



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit

Planung, Bau und Inbetriebnahme einer
Nassgranulationsanlage im
Technikumsmaßstab

Thomas Johannes Hafner, BSc

November 2019

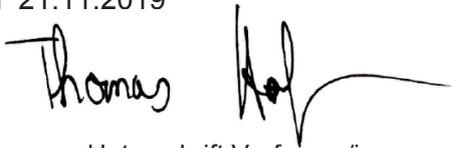
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 21.11.2019



Unterschrift Verfasser/in
Thomas Johannes, Hafner

Kurzfassung

Die Eisen- und Stahlindustrie sowie die Baustoffindustrie zählen zu den energieintensivsten Industriezweigen weltweit. Durch die Kopplung der Industrien, Schließung von Stoffkreisläufen und Recycling kann die Energie- und Ressourceneffizienz erhöht werden. Ein etabliertes Beispiel dazu ist die Herstellung von Hüttensand aus Hochofenschlacke, zur Verwendung als Zuschlagstoff in der Zementindustrie. Diesen Verwertungsweg gilt es, in Form einer Versuchsanlage, im Technikumsmaßstab nachzuempfinden. Ziel ist es, daraus Erkenntnisse einerseits für die Optimierung von Hüttensand und andererseits für die Eignung von alternativen Reststoffen als hydraulisch wirksame Zusatzstoffe zu gewinnen. Die im Zuge der Arbeit zusammengefassten Grundlagen zu Hüttensand in der Zementindustrie bilden die Basis für Auslegung, Planung und Bau der Nassgranulationsanlage. Die Anlage dient zur Herstellung von Nassgranulat unter Variation von Versuchsbedingungen und Einsatzstoffen. Das Granulationsprodukt wird anschließend auf ausgewählte Qualitätsmerkmale für den Einsatz in der Zementindustrie hin überprüft. Daraus sollen die relevanten Einflussgrößen auf die Hüttensandqualität charakterisiert und zukünftig der Einsatz alternativer Reststoffe mit einem zementtechnologischem Eignungsnachweis ermöglicht werden. Außerdem dient die Versuchsanlage zur Bereitstellung von Vergleichsmaterial für alternative Behandlungsverfahren und ermöglicht Schlackenmodifikation durch Zugabe von Zuschlagstoffen.

Abstract

The iron and steel industry and the building materials industry are among the most energy-intensive industries in the world. By linking industries, closing material cycles and recycling, energy and resource efficiency can be increased. An established example is the granulation of blast furnace slag for use as an additive in the cement industry. This route is simulated in form of a pilot plant. The aim is on the one hand to gain insight into the optimization of blast furnace slag and on the other hand to investigate the suitability of alternative residual materials as hydraulically effective additives. In the course of the work, the basics of granulated blast furnace slag in the cement industry will be summarized. They form the basis for the design, planning and construction of the wet granulation plant. Wet granulate under varying test conditions and input materials will be produced. It is then tested for specific quality characteristics for use in the cement industry. From this, the relevant influencing variables on the slag sand quality are to be characterized and the suitability of alternative residual materials is to be proven. In addition, the pilot plant will be used to provide reference material for alternative treatment processes and to enable slag modification by the addition of aggregate.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Allgemeine Formelzeichen	IV
Akronyme.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	2
3 Theoretische Grundlagen – Stand der Technik und Forschung	3
3.1 Zementarten	3
3.2 Zementherstellung.....	6
3.3 Schlackenenstehung – Stahlerzeugung.....	9
3.4 Abkühlungsverfahren für flüssige Hochofenschlacken	11
4 Hüttensand	15
4.1 Physikalische Eigenschaften	16
4.2 Chemische Eigenschaften	17
4.3 Zementtechnologische Eigenschaften	20
5 Planung, Bau und Inbetriebnahme.....	23
5.1 Ausgangslage.....	23
5.2 Einflussgrößen für die Dimensionierung der Versuchsanlage	27
5.3 Sicherheitstechnische Betrachtung.....	29
5.4 Versuchsanlagenbeschreibung.....	29
5.5 Bau der Anlage.....	34
5.6 Inbetriebnahme der Versuchsanlage	35
6 Versuchsplanung und -durchführung.....	37
6.1 Versuchsmaterial	37
6.2 Versuchsvorbereitung.....	38

6.3	Genereller Versuchsablauf	41
7	Versuchsdurchführung	43
7.1	WSG19_C01_V01	43
7.2	WSG19_C01_V02	44
7.3	WSG19_C02_V01	46
7.4	WSG19_C02_V02	48
7.5	WSG19_C02_V03	48
8	Auswertung	50
8.1	Temperaturerfassung	50
8.2	Materialanalysen.....	52
9	Ergebnisse und Diskussion.....	55
9.1	Erkenntnisse aus den Einzelversuchen	55
9.2	Temperaturerfassung	62
9.3	Materialanalysen.....	64
9.4	Optische Bewertung und Glasgehalt.....	70
10	Zusammenfassung und Ausblick	72
11	Literaturverzeichnis	74
Anhang.....		80
	I Verbessertes Düsenkonzept	80
	II Risikobeurteilung.....	82

Allgemeine Formelzeichen

°C	Grad Celsius
%	Prozent
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunden
t	Tonne
l	Liter
s	Sekunden
min	Minute
h	Stunde
w	Massenanteil
W	Watt
cm	Zentimeter
kHz	Kilohertz
m	Meter
A	Ampere
V	Volt
ΔT	Temperaturdifferenz
H _s	Schmelzenthalpie
ρ	Dichte
kJ	Kilojoule

Akronyme

TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
HÜS	Hüttensand
c_p	spezifische Wärmekapazität
IR-Kamera	Infrarot-Kamera
Ca(OH)_2	Kalziumhydroxid
CaSO_4	Kalziumsulfat
CaCO_3	Kalziumkarbonat
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CaS	Kalziumsulfid
H_2O	Wasser
O_2	Sauerstoffs
CaO	Kalziumoxid
H_2S	Schwefelwasserstoff
SO_2	Schwefeldioxid
MgO	Magnesiumoxid
Al_2O_3	Aluminiumoxid
SiO_2	Siliziumdioxid
MnO	Manganoxid
TiO_2	Titandioxid
S	Schwefel
MnO_2	Mangandioxid
WSG	wet slag Granulation
IHW	integriertes Hüttenwerk

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zementherstellung	6
Abbildung 3-2: Abhängigkeit der CO ₂ -Emissionen vom Hüttensandanteil nach Zementklasse.....	8
Abbildung 3-3: Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung	9
Abbildung 3-4: Erzeugung und Verwendung der Schlacke in Deutschland	10
Abbildung 3-5: Schlackengranulation mit Kaltkanal.....	11
Abbildung 3-6: Schlackengranulation im Granulationsbecken.....	12
Abbildung 3-7: Erzeugung und Verwendung der Schlacke in Deutschland	12
Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau einer Trockengranulationsanlage mit Drehteller..	13
Abbildung 4-1: Porengrößenverteilung von Portlandzement und Hochofenzement.....	20
Abbildung 4-2: Festigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt.....	21
Abbildung 4-3: Abhängigkeit der Hydratationswärmeentwicklung vom Hüttensandgehalt bei hüttensandreichen Zementen	22
Abbildung 5-1: Aufbau der Induktionsspule zum Erhitzen der Schlacke	24
Abbildung 5-2: InduMelt-Anlage mit Beschriftung der wichtigsten Komponenten	25
Abbildung 5-3: Schmelzaufbau aus Grafit.....	25
Abbildung 5-4: Erste Skizze der Versuchsanlage [49].....	26
Abbildung 5-5: Das Granulationsbecken (Sitzbadewanne).....	30
Abbildung 5-6: Umwälzpumpe (ELPUMPS (Typ: JPV 1500 B))	31
Abbildung 5-7: Strangregulierventil	31
Abbildung 5-8: Durchflussmessgerät	32
Abbildung 5-9: Temperatursensor (Thermoelement Typ-K))	32
Abbildung 5-10: IR-Kamera	32

Abbildung 5-11: Temperatursensor (Termoelement Typ-S)	33
Abbildung 5-12: Quotientenpyrometer	33
Abbildung 5-13: Auffangsieb für die granulierten Schlacke	33
Abbildung 5-14: Aufbau der Wasserkreislaufs mit Granulationsbecken	34
Abbildung 6-1: WSG19_001:Urprobe HS IHW 01	37
Abbildung 6-2: WSG19_004:Urprobe HS IHW 02	37
Abbildung 6-3: Ablaufdiagramm für das Zusammensetzen des Schmelzaufbaus	39
Abbildung 6-4: Querschnitt des Schmelzaufbaus mit Isolierungen	40
Abbildung 6-5: Isolierung der Schmelzaufbaus nach einem Versuch	41
Abbildung 7-1: Düsenkonzept WSG19_C01_V01	44
Abbildung 7-2: Düsenkonzept WSG19_C01_V02	45
Abbildung 7-3: Vereinfachtes Ringdüsenkonzept WSG19_C02_V01/V02/V03	46
Abbildung 7-4: Positionierung der Typ-S Thermoelemente im Schmelzaufbau	47
Abbildung 8-1: Temperaturlaufzeichnung WSG19_C01_V01 mit den unterschiedlichen Messmethoden	51
Abbildung 8-2: Temperaturlaufzeichnung WSG19_C01_V02 mit den unterschiedlichen Messmethoden	52
Abbildung 8-3: Siebrückstände WSG19_002	53
Abbildung 9-1: Rinne während des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V01	56
Abbildung 9-2: Rinne während des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V02	57
Abbildung 9-3: Rinne gegen Ende des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V02 ...	57
Abbildung 9-4: Düse während des Granulationsvorgangs von WSG19_C02_V01	58
Abbildung 9-5: Platzierung der zusätzlichen Thermoelemente zur Temperaturerfassung am Schmelzaufbau	60
Abbildung 9-6: Filtersieb beim Ausfluss	61
Abbildung 9-7: Boxplot-Diagramm: Temperaturmessungen von WSG19_C01_V01/V02	62
Abbildung 9-8: Korngrößenverteilung WSG19_01: Urprobe HÜS IHW 01	64
Abbildung 9-9: Korngrößenverteilung WSG19_004: Urprobe HÜS IHW 02	64

Abbildung 9-10: Korngrößenverteilung WSG19_002	65
Abbildung 9-11: Korngrößenverteilung WSG19_003	65
Abbildung 9-12: Korngrößenverteilung WSG19_006	65
Abbildung 9-13: Korngrößenverteilung WSG19_007	65
Abbildung 9-14: Sieblinie der untersuchten Hüttensande samt Spannweiten herkömmlicher Hüttensande [66].....	66
Abbildung 9-15: 7- und 28-Tage Druckfestigkeitswerte des Einheitszements und der Portlandhüttenzemente	68
Abbildung 9-16: 7- und 28-Tage Biegezugfestigkeitswerte des Einheitszements und der Portlandhüttenzemente	69
Abbildung 9-17: Nassgranulat WSG19_002.....	70
Abbildung 9-18: Nassgranulat WSG19_003.....	70
Abbildung 9-19: Nassgranulat WSG19_005.....	71
Abbildung 9-20: Nassgranulat WSG19_007.....	71
Abbildung A-1: Einzelteile des verbesserten Düsenkonzepts.....	80
Abbildung A-2: Verbessertes Düsenkonzept (zusammengesetzt).....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Normalzemente nach ÖNORM EN 197-1	4
Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile des Nassgranulationsverfahrens zur Herstellung von Hüttensand und weiterer Verwendung in der Zementindustrie.....	14
Tabelle 4-1: Veränderung der Betoneigenschaften durch Zugabe von Hüttensand.....	15
Tabelle 4-2: Physikalische Eigenschaften des Hüttensands.....	16
Tabelle 4-3: Tendenz der Beeinflussung der Hüttensandqualität durch verschiedene chemischer Bestandteile	17
Tabelle 4-4: Übersicht über die unterschiedlichen Kennzahlen bei Hüttensanden	18
Tabelle 4-5: Zusammensetzung der Hochofenschlacke	19
Tabelle 5-1: Granulationsparameter der umgeschmolzenen Hüttensande mit unterschiedlichem Glasgehalt als Zielgröße	27
Tabelle 5-2: Werte für die Berechnung der benötigten Wassermenge	28
Tabelle 5-3: Technische Daten ELPUMPS Gartenpumpe JPV 1500 B	30
Tabelle 5-4: Auslitern	36
Tabelle 7-1: Versuchsparameter WSG19_C01_V01	44
Tabelle 7-2: Versuchsparameter WSG19_C01_V02	45
Tabelle 7-3: Versuchsparameter WSG19_C02_V01	47
Tabelle 7-4: Versuchsparameter WSG19_C02_V02	48
Tabelle 7-5: Versuchsparameter WSG19_C02_V03	49
Tabelle 8-1: Maschenweiten für die Siebanalyse	53
Tabelle 9-1: Mögliche Ursachen für die hohe Porosität des Granulats von WSG19_C01_V01 und daraus folgende Verbesserungsvorschläge	56
Tabelle 9-2: Medianwerte der unterschiedlichen Messmethoden für WSG19_C01_V01/V02	63
Tabelle 9-3: Chemische Zusammensetzung der Proben.....	67

Tabelle 9-4: Kennzahlen des Hüttensands nach ÖNORM EN 197-1.....	67
Tabelle 9-9: Glasgehalt der unterschiedlichen Hüttensande	71
Tabelle A-0-1: Risikobeurteilung (1).....	82
Tabelle A-0-2: Risikobeurteilung (2).....	83

1 Einleitung

Weltweit fallen bei der Eisen- und Stahlherstellung mehr als 400 Millionen Tonnen [1] teilweise hochproblematische Schlacken an: Hochofen-, Konverter-, Elektroofen-, sekundärmetallurgische-, Pfannen-, und Sonderschlacken. Davon muss nach wie vor ein großer Teil umweltproblematisch und kostenintensiv entsorgt werden und wird so außerdem dem Wertstoffkreislauf entzogen. Das Ziel muss jedoch sein, diese Schlacken stofflich zu verwerten und energetisch zu nutzen.

Ein schon seit über 100 Jahren [2] angewandtes Verfahren, ist die Verwendung von Hochofenschlacke zur Herstellung von Hüttensand. Dieser wird zur Klinkersubstitution in Zementen eingesetzt. Dadurch wird Kohlenstoffdioxid eingespart, ansonsten deponierte Schlacken effektiv genutzt und somit die Umwelt geschont. Als Verfahren der Wahl hat sich die Nassgranulation etabliert. Eine energetische Nutzung der in der Schlacke enthaltenen Wärme ist damit jedoch aufgrund des entstehenden niedrigen Temperaturniveaus praktisch nicht realisierbar.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den technischen Hintergründen der Verwendung von Hüttensand. Weiters werden die Eigenschaften hüttensandhaltiger Zemente analysiert und verschiedene Verfahren der Granulation verglichen. Das Hauptaugenmerk der Arbeit besteht darin, eine Nassgranulationsanlage zu planen, zu bauen und in Betrieb zu nehmen. Anhand der Ergebnisse der Technikumsversuche soll der Stand der Technik weiter optimiert werden. Außerdem ist angedacht, andere Schlacken auf ihre Eignung zur weiteren stofflichen Verwertung zu untersuchen.

2 Aufgabenstellung

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Nassgranulationsanlage im Technikumsmaßstab.

Die detaillierte Aufgabenstellung ist dabei wie folgt gegliedert:

- Literaturrecherche zum Thema Behandlungsmöglichkeiten von Schlacke und ihre Verwertung in der Zementindustrie
 - Kurze Erklärung der technischen Hintergründe
 - Behandlungsmöglichkeiten der Schlacke mit Schwerpunkt Nassgranulation
 - Gesetzliche Rahmenbedingungen
 - Qualitätsmerkmale hüttensandhaltiger Zemente
- Planung und Bau einer Nassgranulationsanlage
 - Wichtige Parameter aus vergleichbaren Anlagen und der Literatur
 - Auswahl und Dimensionierung einzelner Anlagenkomponenten
 - Zusammenbau der Versuchsanlage
- Versuchsdurchführung
 - Funktionsprüfung der Anlage
 - Durchführung von Granulationsversuchen
 - Veränderung der Versuchs-Parameter und Untersuchung des entstandenen Granulats

Diese Arbeit ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Abschnitt wird eine Literaturstudie bezüglich der theoretischen Grundlagen durchgeführt. Der zweite, empirische Teil besteht aus Berechnungen zur Dimensionierung, sowie zum Bau der Anlage. Im dritten Teil wird der Versuchsablauf erklärt und die Ergebnisse der Inbetriebnahme analysiert.

3 Theoretische Grundlagen – Stand der Technik und Forschung

In diesem ersten Teil der Arbeit wird anhand einer Literaturrecherche der Einsatz von Hochofenschlacke in der Zementindustrie beschrieben. Dazu werden die gebräuchlichen Zementarten, ihre Bestandteile, Qualitätsmerkmale und wichtigsten Eigenschaften ebenso wie die Zementherstellung genauer beleuchtet. Außerdem wird auf die Entstehung von Schlacke im Hochofenprozess eingegangen und im Weiteren die Verfahren zur Hochofenschlackenbehandlung zu Hüttensand erläutert. Umweltaspekte werden ebenso aufgegriffen wie aktuelle Statistiken zur momentanen Verwertung.

3.1 Zementarten

In **Tabelle 3-1** sind die Normalzemente nach ÖNORM EN 197-1 [3] sowie ihre Zusammensetzung aufgelistet. Zusätzlich zum Klinker dürfen dem Zement unterschiedliche Mengen weiterer Materialien zugefügt werden. Auf der übernächsten Seite sind die möglichen Hauptbestandteile beschrieben. Außerdem ist in der ÖNORM EN 197-1 [3] geregelt, dass dem Zement bis zu fünf Prozent Nebenbestandteile beigemischt werden dürfen. Dabei kann es sich um fein zerkleinerte anorganische, mineralische Stoffe der Klinkerproduktion oder andere Hauptbestandteile handeln, welche die physikalischen Eigenschaften des Zements verbessern. Als Nebenbestandteile des Zements zugegebene Stoffe dürfen im Zement nicht als Hauptbestandteil enthalten sein. [3, 4]

Tabelle 3-1: Normalzemente nach ÖNORM EN 197-1 [3]

Zementart		Zusammensetzung (Massenanteile in % ^a)			
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile		
			Klinker	Sonstige	
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 – 100	-	0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 – 94	Hüttensand (S)	6 - 20
		CEM II/B-S	65 - 79	S	21 - 35
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	90 – 94	Silikastaub (D)	6 - 10
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	80 – 94	natürliches Puzzolan (P)	6 - 20
		CEM II/B-P	65 - 79		21 - 35
		CEM II/A-Q	80 – 94	natürlich getempertes Puzzolan (Q)	6 - 20
		CEM II/B-Q	65 - 79		21 - 35
	Portlandflugaschenzement	CEM II/A-V	80 – 94	kieselsäurereiche Flugasche (V)	6 - 20
		CEM II/B-V	65 - 79		21 - 35
		CEM II/A-W	80 – 94	kalkreiche Flugasche (W)	6 - 20
		CEM II/B-W	65 - 79		21 - 35
	Portlandschieferzement	CEM II/A-T	80 – 94	gebrannter Schiefer (T)	6 - 20
		CEM II/B-T	65 - 79		21 - 35
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80 – 94	Kalkstein (L)	6 - 20
		CEM II/B-L	65 - 79		21 - 35
		CEM II/A-LL	80 – 94	Kalkstein (LL)	6 - 20
		CEM II/B-LL	65 - 79		21 - 35
	Portlandkompositzement ^{b c}	CEM II/A-M	80 – 88	S, D, P,Q, V, W,	12 - 20
		CEM II/B-M	65 - 79	T, L, LL möglich	21 - 35
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35 - 64		36 - 65
		CEM III/B	20 - 34	S	66 – 80
		CEM III/C	9 - 19		81 - 95
CEM IV	Puzzolanzement ^{b c}	CEM IV/A	65 - 79	D, P, Q, V, W	11 – 35
		CEM IV/B	45 - 64		36 – 55
CEM V	Kompositzement ^c	CEM V/A	40 - 64	S	18 - 30
				P, Q,V	18 - 30
		CEM V/B	20 - 38	S	31 - 49
				P, Q,V	31 - 49

^a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.

^b Der Anteil an Silicastaub ist auf 10 % begrenzt.

^c In markierten Zementen müssen Hauptbestandteile (außer Klinker) durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden.

Hauptbestandteile des Zements

Portlandzementklinker

Bei Zementklinker handelt es sich hauptsächlich um Kalziumsilikate und Kalziumaluminat, die für die charakteristischen Eigenschaften des Zements beim hydraulischen Abbindeprozess wesentlich sind. Der Klinker wird durch einen Mahl- und Brennprozess aus Kalkstein oder Kreide und Ton hergestellt. [4, 5]

Hüttensand

Durch Behandlungsverfahren der flüssigen Schlacke nach dem Hochofenprozess, entsteht Hüttensand. Die Schlackenentstehung und unterschiedlichen Behandlungsarten werden in Kapitel 3.3 und 3.4 näher beschrieben. Bei rascher Abkühlung durch Wasser erstarrt die Schlacke überwiegend glasig. Es bildet sich ein latent hydraulischer Stoff, dessen Hydraulizität erst durch Zugabe eines Anregers, wie z. B. Kalziumhydroxid (Ca(OH)_2) oder Kalziumsulfat (CaSO_4) nutzbar ist. [4, 5]

Puzzolane

Puzzolane sind kieselensäure- und/oder tonerdehaltige Gesteine vulkanischen Ursprungs. Sie verfügen selbst über kein Erhärtungsvermögen. Deshalb wird zu ihrer Erhärtung Kalziumhydroxid benötigt, das durch den Klinker bereitgestellt wird. [4, 5]

Flugaschen

Bei Flugaschen handelt es sich um kieselensäure- oder kalkreiche staubartige Verbrennungsrückstände, die durch Elektrofilter der Abgasreinigung in Kohlekraftwerken abgeschieden werden. [4, 5]

Gebrannter Schiefer

Ölschiefer wird in der Zementherstellung teils als Energieträger eingesetzt, oder nach dem Erhitzen auf 800 °C in einer Wirbelschicht verwendet. Der gebrannte Schiefer verfügt über hydraulische, ebenso wie puzzolanische Eigenschaften. [4, 5]

Kalkstein

Der Kalkstein wird gemahlen und führt, durch eine breitere Korngrößenverteilung, zu einer Verbesserung der Zementeigenschaften, die sich durch bessere Verarbeitungseigenschaften und ein gesteigertes Hohlraumfüllvermögen zeigt. [4, 5]

Silikastaub

Silikastaub besteht zu einem großen Anteil aus feinem, amorphem Siliziumdioxid. Er fällt in Filteranlagen bei der Herstellung von Silizium oder Siliziumlegierungen an. [4, 5]

3.2 Zementherstellung

In **Abbildung 3-1** ist die Prozesskette der Zementherstellung vom Steinbruch bis zum verarbeitungsfertigen Zement schematisch dargestellt. Im Weiteren werden die einzelnen Schritte erläutert sowie die eingesetzten Rohstoffe, verwendeten Maschinen und Verfahren beschrieben.

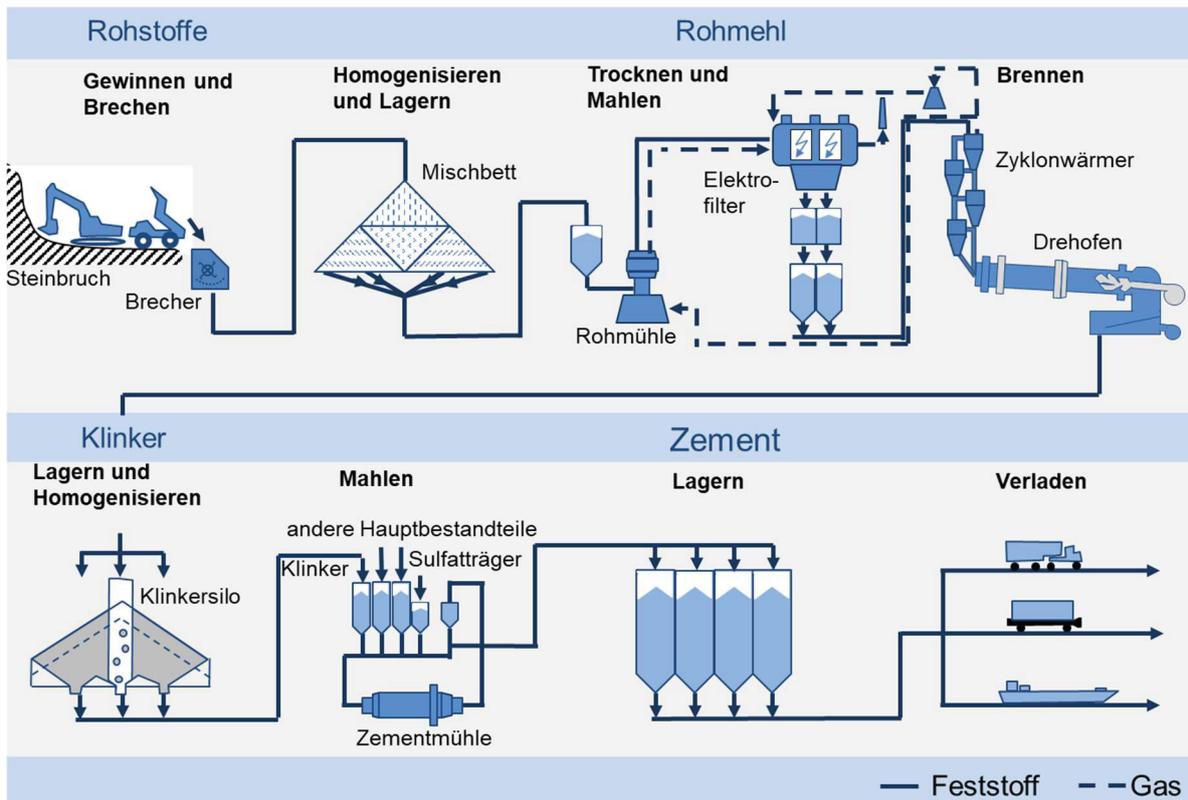


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zementherstellung nach [6]

Gewinnen und Brechen

Die für die Zementherstellung benötigten Rohstoffe werden hauptsächlich durch Sprengungen in Steinbrüchen abgebaut. Dabei handelt es sich um Kalkstein, chemisch Kalziumkarbonat (CaCO_3), Ton oder Mergel, ein Gemisch aus Ton und Kalk. Das Verhältnis von Kalkstein zu Ton bzw. Mergel beträgt dabei ungefähr zwei zu eins. Das ebenfalls enthaltene Eisenoxid gibt dem Zement seine charakteristische, graue Farbe. Mithilfe von Baggern und Schwerlastwägen wird das stückige Gestein zu Hammerbrechern befördert. Diese zerkleinern das Gestein zu Schotter mit einem Durchmesser von rund 30 mm. [4, 5, 7]

Homogenisieren und Lagern

Um die Gleichmäßigkeit des verwendeten Rohmaterials zu gewährleisten, wird der Schotter auf einem Mischbett zwischengelagert. Auf diesen rechteckigen oder kreisförmigen Halden wird der Schotter schichtweise aufgetragen. Die Homogenisierung und somit Sicherstellung einer gleichbleibenden Zusammensetzung wird durch das Abtragen quer zu den Schichten erreicht. [4, 5]

Trocknen und Mahlen

Nach der Entnahme aus dem Mischbett wird der Schotter in die Mahltrocknungsanlage gebracht. Dabei wird er mit der Abwärme des Drehrohrofens getrocknet und gleichzeitig mit Rohr- oder Wälzmühlen zu Rohmehl feingemahlen. Die Abluft wird mithilfe von Elektrofiltern entstaubt. [4, 5, 7]

Brennen

Heutzutage wird Zementklinker hauptsächlich mittels Trockenverfahren hergestellt. Der Vorgang des Brennens erfolgt zweistufig mit der Entsäuerung und dem darauf folgenden Sintern. Bei der Entsäuerung wird aus dem Kalkstein durch Erhitzen auf über 800 °C Kohlenstoffdioxid (CO₂) ausgetrieben. Dazu wird das Rohmehl in vier bis sechs Zyklonvorwärmstufen im Gegenstrom mit den Abgasen des Ofens aufgeheizt. Der Sintervorgang des Materials erfolgt im Drehrohrofen bei Temperaturen um 1450 °C, wobei das Material durch die Drehbewegung eine kugelige Form bis drei Zentimeter Durchmesser annimmt. Nachgeschaltet befindet sich ein Kühler, der den Klinker zum Erhalten der hydraulischen Eigenschaften rasch abkühlt. [4, 5, 7]

Mahlen

Nach einem weiteren Zwischenlagerungsschritt wird der Klinker gemeinsam mit den möglichen weiteren Haupt- und Nebenbestandteilen, wie beispielsweise Hüttensand, abhängig von der gewünschten Zementsorte und den gewünschten Eigenschaften, welche in Kapitel 3.1 beschrieben sind, fein gemahlen. Dazu werden in der Regel Kugel- oder Walzmühlen eingesetzt. [4, 5, 7]

Lagern und Versand

Da Zement schnell Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt und dadurch erhärtet, ist eine Feuchtigkeitsaufnahme möglichst zu verhindern. Deshalb wird Zement trocken in Silos gelagert. [4, 5]

Umweltaspekte – Zementherstellung

Zement ist einer der meistverwendeten Baustoffe weltweit. Der Bedarf an Zement ist nach wie vor, vor allem durch den steigenden Verbrauch von Indien und China, im Steigen begriffen. Bei der Herstellung von Zement werden jedoch große Mengen an klimaschädlichem CO₂ freigesetzt. Je nach Studie liegt der Anteil des weltweiten Kohlenstoffdioxidausstoßes durch die Zementindustrie bei fünf bis acht % [8–10]. Zur Einhaltung der Klimaziele sind CO₂-Einsparungsmaßnahmen auch in der Zementindustrie unumgänglich.

