



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

**Department Umwelt- und Energieverfahrenstechnik
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik**

Energetische Betrachtung einer Versuchsanlage zur trockenen Granulation von Hochfenschlacke

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
an der Montanuniversität Leoben

vorgelegt von Klaus Doschek, BSc
Leoben, November 2013

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Dipl.-Ing. Markus Kofler

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als angegebene Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich aus sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, November 2013

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Harald Raupenstrauch für die Möglichkeit diese Masterarbeit zu verfassen. Ebenso danke ich Herrn DI Markus Kofler für die hervorragende Betreuung und gute Zusammenarbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Frau DI Andrea Werner, stellvertretend für den Projektpartner Siemens VAI, bedanken.

Mehr als nur Dankbarkeit schulde ich meiner gesamten Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich immer in allen Belangen ermutigt und unterstützt haben.

Kurzfassung

In integrierten Hüttenwerken fällt schmelzflüssige Hochofenschlacke als Nebenprodukt bei der Roheisenerzeugung mit rund 1500 °C an. Nach heutigem Stand der Technik wird diese in Nassgranulationsanlagen mit Hilfe von Wasser rasch abgekühlt, wodurch der sogenannte Hütten sand entsteht, welcher aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaften in der Zement- und Baustoffindustrie eingesetzt wird. Jedoch geht durch die nasse Granulation der Energieinhalt von rund 1,5 GJ/t Schlacke verloren. Um diese derzeit noch ungenützte Energiereserve der Eisen- und Stahlindustrie rückzugewinnen, empfiehlt es sich die Hochofenschlacke trocken, zum Beispiel mit Luft nach dem Rotating-Cup Verfahren, zu granulieren. Dabei ist es möglich die Hochofenschlacke sowohl stofflich als auch energetisch zu verwerten.

Aus diesem Grund wurde seitens der Siemens VAI eine Versuchsanlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke zu Forschungszwecken am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben errichtet.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden im Rahmen einer Literaturrecherche Grundlegendes zur Hochofenschlacke, die Entwicklung der trockenen Granulationsverfahren und die direkten Konkurrenzverfahren abgehandelt. Der zweite Teil widmet sich der Messdatenauswertung der drei durchgeführten Versuchskampagnen. Spezieller Fokus liegt dabei auf der Energiebilanz der Einzelversuche und dem daraus resultierenden Wirkungsgrad.

Abstract

In integrated iron and steel mills molten blast furnace slag is produced as a by-product with around 1500 °C. According to the state of the art this slag is cooled down with water in wet granulation plants. This process produces granulated blast furnace slag with latent hydraulic properties used in the cement and construction material industry. However, the method discussed causes an energy content loss of 1.5 GJ/t with regard to the blast furnace slag. This represents a large unexploited energy resource of the iron and steel industry. The dry slag granulation, based on the Rotating-Cup Atomizer, is an appropriate method to retrieve this energy. Simultaneously it is also possible to produce high quality granulated blast furnace slag.

In order to meet this gap in knowledge, Siemens VAI in cooperation with the chair of Thermal Processing Technology for Research and Development at the University of Leoben decided to establish a new testing plant.

The first part of this thesis comprises information about fundamentals of blast furnace slag, the development of dry granulation and the competing processes. The second part deals with the energy balance of the individual trials and the resulting thermal efficiency.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Aktuelle Energiesituation in der Eisen- und Stahlindustrie	4
3. Grundlegendes zu Hochofenschlacke	8
3.1. Eigenschaften von Hochofenschlacke	10
3.2. Verwendung von Hochofenschlacken	15
3.3. Energieinhalt von Hochofenschlacke	19
3.4. Energierückgewinnung aus Hochtemperaturschlacken	21
3.4.1. Mechanische Granulationsmethoden	22
3.4.2. Druckluft Granulationsmethoden	26
3.4.3. Zentrifugal Granulationsmethoden	27
4. Aktuelle Konkurrenzverfahren und Forschungsgruppen	32
4.1. Paul Wurth (PW)	32
4.2. Central Iron and Steel Research Institute China (CISRI)	36
4.3. Australia's Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation (CSIRO)	40
4.4. Siemens VAI (SVAI)	44
5. Beschreibung der Versuchsanlage	48
6. Praktische Durchführung	53
6.1. Bilanzgrenze der energetischen Betrachtung	53
6.2. Ermittlung der relevanten Größen	56
6.3. Datenaufbereitung und Auswertung	61
6.4. Ergebnisse und Diskussion	64
7. Zusammenfassung	67
8. Ausblick	69
Nomenklatur	71
Literaturverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	78
Tabellenverzeichnis	81
A. Messroutine HTA-Messung	I
B. Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild Technikumsanlage	IV

