlacke eingesetzt wird als für den Bauvorgang benötigt wird. Die Verfüllung (z. B. von alten Bergwerksstollen, Tongruben o. ä.) zählt nach der Abfallhierarchie zur sonstigen Verwertung, die Deponierung fällt unter Beseitigung.

In § 5 KrWG ist das Ende der Abfalleigenschaft festgelegt. Wenn ein Abfall ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat, verliert er seine Abfalleigenschaft, wenn:

- für diesen ein Verwendungszweck vorhanden ist
- für diesen eine Nachfrage vorhanden ist
- bestimmte technische Anforderungen und Rechtsvorschriften eingehalten werden, die für den neuen Verwendungszweck bestehen
- bei der Verwendung keine oder nur geringe schädliche Wirkung auf Mensch oder Umwelt zu befürchten sind.

Fertigschlacke kann dementsprechend als Ersatzbaustoff bezeichnet, vermarktet und eingesetzt werden, wenn obige Punkte erfüllt sind und die am Einsatzort geltenden

Vorschriften eingehalten werden. Auch zurückgewonnene Metalle verlieren mit ihrer Separierung ihre Abfalleigenschaft und gelten als Sekundärrohstoffe.

Diverse Rechtsverordnungen konkretisieren und vervollständigen das KrWG. Beispielsweise sind in der 17. BImSchV Vorschriften über die Verbrennung von Abfällen inklusive geltender Emissionsgrenzwerte zu finden. Die Beseitigung von mineralischen Abfällen ist in der Deponieverordnung (DepV) von 2009 näher geregelt, die auch das Deponierungsverbot für unbehandelte Abfälle⁸ und die Zuordnungskriterien für die Deponieklassen I und II führt. Die Verwertung von mineralischen Abfällen soll in der Mantelverordnung bundeseinheitlich geregelt werden. Bisher liegt diese jedoch lediglich in Arbeitsentwürfen vor, sodass neben BBodSchG, BBodSchV, WHG, KrWG weiterhin länderspezifische Regelungen gelten. In Hessen und den meisten anderen Bundesländern stellen die LAGA-Merkblätter den Leitfaden zur Entsorgung der Schlacken dar.

2.3.2 LAGA Merkblätter

Die Merkblätter der *Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)* stellen keine rechtsverbindliche Grundlage dar. Sie gelten jedoch als Leitlinie und werden bundesweite anerkannt.

Das *Merkblatt der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle (LAGA M 19)* gibt vor, dass nur Abfälle als Baustoffe eingesetzt werden, die definierte Feststoff- und Eluatwerte einhalten. HMV-Schlacke muss zudem mindestens in Mineralik, Metallschrott und unverbrannte Reststoffe aufgeteilt werden, wobei dies nicht weiter definiert wird. Einer Metallabtrennung entspricht demnach bereits eine einfache Eisenabtrennung. In vierjährlichem Abstand müssen MVA eine Qualitätskontrolle der Rohschlacke durchführen. In Aufbereitungsanlagen müssen vom Betreiber zusätzlich wöchentlich diverse Parameter bestimmt werden. Da das LAGA M 19 seit 1994 besteht und die Aufbereitungstechniken seitdem verbessert wurden, werden die vorgegebenen Grenzwerte selten erreicht oder gar überschritten. Lediglich die Einhaltung des Eluatwertes von Blei bleibt für manche Anlagen eine Herausforderung. [Meßmann et al., 2004]

⁸ Das Deponierungsverbot für unbehandelte Abfälle aus der TA Siedlungsabfall von 1993 wurde mit einer Übergangsfrist von zwölf Jahren erst in der AbfAbIV umgesetzt. Zur Vereinfachung wurden 2009 jedoch die AbfAbIV, die alte DepV und die DepVerwV von der neuen DepV abgelöst. Das Deponierungsverbot hat zur Folge, dass Siedlungsabfälle vermehrt thermisch behandelt werden und damit größere Mengen an MVA-Schlacken anfallen.

Neben den genannten Grenzwerten werden im LAGA M 19 folgende Punkte zur Verbesserung der Eigenschaften von MVA-Schlacke aufgeführt:

- Reduzierung von schwermetallhaltigen und inerten Stoffen im MVA-Input
- Optimierung der Verbrennungsbedingungen (geringerer organischer Anteil)
- getrennte Erfassung von Filter- und Kesselaschen (geringere Schwermetallbelastung)
- Rückführung des Rostdurchfalls (geringerer organischer Anteil)
- Einführung eines anschließenden Waschvorgangs (geringerer Salzanteil)
- Fe - Abscheidung
- Abtrennung von Feinkorn (Schwermetallbelastung)
- Rückführung von Überkorn
- zwei- bis vierwöchige Lagerung (Entwässerung, Verringerung der chemischen Aktivität)

Das LAGA M 20 („Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen“) behandelt in einem Kapitel ebenfalls die Aufbereitung von HMV-Schlacken und ist etwas aktueller (letzte Neuerung: November 2003) [LAGA, 2003]. Die Anforderungen sind aber weitgehend dieselben wie im LAGA M 19.

2.3.3 Mantelverordnung

Mit dem Ziel, die lebenswichtigen Ressourcen Boden und Wasser, mit allen Eigenschaften und Wechselwirkungen zu erhalten und vor Versiegelung und Schadstoffeinträgen besser zu schützen, wird in Deutschland an der *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung*, kurz Mantelverordnung (MantelV) gearbeitet. Diese soll eine bundeseinheitliche rechtsverbindliche Norm schaffen, die u. a. das Grundwasserrecht, die Ersatzbaustoff-, die Deponie- und die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung umfasst. Da viele Bereiche direkt oder indirekt betroffen sind, zieht sich die Diskussion bereits seit knapp zehn Jahren hin. Befürchtet werden u. a. komplizierte Überwachungs- und Dokumentationsregelungen. Mineralische Ersatzbaustoffe (MEB), zu denen auch MVA-Fertigschlacken zählen können, sollen z. B. anhand diverser Parameter⁹ in Klassen eingestuft werden, die verschiedenen Auflagen unterliegen. So wird statt einer Förderung der stofflichen Wiederverwertung gemäß KrWG §6

⁹ Wichtige Parameter sind z.B. pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK15, PAK16), Chlorid, Sulfat, Fluorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom gesamt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium und Zink.

mit deutlichen Einschränkungen für den Einsatz von MEB gerechnet. Seit dem 23.07.2015 liegt der dritte Arbeitsentwurf der MantelIV vor, der einige Regelungen für die Verwendung von MEB verschärft. Noch im Sommer 2016 soll ein vierter Entwurf fertiggestellt werden. Das Inkrafttreten der MantelIV ist für 2017 geplant. Solange unterliegt die Verwendung von MEB noch den verschiedenen, oft komplexen Landesregelungen. In Hessen ist weiterhin das LAGA M 20 maßgeblich. [BMUB, 2015; EUWID Recycling, 2016; BDI, 2015; Calta et al., 2015, S. 9]

2.4 Konventionelle Aufbereitung

Trotzdem MVA-Schlacke unabhängig von ihrer Herkunft immer ähnlich zusammengesetzt ist, sind „weltweit keine zwei Schlackenaufbereitungsanlagen identisch“ [Bunge, 2016, S. 146]. Selbst innerhalb von Regionen mit denselben rechtlichen Gegebenheiten weisen die Anlagen Unterschiede auf. Die angewendeten Verfahrensschritte basierend jedoch oft auf dem gleichen Prinzip, weshalb die in diesem Kapitel beschriebenen trocken mechanischen Verfahren als konventionell bezeichnet werden.

2.4.1 Separationstechniken

Die Auftrennung der MVA-Schlacke in ihre ursprünglichen Materialien stellt den heute vorherrschenden Ansatz dar. Je nach Aufbereitungstiefe und -verfahren können Sekundärrohstoffe in wirtschaftlichen Mengen gewonnen und vermarktet werden. In konventionellen Anlagen liegt der Schwerpunkt momentan noch in der Aufbereitung des mineralischen Anteils der Schlacken, auch wenn bereits ein hoher Anteil der Fe-Metalle zurückgewonnen wird. [Wiemer et al., 2011]

Klassischerweise werden zur stofflichen Aufbereitung folgende trockenmechanische Techniken eingesetzt:

- Klassiersiebe zur Korngrößenfraktionierung und besseren Abscheidung von Metallen
- Magnetscheider zur Fe-Abscheidung
- Wirbelstromscheider zur NE-Abscheidung
- Prallbrecher oder andere Zerkleinerungsanlagen zur besseren Korngrößenfraktionierung und Trennung der Materialien
- Windsichter zur Abtrennung unverbrannter Stoffe

Die aufgelisteten Verfahrensschritte werden in einer Schlackenaufbereitungsanlage je nach Aufbereitungsziel und -tiefe unterschiedlich angeordnet und mehrfach wiederholt. Eine beispielhafte Aufbereitungsanlage, in der mit konventionellen Techniken eine hohe Metallrückgewinnung möglich ist, ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Die Effektivität dieser Techniken nimmt mit sinkender Korngröße ab, sodass auch die Qualität der zurückgewonnenen Metalle geringer wird. Momentan entspricht die Aufbereitung der MVA-Schlackenanteile ≥ 2 mm dem Stand der Technik.

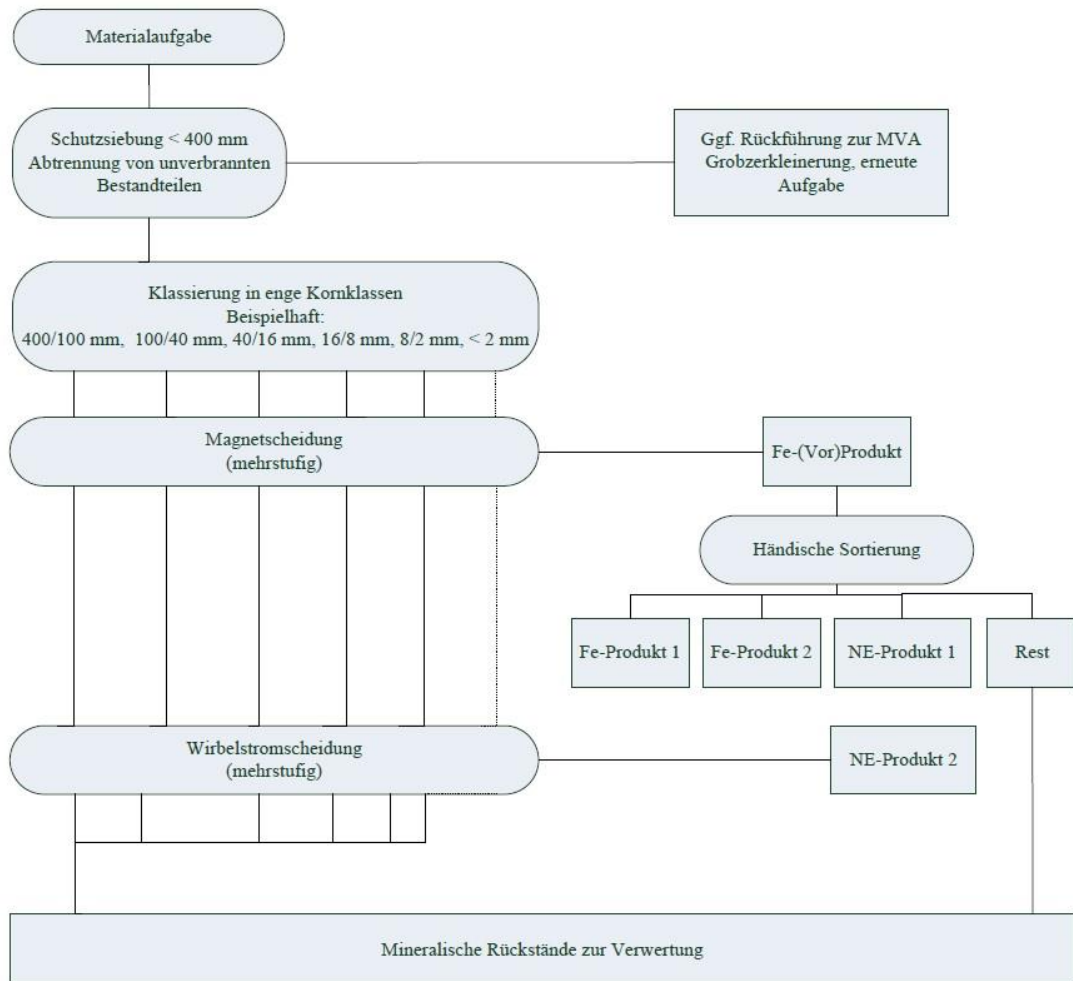
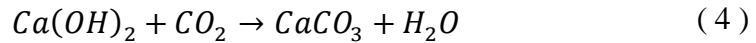


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer beispielhaften konventionellen Schlackenaufbereitung [Krüger et al., 2016]

2.4.2 Alterung

Rohschlacke wird vor der Aufbereitung in der Regel für sechs bis zwölf Wochen gelagert. Dazu wird die Schlacke in Mieten aufgehäuft und bewässert. Durch den Kontakt mit Wasser und Luft laufen verschiedene chemische Reaktionen ab. Die größtenteils exothermen Reaktionen führen unter anderem dazu, dass Schadstoffe stark an die Schlacke gebunden, also immobil werden. Zu diesen chemischen Prozessen gehören z. B. die Oxidation von Metallen, die Neubildung verschiedener Mineralphasen und die Carbonatisierung der in der Nassentschlackung entstandenen Erdalkalihydroxide. [Thomé-Kozmiensky, 2013; Simon et al., 2011; Beck et al., 2005]

Das stark basische Calciumhydroxid neutralisiert sich mit schwach sauren silikatischen Schlackebestandteilen, wie z.B. Kieselsäure oder Quarz sowie beim Kontakt mit Luft. Diese Reaktion wird auch als Abbindereaktion bezeichnet:



Der pH-Wert der Schlacke verringert sich nach dreimonatiger Lagerung durchschnittlich von pH 12 auf pH 6. Um den Alterungsprozess zu beschleunigen kann die Schlacke mit Kohlendioxid belüftet werden. In einem Großversuch von Marzi et al. [2004, S. 23-30] konnte bereits nach wenigen Tagen eine kontrollierte und vollständige Carbonatisierung sowie eine deutliche Verringerung löslicher Blei-, Kupfer- und Molybdänverbindungen erreicht werden. Untersuchungen von Breitenstein et al. [2015] ergaben, dass der Kupfer- und Aluminiumgehalt in der Feinschlacke nach der Alterung insgesamt etwas niedriger ist als der von frischer Schlacke.

2.4.3 Metallentfrachtung

Die Abtrennung von Eisen ist neben der Alterung die einfachste Art der Schlackenaufbereitung. Eisenschrott wurde bereits 1896 in der ersten MVA Deutschlands mittels Magnetscheider aussortiert [MVR Müllverwertung, 2015]. In den 1980er Jahren kam nach und nach die Abtrennung von Aluminium hinzu, da dieses Metall die bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten Schlacken stark mindert [Pretz et al., 2016]. Heute werden im Zuge der Schlackenaufbereitung außerdem Kupfer und zum Teil Edelstahl zurückgewonnen sowie unverbrannte organische Reste detektiert und in die Verbrennung zurückgeführt. Die Abtrennung der NE-Metalle wurde durch Optimierungen in den letzten Jahren in vielen Anlagen erheblich verbessert. Die Ausschleusung strategischer Metalle¹⁰, die einen immer höheren Stellenwert einnimmt, liegt derzeit bei maximal 20 % der potenziell vorhandenen Menge [Wiemer et al., 2011]. Technologisch ist zwar noch nicht das Maximum erreicht, eine weitere Steigerung in vielen Anlagen wirtschaftlich jedoch nicht sinnvoll [Lübben, 2015a, S. 321]. Schwerpunktmäßig zurückgewonnene NE-Metalle sind Kupfer und Aluminium, die nicht nur einen hohen Marktwert erzielen, sondern deren Rückgewinnung sich auch für die Umwelt positiv auswirkt.

¹⁰ Metalle, deren Verfügbarkeit aufgrund ihres Verwendungszwecks und ihrer Herkunft als wichtig angesehen werden. Keiner Stoffgruppe mit ähnlichen chemischen oder physikalischen Eigenschaften zuzuordnen, sondern politisch geprägter Begriff.

Auf die hessische Wirtschaft bezogen sind dies v.a. Indium, Platingruppenelemente und Seltenerdmetalle. Außerdem von Bedeutung sind Chrom, Kobalt, Erdöl, Gallium, Germanium, Kupfer, Lithium, Niob, Phosphor, Silber, Tantal, Tellur und Zirkonium. [Faulstich et al., 2011]

Für die Primärproduktion von 1.000 kg Kupfer ist ein Globaler Materialaufwand¹¹ von ca. 300 Mg verbunden [BAM, 2011]¹². Aluminium ist zwar das dritthäufigste Element in der Erdkruste, für die Gewinnung von einem Megagramm werden jedoch ca. 15.000 kWh verbraucht und 57 m³ Abwasser sowie 13 Mg Rotschlamm fallen an. Zurückgewonnene Metalle aus MVA-Schlacken werden als Sekundärrohstoff eingesetzt. Damit werden Primärrohstoffe eingespart und die für deren Produktion benötigten Ressourcen geschont. In Zahlen lässt sich der Beitrag zum Klimaschutz durch den *kumulierten energetischen Aufwand (KEA)* darstellen. Der KEA erfasst den kompletten Energiebedarf, der zur Herstellung eines Stoffes benötigt wird. Für Metalle werden also der Energiebedarf für den Erzabbau, den Transport, die Erzaufbereitung und die Verhüttung summiert. Der Vergleich des theoretischen KEA für die Metallrückgewinnung aus MVA-Schlacken mit der Primärrohstoffherstellung ergibt das Energieeinsparpotenzial. Wiemer und Gronholz [2011] gehen davon aus, dass aus 1000 kg MVA-Schlacke 44 kg Fe- und 16,3 kg NE-Metalle separiert werden können, die in ihrer Qualität mit Primärmetallen vergleichbar sind. Unter diesen Voraussetzungen ermitteln sie eine Energieeinsparung von 439 kWh durch die NE- und von 146 kWh durch die Fe-Abscheidung. Dies kommt einer Einsparung von 357 kg CO₂ gleich.¹³

Eine Metallausbeute von 100 % ist in der Regel nicht sinnvoll, da die Kosten und der Verbrauch von Ressourcen (Energie, Wasser, etc.) ab einer gewissen Metallausbeute die Einsparungen der Rückgewinnung übersteigen. Dieser Grenznutzen variiert je nach Aufbereitungsverfahren. Die Verbesserung aktueller Rückgewinnungsraten ist v. a. durch bessere Ausnutzung des Metallpotenzials aus dem Feinkornanteil der MVA-Schlacken lohnenswert.

