

Diplomarbeit

Untersuchungen zur Ausbrandqualität von Schlacken aus der Abfallverbrennung im Drehrohrofen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

unter der Anleitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Pachler

von
Emanuel Boschmeier, BSc
Matrikelnummer: 01463193

Wien, 21. März 2021

Emanuel Boschmeier

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 21. März 2021

Emanuel Boschmeier

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dr.techn. Herman Hofbauer und Herrn Dr.techn. Robert Pachler für die Betreuung und Begutachtung meiner Diplomarbeit. Sie ermöglichten mir einen reibungslosen Start und Ablauf meiner Arbeit während der schwierigen Zeit, die durch das SARS-Corona-Virus geprägt war.

Weiters möchte ich mich bei den außerordentlich freundlichen und hilfsbereiten Mitarbeitern im Betriebslabor der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide bedanken. Ohne ihrer bereitwilligen Unterstützung hätte ich meine Tätigkeiten im Labor nicht so wirksam voranbringen können. Daneben sind die wunderbaren Gespräche und Ratschläge nicht zu vergessen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all meinen Freunden und engen Kommilitonen bedanken, dass sie mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet haben. Die Studienzeit im In- und Ausland sowie die Erfahrungen werden mir ewig in Erinnerung bleiben.

Der allergrößte Dank gebührt meinen Eltern Franz und Renate. Ihre unendliche Unterstützung während meines gesamten Studiums machten es erst möglich, dass ich es geschafft habe. In schwierigen Zeiten nahmen sie mir Lasten von der Schulter ab, in guten Zeiten sprachen sie mir zu und förderten mich.

Kurzfassung

Seit langer Zeit steigen der globale Energiebedarf und der produzierte Abfall. Um diese Probleme zu vermindern, wird Abfall in Anlagen verbrannt, um daraus Strom und Wärme gewinnen zu können. Die Wien Energie GmbH betreibt dazu am Standort Simmeringer Haide eine hocheffiziente Verbrennungsanlage für Industriemüll und gefährliche Abfälle in zwei Drehrohröfen, aus denen Fernwärme und Strom gewonnen werden und das Verbrennungsprodukt Schlacke anfällt.

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung jener Schlackeeigenschaften, die kennzeichnend für die Qualität der Verbrennung im Drehrohröfen sind. Die Bestandteile der Schlacke werden über den Mülleinsatz und die Bedingungen während der Verbrennung im Drehrohröfen bestimmt. Die anorganischen Bestandteile gleichen den in der Erdkruste natürlich vorkommenden Bestandteilen, daneben liegen organische Verbindungen vor, auch TOC (total organic carbon) genannt. Der TOC-Gehalt gibt den Anteil an Unverbranntem wieder und ist damit ein Kriterium für die Qualität der Verbrennung. In erster Näherung wird der TOC-Gehalt über die Bestimmung des Glühverlustes angenommen. Daneben besitzt Schlacke die Fähigkeit Wasser zu binden, die von den anorganischen und organischen Verbindungen abhängt.

Um Kenntnis über weitere Eigenschaften zu erhalten, die charakteristisch für die Qualität der Verbrennung sind, wurden 150 Schlackeproben aus der Abfallverbrennung im Drehrohr der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide untersucht. Zusätzlich zur laufenden Glühverlustkontrolle wurden folgende Merkmale untersucht: Trockensubstanz, optische Erscheinung und Geruch, Analyse des Kohlenstoffgehaltes und PAK-Belastung.

Analysen der Schlackeproben ergaben einen Einfluss der Trockensubstanz auf den TOC-Gehalt. Je niedriger diese ist, desto wahrscheinlicher ist ein hoher Gehalt an unverbrannten Bestandteilen. Die optische Bewertung der Schlacken erfolgte über einen Bewertungskatalog, um subjektive Einflüsse so gering wie möglich zu halten. Farbe und Teilchenform der Schlacke können einen Einfluss auf den TOC-Gehalt haben. Aus der optischen Bewertung konnte kein Einfluss des Geruches oder der Feuchtigkeit auf den TOC-Gehalt festgestellt werden. Für den Geruch der Schlacke können die PAK verantwortlich gemacht werden. Die geringen Mengen haben jedoch keine Auswirkung auf den TOC-Gehalt. Eine ausführliche Analyse des Kohlenstoffgehaltes zeigt, dass die Glühverlustanalyse einfach, aber fehlerbehaftet ist.

Abstract

Global energy demand and the produced waste have been increasing for a long time. Waste incineration in electricity and heat generating plants is a common technique to reduce these problems. The Austrian company Wien Energie GmbH operates a highly efficient industrial and hazardous waste incinerator at the plant Simmeringer Haide. Based on incineration in two rotary kilns, district heating and electricity are obtained and incineration residues are produced, especially bottom ash.

In this master thesis, the determination of bottom ash properties that stand for the combustion quality in the rotary kiln is conducted. The type of bottom ash constituents are influenced by waste input and the conditions during incineration. The inorganic components are similar to those naturally found among the earth's crust ingredients. Besides, bottom ash contains organic compounds, the so-called TOC (total organic carbon). The TOC content indicates the amount of unburned components, making it a reliable criterion for verifying the incineration quality. The TOC content is usually derived by determining the loss on ignition. Beyond that, the bottom ash has the ability to bind water, which depends on the inorganic and organic constituents.

In order to gain knowledge of further properties standing for the waste incineration quality, 150 bottom ash samples from waste incineration in the rotary kilns of Wien Energie GmbH at the Simmeringer Haide plant were examined. In addition to the ongoing control of loss on ignition, the following characteristics were investigated: dry matter, visual appearance and scent, carbon content and PAH exposure.

The analysis of the bottom ash samples revealed an influence of dry matter on the TOC content. The lower the dry matter score, the higher the probability of an elevated content of unburned components. The bottom ash was visually evaluated using an assessment catalog in order to keep subjective influences as low as possible. The color and particle shape of the bottom ash may have an influence on the TOC content. From the evaluation, no influence of scent or visible moisture on TOC content can be observed. The PAHs can be held responsible for the scent of the bottom ash. However, the small amounts have no effect on the TOC content. A detailed analysis of the carbon content shows that loss on ignition analysis is practical, yet flawed.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	1
1 Einleitung	2
1.1 Müllverbrennungsanlage Simmeringer Haide.....	2
1.2 Ziel dieser Arbeit.....	4
2 Abfallverbrennung	5
2.1 Technologie Drehrohrofen	6
2.2 Rechtliche Aspekte.....	11
2.2.1 Thermische Behandlung der Abfälle.....	11
2.2.2 Deponierung der Schlacke.....	13
3 Eigenschaften der Schlacke aus der Müllverbrennung	14
3.1 Einflussgrößen.....	16
3.1.1 Art des Müllinputs.....	16
3.1.2 Verbrennungstechnologische Parameter	17
3.2 Anorganische Bestandteile	19
3.3 Wassergehalt	24
3.4 Organische Bestandteile	25
3.4.1 Residual Oxidizable Carbon (ROC) und Elemental Carbon (EC).....	26
3.4.2 Total Organic Carbon (TOC)	27
3.5 Zusammenfassung der Eigenschaften der Schlacke.....	31
4 Analysemethoden	32
4.1 Trockensubstanz nach DIN EN 14346.....	32
4.2 Glühverlust nach DIN EN 15169	33
4.3 Kohlenstoff-Gehalt nach DIN 19539	34
4.4 Optische Bewertung der Schlacken.....	38
5 Untersuchungen der Schlacken	40
5.1 Langzeituntersuchung	41
5.1.1 Minimal erforderliche Trocknungsdauer.....	45

5.1.2	Messergebnisse aus der Langzeituntersuchung.....	48
5.1.3	Diskussion der optischen Bewertung	51
5.2	Analytische Kohlenstoff-Messung.....	56
5.3	Messung der PAK-Belastung.....	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	63
7	Verzeichnisse.....	66
7.1	Literatur	66
7.2	Abbildungen	69
7.3	Tabellen	70
8	Appendix	71

Nomenklatur

Sämtliche in dieser Arbeit vorkommenden Abkürzungen sind nachstehend angeführt. Erläuterungen sind aus dem Text zu entnehmen.

#	Probennummer
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
DOC	dissolved organic carbon
DRO	Drehrohrofen
DVO	Deponieverordnung
EC	elemental carbon
GV	Glühverlust
MVA	Müllverbrennungsanlage
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
ROC	residual organic carbon
SEM	scanning electron microscope
TC	total carbon
TIC	total inorganic carbon
TOC	total organic carbon
Ts	Trockensubstanz
U/min	Umdrehungen pro Minute

1 Einleitung

Nahezu alle alltäglichen Materialien und Güter wurden einmal aus natürlichen Ressourcen produziert und werden am Ende ihres Lebens zu Abfall und Müll. Aufgrund des steigenden globalen Energieverbrauches und der erforderlichen Verringerung des Eingriffes in die Umwelt besteht die Pflicht, den Abfall zu verwerten. Die wirtschaftliche Nutzung des in großen Mengen anfallenden Mülls bewirkt eine Schonung der natürlichen Ressourcen und eine Wahrung des Umweltschutzes [1, 2].

Die Wien Energie GmbH betreibt an mehreren Standorten Müllverbrennungsanlagen, in denen aus Abfall effizient Strom für den Eigenbedarf und Wärme für österreichische Haushalte erzeugt wird. Dabei verwertet sie in ihren Müllverbrennungsanlagen jährlich hunderttausende Tonnen Hausmüll, Industriemüll, Klärschlamm und gefährlichen Abfall, um daraus effizient Strom und Wärme zu erzeugen. Die thermische Verwertung des Abfalls zur Energieerzeugung schont Brennstoffressourcen, bewirkt eine Verminderung des Abfallvolumens und die Zerstörung schädlicher enthaltener Substanzen. Die Anlagen der Wien Energie GmbH erreichen schon derzeit höchste Anforderungen an Energieeffizienz und Emissionen, die weit unter den behördlich vorgeschriebenen Grenzwerten liegen [3]. Am Standort Simmeringer Haide in Wien werden zwei Drehrohröfen zur Abfallverbrennung eingesetzt. Die bei der Verbrennung anfallende Schlacke wird einer ständigen manuellen Qualitätskontrolle (Bestimmung des Glühverlustes) unterzogen, um eine Aussage über die Ausbrandqualität zu erhalten und die Deponiefähigkeit zu gewährleisten.

1.1 Müllverbrennungsanlage Simmeringer Haide

In der Hausmüll-, Sonderabfall- und Klärschlammverbrennungsanlage am Standort Simmeringer Haide in Wien wird der Abfall in vier Wirbelschichtöfen und zwei Drehrohröfen verbrannt. An diesem Standort der Wien Energie GmbH werden jährlich rund 200.000 Tonnen Abfall zu 450 GWh thermischer Leistung und 50 GWh elektrischer Leistung umgesetzt, wobei die hohen Anforderungen an Energieeffizienz und Emissionen stets erreicht werden. Dadurch ist es möglich, 48.000 Haushalte in der Umgebung mit Fernwärme zu versorgen [3]. Abbildung 1 zeigt eine Luftbildaufnahme des Standortes Simmeringer Haide.



Abbildung 1: Müllverbrennungsanlage Wien Simmeringer Haide [3]

In den beiden Drehrohröfen (DRO 1/2) mit anschließender Rauchgasreinigung werden nicht gefährliche und gefährliche Abfälle thermisch verwertet. Die beiden Drehrohre weisen eine Länge von 12 Meter und einen Durchmesser von 4,5 Meter auf. Die angelieferten Abfälle werden vor der thermischen Verwertung zwischengelagert, um behördliche, sicherheitsrelevante und abfallrechtliche Kontrollen durchführen zu können. Feste, flüssige und infektiöse Abfälle sowie Gebinde und Fässer werden vor der Verbrennung sortiert [3, 4]. Bei Temperaturen von knapp 1000°C werden die gefährlichen Abfälle effektiv thermisch verwertet. Das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas wird in der nachgeschalteten Rauchgasreinigungsanlage behandelt, die eine der modernsten Anlagen Europas ist [3]. Die neben der Flugasche anfallende Schlacke wird regelmäßig kontrolliert und unter Einhaltung gesetzlicher Vorschriften deponiert [4].

1.2 Ziel dieser Arbeit

Um eine Effizienzsteigerung bei der Qualitätskontrolle der in den Drehrohröfen anfallenden Schlacken zu erzielen, soll in dieser Arbeit eine Grundlage für die Qualitätsbestimmung der Schlacke gelegt werden. In naher Zukunft besteht das Ziel, eine automatische Erfassung der Ausbrandqualität des Drehrohrofens in der Anlage zu implementieren, um die manuelle Qualitätskontrolle zu verbessern. Dies soll mittels eines berührungslosen Messverfahrens umgesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die chemischen und physikalischen Eigenschaften, die die Schlacke und ihre Qualität charakterisieren, untersucht. Zunächst werden die Einflussgrößen und verbrennungstechnologischen Parameter, die für die Abfallverbrennung im Drehrohrofen stehen, erläutert. In Folge werden Analysemethoden vorgestellt, mit denen ausgewählte Merkmale der Schlacken bestimmt werden. Von großem Interesse ist der Nachweis einer möglichen Korrelation zwischen dem Erscheinungsbild und Geruch der Schlacken und der Qualität des Ausbrandes. Dazu werden Untersuchungen an Schlackeproben im Labor der Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide durchgeführt.

2 Abfallverbrennung

Bei der thermischen Verwertung wird der Brennstoff Müll mit einer gewissen Verweilzeit einer hohen Temperatur in oxidativer Atmosphäre ausgesetzt, um eine Zersetzung und Stoffumwandlung zu bewirken. Diese Umwandlung geschieht aufgrund chemisch-physikalischer Prozesse und resultiert in einer erheblichen Massen- und Volumenreduktion. Durch ausreichende überstöchiometrische Verbrennung unter Luftsauerstoff und hohen Temperaturen werden toxische und problematische Stoffe zerstört [1, 2].

Ablauf der Verbrennung [1, 2]

Die Verbrennung des Brennstoffes Müll erfolgt in vier Stufen, wobei diese aufgrund der hohen Brennraumtemperatur und der räumlichen Gegebenheiten häufig gleichzeitig ablaufen:

1. Trocknung (bis 150°C)

In der ersten Stufe wird der eingesetzte Brennstoff getrocknet, da H₂O die Verbrennung hemmt.

2. Entgasung (150°C – 700°C)

Aufgrund der Hitze und der Brennraumtemperatur beginnt sich der Abfall zu zersetzen. Flüchtige organische Bestandteile und Teilchenrückstände wie Asche und kohlenstoffhaltiger Koks werden freigesetzt. Dieser Prozess ist irreversibel.

3. Vergasung (800°C – 900°C)

Die Entgasungsprodukte reagieren mit der Gasatmosphäre, welche die Vergasungsmedien Luft und H₂O enthält.

4. Verbrennung (über 900°C)

Die Oxidation der Entgasungsprodukte zu CO₂ ist eine exotherme Reaktion. Für eine vollständige Verbrennung ist ein Luftüberschuss notwendig.

Beim Verbrennungsprozess werden gasförmige und feste Produkte gebildet. Die gasförmigen Produkte, auch Rauchgas genannt, gelangen in den Abhitzekessel zur Energieerzeugung [4]. Da das Rauchgas Flugasche enthält, wird dieses in der Rauchgasreinigungsanlage abgeschieden. Die im Brennraum verbliebene Asche liegt aufgrund der hohen Temperaturen teils flüssig und fest vor und wird am Ende des Brennraumes ausgetragen [2, 5].

2.1 Technologie Drehrohrofen

Jene Abfälle, die aus toxischen und umweltgefährdenden Substanzen bestehen und kontrolliert verwertet werden müssen, werden in Drehrohrofen thermisch verwertet. Der Vorteil dieser Verbrennungstechnologie gegenüber der Wirbelschicht- oder Festbetttechnologie ist, dass Drehrohrofen mit sehr hohen Temperaturen betrieben werden können. Weiters sind Drehrohrofen für ein weites Band hinsichtlich der Brennstoffstückigkeit und -heterogenität einsetzbar [6]. In der heißen Ofenatmosphäre durchläuft die Asche die Schmelzphase, sie liegt teils fest und teils flüssig vor. Es ergeben sich aber keine Einschränkungen im Verbrennungsbetrieb, denn die Asche wird am Ende des Drehrohres ausgetragen [7]. Als Beispiel für gefährlichen Abfall sind Reststoffe aus der Petrochemie, Farb- und Lackmittel sowie medizinische Abfallprodukte, welche in verplombten Behältnissen angeliefert werden, zu nennen [2]. Anhand der Abbildung 2 wird diese Verbrennungstechnologie erläutert.

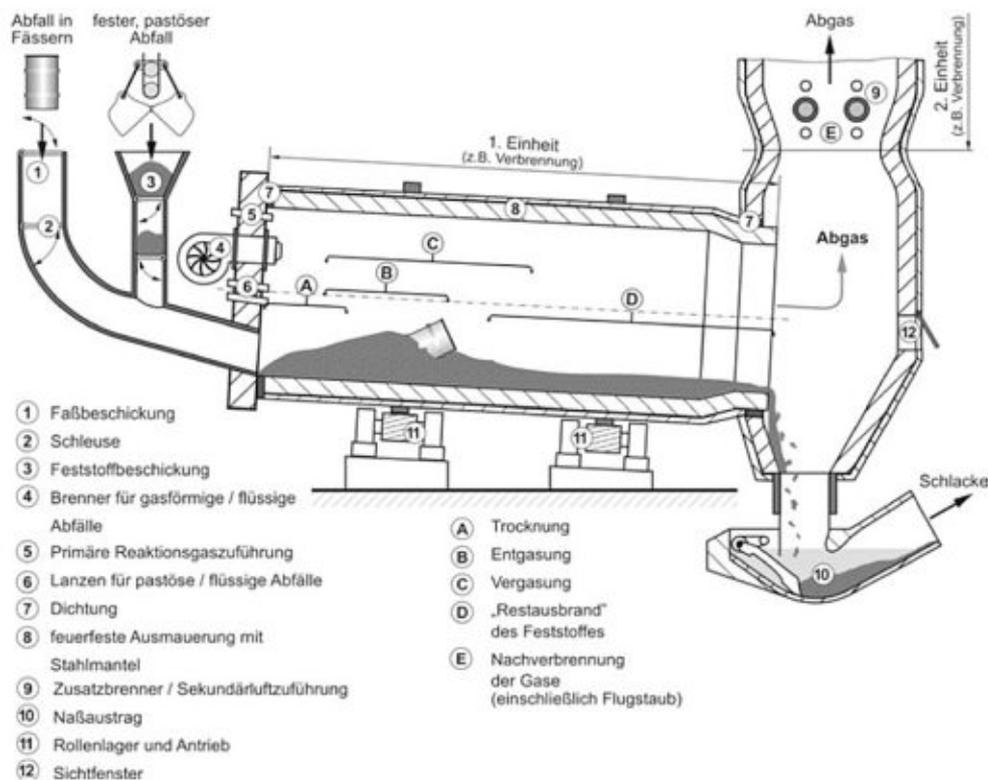


Abbildung 2: Prinzipielle Darstellung eines Drehrohrofens [7]

Ein Drehrohrofen ist ein aus Stahl gefertigter Zylinder, der leicht geneigt auf Laufrollen (1° - 3°) gelagert ist. Während des Betriebes kann die Ofenneigung nicht verändert werden. Die Innenwand ist mit feuerfesten Materialien ausgekleidet, um den Stahlzylinder vor den hohen Temperaturen zu schützen und den Wärmeverlust zu minimieren [8]. Unterschiedliche Spannungszustände während des Betriebes bewirken abrasiven Verschleiß an der Ausmauerung [7]. Die im Zuge der Ofenrevision erneuerte Innenwand des Drehrohrofens der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide ist in Abbildung 3 ersichtlich. Die durch den Verschleiß beeinträchtigte feuerfeste Ausmauerung wurde dabei getauscht.



Abbildung 3: Innenraum des DRO 1 aus Sicht der Stirnwand

Der Verbrennungsprozess

An der Stirnwand des Drehrohrofens werden neben Frischluft die zu verbrennenden Abfälle über Vorrichtungen eingebracht. Wie in Abbildung 2 gezeigt werden Fässer und feste Abfälle über Schurren, flüssige und pastöse Abfälle mittels Lanzen in das Drehrohr eingeleitet [7]. Zusätzlich werden bei Lastwechsel oder dem Anfahren über Lanzen Stützbrennstoffe wie Altöl, Heizöl und Lösemittel eingespritzt [4]. Die unterschiedlichen eingebrachten Fraktionen bilden im Drehrohr ein mechanisch bewegtes Feststoffbett [8].

Durch die Zufuhr des brennbaren Abfalles, der Nutzung der Stützbrennstoffe, der Zufuhr von Frischluft und der exothermen Reaktionen können Temperaturen von über 900°C im Brennraum des Drehrohrs erreicht werden [1, 7, 8]. Das leicht geneigte Drehrohr bewirkt den Transport des Ofeninhaltes vom Eintrag zum Austrag. Ein Drehantrieb am Drehrohr ermöglicht eine in weiten Bereichen einstellbare Drehzahl. Aufgrund der Rotation des Rohres mit üblicherweise 0,5-2 Umdrehungen pro Minute wird eine Durchmischung des Feststoffbettes gewährleistet [1, 4, 8].

