

TEXTE

50/2010

Verbesserung der umwelt-relevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen

Förderkennzeichen 363 01 256
UBA-FB 001409

Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen

von

Holger Alwast
Prognos AG, Berlin

Dr. Axel Riemann
RSP GmbH, Herne

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4025.html>
verfügbar. Hier finden Sie auch eine englische Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
Markus Gleis, Benjamin Wiechmann

Dessau-Roßlau, Oktober 2010

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Schlacken aus Siedlungsabfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerken mit Rostfeuerung	5
3 Charakterisierung der Schlacken hinsichtlich Zusammensetzung und Verwertbarkeit	9
3.1 Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Schlacken aus MVA	10
3.2 Schwankungsbreiten der Eluatparameter von Schlacken aus MVA	14
4 Derzeit beschrittene Verwertungswege für MVA-Schlacken und dafür erforderliche Qualitätsanforderungen	19
5 Stand der Technik zur Schlackeaufbereitung	22
5.1 Konventionelle Schlackeaufbereitung	25
5.2 Weitergehende Schlackeaufbereitung (nass-mechanisch bzw. mit Wäsche)	28
5.3 Erreichbare Schlackequalitäten	30
5.4 Trockenentschlackung	34
5.4.1 Verfahrensbeschreibung	34
5.4.2 Erreichbare Schlackequalität	35
5.5 Zwischenfazit	38
6 Schlackequalitäten von alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen im Vergleich zur konventionellen MVA	40
6.1 Vergasungs- und Entgasungsverfahren mit anschließender Nachverbrennung	40
6.2 SYNCOM-Verfahren	43
6.3 SYNCOM-Plus-Verfahren	46
6.4 Plasma-Schmelz-Verfahren	50

6.5	Verfahrensvergleich im Fokus des Klima- und Ressourcenschutzes	53
6.5.1	Vorgehensweise und Methodik	53
6.5.2	Ergebnisse des technisch-wirtschaftlichen und energetischen Vergleichs	54
6.5.3	Ergebnisse der erreichbaren Schlackequalität	62
7	GESAMTFAZIT	67
8	Literaturverzeichnis	73
9	Anhang	78
9.1	Definition der Modellanlagen	78
9.2	Massen- und Energiebilanzen der betrachteten Verfahren	80
9.3	Abschätzung der Behandlungskosten	84
9.4	Berechnung des energetischen Beitrags durch Ressourcenschonung mit Hilfe des kumulierten Energieaufwandes (KEA)	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kumulierter energetischer Aufwand (KEA) zur Metallherstellung	3
Tabelle 2: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Schlacken – Zusammenfassung von Messergebnissen nach 1990	10
Tabelle 3: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacke (Rohschlacke und gealterte Schlacke) nach Angaben von ITAD für das Jahr 2006/2007	11
Tabelle 4: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Rohschlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)	12
Tabelle 5: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von gealterter Schlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)	12
Tabelle 6: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von gealterter HVM-Schlacke nach Angaben von ITAD für das Jahr 2006/2007	14
Tabelle 7: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von Rohschlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)	15
Tabelle 8: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von gealterter Schlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)	16
Tabelle 9: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von verkaufsfertiger HVM-Schlacke, Messergebnisse verschiedener Auslaugungsverfahren	17
Tabelle 10: Anforderungen an die Schlackequalitäten in Deutschland (oben: Eluatwerte; unten: Feststoffwerte)	21
Tabelle 11: Durchschnittliche Zusammensetzung von Rohschlacke aus MVA	23
Tabelle 12: Durchschnittliche Abfallzusammensetzung und Heizwert	24
Tabelle 13: Verfahrensschritte der konventionellen Schlackeaufbereitung	25
Tabelle 14: Verfahrensschritte der weitergehenden Schlackeaufbereitung	29
Tabelle 15: Schlackequalitäten bei der konventionellen und weitergehenden Aufbereitung (Eluatwerte)	31
Tabelle 16: Schlackequalitäten bei der konventionellen und weitergehenden Aufbereitung (Feststoffwerte)	31

Tabelle 17: Schlackequalität bei trockener Entschlackung (Feinfraktion < 2mm, Feststoffwerte)	37
Tabelle 18: Vergleich der Verfahren (Abgas, Emissionen, Betriebsmittel, Energie, Kosten)	55
Tabelle 19: Schlackequalitäten der betrachteten Verfahren im Vergleich zu aufbereiteter MVA-Schlacke (Eluatwerte)	62
Tabelle 20: Qualitativer Gesamtvergleich der betrachteten Verfahren	69
Tabelle 21: Vergleich der Verfahren in Hinblick auf Klimaschutz	71
Tabelle 22: Wichtige Modellierungsgrundlagen	79
Tabelle 23: Grundlagen der Ermittlung der Behandlungskosten	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Standorte von Müllverbrennungsanlagen (MVA) und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland (Stand: 31. Dezember 2009)	6
Abbildung 2:	Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 nach Herkunft	7
Abbildung 3:	Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 nach Bundesländern	7
Abbildung 4:	Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 und Prognose für 2013	8
Abbildung 5:	Zusammensetzung des Abfallinputs (Feuchtsubstanz) deutscher Müllverbrennungsanlagen nach Abfallfraktionen	9
Abbildung 6:	Geschätztes Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009	19
Abbildung 7:	Geschätztes Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus MVA in Deutschland im Jahr 2009	20
Abbildung 8:	Konventionelle Schlackeaufbereitung am Beispiel der Firma MVR	27
Abbildung 9:	Weitergehende Schlackeaufbereitung am Beispiel der Firma Scherer + Kohl GmbH	29
Abbildung 10:	Trockenentschlackung der Firma Martin GmbH	35
Abbildung 11:	SYNCOM-Verfahren	44
Abbildung 12:	Verfahrenskonzept SYNCOM	45
Abbildung 13:	VPSA-Anlage zur Erzeugung von technischem Sauerstoff	46
Abbildung 14:	Verfahrenskonzept SYNCOM-Plus	47
Abbildung 15:	SYNCOM-Plus-Verfahren	48
Abbildung 16:	Vereinfachte Darstellung eines Plasma-Schmelzofens	52
Abbildung 17:	Massenbilanz der konventionellen Modell-Anlage	80
Abbildung 18:	Energiebilanz der konventionellen Anlage	80
Abbildung 19:	Massenbilanz der Modell-SYNCOM-Anlage	81
Abbildung 20:	Energiebilanz der Modell-SYNCOM-Anlage	81

Abbildung 21:	Massenbilanz der Modell – SYNCOM-Plus-Anlage	82
Abbildung 22:	Energiebilanz der Modell – SYNCOM-Plus-Anlage	82
Abbildung 23:	Massenbilanz der konventionellen Anlage mit Plasma-Schmelzofen	83
Abbildung 24:	Energiebilanz der konventionellen Anlage mit Plasma-Schmelzofen	83

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens ist es, Möglichkeiten der Verbesserung der Schlackequalitäten (weitergehende Maßnahmen zur Schlackeaufbereitung als auch feuerungstechnische Verbesserungen der Rostfeuerung) darzustellen, um eine möglichst nachhaltige Schlackeverwertung auch für die Zukunft zu ermöglichen.

Das Hauptaugenmerk dieses Gutachtens liegt auf der Berücksichtigung des Ressourcen- und Klimaschutzes bei der Schlackeaufbereitung. Ressourcenschutz bedeutet konkret die Einsparung von natürlichen Ressourcen und Rohstoffen, wie z.B. Wasser und Metallerzen. Klimaschutz bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem CO₂-Vermeidung durch eine hohe spezifische Netto-Energie-Abgabe der MVA sowie durch den Minderenergieeinsatz aufgrund der vermiedenen Neuproduktion der wiedergewinnbaren Metalle aus der Schlackeaufbereitung.

Als Hauptmaßnahme zur Verbesserung des Klima- und Ressourcenschutzes bei der Schlackeverwertung ist daher die größtmögliche Abtrennung von Metallen aus der Schlacke zu sehen, da durch das Recycling dieser Stoffe die Energie für die Gewinnung aus Erzen und auch der Rohstoff Erz selbst eingespart wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein möglicher Energieeinsatz für die Verbesserung der Schlackeaufbereitung den energetischen Vorteil durch eine bessere Rückgewinnung von Metallen wieder (teil-) kompensieren kann.

Weitere zu berücksichtigende Aspekte sind der Gewässer- und Bodenschutz und die Eignung der aufbereiteten Schlacke für eine adäquate Verwertung. Die letzten Punkte stellen jedoch nicht das Hauptthema dieses Gutachtens dar. In Deutschland sind derzeit 69 Siedlungsabfallverbrennungsanlagen (MVA) und 23 Ersatzbrennstoffkraftwerke mit Rostfeuerung mit einer Gesamtkapazität von mehr als 21 Mio. Mg pro Jahr in Betrieb. Weitere 13 EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung sind geplant oder befinden sich zum Teil in Bau und werden bereits 2010 den Betrieb aufnehmen.

Das Gesamtaufkommen an Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken wird sich im Jahr 2009 auf rund 5,2 Mio. Mg belaufen. Mit rund 4,8 Mio. Mg bzw. 92 % wird der Großteil der Schlacken bei der thermischen Restabfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen produziert.

Die folgende Tabelle Z.1 zeigt die Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacke als Ergebnis einer Umfrage von ITAD unter seinen Mitgliedern im Jahr 2006/2007. Die Werte beziehen sich sowohl auf Rohschlacke als auch auf gealterte Schlacke.

Tabelle Z.1: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacke (Rohschlacke und gealterte Schlacke) nach Angaben von ITAD für das Jahr 2006/2007

Parameter	Einheit	Schwankungsbreite
TOC	Masse-%	0,3 - 5
EOX	mg/kg	0,05 - 3
Arsen	mg/kg	3 - 15
Blei	mg/kg	1.000 - 3.500
Cadmium	mg/kg	2 - 20
Chrom ges.	mg/kg	200 - 1.000
Kupfer	mg/kg	1.000 - 10.000
Nickel	mg/kg	100 - 500
Quecksilber	mg/kg	< 10
Zink	mg/kg	2.000 - 7.000

Quelle: [ITAD2009]

Tabelle Z.2: Qualitativer Gesamtvergleich der betrachteten Verfahren (detaillierter erläutert in Kapitel 7)

Verfahren	Metall-rückge-winnung	Eluierbarkeit von Schwer-metallen aus der Rostasche	Energie-bedarf	Kessel-asche-menge	Wasser-verbrauch	Behand-lungs-kosten	Referenzsituation	Einge-führtes Ver-fahren
Rostfeuerung mit Nassentaschung	+	o	+	o	o	+	Stand der Technik	++
Rostfeuerung mit Trockenentaschung	+	o Grobfraktion: + Feinfraktion: -	+	-	+	+	1 großtechnische Versuchsanlage 1 Anlage in Realisierung	o-
SYNCOM	+	+	o	+	o	o	Versuche an 1 groß-technischen Anlage in Europa und an 2 Anlagen in Japan 1 Anlage in Europa 1 Anlage in Japan	+
SYNCOM-Plus	+	+ bis ++	o	++	o	o	Versuche an 1 groß-technischen Anlage 1 Anlage in Europa nachgerüstet	o
Rostfeuerung + Metallabtrennung + Plasma-Schmelz-Ofen	+	++	--	++	o	-	keine Anlage bekannt	--
Rostfeuerung + Plasma-Schmelz-Ofen	-	++	--	++	o	--	keine Anlagen in Europa Anlagen in Japan	o-

Legende: ++ sehr gut + gut o durchschnittlich o- unterdurchschnittlich - mangelhaft -- sehr mangelhaft

In Tabelle Z.2 werden die in diesem Gutachten betrachteten Verfahren zusammenfassend qualitativ miteinander verglichen. Die für den Ressourcen- und Klimaschutz besonders relevanten Kriterien sind lachsfarben markiert.

Die bisherige Verbrennungstechnik von **Müllverbrennungsanlagen** in Verbindung mit der bisherigen Schlackeaufbereitungstechnik (sei es intern oder extern) ist in Hinblick auf Ressourcen- und Klimaschutz aufgrund von guter Energieeffizienz in Verbindung mit hohen Rückgewinnungsquoten von Eisen und auch von Nicht-Eisenmetallen nach wie vor als Stand der Technik zu bezeichnen. Eine noch bessere Rückgewinnung von Nicht-Eisenmetallen ist prinzipiell durch weitergehende Klassierung und Abtrennung durch Wirbelstrom- bzw. Induktionsabscheider zu erreichen.

Unter der Annahme, dass sämtliche anderen NE-Metalle gegenüber Kupfer und Aluminium in der Menge vernachlässigbar sind, ergäbe sich allein für die bestehenden MVA in Deutschland bei verbesserter Aufbereitung gegenüber der derzeitigen Rückgewinnungsquote von NE-Metallen eine zusätzlich rückgewinnbare Menge an NE-Metallen in Höhe von 17.000 Mg/a. Diese Menge entspräche einem kumulierten Energieaufwand, der den nötigen Energieaufwand für den Herstellungsprozess durch Nutzung von Primärenergieträgern beschreibt, als energetischer Beitrag durch Ressourcenschonung in einer Größe von ca. 50.000 MWh/a.

Eine Zerkleinerung der Grobfraction vor der weiteren Klassierung könnte eine noch bessere Abscheidung von Nicht-Eisenmetallen ermöglichen. Jedoch muss bei einem solchen Vorgehen beachtet werden, dass dadurch nicht vernachlässigbare Mengen an mineralischem Feinkorn entstehen, die die bauphysikalischen Eigenschaften der aufbereiteten Schlacke negativ beeinflussen und/oder zusätzliche Stoffströme erzeugen, die nicht verwertet werden können. Energetisch und im Sinne des Ressourcenschutzes ist eine solche noch weitergehende Rückgewinnung von insbesondere Nicht-Eisenmetallen in jedem Fall sinnvoll und muss gegen die oben genannten Nachteile abgewogen werden.

Die Bandbreiten der Eluatwerte für Schlacken, die aus dieser Technik hervorgehen, sind insbesondere den unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen geschuldet, liegen aber in einem Bereich, dass eine stoffliche Verwertung, gemäß der bisher geltenden Anforderungen an die Verwertungswege in der Regel möglich ist. Dies ist daran erkennbar, dass Hausmüllverbrennungsschlacken derzeit großflächig eine bautechnische Verwertung im Erd- und Straßenbau sowie im Deponiebau erfahren. Nachgewiesene Umweltschäden durch die Verwendung von Hausmüllverbrennungsschlacken als Baumaterial sind den Gutachtern nicht bekannt.

Die Trockenentschlackung hat im Vergleich zu der Nassentschlackung die Nachteile, dass höhere Flugaschemengen entstehen, die entsorgt werden müssen. Des Weiteren wird die abgesiebte, schadstoffbelastete Schlacke-Feinfraktion in der Regel ebenfalls sicher zu entsorgen sein, so dass hier möglicherweise größere Mengen zur Entsorgung anfallen als bei der Nassentschlackung. Die Möglichkeit zur Schadstoffentfrachtung der Feinfraktion durch eine saure Wäsche besteht zwar prinzipiell, nur werden dadurch weitere Abfall- bzw. Abwasserströme erzeugt und der Frischwasserbedarf erhöht. Bei bestehenden sauren Flugaschewäschen, wie sie in der Schweiz weit verbreitet sind; in Deutschland allerdings nicht existieren, ist eine Trockenentschlackung dennoch interessant. Allerdings besteht auch hier noch umfangreicher Untersuchungsbedarf hinsichtlich zusätzlicher Betriebsstoffe und Outputqualität.

Die betrachteten **alternativen Verfahren zur Sinterung oder Einschmelzung von Verbrennungsrückständen** schneiden in Hinblick auf Ressourcen- und Klimaschutz gegenüber den etablierten Verfahren teils moderat, teils deutlich schlechter ab. Die Abtrennung von Eisen- und Nicht-Eisenmetallen ist im Rahmen einer nachgeschalteten Aufbereitung sowohl bei SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren möglich. Das Plasma-Schmelz-Verfahren erlaubt zwar eine Abtrennung von sowohl Eisen als auch Nicht-Eisenmetallen aus der nass ausgetragenen Schlacke, bevor diese in den Plasma-Schmelz-Ofen geführt wird. Jedoch hat dieses Verfahren die schlechteste Energiebilanz aller in diesem Gutachten betrachteten Verfahren. Aber auch SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren haben im Vergleich zu der konventionellen MVA mit Nassentschlackung und trockener Schlackeaufbereitung einen, wenn auch moderat, erhöhten Energieeigenbedarf.

Betrachtet man die Verfahren „konventionelle Rostfeuerung mit Metallrückgewinnung“, „SYNCOM mit Metallrückgewinnung“, „SYNCOM-Plus mit Metallrückgewinnung“ und „konventionelle Rostfeuerung mit Metallrückgewinnung und Plasma-Schmelzofen“ in Hinblick auf Klimaschutz, so ergibt der Vergleich, dass vor allem aufgrund des hohen Eigenenergiebedarfs das Plasma-Schmelz-Verfahren am ungünstigsten abschneidet (Tabelle Z.3).

Der jeweilige Energievorteil (aus Strom-Nettoabgabe und Beitrag durch Metallrückgewinnung) der drei anderen Verfahren gegenüber konventionellen Rostfeuerung mit Metallrückgewinnung beträgt gemäß Tabelle Z.3:

Tabelle Z.3: Vergleich der Verfahren in Hinblick auf Klimaschutz

	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht- Eisenmetall- abtrennung	SYNCOM- Verfahren + Eisen- und Nicht- Eisenmetall- abtrennung	SYNCOM-Plus- Verfahren + Eisen- und Nicht- Eisenmetall- abtrennung	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht- Eisenmetall- abtrennung + Plasma-Schmelz- Verfahren
Energievorteil	ca. 420 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 350 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 340 kWh/Mg _{Abfall}	0 kWh/Mg _{Abfall}

Die vorherige Tabelle Z.2 zeigt jedoch auch deutliche Vorteile dieser alternativen Verfahren. Diese liegen aufgrund der Zielsetzung der Entwicklung dieser Verfahren bei der Umweltverträglichkeit der erzeugten Reststoffe durch geringere Eluierbarkeit von Schadstoffen.

Das **Plasma-Schmelz-Verfahren** zeigt bei allen Eluatwerten die besten Ergebnisse, SYNCOM und SYNCOM-Plus bewegen sich im oberen Mittelfeld, während die konventionelle MVA zwar schlechter abschneidet, die deutschen Anforderungen an die Eluierbarkeit von Schlacken zur Verwertung im Allgemeinen aber erreicht.

Die relevanten Aspekte der Ressourcenschonung (Metallrückgewinnung und Wasserverbrauch) sind bei allen Verfahren (außer Plasma-Schmelz-Verfahren ohne Metallabtrennung) sehr ähnlich zu bewerten.

Eine entsprechende Schlackeaufbereitung kann bei allen Verfahren eine gute Rückgewinnung von Metallen (Eisen- und Nicht-Eisenmetalle) nach sich ziehen.

Die bedeutsamen Unterschiede liegen zum einen bei den klimaschutzrelevanten Aspekten (Energieeinsatz und -ausbeute), zum anderen bei der Schlackequalität (Eluierbarkeit).

Es lässt sich dabei feststellen, dass ein hoher Klimaschutz (durch hohen Netto-Strom-Output) geringere Schlackequalität (höhere Eluatwerte) verursacht – und umgekehrt.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

In Deutschland fielen im Jahr 2007 nach Angaben des Umweltbundesamtes etwa 4,4 Mio. Mg (Roh-) Schlacke aus Abfallverbrennungsanlagen (MVA) an, von denen mehr als 85% einer stofflichen Verwertung zugeführt worden sind. Die wichtigsten Verwertungswege sind der Straßenbau, der Deponiebau sowie der untertägige Versatz.

Durch die im Rahmen der Rohschlackeaufbereitung vorgelagerte Rückgewinnung von FE- und teilweise auch von NE-Metallen leistet auch dieser Teil der Verwertungskette der Verbrennungsrückstände durch die Substitution natürlicher Rohstoffe der Metallgewinnungsprozesse einen beachtlichen Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung.

Zudem trägt die Verwertung der MVA-Schlacke zur Erreichung des abfallpolitischen Ziels 2020 – vollständige Verwertung von Siedlungsabfällen – bei.

Im Zuge aktueller Verordnungsvorhaben zur bundeseinheitlichen Regelung der Verwertung mineralischer Abfälle („Ersatzbaustoffverordnung“) ist eine Fortschreibung und Verschärfung der Anforderungen an die Qualität auch von MVA-Schlacken geplant. Die Einhaltung dieser, zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber noch nicht konkretisierten, geplanten neuen Vorgaben, die daher auch nicht Gegenstand dieses Sachverständigengutachtens sind sowie neuer Erkenntnisse über die vorhandene Ökotoxizität einiger MVA-Schlacken machen künftig weitergehende Maßnahmen zur Schlackenbildung auf dem Rost und zu deren Aufbereitung und der Sicherung der bisherigen Verwertungswege notwendig.

Ziel des Vorhabens ist es, Möglichkeiten der Verbesserung der Schlackequitäten (weitergehende Maßnahmen zur Schlackeaufbereitung als auch feuerungstechnische Verbesserungen der Rostfeuerung) darzustellen, um eine möglichst nachhaltige Schlackeverwertung auch für die Zukunft zu ermöglichen.

Zudem sollen noch vorhandene Klimaschutzpotenziale bei der Metallrückgewinnung von FE- und NE-Metallen erschlossen werden, indem die Möglichkeiten zur effizienten Rückgewinnung durch eine bessere Aufbereitung der (Roh-) Schlacke, insbesondere von bisher nur teilweise rückgewonnenen NE-Metallen aufgezeigt werden.

Hierzu soll im Rahmen des Gutachtens die Erstellung eines aktuellen Sachstandes zur Schlackeverwertung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anwendungsbereiche und den technischen Möglichkeiten zu einer weitgehenden Aufbereitung, mit dem Ziel die Abtrennung von FE- und NE-Metallen aus der Rohschlacke zu

verbessern, erfolgen. Außerdem wird eine Darstellung der Möglichkeiten zur Erschließung vorhandener Klimaschutzpotenziale durch effizientere Metallrückgewinnung, für die Bestätigung bzw. Anpassung der Anforderungen der geplanten Ersatzbaustoffverordnung und zur Fortschreibung des Standes der Technik der Schlackeaufbereitung aus Abfallverbrennungsanlagen (MVA) mit Rostfeuerungen erwartet.

Im Einzelnen werden die folgenden Bearbeitungsschritte 1 bis 8 der Leistungsbeschreibung des Umweltbundesamtes im Rahmen des Sachverständigengutachtens bearbeitet und im Rahmen des Berichtes dargestellt:

1. Qualifizierte Schätzung der anfallenden Schlacke-Mengen aus Siedlungsabfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerken.
2. Charakterisierung der Schlacken hinsichtlich Zusammensetzung und Verwertbarkeit, z.B. als Ersatzbaustoffe.
3. Qualifizierte Darstellung der derzeit beschrittenen Verwertungswege für MVA-Schlacken und der dafür erforderlichen Qualitätsanforderungen.
4. Beschreibung des Standes der Technik zur Schlackeaufbereitung und möglicher Änderungen der Schlackequalitäten durch technische Eingriffe in die Abfallverbrennungsanlage (z. B. trockener oder nasser Schlackeabzug).
5. Beschreibung der Auswirkungen auf die Verbrennungstechnik und der Veränderung der Stoffströme innerhalb der Verbrennungsanlage bei vorrangigen Maßnahmen (z.B. Versintern) zur Verbesserung der Schlackequalitäten.
6. Qualifizierte Darstellung möglicher Auswirkungen einer Schlackenachbehandlung unter Einbindung des Feuerungssystems auf Abgasmengen, Emissionsverhalten und Energiebilanz der Anlage.
7. Qualifizierte Schätzung der Auswirkungen der Nachrüstung einer weitergehenden Schlackeaufbereitung auf die spezifischen Behandlungskosten sowie den Bedarf an Betriebsmitteln und Energie auf den Gesamtanlagenbetrieb.
8. Qualitative Beschreibung möglicher technischer Risiken am Rost und durch Nebenanlagen für eine mögliche Schlackeerückführung (z. B. Nachsinterung) für den Gesamtanlagenbetrieb.

Dabei wird der Stand der Technik der Schlackeaufbereitung bei konventionellen Müllverbrennungsanlagen (MVA) und EBS-

Kraftwerken beleuchtet und dabei weitere z.T. noch in der Entwicklung bzw. in der Erprobung befindliche Verfahren betrachtet.

Das Hauptaugenmerk dieses Gutachtens liegt auf der Berücksichtigung des Ressourcen- und Klimaschutzes bei der Schlackeaufbereitung. Ressourcenschutz bedeutet konkret die Einsparung von natürlichen Ressourcen und Rohstoffen, wie z.B. Wasser und Metallerzen. Klimaschutz bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem CO₂-Vermeidung durch eine hohe spezifische Netto-Energie-Abgabe der MVA sowie durch den Minderenergieeinsatz aufgrund der vermiedenen Neuproduktion der wiedergewinnbaren Metalle aus der Schlackeaufbereitung.

Als Hauptmaßnahme zur Verbesserung des Klima- und Ressourcenschutzes bei der Schlackeverwertung ist daher die größtmögliche Abtrennung von Metallen aus der Schlacke zu sehen, da durch das Recycling dieser Stoffe die Energie für die Gewinnung aus Erzen und auch der Rohstoff Erz selbst eingespart wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein möglicher Energieeinsatz für die Verbesserung der Schlackeaufbereitung den energetischen Vorteil durch eine bessere Rückgewinnung von Metallen wieder (teil-) kompensieren kann.

Als Bewertungsmaßstab für die Klimarelevanz der Rückgewinnung von Metallen kann der kumulierte energetische Aufwand (KEA) nach VDI-Richtlinie 4600 herangezogen werden. Der KEA beschreibt den nötigen Energieaufwand für den Herstellungsprozess durch Nutzung von Primärenergieträgern. Für die Herstellung von Roheisen, Rohaluminium sowie Rohkupfer, welche die mengenmäßig wichtigsten in der Schlacke enthaltenen Metalle darstellen, hat Fehrenbach jeweils den KEA berechnet (siehe Tabelle 1). Für die Beurteilung der Klimarelevanz ist es sinnvoll, den fossilen KEA heranzuziehen, da dieser den Bezug zu den freigesetzten CO₂-Äquivalenten zulässt. [UBA2007]

Tabelle 1: Kumulierter energetischer Aufwand (KEA) zur Metallherstellung

Metall	KEA fossil
Roheisen	6,16 MWh/Mg _{Roheisen}
Rohaluminium	31,1 MWh/Mg _{Rohaluminium}
Rohkupfer	21,5 MWh/Mg _{Rohkupfer}

Quelle: [UBA2007]

Ein guter Ausbrand der Schlacke, hier ist z.B. der Glühverlust oder TOC ein Indikator für die Qualität des Ausbrands trägt durch Erhöhung der Energieeffizienz der MVA zum Klimaschutz bei.

Weitere zu berücksichtigende Aspekte sind der Gewässer- und Bodenschutz und die Eignung der aufbereiteten Schlacke für eine adäquate Verwertung. Die letzten Punkte stellen jedoch nicht das Hauptthema dieses Gutachtens dar. Sie werden ergänzend im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung berücksichtigt.

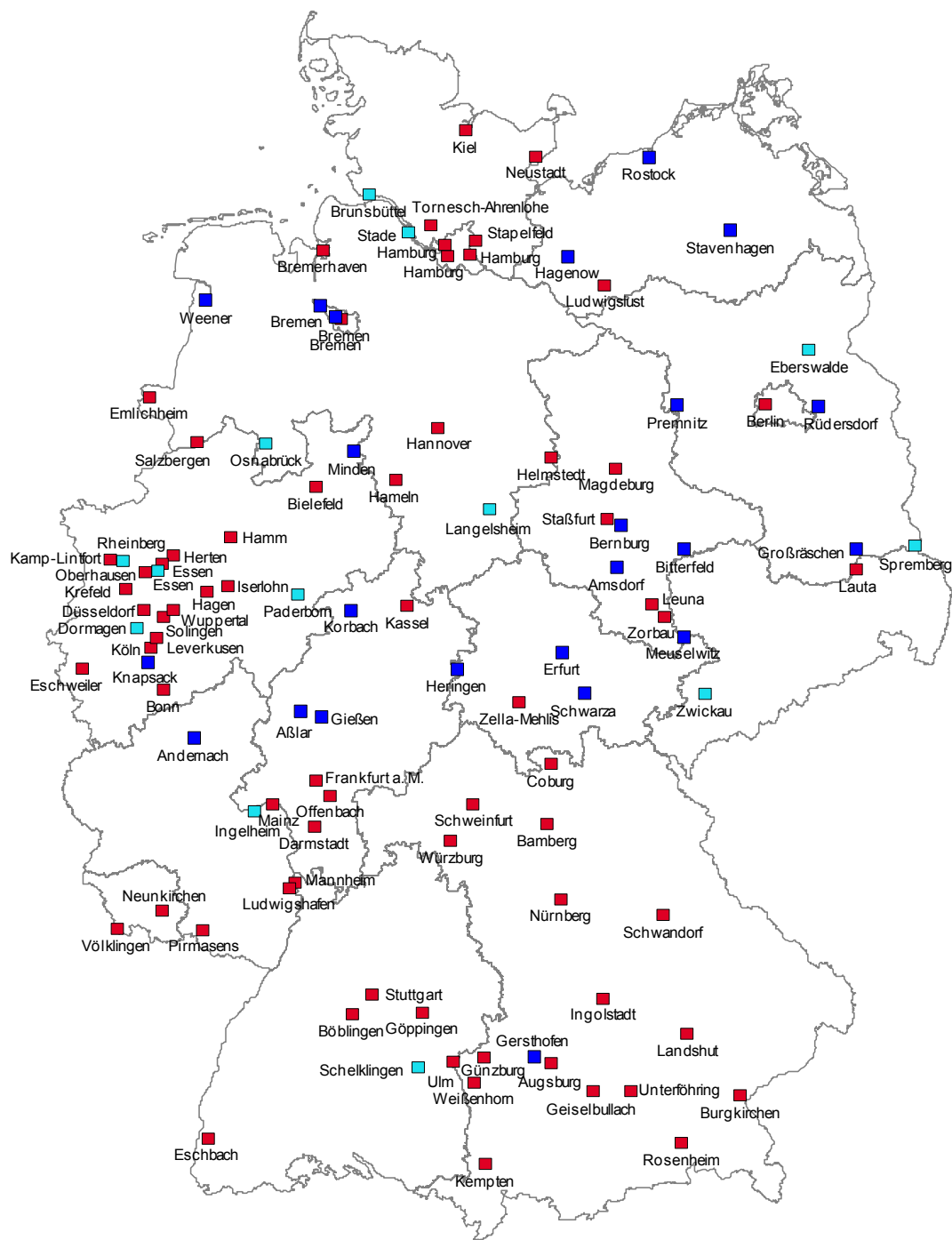
2 Schlacken aus Siedlungsabfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerken mit Rostfeuerung

In Deutschland sind derzeit 69 Siedlungsabfallverbrennungsanlagen (MVA) und 23 Ersatzbrennstoffkraftwerke mit Rostfeuerung mit einer Gesamtkapazität von mehr als 21 Mio. Mg pro Jahr in Betrieb. Weitere 13 EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung sind geplant oder befinden sich zum Teil in Bau und werden bereits 2010 den Betrieb aufnehmen. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Standorte der Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung (Betrieb und Planung) in Deutschland.