¹¹ Umfasst sämtliche für die Produktion benötigten Materialien. Darunter fallen z. B. Energierohstoffe aber auch Abraum.

¹² zitiert in [Schmeisky et al., 2011, S. 2]

¹³ Für den durchschnittlichen Strommix in Deutschland wird ein Wert von 0,61 CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde angenommen. [Statista]

2.5 Weitergehende Aufbereitungsverfahren

Je nach Größe der Anlage, wirtschaftlichen Gegebenheiten und Zielrohstoff verfügen einige Anlagen über weitergehende Aufbereitungstechniken. Zum einen kann das Elutionsverhalten der Schlackenrestfraktion verbessert werden, sodass technische und umweltrelevante Auflagen für Ersatzbaustoffe erfüllt werden. In der Vergangenheit wurde dies unter anderem mit alternativen Verbrennungstechniken getestet, mit denen eine Verglasung der Schlacke bezweckt wurde. Heute werden dafür vor allem Waschverfahren eingesetzt. Zum anderen können mit neuen Verfahren zusätzliche Metalle aus dem Feinkorn geschöpft werden. NE-Metalle erzielen ein Vielfaches des Eisenmarktwertes, sodass der Aufbereitungsschwerpunkt meist auf der Separierung dieses Stoffstromes liegt. Ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit der Aufbereitung ist eine möglichst gleichmäßige Korngrößenverteilung. Können konventionelle Verfahrenstechniken auf ein kleineres Korngrößenspektrum eingestellt werden, lassen sich, durch sinnvolle Anordnung und Wiederholungen verschiedener Schritte, auch mit diesen Feinfraktionen aufbereiten. Nach Fuchs et al. [2014, S. 198] ist für eine umfassende Metallrückgewinnung *„eine Aufteilung des Kornbandes in mindestens drei - besser in fünf - Fraktionen“* notwendig. Leistungsfähige NE-Abscheider können unter optimalen Bedingungen bis zu Korngrößen von ca. 1 mm eingesetzt werden.

2.5.1 Verglasung

Vor allem in den 1990er Jahren wurde eine umweltverträglichere Entsorgung bzw. Verwendung der Schlacken durch Verglasung der Schlacken angestrebt. In diesem Rahmen wurden beispielsweise das Thermoselect oder das Schwel-Brenn-Verfahren als Alternative zur klassischen Verbrennung entwickelt. Sämtliche Schadstoffe sollten in die Matrix der Schlacke eingebunden werden, sodass diese durch Regen und ähnliche Einflüsse nicht mehr auslaugbar sind. Beide Verfahren basieren auf einer Pyrolyse der Abfälle. Diese werden anschließend bei hohen Temperaturen komplett ausgebrannt und eingeschmolzen. Es entsteht verglaste, inerte Schlacke, deren Einsatzmöglichkeit (v. a. in der Bauindustrie) jedoch weiterhin eingeschränkt ist. Zudem ist der Energiebedarf enorm hoch und eine konventionelle Rostfeuerung reicht für diese Verfahren nicht aus. Aus diesen Gründen werden die Verfahren in keiner großtechnischen Anlage in Europa eingesetzt. [Alwast et al., 2010]

2.5.2 Waschverfahren

Vor allem bei der Aufbereitung der kleinen Korngrößen ist die Handhabung mechanischer Verfahren kompliziert und oft wenig effizient. Die hohen Chlorid- und Sulfatgehalte verbleiben in den feinen Fertigschlacken und erschweren deren baustoffliche Verwertung. Hierbei handelt es sich jedoch um lösliche Stoffe, sodass nasse Aufbereitungsverfahren eine geeignete Aufbereitungstechnik darstellen. Schon seit den 1980er-Jahren wird mit nasschemischen Verfahren experimentiert. Da in den letzten Jahren verstärkt die Metalle im Aufbereitungsfokus stehen, gibt es nur wenige Anlagen in Deutschland, die diese Technik einsetzen.

Die Firma Scherer + Kohl in Ludwigshafen setzt seit 1998 auf die Schlackenwäsche. Nach Alterung und einer trocken-mechanischen Aufbereitung (Grobentschrottung von Fe- und NE-Metallen) wird die Teilfraktion < 22 mm nass aufbereitet. Seit Anfang 2016 ist eine Anlage mit einer ähnlichen Verfahrensweise in den Niederlanden in Betrieb (vgl. Kapitel 4.5.1).

2.5.3 Trocken-mechanische Verfahren

Sowohl beim Auswalzen (Gutbettwalzenmühle GBWM), als auch beim Hochgeschwindigkeitsaufschluss (TAR-Prozessor, Hochgeschwindigkeitsprallmühle) werden mineralische Anhaftungen aufgrund ihrer Sprödhheit vom metallischen Kern entfernt.

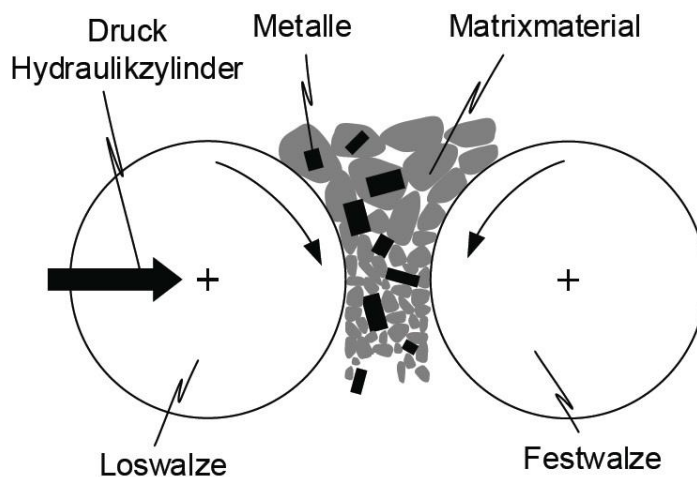


Abbildung 8: *Prinzipskizze der Gutbettwalze*
[UMTEC, 2016]

Bei der GBWM passiert die Rohschlacke bzw. eine bestimmte Korngrößenfraktion der Rohschlacke zwei gegenläufige Walzen. Der Abstand zwischen den Walzen ist größer als die Korngröße des Aufgabematerials. Somit findet die Zermahlung nicht direkt,

sondern durch interpartikuläre Druckübertragung statt. Sprödere Materialien, insbesondere mineralische Bestandteile, platzen von den duktileren Metallen ab und legen diese frei. Partikel aus nur einem Material besitzen keine schwachen Materialübergänge, sodass diese nicht unnötig zerkleinert werden.

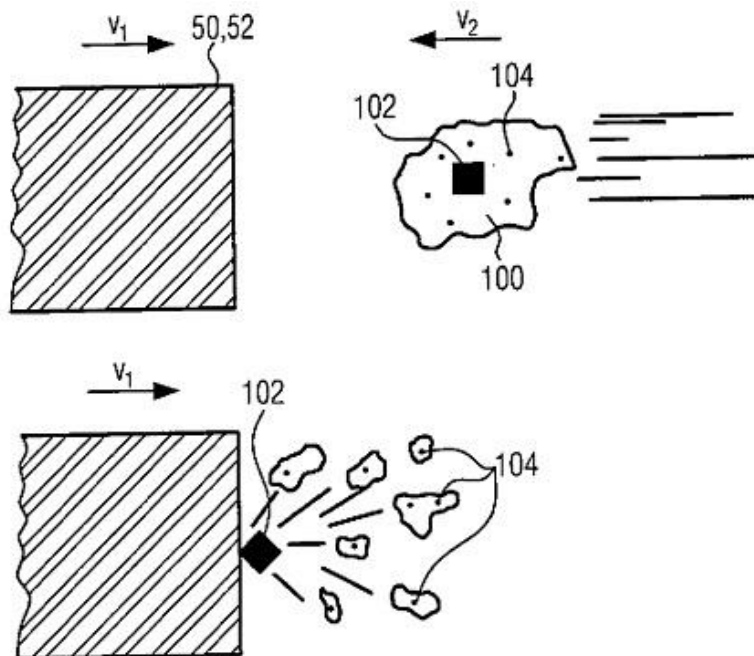


Abbildung 9: *Prinzip des mechanischen Trennens von Materialkonglomeraten aus Materialien unterschiedlicher Dichte mittels Hochgeschwindigkeitsaufschlussverfahren [Gronholz, 2011]*

Beim Hochgeschwindigkeitsaufschlussverfahren werden die Materialien beschleunigt und treffen mit hoher Geschwindigkeit auf gegenläufige Rotoren oder Schlagwerkzeuge auf. Die höhere Dichte der Metalle sorgt für eine Verstärkung der Auftreffkraft, die die Ummantelung zum Zerplatzen bringt.

2.5.4 Bioleaching und Bioakkumulation

Weitere Forschungsansätze zur Aufbereitung der Metalle im Feinkorn von MVA-Schlacken sind Bioleaching und Bioakkumulation. Bereits im Bergbau zur Erschließung von Kupfer angewendet, wird das energiearme und CO₂-neutrale Bioleaching auch an Schlacken getestet. Dazu wird die Schlacke zunächst fein gemahlen und anschließend mit Bakterien (Acidithiobacillus-Arten) versetzt. Diese produzieren Schwefelsäure, oxidieren dabei reduzierte Metallsulfide und bringen so Metalle in Lösung. Der Schwerpunkt der Forschung liegt bisher auf der Reduzierung von Schwermetallen aus Flugaschen und von Phosphat aus Abwässern. [Dott et al., 2013]

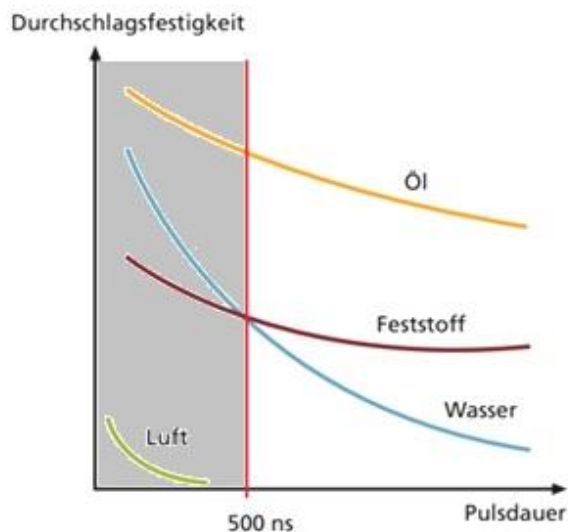
Ebenfalls noch im Forschungsstadium befindet sich die Extraktion mittels Bioakkumulation. Ziel des Verfahrens ist die Rückgewinnung hochwertiger Spezialmetalle, wie Gold oder Silber. Hierbei wird die Schlacke sehr fein (auf Korngrößen von 80-120 μm) zermahlen und mit angepassten Mikroorganismen (MO) versetzt. Diese adsorbieren selektiv an bestimmten Metallen. Die Metalle mit anhaftenden MO sind hydrophob und können in einem Trennverfahren angereichert und selektiert werden. Dieses Verfahren ist momentan noch sehr zeitaufwändig, eine wirtschaftliche, großtechnische Umsetzung mit Schlacken derzeit nicht möglich. [Quicker et al., 2015]

2.5.5 Elektrodynamische Fragmentierung

Die elektrodynamische Fragmentierung (EDF, oder auch Hochfrequenzfragmentierung HVI) stellt ein potenzielles Aufbereitungsverfahren für Verbundwerkstoffe wie Altbeton, kohleverstärkte Kunststoffe oder E-Schrott dar. Großtechnisch eingesetzt wird es heute u. a. bei der Herstellung von hochreinem Silizium für PV-Module oder zum Aufbrechen des Gesteins bei der Gewinnung von Lithium. Das Verfahren basiert auf dem Widerstand, den ein Material gegenüber einem elektrischen Impuls aufbringt. Wissenschaftler der Universität Tomsk in Russland erkannten vor über 70 Jahren, dass dieser Widerstand sich mit der Länge des Impulses verändert. Entlädt sich ein Blitz in weniger als 500 ns bietet Wasser eine höhere Durchschlagsfestigkeit auf als ein Feststoff. Durch hochfrequente Aussendung von Spannungsimpulsen werden solche Entladungsblitze erzeugt. Aufgrund des geringeren Widerstands der Feststoffe (vgl. Abbildung 10) verlaufen die Blitze bevorzugt entlang der Phasengrenzen innerhalb der Feststoffe. Kurzzeitig entstehen hohe Temperaturen um 10^4 K, sodass ein Plasma entsteht. Dieses breitet sich in Druckwellen von ca. 9 GPa bis 10 GPa aus und bewirkt eine Zersprengung des Feststoffs in seine einzelnen Materialien.

Neben der Auftrennung von Verbundstoffen liefern Laborversuche des Verfahrens mit MVA-Schlacken vielversprechende Ergebnisse. Die im Probereaktor entstehenden Druckwellen werden an der Gehäusewand reflektiert, was den Fragmentierungsprozess verstärkt. Durchschnittlich zwischen 40 % und 60 % des gesamten Schlackenvolumens findet sich nach der Fragmentierung in einer Grobfraction (> 2 mm) wieder. Diese kann durch den sortenreinen Aufschluss der Materialien anschließend sehr effektiv mit herkömmlichen Verfahren, wie Magnetscheidern oder Wirbelschichttechnik in magnetische Metalle, NE-Metalle, Steine und Keramik, Glas sowie teilmorphe Schmelzprodukte aufgetrennt werden. Chloride und Sulfate lösen sich zudem im Prozesswasser, Schwermetalle reichern sich im zurückbleibenden Filtrat (< 125 μm) an. Die zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe sind dadurch nur noch gering belastet und

eine höherwertige Verwertung nicht mehr von vornherein ausgeschlossen. [Seifert et al., 2013; Seifert et al., 2014]



[Seifert et al., 2013]

Abbildung 10: Schematische Darstellung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer bzw. der Entladungszeit der Kondensatoren. Der grau hinterlegte Bereich (< 500 ns) ist für die elektrodynamische Fragmentierung in Wasser geeignet.

Die Kosten für eine Aufbereitung in der Kleinanlage pro Mg Schlacke sind schon heute konkurrenzfähig. Ziel ist jedoch eine großtechnische Umsetzung der bisherigen Laborverfahren. In Deutschland wird dafür mit einer Entwicklungsphase von zwei Jahren gerechnet. In Posieux in der Schweiz soll hingegen noch 2016 eine entsprechende Anlage mit einem Jahresdurchsatz von ca. 20.000 Mg in Betrieb gehen. Langfristig soll der Prozess hinsichtlich des Wasserverbrauchs optimiert und auf eine Durchsatzleistung von 100.000 Mg/a gesteigert werden. [Weh, 2015; Wilts et al., 2016; 320°, 2016a]

2.5.6 Elektrodynamische Fragmentierung im Vergleich

Thome [2012] vergleicht das elektrodynamische mit herkömmlichen mechanischen Aufbereitungsverfahren am Beispiel der Auftrennung von Altbeton (vgl. Tabelle 4). Die Gegenüberstellung ist größtenteils auf die Aufbereitung von MVA-Schlacke übertragbar. Vor allem in Bezug auf NE-Metalle lässt sich der Abscheidegrad mit der EDF erheblich steigern. So konnte dieser in Testreihen von 45 % auf 90 % und der für Fe-Metalle von 70 % auf 95 % verbessert werden.

Tabelle 4: Vergleich des mechanischen Aufbereitungsverfahrens mit der elektrodynamischen Fragmentierung [Thome, 2012]

	Prallmühle, Backenbrecher	Elektrodynamische Fragmentierung
Energieeintrag	mechanisch	elektrisch
Kräfte zur Zerkleinerung	> Druckfestigkeit	> Zugfestigkeit
Verschleiß	hoch, durch Abrieb	niedrig, nur Elektrode
Zerkleinerung	nicht selektiv	selektiv
Produkte	Konglomerate	sortenrein
Edukte	Altbeton ohne Bewehrung	auch Stahlbeton
Kontamination	hoch	niedrig

Das Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC hat im April 2016 Ergebnisse eines Versuchs veröffentlicht, in welchem die Gutbettwalzenmühle und die EDF gegenübergestellt und deren Effektivität anhand einer nicht zerkleinerten Referenzprobe verglichen werden. Der Versuch wurde mit abgelagerter Schlacke < 11,2 mm durchgeführt. Durch beide Verfahren konnten die NE- und die Fe-Ausbeute erhöht werden. Allerdings kann die mittels GBWM erreichte Steigerung möglicherweise auch mit gewöhnlichen Prall- oder Walzenmühlen erreicht werden. Die EDF liefert etwas bessere Werte, benötigt jedoch auch mehr als das zehnfache an Energie (50 kWh/Mg). Soll der mineralische Anteil anschließend als Baustoff verwendet werden, weist dieser nach der EDF eine vorteilhaftere Korngrößenverteilung auf als nach der GBWM-Behandlung. Dies wird auf den Feuchtegehalt von ca. 15 % des Aufgabematerials und die dadurch bedingte zu geringe Gutbettbildung zwischen den Walzen zurückgeführt. Ist dieses nicht stark genug, verringert sich der Abstand der beiden Walzen automatisch und es kommt zur direkten Zermahlung einzelner Partikel. Das Mahlgut ist dementsprechend sehr fein. Das UMTEC kommt zu dem Schluss, dass sowohl GBWM als auch EDF keine signifikanten Vorteile gegenüber anderen Verfahren bieten, wenn eine anschließende Verwendung der mineralischen Reststoffe, wie in der Schweiz¹⁴, nicht als Baustoff vorgesehen ist. [UMTEC, 2016]

¹⁴ Aufgrund der hohen Schwermetallgehalte der MVA-Schlacken ist deren Deponierung in der Schweiz gesetzlich vorgeschrieben. Im restlichen EU-Raum darf Schlacke auch als Ersatzbaustoff eingesetzt werden, wenn die länderspezifischen Grenzwerte für eluierbare Schadstoffe eingehalten werden.

2.6 Verwertungswege

Ziel der Aufbereitung von MVA-Schlacken ist einerseits die Rückgewinnung verschiedener Metalle und andererseits das Erreichen von technischen und umweltrelevanten Grenzwerten der Fertigschlacke (mineralische Restfraktion) für den Einsatz als Ersatzbaustoff.