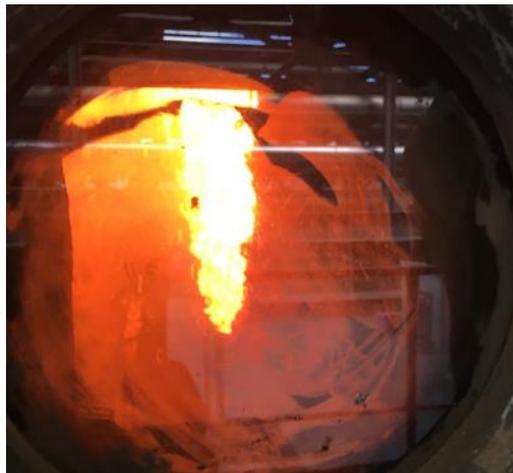


Abbildung 4: Blick auf den Austrag des DRO 1 während des Betriebes durch ein Schauloch

Im Einbringungsbereich des Drehrohrs findet die Trocknung des Abfalles statt. Aufgrund der hohen Temperaturen verdampft das Wasser der eingebrachten Fraktionen und wird über das Rauchgas abgegeben. Die heiße Ofenatmosphäre bewirkt unmittelbar danach die Entgasung des Brennstoffes. Flüchtige Bestandteile entweichen, die bei den heißen Bedingungen sofort zünden. Die weiteren Prozessstufen Vergasung und Verbrennung laufen nahezu parallel ab. Am Ende des Drehrohrs befindet sich die reine Verbrennungszone [7, 8]. Abbildung 4 zeigt den DRO der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide im Betrieb. Der heiße Brennraum (gelb), sowie die glühende Ausmauerung (rot) sind durch das Schauloch erkenntlich. Während der Anlagenführung war die Rotation des Drehrohrs eindeutig erkennbar.

Eine lange Verweilzeit sowie die konstante Durchmischung im Ofen ermöglichen bei optimaler Fahrweise eine vollständige Verbrennung des Abfalls. Am Ende des Drehrohres werden die Verbrennungsprodukte Asche und Rauchgas ausgetragen [8]. Die verbliebenen brennbaren Bestandteile des Rauchgases können bei Bedarf in der Nachbrennkammer durch nochmalige Luft- und Brennstoffzufuhr verfeuert werden (siehe Abbildung 2) [7].

Aufgrund der hohen Brennraumtemperaturen befindet sich die Asche im teils festem, teils geschmolzenem Zustand [1, 4]. Der Großteil der Asche fällt aus dem Drehrohr in den Nassentschlacker, die restliche Menge der Asche wird über das Rauchgas als Flugasche ausgetragen (siehe Abbildung 5) [4]. Im Nassentschlacker kühlt die heiße Asche rasch ab und schmelzflüssige Komponenten der Asche erstarren, man erhält eine transportfähige Schlacke [7]. Daneben stellt der Nassentschlacker eine luftdichte Abgrenzung zur heißen Brennraumatmosphäre dar [5, 7]. Mittels mechanischer Fördersysteme wird die Schlacke ausgetragen, Abbildung 6 zeigt die Schlackenaustragung aus den Drehrohröfen der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide.

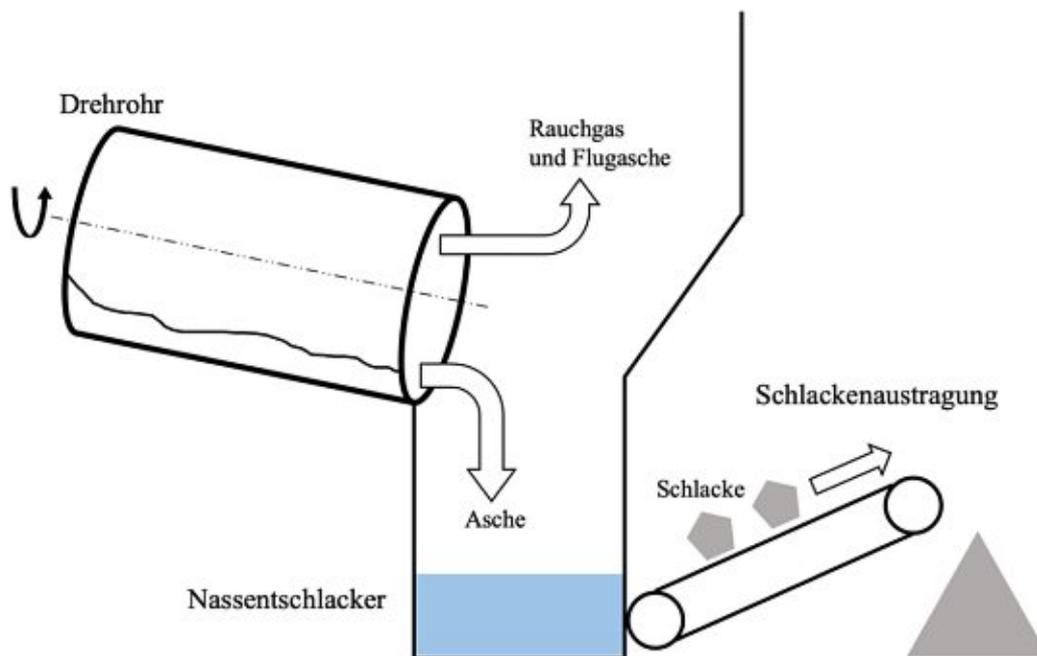


Abbildung 5: Skizzierte Darstellung der Schlackenaustragung



Abbildung 6: Blick auf die Schlackenaustragung. Der Nassentschlacker kühlt die heiße Asche rasch ab und ermöglicht eine mechanische Austragung

Waibel [8] stellt für diese Verbrennungstechnologie einige Nachteile vor. Die thermische Effizienz der Verbrennung im Drehrohr ist gegenüber anderen Technologien wie der Rostfeuerung geringer. Da die Qualität der Verbrennung von vielen Parametern abhängt, kommt es zu fluktuierenden Zusammensetzungen und Qualitäten der Produkte Rauchgas und Asche. Trotz der kontinuierlichen Durchmischung und der hohen Verweilzeit des Festbettes, kann es zu Agglomerationen der Feststoffpartikel kommen, die die Qualität der Asche verändern. Darüber hinaus entstehen Anbackungen der heißen Partikel an der Rohrwand, die ein Zuwachsen des Drehrohrofens bewirken. Aufgrund dieser Nachteile ist eine regelmäßige mehrtägige Revision der Drehrohröfen notwendig.

2.2 Rechtliche Aspekte

Die umfassende Abfallwirtschaft von der Sammlung, dem Transport, der Aufbereitung bis zur Verwertung ist national im Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002) in der geltenden Fassung geregelt. Das AWG 2002 beinhaltet in zehn Abschnitten die rechtlichen Rahmenbedingungen und Pflichten, die die Abfallbesitzer, -sammler und -behandler haben [4]. Im Abfallwirtschaftsgesetz 2002 wird auf die unterschiedlichen Abfallarten hingewiesen, die in Form eines Abfallverzeichnisses formuliert sind. Im Abfallverzeichnis sind die gefährlichen und nicht gefährlichen Abfälle festgelegt [9]. Betreffend den thermischen Abfallbehandlungsanlagen werden im AWG 2002 die Genehmigungen und Anforderungen angeführt. In Österreich wird die Behandlung von Abfällen größtenteils von der Deponieverordnung 2008 (DVO 2008) beeinflusst, sie schreibt die Eigenschaften und Grenzwerte der deponierten Abfälle vor. Damit die gesetzlichen Vorgaben der DVO 2008 eingehalten werden können, müssen nahezu alle Abfälle thermisch, mechanisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden [4].

2.2.1 Thermische Behandlung der Abfälle

Das Europäische Parlament und der Europäische Rat beschlossen eine Richtlinie zur Verbrennung von Abfällen, die in Österreich in die Abfallverbrennungsverordnung (AVV) umgesetzt wurde [4]. Die AVV regelt national die thermische Behandlung von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen. Darin sind die Verbrennungstechnologien, die nötigen Kontrollen und die Emissionsgrenzen für eine ordnungsgemäße Umsetzung des Abfalles und den Reststoffen wie Schlacken festgelegt, mit dem Ziel, die Umwelt so gering wie möglich zu belasten [10].

In der AVV sind die Grenzwerte für umweltverschmutzende Schadstoffe festgelegt, die gemeinhin für alle Anlagen gelten, die Abfall verbrennen, wobei in Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen unterschieden wird. Das bedeutet, dass eine Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlage während der tatsächlichen Betriebszeit so ausgelegt und ausgerüstet sein muss, dass die Emissionsgrenzwerte im Abgas eingehalten werden. Repräsentativ ist dazu in §7 Abs. 2 und 3 AVV die Betriebsbedingung geregelt, dass in Verbrennungsanlagen die

Temperatur des Verbrennungsgases auch unter unerwünschten Bedingungen nicht unter 850°C, für gefährliche Abfälle die Temperatur nicht unter 1100°C fallen darf [10].

Die MVA Simmeringer Haide der Wien Energie GmbH unterliegt einer Sondergenehmigung bezüglich der Mindesttemperatur für die Verbrennungslinien der Drehrohröfen 1 und 2 [11]. Demnach ist der Betrieb der DRO der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide für die Verbrennung gefährlicher Abfälle bei einer Mindesttemperatur von 850°C genehmigt.

Die AVV weist zur Erklärung der einzelnen Abschnitte Anlagen auf, in denen neben den Emissionsgrenzwerten, Äquivalenzfaktoren für Dioxine und Furane, Probennahme- und Analyseverfahren für Emissionsmessungen und weitere Vorgaben angeführt sind. Ein Auszug aus der Anlage 1 der AVV wird in Tabelle 1 gezeigt. In dieser Tabelle sind die Tagesmittelwerte der Emissionsgrenzwerte im trockenen Abgas angeführt, die eine Müllverbrennungsanlage im Betrieb einhalten muss. In weiteren Anlagen der AVV werden Messmethoden sowie weitere nachzuweisende Schadstoffe angeführt, wobei feste Werte oder auch über eine Mischungsregel bestimmte Werte als Grenzwerte festgelegt sind. Die Mischungsregel soll eine gemeinhin idente Behandlung aller Müllverbrennungsanlagen bewirken [4, 10].

Tabelle 1: Auszug aus der AVV Anlage 1: Tagesmittelwerte der Emissionen für Verbrennungsanlagen im trockenen Abgas und bezogen auf 11% Sauerstoff (bei ausschließlicher Altölverbrennung: bezogen auf 3% Sauerstoff) [10]

staubförmige Emissionen	10	mg/m ³
gas- und dampfförmige organische Stoffe, angegeben als organisch gebundener Kohlenstoff insgesamt	10	mg/m ³
Chlorwasserstoff (HCl)	10	mg/m ³
Fluorwasserstoff (HF)	0,5	mg/m ³
Schwefeldioxid (SO ₂)	50	mg/m ³
Stickstoffoxide (NO und NO ₂), angegeben als NO ₂		
bei einer Nennkapazität bis 2 t _{Abfall} /h	200	mg/m ³
bei einer Nennkapazität von mehr als 2 bis 6 t _{Abfall} /h	150	mg/m ³
bei einer Nennkapazität von mehr als 6 t _{Abfall} /h		
- für Neuanlagen	70	mg/m ³
- für bestehende Anlagen	100	mg/m ³
Kohlenstoffmonoxid (CO)	50	mg/m ³
Quecksilber und seine Verbindungen, angegeben als Hg	0,03	mg/m ³

2.2.2 Deponierung der Schlacke

In Österreich ist die Deponierung unbehandelter Abfälle gesetzlich nicht erlaubt [3]. Der Grund liegt darin, dass deponierte Substanzen wie Müll und Reststoffe mit der Umgebung reagieren können und dadurch umweltschädigende toxische Stoffe emittiert werden. Die Endlagerung ausschließlich reaktionsarmer Stoffe ist gesetzlich vorgeschrieben und wird auch kontrolliert durchgeführt. Es dient dem Ziel, während des Bestehens der Deponie die Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden oder so gering wie möglich zu halten [4].

Die Deponieverordnung 2008 (DVO 2008) regelt die Endlagerung deponiefähiger Substanzen, wobei die Deponiefähigkeit in den einzelnen Abschnitten angegeben wird. Zur genauen Ausführung wird in der DVO 2008 auf die Anhänge verwiesen, in denen u.a. die Beurteilung von Abfällen erfolgt [12].

In der DVO 2008 ist ein wichtiges Deponiekriterium der Gehalt an organischen Kohlenstoff (TOC), der für die bei der thermischen Behandlung anfallenden Schlacke ein Merkmal ist.

Nach §7 Abs. 7 DVO 2008 [12] ist die Ablagerung folgender Abfälle verboten:

„...deren Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) im Feststoff mehr als fünf Masseprozent beträgt...“

wobei weiters in der DVO 2008 Ausnahmen angeführt werden.

Die MVA Simmeringer Haide erbringt den Nachweis für die Deponiefähigkeit der in den DRO anfallenden Schlacken über die Bestimmung des Glühverlustes nach EN 15169 (siehe dazu Kapitel 4.2 Glühverlust nach DIN EN 15169). Bei einem Glühverlust von nicht größer als 5 Masseprozent gilt der TOC-Grenzwert als eingehalten und die Deponierung der Schlacke ist erlaubt [12]. Die an diesem Standort entstehenden Schlacken werden ausschließlich deponiert oder für den Deponiebau verwendet [3].

Für diese Arbeit wird die Glühverlustgrenze daher mit 5% der Trockensubstanz definiert.

3 Eigenschaften der Schlacke aus der Müllverbrennung

Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen sind im Allgemeinen ein heterogenes Material, das aus organischen und anorganischen Bestandteilen besteht [7]. Die bei der thermischen Abfallbehandlung entstehende Schlacke ist grundsätzlich ein Indiz für die Qualität der Verbrennung [5]. Eine Charakterisierung der Schlacken erfolgt üblicherweise nach ihrer stofflichen Zusammensetzung, chemischen Aspekten oder der weiteren Verwendungsmöglichkeiten [13].

Ein Ziel bei der thermischen Verwertung von Abfall ist, die anfallende Schlacke einfach entsorgen zu können oder eine weitere Verwendung zu ermöglichen [1]. Geeignete Schlacken werden als Zuschlag zu Baustoffen für den Deponiebau verwendet, für die Weiterverwendung nicht geeignete Schlacken werden deponiert [3].

Die deponierte Schlacke kann dabei mit der Umgebung (z.B. Luft) reagieren, wodurch chemische Reaktionen ablaufen, die die Eigenschaften der Schlacke sowie die Umweltverträglichkeit beeinflussen können [5]. Zum Beispiel bewirken exotherme Reaktionen wie die Hydratation von Schlackephase einen bedeutsamen Temperaturanstieg im Schlackekörper, die einen negativen Einfluss auf die Deponieanlage nehmen können. Außerdem werden im Sickerwasser von Schlackedeponien zumal hohe Chlorid- und Sulfatkonzentrationen nachgewiesen [14].

In nachstehender Abbildung 7 werden sechs Schlackeproben vorgestellt, die innerhalb von 3 Tagen an den Drehrohröfen 1 und 2 am Standort Simmeringer Haide entnommen wurden. Proben a), c) und d) weisen glasartige Komponenten auf, da diese Oberflächenspiegelungen erzeugen und die Schlackenteilchen sind deutlich schwerer. Probe b) ist deutlich dunkler als die anderen Proben und die Partikel neigen zu Agglomeration. Dies spricht für einen hohen Feuchtegehalt. Stoffartige Fragmente sind in Proben e) und f) erkennbar.



a) 13. Juli 2020 2:00 Uhr



b) 13. Juli 2020 6:00 Uhr



c) 12. Juli 2020 6:00 Uhr



d) 11. Juli 2020 10:00 Uhr



e) 11. Juli 2020 6:00 Uhr



f) 10. Juli 2020 22:00 Uhr

Abbildung 7: Ausgetragene Schlacken aus den DRO; Zeitraum der Probenahmen: 10. bis 13. Juli 2020

3.1 Einflussgrößen

Die Zusammensetzung und Qualität der Schlacke werden durch etliche Einflussgrößen bestimmt, die nachstehend diskutiert werden. Im Allgemeinen sind Schlacken ein sehr heterogenes Material mit unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung und unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Daher besteht ohne eine adäquate Vorbehandlung der Schlacke die Möglichkeit, bei mehrmaliger Messung einer Schlackeneigenschaft verschiedene Resultate zu erhalten.

3.1.1 Art des Müllinputs

In erster Linie beeinflusst die Müllzusammensetzung, die regionalen und saisonalen Einflüssen unterliegt, die Zusammensetzung des Schlackenaustrages. Haus-, Sperrmüll und Industriemüll sowie gefährliche Abfälle („Sondermüll“) weisen grundsätzlich voneinander verschiedene Zusammensetzungen auf und rufen daher auch Unterschiede in der Zusammensetzung der Schlacken hervor [13, 15]. Hausmüll besteht zum größten Teil aus Organik (Lebensmittel), Papier und Verpackungen, Kunststoffe, Glas, Metalle und Textilien. Der in den Drehrohröfen am Standort Simmeringer Haide verbrannte Industriemüll und gefährliche Abfall umfasst Lackdosen, fossile Gemische in Fässern aus der Petrochemie und medizinische Abfälle aus Krankenhäusern und Spitälern, um nur einige zu nennen.

Eine Analyse der in dieser Arbeit verwendeten Literatur zeigt, dass Schlacken unterschiedlicher Abfallherkunft weitgehend idente chemische Verbindungen aufweisen. Obwohl die Zusammensetzung der Schlacke variiert, weist sie die gleichen anorganischen Verbindungen auf, die auch natürlich in der Erdkruste vorkommen. Der Unterschied von Schlacken zwischen der Verbrennung von Hausmüll, Industriemüll und gefährlichem Abfall liegt in der Anzahl der anorganischen Verbindungen, auf das im Kapitel 3.2 näher eingegangen wird.

3.1.2 Verbrennungstechnologische Parameter

Eine hohe Qualität der Schlacke wird durch eine vollständige Verbrennung des Abfalles erzielt.

Die Bedingungen für einen hochwertigen Ausbrand sind [6]:

- ausreichend hohe Temperatur im Brennraum
- lange Verweilzeit des Brenngutes
- ausreichende Durchmischung der Luft mit den Brenngasen (Turbulenz)
- zweckmäßiges Brennstoff/Luft-Verhältnis

Die ersten drei Punkte, die charakteristisch für einen guten Ausbrand stehen, werden als 3T-Kriterium der Verbrennung angegeben: time, temperature und turbulence [6]. Weiters ist die Aufbereitung des Materialinputs vor der Verbrennung wesentlich für die ausgetragene Schlacke [5, 13].

Temperatur

Die Brennraumtemperatur wird durch den Heizwert des Abfalles, der durch die Vormischung der verschiedenen Abfälle entsteht und der Luftzufuhr bestimmt. Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf den Ablauf der Verbrennung. Mit steigender Temperatur steigt auch die Geschwindigkeit, mit der die Verfeuerung des Brennstoffes geschieht [6]. Grundsätzlich sollen Temperaturwechsel im Brennraum vermieden werden, da diese zu Wärmespannungen in der Ausmauerung führen und die Feuerfeststeine dadurch schneller verschleifen [7]. Die niedrigste Brennraumtemperatur bildet die gesetzliche Vorgabe (siehe dazu Kapitel 2.2.1), die eine vollständige Zerstörung der schädlichen Substanzen bewirkt [1]. Die höchste Temperatur wird durch die thermische Stabilität der eingesetzten Ausmauerung sowie der Vermeidung der Bildung thermischer Stickoxide bestimmt. Im Allgemeinen fördern hohe Brennraumtemperaturen den guten Ausbrand [7].

Durchmischung (Turbulenz)

Um eine vollständige Oxidation zu ermöglichen, muss der als Brennstoff genutzte Abfall mit ausreichend viel Luftsauerstoff in Kontakt treten können. Bei angemessener Durchmischung kann die Verweilzeit und die Temperatur verringert werden, ohne dabei die Ausbrandqualität zu beeinträchtigen [6]. In den DRO erfolgt die ordnungsgemäße Durchmischung durch die Drehzahl, wobei die Eigenschaften Form, Größe und Dichte des Materials im Feststoffbett die Durchmischung beeinflussen [8].

Verweilzeit

Wie lange das Bettmaterial durch das Drehrohr befördert wird, hängt von der Drehzahl, der Neigung des Drehrohres, der Rohrlänge, dem Rohrdurchmesser und dem Füllungsgrad ab [8]. Je länger das Feststoffbett der hohen Temperatur im Brennraum ausgesetzt ist, desto besser wird die Qualität der Verbrennung und der erhaltenen Schlacke sein. Sind eine hohe Temperatur und eine gute Durchmischung vorhanden, so kann damit gerechnet werden, dass eine niedrigere Verweilzeit für eine vollständige Umsetzung ausreicht [6].

Luftzahl (Luftüberschuss)

Um einen vollständigen Ausbrand des Brenngutes erreichen zu können, muss überstöchiometrisch verbrannt werden, das bedeutet die Luftzahl ist größer als 1 [6]. Eine weitere Erhöhung des Sauerstoffanteiles in der Primärluftzuführung bewirkt eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur. Somit kann der Glühverlust und der TOC Gehalt der Schlacke herabgesenkt werden [5, 7]. Der Luftüberschuss sollte jedoch möglichst gering sein, da eine zu hohe Luftzahl eine Abkühlung im Brennraum bewirkt und die vollständige Oxidation unterdrückt wird [6].