Durch die Verwendung von Alternativen, wie beispielsweise Hüttensand, neben dem hauptsächlich eingesetzten Klinker, können die spezifischen CO₂-Emissionen signifikant verringert werden. Der Hüttensand, welcher ein Nebenprodukt der Eisen- und Stahlindustrie darstellt, darf je nach Zementklasse in unterschiedlichem Ausmaß beigemischt werden und ersetzt dabei den Klinker, siehe **Tabelle 3-1**. Den größten Anteil an hüttensandhaltigen Zementen haben dabei CEM II – Portlandhüttenzement und CEM III – Hochofenzement.

In **Abbildung 3-2** sind die spezifischen CO₂-Emissionen pro Tonne Zement gegen den Hüttensandanteil in Prozent aufgetragen. Abhängig von der Zementklasse und dem damit verbundenen zulässigen Anteil an Hüttensand, sinkt der spezifische CO₂-Ausstoß linear. Bei einem Hüttensandgehalt von 50 % im Zement können somit rund 45 % an Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Vergleich zur alleinigen Verwendung von Klinker eingespart werden.

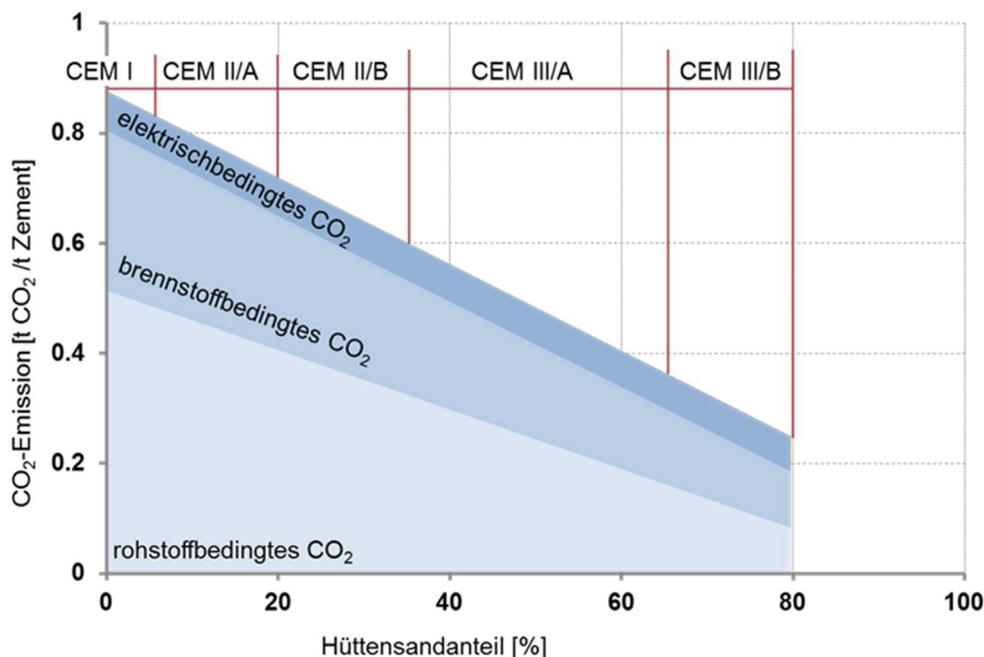


Abbildung 3-2: Abhängigkeit der CO₂-Emissionen vom Hüttensandanteil nach Zementklasse [11]

3.3 Schlackentstehung – Stahlerzeugung

In der Eisen- und Stahlindustrie gibt es zwei wesentliche Verfahrensrouten zur Stahlherstellung. Dabei handelt es sich einerseits um die Hochofenroute mit anschließendem Konverter, welche in **Abbildung 3-3** auf der linken Seite dargestellt ist. Hier wird bei Temperaturen bis 2200 °C das Roheisen aus Erzen, Koks und Zuschlägen erzeugt. Im Hochofenprozess fallen pro Tonne Roheisen 200 – 300 kg Hochofenschlacke an. Diese setzt sich aus der Gangart und Zuschlägen zusammen. Beim Abstich kann die Schlacke anhand des Dichteunterschieds vom Roheisen getrennt werden. [12]

Es folgt der Konverterprozess, in dem es durch das Einblasen von Sauerstoff zur Entkohlung sowie zur Verschlackung der Roheisenbegleitelemente kommt, und so weiterverarbeitbarer Stahl entsteht. Die anfallenden Konverterschlacken dienen hauptsächlich der Aufnahme und dem Abbinden von Silizium und Phosphor. [12, 13]

Bei der Elektroofenroute, welche in **Abbildung 3-3** auf der rechten Seite beschrieben ist, wird Schrott oder direktreduzierter Eisenschwamm eingeschmolzen. Dabei entsteht Elektrolichtbogenofenschlacke, die in ihrer Zusammensetzung der Konverterschlacke ähnelt. [12, 13]

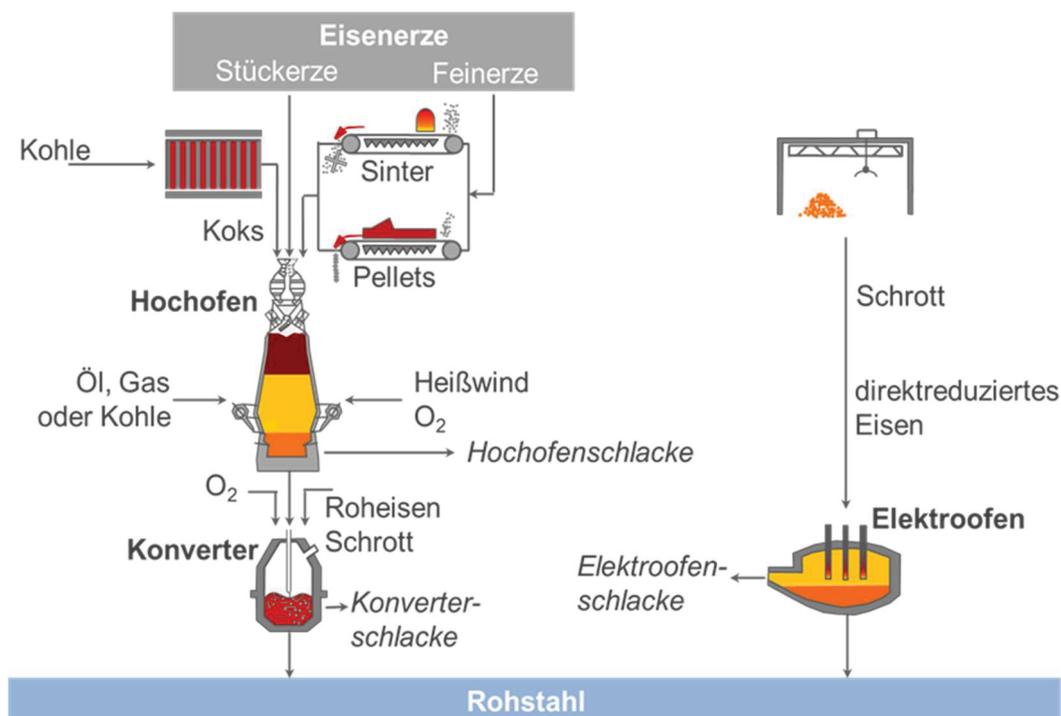


Abbildung 3-3: Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung nach [14]

Schlackennutzung

Zur Ressourcenschonung und aus Energieeffizienzgründen ist es unvermeidbar, die Nebenprodukte der Stahlerzeugung bestmöglich zu nützen. In Deutschland wird, wie in **Abbildung 3-4** zu sehen, nur noch ein Bruchteil der anfallenden Schlacke deponiert. Der Großteil der Schlacke findet dabei in der Bauindustrie, als Baustoff oder Hüttensand für Zement, Verwendung. Weiters wird ein kleiner Teil intern recycelt und ein geringer Prozentsatz fließt, aufgrund des hohen Phosphatgehalts, in die Herstellung von Düngemitteln. [14]

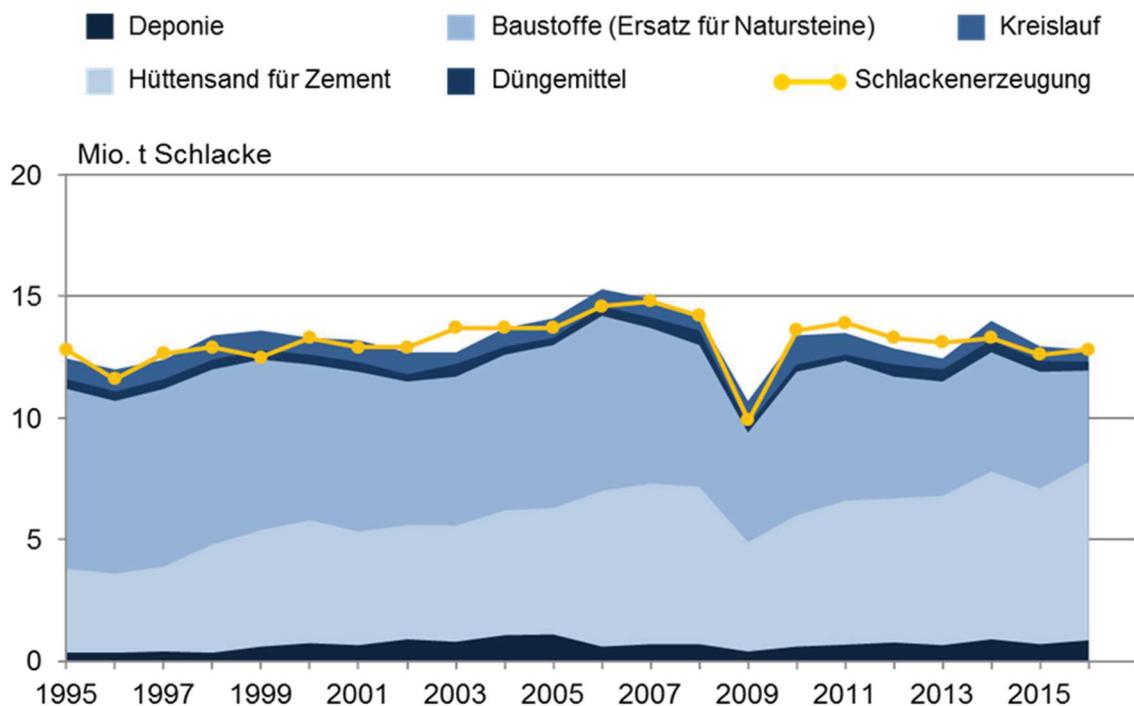


Abbildung 3-4: Erzeugung und Verwendung der Schlacke in Deutschland nach [14]

Der größte Anteil der Schlacken entfällt auf Hochofenschlacken. Beim Abkühlen erstarren diese, je nach Bedingungen nach dem Abstich, entweder als glasiger Hüttensand oder als kristalline Hochofenstückschlacke. Stückschlacke wird als Baustoff für Verfüllungen und Unterbauungen verwendet. Der glasige Hüttensand wird als Klinkerersatz in der Zementindustrie verwendet. [13]

In dieser Arbeit wird in weiterer Folge der Fokus auf die Abkühlverfahren von Hochofenschlacke und die weitere Verarbeitung zu Hüttensand gelegt.

3.4 Abkühlungsverfahren für flüssige Hochofenschlacken

Nassgranulation – Stand der Technik

Nassgranulationsanlagen zur Herstellung des glasig erstarrten, feinkörnigen Hüttensands bestehen im Allgemeinen aus einer Granulier- und einer Entwässerungseinheit. Die Qualität des Produktes bezüglich Korngrößenverteilung sowie Glasgehalt ist unter anderem von der chemischen Zusammensetzung, der Schlackentemperatur, sowie der Anlagenkonfiguration abhängig. Die Entwässerung beeinflusst die Restfeuchte und die Reinheit des Abwassers. [15] Für einen Großteil der anfallenden Schlacke wird das INBA[®]-Verfahren eingesetzt. Das Verfahren kann mit heißem oder kaltem Wasser durchgeführt werden. Bei ersterem erfolgt die Kühlung des Granulationswassers hauptsächlich durch Verdampfung. Zusätzlich wird kaltes Wasser zum Ausgleichen der Feuchtigkeitsverluste hinzugegeben. Beim Kaltwasserkreislauf wird ein Kühlturm eingesetzt um die Temperatur des Wassers konstant zu halten. [16]

Weiters unterscheiden sich im Wesentlichen zwei Anlagenkonfigurationen, die Nassgranulation mit Kaltkanal und jene mit Granulationsbecken. Erstere ist in **Abbildung 3-5** dargestellt. Der Kaltkanal ist als Verlängerung der heißen Rinne, auf der die Schlacke vom Hochofen kommt, angebracht. Die integrierten Spritzköpfe befinden sich direkt unter dem Ende des Heißkanals. Durch die Wasserstrahlen wird das Wasser/Schlacke-Gemisch in den Aufnahmetrichter befördert. Der Granulationsprozess beginnt, sobald die Schlacke mit dem Wasser in Berührung kommt. Es bilden sich zuerst Lamellen sowie Fäden und in weiterer Folge Tröpfchen. Der Großteil des Granulationsprozesses erfolgt erst beim Auftreffen auf die Wand des Aufnahmetrichters. Die Aufgabe des Wassers beinhaltet in diesem Fall somit neben der Granulation auch das Kühlen der Trichterwand. [16]

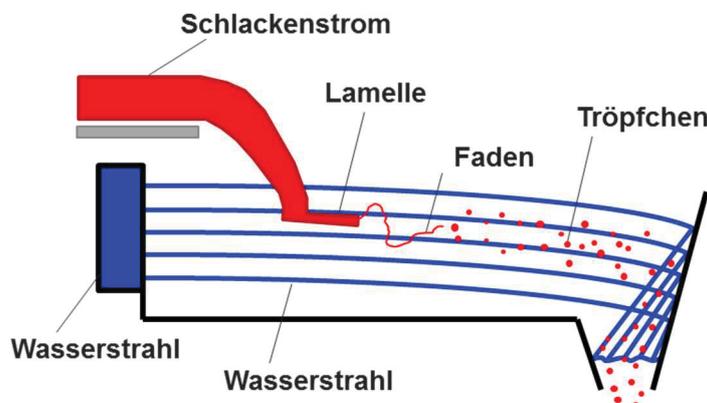


Abbildung 3-5: Schlackengranulation mit Kaltkanal nach [16]

Die zweite Möglichkeit ist in **Abbildung 3-6** gezeigt. Das Granulationsbecken stellt zusätzliches Wasser zum zirkulierten Wasser für die Wärmeabfuhr zu Verfügung. Das, je nach Anwendungsfall dimensionierte, Becken ist, bis zu einer definierten Höhe, mit Wasser gefüllt. Die flüssige Schlacke wird von den Wasserstrahlen mitgerissen, zerteilt und unter Wasser gedrückt. Durch das Auftreffen des Wasser/Schlacke-Gemisches werden im Bad Turbulenzen erzeugt, wodurch die Granulation im Vergleich zur ersten Konfiguration wesentlich schneller erfolgt. Außerdem kann die Kreislaufpumpe, ohne Qualitätseinbußen, wesentlich kleiner dimensioniert werden. [16]

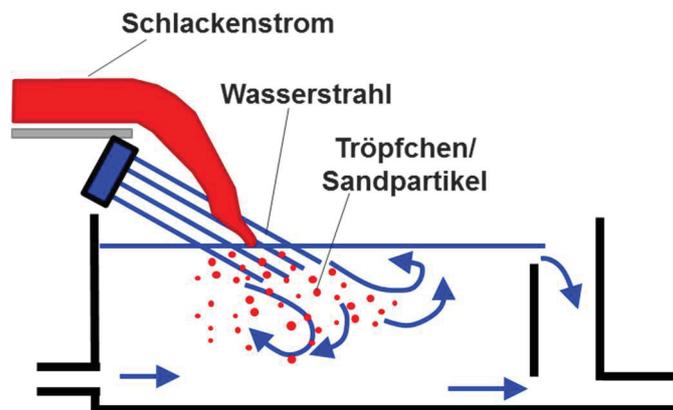


Abbildung 3-6: Schlackengranulation im Granulationsbecken nach [16]

In **Abbildung 3-7** ist der gesamte Verfahrensablauf vom Hochofen bis zur granulierten Schlacke, die in der Zementherstellung als Hauptzutmahlstoff beigefügt werden kann, schematisch aufgezeichnet.

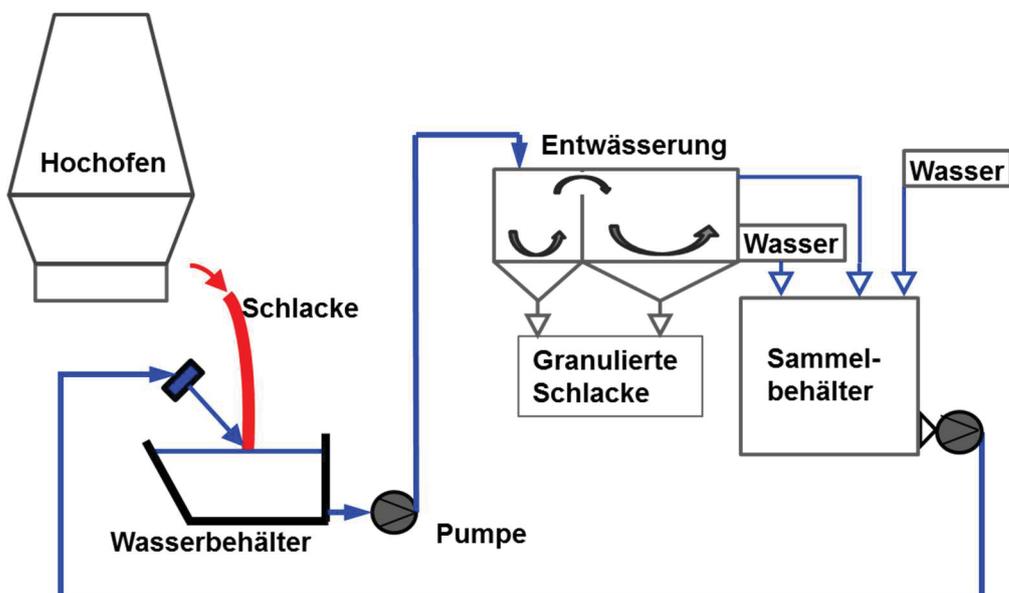


Abbildung 3-7: Erzeugung und Verwendung der Schlacke in Deutschland nach [17]

Trockengranulation – Stand der Forschung

Derzeit wird viel Forschungsaufwand in Richtung einer trockenen Schlackengranulation betrieben. Dabei fließt der Schlackenstrom, wie in **Abbildung 3-8** zu erkennen, auf einen Drehteller (Rotationszerstäuber, „Rotating Cup“-Verfahren) und wird dabei in kleine Tröpfchen zerrissen. Die Partikel werden luftgekühlt, wodurch, im Gegensatz zur Nassgranulation, ein brauchbares Temperaturniveau erreicht wird und die Wärmeenergie der Schlacke verwendet werden kann. [18, 19]

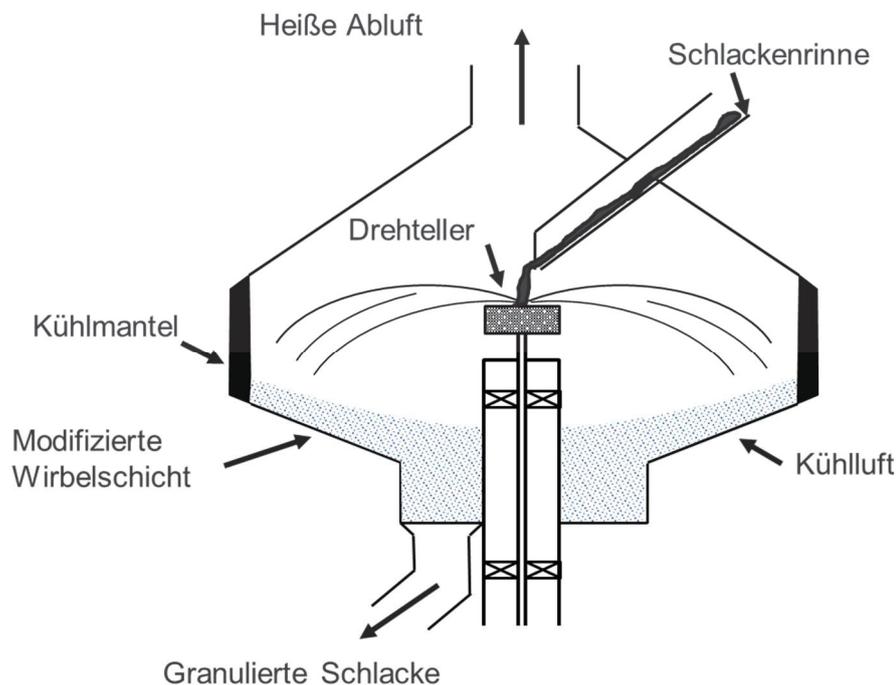


Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau einer Trockengranulationsanlage mit Drehteller nach [20]

Eine Herausforderung liegt darin, eine ausreichende Abkühlung und somit glasige Erstarrung der Schlackentröpfchen zu gewährleisten. Insbesondere durch die geringe Wärmekapazität der Luft gegenüber Wasser ergibt sich daraus ein wesentlicher Nachteil gegenüber der Nassgranulation. Deshalb treffen die Tröpfchen je nach Konfiguration auf wassergekühlte Wände. Mit dem heißen Abluftstrom, welcher Temperaturen bis rund 600 °C erreicht, kann über einen Wärmeübertrager beispielsweise Dampf erzeugt werden.

Viele Wissenschaftler sehen ein großes Potential in der alternativen Abkühlung von Hochofenschlacke. So gibt es schon einige derartige Versuchsanlagen. Dennoch hat sich die Trockengranulation im industriellen Maßstab noch nicht durchgesetzt. [17, 18, 20, 21]

Vor- und Nachteile der Nassgranulation

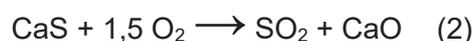
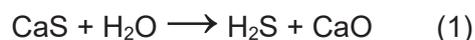
In **Tabelle 3-2** sind die Vor- und Nachteile des Nassgranulationsverfahrens aufgezählt und zusammengefasst. In folgender Liste überschneiden sich genannten Vorteile teilweise mit jenen der Trockengranulation.

Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile des Nassgranulationsverfahrens zur Herstellung von Hüttensand und weiterer Verwendung in der Zementindustrie

Vorteil	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ○ Ressourcenschonung durch Verwendung von Hüttensand statt Klinker [22] ○ Weniger Deponievolumen durch Verwertung in Zementindustrie [15] ○ Schnelle Abkühlung → hoher glasiger Anteil [22] ○ CO₂ Einsparung in der Zementindustrie [24] 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Energieintensive Entwässerung bzw. Trocknung vonnöten (~ 132 kWh/t bei 10 % Restfeuchte) [18, 23] ○ Schwefelwasserstoff- und Schwefeldioxidemissionen [13, 15, 16] ○ Hoher Wasserverbrauch [13] ○ Abwasseraufbereitung erforderlich [23]

Die Schwefelemissionen entstehen bei hohen Temperaturen, beim Kontakt der heißen Schlacke mit dem Wasser. Schwefel kommt in der Schlacke vorwiegend als Kalziumsulfid (CaS) vor. Beim Kontakt mit Wasser (H₂O) oder Luftsauerstoff (O₂) entstehen neben Kalziumoxid (CaO), Schwefelwasserstoff (H₂S) oder Schwefeldioxid (SO₂) und in weiterer Folge Schwefelsäure. [13, 16]

Maßgeblich sind folgende Reaktionen:



Die Emissionen treten direkt bei der Granulation auf, werden mit dem entstehenden Wasserdampf ausgetragen und sind je nach Verfahren unterschiedlich hoch. So sind die Emissionen beim heißen Verfahren, aufgrund der erhöhten Löslichkeit, größer. Mittlerweile sind Systeme mit Kondensationsturm verfügbar, wodurch die Schwefelemissionen auf ein Minimum gesenkt werden können. [16]

4 Hüttensand

Im folgenden Kapitel sind die Eigenschaften des Hüttensands und hüttensandhaltiger Zemente zusammengefasst. Die Zusammensetzung des Hüttensands entspricht der von Hochofenschlacke und ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

Der Einsatz des Hüttensands anstelle des Portlandzementklinkers und die damit verbundene Änderung der Zusammensetzung des Zements führen zu veränderten Eigenschaften. In **Tabelle 4-1** ist die Veränderung der Betoneigenschaften durch den Einsatz von Hüttensand dargestellt. Mit zunehmendem Hüttensandgehalt verstärken sich die genannten Vor- und Nachteile. Auf den darauffolgenden Seiten sind die einzelnen Vor- und Nachteile weiter ausgeführt.