2.6.1 Metalle

Die zurückgewonnenen Fe-Fractionen werden je nach Sorte und Qualität an lokale Schrotthändler oder direkt an Stahlwerke verkauft. Eine Lagerung zur Überbrückung ungünstiger Marktbedingungen ist meist nicht möglich, da anhaftende Salze die Oxidation des Eisens und somit dessen Wertverfall fördern. Während Fe oftmals ohne weitere Behandlungsschritte zur Herstellung von neuem Material eingesetzt wird, müssen die in den Schlackenaufbereitungsanlagen gewonnenen NE-Fractionen in der Regel in weiteren Verfahrensstufen veredelt werden. Mischfraktionen werden durch Dichtesortierung, Anreicherungs- sowie optischen Verfahren weiter aufgetrennt. Anschließend werden aus den zurückgewonnenen Fraktionen in Schmelzverfahren neuwertige Metalle hergestellt. [Kersting, 2015]

2.6.2 Fertigschlacken

Mineralische Primärrohstoffe sind im Süden Deutschlands (Alpenregion) in großen Mengen vorhanden und entsprechend günstig, im Norden aufgrund fehlender Vorkommen hingegen teurer. Die Akzeptanz und der Einsatz von Ersatzbaustoffen nehmen deshalb von Norden nach Süden ab.

In Deutschland werden Fertigschlacken hauptsächlich im Deponie- und im Straßenbau eingesetzt. Eine weitere Einsatzmöglichkeit bietet der Bergversatz oder der Bau von Lärmschutzwänden oder Ähnlichem. Bei Verwendung von Schlacke außerhalb von Deponien müssen bestimmte Eluatwerte, insbesondere von Schwermetallen und Salzen, eingehalten werden, da sonst ein diffuser Eintrag dieser Stoffe in den Boden und das Grundwasser droht. Die Schlackenverwertung in der Bauwirtschaft erfordert sogar die Einhaltung von Eluatgrenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) und *„dies auch unter ungünstigen Bedingungen für historische Zeiträume“* [Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 120]. Die Schlacke stabilisiert sich durch die Alterungsprozesse, was zu einer Qualitätsverbesserung führt. Doch selbst unter optimalen Alterungsbedingungen werden die Eluatwerte der TrinkwV nicht erreicht. Deshalb wird

mit zusätzlichen Waschvorgängen versucht, verbleibende lösliche anorganische Bestandteile aus der Schlackenmatrix zu entfernen.

Ende der 1990er wurden ungefähr zwei Drittel der Fertigschlacken verwertet, 2009 ca. 90 %. Der nicht verwertete Anteil wurde in der Regel auf Deponien beseitigt. Nach Schmeisky et al. [2011] liegen die Schlackenverwertung in Hessen heute bereits bei 100 %. Dieser Wert muss allerdings kritisch betrachtet werden, da in der Statistik nicht berücksichtigt wird, nach welchen Kriterien die Aufbereitung stattfindet. Die Aufbereitung von Schlacken wird als Dienstleistung an private Unternehmen vergeben. Somit steht nicht die Schonung von Ressourcen im Vordergrund, sondern wirtschaftliche Interessen. Die Aussagekraft hinsichtlich der Metallrückgewinnung ist demnach gering.

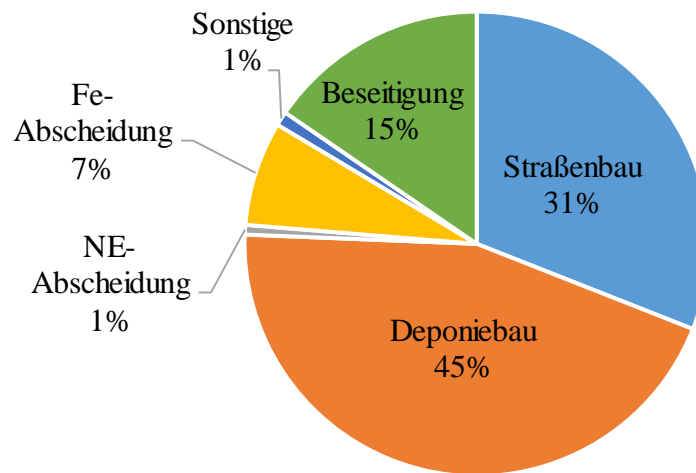


Abbildung 11: Verwertungswege von MVA-Schlacken in Deutschland.
Daten aus [ITAD e. V., 2009] zitiert in [Alwast et al., 2010]

Die Werte für die Metallabscheidung in Abbildung 11 beziehen sich auf Metalle einschließlich ihrer Verzunderungen. Fe liegt im Wesentlichen grobstückig vor und wird trotz Verunreinigungen zuverlässig abgeschieden. NE-Metalle kommen hingegen vermehrt als feine Partikel vor. Zudem wirken sich Verunreinigungen insbesondere auf die Abscheidungsleistung der Wirbelstromscheider negativ aus. Somit verbleiben vermehrt NE-Metalle in der Feinschlacke zurück und mindern deren Qualität. [Alwast et al., 2010; ITAD; Wiemer et al., 2011; Thomé-Kozmiensky, 2013; Schmeisky et al., 2011]

Die Verwertungssituation in Deutschland in dem Zeitraum 2006-2008 (Abbildung 11) kann nicht stellvertretend für Hessen angenommen werden. Einerseits gibt es in Hessen nur eine kleine Zahl an Aufbereitungsunternehmen für MVA-Schlacken, sodass es bereits zu großen Verschiebungen kommen kann, wenn z. B. nur eine Anlage einen

besonders hohen NE-Abscheidungsgrad aufweist. Andererseits werden Fertigschlacken in Hessen nicht direkt im Straßenbau eingesetzt.

3 Situationsanalyse Hessen

Im Bundesland Hessen werden vier Müllheizkraftwerke betrieben [HMUKLV, 2015b, S. 49-50]. Diese stehen in Kassel (KS), Frankfurt (F), Offenbach (OF) und Darmstadt (DA). In allen vier Verbrennungsanlagen wird die anfallende Rohschlacke über einen Nassentschlacker ausgetragen. Betrieben werden die Anlagen bereits seit Ende der 1960er Jahre. Mehrfach wurden Nachrüstungen, Umbauten oder Sanierungen durchgeführt, sodass alle Anlagen auf einem aktuellen Stand sind. Mit einer genehmigten Abfalldurchsatzmenge von bis zu 525.600 Mg pro Jahr ist das MHKW in Frankfurt am Main mit Abstand die größte Müllverbrennungsanlage in Hessen.

Tabelle 5: Genehmigte Verbrennungskapazitäten¹⁵ der hessischen MHKW. Daten aus „Abfallwirtschaftsplan Hessen - Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle“, [HMUKLV, 2015b]

MHKW	genehmigte Kapazität in Mg/a
Darmstadt	212.000
Frankfurt	525.600
Kassel	175.000
Offenbach	250.000
Gesamt	1.162.600

Die genehmigte Gesamtkapazität aller hessischen MHKW beläuft sich auf 1.162.600 Mg pro Jahr. Tatsächlich wurden 2014 hessenweit 1.114.213 Mg Abfälle energetisch verwertet. Der Großteil davon in den MHKW, die EBS-Verbrennung ist hier jedoch auch impliziert. 807.354 Mg lassen sich dem Haus- und Sperrmüll zuordnen, was 70 % der in Hessen anfallenden Gesamtmenge dieser Abfallfraktion ausmacht. [HMUKLV, 2015a]

Literaturangaben zufolge bleibt nach der Verbrennung ein Rückstand, der durchschnittlich 25-30 % der Menge des Abfallinputs ausmacht. Demnach ergibt sich für den Schlackenfall in Hessen ausgehend von den Daten aus 2014 rechnerisch eine Menge von 279.000-334.000 Mg/a.

¹⁵ Die genehmigte Verbrennungskapazität richtet sich üblicherweise nach der Kesselauslegung und der Feuerungswärmeleistung, ist also abhängig vom mittleren Heizwert des Abfalls und dem Abfalldurchsatz. Sinkt der mittlere Heizwert kann entsprechend mehr Abfall verbrannt werden, ohne dass die genehmigte Verbrennungskapazität überschritten wird. Die in Tabelle 5 aufgelisteten Angaben sind also Schätzwerte, sofern sie in den Genehmigungsunterlagen nicht explizit aufgeführt sind.

3.1 Befragung der Betreiber der hessischen Müllheizkraftwerke

Die Menge des Schlackenanfalls in Hessen lässt sich relativ zuverlässig ermitteln, da die Verbrennungsmengen der MHKW in der Regel wenig von den genehmigten Kapazitätsgrenzen abweichen. Die Verwertungswege von MVA-Schlacken in Hessen sind jedoch nicht aus öffentlichen Quellen ersichtlich und lassen sich von Deutschland (vgl. Abbildung 11, S. 31) nicht eins zu eins auf das Bundesland übertragen. Deshalb wird zunächst eine Befragung der Betreiber der hessischen Müllverbrennungsanlagen durchgeführt (Fragebogen Anhang A, S. 74). Anhand dieser soll herausgefunden werden, wo die Schlacken der jeweiligen MHKW aufbereitet werden und wie hoch das jährliche Aufkommen an MVA-Schlacken in Hessen ist. Nicht berücksichtigt werden hierbei Schlacken aus anderen Verbrennungsanlagen, wie z. B. BMKW oder EBS-Kraftwerken.

Gewicht in Mg

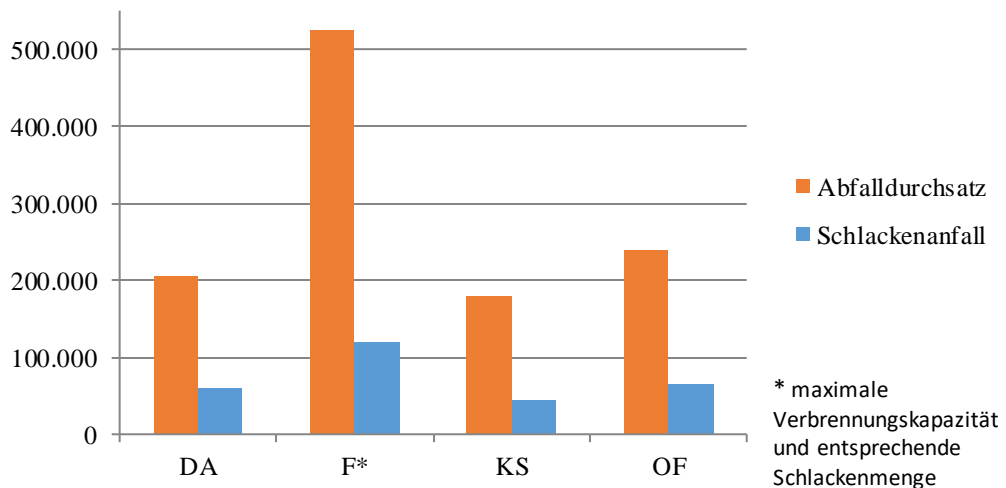


Abbildung 12: Durchschnittlich pro Jahr behandelte Menge an Abfällen und dabei durchschnittlich anfallende Menge an Rohschlacken der hessischen MHKW nach Angaben der Betreiber.

Neben den in Abbildung 12 dargestellten Ergebnissen, ergab die Umfrage außerdem, dass die in den MVA anfallenden Rohschlacken momentan an drei unterschiedliche Aufbereitungsunternehmen in Hessen abgegeben werden.

3.2 Befragung der hessischen Aufbereitungsunternehmen

Durch Internetrecherche und die in Kapitel 3.1 beschriebene Umfrage konnten die Aufbereitungsunternehmen ermittelt werden. Neben diesen Anlagen gibt es in Hessen weitere Aufbereiter, die u. a. EBS- und BMKW-Schlacken behandeln. Um auszuschließen, dass diese auch MVA-Schlacke (z. B. aus einem benachbarten Bundesland) aufbereiten, hier aber nicht beachtet werden, wurde zusätzlich eine Befragung der zuständigen Regierungspräsidien (Kassel, Gießen, Darmstadt) durchgeführt.¹⁶

Die Befragung ergab, dass sich in Hessen lediglich die drei Anlagen zur MVA-Schlackenaufbereitung befinden, die von den MHKW-Betreibern genannt wurden. Anlage 1 behandelt pro Jahr durchschnittlich 120.000 Mg Rohschlacke aus sechs unterschiedlichen Verbrennungsanlagen. Zum Einsatz kommen dabei sieben Sieblinien. In Anlage 2 werden jährlich ca. 50.000 Mg Rohschlacke aus lediglich einer MVA aufbereitet. In der Anlage werden zwei Sieblinien eingesetzt. Zur Durchsatzleistung der dritten Anlage wurden keine Auskünfte erteilt.

¹⁶ Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen, unter welche auch Anlagen zur Aufbereitung von Schlacken zählen, sind nach 4. BImSchV ab einer bestimmten Durchsatzmenge genehmigungspflichtig.

3.3 Plausibilitätsprüfung

Nicht alle Unternehmen waren bereit an der Umfrage teilzunehmen. Aus diesem Grund wurden Daten aus einem Forschungsvorhaben von Schmeisky et al. [2011] mit in die Analyse einbezogen. Die Daten stammen aus dem Jahr 2010.

3.3.1 Umfragedaten zum Schlackenaufkommen

Die von Schmeisky et al. [2011] für das Jahr 2010 ermittelten Werte unterscheiden sich nur geringfügig von den Daten aus der in Kapitel 3.1 beschriebenen Umfrage.

Tabelle 6: Durchschnittlich pro Jahr verbrannte Abfallmengen der hessischen MHKW und dabei anfallende Schlackenmenge

	Abfalldurchsatz [Mg]		anfallende Rohschlacke [Mg]	
	2010 [Schmeisky et al.]	2016 (eigene Umfrage)	2010 [Schmeisky et al.]	2016 (eigene Umfrage)
DA	196.846	205.000	57.382	60.000
F	462.171	-	109.826	-
KS	175.000	180.000	42.550	44.000
OF	234.233	240.000	63.552	65.000
Summe	1.068.250		273.310	

Die verbrannte Abfallmenge und folglich auch der Rohschlackenanfall sind in allen Anlagen leicht gestiegen. Um eine realistische Einschätzung über die aktuell jährlich anfallende Schlackenmenge in Hessen zu bekommen wird auch für das MHKW Frankfurt, für das aktuelle Daten fehlen, ein erhöhter Abfalldurchsatz angenommen. Bei einer etwa gleich starken Erhöhung des Abfall-Inputs aller Anlagen läge der Wert für das MHKW Frankfurt bei ca. 470.000 Mg. Da die Anlagentechnik des MHKW unverändert geblieben ist, wird mit einem gleichbleibenden Schlackenanfall gerechnet. Als Rohschlacke fallen ca. 24 % der Input-Abfallmasse an, was bei obiger Schätzung einer Menge von 113.000 Mg entspricht.

Mit dieser Anpassung kann die durchschnittlich in Hessen pro Jahr verbrannte Menge an Abfällen auf 1.095.000 Mg bestimmt werden. Diese Summe weicht um nicht ganz 2 % von dem in der Abfallmengenbilanz genannten Wert des Jahres 2014 ab. In Anbetracht der Tatsache, dass sich die erfragten Werte nicht auf das Jahr 2014 beziehen, sondern es sich hierbei um Durchschnittswerte der letzten Jahre handelt und zudem ein Wert abgeschätzt werden musste, ist diese Diskrepanz von marginaler Bedeutung.

Die Verbrennung in den hessischen MHKW bewirkt eine Reduzierung der Abfallmasse um durchschnittlich 71-77 %. Dieser Wert korreliert mit der allgemein in der Literatur befindlichen Angabe eines Abfallrückstandes nach der Verbrennung von etwa 25-30 %. Damit beläuft sich die jährlich in Hessen anfallende Schlackenmenge auf insgesamt rund 280.000 Mg, was etwa 6 % der in Deutschland anfallenden MVA-Schlacken entspricht. Außerdem liegt der ermittelte Wert genau im abgeschätzten Bereich von 279.000-334.000 Mg/a. Die Angaben der Betreiber sind somit plausibel.

3.3.2 Umfragedaten zur Schlackenaufbereitung

Die folgenden, in diesem Absatz beschriebenen Mengen, beziehen sich auf die, in den drei Schlackenaufbereitungsanlagen behandelten jährlichen Mengen. Hierunter fallen auch Schlacken aus anderen Verbrennungsanlagen und Bundesländern, weshalb die Mengen nicht den in den hessischen MHKW anfallenden Mengen entsprechen.

Anlage 1 wurde im Jahr 2012 in Betrieb genommen, sodass Schmeisky et al. [2011] für das Jahr 2010 noch keine Daten ermitteln konnten. Hier liegen jedoch aktuelle Daten aus der eigenen Umfrage vor. Anlage 2 nimmt eine etwas größere Menge an Rohschlacke an als 2010, diese stammen aus demselben MHKW wie noch 2010. Zur Anlage 3 wurde keine Auskunft über aktuelle Mengenflüsse gegeben. 2010 lag die durchschnittlich pro Jahr aufbereitete Schlackenmenge nach Schmeisky et al. [2011] bei 350.000 Mg. Da der Schlackenanstieg jedoch in allen anliefernden MVA gestiegen ist und für die Aufbereitungsanlage aktuell eine genehmigte Kapazität von 500.000 Mg/a vorliegt, wird für diese Anlage ein jährlicher Rohschlackeninput von 450.000 Mg abgeschätzt.

Tabelle 7: Jährlich durchschnittlich aufbereitete Menge an Rohschlacken mit den zugehörigen Metallgehalten nach Angabe der Anlagenbetreiber.

	Anlage 1		Anlage 2		Anlage 3	
	2010 [Schmeisky et al.]	2016 eigene Umfrage	2010 [Schmeisky et al.]	2016 eigene Umfrage	2010 [Schmeisky et al.]	2016 *eigene Schätzung
Schlacken- Input [Mg]	-	120.000	45.000	50.000	350.000	450.000*
Fe-Gehalt	-	4,5%	9%	5-7%	5,5-6,5%	-
NE-Gehalt	-	2,5%	1%	1-2%	1%	-

Von den insgesamt 620.000 Mg in den hessischen Aufbereitungsanlagen aufbereiteten Schlacken stammen ca. 340.000 Mg nicht aus hessischen MHKW.¹⁷ Demnach wird

¹⁷ Dieser Wert stellt die Differenz zwischen der Gesamtdurchsatzmenge der Aufbereitungsanlagen (620.000 Mg) und der in Hessen anfallenden Schlackenmenge (280.000 Mg) dar.

diese Menge aus anderen Verbrennungsanlagen, wie z. B. EBS-Kraftwerken oder BMKW, oder aus Anlagen außerhalb Hessens angeliefert.

3.4 Metallpotenzial

Anhand des ermittelten jährlichen Schlackenaufkommens in Hessen wird in diesem Kapitel das darin enthaltene Metallpotenzial abgeschätzt. Ein gesonderter Blick wird auf die Feinschlacken geworfen, da diese von vielen Anlagen bisher noch nicht aufbereitet werden.