3.2 Anorganische Bestandteile

Überwiegend besteht Schlacke aus Müllverbrennungsanlagen aus anorganischen Komponenten, die in amorphen und kristallinen Strukturen vorliegen. Dabei überwiegen die chemischen Elemente Silizium, Aluminium, Eisen und Calcium, die die metallischen, keramischen und glasartigen Komponenten bilden. Sie liegen in Form von Carbonaten, Oxiden und Silikaten in unterschiedlichen Korngrößen vor [5, 13, 16]. Die Partikelform ist dabei sehr unregelmäßig, scharfkantig und die Partikel selbst sind häufig porös, was auf die vorherrschenden Bedingungen während des Verbrennungsprozesses zurückzuführen ist. Dadurch weisen die Partikel eine sehr hohe spezifische Oberfläche auf [16, 17].

Nachstehende Abbildung 8 zeigt eine mikroskopische Aufnahme von Schlacke aus der Verbrennung von petrochemischen Abfällen. Erkennbar sind eine unregelmäßige Partikelform und eine scharfkantige poröse Struktur.

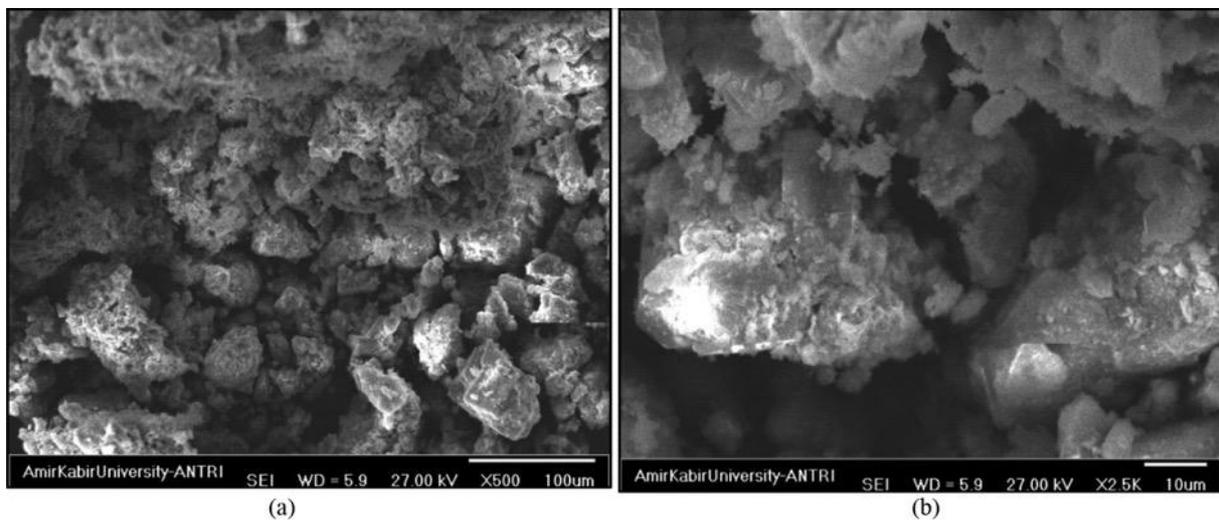


Abbildung 8: SEM Aufnahmen einer Schlacke aus der Müllverbrennung mit (a) 500 (b) 2500 -facher Vergrößerung [17]

Die großen Partikel, vorwiegend bestehend aus Oxiden und Silikaten, sind weitgehend für die physikalischen Eigenschaften der Schlacke verantwortlich [5, 13]. Hämatit (Fe_2O_3) Quarz (SiO_2) und Korund (Al_2O_3) bilden einen Großteil der Oxide, als Vertreter der Silikate kann Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) genannt werden [16]. Silikate und Oxide charakterisieren auch die Höhe der Verglasung der Schlacke, welche auf die Höhe der Brennraumtemperatur zurückgeführt werden kann [13]. Die verglasten Komponenten in der ausgetragenen Schlacke sind mit dem Auge meist deutlich erkennbar.

Die kleineren Teilchen in der Schlacke kommen in Form von Carbonaten und in geringeren Mengen als Chloride und Sulfate vor [13]. Die chemischen Eigenschaften werden überwiegend durch die kleinen Partikel bestimmt [5]. Das am häufigsten vorkommende Carbonat ist der Calcit (CaCO_3), der mit steigender Konzentration die Festigkeit der Schlacke erhöht. Zudem beweist sich Calcit als guter Einbinder von Schwermetallen wie Blei und Zink [18].

Schwermetalle in der Schlacke

Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink treten in geringen Mengen in der Schlacke auf. Sie sind meist in Form von Silikaten, Oxiden, Chloriden und Sulfaten gebunden [5, 17, 19]. Die Carbonate, welche die Feinkornfraktion bilden, binden vor allem das Blei und Zink in das Kristallgitter ein [13, 18]. Die Auswirkung auf die Umwelt markiert dabei weniger die Konzentration der Schwermetalle, sondern mehr die Möglichkeit der Mobilisierung und muss untersucht werden [1, 14].

Die Elution der Schwermetalle wird durch das standardisierte Elutionsverhalten bestimmt, welche in Österreich durch die DVO 2008 geregelt ist [12].

Ziel ist es, die Schwermetalle in einem stabilen Kristallgitter einbinden zu können, um die Umwelt bei der Verwendung oder Deponierung der Schlacke nicht zu gefährden [5, 13]. Für die Abfallverbrennung bedeutet dies, dass die Bildung von keramischen und glasartigen Komponenten gefördert werden soll, da diese die Bindung von Schwermetallen ermöglichen [1, 7].

Daneben weist die Schlacke Komponenten auf, die durch den Verbrennungsprozess keine Veränderung erfahren. Das sind Schrottteile aus Metallen (Eisen und Nichteisen), Keramik- und Glasbruch. Diese Komponenten werden nach einer Abscheidung und Klassierung gesammelt und an Abnehmer weitergegeben [1, 7].

Die nachstehende Tabelle 2 zeigt beispielhaft eine Schlackenzusammensetzung, wie sie von Rendek et al. [15] bestimmt wurde. Die Schlacken aus sechs unterschiedlichen Müllverbrennungsanlagen wurden auf ihre chemischen Komponenten untersucht. Hauptsächlich Hausmüll mit Anteilen an Industrieabfall wurden in den MVA verbrannt. Die Oxide nehmen wie oben erklärt den Großteil der Schlackenmasse ein. Die bei der Verbrennung entstehenden Schlacken ähneln in ihrer Zusammensetzung sehr den Mineralien, die natürlich in der Erdkruste vorkommen.

Tabelle 2: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung von Hausmüll, Industriemüll und gefährlichen Abfällen; adaptiert aus [15]

Verbindung (Gew.-%)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
SiO ₂	47,82	40,77	39,17	31,91
CaO	15,99	19,51	17,52	21,57
Al ₂ O ₃	8,63	8,60	13,06	12,64
Na ₂ O	6,34	4,95	3,66	4,00
Fe ₂ O ₃	6,23	7,12	7,54	12,78
MgO	2,38	2,36	3,36	2,36
andere	12,61	16,69	15,69	14,74

Schlacke aus der Verbrennung von Industriemüll und gefährlichen Abfällen

Zhao et al. [20] untersuchten die Zusammensetzung der Schlacke, die aus der Verbrennung medizinischer Abfälle stammt und als gefährlicher Abfall klassifiziert ist. Tabelle 3 zeigt die anorganischen Bestandteile dieser Schlacke, wie sie auch natürlich in der Erdkruste vorkommen. Mehr als die Hälfte (ca. 57%) der Zusammensetzung bilden das Calciumoxid (CaO) und Quarz (SiO₂), die restlichen Oxide Hämatit (Fe₂O₃), Korund (Al₂O₃) und Magnesiumoxid bilden 22% der Schlacke. Der hohe Chlor-Gehalt in der Schlacke wird auf die Zersetzung von Polyvinylchlorid (PVC) und dem Rückstand von Kochsalz zurückgeführt.

Tabelle 3: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung medizinischer Abfälle, adaptiert aus [20]

Verbindung	Gew.-%
SiO ₂	26,1
CaO	30,5
Al ₂ O ₃	10,0
Fe ₂ O ₃	6,0
MgO	6,0
P ₂ O ₅ , S ₂ O ₃	4,4
Cl	8,1
andere	8,8

Die Schlacken, die aus der Verbrennung weiterer klinischer Abfälle in Drehrohröfen angefallen sind, wurden von Gidarakos et al. [19] untersucht. Vergleicht man zunächst die Anzahl der Verbindungen aus Zhao et al. [20] in Tabelle 3 und Gidarakos et al. [19] in Tabelle 4, so sieht man, dass die gleichen Verbindungen vorhanden sind, aber in unterschiedlicher Menge. Der Quarz-Gehalt (SiO₂) ist annähernd ident, der CaO-Gehalt unterscheidet sich weitgehend.

Tabelle 4: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung klinischer Abfälle, adaptiert aus [19]

Verbindung (Gew.-%)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
SiO ₂	42,78–47,28	42,58–47,06	40,97–45,29	37,58–41,54
CaO	25,18–27,56	28,51–31,19	27,79–30,41	29,67–32,47
Al ₂ O ₃	12,81–13,61	12,90–13,70	11,98–12,72	10,21–10,85
Na ₂ O	6,89–7,69	4,39–4,91	7,42–8,28	10,96–12,24
TiO ₂	3,80–3,62	3,88–4,08	3,70–3,88	3,60–3,78
andere	4,10–4,66	3,18–3,62	3,53–4,03	3,33–3,79

Die Charakteristiken der Schlacke aus der Verbrennung von petrochemischen Abfällen wurde von Ramezianipour und Nikravan [17] untersucht. Der ölige Abfall wurde aufbereitet und in einem Drehrohrofen verbrannt, die Ergebnisse der Schlackenanalyse sind in Tabelle 5 dargestellt. Nahezu die Hälfte des Schlackengehaltes nimmt der Hämatit ein, gefolgt von Anteilen an Calciumoxid, Schwefeltrioxid und Magnesiumoxid. Diese Verbindungen treten in der Schlacke als kristalline Verbindungen auf und können erkennbar sein. Der hohe Hämatitgehalt resultiert aus dem Flockungsmittel Eisen(III)-chlorid (FeCl_3), das in der petrochemischen Industrie verwendet wird [17].

Tabelle 5: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung petrochemischer Abfälle, adaptiert aus [17]

Verbindung (Gew.-%)	Probe 1	Probe 2	Probe 3
SiO_2	< 0,01	0,30	< 0,01
CaO	15,70	15,40	17,60
Al_2O_3	0,87	1,03	4,45
Na_2O	< 0,01	0,12	0,05
Fe_2O_3	56,40	53,40	49,80
TiO_2	1,04	0,92	2,24
MgO	4,50	3,70	3,90
SO_3	8,10	7,40	7,20
Glühverlust	7,50	9,07	8,24
andere	5,87	8,66	6,51

3.3 Wassergehalt

Die im Drehrohrofen entstehende Asche wird aus dem Brennraum durch die Neigung des Drehrohres ausgetragen und fällt in den Nassentschlacker. In diesem Wasserbad wird die anfallende Schlacke abgekühlt, schmelzflüssige Komponenten erstarren und Reaktionen finden statt [5, 7]. Gemeinhin finden die Hydratisierung oder Sulfatisierung des Calciumoxids (CaO) zu Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oder Calciumsulfat (CaSO_4) statt, außerdem treten Salzbildungs- und Lösungsreaktionen auf [5, 13, 18]. Die auftretenden Reaktionen bewirken eine Verfestigung und eine stärkere Aufnahme der Schwermetalle in den Feststoff [7].

Aufgrund der Porosität der keramischen, glasartigen und metallischen Komponenten, weist die Schlacke die Fähigkeit der Absorption von Wasser auf. Die Porosität ist von der Zusammensetzung abhängig [16]. Dabei ist der Umstand, dass feinkörnige Schlacken etwas mehr Wasser aufnehmen als grobkörnige, von Interesse. Dies lässt sich auf die höhere spezifische Oberfläche des feinkörnigen Gemenges zurückführen [16, 17]. Meinfelder et al. [5] geben an, dass die Schlacke bei der Erstarrung rund 20 bis 35 Gew.-% Wasser aufnimmt.

Dhir et al. [16] geben eine durchschnittliche Wasseraufnahme von 9,3 % an, wobei grobkörnige Fraktionen rund 7-15% Wasser absorbieren, feinkörnige in einem noch größeren Bereich von 2-17%. Schlacke nimmt daher wesentlich mehr Wasser als natürlicher Sand auf, der ein Aufnahmevermögen von 1-3% aufweist [16]. Ramezani pour und Nikravan [17] geben an, dass die Wasseraufnahmefähigkeit von Schlacke mit 12,8% ebenfalls signifikant höher ist als die des natürlichen Sandes.

Je nach Gehalt der anorganischen Bestandteile, liegt die Schlacke pastös, pulvrig-sandig oder mit verglasten Komponenten vor. Die Abkühlung der Asche im Nassentschlacker bewirkt, dass die löslichen Bestandteile wie Chloride und Sulfate extrahiert werden [5]. Aus ökonomischen und energiesparenden Gesichtspunkten ist die Nutzung von Wasser in diesem Prozess unumgänglich und wird in vielen MVA verwendet.

3.4 Organische Bestandteile

Organische Verbindungen bestehen hauptsächlich aus dem Element Kohlenstoff. Der gesamte Kohlenstoff (total carbon, TC) in der Schlacke besteht in erster Linie aus gebundenem anorganischem Kohlenstoff (total inorganic carbon, TIC), aus organischem Kohlenstoff (total organic carbon, TOC) und dem restlich oxidierbarem Kohlenstoff (residual oxidizable carbon, ROC) [21]. Eine Unterteilung der organischen Verbindungen in Abhängigkeit des vorkommenden Kohlenstoffes, wie er in Schlacken vorkommt, erfolgt nach Abbildung 9.

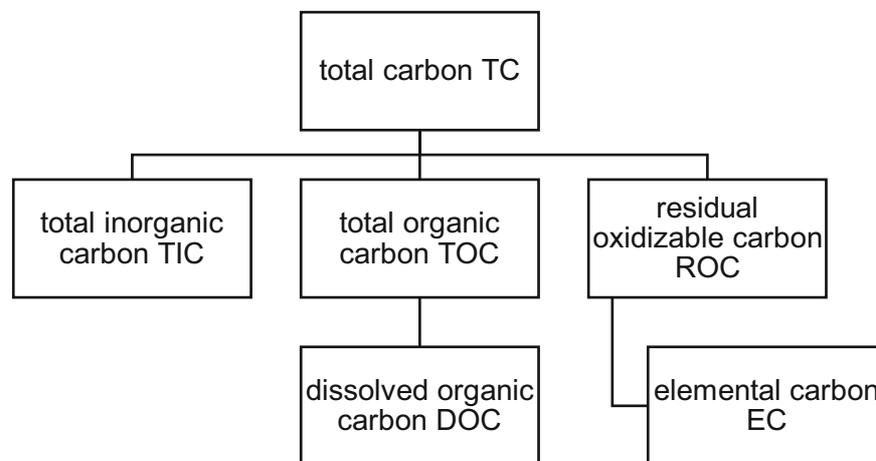


Abbildung 9: Einteilung des Kohlenstoffes in der anfallenden Schlacke, adaptiert aus [22]

TIC-Gehalt in der Schlacke

Schlacke aus der Müllverbrennung besteht überwiegend aus amorphen und kristallinen Verbindungen der Elemente Al, Ca, Fe und Si (siehe dazu Kapitel 3.2 Anorganische Bestandteile). Der Gehalt an anorganisch gebundenen Kohlenstoff TIC in der Schlacke wird überwiegend über die Menge der Carbonate bestimmt [5, 22]. Ein nennenswerter Vertreter der Carbonate ist der Calcit (CaCO_3). Er weist die Möglichkeit auf, Schwermetalle in das Kristallgitter einzubinden und so die Deponiefähigkeit zu verbessern [13].

3.4.1 Residual Oxidizable Carbon (ROC) und Elemental Carbon (EC)

Die Summe organischer Kohlenstoffverbindungen in der Schlacke setzt sich aus den organischen Komponenten (organic carbon, OC) und den elementaren Komponenten (elemental carbon, EC) zusammen. Abbildung 9 zeigt die Unterteilung der Kohlenstoffverbindungen in der Schlacke.

Der restlich oxidierbare Kohlenstoff (residual oxidizable carbon, ROC) ist ein Produkt aus einer nicht vollständigen Verbrennung und wird aufgrund der Entstehungsbedingungen als eigene Untergruppe angeführt. Der ROC beinhaltet den elementar anfallenden Kohlenstoff EC, auch als Ruß oder unverbrannter Kohlenstoff bekannt und hat keine bzw. eine geringe umweltgefährdende Wirkung [21, 22]. Ruß besteht aus verschiedenen graphitähnlichen Anteilen sowie auch amorphen Strukturen. Wichtige Eigenschaften des anfallenden Rußes sind die chemische und thermische Inertheit, Unlöslichkeit in Wasser und eine hohe molekulare Masse [23].

Der TOC Gehalt gibt die Belastung mit niedrig flüchtigen organischen Schadstoffen in der abgegebenen Schlacke wieder [1, 5]. Diese Bestandteile des TOC können mit der Umgebung reagieren und dabei Schadstoffe freisetzen [23]. Die Bedeutung dieser Untergruppe wird in einem eigenen Kapitel 3.4.2 behandelt.

3.4.2 Total Organic Carbon (TOC)

Der TOC Gehalt ist eine wichtige Größe in der Deponieverordnung (DVO 2008) sowie der weiteren Verwertung von Schlacken. In Österreich ist die Deponierung von Schlacken, deren TOC-Gehalt größer als fünf Masseprozent (5 %) ist, gesetzlich nicht erlaubt (siehe Kapitel 2.2.2 Deponierung der Schlacke). Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen sind kein inertes Material, sondern es kann mit der Umgebung reagieren und seine chemischen und physikalischen Eigenschaften dabei verändern [14, 18]. Die organischen Kohlenwasserstoffe in der Schlacke können über Tage, Monate und Jahre mit der Umgebung reagieren und so die Zusammensetzung des Schlackekörpers verändern [23, 24].

Die große Bedeutung des TOC-Gehaltes wird in den Charakteristiken

- chemische Verbindungen
- Qualität des Ausbrandes
- dissolved organic carbon (DOC)
- Glühverlust (GV)
- Deponiefähigkeit-Lagerstabilität

bestimmt. Diese Punkte werden nachfolgend diskutiert.

Chemische Verbindungen

Verbindungen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), organische Säuren und verschiedene Kohlenwasserstoffe bilden zusammen die Menge an TOC.

Im Brennraum können in Bereichen hoher Brennstoffkonzentration aus niedermolekularen aromatischen Ringverbindungen PAK entstehen [25]. Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) sollen nicht mehr in der Schlacke vorhanden sein. Ihre Entstehungsbedingungen werden durch niedrige Brennraumtemperaturen (<600°C) und dem Vorhandensein von unverbrannten Kohlenstoffverbindungen begünstigt [16, 25]. Deshalb soll die Brennraumtemperatur 850°C keinesfalls unterschreiten. (vgl. dazu Kapitel 3.1.2 Verbrennungstechnologische Parameter)

Lin et al. [26] konnten in Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen unterschiedliche Kohlenwasserstoffe nachweisen. Darunter waren niedermolekulare Alkohole, aliphatische und aromatische Verbindungen, Ketone und Carbonsäuren. Eine Auswahl an Verbindungen ist in Tabelle 6 dargestellt. Ein Großteil der unverbrannten Kohlenwasserstoffe sind in Wasser lösbar, wodurch der Gehalt an TOC nach dem Waschen mit Wasser niedriger ist als vor dem Waschen [26].

Tabelle 6: Organische Verbindungen in Schlacken, adaptiert aus [26]

Organische Verbindung
4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanon (DAA)
4-Hydroxy-benzaldehyd
4-Methyl-3-penten-2-on
Benzaldehyd
Vanillin

Qualität des Ausbrandes

Der TOC-Gehalt der Schlacke ist ein Indiz für die Qualität des Ausbrandes. Im TOC sind die noch brennbaren Komponenten der Schlacke enthalten, die im Wesentlichen von den Bedingungen bei der Verbrennung abhängen [1, 5, 7, 15, 22, 23]. Das Ziel bei der Verbrennung ist es, den vorhandenen Kohlenstoff zu mineralisieren, um eine Lagerstabilität gewährleisten zu können und den Einfluss auf die Umwelt so gering wie möglich zu halten [23]. Ein niedriger TOC-Gehalt wird angestrebt, ein hoher organischer Kohlenstoffgehalt in der Schlacke bedeutet, dass die verbrennungstechnischen Parameter nicht ausreichend gut gewählt wurden, siehe dazu Kapitel 3.1.2 Verbrennungstechnologische Parameter.