Das Gesamtaufkommen an Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken wird sich im Jahr 2009 auf rund 5,2 Mio. Mg belaufen. Mit rund 4,8 Mio. Mg bzw. 92 % wird der Großteil der Schlacken bei der thermischen Restabfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen produziert (siehe Abbildung 2).

Die größten Mengen an Schlacken werden in Deutschland im Jahr 2009, bedingt durch die Größe der Verbrennungskapazitäten, in Nordrhein-Westfalen (31 % bzw. 1,6 Mio. Mg), Bayern (14 % bzw. 0,73 Mio. Mg) und Sachsen-Anhalt (9 % bzw. 0,45 Mio. Mg) anfallen. Baden-Württemberg, Niedersachsen und Hessen stellen ebenfalls bedeutende Produzenten von Schlacken dar. Abbildung 3 zeigt die regionale Verteilung des für das Jahr 2009 geschätzten Gesamtkommens an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken in Höhe von 5,2 Mio. Mg.

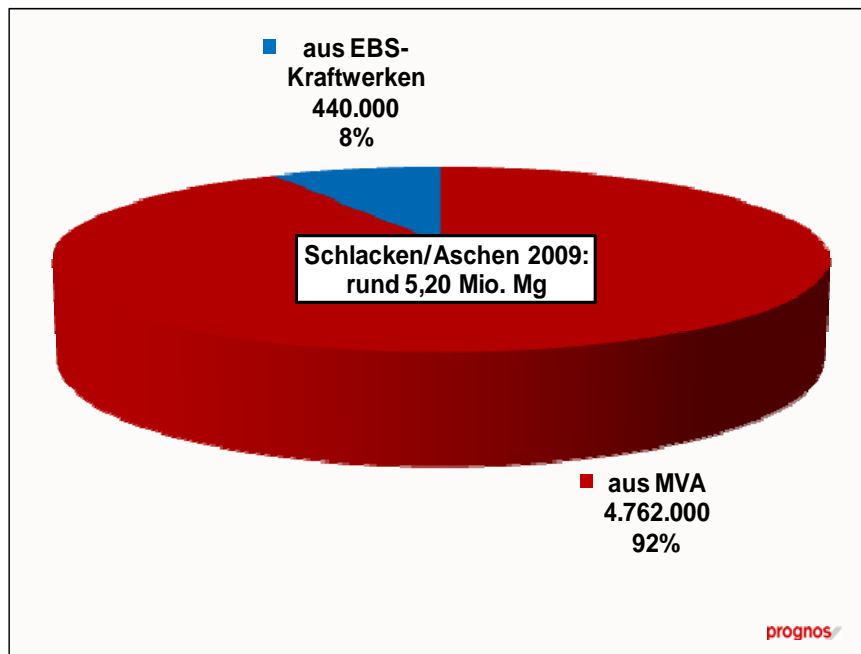
Abbildung 1: Standorte von Müllverbrennungsanlagen (MVA) und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland (Stand: 31. Dezember 2009)



Standorte von MVA und EBS-Kraftwerken
(ausschließlich Rostfeuerungsanlagen)

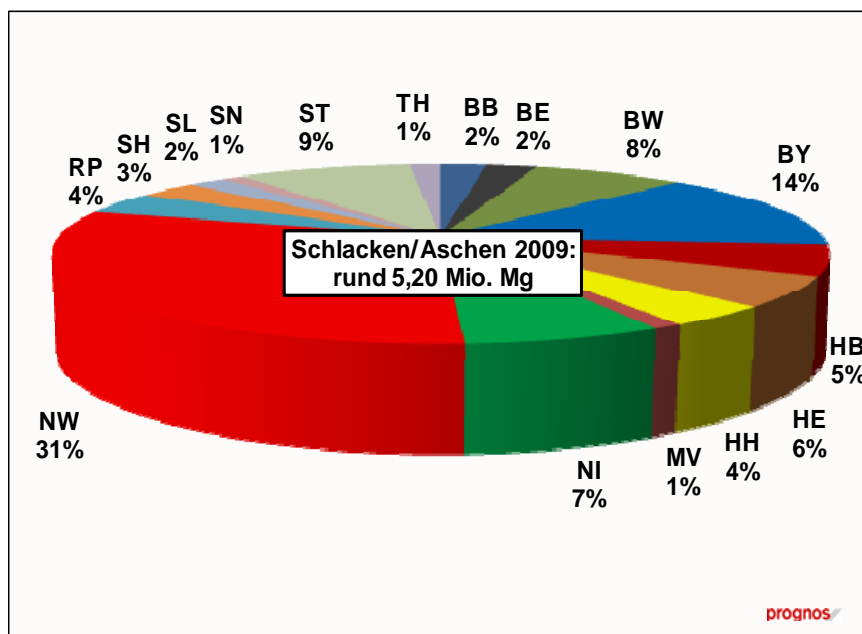
- EBS-Kraftwerk in Betrieb
- EBS-Kraftwerk in Planung/Bau
- MVA

Abbildung 2: Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 nach Herkunft



Quelle: [ITAD2009] und Eigeneinschätzungen Prognos AG 2009

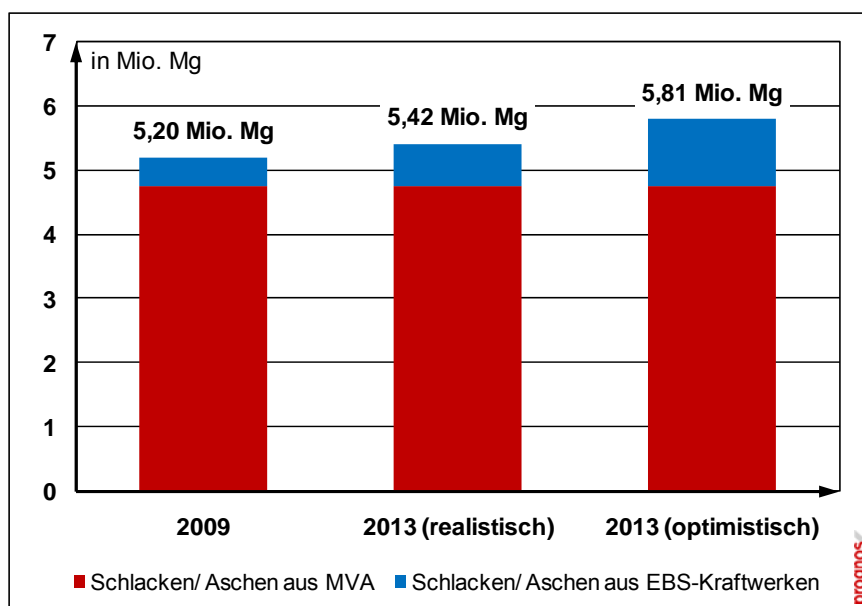
Abbildung 3: Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 nach Bundesländern



Quelle: [ITAD2009] und Eigeneinschätzungen Prognos AG 2009

Die folgende Abbildung 4 stellt das für 2009 geschätzte Aufkommen und szenarisch das für das Jahr 2013 erwartete Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken dar.

Abbildung 4: Geschätztes Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 und Prognose für 2013



Quelle: [ITAD2009] und Eigeneinschätzungen Prognos AG 2009

Grundlage des für 2013 erwarteten Aufkommens an Schlacken ist für beide Szenarien, dass es zu keinem nennenswerten Aufbau und Abbau von Müllverbrennungskapazitäten in Deutschland bis zum Jahr 2013 kommt, d.h. die Mengen an Schlacken aus MVA konstant bleiben. Weiterhin wird in beiden Szenarien davon ausgegangen, dass sich der aktuell Bestand an EBS-Kraftwerken bis 2013 nicht verringern wird.

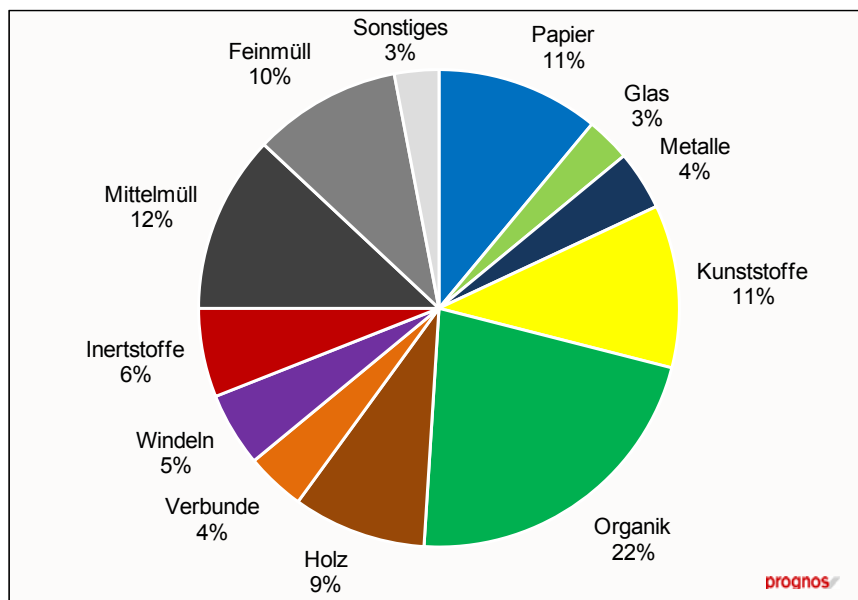
Beim realistischen bzw. niedrigen Szenario werden ausschließlich die konkreten EBS-Kraftwerksprojekte, die 2010 realisiert werden sollen, einbezogen (insgesamt drei Anlagen). In diesem Szenario beträgt das Gesamtaufkommen an Schlacken aus EBS-Kraftwerken im Jahr 2013 rund 0,65 Mio. Mg. Das Gesamtaufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken beläuft sich damit auf rund 5,4 Mio. Mg.

Das optimistische bzw. hohe Szenario basiert auf der Annahme, dass 13 der noch realisierungsfähig eingestuften, geplanten EBS-Kraftwerksprojekte bis 2013 realisiert werden. In diesem Szenario beträgt das Gesamtaufkommen an Schlacken aus EBS-Kraftwerken im Jahr 2013 rund 1,0 Mio. Mg. Das Gesamtaufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken beläuft sich damit auf rund 5,8 Mio. Mg.

3 Charakterisierung der Schlacken hinsichtlich Zusammensetzung und Verwertbarkeit

Die heterogene Zusammensetzung der Schlacke wird bei der Abfallverbrennung in erster Linie durch den im Prozess eingesetzten Abfall bestimmt. Dieser Abfall unterliegt sowohl saisonalen Veränderungen als auch lokalen abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten und ist je nach Region in Deutschland recht unterschiedlich.

Abbildung 5: Zusammensetzung des Abfallinputs (Feuchsubstanz) deutscher Müllverbrennungsanlagen nach Abfallfraktionen



Quelle: [DEH2002]

Der Abfallinput deutscher Müllverbrennungsanlagen setzt sich überwiegend aus variierenden Anteilen von Hausmüll, hausmüll-ähnlichen Gewerbeabfällen zur Beseitigung, Sperrmüll, Gewerbeabfälle zur Verwertung und aus Sortierresten zusammen. Darüber hinaus werden auch Restabfälle aus der Kompostierung und Klärwerksrückstände sowie auch vereinzelt Schredderabfälle und gefährliche Abfälle eingesetzt. Die Zusammensetzung der wesentlichen eingesetzten Abfallarten lässt sich wiederum in Abfallfraktionen aufteilen. In Abbildung 5 ist die mittlere Zusammensetzung des Abfallinputs deutscher Müllverbrennungsanlagen nach Fraktionen dargestellt. Sie wurde 2002 vom Öko-Institut e.V. mittels Auswertung verschiedener Literaturquellen abgeschätzt [DEH2002]. Dabei wurde angenommen, dass der Gesamtinput aus 56 % Hausmüll, 37 % Gewerbeabfall und 7 % Sperrmüll besteht [MEI2008].

3.1 Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Schlacken aus MVA

Eine Bewertung der grundsätzlichen Verwertungseignung aus abfallwirtschaftlicher Sicht wird durch Ermittlung der Feststoffgehalte erreicht. Die folgenden Abbildungen zeigen die ermittelten Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacken aus verschiedenen Datenquellen.

Tabelle 2: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Schlacken – Zusammenfassung von Messergebnissen nach 1990

Parameter	Einheit	Schwankungsbreite
TOC	Masse-%	keine Angabe
EOX	mg/kg	keine Angabe
Arsen	mg/kg	3 - 22
Blei	mg/kg	600 - 5.200
Cadmium	mg/kg	0,1 - 82
Chrom ges.	mg/kg	100 - 9.600
Kupfer	mg/kg	200 - 7.000
Nickel	mg/kg	40 - 760
Quecksilber	mg/kg	0,1 - 20
Zink	mg/kg	500 - 21.000

Quelle: [REI1996]

Die folgende Tabelle zeigt die Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacke als Ergebnis einer Umfrage von ITAD unter seinen Mitgliedern im Jahr 2006/2007. Die Werte beziehen sich sowohl auf Rohschlacke als auch auf gealterte Schlacke.

Tabelle 3: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von MVA-Schlacke (Rohschlacke und gealterte Schlacke) nach Angaben von ITAD für das Jahr 2006/2007

Parameter	Einheit	Schwankungsbreite
TOC	Masse-%	0,3 - 5
EOX	mg/kg	0,05 - 3
Arsen	mg/kg	3 - 15
Blei	mg/kg	1.000 - 3.500
Cadmium	mg/kg	2 - 20
Chrom ges.	mg/kg	200 - 1.000
Kupfer	mg/kg	1.000 - 10.000
Nickel	mg/kg	100 - 500
Quecksilber	mg/kg	< 10
Zink	mg/kg	2.000 - 7.000

Quelle: [ITAD2009]

Die Studie „Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung“ vom Forschungszentrum Karlsruhe aus dem Jahr 2008 stellt die Ergebnisse für die Schwankungsbreiten der Feststoffparameter aus drei verschiedenen Datenquellen zusammen [MEI2008]:

- Umfrage des Forschungszentrum Karlsruhe unter 21 Müllverbrennungsanlagen,¹
- Literaturangaben,²
- Forschungsprojekt „Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken“ des Forschungszentrums Karlsruhe von Frau Dr. Pfrang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt aus dem Jahr 2005 [PFR2005].³

Im Unterschied zu den vorangegangenen Quellen unterscheidet die Studie bei der Angabe der Feststoffparameter zwischen Rohschlacken und gealterten Schlacken. Ein direkter Vergleich zwischen den Werten für Rohschlacken und gealterten Schlacken ist nur bei den Daten aus dem Forschungsprojekt von Frau Dr. Pfrang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt möglich, da beide Datensätze aus einer Anlage stammen. Die Daten aus der Umfrage und der Literaturrecherche beziehen sich dagegen auf Schlacken aus völlig unterschiedlichen Anlagen.

¹ Bei der Umfrage wurden insgesamt 61 Anlagenbetreiber von MVAs mittels Fragebogen nach Brennstoffdaten, Anlagenspezifikationen, Schlackeaufkommen und -qualität etc. befragt.

² In einer Literaturrecherche wurden im Rahmen der Studie etwa 150 Publikationen der letzten 20 Jahre ausgewertet.

³ In der Studie wurden die Schlacken von zehn deutschen Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik untersucht und auf die Beschaffenheit bei unterschiedlichen Müllzusammensetzungen hin analysiert.

Die in den folgenden Tabellen dargestellten Schwankungsbreiten und Mittelwerte wurden aus den in der Studie dargestellten Graphiken abgelesen und stellen damit für die Tabellen übernommene Annäherungswerte dar.

Tabelle 4: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Rohschlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)

Parameter	Einheit	Umfrage	MW	Literatur	MW	Pfrang-Stotz	MW
TOC	Masse-%	0,35 - 2,85	1,45	0,1 - 1,05	0,65	0,2 - 2,4	0,8
EOX	mg/kg	0,5 - 1,6	0,9	0,6 - 1	-	1 - 3	1,3
Arsen	mg/kg	2 - 86	16	4 - 16	10	10 - 90	32
Blei	mg/kg	200 - 4.700	1.500	300 - 4.200	2.000	700 - 2.500	1.300
Cadmium	mg/kg	1,5 - 35	9	5 - 200	55	5 - 20	9
Chrom ges.	mg/kg	50 - 1.200	325	150 - 2.200	675	350 - 1.325	600
Kupfer	mg/kg	600 - 7.500	3.200	1.200 - 6.700	4.200	1.200 - 5.200	2.050
Nickel	mg/kg	15 - 1.200	375	150 - 600	300	150 - 450	175
Quecksilber	mg/kg	keine Angabe		keine Angabe		keine Angabe	
Zink	mg/kg	1.000 - 6.400	3.400	1.000 - 11.200	5.900	1.800 - 8.200	2.900

MW - Mittelwert

Quelle: [MEI2008]

Tabelle 5: Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von gealterter Schlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)

Parameter	Einheit	Umfrage	MW	Literatur	MW	Pfrang-Stotz	MW
TOC	Masse-%	0,5 - 2,3	1,1	0,65 - 1,2	0,95	0,25 - 2,05	0,72
EOX	mg/kg	0,6 - 1	-	0,7	-	1 - 9	2
Arsen	mg/kg	5 - 10	-	7 - 35	13	7 - 28	16
Blei	mg/kg	600 - 1.700	-	1.100 - 2.000	1.600	800 - 2.400	1.600
Cadmium	mg/kg	3,5 - 7,5	-	4 - 20	9	7 - 15	7,5
Chrom ges.	mg/kg	125 - 275	-	150 - 1.200	400	400 - 1.450	675
Kupfer	mg/kg	2.500 - 4.100	-	1.500 - 8.200	4.400	1.200 - 5.000	2.100
Nickel	mg/kg	75 - 300	-	90 - 350	200	100 - 525	200
Quecksilber	mg/kg	keine Angabe		keine Angabe		keine Angabe	
Zink	mg/kg	2.800 - 4.200	-	2.800 - 5.000	3.800	2.200 - 7.600	3.100

MW - Mittelwert

Quelle: [MEI2008]

Die vom Forschungszentrum Karlsruhe ausgewerteten Datenquellen (Tabelle 4 und Tabelle 5) zeigen die größten Schwankungen bei den Umfragewerten und die geringsten Schwankungen bei den Daten von Pfrang-Stotz. Der Vergleich der Schwankungsbreiten zwischen Rohschlacke und gealterter Schlacke zeigt wie zu erwarten war, dass die Bandbreiten bei den Rohschlacken insgesamt größer sind [MEI2008].

Die von [REI1996] ermittelten Schwankungsbreiten übersteigen die in den anderen Datenquellen ermittelten Bandbreiten insbesondere bei den Parametern Blei, Chrom und Zink zum Teil deutlich. Die von ITAD im Jahr 2006/2007 ermittelten Schwankungsbreiten liegen dagegen insgesamt unter den Bandbreiten der anderen Datenquellen. Lediglich die Bandbreite des Kupfergehaltes liegt bei den übermittelten Werten der ITAD relativ deutlich darüber [ITAD2009].

3.2 Schwankungsbreiten der Eluatparameter von Schlacken aus MVA

Analog zur Darstellung der Schwankungsbreiten der Feststoffparameter von Schlacken aus MVA werden im Folgenden die Bandbreiten der Eluatparameter aus verschiedenen Datenquellen dargestellt. Die ermittelten Schwankungsbreiten beziehen sich auf folgende Quellen:

- die o.g. Studie vom Forschungszentrum Karlsruhe aus dem Jahr 2008 [MEI2008],
- die Mitglieder-Umfrage von ITAD aus dem Jahr 2006/2007 [ITAD2009],
- Untersuchungen an HMV-Schlacken durch das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Klaus Mesters im Auftrag der Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM) aus dem Jahr 2008 [MES2008].

Die Schwankungsbreiten der Eluatparameter beziehen sich bei allen drei Datenquellen auf gealterte Schlacke, bei der Studie vom Forschungszentrum Karlsruhe [MEI2008] zusätzlich auch auf Rohschlacke.

Tabelle 6: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von gealterter HMV-Schlacke nach Angaben von ITAD für das Jahr 2006/2007

Parameter	Einheit	Schwankungsbreite
pH-Wert	-	11 - 13
Leitfähigkeit	µS/cm	1.000 - 4.000
Chlorid	mg/l	100 - 400
Sulfat	mg/l	200 - 600
Antimon	µg/l	< 200
Chrom ges.	µg/l	10 - 100
Kupfer	µg/l	100 - 500
Zink	µg/l	100 - 300

Quelle: [ITAD2009]

Tabelle 6 zeigt die Schwankungsbreiten der Eluatparameter von HMV-Schlacke als Ergebnis einer Umfrage von ITAD unter seinen Mitgliedern im Jahr 2006/2007.

Die Studie vom Forschungszentrum Karlsruhe aus dem Jahr 2008 [MEI2008] stellt wie in Kapitel 3.1 beschrieben die Ergebnisse für die Schwankungsbreiten der Eluatparameter aus drei verschiedenen Datenquellen zusammen. Die in den folgenden Tabellen dargestellten Schwankungsbreiten und Mittelwerte wurden analog zu den Feststoffparametern aus den in der Studie dargestellten Graphiken abgelesen und stellen damit Annäherungswerte dar.

Tabelle 7: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von Rohschlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)

Parameter	Einheit	Umfrage	MW	Literatur	MW	Pfrang-Stotz	MW
pH-Wert	-	10 - 12,6	11,9	10,9 - 12,5	11,6	10,9 - 12,6	11,8
Leitfähigkeit	µS/cm	1.000 - 13.000	6.000	1.000 - 25.000	5.000	1.200 - 9.000	2.400
Chlorid	mg/l	50 - 3.200	650	70 - 290	150	70 - 270	150
Sulfat	mg/l	200 - 740	460	800 - 990	330	0 - 480	220
Cyanid ges.	µg/l	10 - 50	20	5 - 180	60	5	-
DOC	mg/l	11 - 64	26	6 - 28	14	6 - 107	34
Arsen	µg/l	0,9 - 10	4,5	0,4 - 5	4	10	-
Blei	µg/l	5 - 6.000	2.000	8 - 7.000	1.500	10 - 4.000	450
Cadmium	µg/l	0,1 - 100	13	0,2 - 8	2	3 - 10	-
Chrom ges.	µg/l	5 - 60	25	5 - 60	23	15 - 50	30
Kupfer	µg/l	45 - 1.700	500	55 - 430	150	13 - 1.300	450
Nickel	µg/l	5 - 50	15	5 - 90	30	10	-
Quecksilber	µg/l	0,1 - 5	0,85	0,2 - 1	0,6	0,1 - 14,4	1,3
Zink	µg/l	0,6 - 1.000	500	8 - 700	250	10 - 200	60

MW - Mittelwert / DOC - gelöste organische Kohlenstoffe

Quelle: [MEI2008]

Tabelle 8: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von gealterter Schlacke aus MVA nach Angaben aus einer Umfrage unter 21 MVA-Betreibern, Literaturwerten und Pfrang-Stotz (Werte abgelesen)

Parameter	Einheit	Umfrage	MW	Literatur	MW	Pfrang-Stotz	MW
pH-Wert	-	9,6 - 11,5	10,3	8,9 - 12	11,6	9,3 - 11,8	11
Leitfähigkeit	µS/cm	1.300 - 3.300	2.200	1.000 - 3.000	2.000	1.000 - 1.800	1.500
Chlorid	mg/l	20 - 590	260	80 - 680	200	30 - 240	120
Sulfat	mg/l	220 - 800	370	10 - 530	260	80 - 540	250
Cyanid ges.	µg/l	10 - 15	12	5 - 20	9	5	-
DOC	mg/l	8 - 21	16	8 - 57	28	6 - 34	16
Arsen	µg/l	1 - 40	13	0,19 - 6	4,5	10	-
Blei	µg/l	5 - 200	70	2 - 1.500	150	10 - 35	12
Cadmium	µg/l	0,5 - 4	1,3	0,2 - 6	1	10	-
Chrom ges.	µg/l	7 - 250	70	5 - 150	45	10 - 130	43
Kupfer	µg/l	30 - 600	200	30 - 300	150	25 - 700	250
Nickel	µg/l	5 - 2.500	500	2,3 - 70	18	10	-
Quecksilber	µg/l	0,1 - 1	0,35	0,05 - 1	0,5	0,1 - 0,3	0,15
Zink	µg/l	8 - 250	90	5 - 300	65	10 - 50	20

MW - Mittelwert / DOC - gelöste organische Kohlenstoffe

Quelle: [MEI2008]

Um eine Abschätzung der Auswirkungen des 1. Arbeitsentwurfes der Ersatzbaustoffverordnung auf den zukünftigen Einsatz von Hausmüllverbrennungsschlacke vornehmen zu können, hat die Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM) das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Klaus Mesters mit einer Untersuchung an HMV-Schlacken beauftragt [MES2008]. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde an 24 verschiedenen HMV-Schlacken die Umweltverträglichkeit mit folgenden drei Auslaugungsverfahren überprüft:

- modifiziertes DEV S4-Verfahren (bisheriges Standardauslaugungsverfahren), W/F⁴-Verhältnis 10:1,
- Schüttelverfahren gemäß DIN 19529, W/F-Verhältnis 2:1,
- Säulenverfahren gemäß DIN 19528, W/F-Verhältnis 2:1.

In Tabelle 9 werden die Ergebnisse der Messungen der Schwankungsbreite der Eluatparameter von verkaufsfertiger HMV-Schlacke aus dem Jahr 2008 nach dem bisherigen Standardverfahren und nachrichtlich den beiden zusätzlichen Auslaugungsverfahren einander gegenüber.

⁴ W/F-Verhältnis – Wasser/Feststoff-Verhältnis

Tabelle 9: Schwankungsbreiten der Eluatparameter von verkaufsfertiger HMV-Schlacke, Messergebnisse verschiedener Auslaugungsverfahren

Parameter	Einheit	Schüttel eluat W:F = 10:1	MW	Schüttel eluat W:F = 2:1	MW	Säulen eluat W:F = 2:1	MW
pH-Wert	-	8,1 - 11,5	10	7,4 - 11,2	9,2	7,7 - 11,1	8,9
Leitfähigkeit	µS/cm	340 - 3.140	1.218	930 - 9.220	4.042	524 - 9.440	4.324
Chlorid	mg/l	41 - 979	246	56,9 - 3.020	1.011	63,2 - 3.350	782
Sulfat	mg/l	49,7 - 515	189	141 - 1.280	553	85,8 - 1.500	590
Blei	µg/l	< 10	-	< 10	-	< 10	-
Cadmium	µg/l	< 1	-	< 1	-	< 1	-
Chrom	µg/l	10 - 271	63	10 - 503	146	10 - 514	130
Kupfer	µg/l	10 - 476	126,2	10 - 1.760	433,5	10 - 2.200	327
Nickel	µg/l	< 10	-	< 10	-	< 10	-
Zink	µg/l	< 40	-	< 40	-	< 40	-
Arsen	µg/l	< 10	-	< 10	-	< 10	-
Antimon	µg/l	8,75 - 56,5	30,2	9 - 124	44,9	4,8 - 93	42,6
Molybdän	µg/l	10,3 - 223	62	28,9 - 987	212,6	10 - 701	151,3
Vanadium	µg/l	10 - 50,1	21,7	10 - 42,3	24,9	10 - 46,6	20,7

MW - Mittelwert

Quelle: [MES2008]

Der positive Einfluss der Alterung und Aufbereitung auf die Eluierbarkeit lässt sich beim Vergleich der Schwankungsbreiten von Rohschlacke und gealterter Schlacke aus den Daten von Pfrang-Stotz verdeutlichen. Insbesondere bei Blei und Zink nimmt die Eluierbarkeit durch die Alterung ab. Auch beim pH-Wert findet man deutliche Einflüsse der Alterung [MEI2008].

In Bezug auf das Auslaugungsverfahren ist festzustellen, dass im Mittel die höchsten Eluat-Konzentrationen beim Schüttelverfahren gemäß DIN 19529 ermittelt worden sind [MES2008].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Schwankungsbreiten der Eluatparameter und ermittelten Mittelwerte der Eluat-Konzentration der gealterten Schlacke in Abhängigkeit von der Datenquelle (Bezugsjahr, Datenumfang) und dem Messverfahren zum Teil relativ deutlich unterscheiden.

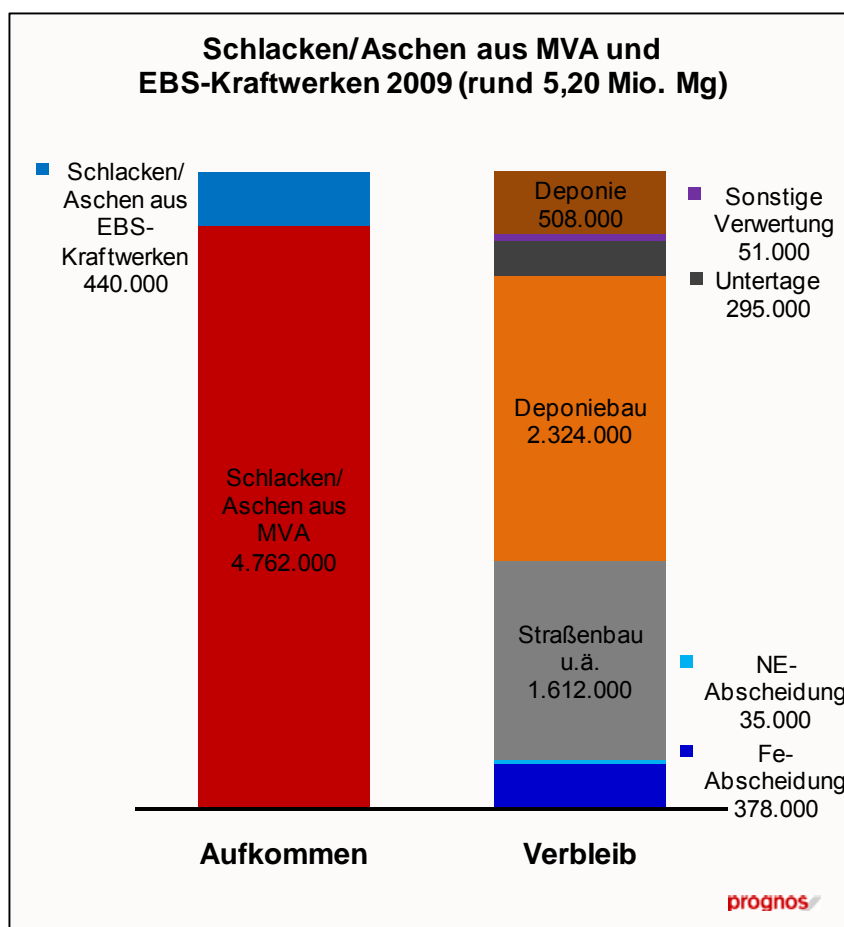
Das bisherige Standard-Verfahren zur Eluatgewinnung ist das 10:1 Schüttel eluat nach DEV-S4. Eventuelle neue Verfahren – wie z.B. Säulen elution – werden im weiteren Rahmen dieses Sachverständigengutachtens nicht berücksichtigt, da bishrige Messreihen gezeigt haben, dass es keine erkennbare Korrelation der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zur Eluatgewinnung gibt. Die Vergleichbarkeit zwischen den Eluaten aus verschiedenen Gewinnungsverfahren wäre also nicht gegeben.