3.4.1 Gesammetallpotenzial aus MVA-Schlacken der hessischen MKW

Ausgehend von dem in Tabelle 1 (Seite 11) aufgeführten durchschnittlichen Metallgehalt in Schlacken von 7 % bis 10 % ergibt sich in den in Hessen anfallenden MVA-Schlacken eine theoretisch enthaltene Metallmenge von 20.000 Mg bis 28.000 Mg. Wird das Metallpotenzial über den Abfallinput (Hessen: 1.095.000 Mg/a) mit einem Metallgehalt zwischen 2 % und 4 % [Gosten, 2013, S. 458] abgeschätzt, liegt der Wert zwischen 22.000 Mg und 44.000 Mg. Beide Abschätzungen liegen in der gleichen Größenordnung. Dass hier jedoch nicht, wie eigentlich anzunehmen, derselbe Ergebnisbereich ermittelt wird liegt u. a. daran, dass der Berechnung nur Durchschnitts- und Schätzwerte zugrunde liegen. Die Metallgehalte sind zudem unterschiedlichen Quellen verschiedener Jahre entnommen. Des Weiteren schwankt die Abfallzusammensetzung sehr stark, sodass jegliche Ermittlung der Metallgehalte lediglich eine Annäherung darstellt. Als sinnvollste Abschätzung für den Metallgehalt der hessischen MVA-Schlacken wird der Deckungsbereich beider Schätzungen, also ein Metallgehalt zwischen 22.000 Mg und 28.000 Mg angenommen.

3.4.2 Metallpotenzial in der Feinfraktion – Bsp. Kupfer

Breitenstein et al. [2013] zufolge liegen nach einer Aufbereitung durchschnittlich 60 % des Schlackeninputs in einer Korngröße < 6 mm bzw. < 10 mm vor.¹⁸ Der Metallgehalt in dieser Feinfraktion wird als bedeutend eingestuft. Kupfer wird in dieser Fraktion mit mindestens 0,2 % bis 0,4 % aber auch mit deutlich höheren Werten von 0,45 % bis 0,8 % beziffert. Die Berechnung des Kupferpotenzials in der Feinfraktion von MVA-Schlacken in Hessen ergibt folglich Jahreswerte zwischen 300 Mg und 1300 Mg.¹⁹ Bei Zugrundelegung der Daten nach Schmidt et al. [2016, S. 201] liegt die

¹⁸ Je nach Verfahren und vorhandener Technik wurde im Jahr 2013 bis zu einer Korngröße von 10 mm oder 6 mm aufbereitet. Je nach Alter der Anlage und Verwertungsziel werden heute (Stand 2016) Schlacken ab einer Korngröße zwischen 1 mm und 6 mm aufbereitet.

¹⁹ Alle Werte sind gerundet. Berechnungsgrundlage bildete hier die ebenfalls gerundete durchschnittliche Schlackenmenge von 280.000 Mg.

Abschätzung im gleichen Bereich, wenn auch mit erheblich geringerer Streuweite (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Metallpotenzial des Feinschlackenanteils (in kg) aus 280.000 Mg Rohschlacke nach Schmidt et al. [2016, S. 201]

	Min [kg]	Max [kg]
Au	70	110
Ag	1.500	1.700
Cu	392.000	504.000
Zn	336.000	560.000

Die abgeschätzte Kupfermenge in der Feinschlacke entspricht damit dem Kupfergehalt der Mittel- und Grobfraktion und ginge verloren, wenn die Feinfraktion nicht weiter aufbereitet würde. Einige Aufbereitungsanlagen führen jedoch bereits eine tiefergehende Aufbereitung durch, sodass das Kupferpotenzial besser ausgeschöpft wird.

3.4.3 Schwierigkeiten in der Abschätzung des Metallpotenzials

Durch die Inhomogenität des Abfalls und die starken Schwankungen der Zusammensetzung ist mit einem relativ großen Fehlerbereich zu rechnen. Des Weiteren gibt es kein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung des Metallgehaltes in Abfällen. Meistens geben Abfallanalysen keine rein chemischen oder metallurgischen Werte an, sondern beziehen sich auf Materialgemische. Ein defektes Fahrrad wird z. B. vollständig der Metallfraktion zugeordnet, obwohl Reifen, Kabelummantelungen, Lenkerband, Pedale etc. aus Gummi, Kunststoffen oder Kork bestehen. Auf der anderen Seite zählt ein Kunststoffspielzeugauto trotz Metallachsen nicht zur Metallfraktion. Dies führt häufig zu einer Überschätzung des Metallpotenzials eines Abfallstroms. [Gosten, 2013]

Auch die Bestimmung des Metallgehaltes aus Schlacken birgt Unsicherheiten. Für die Analyse von Schlacken aus der Abfallverbrennung sind im LAGA M 20 zwar Untersuchungsmethoden vorgegeben, aufgrund der kleinen Probemengen werden aber grobe und mittlere Schrottanteile aussortiert und nicht berücksichtigt. Zudem sind Versinterungen und anderweitige Materialverbünde nur schwer aufzuschließen, insbesondere da diese in allen Korngrößen vorliegen können. Ermittelte Metallgehalte sind also in der Regel fehlerbehaftet.

Generell muss die Aussagefähigkeit der oben berechneten Werte mit Vorsicht bedacht werden. Neben den beschriebenen Unsicherheiten liegen Metalle in unterschiedlichen Qualitäten vor und haben dementsprechend verschiedene Wertigkeiten. Der Preis der

Metalle sowie die, durch die Metallaufbereitung bedingten Auswirkungen auf das Klima, können sich stark unterscheiden. [Gosten, 2013]

3.5 Metallrückgewinnung

Um die Metallrückgewinnung bewerten zu können werden im Folgenden die Metallgehalte der Rostschlacken mit den separierten Metallmengen der Aufbereitungsanlagen verglichen. Zur Ermittlung des Metallgehaltes der Rostschlacke wird nur der enthaltene Massenanteil an Metallstücken > 2 mm bestimmt. Metalle < 2 mm werden nicht erfasst. Moderne Aufbereitungsanlagen erschließen diese Feinfraktion jedoch teilweise schon. Eine Rückgewinnungsrate größer 100 % ist demnach möglich, wird jedoch nur selten erreicht, da die Verluste durch den Aufbereitungsprozess in der Regel höher sind.

Wird der NE-Metallgehalt nach Schmeisky et al. [2011] auf 1-2 % des Rostschlackeninputs angenommen, könnten in Anlage 1 jährlich zwischen 1200 Mg und 2400 Mg NE-Metalle zurückgewonnen werden. Tatsächlich werden jedoch 3000 Mg an NE-Metallen zurückgewonnen, sodass von einem deutlich höheren NE-Metallgehalt der Rostschlacken ausgegangen wird.

Um die Metallrückgewinnung der hessischen Aufbereitungsanlagen besser bewerten zu können, wurden die Mengen an zurückgewonnenen Fe- und NE-Metallen auf den Rostschlacken-Gesamtinput der Anlagen bezogen und in Abbildung 13 dargestellt. Da für Anlage 3 keine Daten vorliegen, wurde deren Metallrückgewinnung dem deutschen Durchschnitt gleichgesetzt.

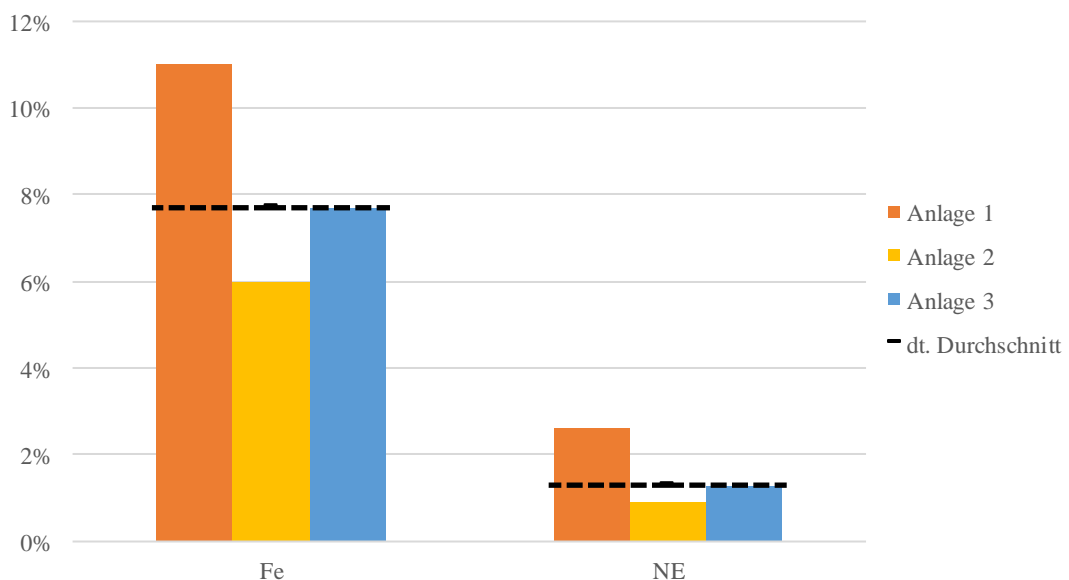


Abbildung 13: Eisen- und NE-Metallrückgewinnung aus Rostaschen der hessischen Aufbereitungsanlagen bezogen auf den Gesamtschlacken-Input. Gestrichelt dargestellt ist der Durchschnitt deutscher Anlagen nach Kuchta et al. [2015].

Deutlich zu erkennen ist die überdurchschnittliche Metallausbringung von Anlage 1. Diese Anlage setzt aufwändige Techniken zum Aufschluss der Metalle ein, was sich unter anderem an den sieben integrierten Sieblinien erkennen lässt.²⁰ Hier spielt jedoch auch das Aufbereitungsziel der Unternehmen eine große Rolle. Anlage 2 entschrotet die Schlacke, separiert also Fe- und NE-Metalle und reduziert die Reaktionsfähigkeit des Schlackenrests durch Alterung weitgehend. Anschließend wird die Fertigschlacke bautechnisch verwertet. Anlage 1 setzt den Schwerpunkt in die Rückgewinnung von NE-Metallen. Die Auftrennung der Schlacke erfolgt in qualitativ möglichst hochwertige Metallfraktionen, die dann direkt an Metallschmelzwerke vermarktet werden können. Die Fertigschlacke wird, sofern möglich, im Deponiebau eingesetzt.

Auch nach Aufbereitung der Rohschlacken bleibt ein Teil an NE-Metallen in der Fertigschlacke. Aus Abbildung 14 lässt sich erkennen, welches NE-Potenzial theoretisch noch erschlossen werden kann. Je nachdem, ob der NE-Metallgehalt 2% oder 4% beträgt, verbleiben in Hessen momentan zwischen 3700 Mg und 15.500 Mg NE-Metalle in der Fertigschlacke.

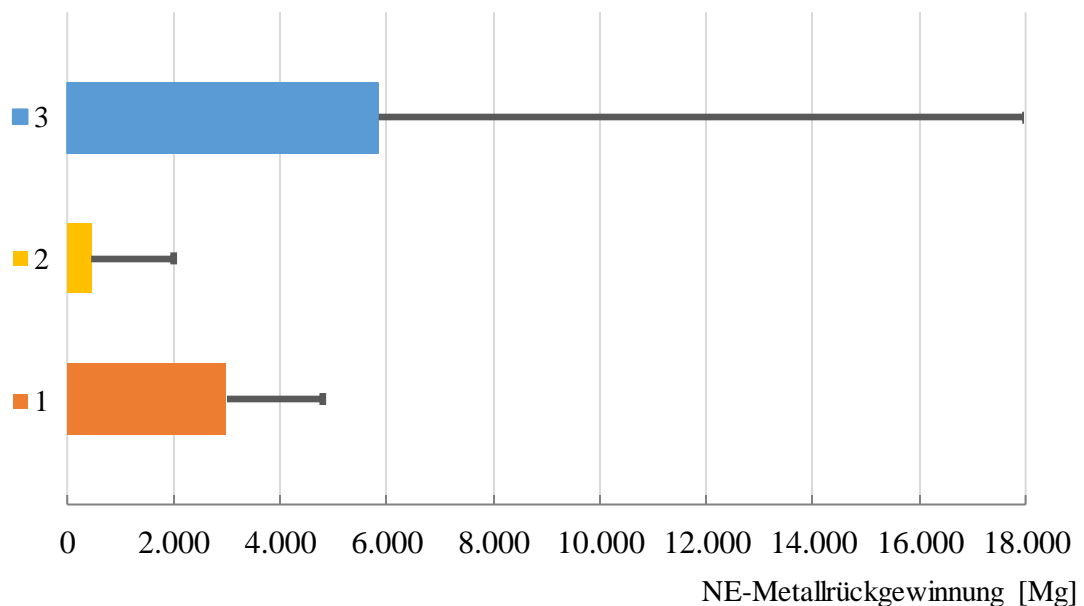


Abbildung 14: NE-Ausbringung der drei hessischen MVA-Schlacken-Aufbereitungsanlagen in absoluten Werten. Die schmalen Balken stellen das NE-Potenzial für einen NE-Gehalt von 4 % der Rohschlacke dar.

²⁰ Anlage 2 nutzt zwei Sieblinien für den Aufbereitungsprozess.

3.6 Verwertung der Fertigschlacken

Der mineralische Rest der Schlackenaufbereitung wird in Hessen zu 100 % verwertet. Der Großteil wird im Deponiebau eingesetzt, ein kleiner Anteil auch im Bau von Autobahnlarmschutzwällen. Für den Bau von Straßen, der deutschlandweit einen wichtigen Verwertungsweg darstellt, werden in Hessen keine Schlacken eingesetzt.

3.7 Diskussion der Umfrageergebnisse

Nicht alle Anlagenbetreiber konnten zur Teilnahme an der Umfrage motiviert werden. Es ist unklar, warum trotz Anonymisierung der Angaben nicht die Bereitschaft aller Unternehmen zur Unterstützung der Datenerfassung gegeben war. Es ist zu vermuten, dass bei transparentem Handeln mittelfristige Wettbewerbsnachteile befürchtet werden. Durch die unzureichende Datenlage lässt sich nicht überprüfen, ob alle im Landesgebiet anfallenden MVA-Schlacken in dieser Betrachtung erfasst wurden. Des Weiteren kann die durchschnittliche Rückgewinnungsrate für NE-Metalle aus MVA-Schlacken in Hessen nicht verlässlich bestimmt werden, sodass eine Einordnung beziehungsweise ein Vergleich der Situation mit anderen Bundesländern nicht möglich ist. Dies mindert die Aussagekraft der Situationsanalyse erheblich.

4 Weiterentwicklung und Forschungsprojekte

Der Bedarf an Ressourcen, insbesondere an Metallen, steigt u. a. durch den vermehrten Einsatz von Elektro- und Elektronikkomponenten immer weiter an. In Deutschland sind die natürlichen Rohstoffquellen zudem begrenzt, was die Erschließung neuer Rohstoffquellen erforderlich macht. Um die Nutzung des Sekundärrohstoffpotenzials aus MVA-Schlacken besser auszuschöpfen, liegt ein Forschungsschwerpunkt in der verbesserten Sortierung der Grob- und Mittelfraktion. Hierfür werden in erster Linie sensorgestützte Verfahren getestet. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erschließung des Metallpotenzials der Feinschlacke. Der Kupfergehalt der Feinfraktion entspricht ungefähr dem armer Kupfererze. Auch das Rückgewinnungspotenzial an Spurenmetallen wird berücksichtigt. Silber spielt z. B. eine immer größere Rolle in der Produktherstellung (USB-Sticks, anti-transpirante Kleidung, etc.) und wird künftig in erhöhter Menge im Abfall und damit in MVA-Schlacken auftauchen [Breitenstein et al., 2013, S. 343].

Werden die Metalle aus der Rohschlacke effektiver separiert, kann die Qualität der Fertigschlacke unter Umständen den Anforderungen der Bauindustrie entsprechen. Für die Aufbereitungsunternehmen bietet sich hier ein zusätzlicher finanzieller Anreiz. Aus Sicht der Politik hingegen ist die Einsparung von Ablagerungsfläche besonders interessant, da die Kapazitätsgrenze der deutschen Deponiekörper bereits in 20 Jahren erreicht werden könnte und eine Ausweitung der Ablagerungsflächen mit hohem Aufwand verbunden ist [Alwast et al., 2010; Seifert et al., 2013]. Auch in Hessen herrscht latenter Deponiebedarf, wobei dies in erster Linie DK I - Deponien betrifft [Verheyen, 2015]²¹.

Aufbereitungstechniken für MVA-Schlacken aus Westeuropa sind weltweit führend. Besonders viele Untersuchungen und Forschungen zur Metallrückgewinnung werden in der Schweiz und in Deutschland durchgeführt. In den Niederlanden steht die baustoffliche Verwertung der Fertigschlacken im Mittelpunkt. Einen Überblick geben die folgenden Kapitel.

²¹ zitiert in [Hartmut, 2015]

4.1 Ressourceneffizienzprogramm

Die Bundesregierung setzt sich mit dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) aus dem Jahr 2012 unter anderem das Ziel, Wirtschafts- und Produktionsweisen unabhängig von Primärrohstoffen zu machen. Dies bedeutet zwangsläufig eine Förderung der Gewinnung und des Einsatzes von Sekundärrohstoffen. Unter diesem Aspekt werden Forschungsansätze zur Verbesserung der Aufbereitung von MVA-Schlacken gefördert. Im Sinne einer „vollständigen und umweltverträglichen Verwertung“ (vgl. BMU „Ziel 2020“, 1999)²² ist vor allem eine möglichst sortenreine Trennung der Metalle interessant. Liegt der Fokus auf der Metallgewinnung, verbessert sich oft auch die Abscheideleistung der restlichen Fraktionen.

4.2 BMBF-Forschungsprojekte

Über das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Bundesregierung jährlich verschiedene Forschungsprojekte von Universitäten, Forschungsinstituten und privaten Unternehmern. Im Folgenden werden drei Projekte vorgestellt, die eine Optimierung durch Weiterentwicklung der Aufbereitungsverfahren von MVA-Schlacken zum Ziel haben. VeMRec zielt auf eine verbesserte Ausschöpfung der momentanen Stoffströme ab, während bei ATR und OPTIMIN die größtenteils noch unerschlossene Feinschlacke im Fokus steht.