Ursachen für einen hohen TOC-Gehalt [15, 20]:

- nicht ausreichend hohe Verbrennungstemperatur, um alle Bindungsarten des Kohlenstoffes aufzubrechen
- zu geringe Verweilzeit bei ausreichend hoher Verbrennungstemperatur
- unvollständige Verbrennung durch ungenügende Sauerstoffzufuhr und dadurch keine vollständige Oxidation des Kohlenstoffes

Eine effiziente Verbrennung des Abfalles resultiert daher in einem niedrigen TOC-Gehalt der Schlacke. Um einen hohen Grad an Mineralisierung des Kohlenstoffes zu erhalten, müssen daher die oben genannten Ursachen vermieden werden. Diese Parameter entsprechen dem 3T-Kriterium (time, temperature, turbulence), das für eine hochwertige Verbrennung steht.

Dissolved Organic Carbon (DOC)

Wie in Abbildung 9 ersichtlich, kann der TOC weiters in die Fraktion DOC unterteilt werden. Etliche Untersuchungen [15, 22- 24] weisen auf die Bedeutung des DOC hin, andere Literatur [26] bezeichnet es auch als extractable organic carbon (EOC). Der verbleibende nicht lösbare Teil der organischen Fraktion wird in der Literatur [23, 26] als non extractable organic carbon (NEOC) bezeichnet.

DOC ist ein Summenparameter für die Bestandteile des TOC, die in einem Lösungsmittel, das meist Wasser ist, lösbar sind [23]. Organische Säuren wie die Huminsäuren und Fulvinsäuren sind die wichtigsten Vertreter aus dieser Fraktion [22, 23].

Schwermetalle und darunter vor allem Kupfer werden durch Vorhandensein von DOC gelöst und in die Umwelt freigesetzt, was bei der Deponierung von Schlacke unzulässig ist. Der Zusammenhang zwischen DOC und Schwermetallen ist Thema etlicher Literaturstellen [17, 19, 20, 23, 26].

Die Höhe des DOC in den ausgetragenen Schlacken kann demnach durch das Waschen mit Wasser verringert werden. Die Effektivität des Waschens von Schlacke aus der Müllverbrennung wird durch die Versuche von Lin et al. [26] unterstrichen. Der organische Anteil in der Schlacke wird durch das Waschen nachweisbar verringert und steigt im Lösungsmittel an. Neben dem Abkühleffekt ist das Waschen der ausgetragenen Schlacke im Nassentschlacker (siehe dazu Kapitel 2.1 Technologie Drehrohrofen) demnach ein unabdingbarer Prozess.

Glühverlust (GV)

Eine einfache Bestimmung der Ausbrandqualität von Schlacke ist die Bestimmung des Glühverlustes (engl. loss on ignition, LOI) nach DIN EN 15169 (siehe dazu Kapitel 4.2). Anhand dieser Norm kann der TOC-Gehalt eingeschätzt werden. Dabei wird eine Probe unter Luftatmosphäre für eine gewisse Zeit erhitzt und die Massenänderung wird als der verbleibende unverbrannte Rückstand herangezogen.

Die von Rocca et al. [24] durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass die Quantifizierung des TOC-Gehaltes über den GV ungenau ist. Beim Glühen soll nur der organische Kohlenstoff ausgetrieben werden, es kann jedoch auch zur Oxidation von Metallen und Nichtmetallen, die mit einer Massenänderung in Verbindung stehen, kommen. Weiters kann eine Dehydration von hydratisierten Phasen stattfinden, wie z.B. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, die ebenfalls eine Massenänderung bewirken. Enthält die Schlacke eine große Menge an hydratisierten Verbindungen, so wird das GV-Ergebnis verfälscht [24].

Deponiefähigkeit-Lagerstabilität

Wie im Kapitel 2.2.2 Deponierung der Schlacke beschrieben, ist ein Kriterium für die Deponiefähigkeit von Schlacken, dass der TOC-Gehalt weniger als fünf Masseprozent beträgt. Dies rührt daher, dass die oben diskutierten organischen Verbindungen mit der Umgebung reagieren können und so die Zusammensetzung der deponierten Schlacke verändern können. Etliche Untersuchungen [14, 18, 20, 22, 23] weisen darauf hin, dass die organischen Substanzen als Lösungsmittel für andere Komponenten der Schlacke fungieren. Anfangs in Matrizen und Kristallgitter eingebundene Schwermetalle können über DOC gelöst werden und in das Grundwasser sickern. Dies würde zu irreparablen Umweltschäden führen, die durch Einhaltung der TOC-Grenze nach DVO 2008 verhindert werden können.

3.5 Zusammenfassung der Eigenschaften der Schlacke

Die nachstehende Abbildung 10 zeigt eine übersichtliche Darstellung der Einflussgrößen und Eigenschaften der Schlacke, die bei der thermischen Behandlung von Müll anfällt. Sie soll eine Zusammenfassung der in den vorigen Kapiteln 3.1 bis 3.4 behandelten Themen darstellen, die für diese Arbeit relevanten und behandelten Eigenschaften sind hervorgehoben. Die Schlacke wird in erster Linie durch die Charakteristik der Müllverbrennungsanlage bestimmt. Der Aufwand für die Aufbereitung des Abfalles, die verfahrenstechnischen Parameter während der Verbrennung und die verwendete Technologie bestimmen die am Ende ausgetragene Schlacke. Eine Aussage über die Qualität der Schlacke lässt sich mit der Bestimmung des Glühverlustes oder analytisch mit einer TOC-Bestimmung tätigen. Ein niedriger Glühverlust oder TOC-Gehalt deutet auf einen hochqualitativen Ausbrand hin, da nur mehr wenig brennbare Komponenten in der Schlacke vorhanden sind. Ein geringer Gehalt an organischen Verbindungen bedeutet ein hoher Mineralisierungsgrad. Abhängig von den vorhandenen Mineralien besitzt die Schlacke die Fähigkeit, Wasser aufzunehmen. Die Berechtigung zur Deponierung charakterisieren die enthaltenen Schwermetalle, die organischen Verbindungen und der Glühverlust der Schlacke.



Abbildung 10: Einflussgrößen und Eigenschaften der Schlacke aus MVA

4 Analysemethoden

Dieses Kapitel dient zur Einführung in die Analysemethoden der Schlackeproben. Die Trockensubstanz, der Glühverlust und die Differenzierung der kohlenstoffhaltigen Verbindungen der Schlackeproben erfolgte nach der jeweiligen Norm. Ein Katalog für die optische Bewertung der Schlackeproben wird hier dargestellt. Im Kapitel 5 Untersuchungen der Schlacken wird die experimentelle Durchführung beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Trockensubstanz nach DIN EN 14346

Da sämtliche Untersuchungen auf die Trockenmasse der Schlacke bezogen werden, wie z.B. der Glühverlust, muss die Probe getrocknet werden.

Dazu wird die Probe in einen Trockenschrank bei $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ getrocknet, die Bestimmung der Trockensubstanz erfolgt durch Wiegen und Bilden der Differenz der gewogenen Probe vor und nach dem Trocknen. Die Probe wird so lange getrocknet, bis die erhaltene Trockensubstanz keine Massenänderung von mehr als 0,5% annimmt [27].

Am Standort Simmeringer Haide verwendet die Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH für die Bestimmung der Trockensubstanz der Schlackeproben aus den Drehrohröfen den Trockenschrank Binder FD Classic Line FD 23 20L.

4.2 Glühverlust nach DIN EN 15169

Durch die Verbrennung des Abfalles unter hohen Temperaturen werden ein Großteil der flüchtigen organischen Bestandteile in Gase umgewandelt. Da eine vollständige Umformung nahezu unmöglich ist, verbleibt ein unverbrannter Rückstand in der Schlacke, siehe dazu Kapitel 3.4.2 Total Organic Carbon (TOC). Um diesen unverbrannten Rückstand ermitteln zu können, wird die Probe unter kontrollierten Bedingungen erhitzt. Durch die Austreibung der brennbaren Bestandteile nimmt die Masse der Probe ab. Diese Massenänderung ist der Glühverlust (engl. loss on ignition, LOI), er wird in Prozent der Trockenmasse angegeben [28].

Die Bestimmung des Glühverlustes einer Probe erfolgt zu Beginn durch Ermittlung der Trockensubstanz der Probe mittels Analysewaage. Anschließend wird die Probe in einen hitzebeständigen Tiegel in einen regelbaren Muffelofen gestellt und für mindestens 20 Minuten bei $550^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ geglüht. Nach Ablauf der Glühzeit wird die Probe aus dem Muffelofen genommen und auf Raumtemperatur abgekühlt. Es folgt eine erneute Wiegung der Probe und der Massenwert wird mit der Trockenmasse verglichen. Die Massendifferenz wird durch die Trockenmasse dividiert, man erhält den Glühverlust in Prozent (%). Das Ergebnis wird auf 0,1% Genauigkeit gerundet [28].

Der Glühverlust wird zur Quantifizierung des TOC-Gehaltes üblicherweise herangezogen. Der Nachweis von TOC mittels Glühverlustbestimmung hängt dabei von der Prüftemperatur und der Verweildauer der Probe im Tiegel ab. Das das Glühen der Probe bei knapp unter 600°C stattfindet, beinhaltet der Glühverlust neben dem TOC-Gehalt den restlich oxidierbaren Kohlenstoff (vgl. dazu Formel 4-1). Die Verdampfung von organischen Stoffen sowie chemische Reaktionen der anorganischen Bestandteile, wie z.B. die Kalzinierung von Carbonaten oder die Oxidation von Eisen haben einen Einfluss auf das Messergebnis.

$$\text{GV} = \text{TOC} + \text{ROC} [\%] \quad 4-1$$

Der Glühverlust dient als Kenngröße für die Qualität des Ausbrandes während des Verbrennungsprozesses und ist ein wichtiges Kriterium für die Deponiefähigkeit von Schlacke nach DVO 2008 (siehe dazu Kapitel 2.2.2). Am Standort Simmeringer Haide verwendet die

Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH für die Bestimmung des Glühverlustes der Schlackeproben aus den Drehrohröfen den Muffelofen CEM Phoenix Microwave Furnace.

4.3 Kohlenstoff-Gehalt nach DIN 19539

Der TOC Gehalt von Schlacken ist, wie im Kapitel 2.2.2 erwähnt, ein wichtiges Kriterium für die Deponiefähigkeit der in den Drehrohröfen anfallenden Schlacken. Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, bestehen die organischen Bestandteile der Schlacke aus einer Menge unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Komponenten. Eine genaue Analyse dieser vielen Komponenten ist meist nicht notwendig, deshalb misst man einen Summenparameter – den TOC Gehalt.

Die Bestimmung des TOC Gehaltes nach DIN 19539 [21] erfolgt durch die thermische Behandlung der Probe im Temperaturbereich von 150°C bis 900°C. Bei diesem Verfahren werden die unterschiedlichen Bindungsformen des Kohlenstoffs in der Probe zersetzt und unter oxidativer Atmosphäre zu CO₂ oxidiert. Aufgrund der Unterscheidung durch gestufte Temperaturfenster ist eine geteilte Bestimmung der Massen zwischen organischem, anorganischem und elementarem Kohlenstoff möglich. Ab 150°C erfolgt eine stetige, lineare Temperaturerhöhung, die mit Verweilzeiten verbunden ist [21]. Das Verfahrensprinzip findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Verfahrensprinzip der TOC Bestimmung nach DIN 19539, adaptiert aus [21]

Parameter	T _{START} [°C]	Aufheizrate [°C/min]	T _{Ende} [°C]	Mindest-Verweilzeit [s]
TOC400	150	70	400	120
ROC	400	70	600	100
TIC900	600	70	900	100

TOC ... Total Organic Carbon
 ROC ... Residual Organic Carbon
 TIC ... Total Inorganic Carbon

Erklärung und Bedeutung der kohlenstoffhaltigen Fraktionen finden sich in Kapitel 3.4 Organische Bestandteile. Abbildung 11 zeigt graphisch das Verfahrensprinzip nach DIN 19539. Auf der Abszisse ist die Zeit (X) aufgetragen, auf der Ordinate Y1 die Signalintensität, auf der Ordinate Y2 die Temperatur in °C. Klar erkennbar sind die Temperaturrampen für die differenzierte Bestimmung von TOC, ROC und TIC Gehalt in Abhängigkeit von der Temperatur.

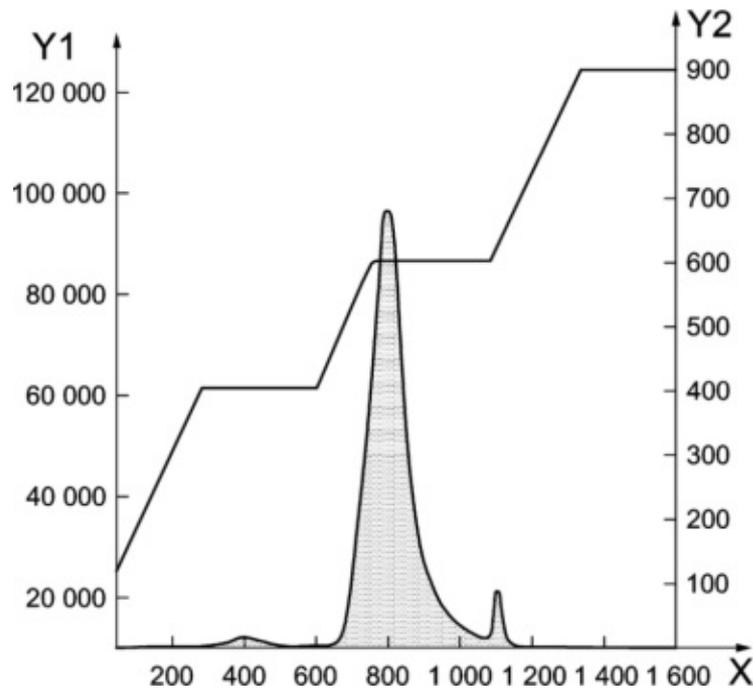


Abbildung 11: Beispieldiagramm für die Kohlenstoffbestimmung nach DIN 19539 [21]

Am Standort Simmeringer Haide verwendet das Labor der Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH für die Bestimmung des TOC Gehaltes den SKALAR Primacs ATC 100-IC-E. Dieses Gerät ermöglicht eine Kohlenstoffbestimmung von Schlackeproben nach DIN 19539.

SKALAR Primacs ATC 100-IC-E Autosampler [29]

Mit diesem Feststoffanalysator ist es möglich, den Kohlenstoffgehalt nach DIN 19539 von bis zu 100 Proben gleichzeitig zu bestimmen. Mit dem integrierten Autosampler, der 100 Positionen umfasst, können viele Proben zur selben Zeit einer Hochtemperaturverbrennung mit anschließender NDIR-Detektion unterzogen werden. Die eingesetzten Keramiktiegel fassen bis zu 3g Feststoff der Probe und mittels Software-Paket lassen sich der TOC, ROC und TIC Gehalt ermitteln.

Nichtdispersive Infrarotspektroskopie (NDIR) [29, 30]

Beim NDIR-Verfahren beruht die Analyse der Substanzen auf der Wechselwirkung der Materie mit unterschiedlicher elektromagnetischer Strahlung. Gase bestehen aus Molekülen, die aus Atomen aufgebaut sind, die spezifische Absorptionsbereiche im Infrarotspektrum (IR-Spektrum) haben. Trifft Infrarotstrahlung auf ein Gas in einer Messküvette, so absorbiert es einen Teil der Strahlung entsprechend der Konzentration und Art der enthaltenen Atome. Die unterschiedlichen Wellenlängen der Infrarotstrahlung bewirken Schwingungen in den Molekülen, die in Form eines Spektrums abgebildet werden. Das entstehende IR-Spektrum eignet sich zum Nachweis organischer Verbindungen, weshalb das NDIR Verfahren für die Bestimmung von Kohlenwasserstoffen in einem Gas verwendet wird. Das Licht der Infrarot-Quelle wird durch einen Strahlteiler geschickt, welcher nur ein sehr schmales Spektrum durchlässt und den Lichtstrahl teilt. Dadurch läuft ein Teil des Lichtstrahles durch die Probe, der andere durch eine Referenzprobe. Das IR-Spektrum wird so gewählt, dass es alle relevanten vorhandenen Moleküle durchleuchtet. Als Referenzprobe befindet sich üblicherweise eine Küvette mit Stickstoff im Gerät.

Erläuterung zur Bestimmung des TOC-Gehaltes

Die Bestimmung des TOC-Gehaltes von Schlacken ist stark vom Messverfahren und den Messparametern abhängig. Es liegt nahe, dass eine einfache und schnelle Bestimmung über den Glühverlust nach DIN EN 15169, wie es in Kapitel 4.2 beschrieben ist, zu anderen Ergebnissen führt als eine aufwendige Messung nach DIN 19539.

Folgende Erkenntnisse zur TOC-Messung von Schlacken konnte aus der Literatur gewonnen werden:

- Liegt die Prüftemperatur im niedrigen Temperaturbereich von kleiner 550°C, so ist der Wert des Glühverlustes niedriger als bei höheren Temperaturen. Der höhere Glühverlust ist auf Oxidationsvorgänge und die Kalzinierung von Carbonaten zurückzuführen, welche das Ergebnis verkennen [16, 24]
- Die Partikelgröße hat einen Einfluss auf den Glühverlust. Feinkörnige Partikel weisen einen höheren Glühverlust auf als grobkörnige. Dies kann auf die höhere spezifische Oberfläche zurückgeführt werden, die feinkörnige Fraktionen aufweisen. An diesen Oberflächen können organische Bestandteile adsorbieren [13, 16]
- Die Verbrennungstechnologie hat keinen nachweisbaren Einfluss auf den Glühverlust von Schlacken. Untersuchte Ofentypen waren Rostfeuerungen, zirkulierende Wirbelschichten und Drehrohre [15, 16]

4.4 Optische Bewertung der Schlacken

Neben den vorhin bereits genannten Eigenschaften wurden die Schlacken auch auf ihr Erscheinungsbild und Geruch untersucht. Zweck dieser Untersuchung ist einerseits, ob die Möglichkeit besteht, mit dem „bloßen Auge“ die Ausbrandqualität der Schlacke bestimmen zu können. Andererseits soll mit der optischen Untersuchung eine Grundlage für die Entwicklung eines berührungslosen Messverfahrens zur automatischen Erfassung der Ausbrandqualität geschaffen werden.

Um die subjektiven Einflüsse auf die Wahrnehmung und Beurteilung der Schlacken bei der optischen Untersuchung so gering wie möglich zu halten, wurde ein Bewertungskatalog geschaffen. Der Bewertungskatalog soll eine einfache strukturierte Beurteilung der Schlacken ermöglichen und für andere leicht verständlich als Grundlage für weitere Überlegungen dienen. Die optische Erscheinung der Schlacke wurde in folgende Kriterien gegliedert:

- Feuchtigkeit: wie wurde die Schlackeprobe im Behälter vorgefunden?
- Farbe: sagt die Farbe etwas über die Ausbrandqualität aus?
- Geruch: charakteristisch für den Geruch sind flüchtige Bestandteile
- Teilchenform: wie sehen die festen Bestandteile der Schlacken aus?
- Teilchengröße: eine Abschätzung zur Teilchengröße

Diese fünf Kriterien wurden nach einem strukturiertem Bewertungsschema (Bewertungskatalog) benotet, der Bewertungskatalog findet sich nachstehend in Tabelle 8. Von den 150 Schlacken wurden 126 Proben auf ihre Feuchtigkeit, Farbe und Geruch bewertet, 75 Proben wurden auf ihre Teilchenform und Teilchengröße beschrieben.

Tabelle 8: Bewertungskatalog für das Erscheinungsbild und den Geruch der Schlackeproben

Kriterium	1	2	3
Feuchtigkeit	trocken, meist matte Erscheinung	feucht, benetzt, dadurch leichter Glanz	nass, meist steht Flüssigkeit im Behälter
Farbe	schwarz-dunkelgrau	grau-schwarz	braun
Geruch	wenig bis kein Geruch	wahrnehmbarer Geruch	intensiver, starker, unangenehmer Geruch
Teilchenform	sehr kleine Teilchen, sandig	kleine Teilchen und größere Klumpen	große Klumpen, meist verglast und glänzend
Teilchengröße	klein < 3 mm	bis max. 5 mm	größer als 5 mm

5 Untersuchungen der Schlacken

Im Zeitraum vom 9. September bis 29. Oktober 2020 wurden für diese Arbeit die Schlackeproben im Labor der Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH am Standort Simmeringer Haide analysiert. Die Schlackeproben stammen dabei aus den Drehrohrlinien 1 und 2. Die Probennahme erfolgte durch die jeweils anwesende Schicht durch Entnahme am Schlackenausstrag (siehe dazu Abbildung 6). Schlackeproben werden täglich, alle vier Stunden zu festgelegten Zeiten gezogen: 2, 6, 10, 14, 18 und 22 Uhr. Die Schlackeproben werden von der anwesenden Schicht in 30 Liter fassende Kübel gefüllt und geschützt in der Nähe der Probennahmestelle für die Laboruntersuchungen aufbewahrt. Die Schlackeproben werden auf Trockensubstanz, Glühverlust und Gehalt an organischem Kohlenstoff untersucht. Für die analytische Bestimmung des organischen Kohlenstoffes wird eine kleine Auswahl von Schlackeproben genommen.

Ziel der Untersuchungen

Von Interesse ist, ob aus den untersuchten Eigenschaften eine Aussage über die Ausbrandqualität der Schlacke getroffen werden kann. In anderen Worten: was sagt die Schlacke aus dem Verbrennungsprozess über die Qualität des Ausbrandes aus? Die Qualität des Ausbrandes wird über den Glühverlust, der eine erste Näherung für den TOC Gehalt ist, bestimmt (siehe dazu Kapitel 3.4.2 Total Organic Carbon (TOC)). Daneben wurden weitere Merkmale der Schlacken auf Zusammenhang mit der Ausbrandqualität untersucht.