Alle im Folgenden in diesem Gutachten angegebenen Eluatwerte (mit Ausnahme) beruhen auf der Bestimmung nach DEV-S4 und wurden ggf. auf die Probentrockenmasse umgerechnet, da es in der Literatur und auch von Betreibern sowohl Konzentrationsangaben als auch auf die Probenmasse umgerechnete Werte gibt.

4 Derzeit beschrittene Verwertungswege für MVA-Schlacken und dafür erforderliche Qualitätsanforderungen

Das für das Jahr 2009 geschätzte Aufkommen an Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung wird mit insgesamt rund 75 % bzw. 3,95 Mio. Mg größtenteils im Deponie- und Straßenbau verwertet. Rund 10 % bzw. 0,5 Mio. Mg der Schlacken werden auf Deponien beseitigt. Weitere 8 % bzw. 0,4 Mio. Mg Eisen- und Nichteisenmetalle werden bei der internen und externen Aufbereitung der Schlacken abgeschieden. Abbildung 6 zeigt das Gesamtaufkommen und den Verbleib der geschätzten 5,2 Mio. Mg Schlacken im Jahr 2009.

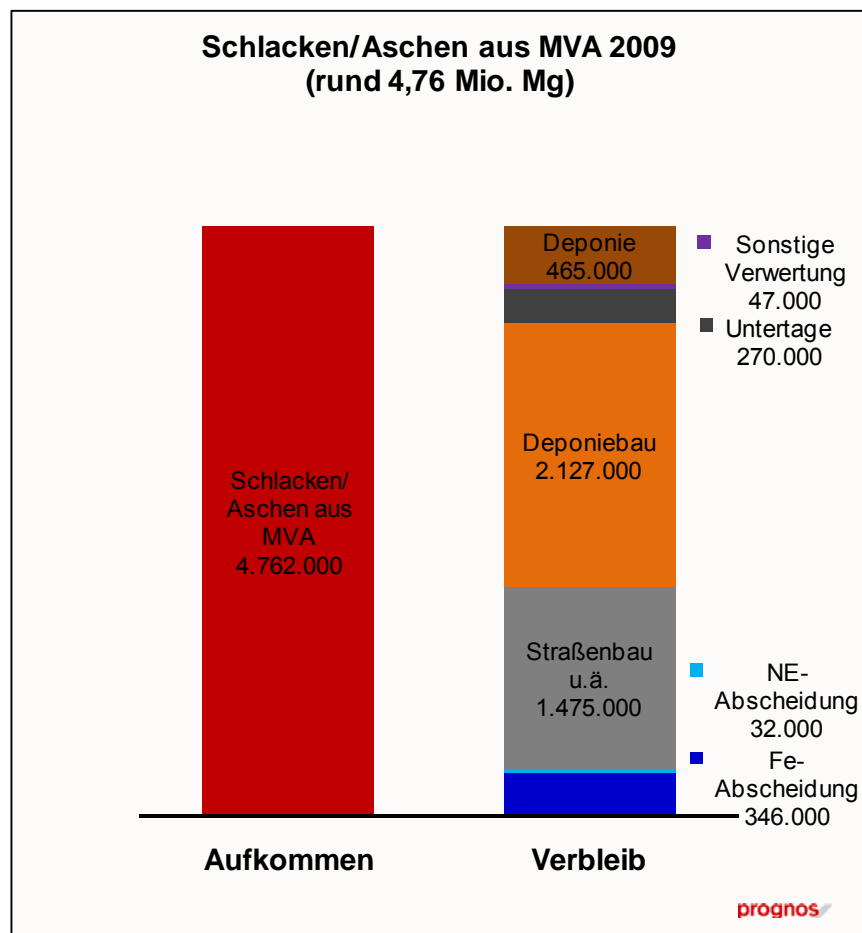
Abbildung 6: Geschätztes Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009



Quelle: [ITAD2009] und Eigeneinschätzungen Prognos AG 2009

Die folgende Abbildung 7 zeigt das Aufkommen und den Verbleib der Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen im Jahr 2009 analog zu Abbildung 6.

Abbildung 7: Geschätztes Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus MVA in Deutschland im Jahr 2009



Quelle: [ITAD2009]

Schlacken aus MVA und EBS-Kraftwerken werden zu rund 90 % verwertet, davon wie beschrieben überwiegend im Deponie- und Straßenbau. Die nicht verwertbaren Schlacken-/ Schlackemengen werden auf Deponien beseitigt.

Die folgenden Tabellen zeigen die Anforderungen an die Schlackeigenschaften, wie sie bisher in Deutschland für die Verwertungswege, u.a. im Straßenbau bestehen.

Die in der Diskussion befindliche Ersatzbaustoffverordnung wird diese Anforderungen für Deutschland in der Zukunft aller Voraussicht nach verschärfen.

Tabelle 10: Anforderungen an die Schlackequalitäten in Deutschland (oben: Eluatwerte; unten: Feststoffwerte)

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)
pH-Wert		7 - 13
Leitfähigkeit	µS/cm	6.000
Blei	mg/kg	0,5
Cadmium	mg/kg	0,05
Chlorid	mg/kg	2.500
Chrom	mg/kg	2
Kupfer	mg/kg	3
Nickel	mg/kg	0,4
Quecksilber	mg/kg	0,01
Sulfat	mg/kg	6.000
Zink	mg/kg	3

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)
C org.	mg/kg TS	
Arsen	mg/kg TS	
Blei	mg/kg TS	6.000
Cadmium	mg/kg TS	20
Chrom	mg/kg TS	2.000
Kupfer	mg/kg TS	7.000
Nickel	mg/kg TS	500
Quecksilber	mg/kg TS	
Zink	mg/kg TS	10.000

5 Stand der Technik zur Schlackeaufbereitung

Als erstes sind für dieses Sachverständigengutachten folgende Vorbemerkungen bzw. Definitionen zu beachten. Betrachtet werden im Rahmen dieses Gutachtens nur Verbrennungsrückstände aus Müllverbrennungsanlagen bzw. EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung. Die Verbrennungsrückstände aus MVA bzw. EBS-Kraftwerken fallen im Allgemeinen als Aschen an, da diese aufgrund der moderaten Verbrennungstemperaturen nicht oder nur teilgesintert werden. Eine vollständige Sinterung oder Einschmelzung der Verbrennungsrückstände, die eigentliche Schlackebildung, findet in konventionellen MVA (Rostfeuerung ohne Maßnahmen zur integrierten thermischen Aschebehandlung oder zur thermischen Schlackenachbehandlung) im Allgemeinen nicht statt. Bei den „alternativen“ Verfahren, die eine thermische integrierte oder nachgeschaltete Schlackebehandlung beinhalten, entstehen aber teilweise Schlacken. Da sich der Begriff „Schlacke“ im allgemeinen Sprachgebrauch auch für Aschen aus MVA durchgesetzt hat, wird dieser im Rahmen dieses Gutachtens durchgängig verwendet.

Wirbelschichtverfahren zur Verbrennung bzw. thermischen Behandlung von Abfällen sowie die dabei entstehenden Wirbelbettaschen sind **nicht** Gegenstand dieses Sachverständigengutachtens, da Wirbelbettaschen mit Schlacken aus Rostfeuerungsanlagen nicht vergleichbar sind. Überdies sind Wirbelschichtfeuerungen zur thermischen Abfallbehandlung in Deutschland in MVA gar nicht anzutreffen und auch insgesamt nur mit einem noch recht geringen Marktanteil, einzig auf die EBS-Kraftwerke reduziert, vorhanden.

Der Abzug der Schlacke und des Rostdurchfalls aus dem Feuerraum erfolgt in allen kommerziellen Müllverbrennungsanlagen in Deutschland durch einen Nassentschlacker. Die heiße Schlacke fällt über die Abwurfkante des Rostes in das Wasserbad des Nassentschlackers und wird dadurch gekühlt. Durch den Wasserspiegel wird der Luftabschluss des Feuerraums gegenüber der Umgebung gewährleistet und dadurch der Einbruch von Falschluff in den Feuerraum verhindert. Die konventionellen und daher auf breiter Front eingesetzten Aufbereitungsverfahren für Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen gehen daher von feuchter bzw. nasser Schlacke als Eingangsstoff aus. Auch Weiterentwicklungen der Aufbereitung zur Verbesserung der Schlackequalität gehen weitestgehend von nasser Schlacke aus.

Zunächst wird in diesem Sachverständigengutachten der Stand der Technik der Schlackeaufbereitung beschrieben (Kapitel 5.1) und dann eine darauf aufbauende weitergehende (nasse) Schlackeaufbereitung (Kapitel 5.2) skizziert.

In Kapitel 5.4 wird auf die Möglichkeiten eingegangen, einen trockenen Schlackeabzug aus dem Feuerraum zu realisieren, wie es zurzeit vor allem in der Schweiz realisiert und weiter untersucht wird.

Die Zusammensetzung der Rohschlacke aus MVA und EBS-Kraftwerken hängt stark vom eingesetzten Abfall und den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Anlage ab (vergl. Kapitel 3.1). Um die hier betrachteten Verfahren aber dennoch vergleichen zu können, wird bei allen weiteren Betrachtungen von folgender durchschnittlicher Rohschlackezusammensetzung ausgegangen (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Durchschnittliche Zusammensetzung von Rohschlacke aus MVA

Fraktion	Gehalt (Gew.-%)
Mineralische Fraktion (Grobstücke + feinstückiges Material)	85 - 90
Unverbranntes oder Teilverbranntes	1 - 5
Eisen- und Nichteisenmetalle	7 - 10

Quelle: [LUE2004, FAU1996]

Diese Angaben enthalten eine Schwankungsbreite und können die enthaltenen Stoffe nicht im chemischen Sinn definieren. Auch wichtige physikalische Eigenschaften, wie z.B. die Korngrößenverteilung von Rohschlacke, sind nicht einheitlich zu charakterisieren und hängen sowohl von der eingesetzten Feuerungstechnik als auch von der jeweiligen Abfallzusammensetzung ab.

Für vergleichende Betrachtungen der integrierten Verfahren zur Schlackebehandlung wird zur Erstellung von Energie- und Massenbilanzen von der in Tabelle 12 dargestellten durchschnittlichen Abfallzusammensetzung ausgegangen, die innerhalb der Bandbreite von europäischem Hausmüll liegt.

Tabelle 12: Durchschnittliche Abfallzusammensetzung und Heizwert

Element / Stoffgruppe	Gehalt	
C	30,1	Gew.-%
H	2,0	Gew.-%
O	17,0	Gew.-%
S	0,4	Gew.-%
N	0,5	Gew.-%
Cl	0,5	Gew.-%
Asche	21,5	Gew.-%
... davon Eisen	2,0	Gew.-%
... davon NE-Metalle	0,5	Gew.-%
... davon mineralischer Anteil	19,0	Gew.-%
Wasser	28,0	Gew.-%
H _u	10,0	MJ/kg

5.1 Konventionelle Schlackeaufbereitung

Die Vorgaben der Schlackequalität aus Hausmüllverbrennungsanlagen für die Möglichkeit des Einsatzes als Baustoff (stoffliche Verwertung) stammen historisch betrachtet aus den LAGA-Merkblättern M19 und M20 (vergl. hierzu auch Kapitel 3 und 4), so dass eine Schlackeaufbereitung unter Berücksichtigung der benötigten bauphysikalischen Eigenschaften folgendes Mindest-Leistungsprofil erfüllen muss [LUE2004], [BREF2006], [PRE1998]:

- Abtrennung von Unverbranntem,
- Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen,
- Klassierung und Einstellung der gewünschten Korngrößenverteilung,
- Volumenstabilisierung (bauphysikalische Eigenschaften) sowie
- Verringerung der Auslaugung von Salzen und Schwermetallen.

Weitere Möglichkeiten, wie der Untertageversatz oder der Depo-niebau haben andere, nicht so weit gehende Anforderungen. Meist reicht die Abtrennung von Metallen aus, zumal diese von den Schlackeaufbereitern vermarktet werden können.

Die trockene Schlackeaufbereitung besteht aus einer Kombination mechanischer Verfahrensschritte und stellt den derzeitigen Stand der Technik dar. Die einzelnen Verfahrensschritte und ihre Funktion sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Verfahrensschritte der konventionellen Schlackeaufbereitung

Lfd. Nr.	Verfahrensschritt	Funktion
1	Siebung	Klassierung der Schlacke
2	Windsichtung	Abtrennung leichter Störstoffe (i.d.R. Unverbranntes)
3	Magnetabscheidung	Abtrennung von Eisenschrott
4	Wirbelstromabscheidung	Abtrennung von NE-Metallen
5	Brechen (Prallmühle)	Zerkleinern zur weitergehenden Abtrennung
6	Alterung (mehrwöchige Lagerung)	Volumenstabilisierung, Herabsetzen der Reaktivität, Immobilisierung von Salzen und Schwermetallen

Die Anzahl und die Verschaltung der einzelnen Verfahrensschritte hängen vom jeweiligen Schlackeaufbereiter und dessen Absatzmöglichkeit ab. Zur Erzeugung von hochwertigen Sekundärbaustoffen sind tendenziell mehr Verfahrensschritte erforderlich. Der wichtigste Schritt ist jedoch die Alterung, durch die verschiedenste chemische Prozesse ablaufen. Hydratations-, Karbonatisierungs- und Oxidationsprozesse überführen viele in der Rohschlacke noch vorhandene leicht mobilisierbare Schwermetallverbindungen in schwer lösliche Verbindungen. Metallisches Aluminium reagiert unter Wassereinwirkung zu Wasserstoff und Aluminiumhydroxid. Durch die chemische Umwandlung der Rohschlacke wird deren Volumen nach der Alterung weitgehend stabilisiert. Dies ist neben der geringen Eluierbarkeit von Schadstoffen (insbesondere Schwermetallen) eine Grundvoraussetzung für den Einsatz der aufbereiteten Schlacke als Baustoff.

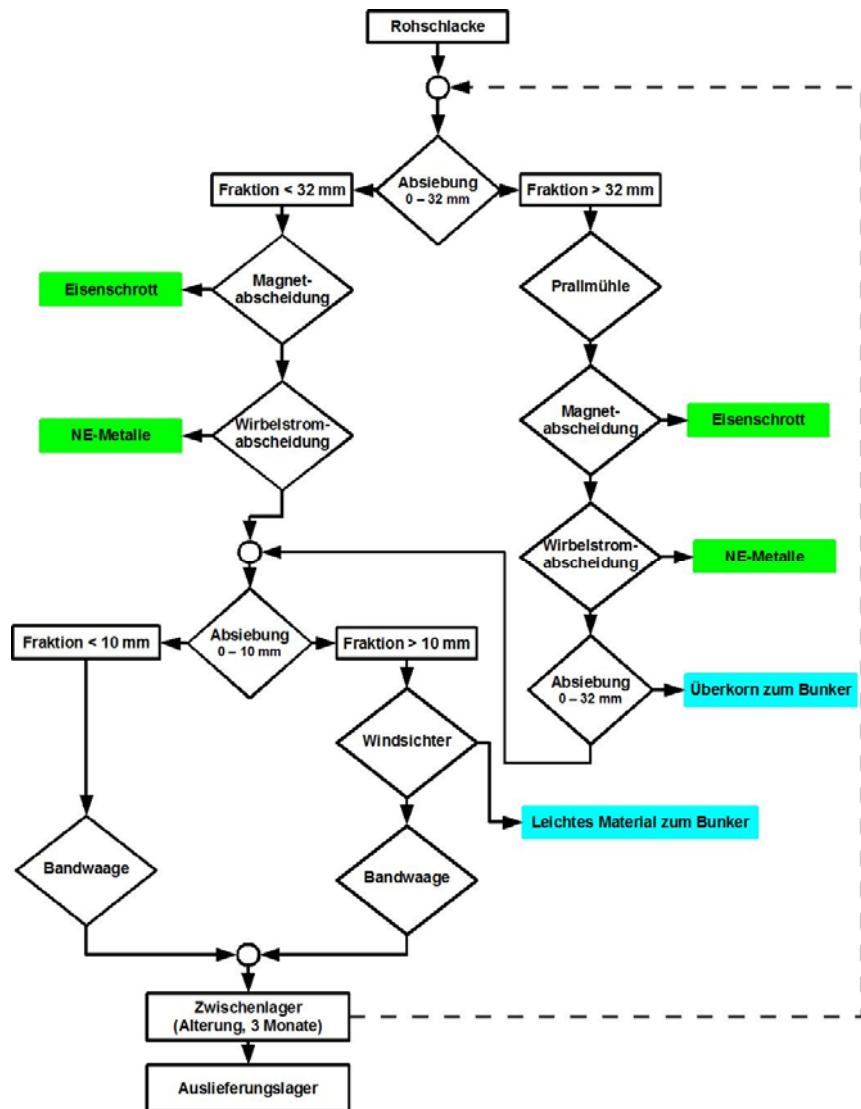
In Abbildung 8 wird ein konventionelles Schlackeaufbereitungsverfahren am Beispiel der MVR Rugenberger Damm dargestellt, wie es in leichter Abwandlung bei den meisten Schlackeaufbereitungsanlagen in Deutschland angewendet wird. Unterschiede existieren vor allem in der Reihenfolge der Verfahrensschritte. Das Flussdiagramm (Abbildung 8) stellt die Produkte zur Verwertung grün und die Stoffe, die zurück zur Müllverbrennung geliefert werden, blau dar.

Der erste Schritt des Verfahrens ist eine Siebung der Rohschlacke aus der MVA in zwei Fraktionen (0 - 32 mm und > 32 mm). Aus der Fraktion 0 - 32 mm werden durch einen Magnetabscheider die Eisenstückchen und danach durch einen Wirbelstromabscheider die Nicht-Eisenmetalle entfernt. Die Fraktion > 32 mm wird durch eine Prallmühle zerkleinert und dann ebenfalls durch Magnetabscheider und Wirbelstromabscheider von Metallen befreit. Diese Fraktion wird nun abermals auf 32 mm gesiebt, um den geringen Anteil an Überkorn abzutrennen. Das Überkorn wird zurück in den Bunker der Müllverbrennungsanlage befördert oder anderweitig entsorgt.

Die beiden nun weitgehend metallfreien Fraktionen 0 - 32 mm werden zusammengeführt, nochmals gesiebt und dadurch in eine Fraktion 0 - 10 mm sowie in eine Fraktion > 10 mm getrennt. Aus der Fraktion > 10 mm wird nun mittels eines Windsichters der Leichtanteil entfernt, der in der Regel aus Unverbranntem besteht. Der Leichtanteil wird zurück in den Müllbunker der Müllverbrennungsanlage befördert, falls die Schlackeaufbereitung in direkter Nachbarschaft zu einer Müllverbrennungsanlage steht. Anderenfalls müssen dafür andere Entsorgungswege gefunden werden. Die Fraktion > 10 mm wird nun über Bandwaagen mit der Fraktion 0 - 10 mm zusammengeführt, um die gewünschte Korngrößenverteilung zu erreichen. Diese nun aufbereitete Schlacke wird in einem Zwischenlager 3 Monate lang zur Alterung gelagert. Dabei geschehen Karbonatisierungs- sowie Oxidations- und Hydratati-

onsreaktionen, die zu einer Volumenstabilisierung und Abnahme der Eluierbarkeit von Schwermetallen führen. Nach der Alterung kann die Schlacke nochmals das gesamte Verfahren durchlaufen, um danach dann an den Abnehmer ausgeliefert werden zu können.

Abbildung 8: Konventionelle Schlackeaufbereitung am Beispiel der Firma MVR



Quelle: [nach ZWA2006]

Die Alterung kann entweder vor oder nach der mechanischen Aufbereitung erfolgen. Dabei ist davon auszugehen, dass die Alterung vor der mechanischen Aufbereitung aufgrund der beschriebenen Umwandlungsprozesse (z.B. Oxidation von Metallen) weniger Ausbeute an Metallen zulässt.

Über die gemäß LAGA-Merkblatt M20 empfohlene Bewässerung der Schlacke während der Alterung gibt es verschiedene Ansich-

ten. Lück beschreibt die Alterung der Hausmüllverbrennungsschlacke bei seiner konventionellen Aufbereitung mit Bewässerung (sowohl über Sprinkler-Anlage als auch durch Niederschlag im Freien). Ziel der Befeuchtung ist die Förderung der stabilisierenden Hydratationsreaktionen [LUE2004]. Im Gegensatz dazu hat Zwahr beobachtet, dass „die in diesem Merkblatt empfohlene Bewässerung während der Zwischenlagerung die [...] notwendigen mineralogischen Umwandlungsprozesse [behindert] und [...] deshalb nicht empfohlen werden [kann]“ [ZWA2006].

Welche Sichtweise korrekt ist, ist weitergehenden Untersuchungen zu überlassen, welche den Rahmen dieses Gutachtens sprengen würden.

5.2 Weitergehende Schlackeaufbereitung (nass-mechanisch bzw. mit Wäsche)

Ausgehend von der konventionellen Schlackeaufbereitung gibt es Verbesserungsmöglichkeiten des Verfahrens, die von Lück [LUE2004] definiert werden:

- Vollständige Abtrennung von Unverbranntem,
- Weitergehende Abtrennung von Eisen- und Nicht-Eisenmetallen, auch in den unteren Korngrößenbereichen,
- Hohe Reinheiten der Metallprodukte und geringer Störstoffanteil,
- Klar definierte Kornverteilung (geringer Über- und Unterkornanteil),
- Hohe Kornfestigkeiten, scharfkantige Kornoberflächen, geringe Porosität, runde Schlackekörner,
- Maximale Schadstoffentfrachtung (Schwermetalle und leicht lösliche Salze).

Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Qualität des mengenmäßig größten Stoffstroms (mineralisches Schlackeprodukt) gelegt, der gute bauphysikalische Eigenschaften und eine gute Umweltverträglichkeit haben soll. Merkmale eines weitergehenden Schlackeaufbereitungsverfahrens sind nasse Abscheidung von Leichtstoffen und weitere Auswaschung von Salzen, weitergehende Klassierung und möglichst vollständige Abscheidung von Nicht-Eisenmetallen mittels Wirbelstromabscheidung aus jeder gebildeten Kornfraktion.

Tabelle 14 zeigt die bei der weitergehenden Schlackeaufbereitung eingesetzten Verfahrensschritte. Auch hierbei handelt es sich um

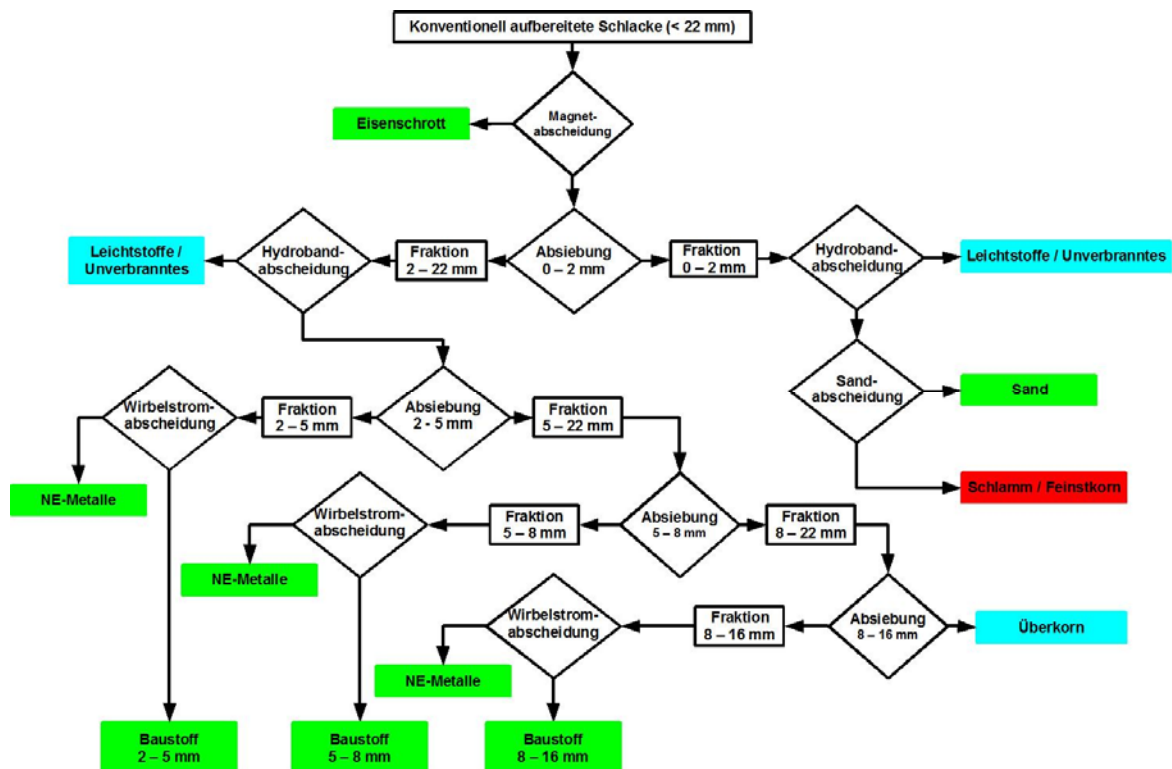
erprobte Verfahrensschritte. Im Unterschied zur konventionellen Aufbereitung werden auch nasse Verfahrensschritte eingesetzt.

Tabelle 14: Verfahrensschritte der weitergehenden Schlackeaufbereitung

Lfd. Nr.	Verfahrensschritt	Funktion
1	Siebung	Klassierung
2	Hydrobandabscheidung	Abtrennung leichter Störstoffe (i.d.R. Unverbranntes), Auswaschen von Salzen
3	Magnetabscheidung	Abtrennung von Eisenschrott
4	Wirbelstromabscheidung	Abtrennung von NE-Metallen
5	Sandabscheidung	Gewinnung von zwei Sandqualitäten

In Abbildung 9 wird ein solches weitergehendes Schlackeaufbereitungsverfahren am Beispiel der Firma Scherer + Kohl dargestellt. Grün dargestellte Stoffe sind verwertbare Produkte, rot dargestellte sind Stoffe zur Entsorgung. Die blau dargestellten Stoffe gehen zurück in die Müllverbrennung.

Abbildung 9: Weitergehende Schlackeaufbereitung am Beispiel der Firma Scherer + Kohl GmbH



Quelle: [nach LUE2004]

Die Voraussetzung für das vorgestellte Verfahren ist das Vorliegen einer bereits konventionell aufbereiteten Schlacke (in diesem Fall mit einer maximalen Korngröße von 22 mm), die noch einmal mittels eines Überbandmagneten von Eisenschrott befreit wird.

Dann erfolgt eine Absiebung bei 2 mm, um eine Feinfraktion (0 - 2 mm) und eine Restfraktion (2 - 22 mm) zu erzeugen. Die Feinfraktion wird über einen Hydrobandabscheider geführt, der die feinen leichten Störstoffe (i.A. Unverbranntes) abtrennt, das Gut wäscht und über einen Sandabscheider in zwei Sandfraktionen trennt, die gemäß der Angaben des Lieferanten als Baustoff verwertet werden können. Dabei fällt Schlamm und eine Feinstfraktion an, die aufgrund der relativ hohen Schadstoffbelastung sicher entsorgt werden muss.

Die Restfraktion (2 - 22 mm) wird ebenfalls über einen Hydrobandabscheider geführt, durch den Leichtstoffe abgetrennt werden. Dann erfolgt eine Klassierung der Restfraktion in drei Korngrößenfraktionen (2 - 5 mm; 5 - 8 mm; 8 - 16 mm). Das Überkorn aus der letzten Siebung wird zurück zur Prallmühle der trockenen Aufbereitung geschickt. Die drei Fraktionen werden nun separat über Wirbelstromabscheider geführt, in denen die Nicht-Eisenmetalle abgetrennt werden. Die mengenmäßig größten Produktströme sind dann die drei mineralischen Kornfraktionen.

5.3 Erreichbare Schlackequalitäten

Die Eluierbarkeit von Schwermetallen ist bei der aufbereiteten Schlacke durch die Alterungsprozesse der Rohschlacke herunterngesetzt. Eine langfristige Erhöhung der Mobilisierung der Schwermetalle ist vor allem in Abhängigkeit des pH-Wertes und der Temperatur nicht auszuschließen, aber aufgrund der Pufferwirkung der gebildeten Verbindungen (z.B. Carbonate) eher unwahrscheinlich. Tabelle 15 zeigt die Bandbreite von Schlacken-Eluatwerten aller MVA in Deutschland (ITAD2009), den Mittelwert 2001 bis 2004 der MVR (Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm, Hamburg) sowie Schlacke einer weitergehenden Aufbereitung (Anlage „Scherer und Kohl“) im Vergleich zu den bisher gültigen LAGA-Werten.

Tabelle 15: Schlackequalitäten bei der konventionellen und weitergehenden Aufbereitung (Eluatwerte)

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)	konventionelle Aufbereitung, mittlere Schwankungs- breite [ITAD2009]	MVR (Mittelwert 2001 - 2004, konventionelle Aufbereitung) [ZWA2006]	Schlacke, weitergehend aufbereitet nach Scherer + Kohl [LUE2004]
pH-Wert		7 - 13	11 - 13	11 - 13	k.A.
Leitfähigkeit	µS/cm	6.000	1.000 - 4.000	1.168	k.A.
Blei	mg/kg	0,5	k.A.	u.N.	u.N.
Cadmium	mg/kg	0,05	k.A.	u.N.	u.N.
Chlorid	mg/kg	2.500	1.000 - 4.000	810	290
Chrom	mg/kg	2	0,1 - 1	0,22	u.N.
Kupfer	mg/kg	3	1 - 5	0,85	u.N.
Nickel	mg/kg	0,4	k.A.	u.N.	u.N.
Quecksilber	mg/kg	0,01	k.A.		u.N.
Sulfat	mg/kg	6.000	2.000 - 6.000	1.510	430
Zink	mg/kg	3	1 - 3	0,35	u.N.

u.N. - Mehrheit der Werte unter Nachweisgrenze; k.A. - keine Angabe

Quelle: [ITAD2009, ZWA 2006, LUE2004]

Tabelle 16: Schlackequalitäten bei der konventionellen und weitergehenden Aufbereitung (Feststoffwerte)

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)	konventionelle Aufbereitung, mittlere Schwankungs- breite [ITAD2009]	MVR (Mittelwert 2005, konventionelle Aufbereitung) [ZWA2006]	Schlacke, weitergehend aufbereitet nach Scherer + Kohl [LUE2004]
C org.	mg/kg TS	k.A.	3.000 - 50.000	6300	k.A.
Arsen	mg/kg TS	k.A.	3 - 15	k.A.	u.N.
Blei	mg/kg TS	6.000	1.000 - 3.500	1609	190
Cadmium	mg/kg TS	20	2 - 20	7	0,8
Chrom	mg/kg TS	2.000	200 - 1000	275	67
Kupfer	mg/kg TS	7.000	1.000 - 10.000	9903	150
Nickel	mg/kg TS	500	100 - 500	393	23
Quecksilber	mg/kg TS	k.A.	< 10	0,016	u.N.
Zink	mg/kg TS	10.000	2.000 - 7.000	5509	470

u.N. - Mehrheit der Werte unter Nachweisgrenze; k.A. - keine Angabe

Quelle: [ITAD2009, ZWA 2006, LUE2004,]

Auffällig ist, dass die Kupfereluatwerte nicht bei allen deutschen MVA eingehalten werden. Gründe könnten die noch nicht breite und effektive Anwendung von Nichteisen-Metallabscheidern sowie die feindisperse Verteilung in der Schlacke sein.