4.2.1 VeMRec

Mit dem Ziel, das NE-Metall-Potenzial aus dem Mittel- und Grobkorn der MVA-Schlacken besser auszuschöpfen und Verluste im Metallrecyclingprozess zu reduzieren, wurde von Mai 2012 bis April 2015 das BMBF-Forschungsprojekt „*Verlustminimiertes Metallrecycling aus Müllverbrennungsrostasche durch sensorgestützte Sortierung*“, kurz *VeMRec* durchgeführt. Ein effizienter Sortierprozess, mit dem Fremdeinträge in das Metallrecycling möglichst ausgeschlossen werden können, sollte entwickelt werden. Die Grundidee ist hier, die in Fein- (0-8 mm), Mittel- (8-16 mm) und Grobfraction (16-40 mm) sortierten NE-Metallkonzentrate aus der konventionellen Schlackenaufbereitung mittels nachgeschalteter Sensortechnik in eine Kupfer- und eine Aluminiumreinfraction zu überführen. Dazu werden die NE-Metallkonzentrate 8-16 mm und 16-40 mm zunächst mit einer Prallmühle mechanisch vorbehandelt. Der

²² Als fünften Eckpunkt im „Ziel 2020“ formuliert das BMU im Jahr 1999: „Bis spätestens 2020 sollen die Behandlungstechniken so weiterentwickelt und ausgebaut werden, dass alle Siedlungsabfälle in Deutschland vollständig und umweltverträglich verwertet werden.“ [BMU, 1999]

mineralische Anteil zerspringt aufgrund seiner Sprödhheit in feine Teile, die sich hauptsächlich in einer Fraktion < 3 mm ansammeln. Diese wird abgeseibt und verworfen. Des Weiteren entstehen viele Mineralikpartikel in dem Korngrößenbereich unter 10 mm, sodass die Fraktion 3-10 mm gesondert behandelt wird. Eine Sensorerfassung funktioniert nur, wenn die Partikel gut verteilt sind (keine Überlappungen, ausreichender Abstand, keine rollenden Partikel), weshalb unter anderem eine Verteilung auf einer Vibrationsrinne getestet wurde. In der größten Fraktion befindet sich zum Großteil Aluminium, sodass dessen Aussortierung hier wenig Sinn ergibt. Stattdessen wird der geringere Anteil an Schwermetallpartikeln über Röntgentransmission (XRT) detektiert und mit Druckluftstößen vom Stoffstrom separiert. Optional kann das Verfahren um eine Form- bzw. Farberkennung ergänzt werden, um die Detektionsgenauigkeit zu erhöhen. Auch der Einsatz von Induktionssensoren wurde getestet.

Grundsätzlich konnte die Realisierbarkeit einer Dichtesortierung mittels Sensortechnik zwar gezeigt werden doch auch die Grenzen dieser Technik wurden deutlich. Eine gute Vorkonditionierung ist unabdingbar, um das Verfahren anwenden zu können. [Pretz et al., 2015; Gisbertz et al., 2015]

4.2.2 ATR

Das BMBF-Forschungsprojekt „*Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren*“ (ATR) zielte auf die Erhöhung der Metallausbringung aus MVA-Schlacken durch mechanische Aufbereitung ab. Besonders die Aufbereitung der Feinfraktion < 2 mm sowie das Potenzial aus bereits abgelagerten MVA-Schlacken wurden untersucht.

Das Projekt wurde vom 1. Juli 2012 bis zum 30. Juni 2015 durchgeführt. In einer großtechnischen Anlage mit einem speziellen Hochgeschwindigkeitsaufprallverfahren der Firma Tartech, genauerer Aufteilung der Korngrößen und mehreren NE-Abscheidern wurden abgelagerte MVA-Schlacken sowie Rohschlacken aus Hamburg und Berlin aufbereitet. Mit der aufwendigen Aufbereitung konnten Eisen, Eisenoxide, Nichteisenmetalle, Edelstahl sowie Unverbranntes und Inertmaterial zurückgewonnen werden. Die Feinfraktion < 2 mm wurde in einer Betalinie in Eisenoxide (0-2 mm), inerte Materialien (0-100 μm) sowie Kupfer-Edelmetallgemische (0,5-2 mm; 100-500 μm) und Aluminium-Inert-Gemische (0,5-2 mm; 100-500 μm) aufgetrennt. Aus der MVA-Schlackenfraktion < 2 mm konnten durch das Verfahren zusätzlich etwa 1,7 % an NE-Metallen zurückgewonnen werden [Lübben, 2015b]. Selbst bereits aufbereiteten

Schlacken konnten noch NE-Metalle in einer Größenordnung von 1,25 % des Schlackeninputs entzogen werden. Daraus resultiert, dass der Aufschluss der Feinkornfraktion ein weiteres wirtschaftlich erschließbares Potenzial darstellt.

4.2.3 OPTIMIN

„Optimierung der stofflichen Verwertung mineralischer Rückstände aus der Abfallwirtschaft“ (*OPTIMIN*) ist das dritte hier beschriebene BMBF-Forschungsprojekt. Zielsetzung ist die Suche nach Wegen, die Deponierung von Fertigschlacken oder zumindest von Teilfraktionen zu reduzieren und deren Verwertung zu sichern. Der Fokus liegt auch hier auf der Feinschlacke, deren hohe Chlorid- und Sulfatgehalte eine besondere Herausforderung darstellen. Diese bildet circa die Hälfte des Gesamtmassestromes.

Vom 1. Januar 2016 bis 30. Juni 2018 wird getestet, ob durch ein Waschverfahren alle Partikel $< 200 \mu\text{m}$ aus der Schlacke separiert und somit Chloride, Sulfate und leicht löslichen Metalle entfernt werden können. Die abgetrennten Partikel sollen zu einem Filterkuchen gepresst und dessen Beimischung in Zementklinker getestet werden. Die aus dem Waschverfahren gewonnene Fertigschlacke soll in für die Baustoffindustrie optimierte Korngrößen sortiert werden. Außerdem wird ein maximaler Beimischungswert für Beton und Asphalt gesucht. Dafür muss die Fertigschlacke weitestgehend von Metallen und Glaspartikeln befreit werden, sodass ein regelkonformer Zuschlagstoff für die Bauindustrie entsteht. [320°, 2016c; Stadtreinigung Hamburg; Lübben, 2016]

4.3 ReNe-Adapt-Verfahren

Die Strabag AG und die Aurubis AG haben zusammen mit der TU Clausthal das Verfahren „Recycling von NE-Metallen“, kurz ReNe entwickelt. Mit dem ReNe- bzw. dessen Erweiterung, dem ReNe-Adapt-Verfahren soll die konventionelle Schlackenaufbereitung ergänzt werden, sodass neben Mittel- und Grobkorn zusätzlich eine Aufbereitung der Feinfraktion durchgeführt werden kann. Der Schwerpunkt des Verfahrens liegt auf der Separierung von Kupfer und Aluminium, die den größten metallischen Anteil dieser Schlackenfraktion ausmachen. Das ReNe-Verfahren lässt sich in drei Verfahrensstufen gliedern, die jeweils eine Erweiterung der vorherigen Stufe bilden. Eine Anlage lässt sich dadurch sukzessive nachrüsten. Je nach Korngrößenspektrum der Feinfraktion werden die mechanischen Aufbereitungsstufen, wie z. B. die Siebmaschenweite optimal ausgelegt. In Versuchen wurden so Schlacken bis zu einer Korngröße $< 160 \mu\text{m}$ aufbereitet. Im Folgenden ist das Verfahren hingegen für einen Input von Fein- und Mittelkorn, also $< 6 \text{ mm}$ beschrieben.

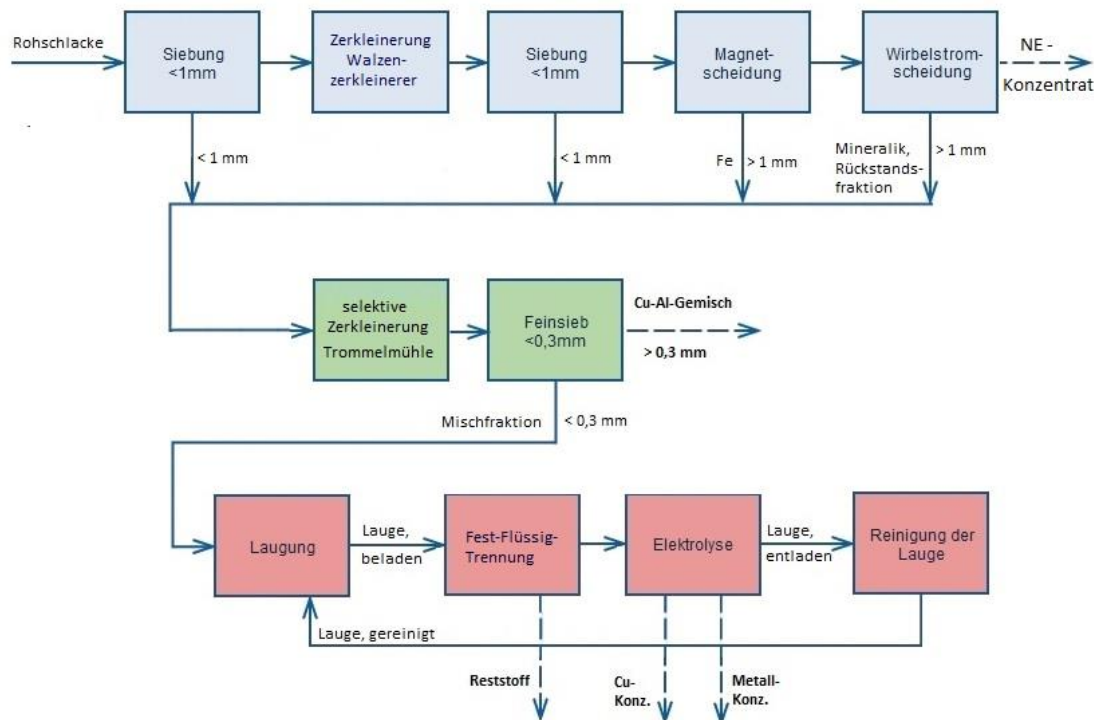


Abbildung 15: Flussschema des ReNe-Verfahrens nach Breitenstein et al. [2013]. Die Verfahrensschritte sind farblich kenntlich gemacht (erster – blau, zweiter – grün, dritter – rot).

Als erstes wird die HMVA-Fraktion ($< 6 \text{ mm}$) von der Feinfraktion $< 1 \text{ mm}$ abgetrennt. Anschließend wird das Mittelkorn mechanisch zerkleinert. Durch Auswalzung lässt sich die unterschiedliche Duktilität der Materialien ausnutzen. NE-Metalle wie Kupfer und Aluminium verformen sich, während Mineralien und Eisen spröde sind und zerbrechen. Die verformten Metallteile passen nicht mehr durch das feinmaschige Sieb

und können abgetrennt werden. Mit einem Magnetscheider wird zunächst der Fe-Anteil > 1 mm, der hauptsächlich aus Eisen und Eisen-Kupfer-Verbindungen besteht, separiert. Die unmagnetische Fraktion läuft durch einen Wirbelstromscheider, welcher NE-Metalle (bis zu einer minimalen Korngröße von ca. 0,6 mm) abtrennt. Dieser gewonnene NE-Anteil besteht zu ca. 28 % aus Kupfer und 39 % aus Aluminium. Den mit ausgetragenen Rest von 33 % machen mineralische Verwachsungen aus.

Je feiner die Partikel sind, desto höher ist die Staubentwicklung bei ihrer Aufbereitung. Wie in Abbildung 15 dargestellt, werden deshalb die Fraktionen < 1 mm sowie Fe und Mineralik > 1 mm zusammengeführt und im zweiten Schritt des Verfahrens nass-mechanisch bearbeitet.

Im dritten Verfahrensschritt werden metallische und oxidische Phasen der Restfraktion $< 0,3$ mm aufgeschlossen und in eine saure oder basische Lösung überführt (Laugung). Hierzu eignen sich insbesondere basische Prozessführungen, da durch diese mineralische Bestandteile nicht aufgelöst werden. Zurück bleibt ein mineralisches Reststoffgemisch, welches mittels Fest-Flüssig-Trennung separiert und durch weitergehende Behandlung als Zuschlagstoff für Baustoffe eingesetzt werden kann. Der beladenen Lauge werden in einer anschließenden Elektrolyse selektiv Kupfer und weitere Metalle entzogen.

Im ReNe-Adapt-Verfahren schließt sich ein vierter Prozessschritt an. Die im ReNe-Verfahren separierten NE-Mischkonzentrate lassen sich durch eine Dichtesortierung in separate Stoffströme auftrennen. Dabei werden nochmals Fehlausträge minimiert und somit hochwertigere Metallphasen (Kupfer und Aluminium) gewonnen. [Breitenstein et al., 2013; Breitenstein et al., 2015; Breitenstein et al., 2016]

4.4 Hybridverfahren

Aktuell werden Verfahren getestet, in denen die Rohschlacke in der MVA sowohl nass als auch trocken ausgetragen wird. Da Versinterungen und Verbackungen der nassausgetragenen Rohschlacken in erster Linie auf den Feinkornanteil zurückzuführen sind, wird dieser bereits der Primärschlacke entzogen. Diese erste Fragmentierung geschieht also noch im Ofen. Das Mittel- und Grobkorn kann weiterhin nass ausgetragen werden, da bei fehlendem Feinkorn praktisch keine Abbindeprozesse mehr stattfinden. Derzeit sind zwei Varianten in Entwicklung:

Im HZI-Verfahren²³ wird der Feinkornanteil innerhalb der letzten Roststufe abgetrennt. Der Rost ist mit Schlitzfenstern versehen, sodass Schlackenbestandteile < 8 mm durchfallen und separat behandelt werden können.

Das CST-Verfahren²⁴ separiert das Feinkorn einen Schritt später. Gereinigte Abluft wird nach dem Elektrofilter abgeführt und im Gegenstrom in den Schlackenschacht eingeleitet. Dieser Luftstrom reißt Partikel < 5 mm bzw. < 0,25 mm aus dem Rostabwurf und trägt diese mit der Flugasche gemeinsam aus. [Bunge, 2016]

4.5 Niederlande

In den Niederlanden ist die Deponierung von MVA-Schlacken verboten. Seit mehr als dreißig Jahren wird der Verbrennungsrückstand dort als IBC-Baustoff²⁵ eingesetzt. Gemäß der niederländischen Bodenschutzverordnung muss dieser an der Oberseite mit Folie und Sand-Betonit-Matten abgedeckt werden. Mit der Verabschiedung des Green Deal beabsichtigt die niederländische Regierung eine Verbesserung der Schlackenaufbereitung, sodass die Fertigschlacke ohne potenziellen Schadstoffeintrag in die Umwelt als Baustoff frei eingesetzt werden kann. Zusammen mit der niederländischen Abfallvereinigung (Dutch Waste Management Association) wird deshalb vereinbart, dass ab 2017 nur noch die Hälfte der anfallenden und ab 2020 keine Fertigschlacken mehr als IBC-Baustoff eingesetzt werden. Des Weiteren wird eine NE-Rückgewinnungsrate von mindestens 75 % aus der Fraktion > 6 mm festgelegt.

Die Aufbereitung der gröberen Schlackenanteile (> 6 mm) ist weit entwickelt, ein Einsatz ohne IBC-Maßnahmen im Prinzip schon möglich. Um die festgelegten Verwertungs- und Rückgewinnungsziele zu erreichen, werden die Schlacken in den meisten Fällen in eine Grob- und eine Feinfraktion aufgeteilt. Anschließend werden sowohl nasse als auch trockene Verfahren getestet. Um auch die höher belastete Feinfraktion einem sinnvollen Verwertungszweck zuführen zu können, sollen die hohen Schwermetallgehalte in die Schlackenmatrix eingebunden werden. Denkbar ist u. a. ein Einsatz als Zuschlagstoff in Betonklinkern, Pflastersteinen oder Bordsteinkanten. [Born, 2015a]

²³ Von der Firma Hitach-Zosen Inova entwickelt.

²⁴ Clean Slag Technology

²⁵ IBC auf Deutsch etwa Isolieren, Begrenzen, Kontrollieren

4.5.1 Schlackenwäsche

Die Unternehmen Boskalis Environment und HVC betreiben seit 2016 eine Schlackenwaschanlage, in welcher Schlacken soweit gereinigt werden, dass diese nach Green-Deal-Kriterien als Sand- oder Kiesersatz im Gebäudebau verwendet werden können. In Versuchsdurchläufen wurden innerhalb der letzten zwei Jahre insgesamt ca. 100.000 Mg Rohschlacken aufbereitet.