Tabelle 4-1: Veränderung der Betoneigenschaften durch Zugabe von Hüttensand [2, 22]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">○ hellere Farbe	<ul style="list-style-type: none">○ geringere Anfangsfestigkeit
<ul style="list-style-type: none">○ größere Nacherhärtung	<ul style="list-style-type: none">○ langsamere Erhärtung
<ul style="list-style-type: none">○ längere Verarbeitbarkeit	<ul style="list-style-type: none">○ zunehmende Nachbehandlungsempfindlichkeit
<ul style="list-style-type: none">○ niedrigere Wärmeentwicklung	
<ul style="list-style-type: none">○ dichteres Gefüge	
<ul style="list-style-type: none">○ höherer chemischer Widerstand	

4.1 Physikalische Eigenschaften

In **Tabelle 4-2** sind einige wichtige physikalischen Eigenschaften des Hüttensandes aufgelistet. Die Feinheit, oder spezifische Oberfläche, des Hüttensands sollte höher, als die des Zements sein, um eine gute Leistungsfähigkeit des Betons zu gewährleisten. [25] Ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal ist der glasige Anteil. Dieser wird durch die rasche Abkühlung unter die Transformationstemperatur von 840 °C [26] erreicht. Neben der chemischen Zusammensetzung ist der glasige Anteil wesentlich für die latent hydraulischen Eigenschaften des Hüttensands verantwortlich. Einige Arbeiten legen jedoch nahe, dass sich ein geringer kristalliner Anteil keineswegs negativ auf die Festigkeitsentwicklung hüttensandhaltiger Zemente auswirkt. In Demoulian et al. [27] sind Ergebnisse dargestellt, die für Hochofenzemente mit 5 – 7 % kristallinem Anteil die höchste Festigkeit ausweisen. [27–30] Laut ÖNORM EN 197-1 [3] muss der Hüttensand aus mindestens zwei Drittel glasig erstarrter Schlacke bestehen.

Tabelle 4-2: Physikalische Eigenschaften des Hüttensands [31, 32]

Eigenschaft	Einheit	Wert
Spezifische Oberfläche	[m ² /kg]	> 350
relative Dichte	$\left[\frac{\text{kg}_{\text{SCHLACKE}}/\text{m}^3_{\text{SCHLACKE}}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}(4^\circ\text{C})/\text{m}^3_{\text{H}_2\text{O}}(4^\circ\text{C})} \right]$	2.9
Schüttdichte	[kg/m ³]	~ 1200
Glasgehalt	%	> 90

Dichte

Die Dichte, welche meist entweder als relative Dichte im Vergleich zu Wasser oder als Schüttdichte angegeben wird, und die Partikelgröße des Hüttensands sind wesentlich von den Granulationsbedingungen abhängig. Einfluss haben dabei die Schlackentemperatur, das Wasser/Schlacke–Verhältnis, sowie die Geschwindigkeit und Temperatur des Kühlwasserstroms. [33]

Farbe

Durch Reaktion von im Hüttensand enthaltenen Sulfiden mit Wasser, entstehen unter Luftabschluss grünlich-blaue Metallsulfite. Diese Färbung ist oftmals an frisch geschalteten

Betonoberflächen erkennbar. Durch den Kontakt mit Sauerstoff werden die Sulfite zu farblosen Verbindungen oxidiert. Teilweise werden bei Rückbauarbeiten auch nach Jahren noch blaue Stellen im Inneren von Hochofenzementen entdeckt. Dies zeugt von der an Kapillaren armen, sowie dichten Gefügestruktur dieser Zemente. [2]

Nach wenigen Tagen kommt das für hüttensandhaltige Zemente charakteristische helle Grau meist wieder vollständig zum Vorschein. Das Grau des Zements entsteht durch die in unterschiedlichen Mengen vorhandenen Eisenoxide. Da im Hüttensand aufgrund der Hochofenroute wenige Eisenoxide enthalten sind, sind Portlandhüttenzement und Hochofenzement mit steigendem Hüttensandgehalt heller als herkömmlicher Portlandzement. Aus diesem Grund werden sie für Sichtbeton eingesetzt und die Anforderungen bezüglich Pigmentzusätzen für Farbbeton sind niedriger. [2, 4, 25, 31]

4.2 Chemische Eigenschaften

Der Einfluss der Gehalte einzelner Verbindungen auf die Qualität des Hüttensands ist komplex. Anhand von Versuchen konnte für die einzelnen chemischen Bestandteile ein ungefährender Trend ausgearbeitet werden. Dieser ist in **Tabelle 4-3** aufgelistet.

Tabelle 4-3: Tendenz der Beeinflussung der Hüttensandqualität durch verschiedene chemischer Bestandteile [36, 39, 40]

Bestandteil	w(x) [%]	Wirkung auf die Qualität des Hüttensandes als Zementbestandteil
CaO		positiv
MgO	< 12 > 12	positiv negativ
Al ₂ O ₃		positiv
SiO ₂		negativ
Alkalien		positiv
MnO	< 1,4 > 1,4	ohne Wirkung negativ
TiO ₂	< 1 > 1	ohne Wirkung negativ

Über die positiven Auswirkungen von CaO, MgO (bis $w_i < 12$ %) und Alkalien, sowie die negativen Effekte größerer Mengen SiO₂, TiO₂ und MnO auf die Reaktivität des Hüttensands

gibt es zahlreiche Arbeiten. [34–37] Für Al_2O_3 wird Großteils von positiven [34, 36, 38] oder neutralen [35] Auswirkungen geschrieben, welche jedoch von der Art des eingesetzten Anregers beeinflusst wird. Aus den Beeinflussungen der unterschiedlichen chemischen Komponenten sind über die Jahre Kennzahlen entstanden, die die Eigenschaften des Hüttensands beschreiben. In **Tabelle 4-4** sind einige dieser Kriterien und ihre Anforderungen chronologisch aufgelistet. Die Werte allein ergeben jedoch keine ausreichende Aussage, da die Granulationsparameter genauso einen wesentlichen Beitrag leisten. [35, 38]

Tabelle 4-4: Übersicht über die unterschiedlichen Kennzahlen bei Hüttensanden [36, 39, 40]

Vorschlag/Kriterium	Jahr	Kriterium	Anforderung
„Einfache“ Basizität	1886	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	> 1
Norm für Eisenportlandzement	1909	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	≥ 1
Norm für Hochofenzement	1917	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3}\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_3}$	> 1
DIN 1164	1932	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3}\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_3}$	≥ 1
bei Hochofenzement:		w(MnO)	$\leq 5\%$
DIN 1164	1942	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	≥ 1
F-Wert nach Keil	1942	$\frac{\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2}\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$	> 1,5
F-Wert nach Sopora	1959	$\frac{\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2}\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}_2}$	> 1,5
Basizität nach Schwiete	1963	$\frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 10}{\text{SiO}_2 + 10}$	-
DIN 1164	1994	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$	> 1
DIN EN 197-1	2001		
prEN 15167	2006	w(CaO + MgO + SiO ₂)	> 2/3

Schlackenzusammensetzung

Die Hauptbestandteile der Hochofenschlacke sind Kalziumoxid (CaO), Siliziumdioxid (SiO₂), sowie Magnesiumoxid (MgO) und Aluminiumoxid (Al₂O₃). Weiters sind Mangandioxid, Eisen und Schwefel enthalten. In kleinen Mengen befinden sich weitere Elemente wie beispielsweise Phosphor oder Titan in der Schlacke. Die Variationsbreiten der wesentlichen Bestandteile sind **Tabelle 4-5** zu entnehmen. Bei den angegebenen Bandbreiten handelt es sich um Richtwerte.

Tabelle 4-5: Zusammensetzung der Hochofenschlacke [13, 41–43]

Element/Verbindung	Einheit	Variationsbreite
CaO	[%]	36 – 43
SiO ₂	[%]	34 – 40
MgO	[%]	04 – 16
Al ₂ O ₃	[%]	08 – 12
S	[%]	< 1,9
MnO ₂	[%]	< 1,3
Fe _{ges}	[%]	< 0,7

Nach ÖNORM EN 197-1 [3] gelten für granuliert Hochofenschlacke folgende Qualitätskriterien: *„Hüttensand [...] enthält nach Massenanteilen mindestens zwei Drittel glasig erstarrte Schlacke und weist bei geeigneter Anregung hydraulische Eigenschaften auf. Hüttensand muss nach Massenanteilen zu mindestens zwei Dritteln aus Calciumoxid (CaO), Magnesiumoxid (MgO) und Siliziumdioxid (SiO₂) bestehen. Der Rest enthält Aluminiumoxid (Al₂O₃) und geringe Anteile anderer Verbindungen. Das Massenverhältnis (CaO + MgO)/(SiO₂) muss größer als 1,0 sein.“* [3]

Die in **Tabelle 4-5** aufgelistete Bandbreite der Zusammensetzung von Hochofenschlacken genügt in der Regel den Anforderungen der ÖNORM. Die Zusammensetzung muss vor dem Anwendungsfall überprüft werden. Der Anteil der glasig erstarrten Schlacke kann durch die Abkühlungsbedingungen, beziehungsweise das gewählte Verfahren bei der Granulation festgelegt und wurde in Kapitel 3.4 näher behandelt.

4.3 Zementtechnologische Eigenschaften

Porengröße

In **Abbildung 4-1** ist die Porengrößenverteilung von Hochofenzementstein, mit 50 % Hüttensand, im Vergleich mit Portlandzementstein dargestellt. Sowohl Hochofen- als auch Portlandzementstein verfügen über eine annähernd gleiche Gesamtporosität, wobei ersterer eine feinere Porenstruktur aufweist. Durch die Verschiebung der Porenradienverteilung verfügt Hüttensand über eine geringere Durchlässigkeit gegenüber flüssigen und gasförmigen Medien, woraus eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit und ein erhöhter Schutz gegen das Eindringen aggressiver Stoffe resultieren. [22, 44]

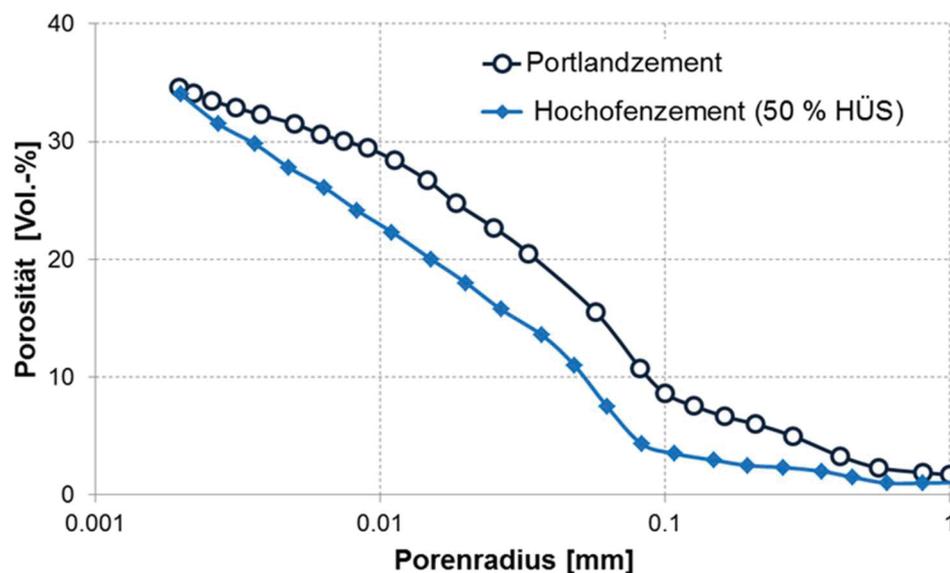


Abbildung 4-1: Porengrößenverteilung von Portlandzement und Hochofenzement [44]

Erhärtung

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, ist die Hydraulizität des Hüttensands erst nach Zugabe eines Anregers nutzbar. Bei alleiniger Mischung mit Wasser werden zwar Hydratphasen ausgebildet, welche jedoch zu keiner technisch nutzbaren Festigkeitsentwicklung führen. Aus diesem Grund werden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oder andere Anreger benötigt. [2] Die Reaktion mit Wasser läuft bei hüttensandhaltigen Zementen, je nach Hüttensandgehalt, somit wesentlich langsamer ab, als bei herkömmlichen Zementen. Zemente werden laut Norm auf eine Zielfestigkeit nach 28 Tagen eingestellt. **Abbildung 4-2** zeigt, dass Hüttensand im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzement zeitverzögert reagiert. [22]

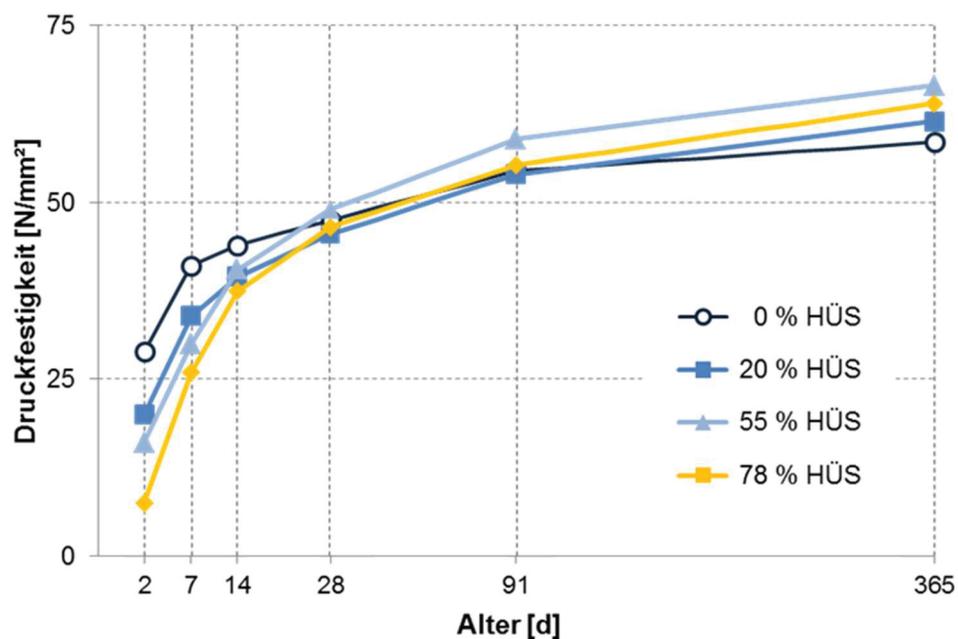


Abbildung 4-2: Festigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt [24]

Mit steigendem Hüttensandgehalt läuft somit die Anfangserhärtung langsamer ab. Diese Eigenschaft ist bei gewünschtem schnellem Baufortschritt nachteilig. Im höheren Hydratationsalter ist bei Hüttensand, aufgrund der Trägheit, jedoch noch immer ein wesentlicher Reaktionsfortschritt zu sehen. Hüttensandreiche Zemente weisen somit eine höhere Nacherhärtung auf und verfügen somit über Festigkeitsreserven. Durch die langsamere Erhärtung zu Beginn der Reaktion verfügen genannte Zemente über eine längere Verarbeitbarkeit. Sie können daher über längere Strecken transportiert werden. Außerdem ist genannte Eigenschaft bei einer Verarbeitung bei höheren Temperaturen von Vorteil. Gleichzeitig reagieren Zemente mit zunehmendem Hüttensandgehalt empfindlich auf eine unzureichende Nachbehandlung, welche bei jedem Beton zum Schutz vor Austrocknung notwendig ist. [24, 27]

Hydratationswärmeentwicklung

Ein steigender Hüttensandgehalt in Zementen führt, wie bereits erwähnt, zu einer langsamer werdenden Reaktion. Diese Eigenschaft ist hier bei der Auftragung der kumulierten freigesetzten Hydratationswärme gegen die Zeit, in **Abbildung 4-3** dargestellt, ebenfalls zu sehen.

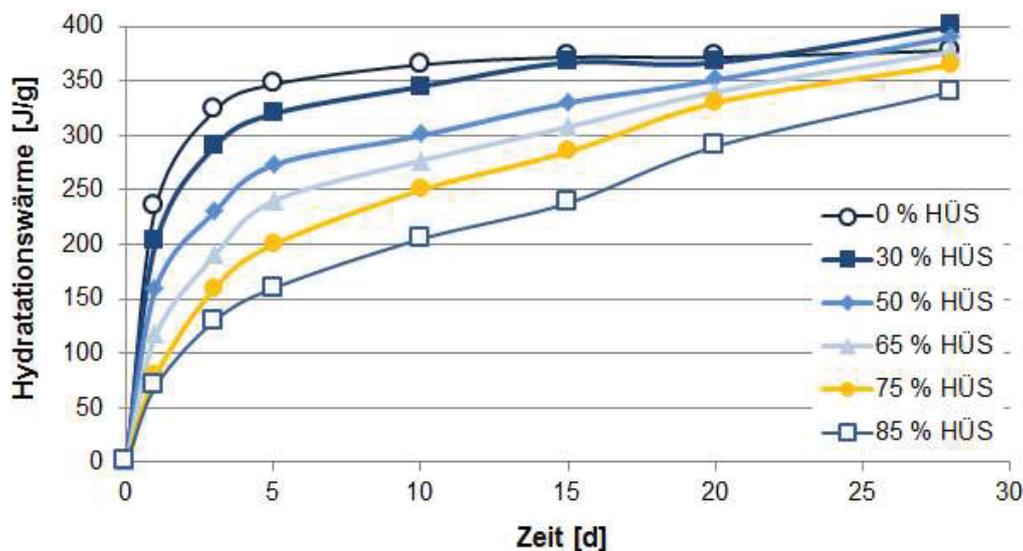


Abbildung 4-3: Abhängigkeit der Hydrationswärmeentwicklung vom Hüttensandgehalt bei hüttensandreichen Zementen [45]

Bei Portlandzement wird in den ersten fünf Tagen bereits mehr als 90 % der Hydrationswärme freigesetzt. Wesentlichen Einfluss auf die Hydrationswärme haben Menge und Art der Haupt- und Nebenbestandteile, die Klinkerzusammensetzung des Zements sowie die erreichte Mahlfineinheit. Im Vergleich dazu wird bei hüttensandreicherem Zement, mit 85 % HÜS (Hüttensand), im selben Zeitraum nur rund 40 % der Reaktionswärme abgegeben. Aus diesem Grund wird hüttensandreicher Zement vor allem für Bauteile großen Ausmaßes, wie beispielsweise Fundamente, bevorzugt. Durch eine gleichmäßigere und zu Beginn geringere Wärmefreisetzung, werden temperaturbedingte Spannungsrisse minimiert. [24, 27, 47]

Chemische Beständigkeit

Neben der feineren Porenstruktur führen veränderte Reaktionsprodukte im Vergleich zu Portlandzement zu einer erhöhten chemischen Beständigkeit hüttensandhaltiger Zemente. Aus dem Hüttensand entsteht kaum $\text{Ca}(\text{OH})_2$, welches chemisch nicht sehr beständig ist und teils empfindlich auf Sulfate oder Säuren reagiert. [22] So betrug der Oberflächenabtrag bei einem 20-jährigen Versuch von Zement in Kohlensäure für Hochofenzement nur die Hälfte im Vergleich zu gewöhnlichem Portlandzement. [46] Zemente mit zunehmendem Hüttensandgehalt weisen eine steigende Resistenz gegen Chloriddiffusion auf, welche einerseits auf die höhere Dichte des Zements und andererseits auf die Fähigkeit der adsorptiven Bindung von Chloriden durch hüttensandhaltige Zemente schließen lassen. [47, 48]

5 Planung, Bau und Inbetriebnahme

Im zweiten Teil der Arbeit werden sowohl Konzeption und Aufbau der Laboranlage als auch die Inbetriebnahme dargelegt. Dabei werden die einzelnen Schritte erklärt und die Hintergründe sowie Motivation der Bauweise erläutert. Außerdem werden auf bekannte Betriebsparameter aus der Literatur und vergleichbare Versuchsanlagen eingegangen.

5.1 Ausgangslage

Grundsätzlich soll sich der Versuchsaufbau am INBA[®]-Verfahren orientieren. Die Granulierung ist wie in **Abbildung 3-6** mit einem Granulationsbecken vorgesehen. Bei dieser Art des Aufbaus ist der zusätzliche Sicherheitsfaktor, durch das Becken und die dadurch vorhandene größere Wassermenge, von Vorteil. Außerdem steht neben dem zirkulierenden Wasser zusätzliche Flüssigkeit zum Abkühlen der Schlacke zur Verfügung.

Weiters wurde bereits von Weißböck [49] eine Vorarbeit über das Thema der Nassgranulation mit dem Schwerpunkt auf Planung und Dimensionierung des Baus der Anlage erstellt. Dabei wurde auf die wichtigsten Einflussparameter eingegangen und ein erster Vorschlag für den Bau der Anlage ausgearbeitet. Auf diese wird in der hier vorliegenden Arbeit teilweise aufgebaut und Bezug genommen. Außerdem ist am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik (TPT) an der Montanuniversität Leoben bereits eine Trockengranulationsanlage in Betrieb, deren Bauteile bestmöglich in die neue Anlage integriert werden sollen.

Schmelzaggregat

Der Versuchsaufbau der Nassgranulation soll passend zur vorhandenen induktiven Schmelzanlage konzipiert und gebaut werden. Die Schmelze im Technikum ist vonnöten, da die Granulierung nicht direkt mit der heißen Schlacke vom Hochofen erfolgt, sondern die bereits erstarrte Schlacke wieder aufgeschmolzen werden muss. Die sogenannte InduMelt - Anlage besteht, wie schematisch in **Abbildung 5-1** zu sehen ist, aus elektronischen Bauteilen, einem Kühlkreislauf, sowie einer großen Kupferspule.

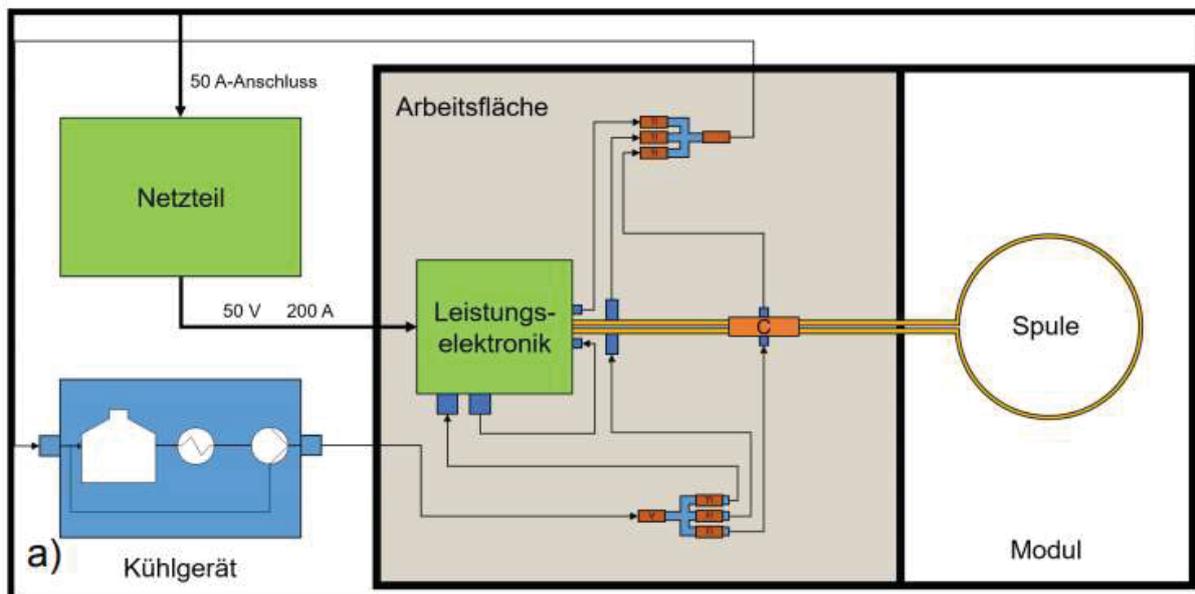


Abbildung 5-1: Aufbau der Induktionsspule zum Erhitzen der Schlacke [50]

Bei der verwendeten Spule handelt es sich um eine einwindige, aus 1 mm dickem Kupferblech, gefertigte Spule. Sie wird innen mit Wasser gekühlt und verfügt über eine Höhe von 12,3 cm sowie einen Innendurchmesser von 20,5 cm. Das Kühlaggregat, welches unter dem Netzteil positioniert ist, wird luftgekühlt und für eine optimale Funktion der Anlage auf eine Temperatur von 15 °C eingestellt. Der Kühlkreislauf verfügt zu Kontrollzwecken über eine Durchfluss- sowie Rücklauf Temperaturmessung. Neben dem Netzteil sind für den Betrieb der Spule Kondensatoren sowie Leistungselektronik von Nöten. Das Netzteil stellt eine Wirkleistung von 10 kW, bei einem Maximalstrom von 200 A und einer Maximalspannung von 50 V, bereit. Die Kondensatoren werden für die Anpassung der Gesamtkapazität des Parallelschwingkreises benötigt. **Abbildung 5-2** zeigt Darstellungen der verwendeten InduMelt-Anlage mit den Beschriftungen der wichtigsten Komponenten.

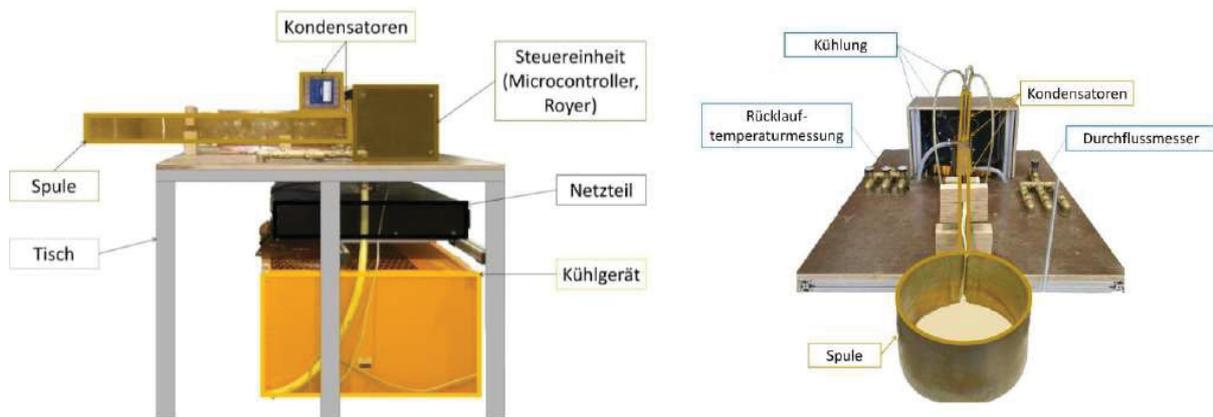


Abbildung 5-2: InduMelt-Anlage mit Beschriftung der wichtigsten Komponenten [51]

Über den durch die Spule geleiteten Wechselstrom wird im darunter platzierten Schmelzaufbau aus Grafit eine Spannung induziert und dieser aufgeheizt. [52] Gleichzeitig wird die darin eingefüllte Schlacke verflüssigt. Zur Vermeidung großer Wärmeverluste wird der Schmelzaufbau isoliert. Er verfügt an der Unterseite über ein Loch, das mit einem Stopfen verschlossen werden kann, der bei Bedarf herausgezogen wird, um die flüssige Schlacke herauslaufen zu lassen. In **Abbildung 5-3** ist der grundsätzliche Schmelzaufbau dargestellt. Eine erweiterte Skizze mitsamt Isolierung ist in **Abbildung 6-4** zu sehen.