Die praktizierte Nassentschlackung in den MVA führt durch die teilweise Auswaschung der leicht löslichen Salze dazu, dass die Parameter, die in den LAGA-Merkblättern festgelegt wurden, meist eingehalten werden (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16). Leicht lösliche Salze sind jedoch in einigen aufbereiteten Schlacken weiterhin in einem nennenswerten Anteil vorhanden (hier vor allem Sulfate und Chloride) und werden durch die konventionelle Schlackeaufbereitung nicht wesentlich verändert, so dass diese Werte bereits durch die Rohschlacke eingehalten werden sollten.

Die Abtrennung von z.B. 92,5 % des Eisenanteils bzw. 96,9 % des technisch und wirtschaftlich gewinnbaren Eisenschrottes sowie von etwa 34 % des NE-Metalls ist mit konventioneller Technik (ohne effektive Nichteisen-Metallabscheidung durch bessere Klassierung und weitere Wirbelstromabscheider) möglich [PRE1998].

Die im Vergleich zu den Eisenmetallen schlechte Abscheidung der NE-Metalle liegt zum einen an der Größe zum anderen an der Inhomogenität der Stoffströme, die über die beiden Wirbelstromabscheider geführt werden. Eine verbesserte Nicht-Eisenmetall-Abscheidung kann durch eine weitergehende Klassierung und den Einsatz weiterer Wirbelstromabscheider erreicht werden.

Auch bei der weitergehenden Schlackeaufbereitung wird die Eluierbarkeit von Schwermetallen durch Alterung herabgesetzt. Leicht lösliche Salze werden aus der aufbereiteten Schlacke durch die nasse Behandlung besser ausgewaschen als bei der trockenen Aufbereitung. Zusammen mit der praktizierten Nassentschlackung in den MVA werden die Parameter, die in den LAGA-Merkblättern festgelegt wurden, nach Angaben des Verfahrensgesbers sicher eingehalten [LUE2004] (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16). Es werden allerdings bei den Eluatwerten nur wenige Parameter (Chlorid und Sulfat) angegeben, die alle aus nur einer Aufbereitungsanlage mit der/den entsprechenden MVA stammen, so dass diese Werte nicht unmittelbar auf andere Schlacken übertragbar sind. Die Feststoffwerte in Tabelle 16 zeigen bei den Schwermetallen sehr niedrige Werte, so dass hier davon auszugehen ist, dass die zugehörigen Eluatwerte ebenfalls sehr niedrig sind. Dies müsste allerdings noch nachgewiesen werden.

Die Abtrennung von z.B. 92,5 % des Eisenanteils bzw. 96,9 % des technisch und wirtschaftlich gewinnbaren Eisenschrottes bei der konventionellen Aufbereitung kann durch den zusätzlichen Magnetabscheider sicherlich noch etwas gesteigert werden. Für die Abtrennung der NE-Metalle ist gegenüber der konventioneller Technik eine deutliche Erhöhung der Ausbringung zu erwarten. Da jeder fraktionierte Gutstrom bis hinunter zu 2 mm Korngröße über einen Wirbelstromabscheider geführt wird, kann gemäß Pretz eine Ausbringung von 90 % vorausgesetzt werden [PRE1998].

Die mineralische (Baustoff-)Fraktion enthält kein Feinkorn, da dieses in den Sandfraktionen aufgeht. Die bauphysikalischen Eigenschaften der mineralischen Grob-Fraktion sind daher als gut zu erwarten.

Die bautechnische Eignung des Sandes muss hinterfragt werden. Dieser wird zwar von Schadstoffen entfrachtet, ist aber möglicherweise schwierig extern zu vermarkten. Nach Angaben der Betreiberfirma ist der Sand jedoch als Baustoff geeignet [LUE2004].

Die nasse Schlackeaufbereitung erzeugt einen Schlamm (6 - 7 % des Eingangsmassenstroms an Rohschlacke), der einen relativ hohen Schadstoffgehalt zeigt und daher sicher entsorgt werden muss.

Im Gegensatz zur trockenen Aufbereitung wird bei der nassen Aufbereitung Wasser verbraucht, das aufbereitet werden muss und daher zu der Energie für die weitergehende Aufbereitung noch zusätzlich weitere Energie benötigt wird.

Das Verfahren zur weitergehenden Schlackeaufbereitung hat sich vermutlich auch aufgrund der Nachteile (Verwertbarkeit Sandfraktion, Wasserbedarf, Entsorgung des Schlammes mit hohem Schwermetallanteil) bisher nicht durchgesetzt.

Die erreichbaren Schlackequalitäten hängen sehr stark vom eingesetzten Abfall und der jeweiligen Feuerungstechnik ab. Die Alterung, bei der durch selbsttätige chemische Prozesse die Schlacke in eine umweltverträglichere Form überführt wird, führt zu Qualitäten, die unter den jeweiligen Rahmenbedingungen bei einem angenommenen Durchschnittsabfall die bisher gestellten Anforderungen an eine Verwertung, z.B. im Straßenbau erfüllt (vergl. auch Kapitel 4).

Unabhängig von den chemischen Parametern (Tabelle 5 und 6), die eine Mindest-Schlackequalität definieren, ist auch die Ökotoxizität der Schlacken - d.h. schädliche Einwirkungen auf Lebewesen, deren Populationen und natürliche Umgebung - bei der Einstufung von Schlacken eine wichtige Größe. Zur Ökotoxizität von Schlacken werden zurzeit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die bisher noch nicht abgeschlossen sind. Erste veröffentlichte Ergebnisse zeigen keine Korrelation zwischen physikalisch-chemischen Parametern und beobachteter Ökotoxizität. Des Weiteren ergaben die fertig aufbereiteten Schlacken eine deutlich geringere Neigung zur Ökotoxizität. Da selbst für die konventionellen Hausmüllverbrennungsschlacken bisher wenige Daten zur Verfügung stehen, können für die weiteren in diesem Gutachten beschriebenen Verfahren, die nicht Stand der Technik sind, keine Aussagen über die Ökotoxizität getroffen werden [ROE2007].

5.4 Trockenentschlackung

Konventionelle rostgefeuerte MVA verfügen über einen Nassentschlacker zum Austrag der Schlacke aus dem Feuerraum. Dieser Nassentschlacker erfüllt zwei wichtige Funktionen. Erstens werden die heiße Schlacke und der Rostdurchfall abgekühlt. Zweitens wird der Feuerraum luftdicht abgeschlossen. Dies dient der Vermeidung des Eintrittes von Falschluff durch den Entschlacker infolge von Unterdruck in der Brennkammer. Ein trockener Austrag der Schlacke mit einem Trockenentschlacker könnte aus folgenden Gründen gegenüber dem Nassentschlacker von Vorteil sein [BAF2007]:

- Gewichtsreduktion der Schlacke um ca. 12 - 20 Gew.-% (typische Wassergehalte der Schlacke bei Stößelentschlacker bzw. Plattenbandentschlacker),
- kein Verklumpen der mineralischen Bestandteile von Schlacke,
- Erhalt der Abbindefähigkeit der Schlacke,
- gute Qualität der zurück gewonnenen Metalle,
- Möglichkeit der trockenmechanischen Entfernung von Salzen und Schwermetallen.

In den nachfolgenden Kapiteln 5.4.1 und 5.4.2 wird die Trockenentschlackung betrachtet und mit dem konventionellen Verfahren der Nassentschlackung verglichen.

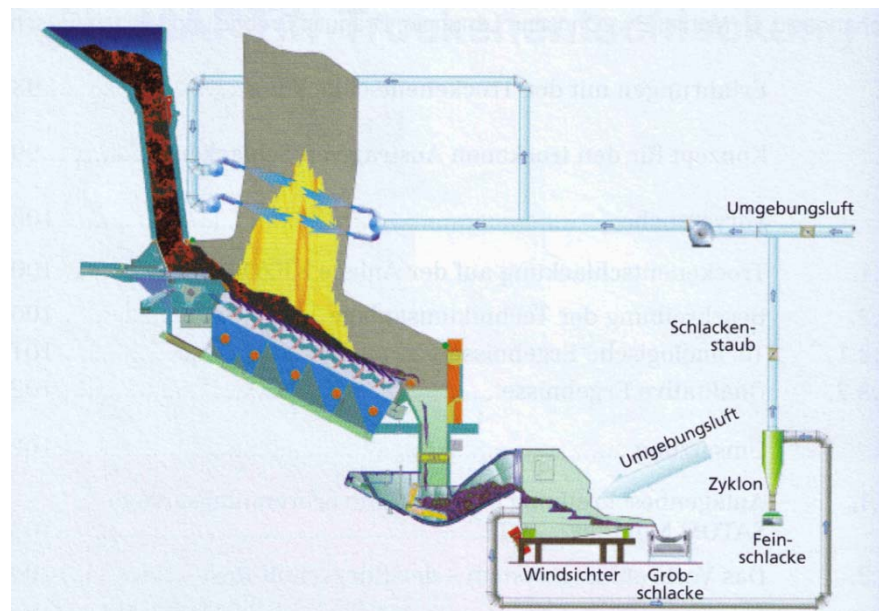
5.4.1 Verfahrensbeschreibung

Umfangreiche Versuche an der KVA Hinwil [BAF2007, UMT2009, BOE2009] in der Schweiz haben gezeigt, dass bei einem trocken betriebenen Nassentschlacker keine größeren technischen Probleme auftreten. Der Nassentschlacker wurde ohne Wasser betrieben und die ausgetragene Schlacke durch die im Gegenstrom einströmende Falschluff gekühlt. Die Schlacke wurde daraufhin direkt trocken abgesiebt (2 mm-Fraktion). Dabei bildete sich Staub, der durch eine Schürze vor dem Austrag ins Kesselhaus bewahrt und durch die einströmende Falschluff größtenteils wieder zurück in die Feuerung gesogen wurde. Dieser Staub wurde in der Abgasreinigung zusammen mit der bisherigen Flugasche sicher abgeschieden. Die Flugaschemenge erhöhte sich dadurch um 30 - 50 Gew.-%. Es wurden 2 Schlackefraktionen gebildet (0 - 2 mm und 2 - x mm).

Zur Eindämmung des Problems der „Falschluff“ und der Erhöhung der Flugaschemenge und der Staubentwicklung bei der Siebung

wurde von der Fa. Martin ein weiterführendes Konzept entwickelt, bei dem der MARTIN-Entschlacker eingesetzt werden kann und diesem dann ein komplett eingehauster Windsichter nachgeschaltet wird, der Feinschlacke und Schlackenstaub weitgehend von den gröberen Partikeln abtrennt und durch Aufstauen der Schlacke im Schlackenschacht sowie den Betrieb im Unterdruck den Einbruch von Falschluff in den Feuerraum verhindert. Die Grobschlacke wird über das Fördersystem des Windsichters aus diesem ausgetragen und ist weitgehend staubfrei. Die Feinschlacke wird zusammen mit dem Staub im Luftstrom aus dem Windsichter ausgetragen und über einen Zyklon geführt, der die Feinschlacke abscheidet. Der verbleibende Schlackenstaub wird zusammen mit der Trägerluft der Sekundärluft beigemischt (siehe Abbildung 10).[MAR2009]

Abbildung 10: Trockenentschlackung der Firma Martin GmbH



Quelle: [MAR2009]

Das Martin-Konzept zur Trockenentschlackung mit integrierter Klassierung wird derzeit an der Anlage SATOM Monthey großtechnisch umgesetzt. Langfristige Betriebserfahrungen liegen daher noch nicht vor. Im Technikumsmaßstab liegen jedoch bereits Erfahrungen vor, die eine Weiterverfolgung der Trockenentschlackung befürworten.

5.4.2 Erreichbare Schlackequalität

Vorausgesetzt, dass die Trockenentschlackung technisch ohne Probleme betrieben werden kann, werden nachfolgend die dadurch erreichbaren Schlackequalitäten aufgezeigt. Da die trocken

ausgetragene Schlacke direkt nach dem Austrag in zwei Fraktionen klassiert wird, die sich nicht nur in ihrem physikalischen sondern auch in den chemischen Eigenschaften stark unterscheiden, wird auf diese beiden Fraktionen (Grobfraktion > 2 mm, Feinfraktion < 2 mm) gesondert eingegangen.

Grobfraktion (> 2 mm)

Der Grobanteil (> 2 mm) der (trockenen) Schlacke beträgt ca. 70 - 80 % [BAF2007, UMT2009, BOE2009].

Die Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Grobfraktion wird durch Absiebung bzw. Abtrennung der Feinfraktion heruntergesetzt. Gleiches gilt für leicht lösliche Salze. Die konventionell über einen Nassentschlacker ausgetragene Schlacke eluiert laut Angaben von Böni „... bei den kritischen Schwermetallen Blei das 5fache, bei Cadmium das 25fache und bei Kupfer das 250fache ...“ [BOE2009] der trocken ausgetragenen Schlacke (Grobfraktion). Trotz fehlender Alterung (die nach LAGA-Merkblatt im feuchten Milieu stattfinden soll) ist die Eluierbarkeit von Schwermetallen in der Schlacke-Grobfraktion gering.

Aufgrund der Trockenentschlackung verbacken wesentlich weniger Metallteilchen mit mineralischen Bestandteilen der Schlacke, so dass die anschließende Aufbereitung bei der Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung potenziell höhere Abscheideleistungen ermöglicht als ein nasser Schlackeaustrag. Eine nasse Schlackeaufbereitung ist nach einem trockenen Schlackeaustrag aufgrund der nicht vorhandenen Feinfraktion wenig sinnvoll. Eine trockene Aufbereitung (wie sie im Kapitel 5.1 beschrieben wird) wird vermutlich zu sehr guten Leistungen bei der Metallabtrennung führen. Die gewonnenen Metalle wurden nicht durch die Abschreckreaktionen bei der Nassentschlackung verändert, sind daher sehr rein und oxidieren nicht an der Luft.

Die nach der Aufbereitung (im Wesentlichen Abtrennung von Metallen) mineralische Grob-Fraktion enthält wenig Feinkorn und hat eine gute Abbindefähigkeit. Die bauphysikalischen Eigenschaften der mineralischen Grob-Fraktion sind als gut zu erwarten. Daher erscheint eine Vermarktung dieser Fraktion möglich.

Feinfraktion (< 2 mm)

Der Feinanteil (< 2 mm) der (trockenen) Schlacke beträgt ca. 20 - 30 % [BAF2007, UMT2009, BOE2009].

Da auch bei der Feinfraktion weniger verbackene Teilchen vorliegen, ist auch hier der Abtrenngrad aller Metalle als sehr gut zu erwarten. Böni nennt Abscheidegrade von größer 90 %, wobei bei der Nicht-Eisenmetallabscheidung eine induktive Technik eingesetzt wurde, die noch nicht in Serie produziert wird [BOE2009].

Insbesondere bei kleinen Teilchen – wie bei der Feinschlacke – haben bisher eingesetzte induktive Abscheider Probleme. Hier ist weitergehender Untersuchungsbedarf zu sehen.

Die nach der Aufbereitung (im Wesentlichen Abtrennung von Metallen) mineralische Feinfraktion hat eine noch erhaltene Abbindefähigkeit. Die bauphysikalischen Eigenschaften der mineralischen Feinfraktion sind aufgrund der Korngrößenverteilung ohne weitere Behandlungsschritte bzw. ohne weitere Bearbeitung eingeschränkt. In der Feinfraktion ist ein Großteil der gesamten Schwermetall- und Salzfracht der Schlacke enthalten. Die Eluatwerte entsprechen daher möglicherweise nicht den gesetzlichen Vorgaben. Eine Entsorgung des Feinanteils scheint geboten. Fierz und Bunge weisen darauf hin, dass die Feinschlacke analog zur sauren Wäsche der Filterasche (wie sie in der Schweiz weit verbreitet ist) von Schwermetallen und Salzen entfrachtet werden kann [BAF2007].

In Tabelle 17 wird die Schlackequalität der unaufbereiteten Feinfraktion aus der Trockenentschlackung im Vergleich zu nasser Gesamtschlacke dargestellt. Die Feinschlackewerte stammen aus einer Versuchsanlage in der Schweiz und können daher nicht direkt mit anderen Werten verglichen werden. Die Qualität der zugehörigen Grobschlacke liegt im Vergleich zu den Werten ITAD 2009 im unteren Bereich und bewegt sich innerhalb der Bandbreite der nass ausgetragenen, konventionell aufbereiteten Schlacke. Unter Berücksichtigung, dass die Schlackequalitäten stark schwanken können, ist zu sehen, dass die Schwermetalle in der zugehörigen Feinfraktion angereichert sind.

Tabelle 17: Schlackequalität bei trockener Entschlackung (Feinfraktion < 2mm, Feststoffwerte)

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)	unaufbereitete Schlackefeinfraktion bei Trockenentschlackung [BOE2009]	konventionelle Aufbereitung, mittlere Schwankungsbreite [ITAD2009]
Blei	mg/kg TS	6.000	2.000	1.000 - 3.500
Cadmium	mg/kg TS	20	15	2 - 20
Chrom	mg/kg TS	2.000		200 - 1000
Kupfer	mg/kg TS	7.000	6.000	1.000 - 10.000
Nickel	mg/kg TS	500	250	100 - 500
Quecksilber	mg/kg TS		0,02	< 10
Zink	mg/kg TS	10.000	5.000	2.000 - 7.000

Quelle: [BOE2009, ITAD2009]

Das Entstehen einer möglicherweise schwermetall- und salzbelasteten Feinfraktion in relevanter Menge (bis 30 % der Trockenschlacke) widerspricht dem Ziel der trockenen Entschlackung, weniger Reststoffe zu erzeugen, die entsorgt werden müssen. Eine nasse und saure Wäsche des Feianteils zur Schwermetall- und Salzentfrachtung steht ebenfalls einem Ziel der Trockenentschlackung (Schonung der Ressource Wasser) entgegen. Darüber hinaus können, angesichts der zu erwartenden Knappheit von Rohstoffen auf dem Weltmarkt, wertvolle Ressourcen (FE- und NE-Metalle) in guter Qualität zurückgewonnen werden. In der Schweiz, in der in etlichen Kehrichtverbrennungsanlagen (meist saure) Flugaschewäschen eingesetzt werden, scheint die Trockenentschlackung so interessant, dass die Einrichtung spezieller Schlackekompartimente auf Schlackedeponien und einer Änderung der TVA diskutiert wird.

5.5 Zwischenfazit

Die bisherige Aufbereitungstechnik von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen ist in Hinblick auf Ressourcen- und Klimaschutz aufgrund von relativ geringem Energiebedarf der Anlagentechnik in Verbindung mit hohen Rückgewinnungsquoten von insbesondere Eisen nach wie vor als Stand der Technik zu bezeichnen.

Eine bessere Rückgewinnung von Nicht-Eisenmetallen ist prinzipiell durch weitergehende Klassierung und Abtrennung durch Wirbelstrom- bzw. Induktionsabscheider zu erreichen. Eine Zerkleinerung von Grobfraktionen vor der weiteren Klassierung kann eine noch bessere Abscheidung von Nicht-Eisenmetallen ermöglichen. Jedoch ist bei einem solchen Vorgehen davon auszugehen, dass dadurch signifikante Mengen an mineralischem Feinkorn entstehen, die die bauphysikalischen Eigenschaften der aufbereiteten Schlacke negativ beeinflussen und/oder zusätzliche Stoffströme erzeugen, die nicht verwertet werden können. Energetisch und im Sinne des Ressourcenschutzes ist eine solche weitergehende Rückgewinnung von insbesondere Nicht-Eisenmetallen in jedem Fall sinnvoll und muss gegen die oben genannten Nachteile abgewogen werden.

Die Bandbreiten der Eluatwerte für Schlacken, die aus der nassen, konventionellen Schlackeaufbereitung hervorgehen, sind insbesondere den unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen geschuldet, liegen aber in einem Bereich, dass eine stoffliche Verwertung in der Regel möglich ist. Dies ist daran erkennbar, dass Hausmüllverbrennungsschlacken derzeit zu rund 31% eine bautechnische Verwertung außerhalb der Deponien erfahren und zu rund 44% im Deponiebau eingesetzt werden (vergl. Kapitel 4), [ITAD2009]. Nachgewiesene Umweltschäden durch die Verwen-

zung von Hausmüllverbrennungsschlacken als Baumaterial, z.B. im Straßenbau sind den Gutachtern nicht bekannt.

Die Trockenentschlackung hat im Vergleich zu der Nassentschlackung die Nachteile, dass höhere Flugaschemengen entstehen, die entsorgt werden müssen. Des Weiteren wird die abgesiebte, schadstoffbelastete Schlacke-Feinfraktion in der Regel ebenfalls sicher zu entsorgen sein, so dass hier möglicherweise größere Mengen zur Entsorgung anfallen als bei der Nassentschlackung. Die Möglichkeit zur Schadstoffentfrachtung der Feinfraktion durch eine saure Wäsche besteht zwar prinzipiell, nur werden dadurch weitere Abfall- bzw. Abwasserströme erzeugt und der Frischwasserbedarf erhöht. Bei bestehenden sauren Flugaschewäschen, wie sie in der Schweiz weit verbreitet sind; in Deutschland allerdings nicht existieren, ist eine Trockenentschlackung dennoch interessant. Allerdings besteht auch hier noch umfangreicher Untersuchungsbedarf hinsichtlich zusätzlicher Betriebsstoffe und Outputqualitäten.

Im Hinblick auf Klima- und Ressourcenschutz ist die Trockenentschlackung ähnlich zu bewerten wie die Nassentschlackung, da auch hier hohe Abtrennquoten von Metallen zu erreichen sind. Möglicherweise ist die Aufbereitung der Schlacke aufgrund der beobachteten guten Qualität und freien Zugänglichkeit der Metalle in der Schlacke weniger energieintensiv als die Aufbereitung von nasser Schlacke. Das energetische Optimierungspotenzial der Aufbereitungstechnik für trockene Schlacken ist gegenüber der Energieeinsparung durch Rückgewinnung von Metallen jedoch als klein anzusehen. Um hier genauere Aussagen treffen zu können, ist weiterer Untersuchungsbedarf bei den großtechnisch umgesetzten Anlagen zu sehen.

6 Schlackequalitäten von alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen im Vergleich zur konventionellen MVA

6.1 Vergasungs- und Entgasungsverfahren mit anschließender Nachverbrennung

Einige innovative Verfahren zur Verbesserung der Schlackequalitäten, die auf dem Prinzip der Vergasung mit anschließender Nachverbrennung beruhen, sind in der Vergangenheit entwickelt und erprobt worden. Die Verbesserung der Schlackequalität zum Einsatz als Baustoff war, zusammen mit einer Reduzierung des Gesamt-Dioxin-Outputs, treibende Kraft bei der Entwicklung aller dieser Verfahren. Allen Verfahren ist gemein, dass der Abfall vergast bzw. pyrolysiert wird. Im Nachgang wird der Verbrennungsrückstand („Schlacke“) bei hohen Temperaturen komplett ausgebrannt und eingeschmolzen. Verbrennungsrückstand dieser Verfahren ist verglaste inerte Schlacke. Verglaste Schlacke hat im Allgemeinen zwar im Vergleich zu gesinterter bzw. teilgesinterter Schlacke eine wesentlich bessere Umweltverträglichkeit (Eluatwerte), jedoch kann diese aufgrund ihrer bauphysikalischen Eigenschaften (Bindungsfähigkeit) gegebenenfalls nur eingeschränkt verwertet werden.

Keines dieser Verfahren nutzt allein die Rostfeuerung, da diese allein mit einer Rostfeuerung technisch nur schwer realisierbar sind. Weil dieses Gutachten primär konventionelle MVA bzw. EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung betrachtet, werden diese Verfahren nachfolgend nur kurz beschrieben und einer zusammenfassenden Bewertung unterzogen.

RCP-Verfahren

Beim RCP-Verfahren wird der Abfall unbehandelt auf ein Rost aufgegeben. Dort wird dieser entgast und getrocknet und durch Oxidation eines Teils des Pyrolysegases mit zugesetztem Sauerstoff unterstöchiometrisch verbrannt (insgesamt kann dieser Teilschritt als Vergasung bezeichnet werden). Der Pyrolysekoks fällt aus der Pyrolysekammer in die erste Zone eines Schmelzreaktors und wird unter Zugabe von Sauerstoff dort ausgebrannt. Die geschmolzene Schlacke und damit auch die meisten Metalle werden durchoxidiert. Der gesamte Schmelzreaktor ist mit feuerfester Ausmauerung ausgekleidet. Die flüssige Schlacke läuft von der ersten Zone des Schmelzreaktors in die zweite Zone. Dort wird die Schlacke elektrisch ohne Zufuhr von Sauerstoff auf Temperaturen von etwa 1.500 °C aufgeheizt. Die zweite Zone ist die Reduktionszone, in

der die Schwermetalle sowie Eisen und Kupfer reduziert und so in den metallischen Zustand zurückgeführt werden. Einige Schwermetalle verdampfen, während sich Kupfer, Nickel und Eisen am Boden sammeln und wie in einem Hochofen regelmäßig abgestochen werden. Die dritte Zone (Absetzzone) wird durch Öl-/Sauerstoff-Brenner beheizt. Dort setzen sich die Reste von Kupfer und Nickel ab und die oben schwimmende mineralische Schlacke kann über einen Überlauf aus dem Schmelzreaktor ausgetragen und granuliert werden. Das Pyrolysegas wird in einer Nachbrennkammer vollständig verbrannt, so dass die Energie genutzt werden kann [NOT1997].

Probleme gab es beim Betrieb einer Anlage mit dem RCP-Verfahren im Bereich des Schmelzreaktors. Dieser war schwierig auf der richtigen Temperatur zu halten. Bei zu hohen Temperaturen sank die Standzeit der Ausmauerung rapide, während bei zu niedrigen Temperaturen die Schmelze eine zu hohe Viskosität aufwies. Die abgestochenen Metalle werden als Legierung gewonnen, so dass eine Vermarktung der Einzelmetalle erst nach metallurgischer Aufarbeitung des Gemisches möglich ist.

Thermoselect-Verfahren

Das Kernstück des Thermoselect-Verfahrens besteht aus einem reduzierenden Schmelzen in einem Hochtemperaturreaktor, dem eine Entgasung des Abfalls bei Temperaturen bis etwa 600 °C vorgeht.

Erster Verfahrensschritt ist ein Verdichten des Abfalls. Die dadurch hergestellten Ballen bzw. Pfropfen werden waagrecht in den Entgasungskanal eingeschoben und durch Nachverdichtung mit den heißen Wänden des Entgasungskanales in Kontakt gehalten. Der entgaste Abfall fällt parallel zum Pyrolysegas in den Hochtemperaturreaktor, in dem Sauerstoff unterstöchiometrisch eingeblasen wird. Aus dem bei geringem Überdruck betriebenen Reaktor wird eine schmelzflüssige Schlacke und ein Roh-Synthesegas abgezogen“ [MOS1994].

Nach der Reinigung des Synthesegases kann dieses entweder für die chemische Synthese oder zur Energieerzeugung genutzt werden.

Die erste großtechnische Anlage mit dem Thermoselect-Verfahren wurde in Karlsruhe errichtet. Die Anlage wurde nach Angaben des Betreibers aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit und technischer Risiken im Jahr 2004 stillgelegt. Der Verfahrenslieferant widerspricht den Aussagen des Betreibers, indem er darauf verweist, dass es bereits Anlagen in Japan gibt, die wirtschaftlich und sicher betrieben werden.

Schwel-Brenn-Verfahren

Beim Schwel-Brenn-Verfahren wird der vorzerkleinerte Abfall zunächst verschwelt, also bei relativ niedrigen Temperaturen pyrolysiert bzw. entgast. Dies geschieht in einer rotierenden Trommel, welche auch als Konversionstrommel bezeichnet wird. Die Temperatur beträgt 450 °C bis ca. 520 °C, die Verweilzeit etwa 1 Stunde. Aus dem verschwelten Rückstand, der noch große Anteile an elementarem Kohlenstoff bzw. Pyrolysekoks enthält, wird die Feinfraktion (< 1 bis 5 mm) abgetrennt und nach Aufmahlen auf Korngrößen < 1 mm gemeinsam mit dem Pyrolysegas in einer Schmelzbrennkammer bei einer Endtemperatur von 1.300 °C verbrannt. Die Schlacke wird schmelzflüssig abgezogen und erstarrt in einem Wasserbad.

Flugaschen aus den Kesseln und dem Elektrofilter und auch das Sorbens aus der Abgas- Nachreinigung (z.B. HOK) werden in die Brennkammer rückgeführt. Für den Rückstand der Abgasreinigung ist eine besondere Behandlung erforderlich. Im Regelfall ist ein untertägiger Versatz möglich. Die Grobfraktion der Entgasung wird gekühlt, von Drähten befreit und zunächst staubfrei geblasen. Danach wird mittels Magnetabscheider und Wirbelstrominduktion in drei Fraktionen getrennt:

- > 5 mm Eisenmetalle,
- > 5 mm Aluminium,
- > 5 mm Glas, Tongut, Keramik und Steine.

In der Praxis könnten aufgrund des steigenden Angebotes an Sekundärbaustoffen aus Baurestmassenverwertungsanlagen jedoch Absatzschwierigkeiten entstehen. Ebenso wurde das Schmelzgranulat auf diese Verwertungsmöglichkeiten hin untersucht. Dabei wurde die technische Eignung prinzipiell bestätigt; aufgrund der geringen Auslaugbarkeit ist vermutlich auch eine umweltverträgliche Verwertung als Baustoff möglich“ [MOS1994].