Nach einer konventionellen Eisen- und NE-Entschrottung (ca. 7 % Fe und 1,8 % NE) wird die Schlacke in Wasser gegeben, wo sich Salze und lösliche Schwermetalle im Feinschlamm anreichern. Anschließend wird die Schlacke in Fraktionen aufgeteilt. Mit Abtrennung der Schlickfraktion ($< 63 \mu\text{m}$) wird auch der größte Teil der Schwermetalle und Salze separiert. In Abbildung 16 sind die aufbereiteten Fraktionen inklusive prozentualer Mengenangaben dargestellt. [Born, 2015a; Born, 2015b; Boskalis Dolman]

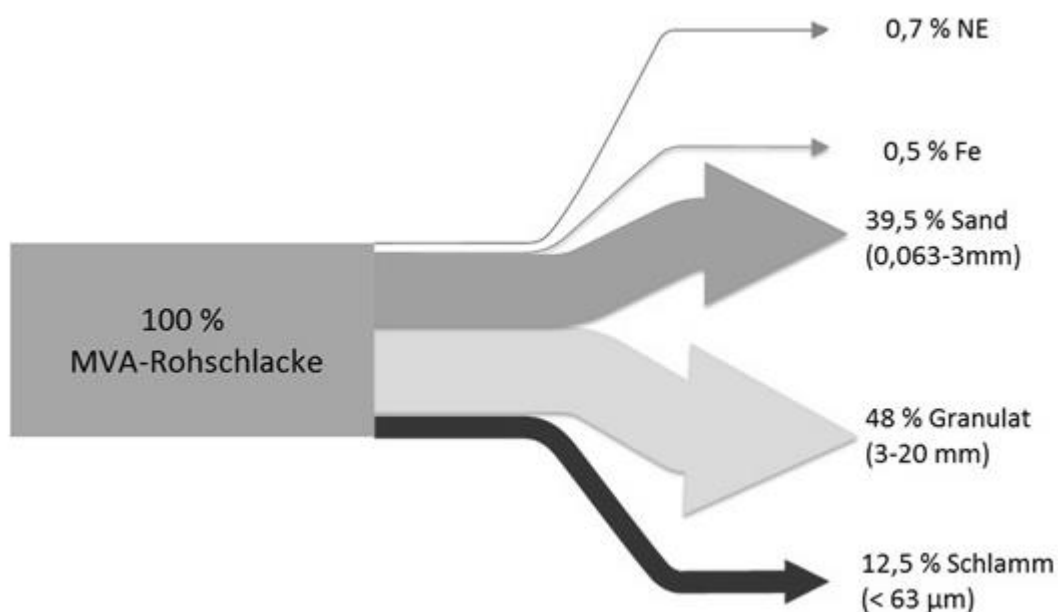


Abbildung 16: Stoffströme nach konventioneller trockener Vorbehandlung (Fe- und NE-Abscheidung), Nassfraktionierung und Waschvorgang der MVA-Schlackenaufbereitungsanlage von Boskalis Dolman [Born, 2015b]

4.5.2 Advanced Dry Recovery

Zusammen mit der TU Delft hat die niederländische Firma Inashco ein trocken-mechanisches Auftrennungsverfahren für Feinschlacken entwickelt. Dieses wird bereits seit 2014 in zwei Anlagen getestet. Durch die Separierung des Feinkorns lässt sich das Grob- und Mittelkorn effektiver sortieren. Ziel war in erster Linie die Auftrennung von

Rohschlacke in eine Fraktion kleiner und eine Fraktion größer 2 mm. Sieblinien verstopfen aufgrund der hohen Feuchte der Feinschlacke schnell. Eine vorherige Trocknung oder zusätzlicher Wasserzufuhr sollten nicht zum Einsatz kommen, um Kosten zu sparen. Beim ADR-Verfahren wird die Schlacke auf einen Prallsichter gegeben, sodass die einzelnen Partikel gegen Rotorblätter schlagen. Die Partikel werden durch den Aufprall beschleunigt und fliegen je nach Korngröße unterschiedlich weit. [Vries et al., 2014]

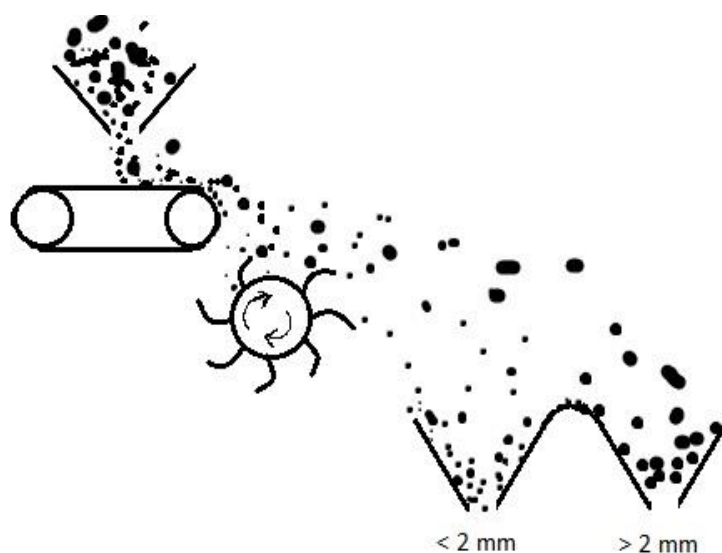


Abbildung 17: Skizze der Funktionsweise des Prallsichters zur Auftrennung der Schlacke in zwei Korngrößenspektren

Durch einen zusätzlichen Windstrom können außerdem Leichtmaterialien aussortiert werden und das Verfahren optimal auf bis zu 0,5 mm kleine Partikel eingestellt werden. Die NE-Ausbringung kann somit um ca. 1 % gesteigert werden. [Lamers, 2015]

4.6 Schweiz

Die extrem hohen Anforderungen der Schweizer Umweltgesetzgebung und die vorhandenen mineralischen Ressourcen schließen den Einsatz von Fertigschlacken als Ersatzbaustoff quasi aus. Der Aufbereitungsschwerpunkt wird also auf die Metallrückgewinnung gelegt, sodass das Land in diesem Bereich führend ist. Allein im ersten Halbjahr des Jahres 2016 wurden dort drei einzigartige Anlagen mit innovativen Aufbereitungsverfahren in Betrieb genommen. Selbst Ansätze zu nass-chemischen Verfahren, welche vor ca. 20 Jahre aufgrund des mangelnden Erfolgs und fehlender Wirtschaftlichkeit eingestellt wurden, sollen nach Franz [2014] wieder aufgenommen werden.

4.6.1 Vorgeschaltete Nassschlackenaufbereitung

Das nassmechanische Aufbereitungsverfahren der Firma GeoLAB (vgl. Abbildung 18) konzentriert sich auf die Ergänzung bereits bestehender Aufbereitungsanlagen. Konzipiert ist das Verfahren für nassausgetragene Schlacken. Unmittelbar nach der Entschlackung werden der Rohschlacke Bestandteile > 100 mm entzogen. Diese können anschließend manuell sortiert werden. Da möglichst alle Partikel < 2 mm aufbereitet werden sollen, wird die komplette Fraktion < 100 mm einer Nassfraktionierung unterzogen. Aufgrund der noch nicht abgelaufenen Alterungsprozesse liegt die Schlacke ohne Agglomerate vor und lässt sich gut auftrennen. Die Fraktion > 2 mm kann nun mittels konventioneller Technik aufbereitet werden. Die Feinfraktion < 2 mm wird in einem ersten Schritt entschlamm, also von den Partikeln < 35 μm getrennt und anschließend entwässert. Aus der verbleibenden Fraktion (0,035-2 mm) werden die magnetischen Bestandteile aussortiert und als Metallkonzentrat abgeführt. Der verbleibende Rest wird durch ein gravimetrisches Verfahren in eine Fraktion mit einer Dichte kleiner $4,5$ g/cm^3 und einer Fraktion größerer Dichte aufgetrennt. Das separierte Leichtgut besteht hauptsächlich aus Aluminium und aus mineralischen Bestandteilen.

Die KVA Linth, Schweiz hat Anfang 2016 eine Anlage mit oben beschriebener Technik installiert. In der KVA fallen jährlich ca. 25.000 Mg Rohschlacken an, die in der eigenen Schlackenaufbereitungsanlage aufbereitet werden.

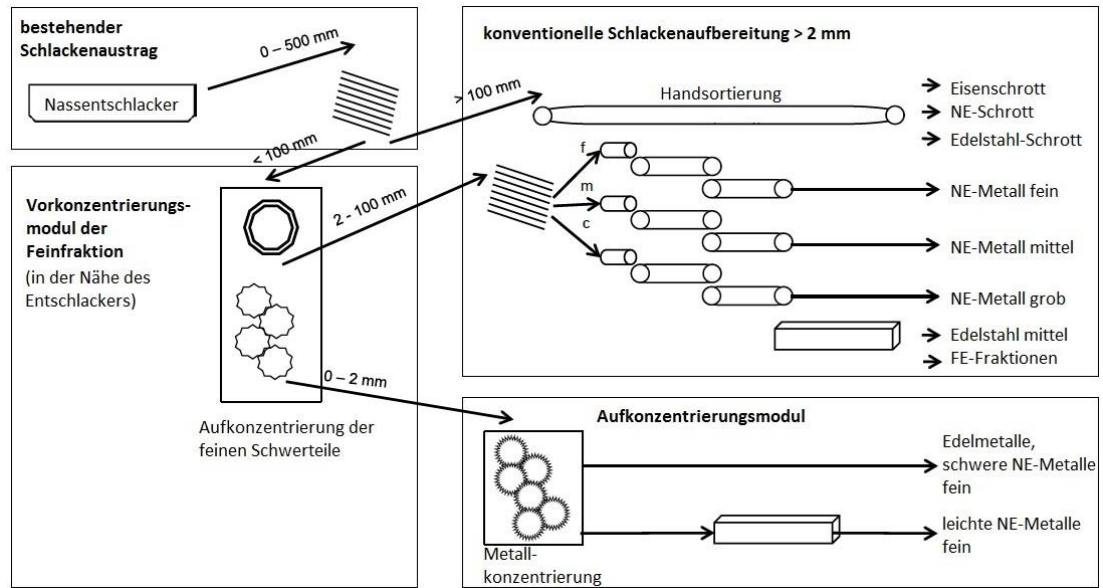


Abbildung 18: Verfahrensschema der vorgeschalteten Nassschlacken-Aufbereitungsanlage und der nachgeschalteten NE-Separierung. [Weippert, 2015]

Die Waschanlage der Feinfraktion (Vorkonzentrationsmodul) wird ohne Chemikalien betrieben und erhöht die NE-Metallausbeute signifikant. In Tests konnten 70 % der in der Feinfraktion der Rohschlacke enthaltenen Wertmetalle zurückgewonnen werden. Durch die direkt anschließende Aufbereitung liegen die Metalle noch nicht gesintert vor, sodass eine effektivere Abtrennung möglich ist. Zudem ist die Grobfraktion trotz Einsparung des Alterungsprozesses lagerstabil und frei von Agglomeraten. Somit lässt sich auch in der Grobfraktion die Metallrückgewinnungsrate erheblich verbessern. Geplant ist das Upscaling auf einen durchschnittlichen Durchsatz von mehr als 50.000 Mg/a und eine geschlossene Wasserrückführung der Schlackenwäsche. Der Wasserverbrauch wird dadurch mit maximal 0,5 m³/h veranschlagt. [Weippert, 2015; Fuchs et al., 2014; Schmidt et al., 2016]

4.6.2 supersort[®]-Verfahren

Eine weitere Anlage in der Schweiz betreibt ein dreistufiges Aufbereitungsverfahren. Sowohl nass als auch trocken ausgetragene Schlacken sowie diverse andere Abfallströme können aufbereitet werden.

In der ersten Stufe unterscheidet sich diese Anlage noch wenig von anderen trockenmechanischen Aufbereitungsanlagen. Zunächst wird die Rohschlacke durch eine Prallmühle (den sogenannten *Liberator*) aufgeschlossen und durch einen Überbandmagneten von grobem Eisenschrott befreit. Diesem Stoffstrom werden anschließend von Hand Eisen-Kupfer-Spulen und Batterien entzogen. Der Schlackenrest wird in vier Fraktionen aufgetrennt. Der Fraktion > 3 mm werden Eisen und NE-Metalle entzogen.

Die Fraktionen 12-40 mm und > 40 mm werden zusätzlich von Leichtgut (Störstoffen) befreit (Windsichter / Handsortierung), wobei für die groben Stoffe > 40 mm außerdem eine manuelle Abtrennung von NE, Edelstahl, Batterien und Kupfer-Eisen-Spulen folgt.

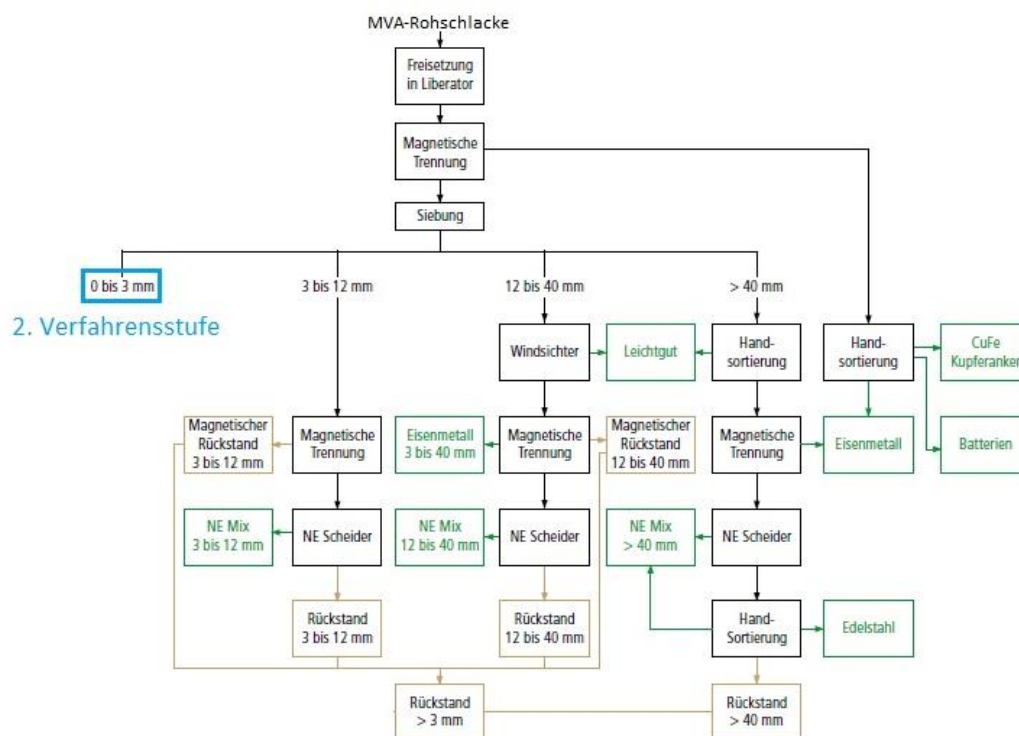


Abbildung 19: Erste Verfahrensstufe der Metallaufbereitungsanlage supersort. Grün dargestellt sind Output-Fraktionen, braun Rückstände und schwarz Prozessschritte. [Eberhard et al., 2015]

Die zweite Verfahrensstufe befasst sich mit den Partikeln < 3 mm. Hier stoßen gängige Siebklassiersysteme an ihre Grenzen, da die Schlacke sehr fein, feucht und verklebt ist. Um dennoch eine Klassierung vorzunehmen setzt dieses Verfahren eine Beschleunigungsmaschine ein. Kleine Partikel haben eine höhere spezifische Oberfläche und verhalten sich entsprechend anders als größere. Dasselbe gilt für die Dichte der Materialien. Metalle der Größe 0,5-3 mm werden angereichert und durch NE-Abscheider ein NE-Konzentrat hergestellt.

Die Veredelung der NE-Metalle wird seit 2016 in einem dritten Anlagenteil ebenfalls durch ein trockenes Verfahren vorgenommen. Die NE-Metall-Konzentrate werden in Leicht- und Schwermetalle aufgetrennt und von Anhaftungen befreit. Laut Betreiber entstehen NE-Metallfraktionen, die ohne weitere Aufbereitung direkt an Metallschmelzwerke verkauft werden. [Eberhard et al., 2015; 320°, 2016b]

5 Fazit und Ausblick

In Mitteleuropa ist die Abfallverbrennung schon lange Stand der Technik, die Entwicklung dementsprechend ausgereift. Verbesserungspotenzial gibt es jedoch noch in der Schlacken- und Flugaschenverwertung.

Die Aufbereitung von MVA-Schlacken wird insbesondere in den zentraleuropäischen Ländern Deutschland, Österreich, Schweiz und den Niederlanden durchgeführt und vorangetrieben. In Osteuropa entstehen hingegen erst in den letzten Jahren vereinzelt MVA, um der europäischen Abfallpolitik gerecht zu werden. In Polen z. B. befinden sich mehrere Anlagen in Planung [Repetzki, 2016]. Der Wirtschaftszweig der MVA-Schlackenaufbereitung wird dort innerhalb der nächsten Jahre noch entstehen.

Unabhängig von ihrer Herkunft ist die Zusammensetzung der MVA-Schlacken oft sehr ähnlich. Unterschiede ergeben sich in erster Linie durch die Austragungsart, wobei die Nassentschlackung in europäischen MVA dominiert. Durch den Wasserkontakt entstehen Verbackungen, die im Aufbereitungsprozess aufgeschlossen werden sollen. Lange Zeit lag der Aufbereitungsschwerpunkt auf dem mineralischen Schlackenanteil, der den größten Anteil der Schlacke ausmacht. Aluminium wurde zwar schon Ende der 1980er Jahre abgeschieden, Grund hierfür war allerdings die Oxidationsfähigkeit, die sich negativ auf die baustofflichen Eigenschaften der Fertigschlacken auswirkte. Erst mit Beginn des 21. Jahrhunderts gewannen NE-Metalle an Wert und Bedeutung, sodass vermehrt auf Wirbelstromtechnik gesetzt wurde. Trotzdem galt die Separierung von NE-Metallen bis 2008 lediglich als „nice-to-have“ [Pretz et al., 2016]. In den darauffolgenden Jahren wurde die Metallrückgewinnung durch politische Zielsetzungen im Ressourcenschutz und den Wertanstieg der Metalle stark vorangetrieben. Heute werden nur wenige Anlagen ohne NE-Abscheidung betrieben.

In den vier hessischen MHKW werden jährlich ca. 1.095.000 Mg Abfälle verbrannt, von denen durchschnittlich 280.000 Mg als MVA-Schlacke anfallen. Das darin liegende Metallpotenzial (Fe + NE) liegt bei etwa 22.000-28.000 Mg. Hinzu kommt das Metallpotenzial der Feinschlacke, welches nur schwer abzuschätzen ist. Nach Untersuchungen von Grünbein et al [2015] entfallen 20-30 % der Gesamtmasse auf die Feinschlacke. Demnach entstehen potenziell 56.000-84.000 Mg Feinschlacke pro Jahr in Hessen. Den größten metallischen Anteil dieser Feinschlacke machen Kupfer (ca. 400-500 Mg) und Zink (ca. 300-600 Mg) aus. Silber (ca. 1.500-1.700 kg) und Gold (ca. 70-110 kg) kommen nur in geringen Mengen vor.

Die Metallausbringung der hessischen Aufbereiter entspricht in etwa dem Bundesdurchschnitt, was aufgrund der unvollständigen Daten allerdings nicht verifiziert werden kann. In den drei betrachteten MVA-Schlacken-Aufbereitungsanlagen wird mehr als das Doppelte der insgesamt in den hessischen MHKW anfallenden Schlacke aufbereitet. Allein etwa 340.000 Mg der aufzubereitenden Schlacken stammen aus anderen Verbrennungsanlagen (EBS/BMKW) oder nicht aus Hessen. Somit ist die in den hessischen Aufbereitungsanlagen tatsächlich zurückzugewinnende Menge an Metallen deutlich höher. Mit momentanem Aufbereitungsstand und einem NE-Metallgehalt der Rohschlacken zwischen 2 % und 4 % wird die in Mittel- und Grobfraction theoretisch noch erschließbare NE-Menge auf 3700-15.500 Mg abgeschätzt.

Generell zeigt sich, dass bereits gute Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Metallen aus MVA-Schlacken bestehen und sogar teilweise in großtechnischen Anlagen eingesetzt werden. Jedoch verbleibt immer noch ein großer Anteil an NE-Metallen in der Schlacke. Das Metall-Potenzial der MVA-Schlacken muss von deutschen Aufbereitungsanlagen deutlich besser ausgeschöpft werden. Dazu fehlt jedoch die wirtschaftliche Sicherheit. Aufgrund der stark schwankenden Metallpreise ist eine Investition in moderne Aufbereitungstechniken für viele Betreiber ein zu hohes Risiko. Hier liegt es also an der Politik, stärkere Anreize und Vorgaben zu schaffen. Dies gestaltet sich aufgrund der vielen Beteiligten als sehr schwierig, wie das Beispiel der seit zehn Jahren andauernden Diskussion über die Mantelverordnung zeigt.