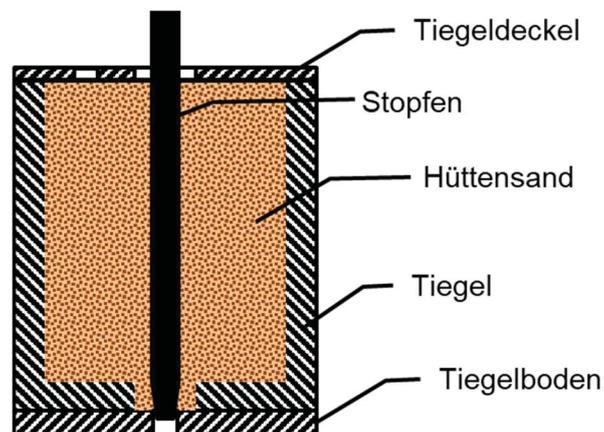
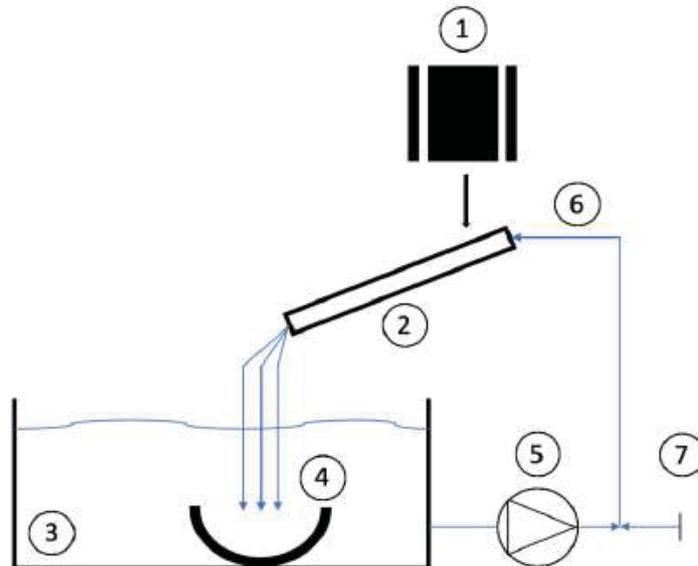


Abbildung 5-3: Schmelzaufbau aus Grafit

Der Tiegel verfügt über ein Füllvolumen von 2,7 kg Hüttensand. Nach dem Schmelzvorgang ist er zu etwa einem Drittel mit flüssiger Schlacke gefüllt. In Vorversuchen wurde die Schlacke auf 1400 °C erhitzt. Die Ausflussdauer beträgt dabei circa 20 Sekunden. Aus dem Volumen und der Dauer lässt sich der Schlackenmassenstrom mit 0,15 kg/s ableiten. Die Dauer des Aufheizvorgangs ist abhängig von der zugeführten Leistung, den Materialeigenschaften sowie der Frequenz. [53]

Anlagenentwurf

In **Abbildung 5-4** ist eine erste grobe Skizze der Versuchsanlage zu sehen. Dabei werden nur die wichtigsten Bauteile berücksichtigt. Messgeräte und Regelungen werden im Zuge der weiteren Anlagenplanung hinzugefügt. Vom zuvor beschriebenen Schmelzaggregat zum Verflüssigen der Schlacke ist nur der Schmelztiegel dargestellt.



1	Schmelztiegel	5	Wasserpumpe
2	Granulationsrinne	6	Granulationswasser
3	Wasser befülltes Granulationsbecken	7	Wasserleitungsanschluss
4	Auffangbehälter		

Abbildung 5-4: Erste Skizze der Versuchsanlage [49]

Wie bereits zuvor beschrieben fließt die flüssige Schlacke, nach dem Entfernen des Stopfens, an der Unterseite aus dem Schmelzaufbau heraus. Kaltes, aus einer Düse austretendes Wasser, reißt die heiße Schlacke mit. Das Wasser/Schlacke-Gemisch gelangt über eine Rinne in das Granulations- und Absetzbecken. Dabei wird die Schlacke schnell genug abgeschreckt, um den gewünschten Glasanteil zu erreichen. Im Becken wird die Schlacke von einem Sieb- beziehungsweise Gitterkorb aufgefangen, um das Granulat für weitere Analysen entnehmen zu können und die Pumpe in ihrer Funktionsfähigkeit nicht zu beeinträchtigen. Über Schläuche, Rohre sowie die Pumpe gelangt das Wasser zurück zur Rinne. Des Weiteren sind ein Anschluss an die Wasserleitung zum Befüllen, sowie ein Kanalanschluss zum Entleeren des Beckens vorgesehen.

5.2 Einflussgrößen für die Dimensionierung der Versuchsanlage

Wasser/Schlacke–Verhältnis

Für die Auslegung der Pumpe und des Behälters sind das Wasser/Schlacke–Verhältnis sowie die Wärmekapazität der Hochofenschlacke maßgeblich. Die Abkühlung der Schlacke soll so erfolgen, dass der optimale Glasanteil von 90 – 95 % möglichst erreicht wird. Bezüglich des Wasser/Schlacke–Verhältnisses finden sich in der Literatur unterschiedliche Vorschläge. Üblich sind in der Industrie hohe Wasserüberschüsse (Wasser : Schlacke = 6 – 10 : 1 [2, 18]). Schneider [34] beschreibt eine Laboranlage zur Granulation von Hochofenschlacke. Dabei werden für das Aufschmelzen und anschließendes Granulieren von Hüttensanden höhere Wasser/Schlacke–Verhältnisse angegeben. Diese sind für eine Wassertemperatur von 10 °C in **Tabelle 5-1** aufgelistet.

Tabelle 5-1: Granulationsparameter der umgeschmolzenen Hüttensande mit unterschiedlichem Glasgehalt als Zielgröße [34]

Glasanteil [%]	Wassermenge [l/kg Hüttensand]
80	1
90	20
100	50

Die Versuchsanlage soll sich am Stand der Technik orientieren. Deshalb soll ein Wasser/Schlacke–Verhältnis von ungefähr 10 realisiert werden. Aus der Masse von 2,7 kg Schlacke und der Ausflussdauer von 20 Sekunden ergibt sich ein Schlackenmassenstrom von rund 8 kg/min. Daraus folgend ergibt sich für die Pumpe eine Förderleistung von mindestens 80 l/min (= 4800 l/h). Bei diesen Werten wird in der Regel die Siedetemperatur des Wassers in der Rinne, bis auf lokale Stellen, nicht erreicht. [16]

Gesamtwassermenge

Um hohe Temperaturschwankungen zu vermeiden und die Bauteile vor Überhitzung zu schützen wird eine maximale Temperaturdifferenz (ΔT) von 10 °C gewählt. Bei einer Wassertemperatur von 20 °C ergibt sich, daraus eine Höchsttemperatur von 30 °C. Gleichzeitig wird die geschmolzene Schlacke von 1550 °C auf die 30 °C abgekühlt. Aus der Temperaturdifferenz von Wasser und Schlacke, der Dichte (ρ) des Wassers, der

Schlackenmenge sowie den spezifischen Wärmekapazitäten und der Schmelzenthalpie (H_S) der Schlacke wird die erforderliche Gesamtwassermenge berechnet. Für die Berechnung relevante Werte sind in **Tabelle 5-2** zusammengefasst. Die spezifische Wärmekapazität (c_p) der Schlacke wurde intern, für die im Technikum verwendeten Schlacken, errechnet. Die angegebene Zahl entspricht dem gemittelten temperaturabhängigen c_p -Wert.

Tabelle 5-2: Werte für die Berechnung der benötigten Wassermenge

Bezeichnung	Einheit	Wert
ρ_{H_2O} [54]	[kg/m ³]	997
c_{p,H_2O} [54]	[kJ/kg*K]	4,18
ΔT_{H_2O}	[K]	10
$c_{p,HOS}$	[kJ/kg*K]	1,27
ΔT_{HOS}	[K]	1520
m_{HOS}	[kg]	2,7
$H_{S,HOS}$ [55, 56]	[kJ/kg]	~ 250

Zur Berechnung der Gesamtwassermenge, wird in einem ersten Schritt eine einfache Energiebilanz nach **Formel (5 1)** aufgestellt.

$$V_{H_2O} * \rho_{H_2O} * c_{p,H_2O} * \Delta T_{H_2O} = m_{HOS} * (c_{p,HOS} * \Delta T_{HOS} + H_{S,HOS}) \quad (5-1)$$

Durch Umformung der Gleichung auf **Formel (5 2)** kann in weiterer Folge durch Einsetzen der Stoffwerte in **Formel (5 3)** die Wassermenge berechnet werden.

$$m_{H_2O} = \frac{m_{HOS} * (c_{p,HOS} * \Delta T_{HOS} + H_{S,HOS})}{\rho_{H_2O} * c_{p,H_2O} * \Delta T_{H_2O}} \quad (5-2)$$

$$m_{H_2O} = \frac{2,7 [kg] * (1,27 \left[\frac{kJ}{kg * K}\right] * 1520 [K] + 250 \left[\frac{kJ}{kg}\right])}{997 \left[\frac{kg}{m^3}\right] * 4,18 \left[\frac{kJ}{kg}\right] * 10[K]} = \sim 0,14 m^3 = 140 l \quad (5-3)$$

Es ergibt sich somit für eine maximale Erwärmung von 10 °C eine Gesamtwassermenge von ~ 140 Litern. Bei diesem Ergebnis handelt es sich, aufgrund angenommener Werte und einiger Vereinfachungen um eine grobe Abschätzung und somit um einen Richtwert für die weitere Planung der Anlage.

Einflussgrößen auf die Dichte und Partikelgröße

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Dichte und Partikelgröße ist die Schlackentemperatur. So führt das Abschrecken von höheren Schmelztemperaturen bei Gläsern zu geringeren Härten und einer offeneren Struktur. [57] Letztgenannte sind hinsichtlich der chemischen Beständigkeit und der hydraulischen Erhärtung des Zements hinderlich. [36] Die Temperatur der Schlacke kann in Hüttenwerken jedoch nicht beliebig eingestellt werden. Sie ist durch örtliche Gegebenheiten, wie die Entfernung der Granulationsanlage, meist vorgegeben. [34] Tobo et al. [33] führte Versuche bezüglich des Einflusses der Wasserdüse auf die Eigenschaften des Granulats durch. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Schlitzdüse, im Vergleich zu einer Düse mit vielen Löchern, kleinere Partikel mit einer höheren Dichte erreicht werden. Nachdem die Dichte von einigen weiteren Parametern beeinflusst wird, werden Überlegungen zu einer Adaption der Düse erst nach der Inbetriebnahme und ersten Erkenntnissen zum gewonnen Granulat erfolgen. Aus diesem Grund werden die Versuche ohne spezielle Düse gestartet.

5.3 Sicherheitstechnische Betrachtung

Im Zuge der Arbeit wurden eine Risikoanalyse nach EN ISO 12100 [60] durchgeführt. Darin werden einerseits die Gefahren und ihre Ursachen bei der Durchführung der Nassgranulation erfasst und andererseits die Auswirkungen ihre Vermeidung und damit verbundene zu setzende Gegenmaßnahmen erarbeitet und aufgelistet. Die Analyse ist in Anhang II in **Tabelle A-0-1** und **Tabelle A-0-2** zu sehen. Bezüglich der Vorgehensweise bei der Analyse sei auf die EN ISO 12100 [60] und die ISO/TR 14121-2 [61] sowie eine dieses Thema behandelnde Arbeit von Doschek K. [62] verwiesen.

5.4 Versuchsanlagenbeschreibung

Granulationsbecken

Als Granulationsbecken wird eine gebrauchte emaillierte Stahlbadewanne mit einem Fassungsvermögen von rund 150 Litern verwendet. Damit kann die benötigte Gesamtwassermenge einfach erreicht werden. Außerdem ist bereits ein Abfluss vorhanden, um die Pumpe und weitere Komponenten anzuschließen. Ein weiterer Vorteil ist die relativ

hohe Hitzebeständigkeit, wodurch es, selbst bei nicht ordnungsgemäßer Funktionsweise der Anlage und der Berührung heißer Schlacke mit der Wanne, zu keinen ernsthaften Schäden kommen sollte. In **Abbildung 5-5** ist das Granulationsbecken im Rohzustand, vor den Umbauarbeiten und der darauffolgenden Reinigung, dargestellt. Die Badewanne ist 110 cm lang, 70 cm breit und 60 cm hoch. Der Abstand zwischen Überlauf und Ausfluss, welche der maximalen Füllhöhe entspricht, beträgt 35 cm.



Abbildung 5-5: Das Granulationsbecken (Sitzbadewanne)

Pumpe

Um das gewünschte Wasser/Schlacke–Verhältnis zu erreichen, wurde eine selbst-ansaugende Gartenpumpe der Marke ELPUMPS (Typ: JPV 1500 B) gewählt. Sie verfügt über einen Einphasen-Asynchronmotor sowie ein Pumpengehäuse aus Gusseisen und ein Schaufelrad aus Bronze. Die wichtigsten technischen Daten sind in **Tabelle 5-3** aufgelistet.

Tabelle 5-3: Technische Daten ELPUMPS Gartenpumpe JPV 1500 B

Spezifikation	Einheit	Wert
Leistungsaufnahme	W	1500
max. Förderdruck	bar	4,8
Wasserförderung	l/min	105
max. Wassertemperatur	°C	35
Nettogewicht	kg	13,8

Die maximale Wassertemperatur liegt über den in Kapitel 5.2 angenommenen 30 °C. Die Pumpe ist jedoch nicht für sandiges Wasser beziehungsweise Flüssigkeiten mit Schleifwirkung geeignet, weshalb der ausreichenden Abtrennung des Hüttensands eine wesentliche Rolle zukommt. Die Pumpe ist in **Abbildung 5-6** dargestellt.



Abbildung 5-6: Umwälzpumpe (ELPUMPS (Typ: JPV 1500 B))

Regelventil

Da die Pumpe selbst nicht geregelt werden kann, ist zur Durchflussregelung ein Strangregulierventil eingebaut. Dadurch kann der Einfluss des Wassers/Schlacke – Verhältnis auf die Hüttensandeigenschaften untersucht werden. Das Ventil fungiert dabei als Drossel. Durch den erhöhten Druckverlust kann der Wasserdurchfluss gesenkt werden. Die Verstellung des Ventils erfolgt stufenlos und eine Skala hilft dabei abzuschätzen, wie das Ventil geschlossen ist. Die Apparatur ist in **Abbildung 5-7** dargestellt.



Abbildung 5-7: Strangregulierventil

Messequipment

Um die tatsächliche Durchflussmenge messen zu können, ist ein Durchflussmesser der Marke Parker verbaut. Dieser verfügt über einen variablen Messbereich von 5 – 100 l/min bei einem Betriebstemperaturbereich von 5 °C bis 60 °C sowie einem Maximaldruck von 10 bar. Das Bauteil ist in **Abbildung 5-8** zu sehen.



Abbildung 5-8: Durchflussmessgerät

Für die Überwachung der Temperatur im Granulationsbecken, verfügt der Versuchsaufbau über einen Temperatursensor. Dafür ist ein Thermoelement Typ-K in Verwendung. Des Weiteren kann mithilfe einer Infrarot-Kamera (JENOPTIK, VarioCAM® head HiRes 640) die Temperaturverteilung beim Aufeinandertreffen von Schlacke und Wasser aufgezeichnet und analysiert werden. Der Temperatursensor und die IR-Kamera sind in **Abbildung 5-9** und **Abbildung 5-10** dargestellt.



Abbildung 5-9: Temperatursensor
(Thermoelement Typ-K))



Abbildung 5-10: IR-Kamera

Aus Vorversuchen sind für bestimmte Leistungen bereits die Aufheizdauern bekannt. Zur Überprüfung ob die gewünschte Schlackentemperatur beim Schmelzvorgang erreicht wird, kann über ein Thermoelement Typ-S die Temperatur im Schlackenbad gemessen werden. Das verwendete Element ist **Abbildung 5-11** in zu sehen. Zur weiteren Überprüfung der

Schlackentemperatur ist ein Quotientenpyrometer (KELLER HCW, PZ40 AF4) im Einsatz. Es ist in **Abbildung 5-12** dargestellt.



Abbildung 5-11: Temperatursensor
(Thermoelement Typ-S)



Abbildung 5-12: Quotientenpyrometer

Auffangbehälter/Sieb

Um den Hüttensand einer weiteren Analyse zuführen zu können, ist das Abtrennen des hergestellten Granulats vonnöten. Weiters müssen vom Auffangbehälter auch mögliche sandige Partikel gefiltert werden, um die Pumpe nicht zu beschädigen. Der verwendete Auffangbehälter ist in **Abbildung 5-13** dargestellt.



Abbildung 5-13: Auffangsieb für die granulierten Schlacke

Für die Stabilität ist als Grundgerüst ein Drahtgitter mit einer Maschenweite von 1,2 cm in Verwendung. Darauf ist ein Siebgitter mit einer Maschenweite von 200 µm befestigt. Die Größe

der gesamten Konstruktion ist mit einer Länge von 51 cm, einer Breite von 24 cm und einer Höhe von maximal 21 cm so gewählt, dass die gesamte Granulatmenge von 2,7 kg darin Platz findet. Bei den Versuchen muss darauf geachtet werden, dass das Sieb nicht von möglichen feinen Teilen des Hüttensands verstopft wird, damit ein ausreichender Austausch des Wassers zwischen Wanne und Auffangbehälter vorhanden ist.

5.5 Bau der Anlage

In **Abbildung 5-14** ist der in diesem Kapitel beschriebene generellen Aufbau dargestellt. Die Wasserführung wird im Laufe der Versuche verändert. Hierbei handelt es sich um das zu Beginn angewandte Rinnenkonzept.



Abbildung 5-14: Aufbau der Wasserkreislaufs mit Granulationsbecken

Das Granulationsbecken ist zum Zweck des einfacheren Transports mittels Gabelhubwagen und zur Befestigung weiterer Anlagenkomponenten mit einem Rahmen aus 40 mm x 40 mm Aluminiumprofilen eingefasst. Auf die richtige Höhe wird die Konstruktion durch die Verwendung von Metallschraubfüßen gebracht. Die Profile sind fest mit den vorhandenen Stehern der Sitzbadewanne verschraubt. An der Querseite, gegenüber dem Ausfluss, reicht der Rahmen über die Oberkante des Beckens hinaus. Dort ist eine höhenverstellbare Eisenplatte, mit einem mittigen Loch, für den Ausfluss der Schlacke, befestigt. Auf der Eisenplatte wird in weiterer Folge der Schmelzaufbau platziert. Zwischen der Platte und dem Alurahmen befindet sich eine Isolationsschicht, aus feuerfester Keramikfaser, um das

Aluminium vor den hohen Temperaturen zu schützen. Direkt am Rahmen neben der Platte ist eine, in obiger Darstellung nicht abgebildete, weitere senkrechte Schiene befestigt, welche als Stativ für das Thermoelement Typ-S fungiert. In der höhenverstellbaren Holzplatte ist ein Loch eingebohr, durch welches exakt der Temperatursensor passt. Die Platte wird so eingestellt, dass das Thermoelement tief genug in die flüssige Schlacke eintaucht, aber nicht den wesentlich heißeren Tiegel, welcher bis zu 2000 °C haben kann, berührt. Die Pumpe ist unterhalb der Wanne, auf der Längsseite, angebracht.

Grund für diese Position ist, neben dem einfachen Zugang für das Ein- und Ausschalten und die Anschlüsse, der Schutz der Pumpe sowie der zugehörigen Elektronik vor der heißen Schlacke und etwaigem Spritzwasser. Generell wird aus Sicherheitsgründen darauf geachtet, elektrische und sensible Anlagenkomponenten möglichst in ausreichender Entfernung von der Schlacke und möglichen herumfliegenden flüssigen Schlackentröpfchen zu platzieren. An der Saugseite ist die Pumpe mit einem 1,5 Zoll Schlauch an den bereits vorhandenen Abfluss der Badewanne angeschlossen. Druckseitig verbindet ein 1,25 Zoll Schlauch die Pumpe mit dem Strangregulierer, welcher über Rohrfittinge mit dem Durchflussmessgerät verbunden ist. Zuletzt genannte Anlagenkomponenten sind mittels Schraubbohrschellen an einer Pressspanplatte, welche am Alurahmen festgeschraubt ist, befestigt. Um das Ausrinnen von Wasser zu vermeiden, sind diverse Verschraubungen mit einem Gewinde-Dichtfaden abgedichtet und die Schläuche mit Schlauchklemmen befestigt. Die weitere Führung des Wassers ist je nach Anlagenkonfiguration verschieden und wird zu Beginn der jeweiligen Versuchsbeschreibung in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

5.6 Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Vor Beginn der Versuchsreihe erfolgte eine Kontrolle der Richtigkeit des Durchflussmessgeräts. Dazu wurden unterschiedliche Wassermengen über einige Sekunden in einem Kübel aufgefangen und danach abgewogen.

Die abgelesenen sowie berechneten Ergebnisse sind in **Tabelle 5-4** aufgelistet. Bei der berechneten Wassermenge handelt es sich um Mittelwerte aus zwei Messungen. Eine Messung dauerte, je nach Durchflussmenge, zwischen 10 Sekunden und 20 Sekunden. Bei den 85 Litern handelt es sich um die maximal erreichbare Wassermenge beim Anschluss eines 1 Zoll Schlauches.

Tabelle 5-4: Auslitern

Anzeige am Flowmeter	Berechnete Wassermenge
40 Liter	39,75 Liter
60 Liter	61,4 Liter
80 Liter	78 Liter
85 Liter	83,4 Liter

Die beobachteten Abweichungen zwischen den Anzeigewerten und den Berechnungen sind gering. Sie liegen zwischen 0,6 und 2,5 Prozent. Keines der Messergebnisse liegt über der am Durchflussmessgerät angegebenen Messunsicherheit von +/- 5 %.

6 Versuchsplanung und -durchführung

In diesem Kapitel erfolgt die Versuchsmaterialcharakterisierung, Versuchsvorbereitung beziehungsweise –beschreibung. Außerdem wird die generelle Vorgehensweise für die Granulationsversuche erläutert.

6.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial wurde bereits nassgranulierte Hochofenschlacke von integrierten Hüttenwerken (IHW) verwendet. Die verwendeten Hüttensande sind in **Abbildung 6-1** und **Abbildung 6-2** jeweils im selben Maßstab, zu sehen.

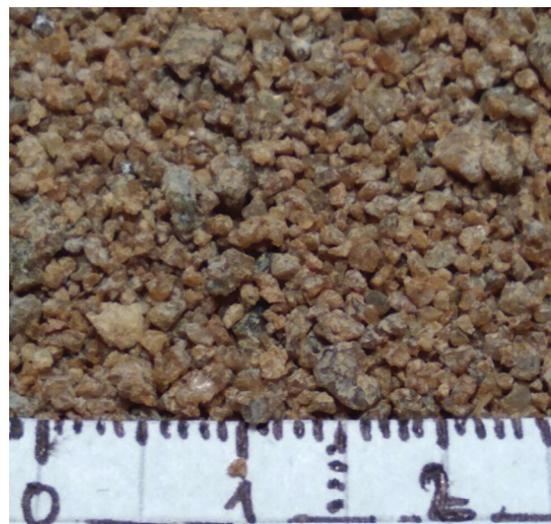
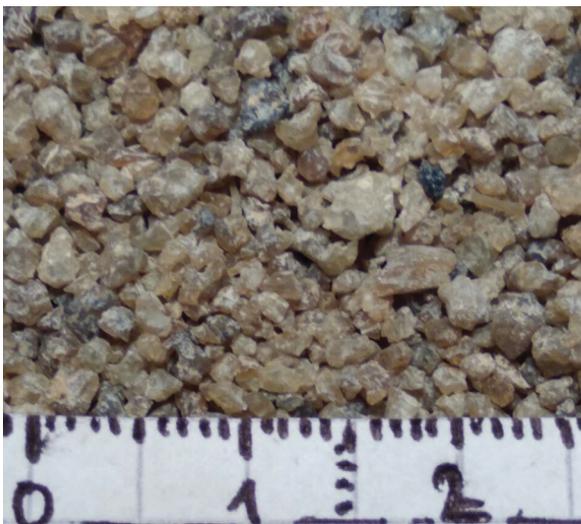


Abbildung 6-1: WSG19_001:Urprobe HS IHW 01 **Abbildung 6-2:** WSG19_004:Urprobe HS IHW 02

Für die Probenbenennung wurde eine systematische Bezeichnung, bestehend aus WSG für wet-slag-granulation, dem Jahr und einer fortlaufenden Nummer gewählt. Daraus ergibt sich für die erste Probe die Bezeichnung „WSG19_001“. Beim Vergleich der beiden Hüttensande sind optisch wesentliche Unterschiede erkennbar. So ist bei der Urprobe HÜS IHW 01 die Korngrößenverteilung wesentlich breiter gestreut und viel mehr kleinere, beinahe sandige Körner in der Probe enthalten. Außerdem finden sich darin auch einige fadenartige Partikel. Im Gegensatz dazu sind in der Urprobe HÜS IHW 02 die größeren Körner, mit Durchmessern von über 5 mm, zu finden. Die Ergebnisse der Urproben welche ebenso, wie das gewonnene Granulat, einer Siebanalyse unterzogen wurden, sind in Kapitel 9.3 abgebildet. Vor dem erneuten Einschmelzen des Hüttensandes im Tiegel, wird dieser getrocknet und wie bereits beschrieben exakt 2,7 Kilogramm, pro Versuch, eingewogen.

6.2 Versuchsvorbereitung

Vor jedem einzelnen Versuch sind weitere Vorbereitungen zu treffen, die nachfolgend beschrieben sind. Der gesamte Schmelzaufbau aus Grafit setzt sich aus dem Tiegel, der Boden- sowie der Deckplatte und dem Stopfen zusammen. Die Einzelteile sowie der Ablauf des Zusammenbaus des Schmelzaufbaus sind in **Abbildung 6-3** schematisch dargestellt.