Folgende Eigenschaften der Schlacken wurden im Labor der Betriebsanalytik der Wien Energie GmbH untersucht und werden in den nachstehenden Kapiteln behandelt:

- Trockensubstanz nach DIN EN 14346
- Glühverlust nach DIN EN 15169
- Optische Bewertung der Schlacken
- Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes nach DIN 19539

Verwendete Geräte und Laborutensilien im Betriebslabor der Wien Energie GmbH

- Trockenschrank: Binder FD Classic.Line FD 23 20L
- Muffelofen: CEM Phoenix Microwave Furnace
- Probenbehälter: 100 mL CEM Quartz Fiber Crucibles
- Analysenwaage: Sartorius LE3245-OCE
- TOC Messgerät: SKALAR Primacs ATC 100-IC-E
- Planeten-Kugelmühle: Retsch PM 100
- keine explizit anführbaren Chemikalien oder Lösungsmittel

Am Ende eines jeden Versuches oder Untersuchung wurden die Abfälle fachlich gerecht entsorgt und der Sollzustand des Labors hergestellt.

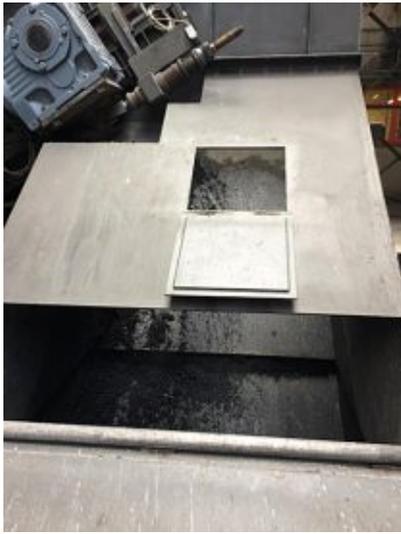
5.1 Langzeituntersuchung

Im Zeitraum von 9. September bis 29. Oktober 2020 wurden insgesamt 150 Schlackeproben aus den Drehrohrlinien 1 und 2 untersucht. Zweck der Langzeituntersuchung war es, eine erstmalige Datenerhebung über die Ausbrandqualität von DRO-Schlacken durchzuführen.

Die Schlackeproben wurden von der jeweils anwesenden Schicht aus dem Schlackenausstrag entnommen und in separate 30 Liter Kübel gefüllt. Abbildung 12 a) zeigt den Schlackenausstrag am Ende des DRO, an dem die Schlackeproben gezogen werden. Es erfolgte eine Beschriftung der Kübel mit dem Datum und der Uhrzeit der Probennahme, um so die Proben, die im vier Stunden Takt gezogen werden, voneinander unterscheiden zu können. Abbildung 12 b) zeigt den Inhalt eines Probenkübels, konkret ist es die Probe #98 vom 2.10.2020 2:00 Uhr. Für die Analysen im Betriebslabor wurde mit einer kleinen Schaufel der Kübelinhalt nochmals durchgemengt und anschließend kleine Behälter von ca. 0,5 Liter Fassungsvermögen mit der Schlackeprobe befüllt. Jeder Behälter wird mit dem Zeitpunkt der Schlackeprobennahme versehen.

Im Betriebsanalytik-Labor angekommen, wurden die Schlackeproben aus den 0,5 Liter Behältern in Cellulose Behälter gefüllt, wobei zuvor die Tara der Cellulose Behälter bestimmt wurde. Die thermisch beständigen Cellulose Behälter dienen zum Trocknen und Glühen der Schlackeproben. Abbildung 12 c) zeigt sechs mit Schlackeproben befüllte Cellulose Behälter, die anschließend getrocknet und geglüht werden. Die Tara des Cellulose Behälters, die Einwaage mit der Schlackeprobe und der Zeitpunkt der Probennahme sowie weitere Messergebnisse wurden tabellarisch festgehalten und sind in Kapitel Appendix zu finden. Nun wurden die Cellulose Behälter in den Trockenschrank gestellt und bei 105°C getrocknet. Die Trocknungsdauer lag dabei immer bei über 2 Stunden, um, wie in Kapitel 5.1.1 nachfolgend beschrieben, eine ausreichende Trocknung gewährleisten zu können. Nach der erfolgreichen Trocknung der Schlackeproben wurde die Auswaage der Cellulose Behälter bestimmt. Im Anschluss wurden sie umgehend in den Muffelofen zum Glühen gestellt, wobei das maximale Fassungsvermögen des Muffelofens sechs Cellulose Behälter beträgt. Auf die Cellulose Behälter wurden zuvor Cellulose Deckel gelegt, um das Spritzen der Schlacke im Muffelofen zu unterbinden. Das Spritzen der Schlacke ist auf die schlagartige thermische Beanspruchung zurückzuführen.

Die Schlackeproben wurden wie im Kapitel 4.2 beschrieben geglüht und nach Abschluss des Glühvorganges (Dauer 15 Minuten) auf Raumtemperatur abgekühlt und ausgewogen. Die Massendifferenz ergibt den Glühverlust, welcher in erster Näherung mit dem TOC Gehalt gleichzusetzen ist. Sämtliche Untersuchungsergebnisse der Schlackeproben aus den DRO sind in Kapitel 8 angeführt. Abbildung 12 d) und e) zeigen eine Probe vor und nach dem Glühen. Der Farbunterschied von schwarz auf rot-braun ist auf die Oxidation des Eisens in der Schlacke zurückzuführen.



a) Schlackenaustrag



b) Aufbewahrung in 30 Liter Kübel



c) Schlackeproben in den Cellulose Behältern vor dem Trocknen und Glühen



d) Probe #48 vom 17.9.2020 18 Uhr vor dem Trocknen und Glühen



e) Probe #48 vom 17.9.2020 18 Uhr nach dem Glühen

Abbildung 12: Schlackenanalyse im Langzeitversuch

Probleme und Erkenntnisse während der Langzeituntersuchung

1. Bei der Schlackeprobennahme sollte der Einfluss der Witterung keine Rolle spielen dürfen. Jedoch ist es möglich, dass Niederschlag den Wassergehalt der Probe verändert, denn der Schlackenaustrag ist durch die einfache Überdachung unzureichend geschützt. Während des Zeitraumes kam es jedoch nur zu ein paar Regentagen und der Einfluss der Regentage auf die Ergebnisse kann als gering angenommen werden.
2. Das Glühen der Schlacke im Muffelofen bedeutet eine schlagartige thermische Beanspruchung der Schlacke einerseits und des Cellulose Behälters andererseits. Bevor die Proben in den Muffelofen gestellt wurden, sind sie mit einem Cellulose Deckel bedeckt worden. Durch die hohe Aufheizgeschwindigkeit der Probe im Muffelofen kommt es zum Spritzen der Schlacke einerseits und eine Materialermüdung der Cellulose Behälter andererseits. Diese Faktoren führen zu einer Minderung des Gewichtes der Probe, die bei der Auswaage das Ergebnis verfälschen können.
3. Wird eine Schlackeprobe mehrmals auf Wassergehalt und Glühverlust untersucht, so schwanken die Messergebnisse stark. Dies ist aufgrund der Inhomogenität der Schlacken, wie es in Kapitel 3 beschrieben ist, zurückzuführen. Schlacke besteht aus anorganischen und organischen Bestandteilen, die unregelmäßig in der Schlackeprobe vermischt sind.

Die Erkenntnisse aus den genannten Punkten 2 und 3 bewirken, dass eine Probe unterschiedliche Ergebnisse des Glühverlustes haben kann. Parallel zu meinen Untersuchungen bestimmten die Mitarbeiter der Betriebsanalytik den Glühverlust der Schlackeproben. Die von mir gemessenen Glühverlustwerte sind als „% GV 1“ bezeichnet, die Werte der Mitarbeiter als „% GV 2“. Ein Vergleich der Ergebnisse ist in Abbildung 13 dargestellt. Mehr als die Hälfte der Messergebnisse (58%) haben eine Messabweichung von weniger als 20%, weitere 21% der Messungen weichen von jenen der Betriebsanalytik um 20-40% ab. Nur ein geringer Teil der Messungen (8%) haben eine Abweichung von mehr als 80%. Wie oben beschrieben sind diese Abweichungen auf die Inhomogenität der Schlacke zurückzuführen.

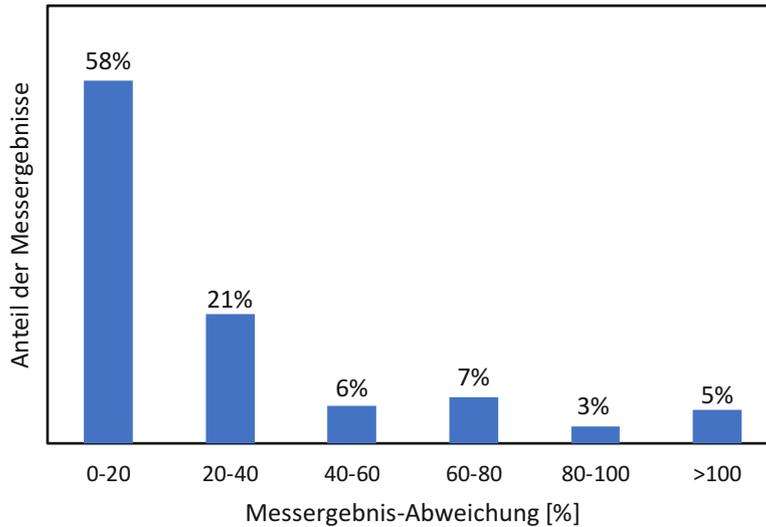


Abbildung 13: Abweichung der Glühverlust-Messergebnisse

5.1.1 Minimal erforderliche Trocknungsdauer

Ziel dieses Versuches war es, eine Vorstellung über die minimal erforderliche Trocknungsdauer der Schlackeproben zu erhalten. Die erforderliche Trocknungsdauer wird anhand der DIN EN 14346 definiert: die Massenänderung der erhaltenen Trockensubstanz darf 0,5% nicht überschreiten (siehe Kapitel 4.1). Der Versuch wurde am 11. September 2020 mit den sechs Proben vom 9. September 2020 und einer Probe vom 8. September 2020 durchgeführt. Für den Versuch wurde darauf Wert gelegt, dass die Proben möglichst unterschiedliche optische Eigenschaften aufweisen, wie sie im Bewertungskatalog bestimmt werden (siehe dazu Kapitel 4.4) und ob sich die Eigenschaften auf die Trocknungsdauer auswirken. Bei der Probenauswahl wurde vor allem auf die unterschiedliche Feuchtigkeit der Proben Wert gelegt. Eine Beschreibung der optischen Erscheinung der sieben untersuchten Proben findet sich in Tabelle 9.

Tabelle 9: Untersuchte Proben des Trocknungsdauerversuches

#	Beschreibung der optischen Erscheinung der Probe
4	trockenes Partikelgemenge, sehr kleine Klumpen, Größe der Partikel 2mm, keine Glasanteile, wenig Geruch
10	etwas feucht, kleine Klumpen, ein paar Klumpen sind zu großen Klumpen aggregiert, Größe 5-10mm, schwarz grau, viele glasartige Teile enthalten, fast kein Geruch
11	etwas feucht, viele kleine Klumpen, Größe rund 5mm und weniger, schwarz dunkelgrau, keine Glas Anteile erkennbar, ganz leichter Geruch, graue Anteile
12	sehr feuchte Probe, Flüssigkeit zwischen den Teilchen erkennbar, kleine Teilchen, Größe < 5mm, Teilchengröße im Mittel um 1-2mm, dunkelgrau-oliv, Geruch auffällig, keine Glasteile sichtbar
13	etwas feucht, Teilchen alle sehr klein, Größe um die 2mm, keine großen klumpen, sonst wie Probe 10
14	ähnlich wie 10 aber feuchter, Flüssigkeit zwischen den Teilchen erkennbar, Geruch sehr intensiv
15	ähnlich wie 10

Versuchsdurchführung

Die Tara der sieben eingesetzten Probenbehälter wurden bestimmt, die Behälter mit Schlackeproben ungefähr halb befüllt, das Gewicht Tara inkl. Einwaage bestimmt und anschließend in den Trockenschrank bei 105°C gestellt. Die übliche Einwaage der Proben betrug 35 – 65g. In der ersten Stunde wurden die Proben alle 15 Minuten aus dem Trockenschrank genommen und sofort gewogen, in den letzten zwei Stunden erfolgte die Auswiegung alle 30 Minuten. Auf die Abkühlung der Proben wurde zum Schluss weniger geachtet, da erkennbar war, dass Auftriebskräfte durch eine höhere Probentemperatur vernachlässigbar klein waren, denn die Massenänderung geschah nur in der zweiten oder dritten Nachkommastelle.

Ergebnisse und Diskussion

Die beim Versuch erhaltenen Zahlenwerte finden sich in Kapitel Appendix, nachstehende Abbildung 14 zeigt eine graphische Übersicht dieser Versuchsergebnisse.

In der ersten Stunde im Trockenschrank nahm die Probenmasse sehr schnell ab, was auf die Verdampfung des Wassers in den Proben rückzuführen ist. Nach zwei Stunden im Trockenschrank änderte sich die Masse der Proben nur gering, bis zur dritten Stunde betrug die Massenänderung der sieben Proben ca. 0,01%, was lt. Norm somit ausreichend für die Bestimmung des Feuchtegehaltes ist.

Obwohl die Proben unterschiedliche Erscheinungsmerkmale haben, ist der Verlauf aller Proben fast gleich. Wenn Proben mit einer Einwaage von 35 – 65g länger als 2 Stunden getrocknet werden, weisen sie keine großen Massenänderungen mehr auf. Somit kann die Empfehlung abgegeben werden, dass die minimale erforderliche Trocknungsdauer für Schlackeproben 2 Stunden sein sollte und daher 2,5 Stunden vollkommen ausreichend sind.

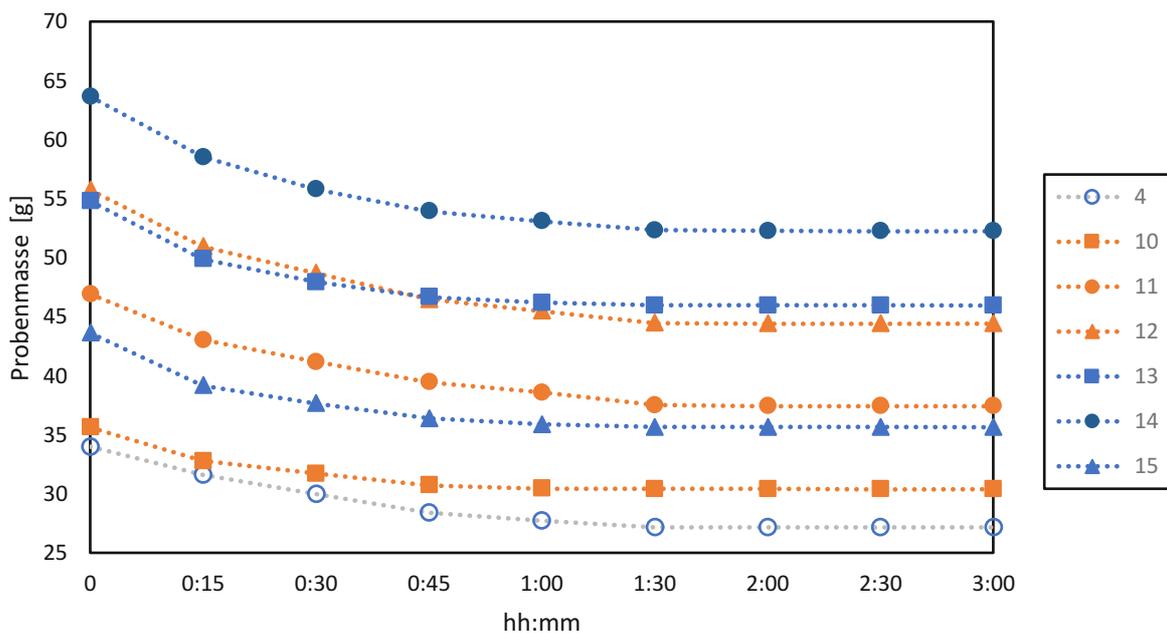


Abbildung 14: Versuch minimal erforderliche Trocknungsdauer

5.1.2 Messergebnisse aus der Langzeituntersuchung

Trockensubstanz T_s

Die Trockensubstanz der Schlackeproben wurde nach DIN EN 14346 wie im Kapitel 4.1 beschrieben, bestimmt. Dazu wurden die Schlackeproben mind. 2 Stunden im Trockenschrank bei 105°C getrocknet. (vgl. dazu Kapitel 5.1.1 Minimal erforderliche Trocknungsdauer).

Die Trockensubstanz T_s wird anstelle des Wassergehaltes verwendet, da die Menge an trockenem Material in der Schlacke von höherem Interesse ist.

Die Trockensubstanz T_s wird anhand folgender Formel ermittelt:

$$T_s = \frac{(T + AW T_s) - Tara}{(T + EW) - Tara} * 100 [\%] \quad 5-1$$

wobei

$T+AW T_s$... Tara inkl Auswaage der Trockensubstanz in g

$T+EW$... Tara inkl. Einwaage in g

Tara ... Masse des Cellulose Behältes in g

Abbildung 15 zeigt die Anzahl der Schlackeproben unterteilt in die Trockensubstanz. Auf der Abszisse ist die Trockensubstanz in 5% Schritten aufgetragen, beginnend bei 50%. Keine Schlackeprobe hatte eine Trockensubstanz <50%. Ein Großteil der Schlackeproben – 70%, haben eine Trockensubstanz zwischen 65 – 85%.

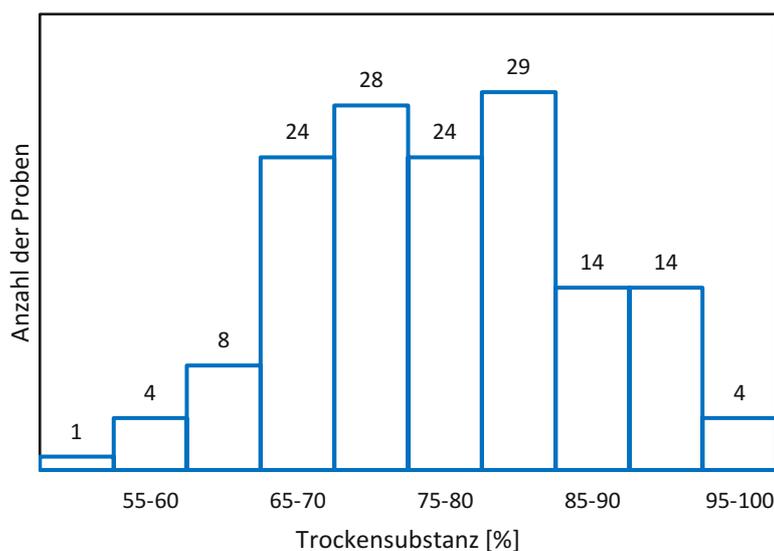


Abbildung 15: Verteilung der Trockensubstanz der 150 untersuchten Proben

Glühverlust GV

Der Glühverlust der Schlackeproben wurde nach DIN EN 15169 wie im Kapitel 4.2 beschrieben, bestimmt. Dazu wurden die Schlackeproben für 15 Minuten im Muffelofen bei 550°C geglüht. Der Glühverlust wird hier als der TOC-Gehalt der Schlacke angenommen und auf die Trockensubstanz der Schlacke bezogen.

Mit folgender Formel wird der Glühverlust bestimmt

$$GV = \frac{OTs}{Ts} * 100 [\%] \quad 5-2$$

Der Glühverlust wird dabei über die organische Trockensubstanz bestimmt

$$OTs = \frac{(T + AW Ts) - Tara - [(T + AW OTs) - Tara]}{(T + EW) - Tara} * 100 [\%] \quad 5-3$$

wobei

T+AW Ts	...	Tara inkl Auswaage der Trockensubstanz in g
T+EW	...	Tara inkl. Einwaage in g
Tara	...	Masse des Cellulose Behältes in g
T+AW OTs	...	Tara inkl. Auswaage nach Muffelofen in g
OTs	...	organische Trockensubstanz in g

Die gemessenen Glühverluste der 150 Proben sind in der Abbildung 16 als Datenpunkte dargestellt, zusätzlich ist die Glühverlustgrenze eingezeichnet. 41 Proben übersteigen die Glühverlustgrenze von 5% (siehe dazu Kapitel 2.2.2 Deponierung der Schlacke), 109 der 150 untersuchten Proben befinden sich unterhalb der GV-Grenze.