Die Rückgewinnung von Spurenmetallen aus MVA-Schlacken wird derzeit in Forschungsvorhaben untersucht, das Potenzial allerdings gering eingeschätzt. Durch die starke Vermischung mit anderen Abfällen liegen SEM und andere strategische Metalle dissipativ vor und eine Aufbereitung lässt sich nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand realisieren. Aufkonzentrierungsschritte sollen diesen Aufwand senken. SEM liegen zudem nahezu ausschließlich in der Feinschlacke vor. Wird diese separat aufbereitet und der Stoffstrom möglichst stark konzentriert, lassen sich durch Waschverfahren oder biochemische Prozesse Edelmetallkonzentrate gewinnen.

Die bessere Ausschöpfung der bereits erschließbaren NE-Metalle (Aluminium und Kupfer) wird vorerst als sinnvollste Möglichkeit erachtet. Die abgetrennten Wertmetalle weisen größtenteils noch hohe Verunreinigungsgrade auf. Vor allem in der Feinschlacke liegt ein großes Potenzial, das momentan nur von wenigen Anlagen erschlossen wird. Dies liegt u. a. an der hohen Varianz der Aufbereitungsanlagen, die sich durch unterschiedliche Aufbereitungsziele, gesetzliche Rahmenbedingungen der Länder und der Anlagengröße ergibt. Wird das NE-Potenzial besser genutzt, können erhebliche Mengen an Primärstoffen eingespart werden und so ein großer Beitrag zum

Klimaschutz geleistet werden. Da auch BMKW- und EBS-Schlacken ein entsprechendes Metallpotenzial aufweisen, könnte es wirtschaftliche Vorteile bringen, die Schlacken in größeren Anlagen zusammen aufzubereiten. Größere Unternehmen nutzen diese Möglichkeit zum Teil schon heute. Oftmals werden aus wirtschaftlichen Gründen jedoch Schlacken aus ganz Europa in einer Anlage aufbereitet. Transportwege von über 1000 km werden von LKW zurückgelegt, was zwar zu einer besseren Aufbereitung führen kann, dafür jedoch zu hohem CO₂-Ausstoß führt. Eine bessere Abstimmung mit lokalen bzw. näher liegenden Anlagen sowie ein umweltfreundlicherer Transport, zum Beispiel über die Schiene wäre hier wünschenswert.

Ein unter Beteiligung einer hessischen Aufbereitungsanlage durchgeführtes BMBF-Forschungsprojekt wurde im Juni 2016 abgeschlossen. Untersucht wurde ein möglicher Aufschluss der feinen Anteile von frischer sowie von abgelagerter Rohschlacke durch ein trocken-mechanisches Verfahren. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Ergänzung von bestehenden Anlagen eine deutliche Steigerung gegenüber dem momentanen Austragungsstandard möglich ist. So wurden mit der Erweiterung einer vorher schon modernen Anlage NE-Ausbringungssteigerungen von zusätzlich 1,7 % erreicht.

In der Schweiz wird eine Qualitätsverbesserung vereinzelt mit Trockenentschlackung getestet. Die Ergebnisse sind aussichtsreich, eine Umrüstung der MVA allerdings aufwendig und teuer. Für Hessen besteht hierin also keine echte Alternative. Zudem kann es zu einer hohen Staubentwicklung kommen.

Vielversprechend hingegen ist die Abtrennung der feinen Schlackenanteile direkt nach der Verbrennung. Die Zusammenbackung der Schlacke (Sinterung) setzt in der Regel erst nach ca. 36-48 Stunden ein und ist fast ausschließlich auf die Partikel < 2 mm zurückzuführen. Bei einer vorherigen Abtrennung dieser Fraktion wird dieses Problem umgangen. Außerdem bietet die EDF eine attraktive Möglichkeit zur Aufbereitung der MVA-Schlacken. Genau wie bei der vorherigen Abtrennung der Feinschlacke, werden auch hier die Bestandteile beim Aufbereitungsprozess nicht unnötig klein gemahlen. Beide Verfahren wurden 2016 in zwei großtechnischen Anlagen in der Schweiz in Betrieb genommen. Ergebnisse der Anlaufphasen liegen noch nicht vor.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Nassaufbereitungsverfahren. Auch hier laufen seit 2016 Anlagen in der Schweiz und den Niederlanden. Ein großer Vorteil liegt im besseren Aufschluss der Feinschlacken. Von besonderem Interesse sind vor allem solche Verfahren, die nicht nur auf die Metallabscheidung abzielen, sondern auch eine Aufwertung der Fertigschlacken bewirken. Auch wenn Ersatzbaustoffe noch unter mangelnder Akzeptanz leiden, zeichnet sich langsam eine Rückkehr zur Aufbereitung der mineralischen Schlackenrestfraktion ab. Zurückzuführen ist dies u. a. auf die sinkende

Deponiekapazität, und die boomende Baubranche. Hier wird in erster Linie auf aktuelle Entwicklungen in den Niederlanden geschaut, wo mit den Green-Deal-Zielen eine klare Richtung hinsichtlich des Einsatzes von Ersatzbaustoffen vorgegeben ist.

Die zahlreichen Aufbereitungsvarianten für die immer ähnlich zusammengesetzten MVA-Schlacken sind ein Indiz für das noch vorhandene Optimierungspotenzial. Mit der im Bundesdurchschnitt liegenden Rückgewinnungsquote ist das Optimum der Aufbereitungsanlagen in Hessen noch nicht erreicht. Auch vor dem Hintergrund des Ressourcenschutzes und der Verknappung strategischer Rohstoffe muss das Wertstoffpotenzial aus MVA-Schlacken besser ausgeschöpft werden. Die Entwicklung zurück zur Verwertung des mineralischen Anteils der MVA-Schlacken als Ersatzbaustoff ist zu favorisieren, sofern die Metallabtrennung weiterhin vorgenommen und weiterentwickelt wird. Vor diesem Hintergrund bieten vor allem die elektrodynamische Fragmentierung sowie die frühzeitige Separierung des Feinkorns vielversprechende Konzepte. Hier stellt sich jedoch generell die Frage, ob die Abfallverbrennung eine hinreichend gute Abfallbehandlung im Sinne der Ressourcenschonung darstellt. Bei der Verbrennung gehen Wertstoffe verloren und lassen sich zum Teil nicht mehr zurückgewinnen (z. B. Tantal). Außerdem setzt sich der Verbrennungsabfall aus verschiedensten Stoffgruppen zusammen, sodass eine starke Vermischung der Abfälle und damit eine entsprechend starke Verdünnung einzelner Materialien stattfindet. Auch wenn die gemischte Erfassung möglicherweise höhere Rücklaufquoten mit sich bringt, wird eine Getrenntsammlung weiterhin als notwendig angesehen. Eine stoffliche Aufbereitung von Abfällen ist umso effektiver, je spezifischer und reiner ein Stoffstrom ist. Dementsprechend ist deren stoffliche Wiederverwendung und nicht deren thermische Verwertung anzustreben. Auch die Abfallhierarchie führt nach der Vermeidung von Abfällen das Priorisieren der stofflichen Wiederverwendung an.

6 Zusammenfassung

Die Konzentration der Abbaugebiete von Erzen und Seltenen Erden auf wenige, meist politisch instabile Regionen, und der daraus resultierende, stark schwankende, Preis für Metalle rückt eine Wiederaufbereitung von Metallen aus Abfällen vermehrt in die Diskussion. Rohschlacke (= unbehandelte Schlacke) aus Hausmüllverbrennungsanlagen besteht neben Mineralik, Glas und Unverbranntem zu einem Großteil aus Metallen. In Deutschland liegt der Anteil dieser Fraktion in der Regel zwischen 7 % und 10%. Die Erschließung dieser bisher ungenutzten Rohstoffquelle bedeutet wirtschaftliche Unabhängigkeit von politisch schwachen Exportländern und eine Verfügbarkeit auch für künftige Generationen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie eine Situationsanalyse zum Stand der Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken in Hessen durchgeführt und weitergehende Verfahren dargestellt. Durch eine Umfrage konnte ermittelt werden, dass in den hessischen Müllheizkraftwerken jährlich ca. 280.000 Mg Rohschlacken anfallen, die anschließend in drei Aufbereitungsanlagen innerhalb Hessens weiter behandelt werden. Die Metallausbringung dieser Anlagen unterscheidet sich deutlich, entspricht im Mittel jedoch dem bundesweiten Durchschnitt. Derzeit verbleiben zwischen 3.700 Mg und 15.500 Mg an NE-Metallen in den aufbereiteten Schlacken. Hinzu kommt das Metallpotenzial des Feinkorns, welches nur selten aufbereitet wird. Allein in den in Hessen anfallenden MVA-Schlacken liegen etwa 400-500 Mg Kupfer und 300-600 Mg Zink. Seltene Erden und Edelmetalle kommen nur in Spuren vor. Die drei Aufbereitungsanlagen bereiten zusätzlich auch Schlacken aus anderen Ländern und anderen Verbrennungsanlagen auf, sodass die tatsächlich zurückzugewinnende Metallmenge aus der Feinschlacke deutlich höher einzuschätzen ist.

Für den Aufschluss bieten sich weitergehende Aufbereitungsverfahren wie die elektrodynamische Fragmentierung oder Hybridverfahren an. Werden Feinstpartikel unmittelbar nach dem Schlackenausstrag abgetrennt, können Verbackungen verhindert werden, sodass eine anschließende Aufbereitung deutlich effektiver durchgeführt werden kann. Großtechnische Anlagen wurden bereits in Betrieb genommen, Ergebnisse der Anlaufphase hingegen noch nicht veröffentlicht. Die Rückgewinnung von Spurenmetallen ist derzeit weder wirtschaftlich, noch vom Ressourcenaufwand vertretbar. Mit verbesserter Metallausbringung aus der Feinfraktion gehen jedoch Aufkonzentrierungsschritte einher, sodass diese Quelle künftig erschlossen werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- 320°. 2016a.** 320° Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft. „Echtes Recycling“ mit künstlichen Blitzen. [Online] 06. Juni 2016a. [Zitat vom: 10. 06. 2016.] <http://320grad.de/echtes-recycling-mit-kuenstlichen-blitzen/>.
- 320°. 2016b.** 320° Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft. *Grossauftrag für BHS Sonthofen.* [Online] 2016. April 2016b. [Zitat vom: 10. 06. 2016.] <http://320grad.de/grossauftrag-fuer-bhs-sonthofen/>.
- 320°. 2016c.** 320° Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft. *Schlackenwäsche soll Deponierung überflüssig machen.* [Online] 21. März 2016c. [Zitat vom: 11. 06. 2016.] <http://320grad.de/schlackenwaesche-soll-deponierung-ueberfluessig-machen/>.
- Alwast, Holger und Riemann, Axel. 2010.** *Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2010.
- BAM. 2011.** Bundesanstalt für Materialprüfung. *mündliche Mitteilungen.* Berlin, 2011.
- Baudirektion des Kantons Zürich. 2015.** Abfall, Rohstoffe & Altlasten. *Bericht zum Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015...2018.* [Online] März 2015. [Zitat vom: 16. 06. 2016.] http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/abfallplanung_2015_2018.html.
- BDI. 2015.** Kurzbewertung des 3. Arbeitsentwurfs zur sogenannten Mantelverordnung. *Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.* [Online] 9. November 2015. [Zitat vom: 11. 06. 2016.] http://bdi.eu/media/themenfelder/umwelt/downloads/medienbezogener-umweltschutz/Positionspapier_Kurzbewertung_zur_Mantelverordnung_20151109.pdf.
- Beck, Ralf und Kröger, Werner. 2005.** *Aschen aus der Müllverbrennung - Baustoff auf Deponien oder ABfall zur Ablagerung.* s.l. : Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2005.

- Biltewski, Bernd und Härdtle, Georg. 2013.** *Abfallwirtschaft*. Berlin - Heidelberg : Springer Vieweg, 2013.
- BMU. 1999.** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - Pressemitteilungen. *BMU legt Eckpunkte für die Zukunft der Entsorgung von Siedlungsabfällen vor*. [Online] 20. August 1999. [Zitat vom: 11. 05. 2016.]
<http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/bmu-legt-eckpunkte-fuer-die-zukunft-der-entsorgung-von-siedlungsabfaellen-vor/>.
- BMUB. 2015.** Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der BundesBodenschutz- und Altlastenverordnung. *MantelV - 3. Arbeitsentwurf des Bundesministerium für Umelt, Bau und Reaktorsicherheit*. [Online] 23. Juli 2015. [Zitat vom: 11. 06. 2016.]
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/mantelv_entwurf_3_bf.pdf.
- Böni, Daniel. 2010.** *Ausbeute aus der Trockenschlacke*. VDI Wissensforum. s.l. : ZAR - Stiftung für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung, 2010.
- Born, Jan-Peter. 2015a.** Green Deal zu Abfallverbrennungsaschen in den Niederlanden - Vorgeschichte, Umsetzung und erzielbare Qualitätsverbesserungen der Mineralfraktion. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015a.
- Born, Jan-Peter. 2015b.** ICP Deponieseminar. *Green Deal zu Müllverbrennungs-Aschen in den Niederlanden*. [Online] 2015b. [Zitat vom: 16. 06. 2016.]
http://icp-ing.de/Seminar/Deponieseminar2015/22-Born_Green-Deal-HMVA.pdf.
- Boskalis Dolman.** Boskalis Environment. *Incinerator bottom ash washing*. [Online] [Zitat vom: 13. 06. 2016.]
<http://www.boskalisdolman.com/activities/incinerator-bottom-ash-washing.html>.

- Breitenstein, Boris und Goldmann, Daniel. 2016.** NE-Metallrückgewinnung aus MVA-Schlacken < 2 mm zur Metallrückgewinnung und mineralischen Reststoffverwertung. [Hrsg.] Ulrich Teipel und Armin Reller. *4. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. Evangelische Akademie Tutzing : Fraunhofer Verlag, 2016.
- Breitenstein, Boris, Goldmann, Daniel und Heitmann, Benedikt. 2015.** NE-Metallrückgewinnung aus Abfallverbrennungsschlacken unterschiedlicher Herkunft. [Hrsg.] Karl Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2*. Neuruppin : Tk Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Breitenstein, Boris, Goldmann, Daniel und Quedenfeld, Iven. 2013.** ReNe-Verfahren zur Rückgewinnung von dissipativ verteilten Metallen aus Verbrennungsrückständen der thermischen Abfallbehandlung. [Hrsg.] Karl Thomé-Kozmiensky. *Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.
- Briese, Dirk, Duill, Björn und Westholm, Hilmar. 2012.** Der Markt für Schlacken. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe 5*. Neuruppin : TK Verlag, 2012.
- Bunge, Rainer. 2016.** Aufbereitung von Abfallverbrennungsaschen – Eine Übersicht. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3*. Neuruppin : TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2016.
- Bunge, Rainer. 2014.** Interessante Aufschlüsse. *ReSource*. 2014, 3.
- Calta, Evelyn, Marb, Clemens und Riedel, Heinz. 2015.** *Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen*. Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015.
- Deike, Rüdiger et al. 2012.** *Abschlussbericht zum Projekt "Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung"*. Duisburg : Universität Duisburg-Essen, 2012.
- DHZ AG. 2015.** supersort.ch. *supersort Technologie*. [Online] DHZ AG, 2015. [Zitat vom: 19. 02. 2016.] <http://www.supersort.ch/de/998/Technologie.htm>.
- Dott, Wolfgang et al. 2013.** Bioleaching von Schwermetallen aus Aschen und Schlacken mit gleichzeitiger Rückgewinnung von Phosphat. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Aschen, Schlacken, Stäube - aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.

- Eberhard, Stefan und Röcken, Raphael. 2015.** Resource Mining - Rohstoff aus Schweizer Abfall - Rückgewinnung von Produkten aus Abfallverbrennungsrückständen -. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Energieversorgung Offenbach AG. EVO-AG: Die Funktionsweise des MHKW. EVO-AG: Der Weg des Mülls.** [Online] [Zitat vom: 13. 05. 2016.] <https://www.evo-ag.de/technik-und-umwelt/muellheizkraftwerk/funktionsweise/>.
- Energieversorgung Offenbach AG. 2013.** *Für eine saubere Umwelt - Das Müllheizkraftwerk Offenbach - effizient und nachhaltig*. Offenbach : EVO AG, 2013.
- EUWID Recycling. 2016.** Wirtschaft. *Baugewerbe hält MantelV für unbrauchbar und fordert Neustart*. [Online] 14. April 2016. [Zitat vom: 11. 06. 2016.] <http://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/baugewerbe-haelt-mantelv-fuer-unbrauchbar-und-fordert-neustart.html>.
- Faulstich, Martin et al. 2011.** *Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen*. ATZ Entwicklungszentrum und TU München. Sulzbach-Rosenberg : s.n., 2011.
- Franz, Markus. 2014.** Geschichte der Schlackenaufbereitung. *KVA-Schlackenaufbereitung in der Schweiz - Von den Anfängen bis heute*. [Online] 2014. [Zitat vom: 11. 06. 2016.] <http://www.abfall-sh.ch/pflumm/assets/downloads/5582c062/geschichte-schlackenaufbereitung.pdf>.
- Fuchs, Christian und Schmidt, Martin. 2014.** Extraktion von Kupfer und Gold aus Feinstfraktionen von Schlacken. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014.
- Gillner, Ronald et al. 2011.** NE-Metallpotenzial in Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen. *World of Metallurgy – ERZMETALL*. 2011, Bd. 64, 5.

- Gisbertz, Kilian und Friedrich, Bernd. 2015.** VeMRec - Metallurgische Herausforderungen beim Recycling von NE-Metallkonzentraten aus Abfallverbrennungs-Rostasche. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin : TK Verlag karl Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Gosten, Alexander. 2013.** Potential des Metallrecyclings durch Abfallverbrennung. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe 6*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.
- Greinert, Joachim. 2012.** Vermarktung von MVA-Schlacken - Erfahrungen aus Hamburg. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012.
- Gronholz, Claus und Schmidt, Mary. 2016.** *Schlussbericht zum Verbundvorhaben ATR Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren*. 2016.
- Gronholz, Claus. 2011.** *Vorrichtung zum mechanischen Trennen von Materialkonglomeraten aus Materialien unterschiedlicher Dichte und/oder Konsistenz*. DE 10 2011 050 789 A1 Deutschland, Oktober 2011.
- Grünbein, Marcel, Wegkamp, Dennis und Rüßmann, David. 2015.** Steigerung der Wertstoffseparation von Rostaschen aus der Nassentschlackung durch Optimierung konventioneller Technik. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2*. Neuruppin : TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Hartmut, Haeming. 2015.** Deponien in Deutschland: Situation und Bedarf. *Erfahrungsaustausch Kommunale Abfallwirtschaft*. [Vortrag]. GGSC : s.n., 25. & 26. Juni 2015.
- Hempel, H. und Müller, M. 2003.** *Anlagen zur Verbrennung und mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen - Übersicht über Aufbau, Technik, Leistungsfähigkeit und gesetzlichen Anforderungen*. Jena : Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 2003.
- HMUKLV. 2015a.** *Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2014*. Wiesbaden : Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2015a.