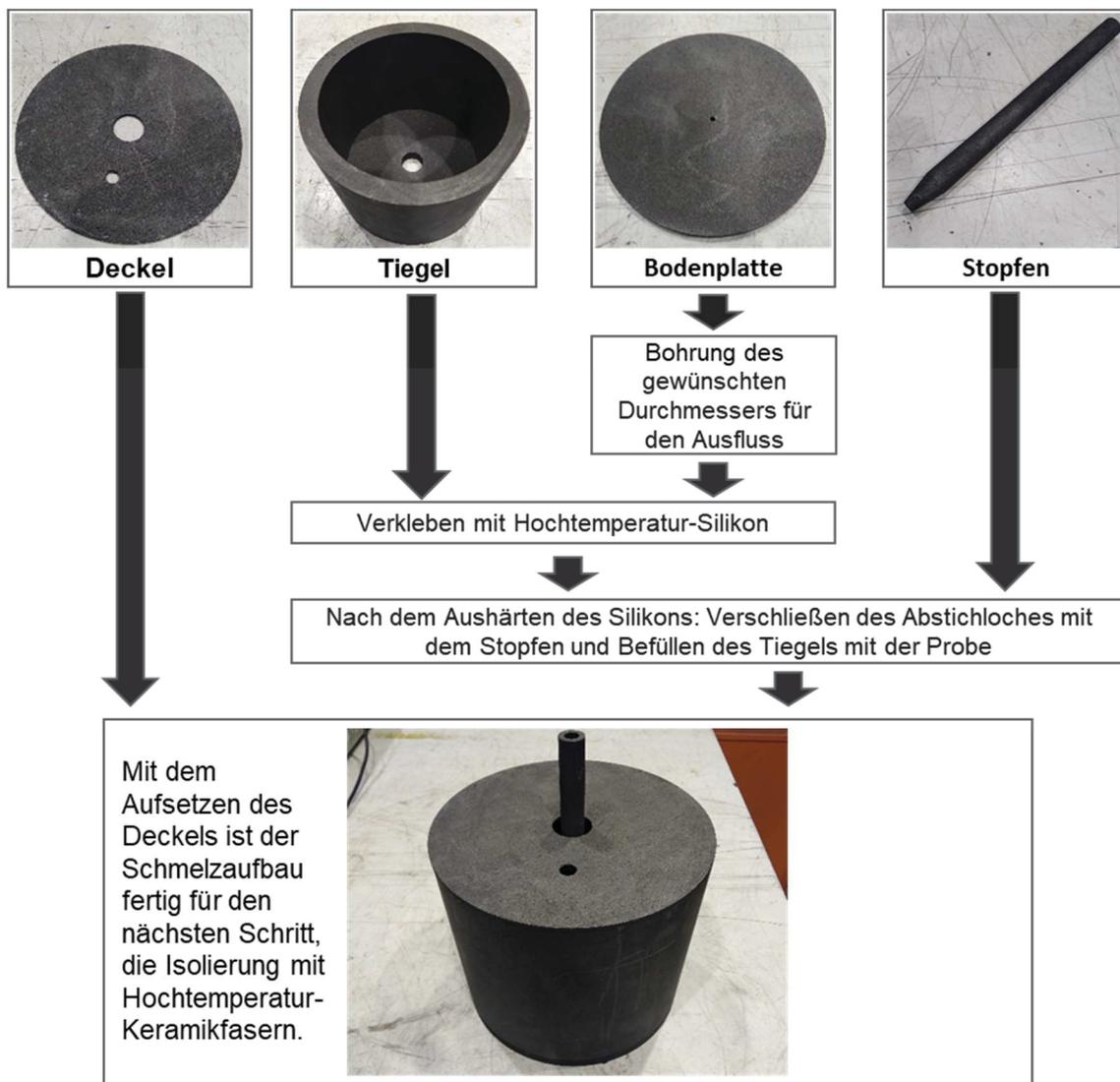


Abbildung 6-3: Ablaufdiagramm für das Zusammensetzen des Schmelzaufbaus

Als ersten Schritt, ist es erforderlich in die Bodenplatte ein Loch mit dem gewünschten Durchmesser zu bohren, damit die Schlacke nach dem Verflüssigen ausfließen kann. Danach wird die Platte mit Hochtemperatur-Silikon auf die Unterseite des Tiegels geklebt, damit beim weiteren Einrichten des Behälters das Abstichloch nicht verrutschen kann. Dabei ist auf eine ausreichende Trocknungszeit zu achten. Nach dem Erhärten des Klebers wird das Loch mit einem Grafitstopfen verschlossen. Daraufhin erfolgt das Befüllen des Tiegels mit der trockenen Probe. Dazu werden exakt 2,7 kg Probenmaterial verwendet. Schlussendlich wird auf den Tiegel noch der Deckel gelegt. Dieser verfügt über zwei Löcher. Das Loch in der Mitte ist für den Stopfen, damit dieser später zum Ausfließen der Schlacke entfernt werden kann. Durch das zweite kleinere Loch, kann zur Temperaturmessung das Thermoelement eingeführt werden. Zum Schutz des Schmelzaufbaus vor oxidierendem Sauerstoff und um die Wärmeverluste zu minimieren, wird der Schmelzaufbau von allen Seiten mit feuerfester

Keramikfaser aus Alumosilikaten eingepackt. Die Konfiguration ist in **Abbildung 6-4** graphisch dargestellt.

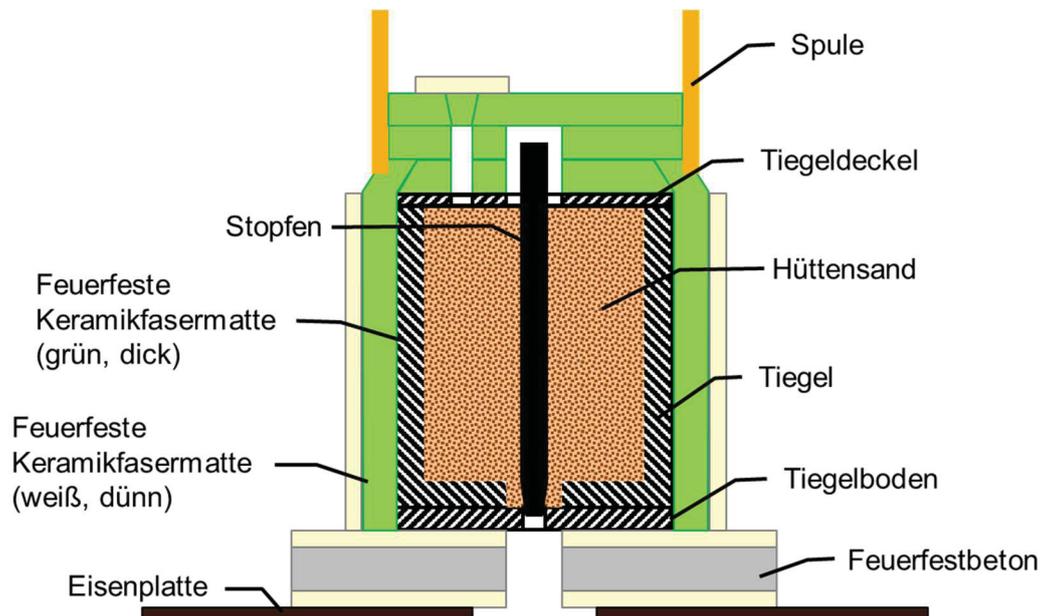


Abbildung 6-4: Querschnitt des Schmelzaufbaus mit Isolierungen

Der Schmelzaufbau steht auf einer Platte aus Feuerfestbeton, welche beidseitig mit einer Schicht Fiberfrax® Durablanket® Z isoliert ist. Dabei handelt es sich um eine weiße Hochtemperaturmatte aus gesponnener zirkonerdeverstärkter Keramikfaser, mit einer Klassifizierungstemperatur von 1400 °C, einer Dichte von 128 kg/m³ sowie einer Dicke von 13 mm. Darunter befindet sich die am Aluminiumrahmen befestigte Eisenplatte. Die vier letztgenannten Schichten verfügen über ein rund 4 x 4 cm großes Loch für den Schlackenausfluss.

Für die Oberseite wird ein Stück grüner Cerachrome® Matte, mit der Größe des Grafitdeckels ausgeschnitten. Es handelt sich um eine Hochtemperaturmatte aus gesponnener Keramikfaser, aus Al₂O₃, SiO₂ und Cr₂O₃, mit einer Klassifizierungstemperatur von 1425 °C, einer Dichte von 128 kg/m³ sowie einer Dicke von 25 mm. Danach wird der Zuschnitt einseitig abgefast und mit einem Loch, für den Stopfen sowie das Thermoelement, versehen. Rundherum wird der Schmelzaufbau zuerst straff mit einer teilweise überlappenden und an der Oberseite überstehenden Schicht der grünen Cerachrome® Matte isoliert. Darauf wird danach noch eine Schicht der weißen Fiberfrax® Matte angebracht. Die Befestigung erfolgt jeweils mit einem hitzebeständigen Faden.

Danach wird die Spule mit einem Hubwagen auf den Schmelzaufbau gehoben und so fixiert. Nachfolgend werden noch zwei Stück grüner Cerachrome® Keramikfasermatte genau passend für das Innere der Spule zugeschnitten. In das erste werden abermals zwei Löcher

geschnitten. Das zweite verfügt nur noch über ein Loch für das Thermoelement. Dieses Loch wird jedoch mit der ausgeschnittenen und gegebenenfalls einer zusätzlichen Keramikfasermatte erneut verschlossen. Wenn die zuvor beschriebenen Schritte erfolgt sind, kann die InduMelt-Anlage gestartet werden und der Versuch an sich beginnen. In **Abbildung 6-5** ist die Isolierung des Schmelzaufbaus nach einem Versuch und dem damit verbundenen Entfernen der Spule dargestellt.



Abbildung 6-5: Isolierung der Schmelzaufbaus nach einem Versuch

6.3 Genereller Versuchsablauf

Im Folgenden sind die grundlegenden Schritte der durchgeführten Versuche erklärt. Genaue Versuchsparameter sind bei der Beschreibung der einzelnen Versuche aufgelistet. Zu Beginn des Versuchs wird die InduMelt-Anlage eingeschaltet. Nachdem die Stromversorgung hergestellt ist, wird im folgenden Schritt das Kühlaggregat eingeschaltet und seine sachgemäße Funktion überprüft. Danach wird das Netzteil gestartet und die gewünschte Leistung kann über einen Regler eingestellt werden. Die Anlage verfügt über eine Spannungsbegrenzung bei 50 Volt. Aus Spannung und Stromstärke ergibt sich die zugeführte Leistung. In der Spule kommt es zu Ohm'schen- und Hystereseverlusten. Aufgrund der Spannungsabhängigkeit der Verluste lässt sich aus der Leerlaufkurve die tatsächlich aufgenommene Leistung berechnen. [51, 58] Diese Verluste sind in Formel (6-1) beschrieben.

$$P_{\text{Verlust}} = (0.0013 * (U [V])^2 + 0.0004 * U [V] - 0.0057) \quad (6-1)$$

Die tatsächlich von der Schlacke aufgenommene Wärmeleistung verringert sich vor allem durch Strahlungsverluste weiter. Während des gesamten Versuches wird in regelmäßigen Abständen die Leistung notiert sowie die Frequenz kontrolliert. Bei der Frequenz ist darauf zu achten, dass diese möglichst konstant ist. Dann befindet sich das System im eingeschwungenen Zustand. Meist liegt sie bei rund 50 Kilohertz (kHz). Falls die Frequenz zu sehr zu schwanken beginnt, muss die Leistung reduziert werden.

Ziel ist es, einen vollständig reproduzierbaren Ablauf für eine bestimmte Schmelztemperatur zu haben. Die zu diesem Zeitpunkt beste Methode ist das Zurückgreifen auf Erfahrungswerte vorangegangener Versuche. So ist bekannt, dass die Aufheizzeit definierter Leistung bei rund zweieinhalb Stunden liegt. Nach Ablauf dieser Zeit wird die InduMelt-Anlage ausgeschaltet und die tatsächliche Temperatur mittels Thermoelement in der Schmelze kontrolliert. Ein längeres Verweilen des Thermoelements Typ-S in der Schlacke ist nicht möglich, da die Keramik des Thermoelements sonst angegriffen wird. Für die Messung muss die Verstopfung des kleinen Loches mit einer Zange entfernt werden. Wenn die Zieltemperatur von 1400 °C erreicht wird, erfolgt der Abstich. Davor wird die Pumpe für die Wasserzirkulation eingeschaltet und die Aufzeichnung mit der GoPro und der Infrarotkamera gestartet. Für den Abstich wird anschließend der Grafitstopfen entfernt. Folgend fließt die Schlacke durch das offene Loch aus dem Schmelzaufbau nach unten. An einem Punkt treffen Schlacke und Wasser aufeinander. Erstere wird vom Wasser zerteilt und ins Becken befördert. Dort wird das Granulat von einem Sieb für die nachfolgende Analyse aufgefangen. Während des Versuchs wird zur Überprüfung der Schlackentemperatur eine Messung mittels Quotientenpyrometer durchgeführt. Zudem wird der gesamte Granulationsvorgang mittels Infrarot-Kamera und GoPro aufgezeichnet. Die einzelnen Messgeräte sind bereits in Kapitel 5.4 dargelegt und ihre Funktionsweise erläutert.

Nach dem Ende des Versuchs wird aus Sicherheitsgründen die InduMelt-Anlage samt Spule mit dem Hubwagen angehoben und weggefahren. Danach wird die Isolierung an der Oberseite wieder angebracht um ein zu starkes Abbrennen des Grafits zu vermeiden. Der Kontakt des heißen Schmelzaufbaus mit Sauerstoff führt zu einem erheblichen Verschleiß des Grafits. Davon am stärksten betroffen sind die Bodenplatte, der Deckel sowie die obersten Zentimeter der Außenseite des Tiegels. Bodenplatte und Deckel sind daher wechselbar ausgeführt und sind nach jedem Versuch zu tauschen. Der Grafitiegel kann für bis zu drei Versuche verwendet werden. An der Innenseite, wo der Tiegel durch die Schlacke vor einer Oxidation geschützt ist, erfolgt kein merkbarer Materialabtrag. Das zeigt auch, dass die Schlacke vollkommen ausreduziert ist.

7 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die einzelnen Versuche, samt den exakten Versuchsaufbauten sowie der genauen Fahrweise beschrieben. Die systematische Versuchsbenennung lautet wie folgt: *WSG Jahr _ Kampagne _ fortlaufende Nr._ Versuch _ fortlaufende Nr.* Für den ersten Versuch ergibt sich daraus folgende Benennung WSG19_C01_V01.

7.1 WSG19_C01_V01

Konfiguration

Bei Versuch WSG19_C01_V01 trifft die Schlacke vom Schmelzaufbau kommend in der Granulationsrinne auf das Wasser. Bei der Rinne handelt es sich um ein Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 20 cm. Das Rohr ist 37 cm lang und auf der Oberseite, bis auf zwei 5 cm breite Streifen auf jeder Seite, nicht ganz bis zur Hälfte aufgeschnitten. Auf der Oberseite dieser Streifen befinden sich Löcher, an denen die Rinne aufgehängt ist. Mittels Schraube beziehungsweise Gewindestange ist sie verstellbar mit der Platte verbunden. Das Gefälle der Granulationsrinne kann durch das Verändern der Position der Mutter an der Gewindestange in einem Bereich von rund 20° bis 50° eingestellt werden. Bei diesem Versuch wurde die Rinne bei einer Steilheit von 30° fixiert. Für die Wassereindüsung beim ersten Versuch wurde ein 1-Zoll-Schlauch verwendet, welcher mit einer Schraubzwinde am Granulationsrohr befestigt und so eingerichtet wurde, dass der Schlackenstrahl mittig auf das Wasser trifft. Das Düsenkonzept ist in **Abbildung 7-1** dargestellt. Direkt an der Düse wurde ein zusätzliches Thermoelement Typ-K zur Temperaturmessung angebracht.



Abbildung 7-1: Düsenkonzept WSG19_C01_V01

Versuchsparameter

In **Tabelle 7-1** sind die wichtigsten Versuchsparameter aufgelistet.

Tabelle 7-1: Versuchsparameter WSG19_C01_V01

Parameter	Einheit	Beschreibung
Konfiguration		Rinne mit Schlauchdüse
Ausgangsmaterial		WSG19_001: Urprobe HÜS IHW 01
Eingewogene Masse	kg	2,7
Bohrungsdurchmesser	mm	10
Wasserdurchflussmenge	l/h	85

7.2 WSG19_C01_V02

Konfiguration

Bei Versuch WSG19_C01_V02 wurde dieselbe Rinne wie im ersten Versuch verwendet. Allerdings wurde als Düse anstatt des Schlauches eine etwas flachgedrückte Schlauchtülle verwendet. Die Tülle wurde über Rohrverbindungen verbunden und im rechten Winkel zum Rinnenboden befestigt. Das Düsenkonzept ist in **Abbildung 7-2** dargestellt. Das Gefälle der

Granulationsrinne wurde durch das Verstellen der Schrauben an der Gewindestange auf rund 47 ° eingestellt. Weiters wurde die Fläche des Abstichloches halbiert, um ein höheres Wasser/Schlacke–Verhältnis zu erreichen.



Abbildung 7-2: Düsenkonzept WSG19_C01_V02

Versuchsparameter

In **Tabelle 7-2** sind die wichtigsten Versuchsparameter aufgelistet.

Tabelle 7-2: Versuchsparameter WSG19_C01_V02

Parameter	Einheit	Beschreibung
Konfiguration		Rinne mit Schlauchtüllendüse
Ausgangsmaterial		WSG19_001: Urprobe HÜS IHW 01
Eingewogene Masse	kg	2,7
Bohrungsdurchmesser	mm	7,2
Wasserdurchflussmenge	l/h	85

7.3 WSG19_C02_V01

Konfiguration

Für das Übergangskonzept wurde eine Ringdüse durch die Wassereindüsung von vier Seiten rund um den Schlackenstrahl nachgebildet. Dazu wurden vier Formrohre an ein Edelstahlrohr mit 16 cm Durchmesser angeschweißt. Zur Befestigung der wasserführenden Rohre, sowie der Gesamtkonstruktion an der darüber liegenden Platte wurden Gewindestangen angeschweißt. Durch Muttern wurden die Gewindestangen von oben an der Platte fixiert. Für die Wasserführung wurden Rohre mit einem Innendurchmesser von 1 cm mittels Rohrbiegemaschine auf einen Winkel von $105^\circ - 110^\circ$ gebogen. Diese Rohre sind mit je einer Stativmuffe verstellbar an den Gewindestangen befestigt. Der Wasseranschluss erfolgt über Kunststoffschläuche, welche mit Schlauchklemmen einerseits an den Rohren und an der anderen Seite an T-Schlauchverbindern befestigt sind. Beim Einstellen der Rohre ist darauf zu achten, dass sich die einzelnen Wasserstrahle an einem Punkt treffen und die Schlacke möglichst an diesem Punkt auf das Wasser trifft. Das Düsenkonzept, welches für die beiden folgenden Versuche nicht adaptiert wurde, ist in **Abbildung 7-3** dargestellt.



Abbildung 7-3: Vereinfachtes Ringdüsenkonzept WSG19_C02_V01/V02/V03

Als weitere Änderung wurde ein zusätzliches Thermoelement Typ-S eingesetzt. Dazu wurde auf einer Drehbank ein Loch bis zum untersten Drittel des Stopfens gebohrt, damit sich das Thermoelement im Bereich der geschmolzenen Schlacke befindet. In **Abbildung 7-4** ist die Positionierung der Thermoelemente vor dem Abstich zu sehen. Aus Gründen der Einfachheit ist die Isolierung nicht dargestellt.

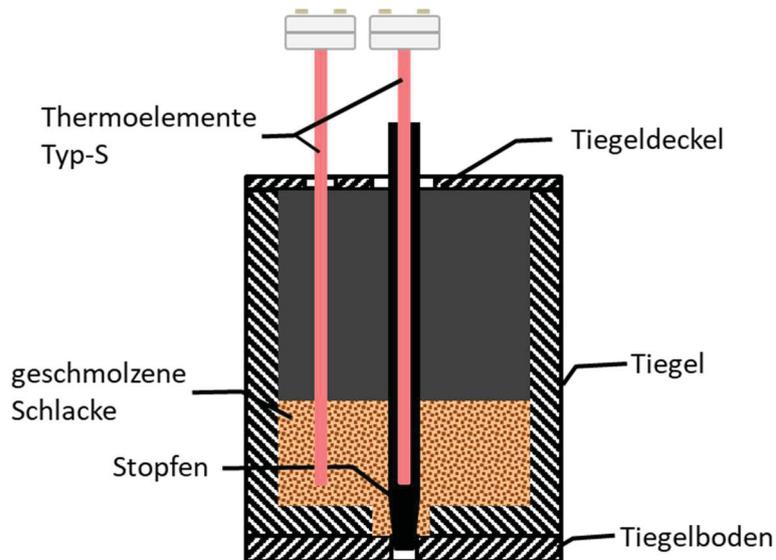


Abbildung 7-4: Positionierung der Typ-S Thermoelemente im Schmelzaufbau

Zu Beginn des Versuchs wurde ein Thermoelement Typ-S in der Bohrung fixiert und bis zum Abstich dort gelassen. Durch diese Temperaturmessung sollen Rückschlüsse auf die Schlackentemperatur gezogen werden. Der Vorteil dieser Konfiguration liegt darin, dass während der gesamten Aufheizphase die Temperatur gemessen werden kann und das Thermoelement nicht zerstört wird und daher wiederverwendet werden kann. Die zweite Temperaturmessung ist eine Referenzmessung.

Versuchsparameter

In **Tabelle 7-3** sind die wichtigsten Versuchsparameter aufgelistet.

Tabelle 7-3: Versuchsparameter WSG19_C02_V01

Parameter	Einheit	Beschreibung
Konfiguration		Vereinfachte Ringdüse
Ausgangsmaterial		WSG19_004: Urprobe HÜS IHW 02
Eingewogene Masse	kg	2,7
Bohrungsdurchmesser	mm	7,2
Wasserdurchflussmenge	l/h	85

7.4 WSG19_C02_V02

Konfiguration

Das Düsenkonzept entspricht dem des vorherigen Versuchs und ist bereits in **Abbildung 7-3** dargestellt.

Versuchsparameter

In **Tabelle 7-5** sind die wichtigsten Versuchsparameter aufgelistet. Um die Basizität der Schlacke herabzusetzen wurde dem Hüttensand vor Versuchsbeginn Kalk beigemischt.

Tabelle 7-4: Versuchsparameter WSG19_C02_V02

Parameter	Einheit	Beschreibung
Konfiguration		Vereinfachte Ringdüse
Ausgangsmaterial		WSG19_004: Urprobe HÜS IHW 02 und Kalk
Eingewogene Masse	kg	2,7 (2,15 : 0,55)
Bohrungsdurchmesser	mm	7,2
Wasserdurchflussmenge	l/h	85

7.5 WSG19_C02_V03

Konfiguration

Das Düsenkonzept entspricht dem der vorherigen beiden Versuche und ist bereits in **Abbildung 7-3** dargestellt.

Versuchsparameter

In **Tabelle 7-5** sind die wichtigsten Versuchsparameter aufgelistet. Die eingewogene Masse musste ein wenig verringert werden, da die Standardmenge, aufgrund von Abstoßungskräften zwischen den Partikeln, im Schmelzaufbau nicht Platz hatte.

Tabelle 7-5: Versuchsparameter WSG19_C02_V03

Parameter	Einheit	Beschreibung
Konfiguration		Vereinfachte Ringdüse
Ausgangsmaterial		WSG19_004: Urprobe HÜS IHW 02
Eingewogene Masse	kg	2,65
Bohrungsdurchmesser	mm	10
Wasserdurchflussmenge	l/h	85

8 Auswertung

Im folgenden Kapitel ist die Auswertung der Messergebnisse der hergestellten Granulationsprodukte beschrieben. Dabei werden die gewählten Vorgehensweisen sowie die durchgeführten Analysen erläutert.

8.1 Temperaturerfassung

Die Temperaturerfassung erfolgte über Typ-S Thermoelemente, Quotientenpyrometer sowie IR-Kamera. Bei den Rinnenversuchen funktionierten die Messaufzeichnungen einwandfrei. Bei den ersten beiden Düsenversuchen, WSG19_C02_V01/V02 konnte trotz des Hinzufügens eines weiteren S-Elements im Stopfen, während des Versuchs, aus unterschiedlichen Gründen, welche in der Diskussion behandelt werden, keine Temperatur gemessen werden. Eine Skizze der Position der Thermoelemente ist in **Abbildung 7-4** dargestellt. Das Quotientenpyrometer und die IR-Kamera wurde in einer Entfernung von rund einem Meter aufgestellt. Beim Versuch WSG19_C02_V03 sind Messdaten aller vier Messmethoden vorhanden, jedoch nur ein Wert alle 4 Sekunden. In **Abbildung 8-1** ist der Temperaturverlauf während des Granulationsvorgangs für den ersten Versuch, WSG19_C01_V01 dargestellt. Dafür sind die Temperaturaufzeichnungen des Thermoelements Typ-S, des Quotientenpyrometers und der IR-Kamera gegen die Zeit aufgetragen.

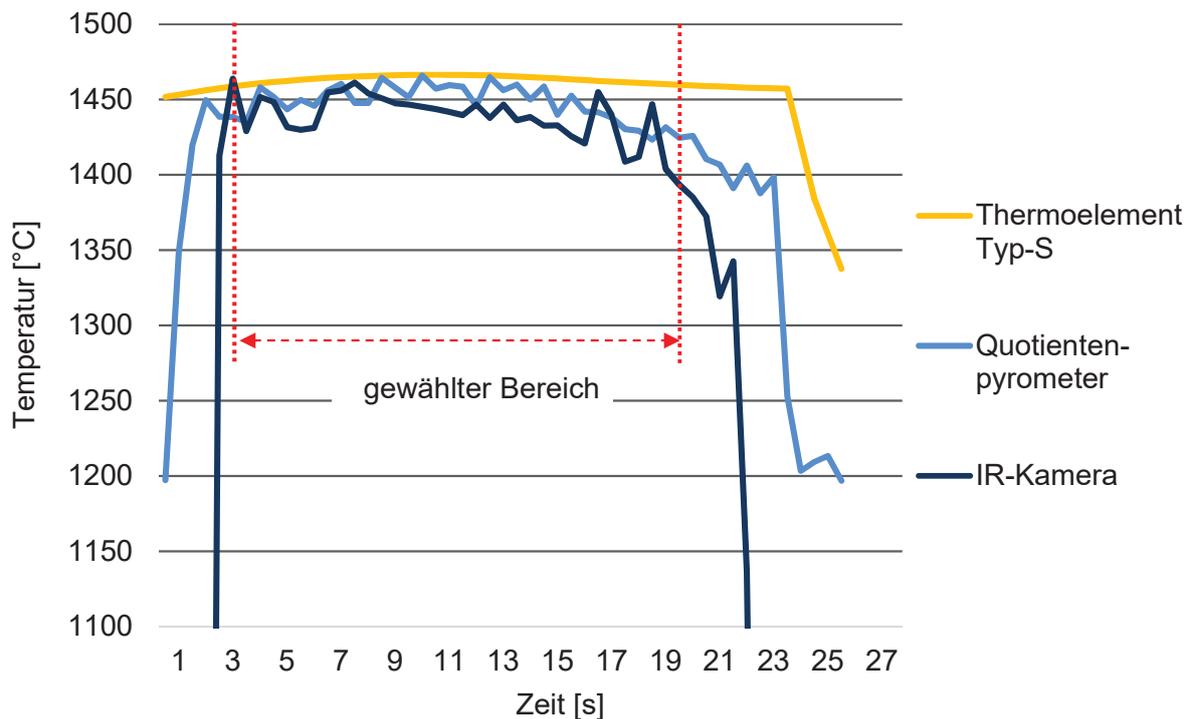


Abbildung 8-1: Temperaturlaufzeichnung WSG19_C01_V01
mit den unterschiedlichen Messmethoden

Beim Thermoelement ist vor Versuchsbeginn kein sprunghafter Anstieg zu sehen, da es bereits vor Granulationsbeginn im Schmelzaufbau eingetaucht wird. Bei den beiden weiteren Temperaturmessungen sind klare Versuchsstarts und –enden zu erkennen. Für die weitere Auswertung der Temperaturen während der Granulation, sowie aus Gründen der Vergleichbarkeit, wurde ein bestimmter Bereich definiert, welcher gleichmäßige Bedingungen zu Beginn der Versuche gewährleistet. Dafür wurde der Zeitraum der IR-Kamera genommen, da dieser am kürzesten ist. Zusätzlich wurden nur Temperaturen auf einem stabilem Niveau für die weitere Temperaturanalyse, welche in Kapitel 9.2 beschrieben ist, herangezogen. Der dafür gewählte Bereich ist in **Abbildung 8-1** eingezeichnet. Weiters wurden einzelne Ausreißer mit einer Abweichung von mehr als 50 °C, aus den Datenreihen entfernt, da eine solch große sprunghafte Abweichung der Temperatur nicht zu erwarten ist und auf einen Fehler in der Messdatenerfassung hinweist. In **Abbildung 8-2** ist der Temperaturverlauf des zweiten Versuchs, WSG19_C01_V02 dargestellt. Die Dauer des Granulationsvorgangs ist, aufgrund des verringerten Bohrungsdurchmessers und der damit verbundenen Halbierung der Lochgröße, mehr als doppelt so lange wie die des vorherigen Versuchs.