Die erste großtechnische Anlage mit dem Schwel-Brenn-Verfahren in Fürth wurde nach einem Austritt von Schwelgas stillgelegt. Dieser Austritt beruhte auf einer Undichtigkeit der Drehrohrabdichtung, die vermutlich durch für dieses Verfahren nicht geeigneten Abfall ausgelöst wurde. Auch unter dem Druck der Öffentlichkeit verzichtete der zuständige Zweckverband (Bauherr und Betreiber) auf einen Weiterbetrieb [NOT1997].

Im Übrigen ist zu bemerken, dass es keines dieser Verfahren in einen großtechnischen Dauerbetrieb in Europa geschafft hat. In Japan sieht die Situation jedoch anders aus. Die dortige Politik legte sich auf eine Philosophie fest, den Gesamt-Dioxin-Output drastisch zu senken und den knappen Deponieraum zu schonen. Daher wurden und werden Müllverbrennungsanlagen mit Vergla-

sungsverfahren für Schlacken subventioniert und damit in der Entwicklung vorangetrieben. In Japan gibt es beispielsweise sieben kommerzielle Thermoselect-Anlagen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Ausführungen sind drei alternative thermische Verfahren näher zu betrachten, deren Tauglichkeit entweder als integrierte Verfahren oder als Zusatzanlagen in großtechnischen Versuchen in Europa nachgewiesen wurde und/ oder die großtechnisch als Produktionsanlage bereits in Europa verwirklicht wurden. Diese sind:

- das **SYNCOM-Verfahren**,
- das **SYNCOM-Plus-Verfahren** sowie
- das **Plasma-Schmelz-Verfahren**.

Das SYNCOM-Verfahren wird in Kapitel 6.2, das SYNCOM-Plus-Verfahren in Kapitel 6.3 sowie das Plasma-Schmelz-Verfahren in Kapitel 6.4 näher beschrieben.

Eine vergleichende Untersuchung der drei Verfahren untereinander und mit einer konventionellen MVA im Fokus des Klima- und Ressourcenschutzes schließt sich in Kapitel 6.5 an. Dabei wird sowohl ein technisch-wirtschaftlicher und energetischer Vergleich als auch eine Darstellung und Bewertung der erreichbaren Schlackenqualitäten vorgenommen.

6.2 SYNCOM-Verfahren

Das SYNCOM-Verfahren der MARTIN GmbH für Umwelt- und Energietechnik ist ein Zusatz, der bei einer konventionellen Müllverbrennungsanlage mit Rückschubrostfeuerung eingesetzt werden kann. Idealerweise wird das SYNCOM-Verfahren jedoch bereits beim Neubau einer MVA realisiert, da so die übrigen Teile der Anlage (wie z.B. Kessel und Abgasreinigung) besser auf das Verfahren abgestimmt werden können und dieses seine Stärken besser ausspielen kann.

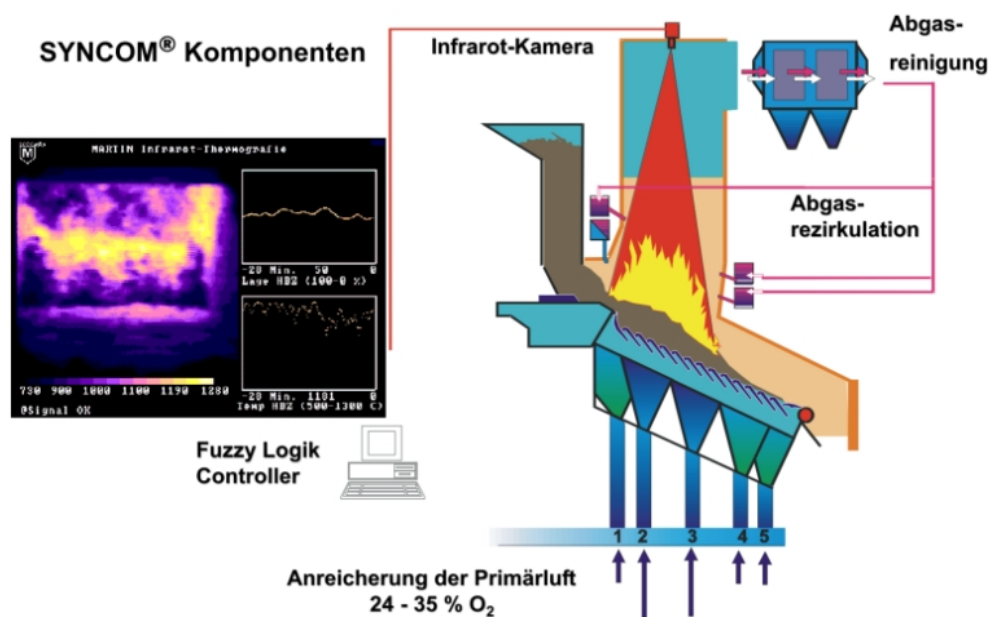
Dieses Verfahren ist bereits in einer Hausmüllverbrennungsanlage seit dem Jahr 2004 im Dauerbetrieb (TBA Arnoldstein, Österreich). Es ist im BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung als aufkommende Technologie („Emerging Technology“) aufgeführt [BREF2006].

Eine weitere SYNCOM-Anlage ist in Sendai, Japan in Betrieb

Das SYNCOM-Verfahren beinhaltet zusätzlich zu der „konventionellen Rostfeuerung“ drei Komponenten (siehe auch Abbildung 11):

- Anreicherung der Primärluft mit Sauerstoff,
- Infrarotkamera mit Fuzzy-Logik-Regelung sowie
- Abgasrezirkulation.

Abbildung 11: SYNCOM-Verfahren



Quelle: [MAR2009a]

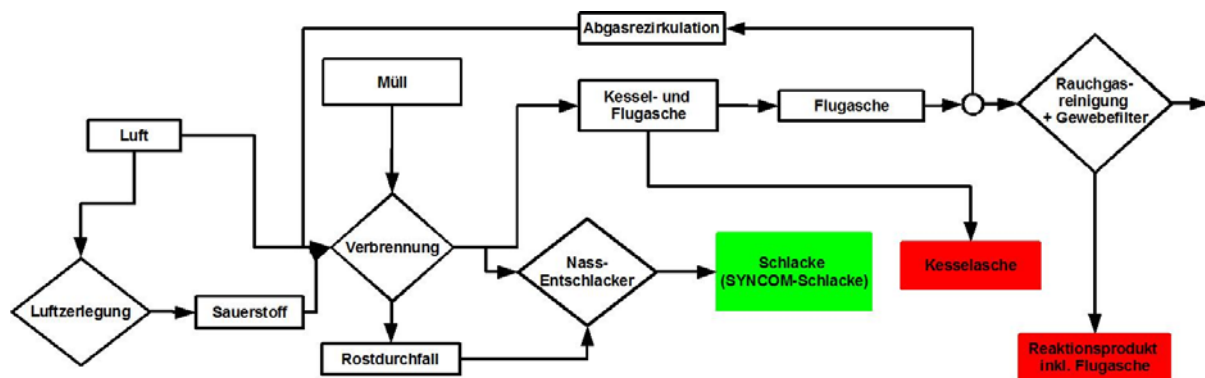
Die Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff führt zu erhöhten Brennbett- und Feuerraumtemperaturen mit Auswirkungen auf die Beschaffenheit der Schlacken.

Zur Anreicherung der Primärluft mit Sauerstoff ist eine Luftzerlegungsanlage erforderlich. In Verbindung mit der Feuerungsleistungsregelung durch IR-Kamera und Fuzzy-Logik führt die mit Sauerstoff angereicherte Luft zu erhöhten Brennbetttemperaturen im Bereich zwischen 1.000 und 1.300 °C. Die erhöhten Brennbetttemperaturen führen wiederum zu besserem Ausbrand der Schlacke und zu besserer Versinterung derselben. Ein Teil des Abgases wird, nachdem es im Kessel den Großteil seiner Energie an den Wasser-Dampf-Kreislauf zur Strom- und Dampferzeugung abgegeben hat, innerhalb der Abgasreinigung abgezogen und über einen Rezirkulationsventilator als Sekundärgas in den Feuerraum eingedüst. Das Abgas zur Rezirkulation kann je nach Verfahrenskonzept nach der Vor-Entstaubung oder auch nach Entfernung der sauren Schadgase und dem Gewebefilter entnommen werden. Für

die in diesem Gutachten angestellten Vergleiche wird davon ausgegangen, dass das Abgas nach Abscheidung der sauren Schadgase und Gewebefilter rezirkuliert wird. Die Abgasrezirkulation führt zu einer besseren Ausnutzung des Sauerstoffs für die Verbrennung und zur Minderung von Stickoxiden. Im Zusammenspiel mit diesen Effekten wird zusätzlich die Abgasmenge verringert.

Das Verfahrenskonzept des SYNCOM-Verfahrens ist Abbildung 12 zu entnehmen. Dabei stellen grün dargestellte Stoffe Stoffströme zur Verwertung, rot dargestellte Stoffe Stoffströme zur Beseitigung dar.

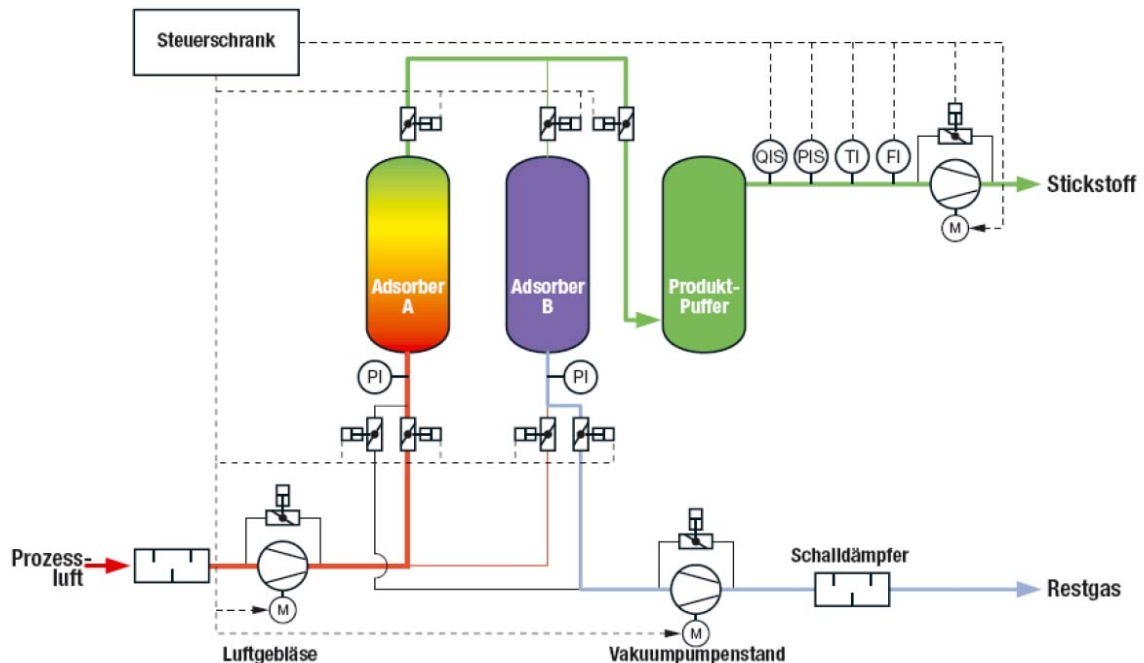
Abbildung 12: Verfahrenskonzept SYNCOM



Quelle: [nach MAR2009b, KOR2009]

„Die Gewinnung von Sauerstoff mit Hilfe der Adsorptionstechnik basiert auf der Eigenschaft poröser Adsorptionsmittel, den sog. Molekularsieben, Gase an der Oberfläche zu binden. Die beiden Hauptbestandteile der Luft, Sauerstoff und Stickstoff, werden abhängig von Temperatur und Druck unterschiedlich stark adsorbiert. Die Druckabhängigkeit wird genutzt, um den Sauerstoff vom Stickstoff zu trennen. Der Prozess bewegt sich während der Adsorptionsphase im Überdruckbereich, während die Regenerierung unter Vakuum erfolgt. Deshalb werden solche Anlagen Vacuum-Pressure-Swing-Adsorption oder kurz VPSA-Anlagen genannt“ (siehe Abbildung 13) [MAR2009b].

Abbildung 13: VPSA-Anlage zur Erzeugung von technischem Sauerstoff



Quelle: [MAR2009b]

Das SYNCOM-Verfahren wird vom Lieferanten nur mit einem Rückschub-Rost angeboten, da bei anderen Rosttypen die erhöhten Brennbetttemperaturen zu erhöhter thermischer Belastung der Roststäbe führen. Der Rückschubrost ermöglicht gemäß Aussagen des Lieferanten eine gleichmäßige Abfallschicht auf dem Rost, die diesen von der Wärmestrahlung aus der Brennkammer abschirmt. Durch die gute Schürwirkung des Rosts ist zwar ein Kontakt der Roststäbe mit heißem Abfall möglich, jedoch gibt es laut dem Lieferanten keinen erhöhten thermischen Verschleiß des Rostbelags, obwohl der Rost nicht wassergekühlt ist [MAR2006].

6.3 SYNCOM-Plus-Verfahren

Das SYNCOM-Plus-Verfahren ist eine Erweiterung des SYNCOM-Verfahrens (siehe Kapitel 6.2) um folgende Komponenten:

- nass-mechanische Schlackenachbehandlung,
- Rückführung des Feinanteils der Schlacke und eines Teils der Flug- und Kesselasche bzw. nur der Kesselasche in die Feuerung.

Im BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung wird das SYNCOM-Plus-Verfahren genannt, welches

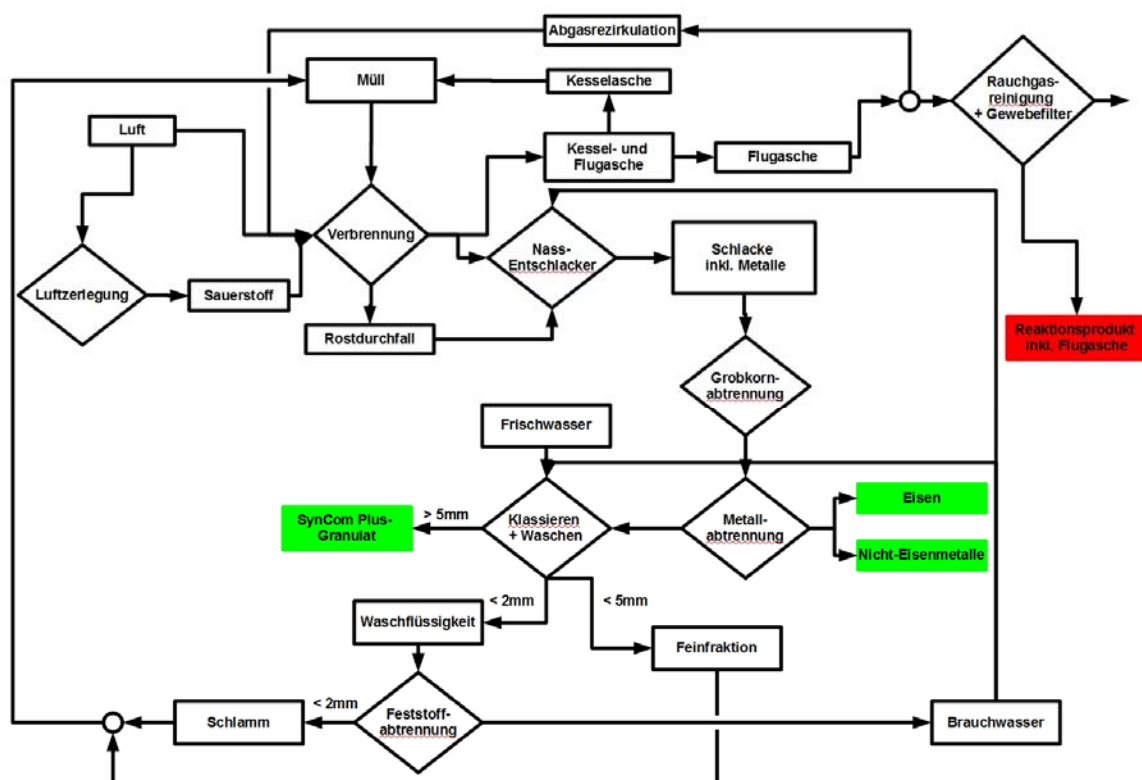
bis zum Zeitpunkt der Endbearbeitung des Merkblattes im Techniksmaßstab erprobt wurde [BREF2006].

Die Untersuchungen wurden erfolgreich an einer großtechnischen Versuchsanlage in der bereits erwähnten SYNCOM-Anlage in Arnoldstein (Österreich) durchgeführt [MAR2009b, KRV2009].

In Abbildung 14 wird das Verfahrenskonzept des SYNCOM-Plus-Verfahrens schematisch dargestellt. Verwertbare Produkte sind in grün dargestellt, während die zu entsorgenden Reststoffe rot dargestellt sind. Dieses Konzept sieht keine Vorentstaubung des Abgases vor der weitergehenden trockenen Abgasreinigung vor.

In diesem Fall werden nur der Feinanteil der Schlacke und die Kesselasche in die Feuerung zurückgeführt, da die Flugasche nicht separat erfasst wird. Dieses Konzept wird bei der weiteren Betrachtung berücksichtigt.

Abbildung 14: Verfahrenskonzept SYNCOM-Plus



Quelle: [nach MAR2009b, KOR2009]

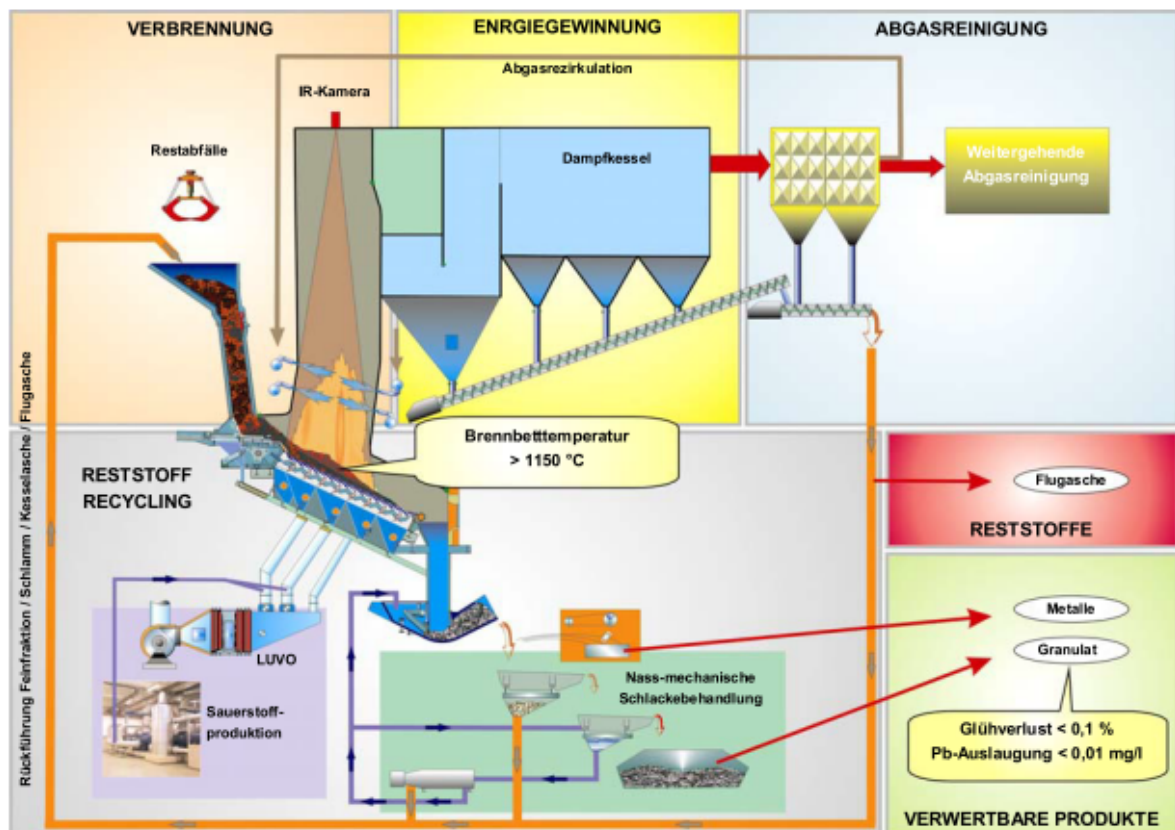
Abbildung 15 ist ein Schema des Verfahrensgebers und dient zur Veranschaulichung des Verfahrens. In diesem Schema wird das Abgas vor der Abgasreinigung vorentstaubt. Somit können Flug- und Kesselasche in die Feuerung zurückgeführt werden. Ein Teil

der Flug- und Kesselasche wird aus dem Prozess ausgeschleust und der Entsorgung zugeführt, um eine Akkumulation von Schwermetallen im Prozess zu verhindern.

Die dem Nassentschlacker nachgeschaltete nass-mechanische Schlackeaufbereitung besteht aus einer vereinfachten nassen Schlackeaufbereitung, wie sie in Kapitel 5.2 beschrieben ist. Das Ziel der nass-mechanischen Aufbereitung ist die Abtrennung des Feinkornanteils der Schlacke inklusive der löslichen Salze sowie die Herstellung des Schlackengranulats, das als höherwertiger Baustoff eingesetzt werden kann.

Durch die Rückführung des Feinanteils der Schlacke und der Kesselasche wird zum einen der ungesinterte Anteil der Schlacke nachgesintert und zum anderen wird die Menge der Flugasche (die auch einen signifikanten Anteil an Unverbranntem enthält) reduziert.

Abbildung 15: SYNCOM-Plus-Verfahren



Quelle: [MAR2009b]

Übertragbarkeit der Merkmale des SYNCOM-Plus-Verfahrens auf konventionelle MVA mit einem anderem Rostsystem als dem Rückschubrost

Ist es gewünscht, die Merkmale des SYNCOM-Plus-Verfahrens (Sauerstoffanreicherung, Rückführung sowohl des Feinkornanteils der gesinterten Schlacke als auch des größten Teils der Flug- und Kesselasche) bei einer konventionellen MVA nachzurüsten, auch wenn dies vom Hersteller nur in Anlagen mit Rückschubrost angeboten wird, so ist dies prinzipiell möglich.

Eine höhere Brennbetttemperatur durch eine O₂-Anreicherung zur Versinterung kann den bestehenden Rostbelag und Rostkomponenten einer konventionellen MVA mit einem anderen Rostsystem als Rückschubrost thermisch schädigen. Ein weiteres Problem einer Nachrüstung ist die Erreichbarkeit der theoretischen Durchsatzserhöhung durch die Sauerstoffanreicherung, da der Kessel und der Rost dafür ausgelegt sein müssen. Eine Durchsatzserhöhung um 33 % würde also eine um etwa 33 % erhöhte mechanische (und thermische) Rostbelastung und eine um etwa 33 % erhöhte Kessel- und Turbinenleistung zur Folge haben. Im Normalfall, wenn die nachzurüstende MVA keine umfangreichen Auslegungsreserven hat, würde eine Nachrüstung technische Schwierigkeiten hervorrufen (Rost) und/oder nicht zu der erhofften erhöhten Energieausbeute (Wärme/Strom) führen (Kessel/Turbine).

Eine Rückführung sowohl des Feinkornanteils der Schlacke als auch des größten Teils der Flug- und Kesselasche kann den Anteil an zu entsorgender Flugasche mindern und die Qualität der Schlacke durch Nachsinterung auf dem heißen Brennbett verbessern. Die hierfür notwendigen Komponenten lassen sich theoretisch bei einer bestehenden MVA nachrüsten. Sofern diese auch in den Komponenten Kessel und Turbine auf eine höhere Leistung ausgelegt ist, ist eine Nachrüstung auch sinnvoll.

Ob die Rückführung von Fein- und Feinstkorn mit einer überwiegend mineralisch-metallischen Zusammensetzung zu erhöhtem abrasivem Verschleiß insbesondere des Rostbelags führen kann, ist durch Langzeituntersuchungen zu verifizieren. Negative Erfahrungen mit ähnlichen Stoffen bei konventioneller Rostfeuerung mit anderen Rostsystemen gibt es bereits. In Verbindung mit den höheren Brennbetttemperaturen kommt zum mechanisch-abrasiven noch potenziell erhöhter thermischer Verschleiß hinzu. Gerade bei konventionellen MVA ist das Rostbelagmaterial im Allgemeinen nicht dazu geeignet, höheren Temperaturen und Abrasion zu widerstehen. Zusätzlich ergibt sich ein hohes Verschleißpotenzial der Feuerraumauskleidung. Denn auch die Feuerraumtemperaturen steigen durch die Sauerstoffanreicherung gegenüber der konventionellen Fahrweise mit Luft um etwa 150 - 200 °C an. Höherer Verschleiß verkürzt die Wartungszyklen, so dass eine niedrigere Verfügbarkeit der Anlage die Folge wäre.

Für die Luftzerlegeanlage nach dem Prinzip der Druckwechseladsorption sind keine besonderen Risiken zu erwarten. Ein Ausfall dieser ist aufgrund der langen Erfahrung mit solchen Anlagen relativ selten. Sollte jedoch diese Anlage ausfallen und keine ausreichende Menge an Sauerstoff gespeichert worden sein, so kann die Anlage mit normaler Umgebungsluft, je nach Auslegung der Abgasreinigung ggf. im Teillastbetrieb, weiterbetrieben werden. Die Rückführungen der Feinfraktionen (Schlacke + Flug- bzw. Kesselasche) können weiterhin betrieben werden. Jedoch wird die Qualität der Schlacke aufgrund der fehlenden Temperaturerhöhung im Brennbett sinken.

Zur Verbesserung der Schlackequalität kann alternativ auch die Schlacke oder ein Teil davon in die Feuerung zurückgeführt werden. Wegen der zu hohen mechanischen Rostbelastung und wegen der niedrigeren Temperatur im Brennbett macht es wenig Sinn, die gesamte Schlacke (entspricht etwa 25 % des Abfalls) zurückzuführen. Die Stabilität des Verbrennungsvorgangs kann dadurch gefährdet werden, da zu viel Schlacke, die zum einen überwiegend inert und zum anderen feucht ist, den Heizwert des Abfallbettes zu stark herabsetzt.

Stattdessen ist jedoch eine Rostdurchfall-Rückführung als sinnvolle Möglichkeit denkbar. Zum einen weist der Rostdurchfall typischerweise aufgrund der kürzeren Verweilzeit in der Hauptbrennzone einen höheren Anteil an Unverbranntem und unversinterter bzw. teilgesinterter Schlacke auf, so dass eine nochmalige thermische Behandlung dieses Stoffstroms auf dem Rost zu einer verbesserten Schlackequalität beitragen würde.

Zum anderen ist die Menge des Rostdurchfalls klein gegen die Menge der gesamten Schlacke, so dass für den Rost im Allgemeinen keine mengenmäßigen Risiken bestehen, jedoch bleiben die bei einer Rückführung von Fein- und Feinstkorn genannten Risiken der Abrasion auch in diesem Fall grundsätzlich gültig.

6.4 Plasma-Schmelz-Verfahren

Die Technologie der Plasma-Verglasung kann für die Inertisierung unterschiedlicher gefährlicher Abfälle sowie für weitere industrielle Anwendungen wie in Hochöfen, Gießereischachtofen und ähnlichem angewendet werden, in denen der Einsatz von Luft bei hohen Temperaturen erforderlich ist.

Bei der thermischen Nachbehandlung in einer separaten Feuerung (additives Schmelzverfahren) sind deutlich höhere Temperaturen als in der Hauptfeuerung nötig, um die Schlacke einschmelzen und deren Qualität verbessern zu können. Solche Hochtemperatur-

Verfahren werden entweder fossil befeuert (z.B. KUBOTA Melting Surface Furnace) oder, wie nachfolgend beispielhaft beschrieben, elektrisch beheizt (z.B. durch Plasma-Brenner), um die Schlacke einschmelzen und verglasen zu können.

Bei Verbrennungsrückständen, wie der hier betrachteten Schlacke bewirken die vom Plasmabrenner freigesetzten hohen Temperaturen die Verglasung des Einsatzmaterials. Ob dieses wie andere Sekundärrohstoffe beispielsweise im Straßenbau oder als Baustoffplatten, Pflaster oder Gehwegbegrenzungen verwertet werden kann, bleibt Einzelfallprüfungen hinsichtlich der bautechnischen Eigenschaften vorbehalten.

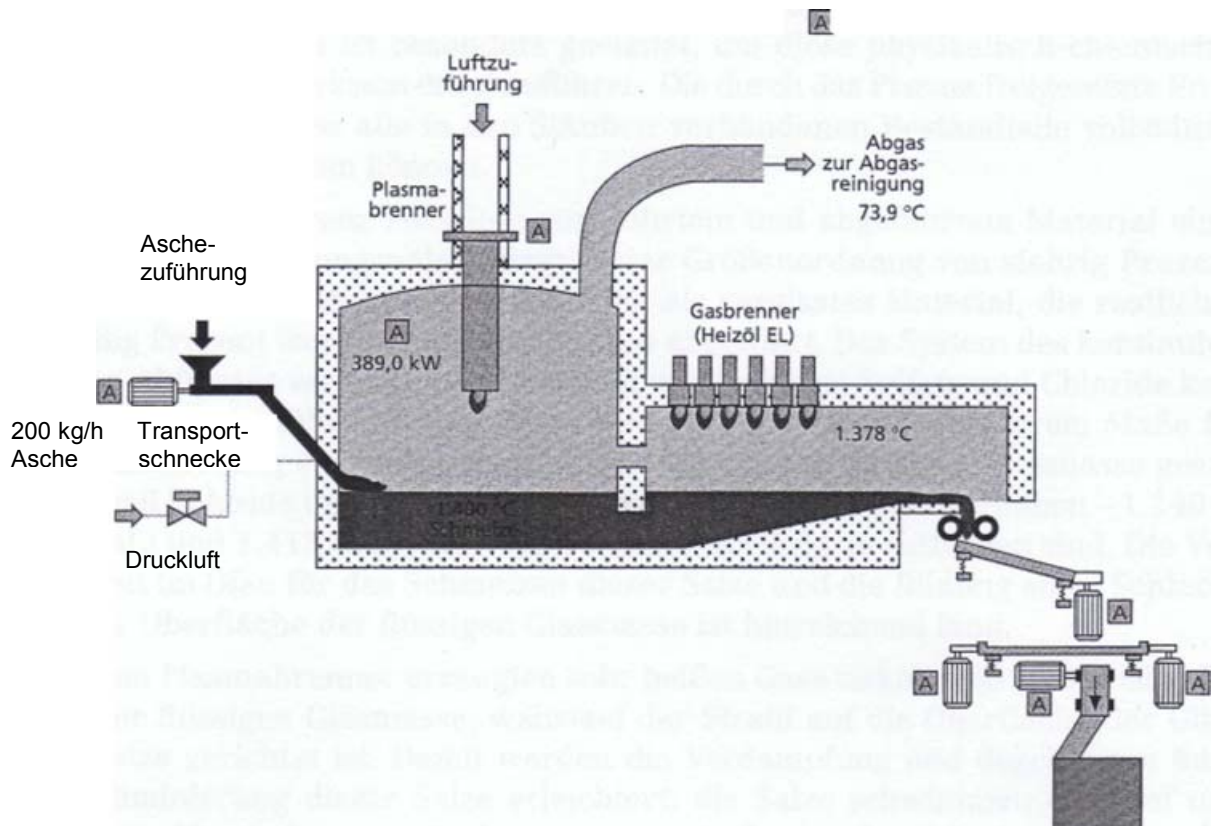
Die Anlage zur Behandlung von Schlacke besteht aus zwei Einheiten, die beide für das einwandfreie Funktionieren der Anlage und für die Qualität des verglasten Materials entscheidend sind. Es handelt sich um den Schmelzreaktor und die Gießrinne.