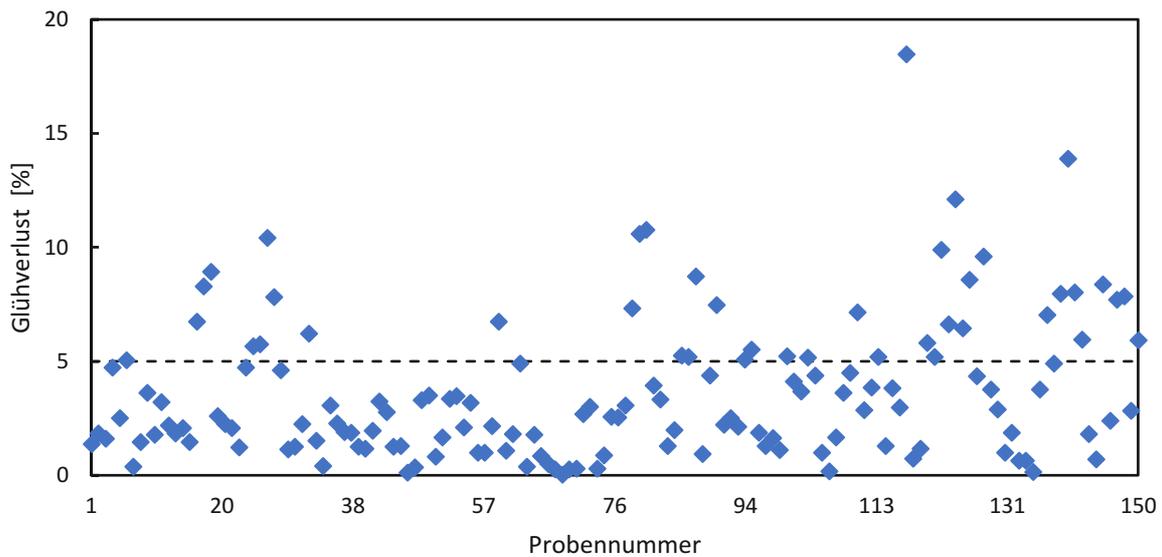


Abbildung 16: Glühverlust der 150 Schlackeproben

Zusammenhang der Trockensubstanz Ts und Glühverlust GV

Bei näherer Betrachtung lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Trockensubstanz und dem Glühverlust der Schlackeproben erkennen. Zieht man die Glühverlustgrenze von 5%, so übersteigen 41 Proben diese Grenze, 109 der 150 Proben befinden sich unterhalb der Grenze.

38/41 (93%) Proben mit einem $GV > 5\%$ haben eine Trockensubstanz $T_s < 75\%$.

82/109 (75%) der Proben mit $GV < 5\%$ haben eine Trockensubstanz $> 75\%$.

Keine Schlackeprobe mit $T_s > 85\%$ übersteigt die Glühverlustgrenze.

Basierend auf diesen oben genannten Aussagen und den 150 untersuchten Schlacken lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit sagen

- hat die Schlackeprobe einen T_s -Gehalt $> 75\%$, so ist es wahrscheinlich, dass die Glühverlustgrenze nicht überschritten wird
- keine Schlackeprobe mit $T_s > 85\%$ übersteigt die Glühverlustgrenze
- hat die Schlackeprobe einen T_s -Gehalt $< 75\%$ und demnach einen hohen Wassergehalt, so wird die Glühverlustgrenze mit ziemlicher Sicherheit überschritten

5.1.3 Diskussion der optischen Bewertung

126 von den 150 gezogenen Proben wurden anhand des Kataloges auf Feuchtigkeit, Farbe und Geruch bewertet. Eine geringere Anzahl, nämlich 75 von 150 Proben wurden auf Teilchenform und Teilchengröße bewertet. Während der Beurteilung wurde die Kenntnis erworben, dass Teilchenform und Teilchengröße der untersuchten Schlacken keinen Einfluss auf den Glühverlust haben. In nachstehender Tabelle 10 findet sich die Anzahl der bewerteten Schlacken in Abhängigkeit des Kriteriums und der Bewertung. Von den 126 Schlacken übersteigen 33 die Glühverlustgrenze, 93 Schlacken sind unterhalb der Glühverlustgrenze und somit geeignet für die Deponierung.

Tabelle 10: Übersicht der optischen Bewertung der Schlacken

Kriterium	1	2	3
Feuchtigkeit	62	53	11
Farbe	50	60	16
Geruch	50	36	40
Teilchenform	30	35	10
Teilchengröße	38	22	15

Feuchtigkeit

Eine Analyse der Tabelle 11 zeigt, dass 91% $((62+53) / 126)$ der untersuchten Schlacken als trocken und leicht feucht bewertet wurden und bei 9% stand Flüssigkeit im Behälter. Differenziert man weiter in die Glühverlustgrenze von 5%, so ist bei nassen Schlacken (also mit 3 bewertet) keine Aussage zu treffen, ob sie einen hohen oder niedrigen GV aufweisen, da insgesamt nur 11 Schlacken mit 3 bewertet wurden und zu fast gleichen Teilen die GV-Grenze überstiegen oder unterschritten wurde. Es lässt sich optisch nicht erkennen, ob eine trockene oder feuchte Schlacke für einen hohen oder niedrigen Glühverlust steht.

Aus den 126 auf Feuchtigkeit untersuchten Schlacken lässt sich daher keine eindeutige Aussage formulieren, ob die sichtbare Feuchtigkeit einen Hinweis auf den Glühverlust liefert.

Tabelle 11: Schlacken mit Kriterium Feuchtigkeit

Kriterium	1	2	3
Feuchtigkeit	62	53	11
GV < 5%	47	41	5
GV > 5%	15	12	6

Feuchtigkeit und Trockensubstanz

Im Zuge der Datenanalyse konnte ein Erkenntnis zwischen der sichtbaren Feuchtigkeit und der gemessenen Trockensubstanz, die vice versa für den Wassergehalt steht, gewonnen werden. Nur 32/62 Proben sind mit Feuchtigkeit 1 (daher trocken) bewertet worden und haben $T_s > 80\%$. 10/11 Proben, die mit Feuchtigkeit 3 bewertet worden sind, haben einen T_s -Gehalt $< 75\%$.

Diese beiden Ergebnisse lassen schließen, dass, wenn eine Probe optisch trocken erscheint, diese einen hohen Wassergehalt haben kann. Dieser Umstand ist möglicherweise auf die Hydrate der anorganischen Bestandteile zurückzuführen. Die kristallinen Strukturen können Wasser binden, das als Kristallwasser bezeichnet wird. Eine nasse erscheinende Probe hat weiters mit großer Wahrscheinlichkeit einen hohen Wassergehalt bzw. eine niedrige Trockensubstanz.

Farbe

Bei der Farbbewertung trat für eine nicht unwesentliche Menge an Proben das Problem auf, ob es mit 1 oder 2 bewertet werden soll. Ob die Farbe der Schlacken nun hell, mittel oder dunkelgrau ist, liegt hier nun stark im Auge des Betrachters. Deshalb wurde in der Auswertung die Bewertung 1 und 2 zusammengefasst, da diese Schlacken eindeutig als grau oder schwarz oder in deren Farbmischungen vorliegen und somit klar von brauner Farbe unterschieden werden kann.

Eine Analyse der Tabelle 12 zeigt, dass 87% der untersuchten Schlacken ein dunkles Erscheinungsbild in den Farben schwarz-grau hatten, 16 von 126 Schlacken konnten eindeutig als braun identifiziert werden.

Interessant ist, dass 30 von 33 Schlacken (91%), die mit 1 oder 2 bewertet wurden bzw. ein dunkles Erscheinungsbild haben, die Glühverlustgrenze übersteigen. 13/16 Schlacken, die mit 3 bewertet wurden, haben einen $GV < 5\%$. Dagegen sind nur 3/16 Schlacken als braun identifiziert und haben einen höheren Glühverlust. Bei genauerer Betrachtung dieser 3 Schlacken (#121, #128, #142) übersteigen zwei Schlacken, nämlich #121 und #142, nur gering

die GV Grenze. Dies kann auf die Probleme bei der GV-Bestimmung zurückzuführen sein (Erklärung dazu im Kapitel 5.1)

Weiters ist anzumerken, dass alle Schlacken nach dem Glühen eine braune Farbe aufwiesen, unabhängig von der Ausgangsfarbe. Nachdem das Glühen nach DIN EN 15169 einer vollständigen Austreibung des organischen Kohlenstoffes entspricht, lässt sich die Aussage formulieren, dass braune Schlacke als ziemlich gut ausgeglüht bezeichnet werden kann und der GV daher niedrig anzunehmen ist.

Aus der Farbbewertung der 126 Schlacken lässt sich mit Vorbehalt formulieren, dass eine schwarz graue Schlacke eher die GV Grenze übersteigt als braune Schlacke. Braune Schlacke kann als Indiz für einen guten Ausbrand herangezogen werden.

Tabelle 12: Schlacken mit Kriterium Farbe

Kriterium	1	2	3
Farbe	50	60	16
GV < 5%	38	42	13
GV > 5%	12	18	3

Geruch

In Tabelle 13 findet sich das Ergebnis zur Geruchsbewertung. Das Ergebnis fiel durchaus überraschend aus. Nachdem angenommen wurde, dass für den Geruch die flüchtigen organischen Bestandteile verantwortlich sind (also Aromaten, org. Säuren etc.), so lag der Gedanke nahe, dass stark riechende Schlacken einen höheren Anteil an organischen Komponenten aufweisen als nicht riechende Schlacken und demnach einen hohen GV haben. Jedoch ergab die Analyse der 126 Schlackeproben, dass der Geruch auf die Höhe des GV keinen Einfluss nimmt. Betrachtet man jene Schlacken, die die GV Grenze übersteigen, so verteilen sich die Schlackeproben zu ca. 1/3 auf die drei Bewertungsnoten. Für 5/11 Schlacken gilt, dass sie optisch nass waren (Feuchtigkeit 3) und geruchlos (Geruch 1). Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, ist das auf die Lösbarkeit der organischen Stoffe in Wasser zurückzuführen. Die restlichen 6/11 Schlacken hatten eine Geruchentwicklung was bedeuten kann, dass nicht alle organischen Stoffe in Wasser lösbar sind.

Eine Korrelation des Geruchs mit dem Glühverlust ist anhand dieser Ergebnisse daher auszuschließen.

Tabelle 13: Schlacken mit Kriterium Geruch

Kriterium	1	2	3
Geruch	50	36	40
GV < 5%	37	27	29
GV > 5%	13	9	11

Teilchenform

75 Schlackeproben wurden auf ihre optische Teilchenform bewertet. Nahezu alle der 150 Schlackeproben wiesen eine Teilchenform auf, die mit 1 oder 2 bewertet wurden. Im Zuge der Analysen (siehe dazu Tabelle 14) stellte sich heraus, dass nur über die Teilchenform 3 eine Aussage getroffen werden konnte. Schlacken, die mit Teilchenform 3 bewertet wurden, unterscheiden sich optisch stark von den anderen Schlacken. Charakteristisch für diese Schlacken sind die großen Klumpen, die fühlbar hart und schwer sind, eine glatte, glänzende oder matte Oberfläche haben und meist schwarz-grau sind. Diese Schlacken scheinen stark verglast zu sein und 9/10 weisen einen geringen GV auf.

Aus den 75 untersuchten Schlackeproben konnte auf die Teilchenform nur jene Aussage getroffen werden, dass klumpige, harte Schlacken mit verglaster Oberfläche oder metallischen Anteilen einen niedrigen GV haben.

Tabelle 14: Schlacken mit Kriterium Teilchenform

Kriterium	1	2	3
Teilchenform	30	35	10
GV < 5%	26	29	9
GV > 5%	4	6	1

Teilchengröße

Auf Basis der 75 untersuchten Schlacken konnte keine Aussage über die Auswirkung der Teilchengröße auf den GV getroffen werden. Der Großteil der untersuchten Schlacken weisen ein feinkörniges, inhomogenes Gemenge auf, die Teilchengröße variiert in den jeweiligen Schlacken sehr stark. Eine Aufteilung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 15.

Tabelle 15: Schlacken mit Kriterium Teilchengröße

Kriterium	1	2	3
Teilchengröße	38	22	15
GV < 5%	34	17	13
GV > 5%	4	5	2

5.2 Analytische Kohlenstoff-Messung

Am 29. Oktober 2020 und am 11. November 2020 wurden 26 von 150 Schlackeproben mit dem SKALAR Primacs ATC 100-IC-E Autosampler auf die Kohlenstoffzusammensetzung nach DIN 19539 analysiert. Erklärung zur Untersuchung findet sich in Kapitel 4.3 Kohlenstoff-Gehalt nach DIN 19539.

Ziel der Messung

Zweck dieser Untersuchung war es eine Aussage darüber zu treffen, ob die einfache TOC Bestimmung über den Muffelofen eine annähernd ausreichende Genauigkeit aufweist wie eine Bestimmung mit dem Autosampler. Die Glühverlustgrenze wird von 22/26 Proben überstiegen, 4/26 Proben liegen unterhalb der Glühverlustgrenze. Eine tabellarische Auflistung der Versuchsergebnisse findet sich im Appendix.

Versuchsdurchführung

Die 26 aufbewahrten Proben wurden in kleinen Aluschalen gleichmäßig gefüllt und über Nacht im Trockenschrank bei 40°C getrocknet (siehe Abbildung 17). Die Trocknungsdauer belief sich dabei auf mindestens 17 Stunden. Die Trocknungstemperatur wurde deshalb so niedrig gewählt, um nur die Feuchtigkeit aus den Proben auszutreiben und niedrigflüchtige Komponenten unbeeinflusst zu lassen.

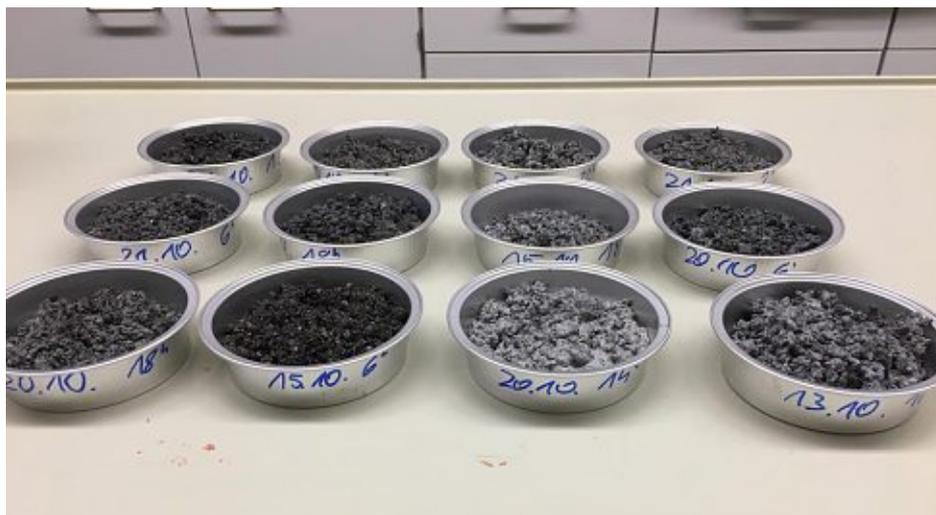


Abbildung 17: Die bei 40°C getrockneten Schlackeproben für die Kohlenstoff-Messung

Nach erfolgreicher Trocknung wurden die Proben in der Planeten-Kugelmühle gemahlen. Die Umdrehungszahl wurde zwischen 200 und 500 U/min gewählt, diese war stark von der Schlackencharakteristik abhängig. Während des Mahlens stellte sich heraus, dass schwere Schlacken bei einer höheren Umdrehungszahl feiner gemahlen werden konnten als bei niedriger Drehzahl. War die Schlacke leicht, so konnte eine Feinheit schon bei niedrigerer Drehzahl erreicht werden. Die Teilchenfeinheit war nötig, um eine optimale Umsetzung im Autosampler zu ermöglichen. Es wird geschätzt, dass die gemahlene Schlackeprobe eine Teilchengröße von ca. 40 – 300 µm aufweisen.

Die fein gemahlene Schlackeprobe konnte in diesem Zustand in den Autosampler zur Kohlenstoff-Bestimmung aufgegeben werden. In die vorbereiteten Keramik-Tiegel wurden ca. 100 mg Schlackeprobe aufgegeben und das Programm gestartet, die Laufzeit betrug ca. 12 Stunden. Die Analyse mit dem Autosampler liefert drei wesentliche Ergebnisse: TOC, ROC und TIC Gehalt in mg bzw. % der aufgegebenen Masse der Probe. Die Beschreibung des Versuchsvorganges zur DIN 19539 mit dem SKALAR Primacs ATC 100-IC-E Autosampler findet sich in Kapitel 4.3.

Ergebnisse und Diskussion

Mit dem SKALAR Primacs ATC 100-IC-E Autosampler wurden 26 Schlackeproben auf die Zusammensetzung des Kohlenstoffes untersucht. Die Menge an TOC, ROC und TIC sind in Masseprozent der aufgegebenen Menge angegeben.

Abbildung 18 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Muffelofen und des Autosamplers. Aufgrund der Messung mit dem Autosampler haben 19 der 26 Proben (73%) einen geringeren TOC Gehalt als die Messung mit dem Muffelofen. Das ist auf die Differenzierung des Kohlenstoffes zurückzuführen. Der Glühverlust beinhaltet zusätzlich den ROC, der bei dieser Methode getrennt bestimmt wird.

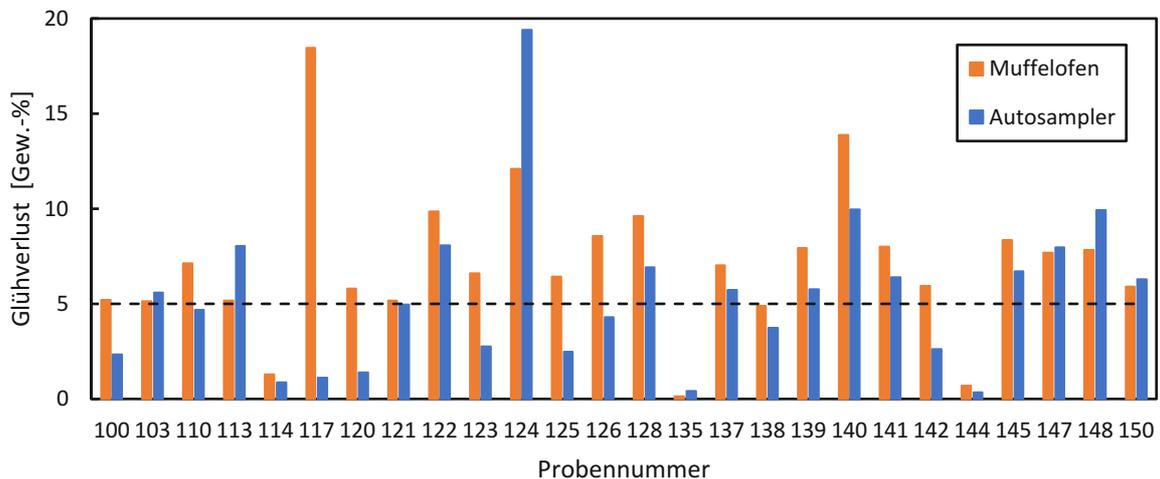


Abbildung 18: Vergleich der TOC Ergebnisse zwischen Muffelofen und Autosampler

Proben #117 und #124 ragen zufolge ihrer hohen Werte heraus. Die hohen Werte sind aufgrund der stoffartigen Fragmente, die bei niedrigen Temperaturen verbrennen. Die Verbrennung bewirkt eine Minderung des Gewichtes und somit einer Erhöhung an organischem Kohlenstoff.

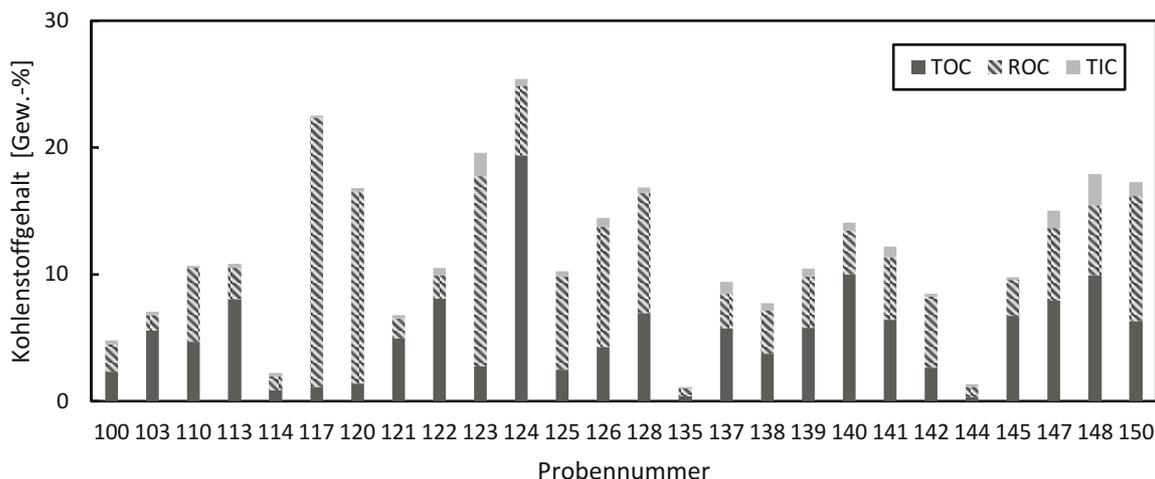


Abbildung 19: Kohlenstoffgehalt der 26 Proben

Abbildung 19 zeigt die Menge an Kohlenstoff in den 26 Proben. Die Darstellung ist eine Stapelung der TOC, ROC und TIC Werte, wobei die TOC Werte die Basis einnehmen. Der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff TIC in den Schlacken ist sehr gering. 22 der 26 Proben haben einen TIC-Gehalt <1%, die restlichen 4 Proben haben einen TIC-Gehalt zwischen 1,1% und 2,5%. Der ROC Gehalt ist für eine Menge der Proben in bedeutender Höhe. 23/26 Proben haben einen ROC-Gehalt von weniger als 10%, die restlichen 3 Proben haben einen hohen ROC Gehalt von 15,0 – 21,2%.