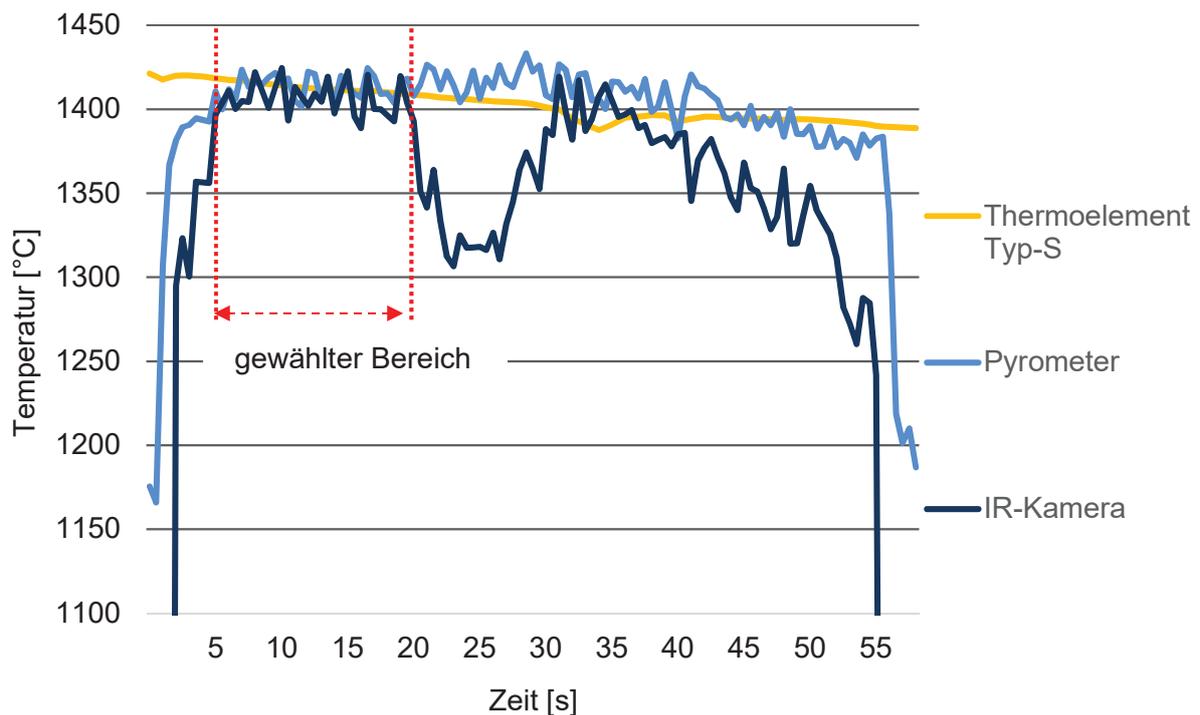


Abbildung 8-2: Temperaturlaufzeichnung WSG19_C01_V02
mit den unterschiedlichen Messmethoden

Es ist zu sehen, dass in den Daten der IR-Kamera in der Mitte des Versuchs die Werte um bis zu 100 °C tiefer sind als die Vergleichswerte. Der genaue Grund für diesen Sprung konnte nicht eruiert werden, somit wird der Fehler als nichtdefinierte Störung der Messung eingeordnet. Um die Daten mit jenen des vorherigen Versuchs vergleichen zu können, wurden, für die weitere Auswertung der Temperaturen, die Daten deshalb auf denselben Zeitraum gekürzt, wie beim vorherigen Versuch.

8.2 Materialanalysen

Siebanalyse

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden, für die Urproben, sowie die Produkte der Versuche, Siebanalysen mittels eines auf einer Vibrationssiebmaschine befestigten Siebturms durchgeführt. Dazu wurden sechs genormte Maschenweiten [63], welche in **Tabelle 8-1** aufgelistet sind, eingesetzt. Das Analysenverfahren sowie die Maschenweiten sind in der ÖNORM EN 933-1 [63] und 933-2 [64] beschrieben.

Tabelle 8-1: Maschenweiten für die Siebanalyse

Siebnummer	Einheit	Maschenweite
1	mm	3,15
2	mm	1
3	mm	0,5
4	µm	250
5	µm	125
6	µm	63

In **Abbildung 8-3** sind die Rückstände auf den einzelnen Sieben für WSG19_002, das Produkt des ersten Rinnenversuchs zu sehen.

**Abbildung 8-3:** Siebrückstände WSG19_002

In Kapitel 9.3 sind die Ergebnisse der einzelnen Siebanalysen, jeweils in einem Histogramm dargestellt und anschließend in einem Sieblinien-Diagramm, samt üblicher Spannweiten für Hüttensande, zusammengefasst.

Chemische Analyse

Aus Zeitgründen wurden nur die ersten fünf Proben zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung in ein Labor eingeschickt und untersucht. Diskussion und Auflistung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 9.3.

Zementtechnologische Analyse

Ebenso untersucht wurde die in Kapitel 4.3 beschriebene Erhärtung und Festigkeitsentwicklung, von aus dem Granulat erzeugten Zementen. Die Druckfestigkeit und

Biegezugfestigkeit wurden nach DIN EN 196-1 [3] untersucht. Die Zusammensetzung des Bindemittelgemisches für die Analyse lag bei den folgenden Massenanteilen: 75 % Einheitszement und 25 % Hüttensand, also gemahlenem Granulat. Der Einheitszement war zum Teil grob und zum Teil fein, im Verhältnis 2:1. Als Form sind in der Norm Prismen mit der Abmessung von 4 x 4 x 16 cm vorgegeben. Für die fünf Proben wurden die Festigkeiten nach 7 und 28 Tagen gemessen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Kapitel 9.3 dargestellt und analysiert.

Glasgehalt

Auch diese Bestimmung des Glasgehalts erfolgte zusammen mit der chemischen Analyse im Labor. Die Ergebnisse sind in Kapitel 9.4 dargestellt und erörtert.

9 Ergebnisse und Diskussion

Hier werden die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Diese werden in weiterer Folge genauer beleuchtet und daraus weiterführende Aussagen getroffen.

9.1 Erkenntnisse aus den Einzelversuchen

In diesem Kapitel werden durchgeführte Adaptionen an der Anlage und ihre Gründe erörtert, sowie Beobachtungen während der Versuche beschrieben.

WSG19_C01_V01

Beim ersten Rinnenversuch wurde mit der Heizleistung nahe des Maximums der Schmelzanlage (InduMelt) gefahren, um den Aufheizvorgang, er lag bei 2,75 Stunden, möglichst kurz zu halten. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass die Alterung des Grafit des Schmelzaufbaus an den Außenseiten dadurch minimiert werden kann. Dabei wurde eine Schmelztemperatur von rund 1450 °C erreicht. Die Dauer des Granulationsvorgangs lag beim ersten Versuch bei 21 Sekunden. Während des gesamten Vorgangs konnte ein markanter Schwefelgeruch wahrgenommen werden, welcher in dieser Intensität bei keinem der weiteren Versuche bemerkt wurde. Die Reaktionen und Gründe von Schwefelemissionen sind in Kapitel 3.4 beschrieben. Die große Oberfläche, die sich aus der hohen Porosität des Granulats ergibt, wird als Grund dafür angenommen.

Beim gewonnenen Produkt ist auffällig, dass es sehr porös ist und bereits bei leichtem Druck zerfällt. Das Erstarrungsbild ist glasig, jedoch mit Lufteinschlüssen und vielen kleinen Rissen.

Teilweise sind im Sieb auch feine Fäden zu erkennen. In **Abbildung 9-1** ist ein Ausschnitt des Videomaterials während des Granulationsvorgangs dargestellt. Das Zusammentreffen von Schlacken- und Wasserstrahl in der Rinne sowie die Verteilung der Schlacke im Wasser sind darauf zu erkennen.



Abbildung 9-1: Rinne während des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V01

Ausgehend von der Erstanalyse des Produktes sollte, im Zuge der folgenden Versuche, die hohe Porosität zu verringern. Nach dem Versuch wurden deshalb mögliche Ursachen zusammengefasst und daraus Verbesserungen für die Anlage erarbeitet. Diese sind in **Tabelle 9-1** aufgelistet.

Tabelle 9-1: Mögliche Ursachen für die hohe Porosität des Granulats von WSG19_C01_V01 und daraus folgende Verbesserungsvorschläge

Ursache	Verbesserungsvorschlag
<ul style="list-style-type: none"> ○ Effektives Wasser/Schlacke–Verhältnis zu gering, da Wasserstrahl zu breit und nur geringer Anteil direkt auf Schlacke trifft ○ Zu viel Luft ins Becken eingetragen → führt zum Aufschäumen ○ Zu geringe Wassergeschwindigkeit, um die Schlacke gut zu zerstäuben 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Steilheit der Rinne erhöhen → Erhalt besserer Durchmischung ○ Verringerung des Bohrungsdurchmessers, um das Wasser/Schlacke–Verhältnis zu erhöhen ○ Verbesserung der Wassereindüsung

WSG19_C01_V02

Beim zweiten Rinnenversuch wurde erneut mit hoher Heizleistung gefahren. Der Aufheizvorgang lag bei 2,33 Stunden. In dieser Zeit wurde eine Schmelztemperatur von rund 1410 °C erreicht. Die Dauer des Granulationsvorgangs lag beim zweiten Versuch aufgrund des verringerten Bohrungsdurchmessers bei 54 Sekunden. Das gewonnene Granulat wirkt kompakter, ist jedoch nach wie vor porös. Im Produkt waren kaum mehr feine Fäden erkennbar. Aufgrund von Beobachtungen und durch Sichtung des Videomaterials ist zu erkennen, dass die Durchmischung von Wasser und Schlacke, wie in **Abbildung 9-2** zu sehen, nach wie vor nicht optimal funktionierte. Teilweise traf die Schlacke nur kurz auf den Wasserstrahl, um dann in verschiedenen Richtungen wegzufliegen, ohne weiter vom Wasser umströmt zu werden. Dies ist in **Abbildung 9-3** am Ende des Versuches zu erkennen.



Abbildung 9-2: Rinne während des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V02



Abbildung 9-3: Rinne gegen Ende des Granulationsvorgangs von WSG19_C01_V02

Aufgrund dessen hatte eine Verbesserung der Umströmung der Schlacke mit Wassers Priorität. Eine einfache Adaptierung der Rinne, durch einen zweiten Wasserstrahl von der gegenüberliegenden Seite der vorhandenen Düse kommend, konnte, baulich aufgrund der vorherrschenden Gegebenheiten nicht umgesetzt werden. Eine weitere Verbesserung war durch ein System mit Ringdüse zu erwarten, welches bereits bei vergleichbaren Versuchen erfolgreich zum Einsatz gekommen war, siehe Ehrenberg A. [59]. Im Anhang ist das dazu ausgearbeitete Konzept genauer beschrieben. Die Fertigung dieses Konzepts war aufgrund des Arbeitsumfangs im Rahmen der Arbeit nicht vorgesehen. Um die Überlegungen dennoch zu untermauern, wurde ein vereinfachtes Düsenkonzept entwickelt, welches in Kapitel 7.3 beschrieben ist.

WSG19_C02_V01

Beim ersten Düsenversuch wurde erneut mit hoher Heizleistung gefahren. Da die Heizleistung mit sinkender Dicke der Tiegelwand steigt, wurde bereits nach 1,5 Stunden abgestochen. Die Dauer des Granulationsvorgangs lag bei 186 Sekunden. Um die Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten und die Granulationsdauer nicht zu lange und das damit einhergehende Sinken der Temperatur nicht zu groß werden zu lassen, wurde die 10 mm Bohrung als Standard gesetzt.

Aufgrund eines technischen Fehlers funktionierte die Messung mit dem Pyrometer nicht. Auch das Thermoelement Typ-S im Stopfen lieferte, ab einer angezeigten Temperatur von etwas über 1300 °C keine Ergebnisse mehr. Weiters konnten auch die Messwerte der Wärmebildkamera, aufgrund einer Verstellung von Eingabeparametern, nicht für eine Temperatúrauswertung herangezogen werden. Auch mit dem zweiten Thermoelement Typ-S konnte keine Schlackentemperatur gemessen werden, da das Loch für die Messung aufgrund der hohen Temperaturen im Schmelzaufbau durch teilweises Schmelzen der Keramikfasermatte nicht mehr zugänglich war. Um die Funktionalität der Thermoelemente zu gewährleisten, ist es notwendig, den Aufheizvorgang bei folgenden Versuchen zu verlangsamen. Dadurch verringert sich der Temperaturunterschied zwischen Schmelzaufbau und Schlacke und damit einhergehend die Maximaltemperatur des Schmelzaufbaus.

Das Produkt ist merkbar feiner und weniger porös, als bei den Rinnenversuchen. Grund dafür ist eine verbesserte Umströmung und Zerteilung des Schlackenstrahls durch das Düsenkonzept, wie in **Abbildung 9-4** zu sehen ist.



Abbildung 9-4: Düse während des Granulationsvorgangs von WSG19_C02_V01

WSG19_C02_V02

Bei diesem Düsenversuch mit modifizierter Schlacke konnte die Schmelztemperatur nicht erreicht werden, wodurch kein Granulat erzeugt wurde. Durch Zugabe von CaO, war die Basizität der Schlacke erhöht worden. Dadurch wurde die Schmelztemperatur auf 1500 – 1600 °C erhöht, diese Temperatur konnte mit den gewählten Anlageneinstellungen der InduMelt nicht erreicht werden. Für zukünftige Modifikation ist deshalb eine Überprüfung der Schmelztemperatur in einem quaternären System aus CaO, SiO₂, MgO und Al₂O₃ und daraus eine Anpassung der Leistungskurve der InduMelt vorgesehen.

WSG19_C02_V03

Beim dritten Düsenversuch wurde mit weitaus niedrigerer Heizleistung gefahren, wodurch der Abstich erst nach rund 6 Stunden erfolgte. Durch den niedrigeren Temperaturunterschied aufgrund des langsameren Aufheizvorgangs funktionierte das Thermoelement im Stopfen während des gesamten Versuchs. Ziel war es, die Schlackentemperatur durch die im Stopfen gemessene Temperatur zu regeln. Der Zielwert lag bei 1400 °C. Deshalb wurde die Temperatur auf 1410 °C gebracht. In den knapp 2 Minuten bis zum Abstich kühlte das Thermoelement auf etwa 1370 °C ab. Diese Temperatur entsprach in weiterer Folge der durch die weiteren Messmethoden gemessenen Schlackentemperatur. Ein Einstellen der Temperatur durch das zusätzliche Thermoelement im Stopfen ist somit möglich. Für eine Temperatur der Schmelze von 1400 °C, wird die Stopfentemperatur auf etwa 1450 °C geschätzt. Der Unterschied lässt sich durch die induktive Erwärmung des Grafits und die Abstrahlung der heißeren Zonen des Deckels und des Tiegels auf den Stopfen erklären. Die exakte Temperaturdifferenz gilt es jedoch in weiteren Versuchen zu verifizieren.

Außerdem ist es vorgesehen, beim nächsten Versuch die Grafittemperatur mit zwei zusätzlichen Thermoelementen vom Typ-S aufzuzeichnen. Eine Skizze des dazugehörigen Aufbaus ist in **Abbildung 9-5** dargestellt. Durch die zusätzlichen Thermoelemente soll die Temperaturverteilung im Schmelzaufbau erfasst werden. Außerdem ist eine Kontrolle der Deckeltemperatur, zum Schutz vor der keramischen Hochtemperaturfasermatte sowie des Thermoelements im Stopfen, möglich.

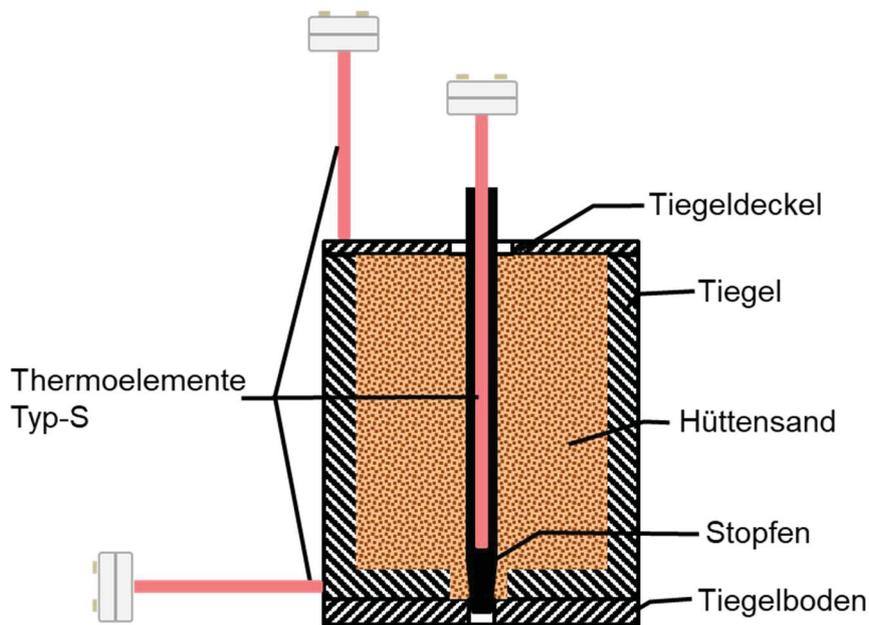


Abbildung 9-5: Platzierung der zusätzlichen Thermoelemente zur Temperaturerfassung am Schmelzaufbau

Die Dauer des durchgängigen Granulationsvorgangs lag bei 20 Sekunden, danach tropfte die Schlacke für rund 7 Minuten in immer größer werdenden Abständen noch nach. Umso wichtiger ist die exakte Einstellung der Temperatur in der Schmelze um reproduzierbare Ergebnisse liefern zu können.

Allgemeines

Bei den ersten beiden Versuchen reichte der Auffangbehälter nicht aus, um die Pumpe und das nachfolgenden Messgeräte ausreichend vor den Partikeln zu schützen. Durch Verwirbelungen und die hohe Wassergeschwindigkeit gelangten Teile des Granulats über das Sieb hinaus in die Wanne. Nachdem bereits kleine Partikel die Funktionsfähigkeit des Durchflussmessgerätes stark beeinträchtigen, wurde ein zusätzliches Filtersieb beim Ausfluss der Wanne installiert.

Dabei handelt es sich um ein Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 4 cm. Um einen ausreichenden Durchfluss zu erreichen, wurde das Rohr auf der Seite aufgeschnitten. Die Öffnungen sind mit dem Siebgitter mit einer Maschenweite von 200 µm verschlossen. Die gesamte Konstruktion ist mithilfe einer Ringschraube, sowie einer Gewindestange beim Ausfluss der Wanne festgeschraubt und in **Abbildung 9-6** dargestellt.



Abbildung 9-6: Filtersieb beim Ausfluss

Beim letzten Versuch wurde vor allem aufgrund der Dauer beobachtet, dass das Sieb beim Ausfluss durch feines Material teilweise verschlossen wurde und die Pumpe dadurch nicht mehr die benötigte Wassermenge ansaugen konnte. Aus diesem Grund soll vor dem nächsten Versuch das Sieb adaptiert und die Ansaugfläche für die Pumpe vergrößert werden.

9.2 Temperaturerfassung

Im Folgenden sind die Temperaturwerte der einzelnen Messmethode analysiert und ihre Abweichungen beschrieben. In **Abbildung 9-7** sind die Daten in einem Boxplot-Diagramm dargestellt. Die Temperaturmessungen erfolgten mit einem Thermoelement vom Typ-S in der Schmelze, sowie von einer IR-Kamera und einem Quotientenpyrometer am Schlackenstrahl. Im Diagramm sind die Medianwerte, das obere- und untere Quartil sowie Maximum und Minimum der ersten beiden Versuche eingezeichnet. Es wurden für beide Versuche dieselbe Anzahl an Messwerten herangezogen. Die Auswahl der Messwerte ist in Kapitel 8.1 beschrieben.

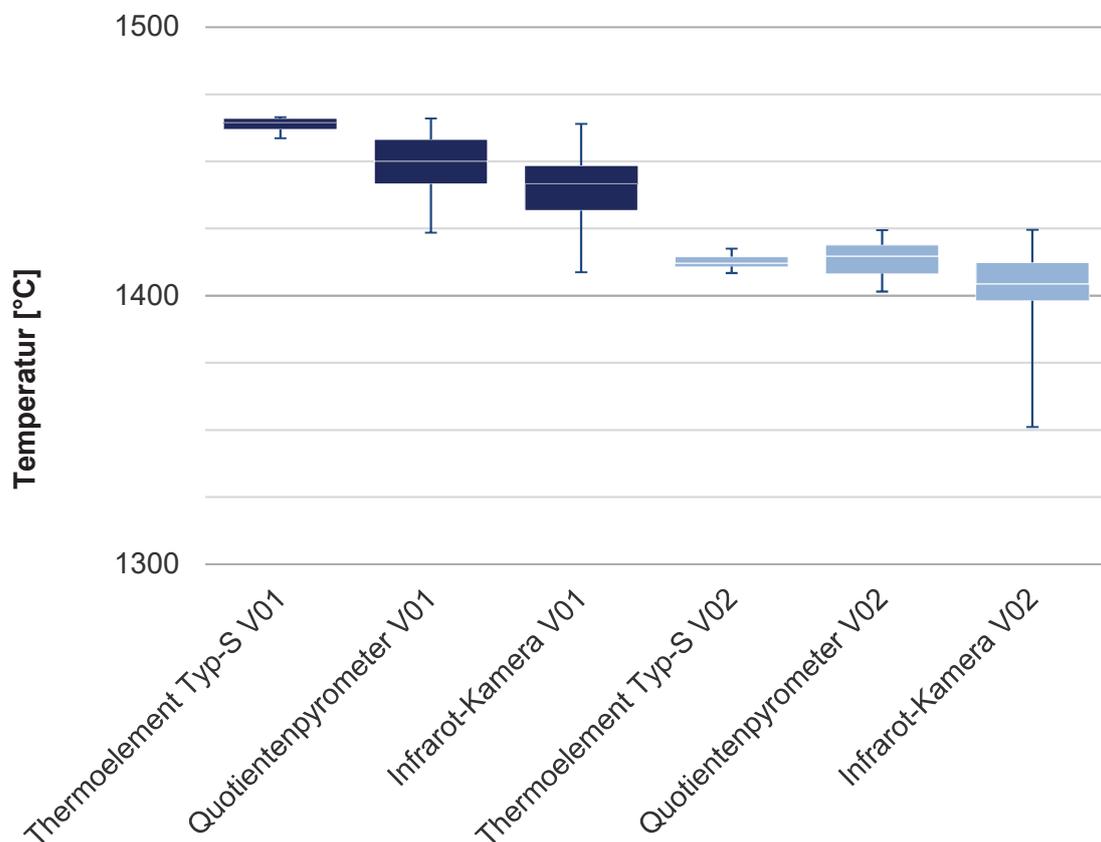


Abbildung 9-7: Boxplot-Diagramm: Temperaturmessungen von WSG19_C01_V01/V02

Wie die Auswahl der Werte erfolgte, ist in Kapitel 8.1 beschrieben. In **Tabelle 9-2** sind die Medianwerte aus der obigen Grafik zusammengefasst.

Tabelle 9-2: Medianwerte der unterschiedlichen Messmethoden für WSG19_C01_V01/V02

Versuch	Einheit	Thermoelement Typ-S	Pyrometer	IR-Kamera
WSG19_C01_V01	°C	1464	1450	1442
WSG19_C01_V02	°C	1412	1415	1404

Allgemein lässt sich ableiten, dass die Medianwerte der unterschiedlichen Messgeräte für einen Versuch nahe beisammen liegen. Bei einer maximalen berechneten Abweichung von rund 2 % sind die Werte plausibel. Es kann daraus geschlossen werden, dass jede Messmethode zur Messung der Temperatur herangezogen werden kann.

Die Streuung ist bei der gleichen Anzahl an Messwerten bei beiden Versuchen, für die jeweilige Messmethode, ähnlich. Die Temperatur des Thermoelements erfährt bei beiden Versuchen die geringsten Sprünge, da sich das Thermoelement im Inneren des Schmelzaufbaus befindet, wo die Temperatur selbst nach dem Auslaufen der Schlacke keine großen Änderungen erfährt. Das Quotientenpyrometer, welches die Temperatur des Schlackenstrahls direkt nach dem Austritt aus dem Schmelzaufbau ausgibt, streut etwas mehr. Bezüglich des Quotientenpyrometers ist zu erwähnen, dass es sich beim verwendeten Gerät um ein Punktpyrometer handelt, welches die Temperatur nur an einem bestimmten eingestellten Messpunkt erfasst. Dies ist für die Temperaturmessung eines Schlackenstrahls nicht optimal. Durch eine ausreichend große Entfernung und eine exakte Einstellung ist trotzdem eine Erfassung der Temperaturen möglich. Für weitere Versuche wäre dennoch ein Gießstrahlpyrometer von Vorteil. Dabei handelt es sich um ein Linienpyrometer. Es verfügt somit nicht nur über einen Messpunkt, sondern über einen, Messbereich aus dem der Maximalwert ausgegeben wird.

Die Medianwerte der Infrarotkamera liegen bei beiden Versuchen um rund 10 °C niedriger als die des Quotientenpyrometers. Außerdem ist bei den Werten der IR-Kamera die Streuung am größten. So liegt die vom Hersteller angegebene Messunsicherheit bei der IR-Kamera bei 2 %, beim Pyrometer bei 1 % und beim Thermoelement bei 0,25 %. Für das Quotientenpyrometer und die IR-Kamera gilt, dass der Emissionskoeffizient der Schlacke manuell einzugeben ist. Dieser Koeffizient ist stark von der Temperatur abhängig. Da jedoch keine exakten Funktionen für Hochofenschlacke vorhanden sind, wird dieser konstant bei einem Wert von 0,85 festgelegt. [65]

9.3 Materialanalysen

Siebanalyse

In folgenden sind die Ergebnisse, der in Kapitel 8.2 beschriebenen Siebanalyse aufbereitet und analysiert. In **Abbildung 9-8** und **Abbildung 9-9** sind die Korngrößenverteilungen der beiden Urproben dargestellt.