HMUKLV. 2015b. *Abfallwirtschaftsplan Hessen - Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle.* Wiesbaden : Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2015b.

Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, KIT. 2015. Langzeitverhalten und bautechnische Eignung von Müllverbrennungsschlacken. [Online] Karlsruher Institut für Technologie, Februar 2015. [Zitat vom: 03. 05. 2016.]
https://www.ise.kit.edu/Forschung_311.php.

ITAD e. V. 2009. *Zusammengestellte Daten aus Mitgliederbefragungen 2006 und 2008.* 2009.

ITAD. ITAD-Reststoffe. [Online] [Zitat vom: 28. 04. 2016.]
<https://www.itad.de/ITAD/reststoffe>.

Johnson, Annette. 1993. Chemische Eigenschaften und Langzeitverhalten der Müllschlacke. [Buchverf.] Peter Baccini und Barbara Gamper. *Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft - Endlagerqualität am Beispiel Müllschlacke.* Ittingen, Schweiz : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1993.

Kersting, Dieter. 2015. Situation der Hausmüllverbrennungsaschen - Industrie, Technik, Kosten und Markt. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.

Kleppmann, Ferdinand. 2015. Stand und Herausforderungen der energetischen Abfallverwertung in Deutschland und Europa. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Strategie Planung Umweltrecht 9.* Neuruppin : TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft, 2015.

Koralewska, Ralf, Langhein, Eva-Christine und Horn, Joachim. 2010. Verfahren zur Verbesserung der Qualität von Verbrennungsrückständen mit innovativer MARTIN-Technologie. [Buchverf.] K. (Ed.) Schenk. *KVA-Rückstände in der Schweiz - Der Rohstoff mit Mehrwert.* Bern : Bundesamt für Umwelt, 2010.

Krüger, Michael et al. 2016. *Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining.* Porta Westfalica : BMBF; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2016.

- Kuchta, Kerstin und Enzner, Verena. 2016.** Metallrecycling aus MV-Schlacke. 28. *Kasseler Abfall- und Bioenergieforum*. Witzenhausen : Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2016, S. 367-372.
- Kuchta, Kerstin und Enzner, Verena. 2015.** *Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen - Bewertung der Ressourceneffizienz*. Hattingen : EdDE e.V., 2015.
- LAGA. 2003.** *Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 2003.
- Lamers, Frans. 2015.** Treatment of Bottom Ashes of Waste-to-Energy Installations – State of the Art. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Stephanie Thiel. *Waste Management 5*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Lemann, Martin F. 2005.** *Abfalltechnik*. Bern : Peter Lang Ag, Europäischer Verlag der Wissenschaften, 2005.
- Lübben, Stefan. 2016.** Schlacke als Quelle für mineralische Baustoffe. [Online] 2. Februar 2016. [Zitat vom: 13. 06. 2016.]
http://www.hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/2016/Vortraege_2016/1_10_Praesentation_Dr_Luebben.pdf.
- Lübben, Stefan. 2015b.** Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals. *ATR-Medien*. [Online] 15. Oktober 2015b. [Zitat vom: 13. 06. 2016.]
http://www.atr.bam.de/de/medien/2015_luebben_beacon.pdf.
- Lübben, Stefan. 2015a.** Verwertung von Abfallverbrennungsasche als Zuschlagstoff in der Beton-, Asphalt- und Zementindustrie. [Hrsg.] K. J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015a.
- Marb, Clemens et al. 2002.** *Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben*. Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002.
- Martens, H. 2011.** *Recyclingtechnik - Fachbuch für Lehre und Praxis*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- Marzi, Thomas et al. 2004.** Künstliche Alterung von Rostaschen aus der thermischen Abfallbehandlung. *Müll und Abfall*. 2004, 1.

- Meinfelder, T. und Richers, U. 2008.** *Entsorgung der Schlacke aus thermischen Restabfallbehandlung*. Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2008.
- Meßmann, Doris und Schäfer, Carsten. 2004.** *Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen in Baden-Württemberg*. Karlsruhe : Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004.
- MHKW Müllheizkraftwerk Frankfurt am Main GmbH. 2013.** FES - Unterrichtung der Öffentlichkeit nach 17. BImSchV. [Online] 2013. [Zitat vom: 19. 05. 2016.] <https://www.mhk-w-frankfurt.de/unterrichtung-der-%C3%B6ffentlichkeit-nach-17-bimschv>.
- Müllheizkraftwerk Kassel GmbH. MHKW Kassel. Daten & Zahlen.** [Online] [Zitat vom: 20. 05. 2016.] http://www.mhk-w-kassel.de/mhk-w/Daten_Zahlen/Abfallmengen/index.htm?nr=30.
- MVR Müllverwertung. 2015.** Müllverwertungsanlage Rugenwalder Damm. *Geschichte der Müllverbrennung in Hamburg*. [Online] 2015. [Zitat vom: 22. 02. 2016.] <http://www.mvr-hh.de/Geschichte.56.0.html>.
- MVR Rugenberger Damm. 2015.** Verfahrenstechnik - Schlackenaufbereitung. *MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG*. [Online] 2015. [Zitat vom: 03. 06. 2016.] <http://www.mvr-hh.de/Schlackenaufbereitung.65.0.html>.
- Pfrang-Stotz, G. und Reichelt, J. 2005.** *Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken*. Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2005.
- Pfrang-Stotz, G. und Reichelt, R. 1999.** *Qualitätsverbesserung von Müllverbrennungsschlacken*. 1999.
- Pretz, Thomas und Feil, Alexander. 2016.** Aufbereitung der Rostasche-Feinfraktion < 10 mm - Stand der Technik. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016.

- Pretz, Thomas und Feil, Alexander. 2015.** Aufbereitungsmethoden für eine hochwertige Verwertung von NE-Metallen aus Abfallverbrennungsrostaschen. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.
- Pretz, Thomas und Meier-Kortwig, Jan. 2000.** Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung. *Aufbereitungstechnik*. 2000, 3.
- Quicker, Peter et al. 2015.** Wertstoffpotenziale von trockenen und nass ausgetragenen Abfallverbrennungsschlacken - Forschungsergebnisse aus praktischen Untersuchungen -. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky, Stephanie Thiel und Elisabeth Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte 2 - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen* -. Neuruppin : TK Verlag, 2015.
- Repetzki, Beatrice. 2016.** Polens Abfallwirtschaft setzt auf Müllverbrennung. *EU-Recycling*. [Online] 29. April 2016. [Zitat vom: 25. 06. 2016.] <http://eu-recycling.com/Archive/11696>.
- Sabbas, Thomas, Mostbauer, Peter und Lechner, Peter. 1998.** *Deponien - Prozesse und Faktoren jenseits der Nachsorge*. Wien : Magistrat der Stadt Wien, 1998.
- Schmeisky, Helge et al. 2011.** *Aufkommen und Verwertung von Aschen und Schlacken sowie den darin enthaltenen Wertstoffen im Bundesland Hessen*. Witzenhausen : Hessischer Forschungsverbund für Abfall, Umwelt und Ressourcenschutz e.V., 2011.
- Schmidt, Martin und Weippert, Roland. 2016.** Rückgewinnung von Metallen aus der Feinfraktion von Abfallverbrennungsaschen. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016.
- Schoppmeier, W. 1988.** Erfahrungen mit der Entsorgung, Aufbereitung und Verwertung fester Verbrennungsrückstände aus der Hausmüllverbrennung. *Müll und Abfall*. 1988, Nr. 3, S. 104-112.
- Seifert, Severin et al. 2013.** *Elektrodynamische Fragmentierung von MVA-Schlacken – Zerlegung der Schlacken und Abscheidung von Chloriden und Sulfaten*. 2013.

Seifert, Severin, Thome, Volker und Karlstetter, Christof. 2014.

Elektrodynamische Fragmentierung – Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Recycling und Rohstoffe 7*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 431 - 438.

Simon, Franz-Georg und Holm, Olaf. 2011. *Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse*. 2011.**Speiser, Claudia. 2001. Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz. *Dissertation*. München : s.n., 2001.****Stadtreinigung Hamburg. OPTIMIN. *Optimierung der stofflichen Verwertung mineralischer Rückstände aus der Abfallwirtschaft*. [Online] [Zitat vom: 13. 06. 2016.] <http://www.optimin.de>.****Statista. *statista. Kohlendioxid - Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland bis 2014*. [Online] [Zitat vom: 25. 05. 2016.] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.****TARTECH. *TARTECH Mineralikaufbereitung*. [Online] KNETTENBRECH + GURDULIC Service GmbH & Co. KG. [Zitat vom: 05. 04. 2016.] <http://www.knettenbrech-gurdulic.de/unternehmen/beteiligungen/tartech-knettenbrech-mineralikaufbereitung/>.****Thome, Volker. 2012. *Elektrodynamische Fragmentierung von Abfallstoffen am Beispiel von Altbeton und Müllverbrennungsschlacken*. Karlsruhe : s.n., 2012.****Thomé-Kozmiensky, Karl J. 2013. Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung von Sekundärabfällen aus der Abfallverbrennung. *Aschen -Schlacken - Stäube - aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.****UMTEC. 2016. IGENASS. *CH-Dokumente-Factsheets*. [Online] April 2016. [Zitat vom: 02. 06. 2016.] https://www.igenass.ch/fileadmin/user_upload/igenass.ch/Dokumente/Factsheets/160526_Zerkleinerung_GBWM_EDF.pdf.**

- Umweltbundesamt. 2005.** *Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung.* Dessau : s.n., 2005.
- Verheyen, Markus. 2015.** [Vortrag] Interessengemeinschaft Deutsche Deponiebetreiber (InwesD) : Hessisches Umweltministerium, 17. 04. 2015.
- Vries, Walter de, Rem, Peter C. und Berkhout, S. Peter M. 2014.** ADR – a New Method for Dry Classification. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Stephanie Thiel. *Waste Management 4.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky, 2014.
- Warnecke, Ragnar. 2014.** Fünfzig Jahre und kein bisschen weise - Korrosion und Verfahrenstechnik in thermischen Abfallbehandlungsanlagen -. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und M. Beckmann. *Energie aus Abfall.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014.
- Weh, Alexander. 2015.** Effiziente Metallrückgewinnung aus Kehrichtverbrennungsasche mittels Hochspannungsimpulsverfahren. [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 167-191.
- Weippert, Roland. 2015.** *LAB Geodur Recovery of Precious Metals from IBA.* [Vortrag] 21. 10. 2015.
- Wiemer, Klaus und Gronholz, Claus. 2011.** Ressourcen- und Klimarelevanz von Aschen und Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. [Buchverf.] Klaus Wiemer. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung: stofflich, energetisch.* Witzenhausen : s.n., 2011.
- Wilts, Henning et al. 2016.** Hochspannungs-Fragmentationsverfahren zur Metallrückgewinnung aus MVA-Aschen. [Hrsg.] Hessen Trade & Invest GmbH und Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. *Technologielinie Hessen-Umwelttech. Stoffkreisläufe in Hessen - Praxisbeispiele und Potenziale,* 2016, Bd. 16.
- ZAS. 2011.** Technische Daten. *Müllheizkraftwerk Darmstadt.* 2011, 1.
- Zwahr, Heiner. 2004.** *Ash Recycling: Just a Dream?* Savannah, GA : NAWTEC, 2004.

Zwahr, Holger. 2006. Eigenschaften mineralischer Abfälle, Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA-Schlacken. *Anforderungen an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung mineralischer Abfälle.* Bonn : Bundesministerium für Umwelt, 13.-14. Februar 2006.

A Fragebogen für MHKW-Betreiber

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit im Fach Umwelttechnik beschäftige ich mich mit der Aufbereitung von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen mit Schwerpunkt Metallrecycling.

Mit der Bearbeitung dieses Fragebogens helfen Sie mir, einen Überblick über die momentan in Hessen angewendeten Aufbereitungsverfahren zu bekommen. Diese Situationsanalyse bildet die Grundlage meiner Arbeit. Anhand der Ergebnisse lässt sich ein Vergleich zu Anlagen in anderen Ländern ziehen und feststellen, auf welchem Stand sich Hessen bezüglich der Schlackenaufbereitung befindet und ob sich bestimmte fortschrittliche Verfahren auf einzelne Anlagen adaptieren lassen.

Die Arbeit wird in Zusammenarbeit der Hochschule RheinMain mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) durchgeführt. Für Kritik, Anregungen oder Fragen jeglicher Art erreichen Sie mich unter den angegebenen Kontaktdaten.

Es wird beabsichtigt die Ergebnisse nach Auswertung und Zusammenführung in anonymisierter Form zu veröffentlichen. Wenn Sie Interesse an den Ergebnissen haben, schicke ich Ihnen diese gerne schon vorab zu. Geben Sie dafür bitte Ihre Mailadresse unter Punkt 5 „Anmerkungen“ an.

Schon jetzt möchte ich mich herzlich für Ihre Hilfe bedanken!

Mit freundlichen Grüßen

Wiesbaden, den

Einige Daten (Name, Adresse, Inbetriebnahme, etc.) habe ich durch öffentlich zugängliche Quellen bereits erhalten und ausgefüllt. Sollten hier Angaben fehlerhaft sein, verbessern Sie diese bitte.

1. Allgemein

Name und Adresse des Betreibers	
Adresse der Anlage	
Ansprechpartner	
Email	
Telefon	

3. Anlage

Jahr der Inbetriebnahme _____

Feuerungsart _____

Anzahl der Verbrennungslinien _____

Wird der Abfall vorbehandelt? Ja Nein

Wenn JA, wie?

Nassentschlackung

Trockenentschlackung

4. Schlacke

a) Durchschnittlicher Anfall an Rostschlacke [t/a] _____

b) Was passiert mit der Schlacke?

Abgabe an externen Aufbereiter

Wenn JA: Name und Anschrift des Aufbereiters:

Deponierung

Wenn JA: Deponieklasse _____

Untertageversatz

Eigene Schlackenaufbereitung

Wenn JA:

Bitte bearbeiten Sie auch den Fragebogen für Schlackeaufbereiter.

c) Regelmäßige Schlackenanalysen

- täglich wöchentlich monatlich
- vierteljährlich halbjährlich jährlich
- alle 2 Jahre alle 5 Jahre nie
- anderer Abstand:
-

d) Schlackenzusammensetzung

- Analyse vorhanden Ja Nein
- Angabe der Zusammensetzung in Durchschnittswerten
 Analysewerten vom:

(tt.mm.jjjj)

- Schlackenanteile [%]

_____ Eisen

_____ Mineralik

_____ Organik

_____ Glas

_____ Kupfer

_____ Aluminium

_____ Edelstahl

- e) Feuchtegehalt der Schlacke:
-

B Fragebogen für Schlackenaufbereiter

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit im Fach Umwelttechnik beschäftige ich mich mit der Aufbereitung von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen mit Schwerpunkt Metallrecycling.

Mit der Bearbeitung dieses Fragebogens helfen Sie mir, einen Überblick über die momentan in Hessen angewendeten Aufbereitungsverfahren zu bekommen. Diese Situationsanalyse bildet die Grundlage meiner Arbeit. Anhand der Ergebnisse lässt sich ein Vergleich zu Anlagen in anderen Ländern ziehen und feststellen, auf welchem Stand sich Hessen bezüglich der Schlackenaufbereitung befindet und ob sich bestimmte fortschrittliche Verfahren auf einzelne Anlagen adaptieren lassen.

Die Arbeit wird in Zusammenarbeit der Hochschule RheinMain mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) durchgeführt. Für Kritik, Anregungen oder Fragen jeglicher Art erreichen Sie mich unter den angegebenen Kontaktdaten.

Es wird beabsichtigt die Ergebnisse nach Auswertung und Zusammenführung in anonymisierter Form zu veröffentlichen. Wenn Sie Interesse an den Ergebnissen haben, schicke ich Ihnen diese gerne schon vorab zu. Geben Sie dafür bitte Ihre Mailadresse unter Punkt 5 „Anregungen“ an.

Schon jetzt möchte ich mich herzlich für Ihre Hilfe bedanken!

Mit freundlichen Grüßen

Wiesbaden, den

Einige Daten (Name, Adresse, Inbetriebnahme, etc.) habe ich durch öffentlich zugängliche Quellen bereits erhalten und ausgefüllt. Sollten hier Angaben fehlerhaft sein, verbessern Sie diese bitte.

1. Allgemein

Name des Betreibers	
Adresse der Anlage	
Ansprechpartner	
Email	
Telefon	
Jahr der Inbetriebnahme der Anlage	

2. Input

a) Durchschnittlich aufbereitete Schlackenmenge [t/a]

b) Herkunft der Rohschlacke:

- Eigene MVA

- Fremdfirmen

Wenn JA: Name(n) und Adresse(n) der Fremdfirmen:

c) Aufbereitung von...

...Rost / Kesselasche (19 01 12)

...Filterstäuben (19 01 14)

...anderen Stoffen:

d) Durchschnittliches Alter der Rohschlacke bei Anlieferung _____

3. Aufbereitung

a) trocken nass nass + trocken

b) Länge der Vorlagerung /
Alterungsdauer immer gleich? Ja Nein

Wenn NEIN : Warum?

c) Alterungsdauer: _____

d) Aufbereitung bis zu einer Korngröße von _____ mm

e) Anzahl der Sieblinien _____

f) Bitte zählen Sie die in Ihrer Anlage durchgeführten Aufbereitungsschritte auf und erläutern Sie diese ggfs.

Beispielsweise:

- 1) *Alterung – Lagerung für 3 Monate, 25°C, bewässert*
- 2) *Zerkleinerung – Prallmühle*
- 3) *Fe-Aussortierung – Überbandmagnet*
- 4) *Größenfraktionierung – Sieb 10mm*
- 5) *NE-Aussortierung – Wirbelstromverfahren*
- 6) *Zerkleinerung – Mahlen auf < 3mm*

4. Output

a) Welche Produkte/Rohstoffe werden gewonnen bzw. fallen bei der Aufbereitung an?

Bitte vervollständigen Sie die Tabelle, soweit möglich, nach folgendem Muster.

FRAKTIONEN			PRODUKTE			
Anzahl	von [mm]	bis [mm]	Mineralik [✓]	Glas [✓]	Fe [✓]	NE [auflisten]
1	2	4	✓		✓	Al, Cu, Zn, Ag, Sn

Fraktion: Geben Sie die Korngrößen der Fraktionen an.

Produkte: Setzen Sie einen Haken in den entsprechenden Spalten, wenn Mineralik, Glas und/oder Eisen anfallen und listen Sie in der letzten Spalte die NE-Metalle auf.

FRAKTION			PRODUKTE			
Anz. / Nr.	von [mm]	bis [mm]	Miner. [✓]	Glas [✓]	Fe [✓]	NE [auflisten]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