5.3 Messung der PAK-Belastung

Zwei Schlackeproben wurden durch die Mitarbeiter des Instituts für Chemische Technologien und Analytik der Technischen Universität Wien auf ihren Gehalt an PAK untersucht. Die quantitative Analyse der 16 Leit-PAK nach EPA und Perylen und Benzo[e]pyren erfolgte über eine GC/MS Analyse mit adäquater Probenvorbereitung. Eine tabellarische Auflistung der Versuchsergebnisse findet sich im Appendix.

Die zwei Proben sind vom gleichen Zeitpunkt der Probennahme, aber mit unterschiedlichem Aufbereitungsgrad. In Tabelle 16 sind die zwei Proben dargestellt, wobei die aufbereitete Probe mit A bezeichnet wird, die nicht aufbereitete Probe mit N.

A ist jene Probe, die auch für die analytische Kohlenstoff-Messung verwendet wurde. Die Probe wurde bei 40°C im Trockenschrank für mindestens 17 Stunden getrocknet und in der Planeten-Kugelmühle fein gemahlen. Die Teilchengröße befindet sich im Bereich von 40 – 300 µm.

N ist die unbehandelte Probe, wie sie bei der Probennahme beim Drehrohr vorgefunden wurde.

Tabelle 16: Schlackeproben für die PAK-Bestimmung

#	Abkürzung	Zeitpunkt	Art der Probe
126	A	21.10.2020 6 Uhr	trocken, fein gemahlen
126	N	21.10.2020 6 Uhr	nicht aufbereitet

Ziel der Messung

Zum einen ist von Interesse, in welcher Menge die PAK in der Schlacke vorkommen und ob diese Elemente für die Geruchsentwicklung verantwortlich sind. Es wird angenommen, dass mit erhöhtem Glühverlust auch die Belastung an PAK steigt. Weiters soll der Einfluss des Aufbereitungsgrades untersucht werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die an den Schlackeproben durchgeführten GC/MS Analysen zeigen, dass die Höhe der PAK-Belastung im niedrigen ppm-Bereich liegt. Die Probe A zeigt ggü. der Probe N mehr PAK-Gehalte an, da die Extraktion und Analyse einer feingemahlten Probe effizienter ist.

Für die Probe A bewegen sich die gemessenen PAK-Konzentrationen im Bereich von 1 – 15,5 µg/g, für die Probe N im Bereich von 0,2 – 2 µg/g. Laut DVO 2008, Anhang 1, Tabelle „Grenzwerte für Gehalte im Feststoff (Gesamtgehalte) für die Annahme von Abfällen auf Reststoffdeponien“ ist der Grenzwert für die PAK Belastung 300 µg/g bezogen auf die Trockenmasse. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse der Schlackeprobe #126 ist in Bezug auf die PAK-Belastung die Deponierbarkeit gewährleistet. Der höchste gemessene Gehalt liegt in Phenanthrene, Fluoranthene, Naphthalene, Pyrene und Fluorene (siehe Abbildung 20). Es konnten keine Gehalte an Benzo[ghi]perylene, Dibenzo[a,h]anthracene, Ideno[1,2,3-cd]pyrene und Benzo[k]fluoranthene gemessen werden.

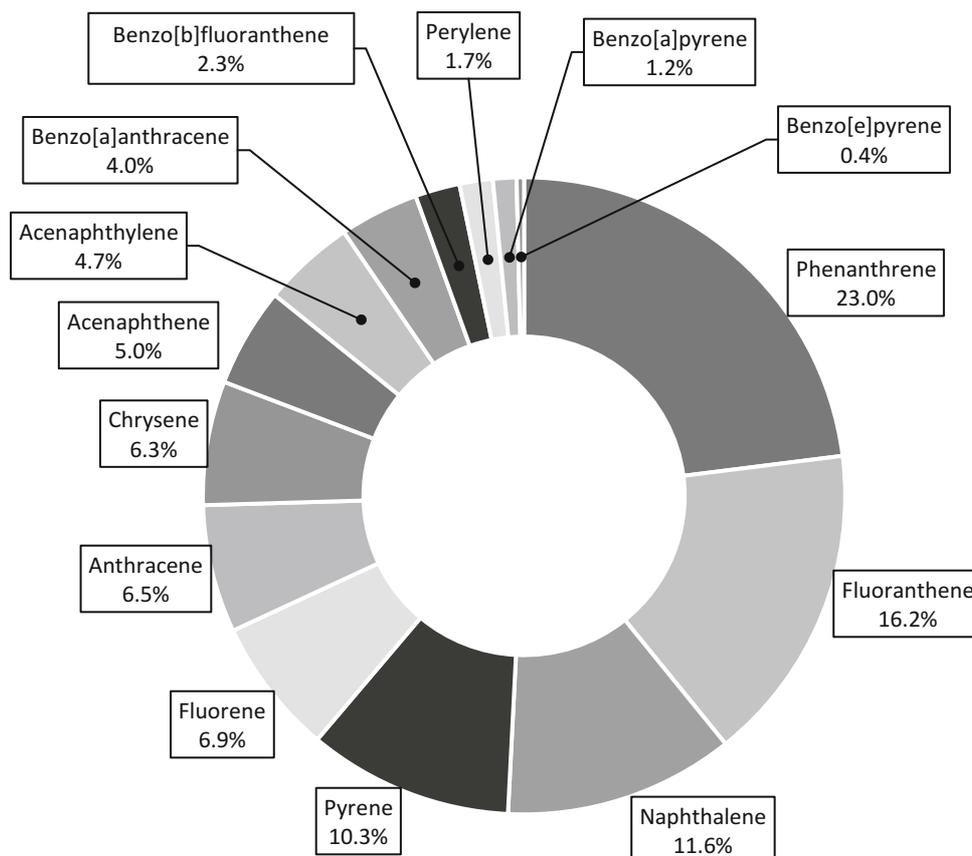


Abbildung 20: Anteil der PAK in der Schlackeprobe A (#126)

Es wird angenommen, dass die ermittelten PAK für die Geruchsentwicklung der Schlacke verantwortlich sind. Deshalb wurden in der Gefahrenstoffinformationssystem-Datenbank (GESTIS) die chemischen Verbindungen aufgesucht und überprüft, von welchen Verbindungen die Geruchsentwicklung bekannt ist. Dabei ist zu beachten, dass die Geruchsentwicklung vor allem von der vorhandenen Konzentration abhängt. Weiters sind in der GESTIS die Eigenschaften der Reinstoffe angegeben. In der Schlacke haben die Verbindungen die Möglichkeit, andere Bindungen einzugehen und nicht mehr als Reinstoff vorzuliegen. Dadurch kann sich die Entwicklung des Geruches verändern.

Allen in Tabelle 17 genannten PAK ist gemein, dass sie praktisch unlöslich in Wasser sind [31]. Dadurch können sie im Nassentschlacker nicht ausgewaschen werden, verbleiben in der Schlacke und sind somit für die Geruchsentwicklung verantwortlich. In nachstehender Tabelle 17 findet sich die Übersicht der Kenntnisse über die Geruchsentwicklung der einzelnen PAK in Reinstoffform. Nur von drei PAK ist bekannt, dass sie für einen Geruch sorgen: Naphthalene, Anthracene und Acenaphthene. Es kann daher angenommen werden, dass diese drei PAK für den oftmals gleichen markanten Geruch der Schlacke verantwortlich sind.

Tabelle 17: Geruch der gemessenen PAK, entnommen aus [31]

PAK	CAS-Nr.	Geruch
Acenaphthene	83-32-9	ja
Acenaphthylene	208-96-8	kein Geruch bekannt
Anthracene	120-12-7	ja
Benzo[a]anthracene	56-55-3	kein Geruch bekannt
Benzo[b]fluoranthene	205-99-2	kein Geruch bekannt
Chrysene	218-01-9	kein Geruch bekannt
Fluoranthene	206-44-0	kein Geruch bekannt
Fluorene	86-73-7	nein
Naphthalene	91-20-3	ja
Perylene	198-55-0	in [31] nicht gelistet
Phenanthrene	85-01-8	nein
Pyrene	129-00-0	nein

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden eingangs die Abfallverbrennung, im speziellen im Drehrohrofen und die rechtlichen Rahmenbedingungen dazu in Österreich vorgestellt. Die Verbrennung von Industriemüll und gefährlichen Abfällen im Drehrohrofen ist vielversprechend. Der Betrieb bei sehr hohen Temperaturen ermöglicht es gefährliche Substanzen vollständig unschädlich zu machen. Die Betriebsweise des Drehrohrofens kann an die Anforderungen der vollständigen Verbrennung angepasst werden. Die bei der Abfallverbrennung im Drehrohrofen ausgetragene Schlacke wurde mittels vorhandener Literatur auf Einflussgrößen und ihre Bestandteile beleuchtet. Die anfallende Schlacke wird über den Mülleinsatz und den Bedingungen während der Verbrennung im Drehrohrofen bestimmt. Gemeinhin gleichen die Bestandteile der Schlacke jener, die auch natürlich in der Erdkruste vorkommen. Diese anorganischen Bestandteile kommen im großen Ausmaß in der Schlacke vor, daneben liegen organische Bestandteile vor. Die Art und Menge der chemischen Verbindungen werden über die Abfallherkunft bestimmt. Die Qualität der Verbrennung wird über die organischen unverbrannten Bestandteile bestimmt: je höher deren Gehalt, desto schlechter der Ausbrand.

Im Betriebslabor der Wien Energie GmbH Sonderabfall- und Klärschlammverbrennungsanlage am Standort Simmeringer Haide wurden 150 Schlackeproben aus der Abfallverbrennung im Drehrohrofen untersucht. Der Mittelpunkt der Untersuchungen ist, ob aus den Eigenschaften der Schlacke eine Aussage über die Ausbrandqualität der Schlacke getroffen werden kann.

Folgende Eigenschaften der Schlacke wurden im Betriebslabor untersucht:

- Trockensubstanz nach DIN EN 14346
- Glühverlust nach DIN EN 15169
- Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes nach DIN 19539
- Bewertung der optischen Erscheinung und des Geruches mittels Bewertungskatalog

Zusätzlich wurden zwei Schlackeproben an der Technischen Universität Wien untersucht:

- Analyse der PAK-Belastung mittels GC/MS

Eine Zusammenfassung aus den Untersuchungen der 150 Schlackeproben in Bezug auf die oben genannten Punkte wird nachfolgend vorgestellt.

Trockensubstanz Ts

Die minimal erforderliche Trocknungsdauer im Trockenschrank für Schlackeproben aus den Drehrohröfen bei einer üblichen Einwaage von 35 – 65g beträgt 2 Stunden und daher sind 2,5 Stunden vollkommen ausreichend. Die Mehrheit der Schlackeproben haben eine Ts von 75 – 85%. Hat die Schlackeprobe eine Ts <75%, so ist es sehr wahrscheinlich, dass die Glühverlustgrenze von 5% überstiegen wird. Keine Schlackeprobe mit Ts >85% übersteigt die Glühverlustgrenze.

Das bedeutet, je höher die Trockensubstanz ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass die Glühverlustgrenze überstiegen wird. Die Bestimmung der Trockensubstanz nimmt die meiste Zeit und Ressourcen in Anspruch. Eine Optimierung des Trockenvorganges wird empfohlen.

Glühverlust (GV) und analytische Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes

Der unverbrannte Rückstand wird über die Bestimmung des Glühverlustes nachgewiesen, der in erster Näherung als TOC-Gehalt bezeichnet wird. Er gibt die Qualität des Ausbrandes wieder und ist ein wichtiges Kriterium für die Deponiefähigkeit von Schlacke und entsprechend gesetzlich geregelt. Schlacken können deponiert werden, wenn der Glühverlust kleiner fünf Masseprozent ist. Die Bestimmung des Glühverlustes der Schlacke und die Verwendung als Deponiekriterium ist in manchen Fällen praktisch, aber ungenau und fehlerbehaftet. Die Bestimmung des Glühverlustes nach DIN EN 15169 ist zeitaufwendig und personalaufwendig. Schlackeproben müssen vorbereitet werden, im Muffelofen gebrannt und anschließend ausgewogen werden. Das Messergebnis kann durch Verdampfen von restlichem Wasser, Oxidationsvorgänge und durch Massenänderung aufgrund der schlagartigen thermischen Beanspruchung verändert werden.

Eine genaue analytische Nachweismethode wurde in dieser Arbeit vorgestellt. Eine Auswahl an Schlackeproben wurden nach DIN 19539 auf ihren Kohlenstoffgehalt untersucht. Der Kohlenstoffgehalt der Probe wird in TOC, TIC und ROC Gehalt differenziert. Der TOC Gehalt nach DIN 19539 ist dabei niedriger als nach der Glühverlustbestimmung, da der ROC-Gehalt nicht eingeschlossen ist. Schlacken wären aufgrund des Glühverlustes nicht deponierbar, obwohl eine Deponiefähigkeit gegeben ist, die über den analytischen Nachweis belegbar ist. Die Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes nach DIN 19539 hat den Nachteil, dass sie noch zeitaufwendiger und arbeitsintensiv ggü der Glühverlustbestimmung ist.

Bewertung der Schlacken mittels Bewertungskatalog, PAK-Analyse

Schlackeproben wurden auf ihr Erscheinungsbild und Geruch untersucht und mittels Bewertungskatalog bewertet, um subjektive Einflüsse so gering wie möglich zu halten. Folgende Erkenntnisse der Merkmale wurden durch die Untersuchungen der Schlackeproben in Bezug auf die Qualität des Ausbrandes festgestellt:

- Feuchtigkeit: Die sichtbare Feuchtigkeit einer Schlackeprobe liefert keinen Hinweis auf die Qualität des Ausbrandes.
- Farbe: braune Schlacke kann als Indiz für einen guten Ausbrand herangezogen werden. Der Großteil der Schlacken hat eine schwarz-graue Färbung, optisch lässt sich bei dieser Färbung kein Hinweis auf die Ausbrandqualität erkennen.
- Geruch: Zu Beginn der Untersuchungen war die Vermutung, dass stark riechende Schlacken die Glühverlustgrenze übersteigen. Aus der Untersuchung der Schlacken konnte keine Aussage getätigt werden, ob der Geruch von Schlacke einen Einfluss auf die Qualität des Ausbrandes hat. Aus der Messung der PAK-Belastung wurde die Kenntnis erworben, dass manche PAK für den Geruch verantwortlich gemacht werden können, da sie in Wasser nahezu unlöslich sind. Sie verbleiben in geringen Konzentrationen (ppm-Bereich) in der Schlacke.
- Teilchenform und -größe: Mit Sicherheit lässt sich sagen, dass klumpige, harte Schlacken mit verglaster Oberfläche oder metallischen Anteilen für einen guten Ausbrand stehen. Befinden sich stoffartige Fragmente in der Schlacke, so wird die Glühverlustgrenze mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht eingehalten.

Ausblick

Eine Optimierung der Bestimmung des unverbrannten Rückstandes in der Schlacke aus Drehrohren sollte angestrebt werden. Im Moment erfolgt die Bestimmung der Deponiefähigkeit über den Glühverlust oder analytisch, wobei beide zeit- und ressourcenintensiv sind. In erster Linie sollte eine Verminderung der Trocknungsdauer angestrebt werden, da diese die meiste Zeit in Anspruch nimmt. Eine Methode wäre, eine automatische Erfassung der Ausbrandqualität des Drehrohrens in der Anlage zu implementieren. Dies kann über ein berührungsloses Messverfahren umgesetzt werden.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

- [1] M. Kranert und K. Cord-Landwehr, Hrsg., *Einführung in die Abfallwirtschaft: mit 131 Tabellen*, 4., Vollst. aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [2] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „Waste-to-Energy in Austria: Whitebook- Figures, Data, Facts – 3rd Edition“, Wien, Dez. 2015.
- [3] Wien Energie GmbH, „Energie ist unsere Verantwortung: Umwelterklärung 2019 der Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen von Wien Energie“, Wien, 2019.
- [4] S. Böhmer, I. Kügler, H. Stoiber, und B. Walter, *Abfallverbrennung in Österreich - Statusbericht 2006*, REP-0113. Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2007.
- [5] T. Meinfelder und U. Richers, „Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung“, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft; Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe, FZKA 7422, Juli 2008.
- [6] H. Hofbauer, *Basic Engineering - Auslegung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen*, VO 166.032, WS 2018/2019. Wien: Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften (E166).
- [7] P. Kurth, A. Oexle, und M. Faulstich, Hrsg., *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*, 1.Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [8] P. Waibel, „Konzeption von Verfahren zur kamerabasierten Analyse und Optimierung von Drehrohrofenprozessen“, *Schriftenreihe Inst. Für Angew. Inform. Am Karlsruher Inst. Für Technol.*, Bd. 49, S. 228, 2014.
- [9] Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002; BGBl. I Nr. 102/2002 Fassung vom 07.08.2019), *Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft*.
- [10] Abfallverbrennungsverordnung (AVV; BGBl. II Nr. 389/2002 Fassung vom 13.05.2020), *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen*.

- [11] Amt der Wiener Landesregierung, Wiener Umweltschutzabteilung, Magistratsabteilung 22 (MA 22), „Änderung der Abfallbehandlungsanlage gemäß §37 Abs.3 Z5 AWG 2002“, Fernwärme Wien GmbH, Wien, Verhandlungsschrift vom 09.01.2013, MA 22-2561/2010.
- [12] Deponieverordnung 2008 (DVO 2008; BGBl. II Nr. 39/2008 Fassung vom 13.05.2020), *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien*.
- [13] G. Pfrang-Stotz und J. Reichelt, „Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken“, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft; Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe, FZKA 7025, Jän. 2005.
- [14] D. Laner, J. Fellner, und P. H. Brunner, „Die Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer“, *Österr. Wasser-Abfallwirtsch.*, Bd. 62, Nr. 7–8, S. 131–140, Aug. 2010.
- [15] E. Rendek, G. Ducom, und P. Germain, „Influence of waste input and combustion technology on MSWI bottom ash quality“, *Waste Manag.*, Bd. 27, Nr. 10, S. 1403–1407, Jän. 2007.
- [16] R. K. Dhir, J. de Brito, C. J. Lynn, und R. V. Silva, „Municipal Incinerated Bottom Ash Characteristics“, in *Sustainable Construction Materials*, Elsevier, 2018, S. 91–138.
- [17] A. A. Ramezani-pour, M. Nikravan, und R. Maknoon, „Characterization of Bottom Ash from Petrochemical Waste Incinerator“, *J. Residuals Sci. Technol.*, Bd. 8, Nr. 4, S. 189–196, Okt. 2011.
- [18] R. K. Dhir, J. de Brito, C. J. Lynn, und R. V. Silva, „Municipal Solid Waste Composition, Incineration, Processing and Management of Bottom Ashes“, in *Sustainable Construction Materials*, Elsevier, 2018, S. 31–90.
- [19] E. Gidakos, M. Petrantonaki, K. Anastasiadou, und K.-W. Schramm, „Characterization and hazard evaluation of bottom ash produced from incinerated hospital waste“, *J. Hazard. Mater.*, Bd. 172, Nr. 2–3, S. 935–942, Dez. 2009.
- [20] L. Zhao, F.-S. Zhang, M. Chen, Z. Liu, und D. B. J. Wu, „Typical pollutants in bottom ashes from a typical medical waste incinerator“, *J. Hazard. Mater.*, Bd. 173, Nr. 1–3, S. 181–185, Jän. 2010.

- [21] DIN 19539:2016-12, *Untersuchung von Feststoffen – Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC400, ROC, TIC900)*. Berlin: Beuth-Verlag, 2016.
- [22] A. Glauser, L. S. Morf, G. Weibel, und U. Eggenberger, „Ten-years monitoring of MSWI bottom ashes with focus on TOC development and leaching behaviour“, *Waste Manag.*, Bd. 117, S. 104–113, Nov. 2020.
- [23] A. van Zomeren und R. N. J. Comans, „Carbon speciation in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in relation to facilitated metal leaching“, *Waste Manag.*, Bd. 29, Nr. 7, S. 2059–2064, Juli 2009.
- [24] S. Rocca, A. van Zomeren, G. Costa, J. J. Dijkstra, R. N. J. Comans, und F. Lombardi, „Mechanisms contributing to the thermal analysis of waste incineration bottom ash and quantification of different carbon species“, *Waste Manag.*, Bd. 33, Nr. 2, S. 373–381, Feb. 2013.
- [25] M. Kaltschmitt, H. Hofbauer, und H. Hartmann, Hrsg., „Grundlagen der thermochemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe“, in *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2. Aufl., Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2009.
- [26] Y.-C. Lin, S. C. Panchangam, C.-H. Wu, P.-K. A. Hong, und C.-F. Lin, „Effects of water washing on removing organic residues in bottom ashes of municipal solid waste incinerators“, *Chemosphere*, Bd. 82, Nr. 4, S. 502–506, Jän. 2011.
- [27] DIN EN 14346:2006-12, *Charakterisierung von Abfällen – Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes*. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [28] DIN EN 15169:2007-05, *Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten*. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [29] Skalar B.V., *PRIMACS100 Analyzer Series User Manual*, Bd. 1.0.35. Breda - NL, 2019.
- [30] U. Ritgen, *Analytische Chemie I*, 1.Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019.
- [31] IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „GESTIS-Stoffdatenbank [Online]“. <https://gestis.dguv.de/search>. Zugriff am: 11.01.2021.