Da der Schmelzreaktor (Hochtemperatur-Brennkammer) eine Zusatzanlage zur Rostfeuerung darstellt, kann dieser kleiner dimensioniert werden als die Rostfeuerung. Er muss etwa 25 % des Durchsatzes der Hauptfeuerung schaffen, abhängig vom Schlackeanteil des verbrannten Abfalls. Mit einem oder mehreren Plasmabrennern, die sich auf der Oberseite des Ofens befinden, werden die idealerweise vorher von Metallen befreite Schlacke und der Kesselstaub mit einem mit Luft angeblasenen Lichtbogen erhitzt. Die Abbildung 16 zeigt ein Beispielschema eines Plasma-Ofens. Die heißen Abgase werden, anders als in Abbildung 16 dargestellt in den Kessel zur Energierückgewinnung zurückgeführt, so dass die Abgase des Plasma-Ofens, wie die Abgase der Hauptfeuerung ebenfalls die Abgasreinigung durchlaufen. In den weiteren Betrachtungen dieses Verfahrens wird die Zuführung der zusätzlichen Abgase aus dem Plasma-Ofen in den Kessel der Rostfeuerung berücksichtigt.

Durch eine Vorabtrennung von Eisen und Nichteisen-Metallen aus der Schlacke können diese Stoffe zu einem großen Teil wiedergewonnen und der Plasma-Ofen entlastet werden.

Wird diese Vorabtrennung nicht vorgenommen, so wird das Metall mit eingeschmolzen, sammelt sich am Boden des Schmelzreaktors und kann durch einen Abstich aus dem Ofen analog zum Hochofen gewonnen werden. Dadurch kann zwar prinzipiell der größte Teil des in der Schlacke enthaltenen Metalls zurückgewonnen werden. Allerdings liegen dann alle Metalle in einer Legierung mit den Hauptbestandteilen Eisen und Kupfer vor, so dass diese nicht direkt weiterverarbeitet werden können. Die Möglichkeit der Vermarktung einer solchen Legierung mit schwankender Zusammensetzung erscheint zumindest fraglich.

Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung eines Plasma-Schmelzofens



Quelle: [ROS2004]

6.5 Verfahrensvergleich im Fokus des Klima- und Ressourcenschutzes

Im Rahmen der nachfolgenden vergleichenden Untersuchung der drei Verfahren untereinander und mit einer konventionellen MVA im Fokus des Klima- und Ressourcenschutzes wird sowohl ein technisch-wirtschaftlicher und energetischer Vergleich als auch eine Darstellung und Bewertung der erreichbaren Schlackenqualitäten vorgenommen.

Zunächst wird die Vorgehensweise und Methodik näher erläutert.

6.5.1 Vorgehensweise und Methodik

Der Vergleich der in diesem Sachverständigengutachten näher betrachteten Verfahren erstreckt sich sowohl auf technische, wirtschaftliche und energetische Gesichtspunkte als auch auf die erreichbaren Schlackenqualitäten.

Mit Hilfe von Recherchen (Internet, Literatur), eigenen Erfahrungen sowie eigenen Modellrechnungen (Massenbilanzen, Energiebilanzen, statischen Betriebskostenrechnungen, etc.) können vergleichende Bewertungen insbesondere zu folgenden Gesichtspunkten vorgenommen werden:

- Abgasvolumenstrom,
- Luftschadstoffe (Emissionsfrachten am Kamin): hier beispielhaft HCl und SO₂,
- Spezifische Behandlungskosten,
- Bedarf an Betriebsmitteln: hier am Beispiel Kalkhydrat,
- Elektrischer Energieeigenbedarf,
- Strom-Nettoabgabe,
- Energetischer Beitrag (KEA) der Ressourcenschonung (Metalle),
- Schlackequalität (Eluatwerte).

Dafür wurden u.a. die betrachteten Verfahren modellmäßig abgebildet.

Die Modell-Anlagen wurden mit Hilfe eines Stoffstromrechenmodells nach folgender Methodik berechnet. Die Prozesse sind modular aufgebaut und erlauben eine Berechnung der Stoff- und Energieumwandlung in Abhängigkeit von den definierten Eigenschaften des Abfallinputs und verfahrensspezifischer Parameter.

Parameter, die für alle Modell-Anlagen gelten, wurden möglichst auf Durchschnittswerte aus bestehenden Anlagen eingestellt. Anlagenspezifische Parameter wurden aus Angaben aus der Literatur, von Betreibern und ggf. aus eigenen Erfahrungen ermittelt. Abweichungen von anderen Modell- und Realwerten sind daher unausweichlich. Die Vergleichbarkeit zwischen den hier gewählten Modell-Anlagen bleibt aber erhalten. Die Genauigkeit der Modelle reicht aus, um die unterschiedlichen Anlagenkonzepte sinnvoll miteinander zu vergleichen und die Unterschiede in einem qualitativen bis quantitativen Umfang herauszuarbeiten.

Die Prozessmodule sind anhand bestimmbarer und festzulegender Parameter auf das jeweilige Verfahren konfigurierbar.

Die hier genannten Grundsätze der Modellierung sind auf alle in diesem Gutachten dargestellten Bilanzen (siehe Anhang, Kapitel 9.2, Abbildung 17 bis Abbildung 24) zu übertragen. Die wichtigsten Modellparameter sind im Anhang; Kapitel 9.1 Tabelle 22, zu finden.

6.5.2 Ergebnisse des technisch-wirtschaftlichen und energetischen Vergleichs

Um die Auswirkungen der betrachteten Verfahren auf Verbrennungstechnik und die Stoff- und Energieströme zu veranschaulichen, wurde für jedes Verfahren eine Massenbilanz (Abbildung 17, Abbildung 19, Abbildung 21, Abbildung 23) sowie jeweils eine Energiebilanz (Abbildung 18, Abbildung 20, Abbildung 22, Abbildung 24) angefertigt.

Die Voraussetzungen sind für sämtliche Modell-Anlagen gleich. Der eingesetzte Abfall entspricht der Spezifikation aus Tabelle 12 bei einem Durchsatz von 10,7 Mg/h. Außer bei den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Verfahren (z.B. Kesselwirkungsgrad) werden alle übrigen Parameter konstant gehalten (siehe Tabelle 22 im Anhang, Kapitel 9.1).

Aus den Bilanzen kann ein Vergleich der konventionellen Modell-MVA, mit der Modell-SYNCOM-Anlage, der Modell-SYNCOM-Plus-Anlage, jeweils mit Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung, und der konventionellen Modell-MVA mit Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung sowie nachgeschaltetem Modell-Plasma-Schmelz-Ofen in Hinblick auf die Abgasvolumenströme, auf Emissionsfrachten, die spezifischen Behandlungskosten sowie den Bedarf an Betriebsmitteln und Energie auf den Gesamtanlagenbetrieb vorgenommen werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Vergleich der Verfahren (Abgas, Emissionen, Betriebsmittel, Energie, Kosten)

	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung	SYNCOM-Verfahren + Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung	SYNCOM-Plus-Verfahren + Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht-Eisenmetallabtrennung + Plasma-Schmelz-Verfahren
Abgasvolumenstrom	ca. 5.700 Nm ³ /Mg _{Abfall}	ca. 3.700 Nm ³ /Mg _{Abfall}	ca. 3.700 Nm ³ /Mg _{Abfall}	ca. 5.750 Nm ³ /Mg _{Abfall}
Luftschadstoffe (Emissionsfrachten am Kamin); ca.	HCl: 0,54 kg/h SO ₂ : 2,68 kg/h	HCl: 0,32 kg/h SO ₂ : 1,60 kg/h	HCl: 0,32 kg/h SO ₂ : 1,60 kg/h	HCl: 0,54 kg/h SO ₂ : 2,69 kg/h
Bedarf an Betriebsmitteln: Kalkhydrat	ca. 141 kg/h	ca. 150 kg/h	ca. 157 kg/h	ca. 205 kg/h
Elektrischer Energieeigenbedarf	ca. 128 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 211 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 218 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 556 kWh/Mg _{Abfall}
Strom-Nettoabgabe	ca. 536 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 466 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 455 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 112 kWh/Mg _{Abfall}
Energetischer Beitrag* der Ressourcenschonung (Metalle)	182 kWh/Mg _{Abfall}	182 kWh/Mg _{Abfall}	182 kWh/Mg _{Abfall}	182 kWh/Mg _{Abfall}
Spezifische Behandlungskosten	ca. 74,50 €/Mg _{Abfall}	ca. 80 €/Mg _{Abfall}	ca. 82 €/Mg _{Abfall}	ca. 102,50 €/Mg _{Abfall}

* KEA fossil

Das SYNCOM- und das SYNCOM-Plus-Verfahren haben im Vergleich mit den konventionellen Verfahren (auch inkl. Plasma-Schmelz-Ofen) den geringsten Abgasvolumenstrom (etwa ein Drittel unterhalb der konventionellen MVA) bei gleichen Voraussetzungen. Unter der Modellannahme, dass alle Modell-Anlagen die gesetzlichen deutschen Grenzwerte (17. BImSchV.) „nur“ exakt einhalten müssen, und nicht - wie in der Realität üblich - diese deutlich unterschreiten, liegen die Frachten der Luftschadstoffe am Kamin, d.h. im Reingas, aus demselben Grund beim SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren etwa ein Drittel unterhalb der konventionellen MVA. Die beim konventionellen Verfahren mit Plasma-Schmelz-Ofen gegenüber der konventionellen MVA sehr leicht erhöhten Werte für Abgasvolumenstrom und Frachten der Luft-

schadstoffe im Reingas resultieren daraus, dass die Abgase des Plasma-Ofens in den Kessel und damit der Abgasreinigung der Hauptfeuerung zusätzlich zugeführt werden.

Die Sauerstoffgehalte des Abgases aller hier betrachteten Anlagen liegen weit unterhalb von 11 Vol.-% trocken, so dass zur Bestimmung der Emissionskonzentrationen keine Umrechnung auf 11 Vol.-% Sauerstoff erfolgen darf.

Durch das SYNCOM-Verfahren werden die Kessel- und Flugaschemengen gemindert, da der Abfall auf dem Rost durch die hohen Temperaturen besser ausbrennt. Die Abgasmengen beim SYNCOM-Verfahren sind durch Sauerstoffanreicherung und Abgasrezirkulation um etwa 30 bis 35 % geringer als bei der konventionellen Rostfeuerung. Dies führt zusammen mit dem höheren Transfer der Schadstoffe ins Abgas durch die höheren Temperaturen zu einer Aufkonzentration der Luftschadstoffe vor der Abgasreinigung. Damit müssen gezwungenermaßen in der Abgasreinigung mehr Schadstoffe abgeschieden werden, um die Modellannahme der exakten Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte zu erreichen. Die Modellrechnungen haben bei der Modell-SYNCOM-Anlage für Kalkhydrat eine leichte Erhöhung um ca. 6,5% gegenüber der Modell-MVA ergeben. Dadurch steigen auch die Reaktionsproduktmengen (in denen auch die gegenüber der konventionellen MVA geringeren Flugaschemengen enthalten sind).

Bei dem SYNCOM-Plus-Verfahren werden die Flugaschemengen im Wesentlichen durch die Rückführung eines Großteils der Kessel- und Flugasche (zusammen mit den Feinanteil der Schlacke) in die Feuerung deutlich verringert. Durch diese Rückführung sowie die geringeren Abgasmengen in Verbindung mit einem höheren Transfer der Schadstoffe ins Abgas durch die hohen Brennbetttemperaturen durch Sauerstoff-Anreicherung ergeben sich gegenüber der konventionellen MVA, aber auch gegenüber dem SYNCOM-Verfahren, erhöhte Rohgaskonzentrationen, so dass in der Abgasreinigung mehr Schadstoffe aus dem Abgas abgeschieden werden müssen. Daher erhöht sich bei der Modell-SYNCOM-Anlage der Bedarf an Kalkhydrat gegenüber der Modell-MVA moderat um ca. 11,5%, und dadurch auch die Menge an Reaktionsprodukten.

Bei der thermischen Nachbehandlung der Schlacke im Plasma-Schmelz-Ofen wird der größte Teil der in der Schlacke enthaltenen Schwermetalle und auch der gebundene Schwefel sowie das Chlor durch die hohen Temperaturen im Schmelzofen in das Abgas transferiert. Durch diesen sehr hohen Transfer ins Abgas ergeben sich höhere Frachten im Abgas, die durch einen höheren Verbrauch an Additiven gemindert werden müssen. Der Bedarf an Additiven für die Abgasreinigung (z.B. Kalkhydrat und Herdofenkoks) steigt aufgrund dieser Tatsache deutlich um ca. 52,5 % ge-

genüber der konventionellen MVA, und dadurch auch die Menge an Reaktionsprodukten.

Im Fokus des Klimaschutzes werden die untersuchten Verfahren in Hinblick auf den jeweils benötigten elektrischen Eigenbedarf der Modell-Anlagen sowie deren jeweilige Strom-Nettoabgabe verglichen und bewertet.

Der Vergleich erfolgt auf Grundlage der Energiebilanzen der Modell-Anlagen (Abbildung 18, Abbildung 20, Abbildung 22, Abbildung 24).

Zunächst kann festgestellt werden, dass sowohl die SYNCOM- als auch die SYNCOM-Plus-Anlage aufgrund des höheren Kesselwirkungsgrads eine höhere Dampferzeugung als konventionelle MVA ohne und mit Plasma-Schmelz-Ofen. Aufgrund der Zuführung der Abgase des Plasma-Schmelz-Ofens in den Kessel zur Energierückgewinnung ergibt sich für diese Kombination eine leicht höhere Dampferzeugung als bei der Einzelbetrachtung der konventionellen MVA.

Energieintensive Zusatzanlagen führen im Vergleich zur konventionellen MVA zu stark erhöhtem Energieeigenbedarf beim SYNCOM-Verfahren (ca. 65 % Erhöhung), beim SYNCOM-Plus-Verfahren (ca. 70 % Erhöhung) und beim Plasma-Schmelz-Verfahren (ca. 335 % Erhöhung).

Die Verfahren SYNCOM und SYNCOM-Plus haben zum Ziel, genügend hohe Temperaturen zur Erzeugung der gewünschten Sintereffekte im Brennbett zu erzeugen und dabei einen möglichst moderaten Energiebedarf zu benötigen.

Die Luftzerlegeanlage (VPSA) erzeugt jedoch bei beiden Verfahren einen höheren Stromeigenbedarf. Die Einsparung an elektrischer Energie beim Saugzug durch eine niedrigere Abgasmenge kann den hohen Strommehrbedarf (ca. 13 % der Generatorklemmenleistung) durch die Luftzerlegeanlage nicht kompensieren. Bei dem SYNCOM-Plus-Verfahren erhöht sich der Energiebedarf durch die Anlagen der nass-mechanischen Schlackeaufbereitung und die Rückführung eines Großteils der Kessel- und Flugasche zusammen mit den Feinanteil der Schlacke in die Feuerung gegenüber dem SYNCOM-Verfahren noch einmal, jedoch sehr moderat (um etwa 1 % der Generatorklemmenleistung). Als Folge der Einsparung an elektrischer Energie beim Saugzug sowie stark erhöhtem Energieeigenbedarf reduziert sich im Vergleich zur konventionellen MVA die Stromnetto-Abgabe des SYNCOM-Verfahrens um ca. 13 % und des SYNCOM-Plus-Verfahrens um ca. 15 %.

Das Plasma-Schmelz-Verfahren setzt die Akzente auf eine kompromisslose Erfüllung der Verbesserung der Schlackequalitäten

ohne Rücksicht auf den Energieeigenbedarf.

Der Plasma-Schmelz-Ofen benötigt etwa 1.950 kWh_{el}/Mg Schlacke und ist daher das energieintensivste der im Rahmen dieses Gutachtens vorgestellten Verfahren [ROS2004]. In Abbildung 24 kann man den hohen elektrischen Eigenbedarf des Plasma-Schmelz-Ofens erkennen. Dieser macht etwa 64% der erzeugten elektrischen Energie (7,15 MW) aus. Im Vergleich zur konventionellen MVA reduziert sich die Stromnetto-Abgabe der Kombination mit Plasma-Schmelz-Ofen um ca. 80 %.

Unter dem Aspekt Klimaschutz schneidet hier die konventionelle MVA moderat besser ab als SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren und diese drei deutlich besser als die Kombination aus konventionelle MVA und Plasma-Schmelz-Verfahren.

Die höhere Energieeffizienz der konventionellen MVA, erkennbar an der höchsten Stromnettoabgabe bei gleichen Voraussetzungen, führt zu einem geringeren spezifischen CO₂-Ausstoß und damit zu einer Schonung des Klimas.

Vergleichende Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der betrachteten Verfahren werden über die jeweils spezifischen Abfallbehandlungskosten getroffen. Zur Erläuterung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der spezifischen Abfallbehandlungskosten sei auf den Anhang (Kapitel 9.3) verwiesen.

Bei dem Vergleich werden Anlagen miteinander verglichen, die die gleiche Durchsatzleistung (bzw. Feuerungswärmeleistung) haben. Dabei wird die SYNCOM-Anlage als mit etwa 1 Mio. € höheren Investitionskosten gegenüber einer konventionellen MVA angesetzt, da diese zum einen durch die Luftzerlegeanlage zusätzlichen Investitionsbedarf hat, zum anderen diese aber einen kleineren Kessel und eine kleinere Abgaseinigung benötigt. Eine einzelne Luftzerlegeanlage in der Größe für eine Anlage mit 80.000 Jahrestonnen wird mit etwa 4 Mio. € angegeben [MAR2006]. Die SYNCOM-Plus-Anlage wird gegenüber der SYNCOM-Anlage aufgrund der nass-mechanischen Schlackeaufbereitung mit etwa zusätzlich 1 Mio. € höheren Investitionskosten angesetzt.

Der Plasma-Schmelz-Ofen mitsamt Anbindung an die konventionelle MVA wird mit zusätzlichen Investitionskosten in Höhe von etwa 3 Mio. € angenommen.

Da sowohl Investitions- als auch Energieerlöse einen großen Anteil an den spezifischen Abfallbehandlungskosten haben, haben SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren moderat höhere Abfallbehandlungskosten und die konventionelle MVA mit Plasma-Schmelz-Ofen signifikant höhere Abfallbehandlungskosten als die konventionelle MVA.

Die ermittelten spezifischen Abfallbehandlungskosten einer konventionellen MVA ergeben im Vergleich zum SYNCOM-Verfahren um etwa 5,50 €/Mg Abfall niedrigere Behandlungskosten, während der Unterschied zwischen dem SYNCOM-Plus-Verfahren und konventioneller MVA bei etwa 7,50 €/Mg Abfall liegt.

Durch die höheren Investitionskosten und insbesondere niedrige Energieerlöse aufgrund der geringen Strom-Nettoabgabe steigen die Behandlungskosten des Abfalls durch eine konventionelle MVA mit Plasma-Schmelz-Verfahren zur thermischen Nachbehandlung der Schlacke um ca. 28 €/Mg Abfall im Vergleich zu einer konventionellen MVA.

Unter dem Aspekt Ressourcenschutz liegen die betrachteten Verfahren gleichauf, da die Metalle entweder im Prozess (SYNCOM-Plus), nachträglich (konventionelle MVA, SYNCOM, SYNCOM-Plus) oder zwischen den beiden thermischen Behandlungsstufen (konventionelle MVA mit Plasma-Schmelz-Verfahren) aus der Schlacke entfernt werden.

Der energetische Beitrag der Abtrennung von Eisen und der Nicht-Eisenmetalle wurde aus dem fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die in diesem Gutachten betrachteten Modell-Anlagen mit der definierten Abfallzusammensetzung aus Tabelle 12 (Kapitel 5) berechnet und kann daher der Einsparung von fossilem CO₂ zugeordnet werden. Für die betrachteten Verfahren beträgt der KEA fossil jeweils 182 kWh/Mg Abfall. Die spezifischen Beiträge zur Energieeinsparung durch Metallabtrennung statt Metallneuproduktion sind gegenüber der Netto-Stromabgabe signifikant, so dass die größtmögliche Abtrennung von Metallen aus der Schlacke den größten positiven Einfluss auf den Klimaschutz hat. Im Anhang (Kapitel 9.4) wird die Berechnung des energetischen Beitrags der Ressourcenschonung kurz erläutert.

Fasst man den energetischen Beitrag des Ressourcenschutzes und die Netto-Stromabgabe als Maß für die Energieeffizienz einer Anlage zusammen, so lässt sich das Ranking der betrachteten Verfahren in Hinblick auf Klimaschutz folgendermaßen ableiten. Energieintensivstes und damit schlechtestes Verfahren ist die konventionelle Rostfeuerung mit Plasma-Schmelz-Ofen. Das SYNCOM-Plus-Verfahren erzielt gegenüber der konventionellen Rostfeuerung mit Plasma-Schmelz-Verfahren einen energetischen Vorteil von ca. 340 kWh/Mg Abfall, das SYNCOM-Verfahren einen energetischen Vorteil von ca. 350 kWh/Mg Abfall. Für eine konventionelle MVA ergibt sich gar ein energetischer Vorteil von ca. 420 kWh/Mg Abfall gegenüber der konventionellen Rostfeuerung mit Plasma-Schmelz-Ofen.

Betrachtet man also die Verfahren „konventionelle MVA“, „SYNCOM-Verfahren“, „SYNCOM-Plus-Verfahren“ und „konventionelle Rostfeuerung mit Plasma-Schmelz-Ofen“ in Hinblick auf Klima-

schutz, so ergibt der Vergleich, dass vor allem aufgrund des hohen Energiebedarfs die konventionelle Rostfeuerung mit Plasma-Schmelz-Verfahren am ungünstigsten abschneidet. Das SYNCOM-Plus-Verfahren landet unter dem genannten Gesichtspunkt auf Platz 3, das SYNCOM-Verfahren auf Platz 2 und die konventionelle Müllverbrennung auf Platz 1.

Um den Klima- und Ressourcenschutz, der von der Metallrückgewinnung ausgeht, zu verdeutlichen, wird nachfolgend die in diesem Sachverständigengutachten aufgrund des Standes der Technik der Aufbereitungsanlagen als sinnvoll möglich betrachtete Metallabtrennung der tatsächlichen derzeitigen (Stand 2008) gegenübergestellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Eisen-Metallabtrennung bereits heute bei knapp unter 100% liegt, wird der Fokus auf der Nichteisen-Metallabtrennung liegen.

Legt man die in diesem Gutachten betrachtete definierten Abfallzusammensetzung aus Tabelle 12 (Kapitel 5) zu Grunde, so enthält 1 Mg Abfall etwa 0,5 % Nichteisen-Metalle. Bei einer sich aus der Massebilanz einer konventionellen MVA ergebenden feuchten Schlackemenge von ca. 25 % des Abfallinputs ergibt sich ein Anteil von NE-Metallen in der Schlacke von ca. 2 Gew.-%. Eine Gesamtschlackemenge aus MVA und EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung in Deutschland im Jahr 2009 in Höhe von ca. 5,2 Mio. Mg (Abbildung 6) enthält somit ca. 104.000 Mg NE-Metalle.

Unter der in diesem Gutachten auf Grundlage des dargestellten und bewerteten Standes der Technik der Schlackeaufbereitung (Kapitel 5) getroffenen Annahme, dass eine NE-Metallabtrennung von 50 % sinnvoll und technisch ohne großen Aufwand möglich erscheint, ergibt sich eine rückgewinnbare NE-Metallmenge von ca. 52.000 Mg/a.

Die bereits mehrfach zitierte Untersuchung der ITAD [ITAD2009] ergab für 2008 einen in den deutschen Anlagen tatsächlich abgetrennten NE-Metall-Anteil an der Schlacke von 0,67%. Diesen Anteil auf die oben genannten Gesamtschlackemenge ergibt eine tatsächliche NE-Metallabtrennung von ca. 35.000 Mg/a, sodass allein aus deutschen Rostfeuerungsanlagen ca. 17.000 Mg/a (etwa 50 %) an NE-Metallen gegenüber heute durch konsequenteren Einsatz des Standes der Technik bei der NE-Metallabtrennung im Rahmen der Schlackeaufbereitung zusätzlich rückgewonnen werden könnten.

Unter der Annahme, dass sämtliche anderen NE-Metalle gegenüber Kupfer und Aluminium mengenmäßig vernachlässigbar sind, ergibt sich für die zusätzlich rückgewinnbare Menge an NE-Metallen in Höhe von 17.000 Mg/a ein kumulierter Energieaufwand, der den nötigen Energieaufwand für den Herstellungsprozess durch Nutzung von Primärenergieträgern beschreibt, als

energetischer Beitrag durch Ressourcenschonung in einer Größe von ca. 50.000 MWh/a.

6.5.3 Ergebnisse der erreichbaren Schlackequalität

Zur Beurteilung der erreichbaren Schlackequalität hinsichtlich Eluierbarkeit und bauphysikalischen Eigenschaften wurde für die betrachteten Verfahren eine Internet- und Literaturrecherche sowie Befragungen von Herstellern und Betreibern durchgeführt.

Tabelle 19 zeigt Schlackequalitäten der betrachteten Verfahren im Vergleich zu aufbereiteter MVA-Schlacke in Form von Eluatwerten. Während der linke Tabellenteil die Eluatwerte aufbereiteter MVA-Schlacken der Tabelle 15 wiedergibt, werden diesem im rechten Tabellenteil Werte für 12 Wochen gealterte Schlacke des SYNCOM-Verfahrens, Werte für nicht gealtertes SYNCOM-Plus-Granulat sowie Werte für nicht gealterte Schlacke aus einer Plasma-Schmelz-Versuchsanlage gegenüber gestellt.

Tabelle 19: Schlackequalitäten der betrachteten Verfahren im Vergleich zu aufbereiteter MVA-Schlacke (Eluatwerte)

Parameter	Einheit	Deutschland LAGA Merkblatt M19 (1994)	konventionelle Aufbereitung, mittlere Schwankungs- breite [ITAD2009]	MVR (Mittelwert 2001 - 2004, konventionelle Aufbereitung) [ZWA2006]	Schlacke, weitergehend aufbereitet nach Scherer + Kohl [LUE2004]	SYNCOM- Schlacke, 12 Wochen gealtert, [FES2005]	SYNCOM-Plus- Granulat, nicht gealtert, (Mittel- wert) [MAR2004]	Schlacke- schmelz- produkt, nicht gealtert, Versuchsanlage [ROS2004]
Arsen	mg/kg	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	< 0,1	0,1	0,01
Barium	mg/kg	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	2	0,06
Blei	mg/kg	0,5	k.A.	u.N.	u.N.	< 0,08	0,1	0,01
Cadmium	mg/kg	0,05	k.A.	u.N.	u.N.	< 0,01	0,01	0,001
Chlorid	mg/kg	2.500	1000 - 4000	810	290	740	216	10
Kupfer	mg/kg	3	1 - 5	0,85	u.N.	0,22	0,3	0,01
Nickel	mg/kg	0,4	k.A.	u.N.	u.N.	< 0,01	0,2	0,01
Quecksilber	mg/kg	0,01	k.A.	k.A.	u.N.	< 0,01	0,002	0,0005
Selen	mg/kg	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,1	0,1	0,01
Sulfat	mg/kg	6.000	2000 - 6000	1.510	430	655	k.A.	15
Zink	mg/kg	3	1 - 3	0,35	u.N.	0,15	k.A.	k.A.

u.N. - Mehrheit der Werte unter Nachweisgrenze; k.A. - keine Angabe

Quelle: [ITAD2009; ZWA2006; LUE2004; FES2005; MAR2004, ROS2004]

Während die Eluatwerte der aufbereiteten MVA-Schlacken bereits im Kapitel 5.3 diskutiert und bewertet wurden, sollen nachfolgend die Eluatwerte der Schlacken der alternativen thermischen Abfallbehandlungsverfahren einer vergleichenden Bewertung unterzogen werden.

Spalte 7 zeigt Eluatwerte von 12 Wochen gealterter Schlacke aus einer realisierten SYNCOM-Anlage in Österreich (TBA Arnoldstein) [FES2005].

Zunächst zeigt sich, dass sämtliche Eluatwerte der gealterten SYNCOM-Schlacke die Parameter, die in den LAGA-Merkblättern festgelegt wurden, deutlich unterschreiten.

Im Vergleich zu konventionell aufbereiteter, gealterter Schlacke aus einer konventionellen MVA, für die nur für 4 Parameter (Chlo-

rid, Kupfer, Sulfat, Zink) angegeben sind, zeigt sich die Stärke des SYNCOM-Verfahrens. Durch die Teilversinterung der Schlacke aufgrund höherer Betttemperaturen werden Schadstoffe beim SYNCOM-Verfahren besser in die Schlacke eingebunden bzw. immobilisiert. Dies führt zusammen mit bei der Alterung der Schlacke ablaufenden Hydratations-, Karbonatisierungs- und Oxidationsprozessen zu einer geringeren Eluierbarkeit der Schadstoffe. Leicht lösliche Salze sind zwar weiterhin Teil der teilgesinterten SYNCOM-Schlacke, werden jedoch durch die hohen Temperaturen des SYNCOM-Verfahrens weitgehend immobilisiert.

Zu dieser Schlussfolgerung kommt auch eine Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen aus den Jahre 2002 aufgrund von großtechnischen Versuchen mit dem SYNCOM-Verfahren an einer bayrischen MVA: „Auch die Verbesserung der Schlackequalität konnte nachgewiesen werden. Durch den höheren Anteil gesinteter Fraktionen und der damit einhergehenden stärkeren Immobilisierung war auch die Auslaugbarkeit der eingeschlossenen Schwermetalle geringer“ [BSM2002].

In der SYNCOM-Plus-Schlacke, nachfolgend aufgrund der Vollversinterung als SYNCOM-Plus-Granulat (wie vom Verfahrensggeber) bezeichnet, liegen aufgrund der nassmechanischen Aufbereitung die alterungsempfindlichen Bestandteile (Feinanteile) nicht mehr vor. Somit ist die Unterscheidung (frisch / gealtert) hier, wie auch bei Schmelzgranulaten, nicht aussagekräftig.

Die in Spalte 8 dargestellten Qualitäten des SYNCOM-Plus-Granulats stammen aus großtechnischen Versuchen an einer bestehenden MVA. Sie sind deshalb nur bedingt pauschalisierbar.