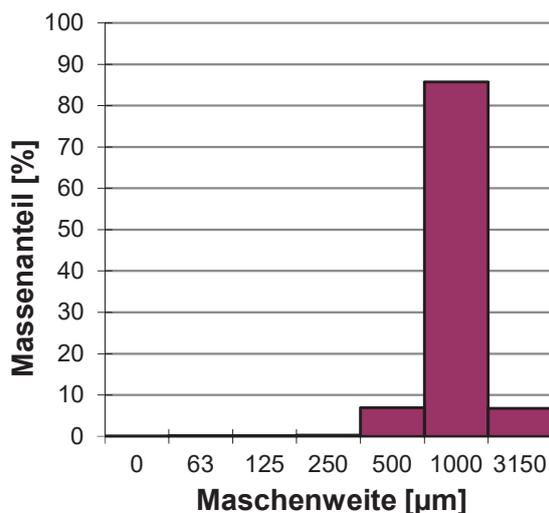


Abbildung 9-8: Korngrößenverteilung
WSG19_01: Urprobe HÜS IHW 01

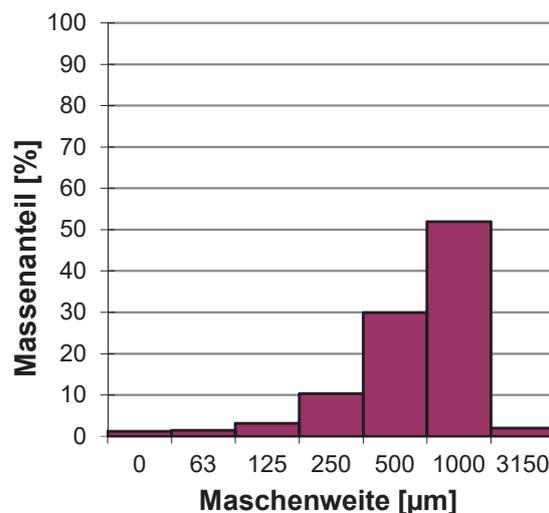


Abbildung 9-9: Korngrößenverteilung
WSG19_004: Urprobe HÜS IHW 02

Schon bei den eingesetzten Hüttensanden ist ein wesentlicher Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Urprobe zu erkennen. So ist ersterer sehr homogen mit einem Großteil der Partikel in Bereich zwischen 1 mm und 3,15 mm, während zweiterer weiter gestreut ist und genauso über einen wesentlichen Anteil kleinerer Körner verfügt. Es ist jedoch festzuhalten, dass die jeweiligen Probenahmen nicht selbst durchgeführt wurden. Deshalb kann nicht gewährleistet werden, dass eine repräsentative Probenahme ohne vorherige Entmischung stattgefunden hat. Für die Produkte der Nassgranulationsversuche wurde das gesamte Granulat analysiert. Ein Teil der feinen Partikel konnte bei den Versuchen nicht im Sieb aufgefangen werden und lagerte sich am Boden der Wanne an. Soweit es möglich war, wurde auch dieser Feinanteil dem Produkt wieder zugeführt.

In **Abbildung 9-10** und **Abbildung 9-11** sind die Korngrößenverteilungen der Rinnenversuche dargestellt. Beide Versuche haben die erste Urprobe, WSG19_001, als Grundlage. Die Korngrößen unterscheiden sich nur unwesentlich, wobei beim zweiten Versuch der Hüttensand etwas feiner ist. Anzumerken ist, dass vor der Siebung wesentlich mehr

Partikel mit einer Größe > 3,15 mm vorhanden waren. Aufgrund der bereits beschriebenen Porosität wurden sie jedoch, bei der Siebanalyse, in kleinere Körner zerteilt.

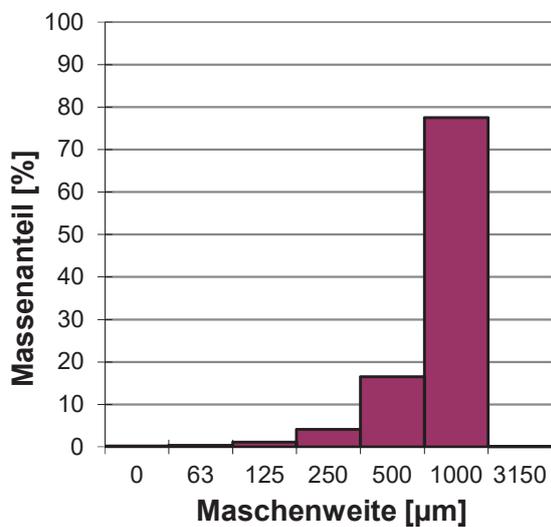


Abbildung 9-10: Korngrößenverteilung WSG19_002

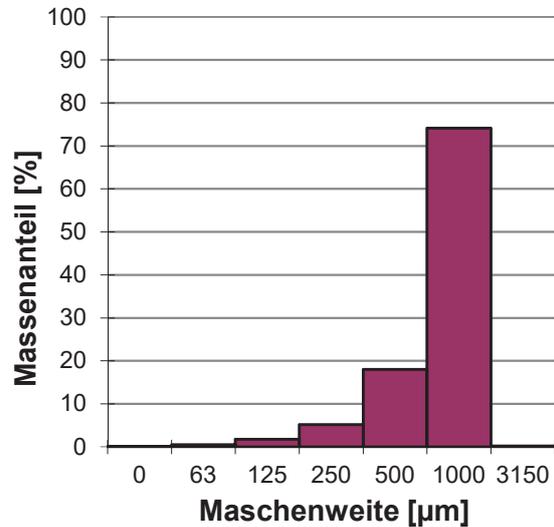


Abbildung 9-11: Korngrößenverteilung WSG19_003

In **Abbildung 9-12** und **Abbildung 9-13** sind die Korngrößenverteilungen der Versuche mit Düsenkonzept dargestellt. Diese Granulate wurden aus der zweiten Urprobe, WSG19_04, gewonnen. Die Korngrößenverteilung ist bei diesem Konzept wesentlich feiner, als bei den vorangegangenen Versuchen. Zwischen der Verteilung der beiden Ringdüsen-Versuche ist ein Unterschied zu erkennen. So enthält WSG19_007 beinahe um die Hälfte mehr Partikel > 1 mm. Die Unterschiede ergeben sich durch verschiedene Schlackentemperaturen und Bohrungsdurchmesser für das Abstichloch.

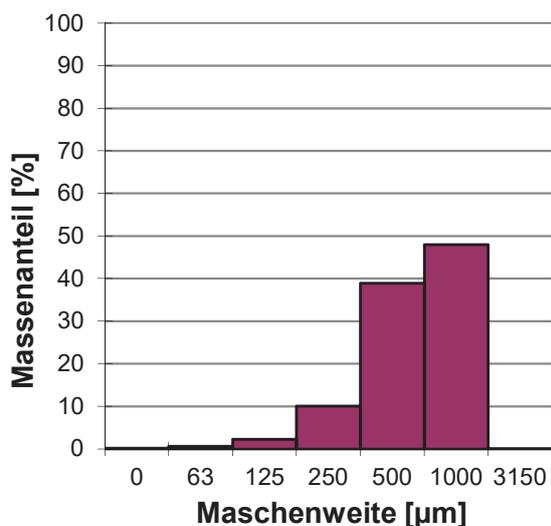


Abbildung 9-12: Korngrößenverteilung WSG19_006

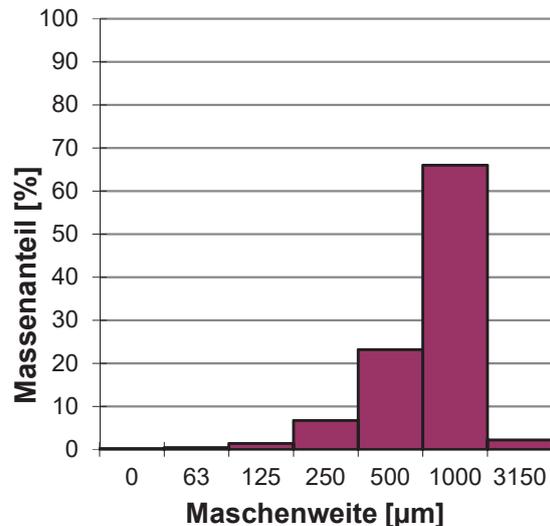


Abbildung 9-13: Korngrößenverteilung WSG19_007

In **Abbildung 9-14** sind die einzelnen Sieblinien der Urproben und der Versuche dargestellt. Weiters sind Ober- und Untergrenze herkömmlicher ungemahlener Hüttensande eingezeichnet. [66] Die Maschenweiten sind dafür logarithmisch auf der x-Achse aufgetragen.

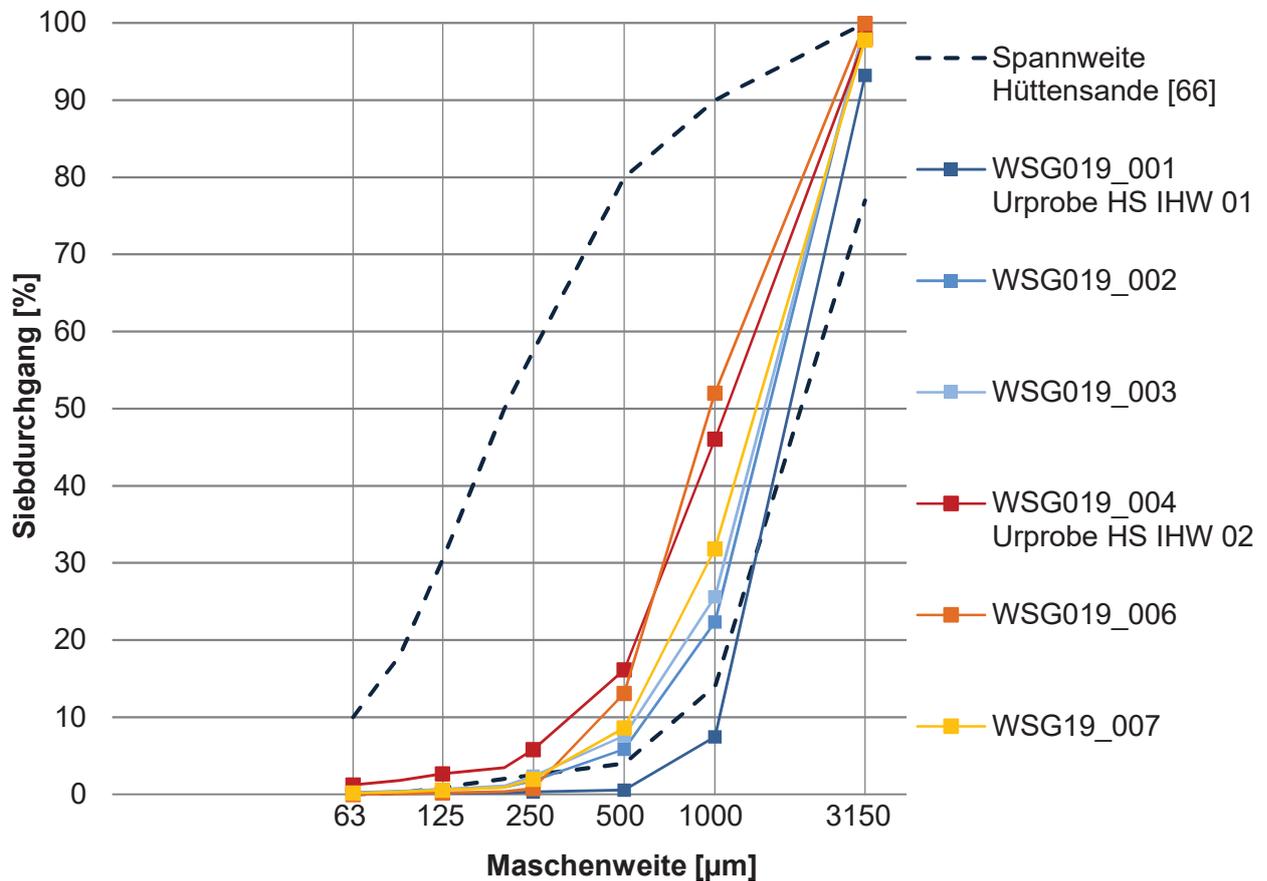


Abbildung 9-14: Sieblinie der untersuchten Hüttensande samt Spannweiten herkömmlicher Hüttensande [66]

Bis auf die Urprobe HÜS IHW 01 befinden sich die Sieblinien fast zur Gänze in den Spannweiten nach Ehrenberg [66]. Dahingehend ist jedoch festzuhalten, dass die Probenahme in der Literatur nicht beschrieben ist. So ist es möglich, dass der Feinanteil durch Lagerung und Transport und die damit verbundene mechanische Beanspruchung erhöht wurde. Weiters wird die, bereits zuvor beschriebene, feiner werdende Korngrößenverteilung von den Rinnenversuchen zu den Düsenversuchen ersichtlich. Außerdem sind die Produkte WSG19_003 und WSG19_006, welche mit einem 7,2 mm Bohrungsdurchmesser granuliert wurden, feiner verteilt, als die Produkte WSG19_002 und WSG19_007, bei denen der Bohrungsdurchmesser bei 10 mm lag.

Chemische Analyse

In **Tabelle 9-3** sind die Gehalte der, nach der Produktspezifikation für Hüttensand, wichtigsten Elemente und Verbindungen, der analysierten Proben aufgelistet.

Tabelle 9-3: Chemische Zusammensetzung der Proben

		WSG19_001	WSG19_002	WSG19_003	WSG19_004	WSG19_005
CaO	[%]	33,9	34,0	34,1	31,3	31,5
SiO ₂	[%]	37,6	37,3	37,4	37,3	37,7
MgO	[%]	9,94	9,81	9,87	11,4	11,3
Al ₂ O ₃	[%]	11,6	11,5	11,5	12,1	12,2
S	[%]	0,72	0,72	0,73	0,61	0,6
Mn	[%]	1,19	1,17	1,23	2,16	1,95
Fe	[%]	0,43	0,25	0,39	0,78	0,29

Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen den jeweiligen Urproben und den daraus hergestellten Granulationsprodukten ist wie zu erwarten minimal. Deshalb kann zur Beurteilung des Hüttensands nach den Kennzahlen der ÖNORM EN 197-1 [3] jeweils die Urprobe herangezogen werden. Die Kennzahlen samt Zielwerten, sowie die Werte der Proben sind in **Tabelle 9-4** aufgelistet.

Tabelle 9-4: Kennzahlen des Hüttensands nach ÖNORM EN 197-1

Kennzahl	Zielwert	WSG19_001	WSG19_004
$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$	> 1	1,17	1,14
w(CaO + MgO + SiO ₂)	> 2/3	0,81	0,80

Die Hüttensande erreichen die Zielwerte, die im integrierten Hüttenwerk durch eine laufende Qualitätskontrolle sichergestellt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Urproben ist gering, da sich der etwas höhere CaO - Gehalt in WSG19_001, zu etwas höheren MgO - Gehalten in WSG19_004 verschiebt.

Zementtechnologische Analyse

Für aus den gemahlene Granulaten hergestellte Portlandhüttenzemente wurden nach dem in Kapitel 8.2 beschriebenen Verfahren, sowohl die Druckfestigkeit als auch die Biegezugfestigkeit nach sieben, sowie 28 Tagen gemessen. In **Abbildung 9-15** sind die Druckfestigkeitswerte des Einheitszements und der Portlandhüttenzemente, welche zu 75 % aus diesem Einheitszement und zu 25 % aus gemahlendem Hüttsand hergestellt wurden, dargestellt.

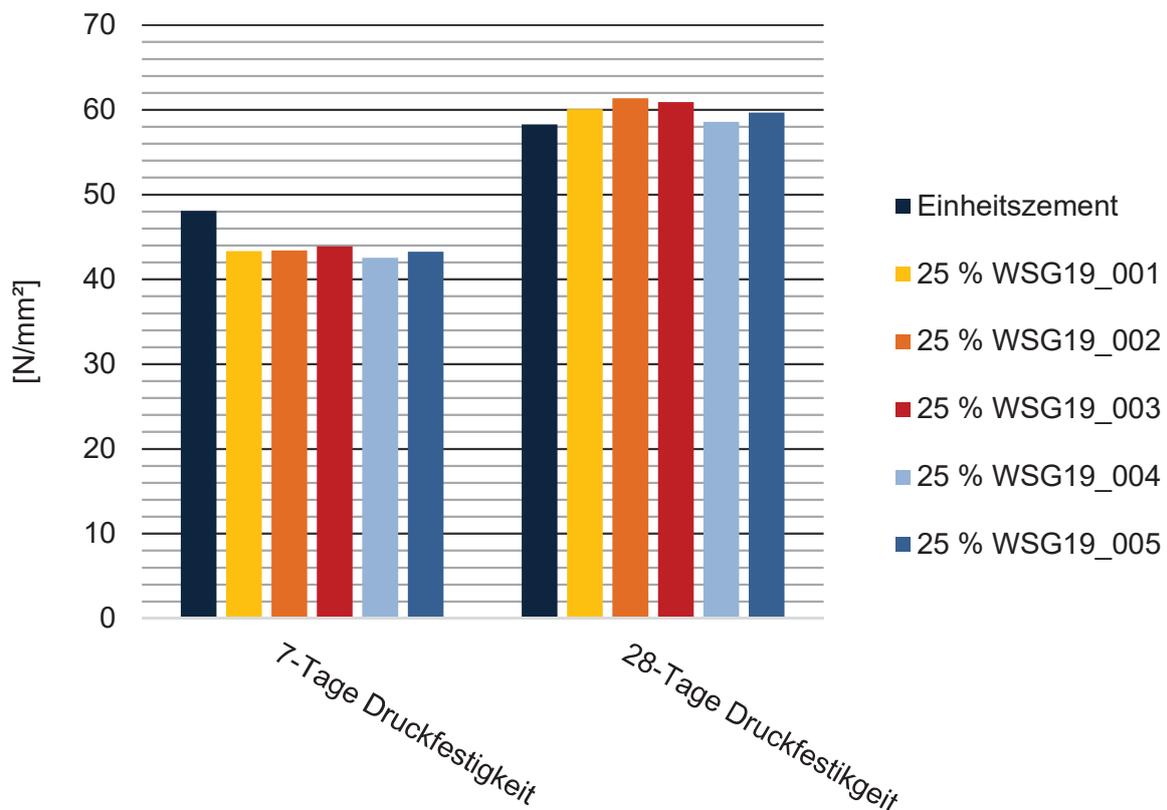


Abbildung 9-15: 7- und 28-Tage Druckfestigkeitswerte des Einheitszements und der Portlandhüttenzemente

Bei der 7-Tage Druckfestigkeit liegen die Portlandhüttenzemente eng zusammen bei einem Wert, der in etwa 90 % von jenem des Einheitszements entspricht. Die Zemente haben somit bereits nach sieben Tagen, auch im Vergleich mit den Werten des Zements mit 20 % Hüttsandgehalt, welcher in **Abbildung 4-2** gezeigt ist, hohe Festigkeitswerte erreicht.

Aus der Grafik lässt sich zudem die bereits in Kapitel 4.3 beschriebene langsamere Nacherhärtung hüttsandhaltiger Zemente im Vergleich zu Einheitszement erkennen. So sind die Druckfestigkeitswerte der Portlandhüttenzemente, von sieben auf 28 Tage, mit einer

Zunahme um rund die Hälfte, wesentlich stärker gestiegen, als jener des Einheitszement, welcher um rund ein Fünftel zulegte. Insgesamt wurden von den Portlandhüttenzementen höhere Druckfestigkeitswerte erreicht als für den Einheitszement. Außerdem ist zu erwähnen, dass, für im Technikum hergestellte Granulate, die Werte etwas höher liegen, als die der Urproben.

In **Abbildung 9-16** sind die sieben- und 28-Tage Biegezugfestigkeitswerte des Einheitszements und der bereits beschriebenen Portlandhüttenzemente dargestellt.

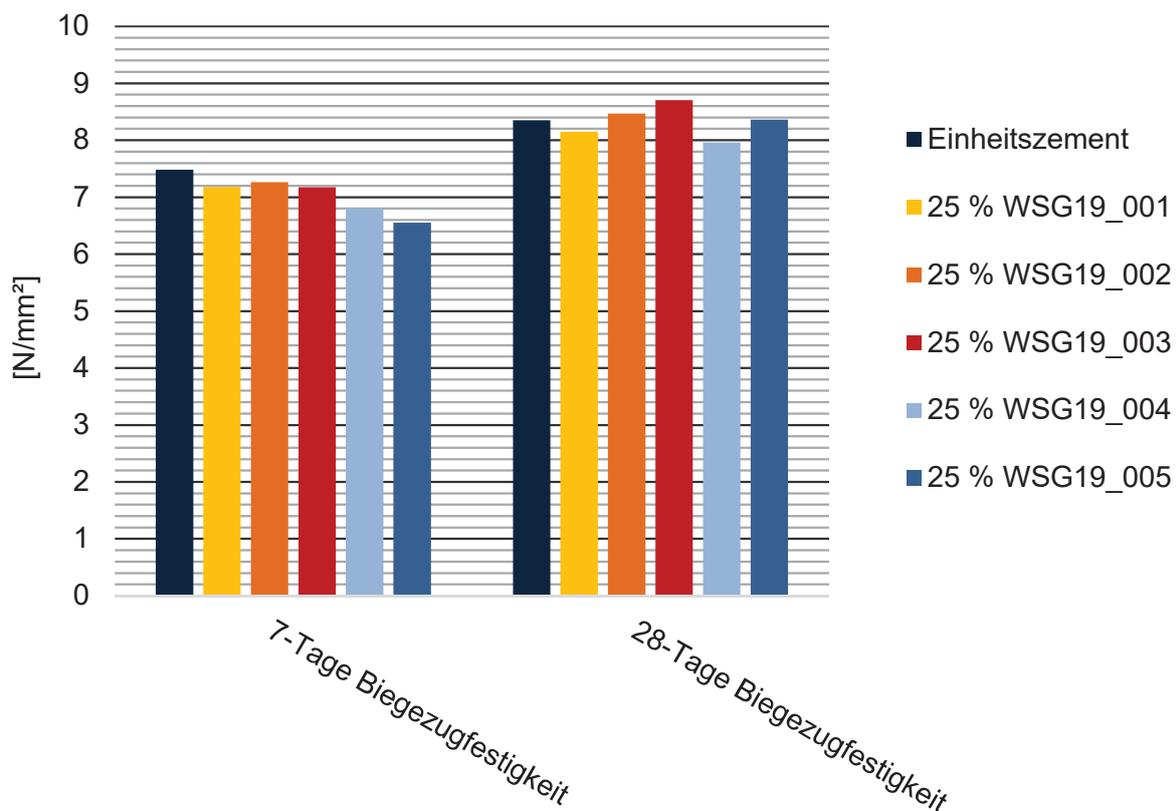


Abbildung 9-16: 7- und 28-Tage Biegezugfestigkeitswerte des Einheitszements und der Portlandhüttenzemente

Auch bei der Biegezugfestigkeit erreichen die Festigkeitswerte bereits nach sieben Tagen Werte, die nicht weit unter jenen des Einheitszement liegen. Hierbei ist jedoch ein Unterschied zwischen den ersten drei Proben, und den letzten beiden zu erkennen. Dies ist wahrscheinlich auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung zurückzuführen. Bei der 28-Tage Biegezugfestigkeit ist erneut zu sehen, dass die Werte der Portlandhüttenzemente, welche aus im Technikum granulierten Schlacken hergestellt wurden, höher liegen als die der Urproben. So erreichten einzig die Portlandhüttenzemente aus den Urproben knapp nicht die Biegezugfestigkeitswerte des Einheitszements.

9.4 Optische Bewertung und Glasgehalt

Die in diesem Kapitel gezeigten Abbildungen des Granulats sind im Zusammenhang mit den Daten aus Kapitel 9.3 zu betrachten, da für die Fotos zwar versucht wurde die Partikelgrößenverteilung abzubilden, es durch Entmischungsvorgänge jedoch nicht exakt möglich ist. Die Unterschiede in der Farbe gründen sich in der unterschiedlichen Lichtbrechung, welche unter anderem abhängig von Lagerung und Transport verändert.

In **Abbildung 9-17** und **Abbildung 9-18** sind die getrockneten Nassgranulate der Rinnenversuche, jeweils im selben Maßstab abgebildet.



Abbildung 9-17: Nassgranulat WSG19_002



Abbildung 9-18: Nassgranulat WSG19_003

Das Erscheinungsbild der beiden Granulate unterscheidet sich sowohl untereinander, als auch im Vergleich zur in **Abbildung 6-1** dargestellten Urprobe. Das im Technikum hergestellte Granulat WSG19_002 verfügt über eine große Anzahl von Körnern mit einer, durch die Luftporenschlüsse, hohen Porosität. Die Körner von WSG19_003 sind kompakter, verfügen aber nach wie vor über Spannungsrisse in den einzelnen Partikeln. Die Verschiedenheit ergibt sich aus dem unterschiedlichen Bohrungsdurchmesser und der Differenz in der Schlackentemperatur.

In **Abbildung 9-17** und **Abbildung 9-18** sind die getrockneten Granulate der erfolgreichen Düsenversuche, jeweils im selben Maßstab abgebildet.



Abbildung 9-19: Nassgranulat WSG19_005



Abbildung 9-20: Nassgranulat WSG19_007

Im Vergleich mit der in **Abbildung 6-2** dargestellten Urprobe ist ein klarer Unterschied ersichtlich. Die beiden Granulate der Düsenversuche sind sich optisch ähnlicher als die der Rinnenversuche. Beide erscheinen, durch eine rundere Form und ohne die bei den vorherigen Versuchen erkennbaren Spannungsrisse, kompakter.

Glasgehalt

Die Ergebnisse der in einem Labor durchgeführten Bestimmung der Glasgehalte sind in **Tabelle 9-5** zu sehen.

Tabelle 9-5: Glasgehalt der unterschiedlichen Hüttensande

	WSG19_001	WSG19_002	WSG19_003	WSG19_004	WSG19_005
Glasgehalt in %	100	100	100	97	100

Wie erwartet liegen die Glasgehalte aller Proben deutlich über 90 %. Einzig WSG19_004, die Urprobe IHW 02, liegt nicht zu 100 % glasig vor und verfügt über einen kleinen teilglasigen Anteil von 3 %, welcher sich jedoch wie in Kapitel 4.1 erklärt, nicht negativ auf die Qualität des Zements auswirkt. Alle Granulate genügen den Vorgaben der ÖNORM EN 197-1 [3], indem sie zu mehr als zwei Drittel glasig erstarrt sind.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich in erster Linie mit der Entstehung und den Behandlungsmöglichkeiten von Hochofenschlacken und deren Verwertung in der Zementindustrie. Schwerpunkt liegt dabei auf der Nassgranulation welche den aktuellen Stand der Technik zur Hüttensandproduktion repräsentiert. Auf Basis des INBA[®]-Verfahrens wurde für eine induktive Schmelzanlage eine Nassgranulationsanlage im Technikumsmaßstab, mit vorheriger sicherheitstechnischer Betrachtung, geplant und anschließend gebaut. Die Dimensionierung der Bauteile erfolgte anhand von vergleichbaren Anlagen und durch Werte aus der Literatur.

Nach erfolgreicher Kaltinbetriebnahme und der damit verbundenen Funktionsprüfung der Nassgranulationsanlage erfolgten die Heißversuche. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass die Anlage zur Granulation von Hochofenschlacke geeignet ist. Während der Versuche wurde das Granulationsprodukt sowie der Prozess laufend evaluiert und verbessert. So wurde das anfänglich verwendete Rinnenkonzept, das ein teilweise sehr poröses Granulat produzierte, zum besser funktionierenden einfachen Düsenkonzept weiterentwickelt.