7.2 Abbildungen

Abbildung 1: Müllverbrennungsanlage Wien Simmeringer Haide [3]	3
Abbildung 2: Prinzipielle Darstellung eines Drehrohrofens [7]	6
Abbildung 3: Innenraum des DRO 1 aus Sicht der Stirnwand.....	7
Abbildung 4: Blick auf den Austrag des DRO 1 während des Betriebes durch ein Schauloch. 8	
Abbildung 5: Skizzierte Darstellung der Schlackenausstragung	9
Abbildung 6: Blick auf die Schlackenausstragung. Der Nassentschlacker kühlt die heiße Asche rasch ab und ermöglicht eine mechanische Austragung	10
Abbildung 7: Ausgetragene Schlacken aus den DRO; Zeitraum der Probennahmen: 10. bis 13. Juli 2020	15
Abbildung 8: SEM Aufnahmen einer Schlacke aus der Müllverbrennung mit (a) 500 (b) 2500 -facher Vergrößerung [17].....	19
Abbildung 9: Einteilung des Kohlenstoffes in der anfallenden Schlacke, adaptiert aus [22] ..	25
Abbildung 10: Einflussgrößen und Eigenschaften der Schlacke aus MVA.....	31
Abbildung 11: Beispieldiagramm für die Kohlenstoffbestimmung nach DIN 19539 [21].....	35
Abbildung 12: Schlackenanalyse im Langzeitversuch.....	43
Abbildung 13: Abweichung der Glühverlust-Messergebnisse.....	45
Abbildung 14: Versuch minimal erforderliche Trocknungsdauer	47
Abbildung 15: Verteilung der Trockensubstanz der 150 untersuchten Proben.....	48
Abbildung 16: Glühverlust der 150 Schlackeproben	50
Abbildung 17: Die bei 40°C getrockneten Schlackeproben für die Kohlenstoff-Messung	56
Abbildung 18: Vergleich der TOC Ergebnisse zwischen Muffelofen und Autosampler.....	58
Abbildung 19: Kohlenstoffgehalt der 26 Proben	59
Abbildung 20: Anteil der PAK in der Schlackeprobe A (#126)	61

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Auszug aus der AVV Anlage 1:Tagesmittelwerte der Emissionen für Verbrennungsanlagen im trockenen Abgas und bezogen auf 11% Sauerstoff (bei ausschließlicher Altölverbrennung: bezogen auf 3% Sauerstoff) [10]	12
Tabelle 2: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung von Hausmüll, Industriemüll und gefährlichen Abfällen; adaptiert aus [15]	21
Tabelle 3: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung medizinischer Abfälle, adaptiert aus [20]	22
Tabelle 4: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung klinischer Abfälle, adaptiert aus [19]	22
Tabelle 5: Anorganische Bestandteile aus der Verbrennung petrochemischer Abfälle, adaptiert aus [17]	23
Tabelle 6: Organische Verbindungen in Schlacken, adaptiert aus [26]	28
Tabelle 7: Verfahrensprinzip der TOC Bestimmung nach DIN 19539, adaptiert aus [21].....	34
Tabelle 8: Bewertungskatalog für das Erscheinungsbild und den Geruch der Schlackeproben	39
Tabelle 9: Untersuchte Proben des Trocknungsdauerversuches	46
Tabelle 10: Übersicht der optischen Bewertung der Schlacken.....	51
Tabelle 11: Schlacken mit Kriterium Feuchtigkeit	52
Tabelle 12: Schlacken mit Kriterium Farbe	53
Tabelle 13: Schlacken mit Kriterium Geruch.....	54
Tabelle 14: Schlacken mit Kriterium Teilchenform.....	54
Tabelle 15: Schlacken mit Kriterium Teilchengröße	55
Tabelle 16: Schlackeproben für die PAK-Bestimmung	60
Tabelle 17: Geruch der gemessenen PAK, entnommen aus [31].....	62

8 Appendix

Langzeituntersuchung

Probennr.												mg	%	%	%	mg	mg	mg
#	Datum	Zeit	% Ts	% OTs	% GV 1	% GV 2	Feuchtigk.	Farbe	Geruch	Form	Größe	Weight	TOC	ROC	TIC	TOC	ROC	TIC
1	07.09.20	12:00	89,21	1,22	1,37	2,20												
2	07.09.20	20:00	88,67	1,62	1,83	1,54												
3	07.09.20	21:50	90,08	1,43	1,59	0,74												
4	08.09.20	02:00	78,11	3,69	4,73	4,50												
5	08.09.20	07:20	85,74	2,13	2,49	2,59												
6	08.09.20	10:30	76,08	3,84	5,04	3,83												
7	08.09.20	16:00	93,68	0,35	0,37	0,85												
8	08.09.20	18:00	91,53	1,31	1,43	0,68												
9	08.09.20	22:00	72,02	2,60	3,61	4,03												
10	09.09.20	02:00	83,89	1,48	1,76	1,51	1	1	1	2	3							
11	09.09.20	06:00	80,88	2,57	3,18	2,60	1	1	1	1	2							
12	09.09.20	10:00	79,62	1,74	2,18	2,19	3	2	2	2	2							
13	09.09.20	14:00	83,65	1,53	1,83	1,77	2	1	1	1	1							
14	09.09.20	18:00	82,99	1,70	2,05	1,62	2	1	3	1	1							
15	09.09.20	22:00	79,80	1,16	1,45	1,08												
16	10.09.20	06:00	65,99	4,43	6,72	7,98												
17	10.09.20	10:00	62,26	5,16	8,28	8,01												
18	10.09.20	14:00	61,62	5,49	8,90	8,90												
19	10.09.20	18:00	77,70	2,00	2,58	2,44												
20	10.09.20	22:00	78,76	1,75	2,22	2,22												
21	11.09.20	02:00	69,58	1,42	2,05	3,57												
22	10.09.20	06:00	82,55	1,00	1,21	1,29												
23	11.09.20	10:00	70,81	3,33	4,71	4,98												
24	11.09.20	14:00	65,49	3,70	5,66	6,32												
25	11.09.20	18:00	65,29	3,74	5,73	4,76												
26	11.09.20	22:00	55,75	5,79	10,39	10,39												
27	12.09.20	02:00	66,59	5,19	7,79	7,25												
28	12.09.20	06:00	68,29	3,14	4,60	3,33												
29	14.09.20	10:00	73,51	0,84	1,14	2,01	1	2	3	1	1							

30	14.09.20	14:00	68,85	0,85	1,23	0,01	1	3	3	1	1
31	14.09.20	18:00	78,69	1,76	2,24	1,95	2	2	1	2	1
32	14.09.20	22:00	65,42	4,06	6,21	4,46	3	1	3	2	1
33	15.09.20	06:00	68,33	1,03	1,50	1,64	2	3	3	1	2
34	15.09.20	10:00	93,54	0,36	0,39	0,23	2	1	1	3	3
35	15.09.20	14:00	77,80	2,36	3,04	2,46	2	2	1	2	2
36	15.09.20	18:00	77,39	1,74	2,25	2,36	2	2	2	1	1
37	15.09.20	22:00	80,09	1,51	1,89	1,79	1	2	1	2	1
38	16.09.20	02:00	79,53	1,47	1,85	1,64	1	3	2	1	1
39	16.09.20	06:00	85,57	1,06	1,24	0,78	1	2	2	2	1
40	16.09.20	10:00	84,97	0,97	1,14	1,23	2	1	3	1	1
41	16.09.20	14:00	79,67	1,55	1,95	1,97	2	2	2	2	2
42	16.09.20	18:00	69,50	2,24	3,23	2,73	2	3	3	3	2
43	16.09.20	22:00	79,51	2,19	2,76	2,31	1	1	1	3	3
44	17.09.20	02:00	73,62	0,92	1,25	1,38	1	2	2	1	1
45	17.09.20	06:00	70,77	0,90	1,27	1,26	1	2	3	1	1
46	17.09.20	10:00	96,24	0,09	0,09	0,04	1	1	3	3	3
47	17.09.20	14:00	90,55	0,30	0,33	0,25	1	1	3	2	1
48	17.09.20	18:00	80,01	2,63	3,29	2,53	1	3	1	1	1
49	17.09.20	22:00	73,89	2,58	3,50	3,55	1	3	2	1	1
50	18.09.20	02:00	88,32	0,70	0,79	1,04	2	2	3	2	3
51	18.09.20	06:00	82,88	1,38	1,66	2,91	2	2	2	2	2
52	21.09.20	10:00	81,90	2,73	3,33	3,09	1	1	2	1	1
53	21.09.20	14:00	82,80	2,87	3,47	3,37	1	1	3	1	1
54	21.09.20	18:00	77,38	1,61	2,08	1,94	1	1	1	1	1
55	21.09.20	22:00	72,71	2,31	3,18	2,68	3	2	3	1	1
56	22.09.20	02:00	84,41	0,82	0,97	0,83	1	1	1	2	1
57	22.09.20	06:00	91,86	0,89	0,97	0,68	1	1	3	1	1
58	22.09.20	10:00	79,38	1,70	2,14	2,71	2	2	3	2	1
59	22.09.20	14:00	66,44	4,46	6,71	6,06	1	1	2	1	1
60	22.09.20	18:00	86,44	0,92	1,06	1,15	1	1	1	1	1
61	22.09.20	22:00	86,58	1,55	1,79	1,27	1	1	2	2	1
62	23.09.20	02:00	73,62	3,60	4,89	4,32	1	2	2	2	1

63	23.09.20	06:00	95,78	0,36	0,37	0,86	1	2	1	3	3
64	23.09.20	14:00	88,59	1,57	1,77	1,25	2	2	2	2	2
65	23.09.20	18:00	87,74	0,73	0,83	1,43	2	1	1	2	2
66	23.09.20	22:00	83,93	0,41	0,49	0,94	2	2	1	2	2
67	24.09.20	02:00	90,56	0,22	0,24	0,27	1	2	1	2	1
68	24.09.20	06:00	94,03	0,02	0,02	-0,10	1	1	1	1	1
69	24.09.20	10:00	90,44	0,22	0,24	0,36	1	2	2	2	2
70	24.09.20	14:00	90,86	0,26	0,29	0,33	1	1	1	1	1
71	24.09.20	18:00	74,17	1,99	2,68	3,25	2	2	1	1	2
72	24.09.20	22:00	65,89	1,96	2,98	2,40	3	2	1	1	1
73	25.09.20	02:00	89,44	0,26	0,29	-0,02	2	1	2	2	1
74	25.09.20	06:00	78,43	0,68	0,87	1,40	1	2	1	2	2
75	28.09.20	02:00	81,32	2,09	2,57	3,22	2	1	3	2	2
76	28.09.20	06:00	80,62	2,04	2,53	2,10	2	1	1	2	3
77	28.09.20	10:00	78,42	2,39	3,05	1,44	2	2	2	2	3
78	28.09.20	14:00	62,58	4,57	7,31	6,59	2	1	1	1	1
79	28.09.20	18:00	63,02	6,66	10,57	9,32	1	1	1	1	2
80	28.09.20	22:00	61,07	6,57	10,76	6,72	1	2	2	3	2
81	29.09.20	02:00	70,91	2,78	3,92	4,74	2	1	1	2	2
82	29.09.20	06:00	71,01	2,34	3,30	4,42	1	1	2	1	1
83	29.09.20	10:00	78,03	0,98	1,26	1,33	1	2	1	2	1
84	29.09.20	14:00	76,97	1,52	1,97	2,47	1	2	2	3	2
85	29.09.20	22:00	68,09	3,57	5,25	6,36	2	2	1	2	2
86	30.09.20	02:00	65,41	3,38	5,17	5,04	2	2	3	2	3
87	30.09.20	06:00	58,18	5,07	8,71	8,53	1	2	3	2	3
88	30.09.20	10:00	93,43	0,85	0,91	0,04	1	1	2	3	3
89	30.09.20	14:00	77,93	3,40	4,36	4,43	2	1	1	2	3
90	30.09.20	18:00	65,54	4,88	7,45	8,38	2	2	1	2	2
91	30.09.20	22:00	84,78	1,88	2,21	2,02	1	3	2	1	1
92	01.10.20	02:00	82,02	2,05	2,49	2,36	1	2	3	1	1
93	01.10.20	06:00	85,52	1,82	2,13	2,13					
94	01.10.20	10:00	73,06	3,70	5,07	5,07	3	1	1	2	2
95	01.10.20	14:00	72,34	3,98	5,50	5,50	1	1	1	1	1

96	01.10.20	18:00	77,61	1,44	1,86	1,86	2	2	2	2	2							
97	01.10.20	22:00	84,92	1,08	1,27	1,27	1	1	1	2	3							
98	02.10.20	02:00	80,55	1,30	1,62	1,62	2	2	2	3	3							
99	02.10.20	06:00	83,06	0,90	1,09	1,09	1	1	1	3	3							
100	13.10.20	10:00	70,76	3,68	5,20	5,28	2	2	3			123,4	2,33	2,17	0,3	2,88	2,68	0,37
101	13.10.20	18:00	72,40	2,96	4,09	4,46	2	2	2									
102	13.10.20	22:00	70,75	2,58	3,65	2,78	2	2	1									
103	14.10.20	02:00	63,73	3,28	5,14	1,83	2	1	2			141,7	5,58	1,19	0,27	7,9	1,69	0,39
104	14.10.20	06:00	69,45	3,03	4,36	5,11	2	2	1									
105	14.10.20	10:00	89,41	0,88	0,98	0,64	1	1	3									
106	14.10.20	14:00	96,80	0,15	0,16	0,26	1	1	3									
107	14.10.20	18:00	81,45	1,33	1,63	1,52	2	3	1									
108	14.10.20	22:00	84,49	3,05	3,61	3,63	1	1	3									
109	15.10.20	02:00	70,55	3,16	4,48	4,38	2	3	2									
110	15.10.20	06:00	71,05	5,07	7,14	6,41	2	1	3			128,9	4,68	5,85	0,16	6,04	7,55	0,2
111	15.10.20	10:00	81,12	2,31	2,85	1,72	2	1	3									
112	15.10.20	14:00	84,46	3,25	3,85	3,19	2	1	3									
113	15.10.20	18:00	74,40	3,85	5,18	5,59	1	2	2			99,5	8,05	2,48	0,32	8,01	2,47	0,32
114	15.10.20	22:00	73,67	0,94	1,27	0,58	2	3	1			114,3	0,87	1,11	0,22	0,99	1,27	0,25
115	16.10.20	02:00	71,16	2,71	3,80	3,77	2	2	3									
116	16.10.20	06:00	70,06	2,08	2,97	2,56	2	2	3									
117	19.10.20	18:00	73,98	13,65	18,46	5,78	2	2	1			101,5	1,13	21,21	0,17	1,15	21,53	0,17
118	19.10.20	22:00	93,83	0,66	0,71	0,11	1	1	1									
119	20.10.20	02:00	87,46	1,01	1,16	1,30	2	2	2									
120	20.10.20	06:00	83,68	4,85	5,79	3,56	2	1	3			122,2	1,38	15,16	0,25	1,69	18,52	0,31
121	20.10.20	10:00	65,76	3,40	5,17	4,61	1	3	2			116	4,97	1,55	0,24	5,76	1,79	0,28
122	20.10.20	14:00	57,27	5,65	9,87	7,77	3	2	1			100,6	8,09	1,85	0,59	8,14	1,86	0,59
123	20.10.20	18:00	70,61	4,66	6,60	5,69	1	2	3			101,2	2,77	14,97	1,84	2,8	15,15	1,86
124	20.10.20	22:00	53,37	6,45	12,08	8,47	1	2	2			109,2	19,4	5,5	0,49	21,19	6,01	0,53
125	21.10.20	02:00	67,41	4,34	6,43	6,29	1	2	1			119,1	2,47	7,34	0,46	2,94	8,74	0,55
126	21.10.20	06:00	73,42	6,29	8,56	8,61	1	1	2			108,2	4,28	9,47	0,69	4,63	10,25	0,74
127	21.10.20	10:00	77,18	3,35	4,34	1,17	1	2	1									
128	21.10.20	12:00	74,54	7,15	9,60	5,75	1	3	1			114,8	6,92	9,53	0,43	7,95	10,94	0,5

129	21.10.20	14:00	68,04	2,56	3,76	7,97	3	2	1								
130	21.10.20	18:00	69,28	2,00	2,89	6,43	3	2	1								
131	21.10.20	22:00	81,99	0,80	0,97	3,91	2	2	2								
132	22.10.20	02:00	83,15	1,55	1,86	0,82	1	3	3								
133	22.10.20	06:00	91,46	0,57	0,62	2,39	1	1	3								
134	22.10.20	10:00	84,52	0,54	0,63	0,46	2	3	1								
135	22.10.20	14:00	97,41	0,12	0,12	0,22	1	1	3	107,9	0,4	0,61	0,12	0,43	0,66	0,13	
136	22.10.20	18:00	78,46	2,93	3,73	4,23	2	2	3								
137	22.10.20	22:00	68,72	4,82	7,02	8,35	2	2	3	126,6	5,73	2,76	0,92	7,26	3,49	1,16	
138	23.10.20	02:00	72,17	3,52	4,88	5,30	1	1	3	106,7	3,75	3,38	0,58	4	3,61	0,62	
139	23.10.20	06:00	67,94	5,40	7,94	7,13	3	2	3	106,9	5,77	4,06	0,64	6,17	4,34	0,58	
140	27.10.20	02:00	61,75	8,57	13,88	9,33	1	1	1	101,6	9,96	3,51	0,61	10,12	3,56	0,62	
141	27.10.20	05:00	69,50	5,57	8,01	8,04	1	2	1	115,9	6,4	4,94	0,87	7,42	5,73	1,01	
142	27.10.20	08:00	74,91	4,44	5,93	5,78	1	3	1	129,4	2,62	5,64	0,23	3,39	7,3	0,3	
143	27.10.20	14:00	79,56	1,44	1,81	2,35	2	2	1								
144	27.10.20	18:00	93,43	0,64	0,69	0,52	1	1	3	129,9	0,33	0,78	0,21	0,43	1,02	0,28	
145	27.10.20	22:00	61,56	5,15	8,36	8,02	3	2	2	116,9	6,72	2,85	0,23	7,85	3,33	0,27	
146	28.10.20	10:00	86,51	2,06	2,38	2,17	1	3	2								
147	28.10.20	18:00	65,86	5,07	7,69	8,17	2	2	2	100,3	7,96	5,7	1,37	7,99	5,72	1,37	
148	28.10.20	22:00	57,37	4,49	7,83	7,09	3	2	3	128	9,91	5,52	2,47	12,68	7,06	3,16	
149	29.10.20	02:00	79,87	2,26	2,83	2,41	2	2	2								
150	29.10.20	06:00	80,01	4,72	5,90	8,21	2	1	3	112,7	6,29	9,87	1,12	7,09	11,13	1,26	

Trocknungsversuch

Probennr. #	Datum	hh:mm	0	00:15	00:30	00:45	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	%Ts
		Uhrzeit	08:45	09:00	09:15	09:30	09:45	10:15	10:45	11:15	11:45	
	Zeit	T+EW	T+AW Ts									
4	08.09.20	02:00	33,99	31,62	29,99	28,41	27,74	27,18	27,16	27,16	27,16	77,41
10	09.09.20	02:00	35,62	32,79	31,71	30,73	30,45	30,41	30,40	30,39	30,39	83,56
11	09.09.20	06:00	46,91	43,02	41,16	39,46	38,57	37,50	37,43	37,42	37,42	78,18
12	09.09.20	10:00	55,74	50,93	48,69	46,46	45,48	44,47	44,42	44,41	44,41	78,06
13	09.09.20	14:00	54,79	49,86	47,93	46,67	46,18	45,97	45,95	45,95	45,94	82,58
14	09.09.20	18:00	63,65	58,53	55,80	53,92	53,09	52,34	52,27	52,25	52,24	81,02
15	09.09.20	22:00	43,63	39,17	37,64	36,38	35,88	35,65	35,64	35,64	35,64	79,80

Untersuchung der PAK Belastung

	Probe A		Probe N	
	µg/g	RSD %	µg/g	RSD %
Naphthalene	7,83	24,80	1,95	23,80
Acenaphthylene	3,15	26,40	0,35	15,60
Acenaphthene	3,40	20,90	0,57	9,10
Fluorene	4,67	23,80	0,20	0,00
Phenanthrene	15,53	30,90	1,97	11,40
Anthracene	4,38	36,30	0,60	18,30
Fluoranthene	10,95	38,90	1,58	19,70
Pyrene	6,98	38,50	1,02	20,10
Benzo[a]anthracene	2,70	56,80	0,85	6,40
Chrysene	4,25	57,20	1,05	5,20
Benzo[b]fluoranthene	1,52	55,30	0,60	18,30
Benzo[k]fluoranthene	-	-	-	-
Perylene	1,13	58,20	0,55	10,00
Benzo[a]pyrene	0,80	68,50	-	-
Benzo[e]pyrene	0,25	65,70	-	-
Ideno[1,2,3-cd]pyrene	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]anthracene	-	-	-	-
Benzo[ghi]perylene	-	-	-	-