Das SYNCOM-Plus-Verfahren, als eine Weiterentwicklung des SYNCOM-Verfahrens mit der Teilversinterung zur Vollversinterung, unterschreitet mit den in Spalte 8 dargestellten Eluatwerten, die sich im Wesentlichen nur im Rahmen der Messgenauigkeit von denen der gealterten Schlacke des SYNCOM-Verfahrens unterscheiden, die Eluatwerte konventionell aufbereiteter, gealterter Schlacke aus einer konventionellen MVA ebenfalls deutlich. Auffallend gegenüber der SYNCOM-Schlacke ist die nochmalige Verbesserung der Eluatwerte für Chlorid und Quecksilber. Leicht lösliche Salze, wie Chlorid, sind auch bei diesem Verfahren weiterhin Teil des vollgesinterten Granulats, wurden jedoch erstens teilweise bei der nass-mechanischen Aufbereitung ausgewaschen und zweitens durch die hohen Temperaturen des SYNCOM-Plus-Verfahrens weitestgehend immobilisiert. Der noch einmal geminderte Quecksilber-Eluatwert kann mit der Rückführung des Feinanteils des aufbereiteten Granulats (zusammen mit dem Großteil an Kessel- und Flugasche) in die Feuerung erklärt werden, da durch das nochmalige Durchlaufen der Verbrennung dieser Fraktion, in der sich im Allgemeinen die Hauptschadstoffmengen befinden, bei

hohen Brennbetttemperaturen weiteres Quecksilber in die Gasphase übergeht.

Es muss aber betont werden, dass grundsätzlich die Schlackequalitäten auch stark vom eingesetzten Abfall abhängen, was man an stark schwankenden Schlackequalitäten bei verschiedenen MVA mit vergleichbarer Technik (siehe Spalte 4: konventionelle Aufbereitung, mittlere Schwankungsbreite [ITAD2009]) erkennen kann.

Das Granulat, welches beim Plasma-Schmelzverfahren entsteht, ist im Prozess vollständig geschmolzen und beinhaltet wegen der sehr hohen Behandlungstemperaturen nur sehr geringe Mengen an organischen Bestandteilen, Schwermetallen und leicht löslichen Salzen. Die in Spalte 9 angegebenen Eluatwerte aus einer Versuchsanlage liegen fast durchgehend um ca. den Faktor 10 unterhalb der Eluatwerte für das SYNCOM-Plus-Granulat. Die Daten aus [ROS2004] beziehen sich zwar auf geschmolzene Filteraschen, es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch mit Rostaschen entsprechende Eluatwerte erreicht werden können. Dieser Aussage könnte allerdings entgegen stehen, dass in Japan vielfach die Rückstände aus nachgeschalteten Ascheschmelzanlagen trotzdem nicht die japanischen Kriterien für die Verwertung erfüllen und deponiert werden müssen. Die genauen Gründe hierfür sind den Gutachtern nicht bekannt. Ein möglicher Grund könnte aber in den bauphysikalischen Eigenschaften liegen, auf die später noch näher eingegangen wird.

Die Eluatwerte für Kupfer als Beispiel für ein Schwermetall sowie für Chlorid als Beispiel für ein leicht lösliches Anion sind für jedes Verfahren angegeben und eignen sich somit gut für eine Gegenüberstellung.

Die Reihenfolge der Eluatwerte für Kupfer sieht folgendermaßen aus:

Plasma-Schmelz- Verfahren "Scherer + Kohl"	SYNCOM SYNCOM-Plus	„Schlackeaufberei- tung MVR“	MVA mit konventio- neller (trockener) Schlackeaufberei- tung
besser			schlechter

Die Reihenfolge der Eluatwerte für Chlorid sieht folgendermaßen aus:

Plasma-Schmelz- Verfahren	SYNCOM-Plus "Scherer + Kohl"	SYNCOM „Schlackeaufberei- tung MVR“	MVA mit konventio- neller (trockener) Schlackeaufbereitung
besser			schlechter

Das Plasma-Schmelz-Verfahren zeigt bei allen Parametern die besten Eluatwerte, SYNCOM, SYNCOM-Plus und Scherer + Kohl bewegen sich im oberen Mittelfeld, während die MVA mit konventioneller (trockener) Schlackeaufbereitung hinsichtlich der Eluatwerte zwar schlechter abschneidet, die deutschen Anforderungen an die Eluierbarkeit von Schlacken zur Verwertung im Allgemeinen aber erreicht.

Neben den Eluatwerten sind auch die bauphysikalischen Eigenschaften ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Verwertbarkeit der Schlacken bzw. Granulate.

Die teilversinterte und damit weitgehend mineralische SYNCOM-Schlacke hat gute bauphysikalische Eigenschaften durch einen geringen Anteil an Feinkorn und hohe Volumenstabilität. Es dürfte mit den bauphysikalischen Eigenschaften konventionell aufbereiteter MVA-Schlacke vergleichbar sein. Nach Aussage des Lieferanten erfüllt die SYNCOM-Schlacke die Anforderungen, die an eine Schlackeverwertung in Deutschland zu stellen sind.

Das vollgesinterte, daher weitestgehend mineralische, SYNCOM-Plus-Granulat hat gute bauphysikalische Eigenschaften durch noch weniger Feinkorn als die SYNCOM-Schlacke. Es erfüllt laut Verfahrensgeber die Anforderungen, die an eine Verwertung als Baustoff in Deutschland gestellt werden.

Dies wird auch durch den Prüfbericht „Untersuchung von SYNCOM-Plus-Granulat hinsichtlich bautechnischer Eigenschaften“ des Materialprüfungsamtes für das Bauwesen, Abteilung Baustoffe, Technische Universität München, [TMU2008] bestätigt: „Es wurde ein industrielles Nebenprodukt (Hausmüllverbrennungsasche; HMVA) als Gesteinskörnung für Schichten ohne Bindemittel unter Berücksichtigung der DIN EN 13242 bzw. Baustoffgemisch für Frostschutzschichten nach TL SoB-StB untersucht und bewertet: Die untersuchte Korngruppe/ Lieferkörnung entspricht einer groben Gesteinskörnung 2/22 nach TL Gestein-StB bzw. einem Baustoffgemisch 0/22 mm nach TL SoB-StB. Die Korngrößenverteilung und der Feinanteil entsprechen den Anforderungen der TL Gestein-StB an eine Lieferkörnung 0/22 für Schichten ohne Bindemittel. Die Kornformverhältnisse können im Bereich aller Kornklassen als sehr gut bezeichnet werden. Die Anforderung an die Kornform wird erfüllt. Das Gesteinsmaterial weist eine gesteinspezifisch ausreichend hohe Kornfestigkeit auf. Die Anforderung an den Widerstand gegen Zertrümmerung wird erfüllt. Das Gesteinsmaterial weist einen ausreichend hohen Frost-Tau-Widerstand auf. Die Anforderung an den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel wird erfüllt. Das Gesteinsmaterial erfüllt hinsichtlich der Raumbeständigkeit die Anforderung der TL Gestein—StB (Hebungsversuch) Baustoffgemisch 0/22 mm nach TL SoB -StB:

Die Kornverteilungslinie verläuft sehr zügig. Die Anforderung an den Anteil an gröbster Körnung für eine Lieferkörnung 0/22 wird

erfüllt. Die geforderten Kornanteile für die obersten 20 cm der Frostschutzschicht sind im Baustoffgemisch allerdings nicht vorhanden. Das Baustoffgemisch erfüllt die Anforderung an den Feinanteil (Anteil Korn $<0,063$ mm max. 5,0 M.-%).

Das bei maximaler Trockenraumdichte verdichtete Baustoffgemisch besitzt eine sehr gute Wasserdurchlässigkeit. Das Baustoffgemisch besitzt ein gesteinspezifisch typisches Tragverhalten.“

Für das SYNCOM-Plus-Verfahren sollten weitergehende Untersuchungen an einer realisierten großtechnischen Anlage durchgeführt werden, um die Ergebnisse der Untersuchungen, auch in Hinblick auf eine möglicherweise problematischere Abfallzusammensetzung auf andere Anlagen, zu verifizieren.

Die bauphysikalischen Eigenschaften des Granulats welches beim Plasma-Schmelzverfahren entsteht, können zwar aufgrund des sehr geringen Feinkornanteils als gut bezeichnet werden. Für eine höherwertige Verwertung, z.B. den Einsatz im Straßenbau ist jedoch die mangelnde Bindungsfähigkeit eines Schlackegranulats, abhängig von dessen Morphologie, möglicherweise ein Problem. Diese möglicherweise mangelnde Bindungsfähigkeit des Schmelzgranulats könnte ein Grund dafür sein, dass in Japan vielfach die Rückstände aus nachgeschalteten Ascheschmelzanlagen trotz hervorragender Eluatwerte nicht die japanischen Kriterien für die Verwertung erfüllen und deponiert werden müssen.

7 GESAMTFAZIT

Zur Einleitung des Gesamtfazits werden kurz die Vorteile (+) und Nachteile (-) stichwortartig für jedes in diesem Gutachten betrachtete Verfahren aufgeführt.

Konventionelle Rostfeuerung mit Nassentschlackung

- + gute Energieeffizienz
- + gute Metallabtrennung (sowohl Eisen als auch Nichteisenmetalle) möglich
- + eingeführtes Verfahren
- höhere Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Schlacke

Konventionelle Rostfeuerung mit Trockenentschlackung

- + gute Energieeffizienz
- + gute Metallabtrennung (sowohl Eisen als auch Nichteisenmetalle) möglich
- + geringe Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Schlacke-Grobfraktion
- bisher nur eine großtechnische Versuchsanlage
- Entsorgung oder Aufbereitung der Schlacke-Feinfraktion
- höhere Flugaschemenge

SYNCOM

- + geringe Schadstofffrachten in die Luft
- + geringere Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der SYNCOM-Schlacke
- + besserer Ausbrand der Schlacke
- + gute Metallabtrennung (sowohl Eisen als auch Nichteisenmetalle) möglich
- höherer Eigenenergiebedarf durch Luftzerlegung
- bisher nur zwei großtechnische Anlagen weltweit

SYNCOM-Plus

- + geringe Schadstofffrachten in die Luft
- + geringere Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Schlacke („SYNCOM-Plus-Granulat“) als bei SYNCOM
- + besserer Ausbrand der Schlacke als bei SYNCOM
- + gute Metallabtrennung (sowohl Eisen als auch Nichteisenmetalle) möglich
- höherer Eigenenergiebedarf durch Luftzerlegung und nass-mechanische Schlackeaufbereitung
- bisher nur eine großtechnische Anlage weltweit (nachgerüstete SYNCOM-Anlage)

Konventionelle Rostfeuerung mit Nassentschlackung, Metallabtrennung und Plasma-Schmelz-Ofen

- + geringste Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Rostschlacke (Inertstoffqualität)
- + hervorragender Ausbrand der Schlacke
- + Abtrennung von Eisen und Nichteisen-Metallen, bevor die Schlacke dem Plasma-Schmelz-Ofen zugeführt wird
- erheblicher Energiebedarf durch Plasma-Schmelzofen

Konventionelle Rostfeuerung mit Nassentschlackung und direkter Zufuhr der Schlacke zum Plasma-Schmelz-Ofen

- + geringste Eluierbarkeit von Schwermetallen aus der Rostschlacke (Inertstoffqualität),
- + hervorragender Ausbrand der Schlacke
- erheblicher Energiebedarf durch Plasma-Schmelzofen,
- keine sinnvolle Rückgewinnung von Metallen möglich

In Tabelle 20 werden die in diesem Gutachten betrachteten Verfahren zusammenfassend qualitativ miteinander verglichen. Die für den Ressourcen- und Klimaschutz besonders relevanten Kriterien sind lachsfarben markiert.

Tabelle 20: Qualitativer Gesamtvergleich der betrachteten Verfahren

Verfahren	Metall-rückge-winnung	Eluierbarkeit von Schwer-metallen aus der Rostasche	Energie-bedarf	Kessel-asche-menge	Wasser-ver-brauch	Behand-lungs-kosten	Referenzsituation	Einge-führtes Ver-fahren
Rostfeuerung mit Nassentaschung	+	o	+	o	o	+	Stand der Technik	++
Rostfeuerung mit Trockenentaschung	+	o Grobfraktion: + Feinfraktion: -	+	-	+	+	1 großtechnische Versuchsanlage 1 Anlage in Realisierung	o-
SYNCOM	+	+	o	+	o	o	Versuche an 1 groß-technischen Anlage in Europa und an 2 Anlagen in Japan 1 Anlage in Europa 1 Anlage in Japan	+
SYNCOM-Plus	+	+ bis ++	o	++	o	o	Versuche an 1 groß-technischen Anlage 1 Anlage in Europa nachgerüstet	o
Rostfeuerung + Metallabtrennung + Plasma-Schmelz-Ofen	+	++	--	++	o	-	keine Anlage bekannt	--
Rostfeuerung + Plasma-Schmelz-Ofen	-	++	--	++	o	--	keine Anlagen in Europa Anlagen in Japan	o-

Legende: ++ sehr gut + gut o durchschnittlich o- unterdurchschnittlich - mangelhaft -- sehr mangelhaft

Die bisherige Verbrennungstechnik von Müllverbrennungsanlagen in Verbindung mit der bisherigen Schlackeaufbereitungstechnik (sei es intern oder extern) ist in Hinblick auf Ressourcen- und Klimaschutz aufgrund von guter Energieeffizienz in Verbindung mit hohen Rückgewinnungsquoten von Eisen und auch von Nicht-Eisenmetallen nach wie vor als Stand der Technik zu bezeichnen. Eine noch bessere Rückgewinnung von Nicht-Eisenmetallen ist prinzipiell durch weitergehende Klassierung und Abtrennung durch Wirbelstrom- bzw. Induktionsabscheider zu erreichen.

Unter der Annahme, dass sämtliche anderen NE-Metalle gegenüber Kupfer und Aluminium in der Menge vernachlässigbar sind, ergäbe sich allein für die bestehenden MVA in Deutschland bei verbesserter Aufbereitung gegenüber der derzeitigen Rückgewinnungsquote von NE-Metallen eine zusätzlich rückgewinnbare Menge an NE-Metallen in Höhe von 17.000 Mg/a. Diese Menge entspräche einem kumulierten Energieaufwand, der den nötigen Energieaufwand für den Herstellungsprozess durch Nutzung von

Primärenergieträgern beschreibt, als energetischer Beitrag durch Ressourcenschonung in einer Größe von ca. 50.000 MWh/a.

Eine Zerkleinerung der Grobfraction vor der weiteren Klassierung könnte eine noch bessere Abscheidung von Nicht-Eisenmetallen ermöglichen. Jedoch muss bei einem solchen Vorgehen beachtet werden, dass dadurch nicht vernachlässigbare Mengen an mineralischem Feinkorn entstehen, die die bauphysikalischen Eigenschaften der aufbereiteten Schlacke negativ beeinflussen und/oder zusätzliche Stoffströme erzeugen, die nicht verwertet werden können. Energetisch und im Sinne des Ressourcenschutzes ist eine solche noch weitergehende Rückgewinnung von insbesondere Nicht-Eisenmetallen in jedem Fall sinnvoll und muss gegen die oben genannten Nachteile abgewogen werden.

Die Bandbreiten der Eluatwerte für Schlacken, die aus dieser Technik hervorgehen, sind insbesondere den unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen geschuldet, liegen aber in einem Bereich, dass eine stoffliche Verwertung, gemäß der bisher geltenden Anforderungen an die Verwertungswege in der Regel möglich ist. Dies ist daran erkennbar, dass Hausmüllverbrennungsschlacken derzeit großflächig eine bautechnische Verwertung im Erd- und Straßenbau sowie im Deponiebau erfahren. Nachgewiesene Umweltschäden durch die Verwendung von Hausmüllverbrennungsschlacken als Baumaterial sind den Gutachtern nicht bekannt.

Die Trockenentschlackung hat im Vergleich zu der Nassentschlackung die Nachteile, dass höhere Flugaschemengen entstehen, die entsorgt werden müssen. Des Weiteren wird die abgesiebte, schadstoffbelastete Schlacke-Feinfraktion in der Regel ebenfalls sicher zu entsorgen sein, so dass hier möglicherweise größere Mengen zur Entsorgung anfallen als bei der Nassentschlackung. Die Möglichkeit zur Schadstoffentfrachtung der Feinfraktion durch eine saure Wäsche besteht zwar prinzipiell, nur werden dadurch weitere Abfall- bzw. Abwasserströme erzeugt und der Frischwasserbedarf erhöht. Bei bestehenden sauren Flugaschewäschen, wie sie in der Schweiz weit verbreitet sind; in Deutschland allerdings nicht existieren, ist eine Trockenentschlackung dennoch interessant. Allerdings besteht auch hier noch umfangreicher Untersuchungsbedarf hinsichtlich zusätzlicher Betriebsstoffe und Outputqualität.

Die betrachteten **alternativen Verfahren zur Sinterung oder Einschmelzung von Verbrennungsrückständen** schneiden in Hinblick auf Ressourcen- und Klimaschutz gegenüber den etablierten Verfahren teils moderat, teils deutlich schlechter ab. Die Abtrennung von Eisen- und Nicht-Eisenmetallen ist im Rahmen einer nachgeschalteten Aufbereitung sowohl bei SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren möglich. Das Plasma-Schmelz-Verfahren erlaubt zwar eine Abtrennung von sowohl Eisen als auch Nicht-

Eisenmetallen aus der nass ausgetragenen Schlacke, bevor diese in den Plasma-Schmelz-Ofen geführt wird. Jedoch hat dieses Verfahren die schlechteste Energiebilanz aller in diesem Gutachten betrachteten Verfahren. Aber auch SYNCOM- und SYNCOM-Plus-Verfahren haben im Vergleich zu der konventionellen MVA mit Nassentschlackung und trockener Schlackeaufbereitung einen, wenn auch moderat, erhöhten Energieeigenbedarf.

Betrachtet man die Verfahren „konventionelle Rostfeuerung mit Metallrückgewinnung“, „SYNCOM mit Metallrückgewinnung“, „SYNCOM-Plus mit Metallrückgewinnung“ und „konventionelle Rostfeuerung mit Metallrückgewinnung und Plasma-Schmelzofen“ in Hinblick auf Klimaschutz, so ergibt der Vergleich, dass vor allem aufgrund des hohen Eigenenergiebedarfs das Plasma-Schmelz-Verfahren am ungünstigsten abschneidet (Tabelle 21).

Der jeweilige Energievorteil (aus Strom-Nettoabgabe und Beitrag durch Metallrückgewinnung) der drei anderen Verfahren gegenüber diesem beträgt:

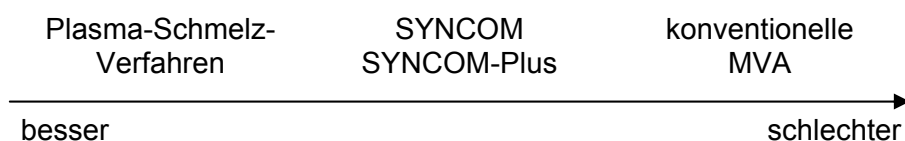
Tabelle 21: Vergleich der Verfahren in Hinblick auf Klimaschutz

	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht-Eisenmetall-abtrennung	SYNCOM-Verfahren + Eisen- und Nicht-Eisenmetall-abtrennung	SYNCOM-Plus-Verfahren + Eisen- und Nicht-Eisenmetall-abtrennung	konventionelle MVA + Eisen- und Nicht-Eisenmetall-abtrennung + Plasma-Schmelz-Verfahren
Energievorteil	ca. 420 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 350 kWh/Mg _{Abfall}	ca. 340 kWh/Mg _{Abfall}	0 kWh/Mg _{Abfall}

Tabelle 20 zeigt jedoch auch deutliche Vorteile dieser alternativen Verfahren. Diese liegen aufgrund der Zielsetzung der Entwicklung dieser Verfahren bei der Umweltverträglichkeit der erzeugten Reststoffe durch geringere Eluierbarkeit von Schadstoffen.

Die Eluatwerte für Kupfer als Beispiel für ein Schwermetall sowie für Chlorid als Beispiel für ein leicht lösliches Anion eignen sich gut für eine Gegenüberstellung.

Die Reihenfolge der Eluatwerte für Kupfer sieht folgendermaßen aus:



Die Reihenfolge der Eluatwerte für Chlorid sieht folgendermaßen aus:

Plasma-Schmelz-Verfahren	SYNCOM-Plus	SYNCOM	Konventionelle MVA
besser			schlechter

Das **Plasma-Schmelz-Verfahren** zeigt bei allen Eluatwerten die besten Ergebnisse, SYNCOM und SYNCOM-Plus bewegen sich im oberen Mittelfeld, während die konventionelle MVA zwar schlechter abschneidet, die deutschen Anforderungen an die Eluierbarkeit von Schlacken zur Verwertung im Allgemeinen aber erreicht.

Die relevanten Aspekte der Ressourcenschonung (Metallrückgewinnung und Wasserverbrauch) sind bei allen Verfahren (außer Plasma-Schmelz-Verfahren ohne Metallabtrennung) sehr ähnlich zu bewerten.

Eine entsprechende Schlackeaufbereitung kann bei allen Verfahren eine gute Rückgewinnung von Metallen (Eisen- und Nicht-Eisenmetalle) nach sich ziehen.

Die bedeutsamen Unterschiede liegen zum einen bei den klimaschutzrelevanten Aspekten (Energieeinsatz und -ausbeute), zum anderen bei der Schlackequalität (Eluierbarkeit).

Es lässt sich dabei feststellen, dass ein hoher Klimaschutz (durch hohen Netto-Strom-Output) geringere Schlackequalität (höhere Eluatwerte) verursacht – und umgekehrt.

8 Literaturverzeichnis

[BAF2007]

Fierz, R./ Bunge, R.: *Trockenausstrag von KVA-Schlacke - Zusammenfassung*, im Internet unter: <http://www.bafu.admin.ch/abfall>, 05.11.2009, 15:57 MEZ.

[BMFT1995]

Verbesserung des Verbrennungs-, Ausbrand- und Emissionsverhaltens einer Abfallverbrennungsanlage mittels Primäroptimierung der Feuerung, Verbundvorhaben: Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen: Abschlussbericht für das Teilvorhaben 3, BMFT, Berlin, 1995

[BOE2009]

Böni, D.: *Trockener Schlackeaustrag – ungenutzte Potentiale in der Abfallverwertung*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Energie aus Abfall 6*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2009.

[BREF2006]

European Commission: *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration (BREF Waste Incineration)*, August 2006, im Internet unter: http://ftp.jrc.es/eippcb/doc/wi_bref_0806.pdf, 05.11.2009, 16:53 MEZ.

[BSM2002]

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): *Müllverbrennung – Die thermische Behandlung von Abfällen*, München, 2002, im Internet unter: www.stmugv.bayern.de/umwelt/abfallwirtschaft/doc/mva.pdf, 05.11.2009, 16:18 MEZ.

[DEH2002]

Dehoust, G./ Gebhardt, P./ Gärtner, S.: *Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung*, Öko-Institut e.V., Darmstadt, 2002.

[EU72004]

Spuller, R. et al.: *Brennbetttemperatur und Schlackequalität in Feuerungsanlagen für Abfälle*, Abschlussbericht des Kooperationsvorhaben des FES, Schwabach mit der MARTIN GmbH für Energie- und Umwelttechnik, München, der Ludwig-Maximilian Universität (LMU), München und dem Bayerischen Institut für angewandte Umweltforschung (BIfA), Augsburg, 2004

[FAU1996]

Faulstich, M.: *Behandlungsverfahren für feste Rückstände aus der Abfallverbrennung*, in: Müll und Abfall 7125, 3/96, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

[FES2005]

Schlackeanalysen des SYNCOM-Verfahrens, Prüfbericht des Forschungs- & Entwicklungszentrums für Sondertechnologien, Schwabach, 2005

[GIR2008]

Girod, K.: *Biogasaufbereitung und Einspeisung – Zahlen, Fakten, Wirtschaftlichkeit*, 3. Biogas-Fachkongress - Effizienz als Schlüssel zur Nachhaltigkeit, 25. November 2008 in Hitzacker (Elbe), im Internet unter: http://www.akademie-ee.de/fileadmin/downloads/Vortraege_Biogaskongress_251108/08_gika_UMSICHT_231008_vorab_F122.pdf, 09.11.2009, 10:21 MEZ.

[ITAD2009]

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

[KOR2009]

Koralewska, R.: *SYNCOM-Plus – An Optimized Residue Treatment Process*, Proceedings of NAWTEC17, 17th Annual North American Waste-to-Energy Conference, May 18-20, 2009, Chantilly, Virginia, USA.

[KRV2009]

Kärntner Restmüllverwertungs GmbH: *Informationen des Betreibers der TBA Arnoldstein (Abarbeitung eines Fragenkatalogs von RSP / Prognos)*, November 2009.

[LUE2004]

Lück, T.: *Die weitergehende Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Scherer + Kohl GmbH*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Optimierung der Abfallverbrennung 1*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2004.

[MAR2004]

Martin, J.J.E./ Gohlke, O.: *Energie und Inertstoffe aus Abfall – Integration von Schlackeaufbereitung und FlugSchlackeentsorgung in den Verbrennungsprozess*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Optimierung der Abfallverbrennung 1*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2004.

[MAR2006]

Martin, J.J.E.: *Flexible Anlagenauslegung mit dem MARTIN SYN-COM-Verfahren*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Optimierung der Abfallverbrennung 3*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2006.

[MAR2009]

Martin, J.J.E./ Langhein, E.-C./ Brebric, D. u.A.: *Die Martin Trockenentschlackung mit integrierter Klassierung*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Energie aus Abfall 6*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2009.

[MAR2009a]

Grafik im Internet unter:

http://www.martingmbh.de/index.php?level=1&CatID=6.27&inhalt_id=23, 30.10.2009, 14:05 MEZ.

[MAR2009b]

Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik: Unterlagen zu SYNCOM-Plus für RSP und Prognos (UBA Gutachten), 2009.

[MEI2008]

Meinfelder, T./ Richers, U.: *Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2008.

[MES2008]

Mesters, K.: *Untersuchungen an HMV-Schlacken im Rahmen der Ersatzbaustoffverordnung*, Untersuchung im Auftrag der Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM), Bochum, 2008.

[MOS1994]

Mostbauer, P./ Ziegler, C./ Lechner, P.: *Immobilisierung von Abfällen*, Endbericht, Wiener Umweltschutzabteilung MA 22, 1994, im Internet unter:
<http://www.wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf/grenzen.pdf>

[NOT1997]

Nottrodt, A.: *Rostfeuerung oder alternative Abfallbehandlungsverfahren*, in: Müll und Abfall 7106, 2/97, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

[OMN2004]

Options-Management Nachhaltige Abfallwirtschaft Schweiz - OM-NA: *Bühne "Weltweite Entwicklungen"*, Zürich/Rüschlikon, 2004.

[PFR2005]

Pfrang-Stotz, G./ Reichelt, J.: *Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2005.

[PRE1998]

Pretz, T./ Meier-Kortwig, J.: *Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung*, im Internet unter: http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v06_sfb525.pdf, 05.11.2009, 16:25 MEZ.

[REI1996]

Reimann, O.: *Schlackemenge und -inhaltsstoffe aus der thermischen Restabfallbehandlung*, VDI-Seminar Schlackeaufbereitung, -verwertung und -entsorgung, Bamberg, 13./14.06.1996.

[ROE2007]

Römbke, J.; Moser, H.: *Ökotoxikologische Charakterisierung von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen*, VGB PowerTech 12/2007.

[ROS2004]

Rossati, F.: *Schmelzen von Flugstäuben mit einem Plasmaprozess*, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: *Optimierung der Abfallverbrennung 1*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2004.

[TUM2008]

Materialprüfungsamt für das Bauwesen, Abteilung Baustoffe, Technische Universität München: *Prüfbericht „Untersuchung von SYNCOM-Plus-Granulat hinsichtlich bautechnischer Eigenschaften“*, TUM, München, 2008

[UBA2005]

Winter, B. et al.: *Abfallvermeidung und -verwertung: Schlacken, Schlacken und Stäube in Österreich*, Wien, 2005.

[UBA2007]

Fehrenbach, H./ Giegrich, J./ Mahmood, S.: *Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz*, 2007.

[UMT2009]

Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik Rapperswil (UMTEC):
Factssheet Trockenaustrag von KVA-Schlacke, im Internet unter:
<http://umtec.hsr.ch/dokumente/dokumente/downloads/factsheets/Factsheet%20Trockenentschlackung.pdf>, 05.11.2009, 16:47 MEZ.

[ZWA2006]

Zwahr, H.: *Eigenschaften mineralischer Abfälle, Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA-Schlacken*, im Internet unter:
http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_zwahr.pdf, 05.11.2009, 16:28 MEZ.

9 Anhang

9.1 Definition der Modellanlagen

Die in diesem Gutachten betrachteten **Modell-Müllverbrennungsanlagen** bestehen aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Rückschubrostfeuerung,
- Vier-Zug-Vertikalkessel,
- Wirbelschicht-Adsorptionsreaktor (Entschwefelung und Entchlorung und Schwermetall- und Dioxinminderung durch Herdofenkoksdosierung),
- Gewebefilter,
- SCR-Anlage,
- Kamin,
- Wasser-Dampf-Kreislauf mit Turbogenerator und luftgekühltem Kondensator (keine externe Dampfabgabe).

Die **konventionelle MVA** hat zusätzlich folgende Hauptkomponenten:

- Magnetabscheider zur Aussortierung von Eisen aus der Schlacke,
- Wirbelstromabscheider (Nicht-Eisenmetallabscheidung).

Die **SYNCOM-Anlage** hat zusätzlich folgende Hauptkomponenten:

- Luftzerlegeanlage,
- Abgasrezirkulation,
- Magnetabscheider.

Die **SYNCOM-Plus-Anlage** hat zusätzlich folgende Hauptkomponenten:

- Luftzerlegeanlage,
- Abgasrezirkulation,
- Nass-mechanische Schlackeaufbereitung.

Die **konventionelle MVA mit Plasma-Schmelz-Ofen** hat zusätzlich folgende Hauptkomponenten:

- Plasma-Schmelz-Ofen,
- Magnetabscheider,
- Wirbelstromabscheider (Nicht-Eisenmetallabscheidung).

Die wichtigsten Modellparameter für die Abbildung der Energie- und Massenströme der Modell-Anlagen sind in Tabelle 22 zu finden.