Außerdem konnte durch Vergleichsmessungen der Schlackentemperatur beim Abstich, mit unterschiedlichen Messmethoden, einerseits durch IR-Kamera sowie Quotientenpyrometer im Schlackenstrahl und andererseits durch ein Typ-S Thermoelement in der Schmelze im Tiegel, herausgearbeitet werden, dass jedes der genannten Messgeräte für die Abstichtemperaturmessung der Schlacke geeignet ist. Somit kann bei zukünftigen Versuchen nur die einfach zu handhabende IR-Kamera verwendet werden.

Ein weiteres Ziel der Versuche, die reproduzierbare Einstellung der Schmelztemperatur, konnte anfänglich nicht erreicht werden. Durch das Hinzufügen eines Thermoelements Typ-S

in den Stopfen des Schmelzaufbaus kann nun die Aufheizkurve sowie die Temperatur der Schmelze überwacht werden. Aufgrund des beobachteten Temperaturunterschieds zwischen Schmelzaufbau und Schmelze sind weitere Versuche zum Verifizieren der dadurch möglichen Einstellung der Schmelztemperatur nötig.

Von großer Relevanz sind außerdem die Eigenschaften der hergestellten Hüttensande. Diese wurden nach den Versuchen einer Reihe von Analysen unterzogen und die Ergebnisse mit den Normvorgaben, den Urproben sowie Literaturwerten verglichen. Laut ÖNORM EN 197-1 [3] erfüllen die hergestellten Hüttensande die Qualitätskriterien für den Einsatz als Zementhauptbestandteil. Außerdem unterscheiden sich die erzielten Festigkeitswerte von den, aus den Nassgranulaten hergestellten, Portlandhüttenzementen, kaum von jenen der Ausgangsstoffe. Bei nahezu allen Analysen ist die Festigkeit etwas höher als die der Urproben.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass es aufgrund der Erkenntnisse der durchgeführten Versuche und durch die laufenden Verbesserungen der Anlage nun möglich ist, Nassgranulat mit gleichbleibender Qualität herzustellen. Somit können zukünftig in der Anlage alternative Reststoffe oder modifizierte Schlacken behandelt und auf ihre zementtechnologische Eignung überprüft werden. Dadurch kann ein weiterer Beitrag zur Verwertung von bisher schwer zu verwertbaren Reststoffen geleistet werden.

11 Literaturverzeichnis

- [1] WORLDSTEEL ASSOCIATION: *FACT SHEET Steel industry co-products*. März 2018
- [2] EHRENBURG A.: Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft : Teil 1. In: *Beton-Informationen 04-2006*, S. 35–63
- [3] ÖNORM EN 197-1. 2011-10-15. *Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*
- [4] BOSOLD, D. UND R. PICKHARDT: *Zement-Merkblatt Betontechnik B 1 9.2017*. URL <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B1.pdf> – Überprüfungsdatum 2019-05-10
- [5] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE: *Zement-Taschenbuch*. 51. Aufl. Düsseldorf : Verlag Bau + Technik, 2008 (Zement-Taschenbuch 51)
- [6] POHLKAMP, J.: *Zementherstellung – ein material- und energieintensiver Prozess*. URL <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zement/herstellung/> – Überprüfungsdatum 2019-05-10
- [7] FRIEMBICHLER, F., S. SPAUN UND J. STEIGENBERGER: *Zementerzeugung in Österreich*. URL https://www.zement.at/downloads/zementerzeugung_in_oesterreich_2011.pdf – Überprüfungsdatum 2019-05-10
- [8] ANDREW, R. M.: *Global CO2 emissions from cement production*. In: *Earth System Science Data* 10 (2018), Nr. 1, S. 195–217

- [9] BENHELAL, E., G. ZAHEDI, E. SHAMSAEI AND A. BAHADORI: *Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry*. In: *Journal of Cleaner Production* 51 (2013), S. 142–161
- [10] WORRELL, E., L. PRICE, N. MARTIN, C. HENDRIKS AND L. O. MEIDA: *CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY*. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 26 (2001), Nr. 1, S. 303–329
- [11] HOENIG, V. AND M. SCHNEIDER: *CO2 REDUCTION IN THE CEMENT INDUSTRY*. In: *VDZ CONGRESS 2002*, S. 499–505
- [12] DEGNER, Michael (Hrsg.): *Stahlfibel*. Veränd. Nachdr. Düsseldorf : Verl. Stahleisen, 2011
- [13] SENK, D. UND D. HÜTTENMEISTER: *Stahl und Schlacke - Ein Bund fürs Leben*. In: *Schlacken aus der Metallurgie*. Neuruppin : TK-Verlag, 2012, S. 69–74
- [14] WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL: *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2017*.
URL https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2017/12/Fakten_Stahlindustrie_2017_rz_web.pdf – Überprüfungsdatum 2019-05-16
- [15] GARA, S. UND S. SCHRIMPF: *Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie*, 1998 (Monographien / Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie)
- [16] LEYSER, P. UND C. CORTINAL: *INBA® slag granulation system with environmental control of water and emissions*. Millenium Steel, Bd. 2006. In: *Millenium Steel*, S. 67–72
- [17] URL
<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSewxwgh6OMoE7r-3W3tH7RhmolyvxqoMULC5kplwd0GY9bLDmy> – Überprüfungsdatum 2019-05-24
- [18] WERNER, A., T.BÜRGLER, D. ALGERMISSEN UND K. DOSCHEK: *Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation*. Publizierter Endbericht. 28.06.2016
- [19] YU, P., S. WANG, Y. LI, UND F. XU: *A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag*. In: *MATEC Web of Conferences* (2016), Nr. 68
- [20] McDONALD, I. J. UND A. WERNER: *Dry Slag Granulation : The Environmentally Friendly Way to Making Cement*. AISTech 2013 Proceedings, S. 649-656

- [21] FIRSBACH F. UND D. SENK: Nachhaltigkeit durch Schlackenverarbeitung : Wärmerückgewinnung und Trockengranulation. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J. (Hrsg.): *Aschen, Schlacken, Stäube : Aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin : TK Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 280–290
- [22] SCHNEIDER, M. UND B. MENG: Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand. In: *Beton-Information 01-2000*, S. 3 - 7
- [23] MOTZ H., A. EHRENBERG UND D. MUDERSBACH: Dry solidification with heat recovery of ferrous slags. In: *THIRD INTERNATIONAL SLAG VALORISATION SYMPOSIUM 2013*, S. 37–55
- [24] CROSSIN, E.: *The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute*. In: *Journal of Cleaner Production* 95 (2015), S. 101–108
- [25] MÜLLER C. ET AL: *Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) as a concrete additive : - Current situation and scenarios for its use in Germany -*. Düsseldorf, 23.03.2007
- [26] BENEDIX R.: *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten* : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [27] DEMOULIAN, E., P. GOURDIN, F. HAWTHORN, UND C. VERNET: Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulicité., Bd. 2. In: *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), Paris (1980)*, III-89-III-94
- [28] DOUGLAS, E. UND R. ZERBINO: *Characterization of granulated and pelletized blast furnace slag*. In: *Cement and Concrete Research* 16 (1986), Nr. 5, S. 662–670
- [29] FRIGIONE G.: *Manufacture and Characteristics of Portland Blast-Furnace Slag Cements*. In: FROHNSDORFF, G. (Hrsg.): *Blended Cements*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International, 1986, 15-28
- [30] HOOTON, R.D. UND J.J. EMERY: Glass content determination and strength development predictions for vitrified blast furnace slag, Bd. 2. In: *Proceedings of the 1st CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello (1983)*, S. 943–962
- [31] SURESH D. AND K. NAGARAJU: Ground Granulated Blast Slag (GGBS) In Concrete – A Review, Volume 12, Issue 4 Ver. VI (Jul. - Aug. 2015). In: *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, PP 76-82
- [32] KUMAR KARRI S., G.V.R. RAO UND P.M. RAJU: *Strength and Durability Studies on GGBS Concrete*. In: *International Journal of Civil Engineering* 2 (2015), Nr. 10, S. 34–41

- [33] TOBO H. K. WATANABE, M. KUWAYAMA, S. GOTO, H. GOTO UND T. TANAKA: Effect of Water Granulation Conditions on Density and Grain Size of Granulated Blast Furnace Slag, Vol. 55 (2015), No. 11. In: *ISIJ (Iron and Steel Institute of Japan)*, pp. 2499–2508
- [34] SCHNEIDER C.: *Zur Konstitution von Hüttensand, seiner quantitativen Bestimmung und seinem Festigkeitsbeitrag im Zement*. Technischen Universität Clausthal, Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften. Dissertation. 2007
- [35] TÄNZER R. A. BUCHWALD UND D. STEPHAN: *Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag*. In: *Materials and Structures* 48 (2015), Nr. 3, S. 629–641
- [36] TIGGES E.: *Die Hydratation von Hüttensanden und Möglichkeiten ihrer Beeinflussung zur Optimierung von Hochofenzementeigenschaften*. Technischen Universität Clausthal, Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften. Dissertation. 2009
- [37] OGIRIGBO O. R., L. BLACK: *Influence of slag composition and temperature on the hydration and microstructure of slag blended cements*. In: *Construction and Building Materials* 126 (2016), S. 496–507
- [38] SCHNEIDER, C.: *Charakterisierung von Zementbestandteilen*. 2006. URL https://www.researchgate.net/publication/279850636_Charakterisierung_von_Zementbestandteilen – Überprüfungsdatum 2019-07-12
- [39] SMOLCZYK, H.G.: Slag structure and identification of slags., Vol. 1: Principal reports. In: *7th International Congress, Paris (1980)*, S. III-1/3-III-1/17
- [40] OLBRICH, E.: *Struktur und Reaktionsfähigkeit von Hüttensandglas*. Clausthal-Zellerfeld, TU-Clausthal. Dissertation. 1999
- [41] TAUBE, K.: *Stahlerzeugung kompakt : Grundlagen der Eisen- und Stahlmetallurgie*. Braunschweig : Vieweg, 1998 (Vieweg Technik)
- [42] GEISELER, J.: Eisenhüttenschlacken – Nebenprodukte der Stahlindustrie, Heft 6. In: *Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken*, S. 9–39
- [43] LARM, A.: *Entwicklung des LAGA Richtlinien-Entwurfs für die Verwertung von Eisenhüttenschlacken basierend auf Originalsubstanzgehalten und Eluatkonzentrationen*. Essen (Fachgespräch Feststoffuntersuchung März 1998). URL <http://www.titro.de/phstarti/bew1998.htm> – Überprüfungsdatum 2019-05-21
- [44] SCHIEßL, P. UND B. MENG: *Neuer Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Baustoffe im Hinblick auf die Interpretation von Transportvorgängen*. Forschungsbericht Nr. F 526. Aachen: Institut für Bauforschung, 1998

- [45] WESCHE K.: *Baustoffe für tragende Bauteile; Band 2, 3. Auflage*. Wiesbaden, (Bauverlag GmbH), 1993
- [46] LOCHER, F.W., W. RECHENBERG, UND S. SPRUNG: *Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure*. Beton 34 (Heft 5), S. 193 – 198. 1984
- [47] STARK, J. UND B. WICHT: *Dauerhaftigkeit von Beton: Der Baustoff als Werkstoff* : Birkhäuser : Birkhäuser, 2001
- [48] LUO, Rui ; CAI, Yuebo ; WANG, Changyi ; HUANG, Xiaoming: *Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete*. In: *Cement and Concrete Research* 33 (2003), Nr. 1, S. 1–7
- [49] WEIßBÖCK L.: *Nassgranulation von Schlacken : Planung, Auslegung und Dimensionierung einer Versuchsanlage im Technikumsmaßstab zur Nassgranulation verschiedener Schlacken*. Leoben, Montanuniversität. Projektarbeit. März 2019
- [50] PONAK C., V. MALLY, S. WINDISCH, A. HOLZER, H. RAUPENSTRAUCH UND A. SCHÖNBERG: *Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen – Weiterentwicklung des RecoPhos-Prozesses*. Leoben, 2018. URL https://www.recydepotech.at/media/1.6_Ponak.pdf
- [51] WINDISCH S.: *Untersuchung der Möglichkeiten einer reduzierenden Behandlung von LD-Schlacke in einem induktiv beheizten Koksbett*. Leoben, Montanuniversität Leoben. Masterarbeit. 2018-03-23
- [52] BRUNST W.: *Die induktive Wärmebehandlung : Unter besonderer Berücksichtigung des Härtens der Stähle*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1957
- [53] KEGEL K.: *Die Praxis der induktiven Warmbehandlung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1961
- [54] LEHRSTUHL STRÖMUNGSMECHANIK & STRÖMUNGSTECHNIK: *Formelverzeichnis*. URL <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf>
- [55] KASHIWAYA Y., T. AKIYAMA AND Y. IN-NAMI: Latent Heat of Amorphous Slags and Their Utilization as a High Temperature PCM, Vol. 50 (2010) No. 9. In: *ISIJ (Iron and Steel Institute of Japan)*, S. 1259–1264
- [56] MICHALSKI M.: *Der REDGRAN-Prozess Direktreduktion von eisenoxidhaltigen Schlacken zur Klinkerherstellung*. Leoben, Montanuniversität, Verfahrenstechnik. Diplomarbeit. 2000. URL https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/2383364/AC03124414_2001.pdf

- [57] SCHOLZE H.: *Glas : Natur, Struktur und Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1988
- [58] OBERERLACHER E.: *Induktives Erwärmen von Suszeptoren in hochfrequenten Magnetfeldern*. Leoben, Montanuniversität. Bachelorarbeit. 2017-12-29
- [59] EHRENBURG A.: Einfluss der Granulationsbedingungen und Leistungsfähigkeit von Hüttensand - Teil 1: Granulationsbedingungen, Band 66 Heft 1. In: *ZKG International*, S. 64–71
- [60] 2011-03. *EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*
- [61] 02_2012. *ISO/TR 14121-2 Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung - Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele*
- [62] DOSCHEK K.: *Sicherheitstechnische Betrachtung einer Versuchsanlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke*. Leoben, Montanuniversität, Institut für Thermoprozesstechnik. Bachelorarbeit. 2015-09-24
- [63] ÖNORM EN 933-1. 2012-03-01. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren*
- [64] ÖNORM EN 933-2. 1996 03 01. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Analysensiebe, Nennweite der Sieböffnungen*
- [65] STALTNER D.: *Modellierung des instationären Wärmeverlusts von Schlackenpartikel im Freeboardbereich einer Trockengranulationstechnologie*. Wien, Technische Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften. Diplomarbeit. Oktober 2018
- [66] EHRENBURG A.: Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft : Teil 2. In: *Beton-Informationen 04-2006*, S. 67–95

Anhang

I Verbessertes Düsenkonzept

Im Zuge der Arbeit wurde des Weiteren ein verbessertes Düsenkonzept designt. Dieses setzt sich aus drei unterschiedlichen Bauteilen zusammen, um Adaptionen zu vereinfachen. Zum Ersten handelt es sich dabei um die eigentliche Düse, welche über ein Gewinde am zweiten Element, dem Deckel, befestigt wird. Im zweiten Bauteil ist ein Wasseranschluss mit einem Durchmesser von 1 Zoll integriert. Das dritte Element ist ein verstellbares Innenrohr, durch das von oben kommend die Schlacke fließt. Außerdem wird dadurch der wasserführende Teil nach oben hin abgedichtet. Die einzelnen Bauteile sind mitsamt ersten Abmessungen in **Abbildung A-1** dargestellt.

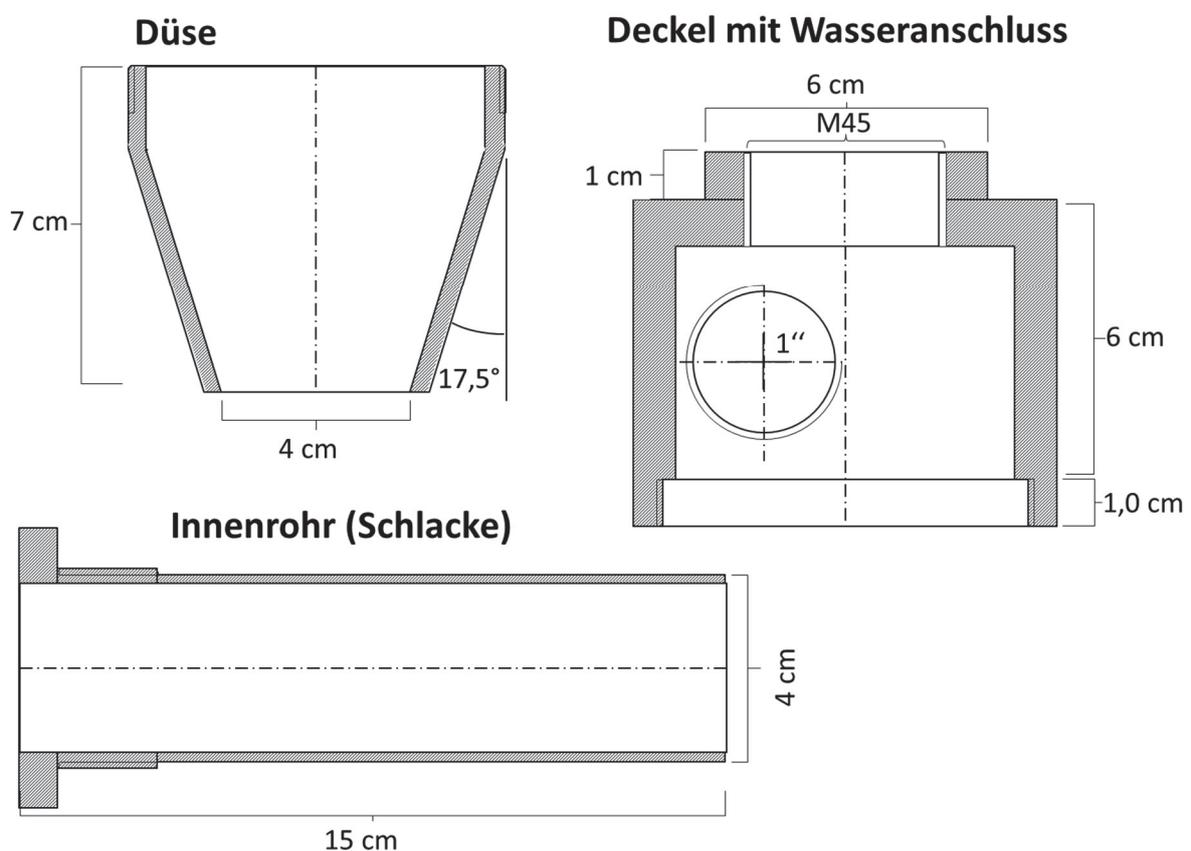


Abbildung A-1: Einzelteile des verbesserten Düsenkonzepts

Durch das verstellbare Innenrohr kann der Querschnitt der Düsenöffnung und somit die Ausflussgeschwindigkeit verstellt werden. Die Befestigung der Düse soll mithilfe von angeschweißten Formrohren an den Seiten erfolgen. Das zusammengefügte Modell ist im Originalmaßstab in **Abbildung A-2** zu sehen. Vor einer Realisierung ist eine exaktere Zeichnung, sowie Überarbeitung mit einem CAD-Programm erforderlich.

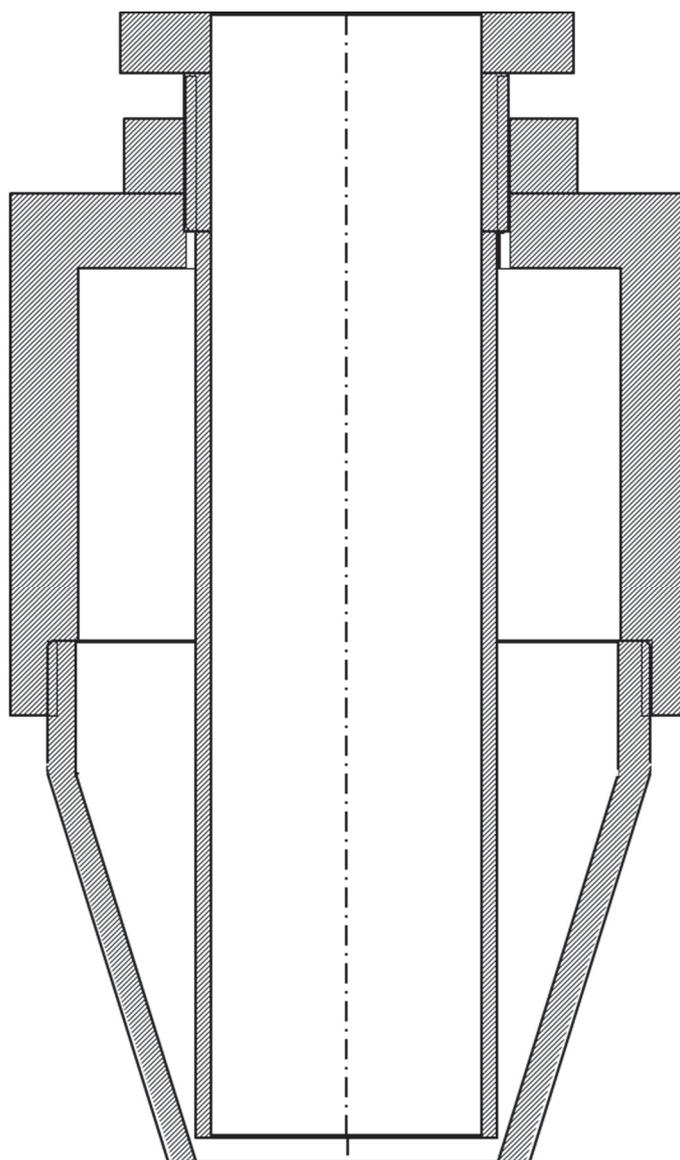


Abbildung A-2: Verbessertes Düsenkonzept (zusammengesetzt)

II Risikobeurteilung

Tabelle A-0-1: Risikobeurteilung (1)

Nr.	Betriebsart	Gefährdung	Ursache	Ereignis	Risiko			Schutzziel	Maßnahme	Restrisiko			
					S	F	O			S	F	O	
					A	A	A			A	A	A	
<p>Anlage: Nassgranulationsanlage</p> <p>S – Schaden S1: leichte Verletzung, reversibel S2: schwere Verletzung, irreversibel</p> <p>F – Gefahrenexposition F1: selten F2: häufig</p> <p>O – Eintrittswahrscheinlichkeit O1: niedrig (unwahrscheinlich) O2: mittel (gelegentlich) O3: hoch (regelmäßig)</p> <p>A – Gefahrenabwendung A1: möglich A2: unmöglich</p> <p>Risikoklasse 1 – 2: geringes Risiko 3 – 4: mittleres Risiko 5 – 6: hohes Risiko</p>													
1	Vorbereitung												
1.1	Dämmen des Schmelzaufbaus	Freisetzung feiner Keramikfasern	Zur Isolierung des Schmelzaufbaus wird eine feuerfeste Keramikfasermatte verwendet, wodurch es zur Freisetzung feiner Keramikfasern kommen kann.	Kann beim Einatmen Krebs verursachen. Kann mechanische Reizungen von Haut, Augen und Atemwegen verursachen.	2	1	3	1	Krebs und mechanische Reizungen vermeiden.	o) Zutritt in den betroffenen Bereich auf wenige Personen minimieren. o) Weitere Staubverteilung, z.B. durch Befuchtung und rasche Entfernung von Verschmitt, vermeiden o) Tragen persönlicher Schutzausrüstung sowie ausreichenden Atemschutz	1	1	3
1.2	Einfüllen des Hüttenands in den Schmelzaufbau	Freisetzung von feinem Staub	Vor dem Versuch wird der Tiegel mit dem Hüttenand befüllt, wobei es zu einer Freisetzung von Staub kommen kann.	Jucken in den Augen, Hustenreiz	1	1	2	2	Jucken und Hustenreiz vermeiden	Tragen persönlicher Schutzausrüstung sowie ausreichender Atemschutz	1	1	2
1.3	Verstellen der Anlage	Quetschung	Die Anlage wird vor Versuchsbeginn in die richtige Position gehoben. Beim Absetzen besteht Quetschgefahr für Hände und Füße.	Hand- und/oder Fußverletzungen	1	1	2	2	Hand- und/oder Fußverletzungen vermeiden	Gefahrenbereich beachten sowie Tragen persönlicher Schutzausrüstung.	1	1	2
2	Heißbetrieb												
2.1	Aufheizvorgang	Stromschlag	Während des Aufheizvorgangs fließen durch die Spule hohe Ströme bis 150 A. Durch das Anfassen der Spule besteht die Gefahr eines Kurzschlusses und somit eines Stromschlags.	Herzkammerflimmern, Tod	2	2	2	2	Herzkammerflimmern, Tod vermeiden	o) Bei Betrieb: Überwachung der Anlage durch geschultes Personal. o) Installieren einer Warnleuchte bei Betrieb der InduMelt-Anlage. o) Anbringen eines Gefahrenhinweises o) Erdung der gesamten Anlage	2	2	1
		Verbrennungen	Während des Aufheizvorgangs erwärmt sich die Granulationsrinne durch die Strahlung des Schmelzaufbaus auf mehrere 100 °C.	Verbrennung	1	2	1	1	Verbrennung vermeiden	Tragen persönlicher Schutzausrüstung, sowie Durchführung durch geschultes Personal.	1	2	1

Tabelle A-0-2: Risikobeurteilung (2)

Nr.	Betriebsart	Gefährdung	Ursache	Ereignis	Risiko			Schutzziel	Maßnahme	Restrisiko			Datum: Mai 2019		
					S	F	O			S	F	O		A	
Anlage: Nassgranulationsanlage															
2.2	Abstich	Verbrennungen	Beim Abstich kommt es zu hohen Temperaturen von bis zu 1500 °C. Der heiße Stopfen muss aus dem Schmelzaufbau entfernt werden.	Verbrennung	2	1	3	2	o) Tragen persönlicher Schutzausrüstung, Schutzhelm für Warmbetriebe sowie flammhemmenden Arbeitsanzug. o) Durchführung nur durch geschultes Personal.	o) Tragen persönlicher Schutzausrüstung, Schutzhelm für Warmbetriebe sowie flammhemmenden Arbeitsanzug. o) Durchführung nur durch geschultes Personal.	1	1	2		
2.3	Granulationsvorgang	Gehörschädigung	Die eingesetzte Pumpe verfügt über Lautstärken bis zu 90 Dezibel.	Gehörschädigung	2	1	2	2	Gehörschädigung vermeiden	o) Tragen von Gehörschutz o) Einhausung der Pumpe	1	1	2	1	
3	Nachbereitung														
3.1	Abkühlvorgang	Verbrennung	Durch die Isolierung dauert der Abkühlvorgang einige Stunden. Das Berühren des Schmelzaufbaus ist durch die Keramikfasermatte eingeschränkt. Weitere Teile wie die Eisenplatte sind jedoch auch noch einige Zeit heiß.	Verbrennung	2	2	1	2	Verbrennung vermeiden	Anfertigung eines Warnweises.	2	1	1	1	1
3.2	Probenerstanalyse	Scharfes, spitzes Granulat	Bei der Granulation entsteht glasiger Hütten sand, der scharfkantige und teilweise Spitze Partikel enthält. Bei der Erstanalyse besteht die Gefahr sich mit diesen Partikel zu schneiden.	Handverletzungen	1	2	1	1	Handverletzungen vermeiden	Tragen persönlicher Schutzausrüstung	1	1	1	1	1