Tabelle 22: Wichtige Modellierungsgrundlagen

Parameter	Einheit	konventionell	SynCom	SynCom-Plus	Plasma
Glühverlust (Feuerung)	%	1,5	1	0,1	1,5
Kesselwirkungsgrad	%	82,5	84	83,8	82,5
Luftüberschuss Hauptfeuerung		1,8			1,8
Sauerstoffgehalt Primärluft	Vol.-% tr.	21	27,7	27,7	21
Transferkoeffizient Cl ins Rauchgas		0,85	0,85	0,85	0,9
Transferkoeffizient S ins Rauchgas		0,5	0,55	0,6	0,9
Druckverlust Primärluft	mbar	20			
Druckverlust Reziluft	mbar	40			
Druckverlust Saugzug	mbar	100			
Lufttemperatur	°C	20			
Wasserbeladung der Luft	kg/kg	0,012			
Luftdruck	mbar	1.013			
el. Energiebedarf zur Erzeugung von Sauerstoff (VPSA)	kWh/Nm³	0,38			
Frischdampfdruck	bar	40			
Frischdampftemperatur	°C	400			
Speisewasserdruck	bar	52			
Speisewassertemperatur	°C	130			
Abdampfdruck	bar	0,1			
Dampfgehalt Abdampf	kg/kg	0,9			
Generatorwirkungsgrad	%	94,7			
externe Dampfabgabe		nein			
Feuchte der Rostasche (Stößelentascher)	% (m/m)	13,4			
Feinanteil an SYNCOM Plus - Granulat	% (m/m)	25			
HCl-Emissionen	mg/Nm³ tr., 11 % O2	10			
SO2-Emissionen	mg/Nm³ tr., 11 % O2	50			
NOx-Emissionen	mg/Nm³ tr., 11 % O2	200			
Staubemissionen	mg/Nm³ tr., 11 % O2	< 1			

9.2 Massen- und Energiebilanzen der betrachteten Verfahren

Abbildung 17: Massenbilanz der konventionellen Modell-Anlage

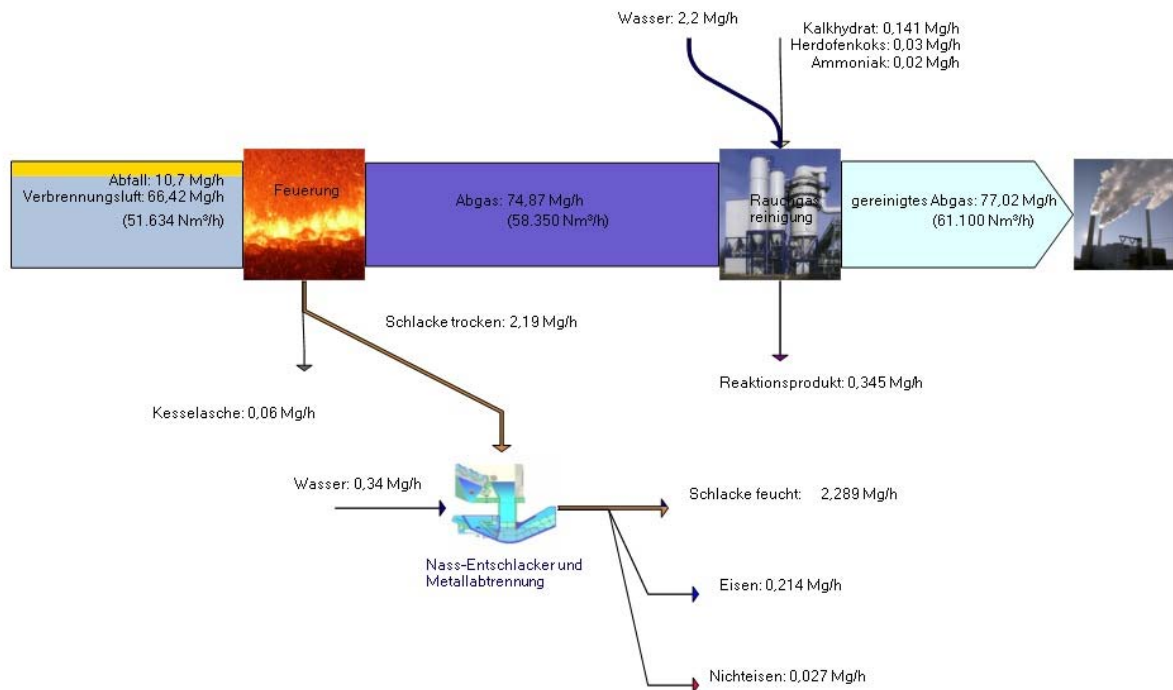


Abbildung 18: Energiebilanz der konventionellen Anlage

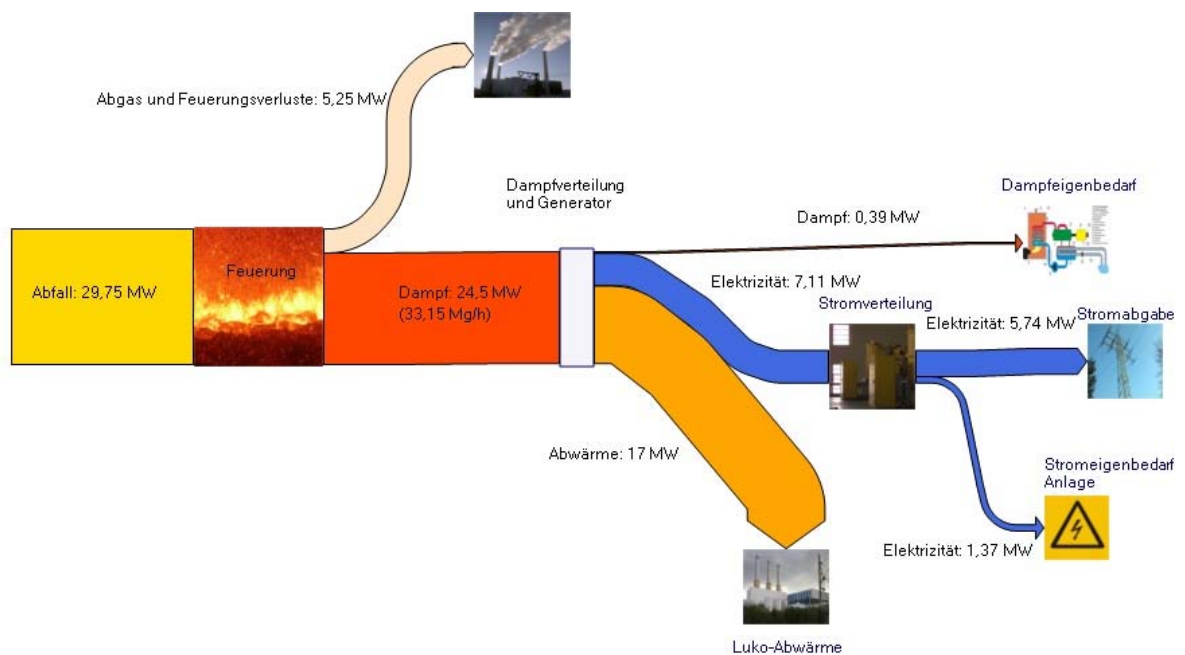


Abbildung 19: Massenbilanz der Modell-SYNCOM-Anlage

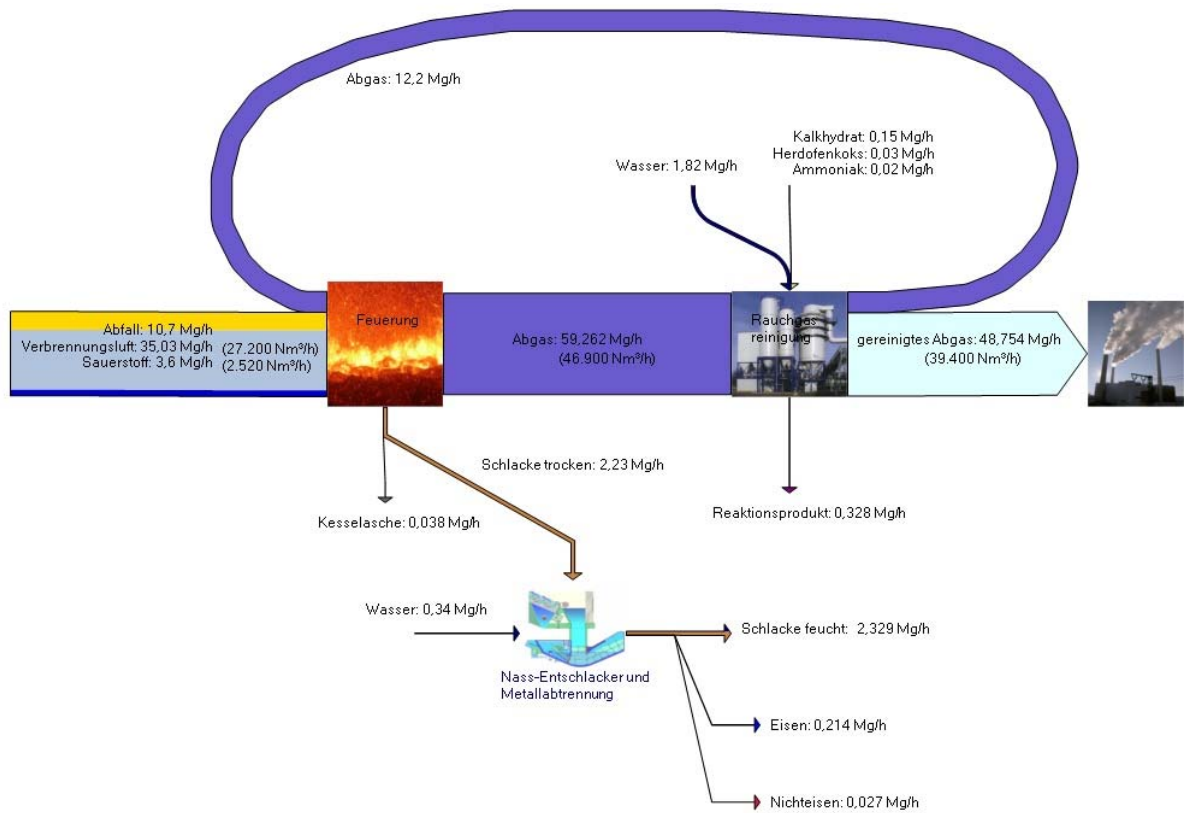


Abbildung 20: Energiebilanz der Modell-SYNCOM-Anlage

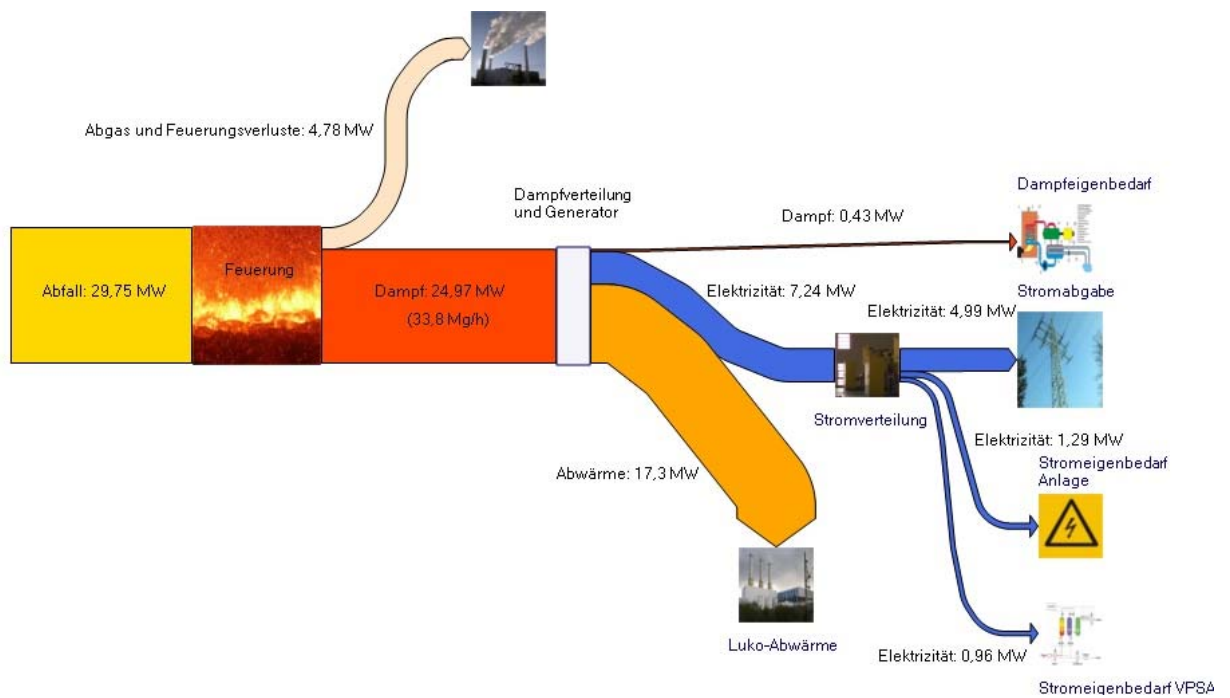


Abbildung 21: Massenbilanz der Modell – SYNCOM-Plus-Anlage

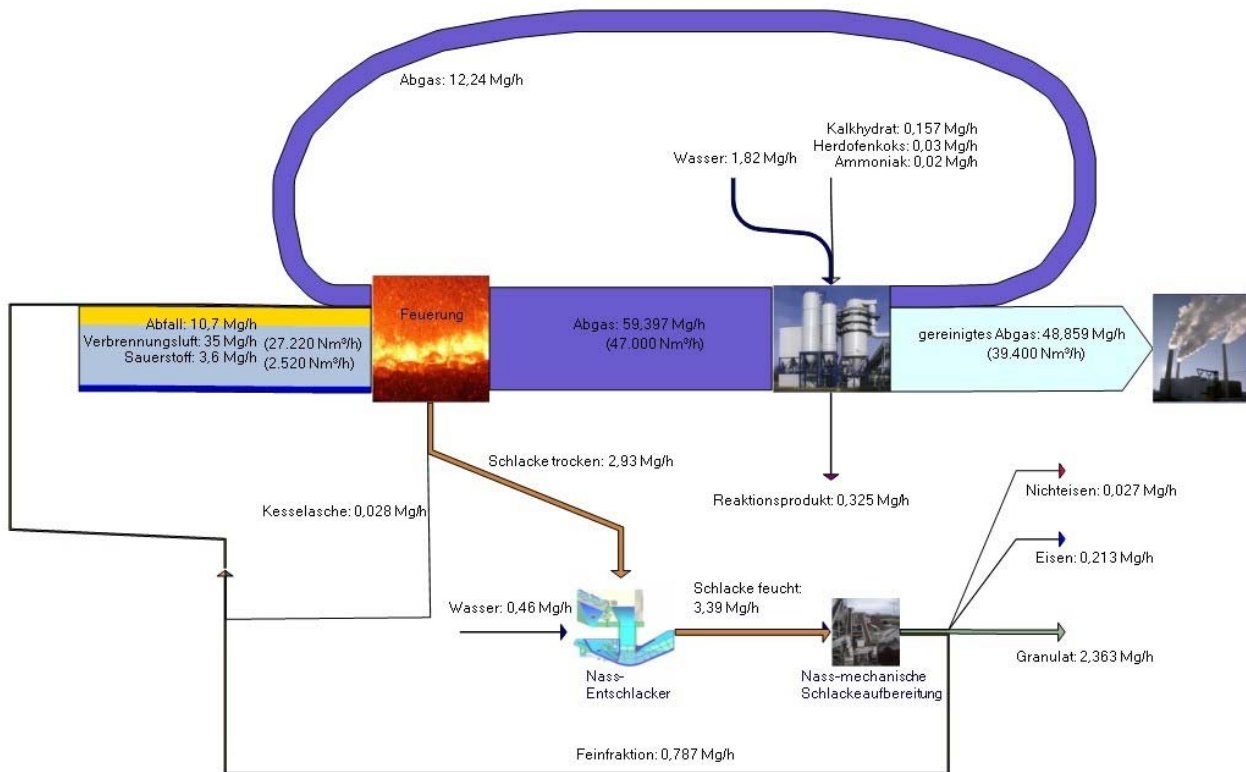


Abbildung 22: Energiebilanz der Modell – SYNCOM-Plus-Anlage

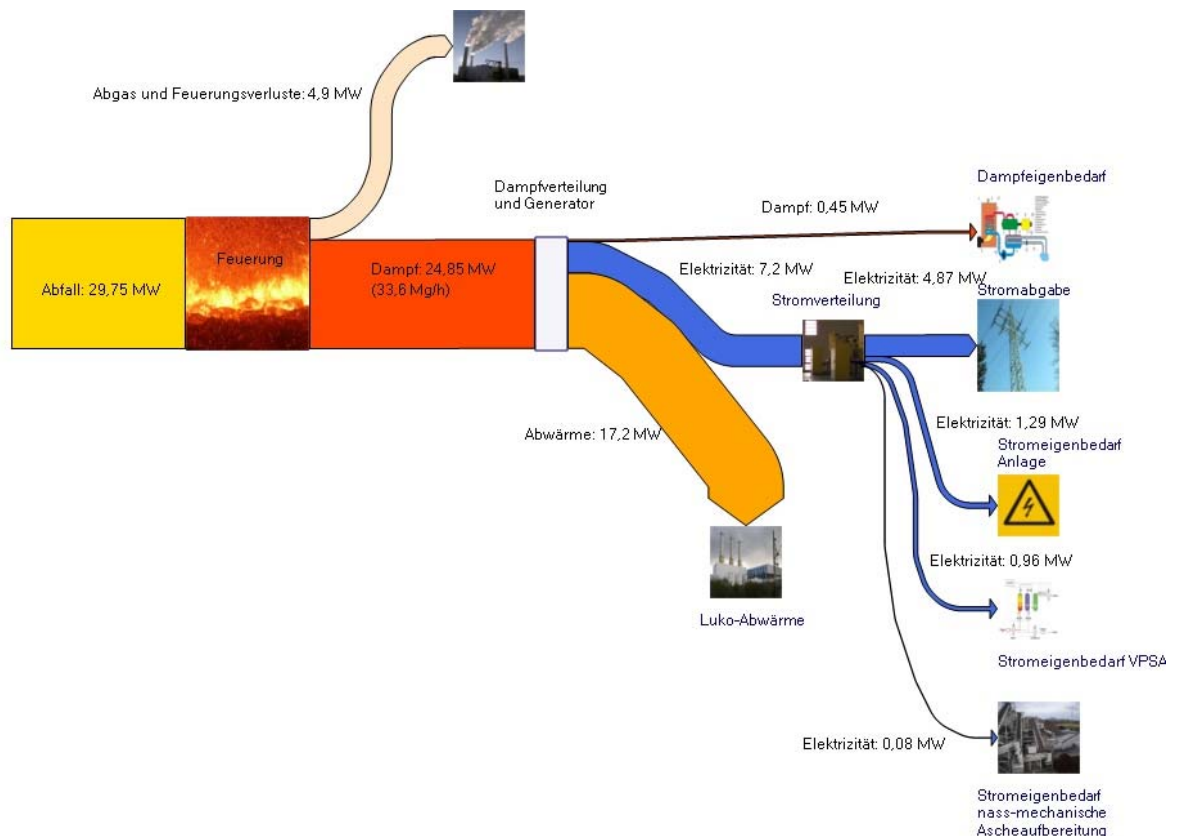


Abbildung 23: Massenbilanz der konventionellen Anlage mit Plasma-Schmelzofen

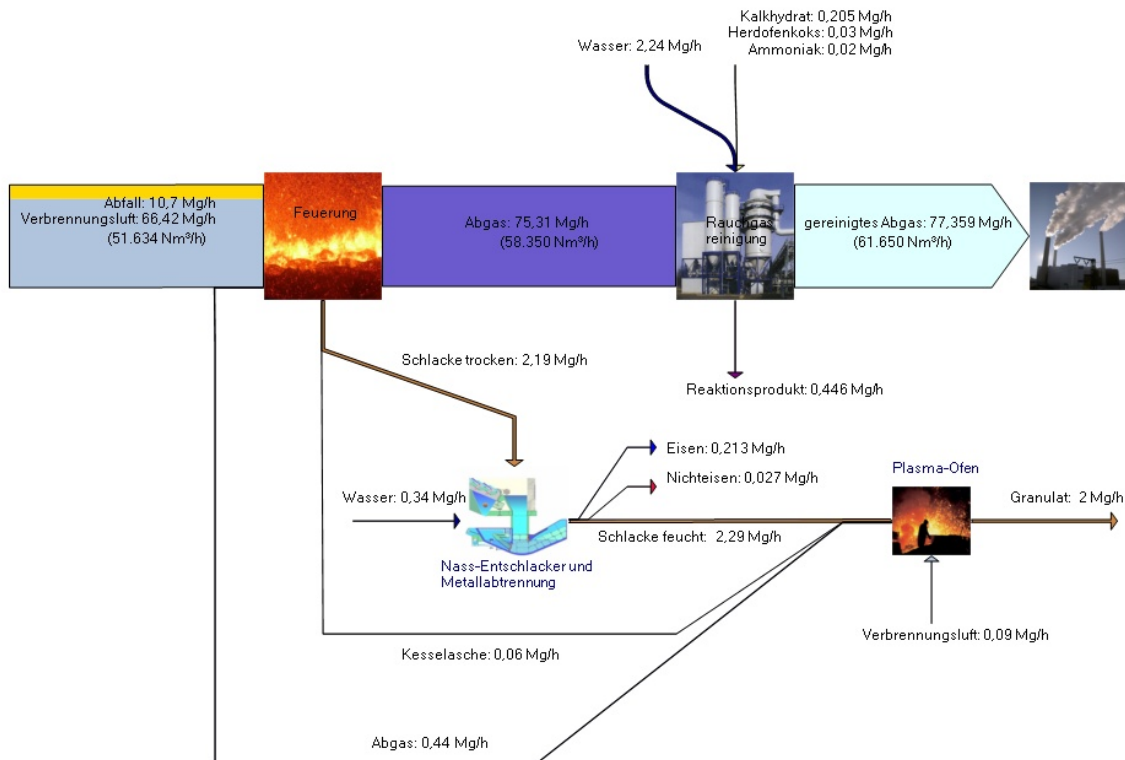
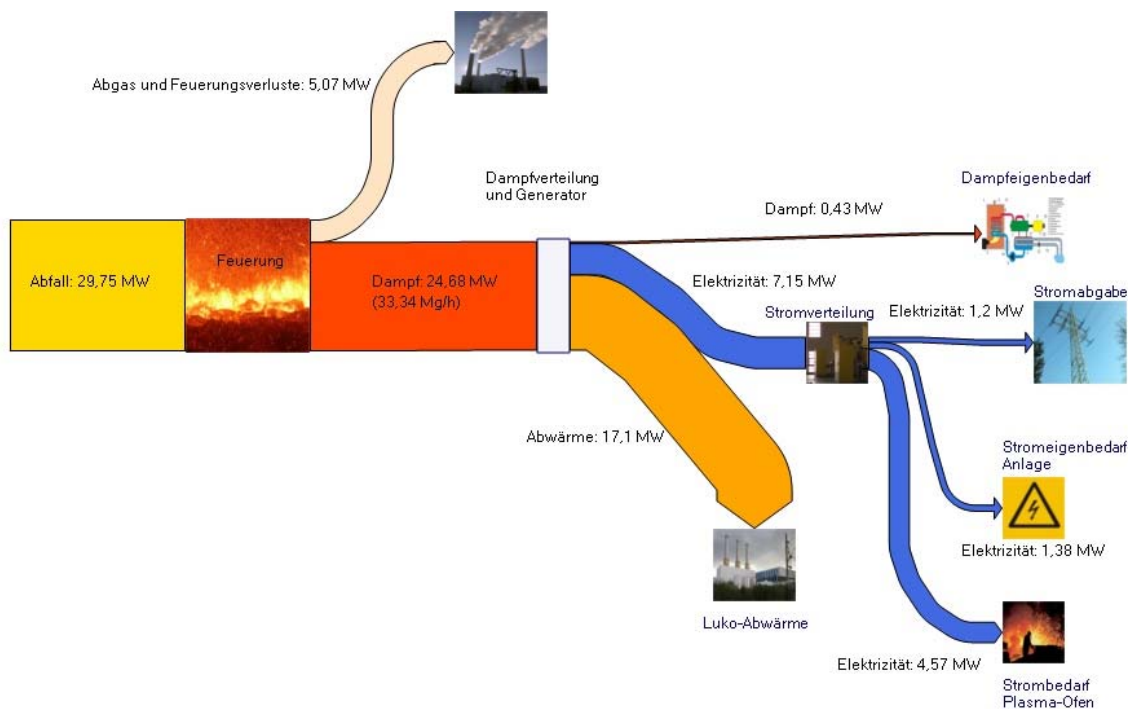


Abbildung 24: Energiebilanz der konventionellen Anlage mit Plasma-Schmelzofen



9.3 Abschätzung der Behandlungskosten

Zur Abschätzung der Behandlungskosten wurde eine Betriebskostenrechnung angefertigt, die die in Tabelle 23 gezeigten Eingaben verwendet. Als Mengen wurde die in den Massenbilanzen ermittelten Massenströme bzw. die in den Energiebilanzen ermittelten Strommengen eingesetzt. Die Investitionskosten für eine konventionelle MVA wurden aus eigenen Daten für vergangene Projekte abgeschätzt. Für die SYNCOM-Anlage, die SYNCOM-Plus-Anlage und die MVA mit Plasma-Schmelz-Anlage wurde ein Zuschlag für die zusätzliche Anlagentechnik hinzu geschlagen.

Die Kosten für die Schlackeentsorgung werden bei der SYNCOM-Plus-Anlage und der konventionellen MVA mit Plasma-Schmelz-Ofen niedriger angesetzt, da die Schlacke bzw. das Schlackengranulat eine bessere Qualität aufweist als die Schlacke der konventionellen MVA oder der SYNCOM-Anlage. Erlöse für das Schlackengranulat scheinen derzeit aufgrund der verhaltenen Marktakzeptanz, den rechtlichen Einsatzmöglichkeiten und nicht zuletzt aufgrund des niedrigen Preises für natürliches Material nicht erzielbar zu sein.

Die erreichbare Metallabtrennung wird bei Eisen ideal mit 100 % im Verhältnis zum im Müll enthaltenen Eisen angenommen. Bei den Nicht-Eisenmetallen Aluminium und Kupfer werden analog 50 % Abscheidegrad angenommen. Diese Annahmen stecken bereits in den Massenbilanzen dieses Gutachtens.

Tabelle 23: Grundlagen der Ermittlung der Behandlungskosten

Kostenarten	Einheit	konventionell	SYNCOM	SYNCOM-Plus	Plasma-Schmelz
Investitionskosten	€	45.000.000	46.000.000	47.000.000	48.000.000
Abschreibungszeitraum	Jahre	15			
Zins	%	6			
Personalbedarf	Personen	20			
Personalkosten	€/(Person*a)	40.000			
Kosten Kalkhydrat	€/Mg	90			
Kosten HOK	€/Mg	350			
Kosten Ammoniakwasser	€/Mg	100			
Kosten Schlackeentsorgung	€/Mg	10	10	5	5
Kosten Reaktionsproduktentsorgung	€/Mg	90			
Wasserkosten	€/m³	1,7			
Ansatz Betriebs- und Hilfsstoffe	€/Mg _{Abfall}	2	2	2,5	2,5
Bereitstellungskosten Strombezug	€/a	195.000			
Strombezug Arbeitspreis	€/MWh	50			
Eisenschrottpreis	€/Mg	150			
Kupferschrottpreis	€/Mg	3.000			
Aluminiumschrottpreis	€/Mg	400			
Stromabgabe Arbeitspreis	€/MWh	50			

Die Sensitivität der Investitionskosten auf die Behandlungskosten ist besonders groß, so dass bei einer falschen Schätzung hier der größte Fehler passieren kann. Da jedoch eine SYNCOM-Anlage, eine SYNCOM-Plus-Anlage und eine konventionelle MVA mit Plasma-Schmelz-Ofen aufgrund der Zusatzanlagen sicherlich immer höhere Investitionskosten nach sich ziehen, bleibt hier die Vergleichbarkeit der Anlagen gewährleistet.

9.4 Berechnung des energetischen Beitrags durch Ressourcenschonung mit Hilfe des kumulierten Energieaufwandes (KEA)

Der energetische Beitrag durch Ressourcenschonung ist der auf den Müll bezogene fossile KEA. Der fossile KEA für jedes Metall wird Tabelle 1 entnommen und mit der erreichbaren Metallabtrennung (siehe auch Kapitel 9.2) pro Tonne Müll multipliziert.

Für Eisen:

Metallabtrennung: 214 kg/h

Metallabtrennung pro Tonne Müll: $0,02 \text{ Mg}_{\text{Eisen}}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$

KEA fossil Roheisen: $6,16 \text{ kWh}/\text{Mg}_{\text{Eisen}}$

Energetischer Beitrag der Ressourcenschonung durch Eisenabtrennung:

$$6,16 \text{ MWh}/\text{Mg}_{\text{Eisen}} * 0,02 \text{ Mg}_{\text{Eisen}}/\text{Mg}_{\text{Müll}} = 123,2 \text{ kWh}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$$

Für Aluminium:

Metallabtrennung: 5 kg/h

Metallabtrennung pro Tonne Müll: $0,000467 \text{ Mg}_{\text{Alu}}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$

KEA fossil Rohaluminium: $31,1 \text{ MWh}/\text{Mg}_{\text{Alu}}$

Energetischer Beitrag der Ressourcenschonung durch Aluminiumabtrennung:

$$31,1 \text{ MWh}/\text{Mg}_{\text{Alu}} * 0,000467 \text{ Mg}_{\text{Alu}}/\text{Mg}_{\text{Müll}} = 14,5 \text{ kWh}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$$

Für Kupfer:

Metallabtrennung: 22 kg/h

Metallabtrennung pro Tonne Müll: $0,00206 \text{ Mg}_{\text{Kupfer}}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$

KEA fossil Rohkupfer: $21,5 \text{ MWh}/\text{Mg}_{\text{Kupfer}}$

Energetischer Beitrag der Ressourcenschonung durch Kupferabtrennung:

$$21,5 \text{ MWh}/\text{Mg}_{\text{Kupfer}} * 0,00206 \text{ Mg}_{\text{Kupfer}}/\text{Mg}_{\text{Müll}} = 44,3 \text{ kWh}/\text{Mg}_{\text{Müll}}$$

Da der energetische Beitrag der Ressourcenschonung durch Ersatz von Schottermaterial durch Müllverbrennungsschlacke im Vergleich zum Beitrag der Metalle etwa um den Faktor 15 geringer ist, wird dieser nicht weiter in diesem Gutachten berücksichtigt. Beispielhaft wird der energetische Beitrag für die Schlacke aus der konventionellen MVA berechnet.

Für Schlacke (Ersatz für Schotter):

Schlackegewinnung (feucht): 2,289 Mg/h

Schlackegewinnung pro Tonne Müll: 0,214 Mg_{Schlacke}/Mg_{Müll}

KEA fossil Schotter [UBA2007]: 0,0533 MWh/Mg_{Schotter}

Energetischer Beitrag der Ressourcenschonung durch Schlackegewinnung:

$$0,0533 \text{ MWh/Mg}_{\text{Schotter}} * 0,214 \text{ Mg}_{\text{Schlacke}}/\text{Mg}_{\text{Müll}} = 11 \text{ kWh/Mg}_{\text{Müll}}$$