C. Datenzusammenfassung zur Berechnung des Wirkungsgrades

V

1. Einleitung

In integrierten Hüttenwerken fallen pro Tonne Roheisen ungefähr 275 kg schmelzflüssige Hochofenschlacke mit rund 1500 °C und einem Energieinhalt von circa 1,5 GJ/t an. Unter Berücksichtigung der weltweiten Roheisenproduktion fielen 2012 ungefähr 300 Mio. Tonnen Hochofenschlacke als Nebenprodukt an. Diese wird nach dem heutigen Stand der Technik in Nassgranulationsanlagen mit Wasser abgekühlt. Durch die rasche Abkühlung unter die Transformationsstemperatur von etwa 900 °C entsteht ein amorphes Produkt, der sogenannte Hüttensand, der aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaften in der Zement- und Baustoffindustrie Anwendung findet. Bei dieser konventionellen Methode der Granulation geht aber das erhebliche Energiepotential der schmelzflüssigen Schlacke verloren; eine für die Eisen- und Stahlindustrie noch ungenützte Energiemenge. Desweiteren müssen im Rahmen der Nassgranulation große Wassermengen aufbereitet und der Hüttensand vor der weiteren Verwendung getrocknet werden. Um diese negativen Aspekte auszuklammern und die in der Schlacke enthaltene Energie rückzugewinnen, empfiehlt es sich die flüssige Hochofenschlacke trocken nach dem Rotating-Cup Verfahren zu granulieren. Dabei wird die schmelzflüssige Hochofenschlacke auf einen schnell drehenden Teller aufgebracht und durch Einwirken der Zentrifugalkraft in kleine Tröpfchen zerteilt. Gleichzeitig wird Luft von unten durch den Granulatorraum geleitet. Es kommt zur Wärmeübertragung zwischen Schlacke und Luft, wobei hohe Ablufttemperaturen zur weiteren Nutzung erreicht werden können. Durch die rasche Abkühlungsrate erstarren die Schlackepartikel glasig. Unter diesen Voraussetzungen kann die trocken granuliert Hochofenschlacke sowohl stofflich in der Zement- und Baustoffindustrie, als auch energetisch verwertet werden. [1]

Auf Basis von bereits durchgeführten Vorversuchen zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke nach dem Rotating-Cup Verfahren wurde zu Forschungszwecken im Auftrag von Siemens VAI eine Versuchsanlage im Technikum des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben errichtet.

Zusammenfassend ergeben sich aus der Anwendung der trockenen Schlackengranulierung für Hüttenwerke folgende Vorteile:

- Sinnvolle Nutzung der in der Schlacke enthaltenen Wärmeenergie
- Wegfall der Wasserwirtschaft und somit keine Wasserverschmutzung
- Erzeugung von Hüttensand
- Trocknungsprozess für die granuliert Schlacke entfällt

Problemstellung

Schmelzflüssige Hochofenschlacke wird in Europa zum Großteil in nassen Granulationsanlagen mit Wasser rasch abgekühlt. Dabei entsteht der sogenannte glasige Hüttensand, der in der Zement- und Baustoffindustrie aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaften eingesetzt werden kann. Abseits der etablierten stofflichen Verwertung weist die nasse Granulation folgende Problematik beziehungsweise Verbesserungspotentiale auf [2]:

- Energieverlust
- Wasserverbrauch & -aufbereitung
- Emissionen
- Zusatzenergie

Der größte Nachteil ergibt sich aus der ungenutzten Schlackenenergie von rund 1,5 GJ/t durch die Entstehung von Niedertemperaturdampf. Daraus ergibt sich ein Wasserverlust bei älteren offenen Anlagen von circa 1,0–1,2 Tonnen pro Tonne granulierter Hochofenschlacke. Gleichzeitig kann es aufgrund von Reaktionen zwischen Wasser und Schlacke zur Bildung von gasförmigen Schwefeldioxid SO_2 , Schwefelwasserstoff H_2S und anderen Sulfatverbindungen kommen. Als letzter Punkt ist die energieintensive Trocknung des Hüttensandes zu nennen, bevor er weiter verarbeitet werden kann.

Daher gilt es ein Verfahren zu entwickeln, das die oben genannten Punkte ausklammert und eine stoffliche und energetische Verwertung von Hochofenschlacke ermöglicht. Auf Basis von bereits getätigten Vorversuchen bietet sich dafür die trockene Granulation nach dem Rotating-Cup Verfahren an.

Anhand der generierten Messdaten der am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik installierten Anlage zur trockenen Granulation gilt es eine Versuchsbewertung nach folgenden Kriterien durchzuführen:

- Glasgehalt $> 90\%$; rasche Abkühlrate unter Transformationstemperatur 900 °C führt zur Ausbildung amorpher Strukturen
- Granulationsrate $> 85\%$, Verhältnis von granulierter zu eingesetzter Schlackenmenge

Erfüllt ein Einzelversuch die oben genannten Kriterien, wird eine energetische Betrachtung durchgeführt und der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung von Schlacke und Luft berechnet.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zu Beginn der Arbeit soll ein allgemeiner Überblick über die aktuelle Energiesituation in der Eisen- und Stahlindustrie mit besonderem Fokus auf Effizienzsteigerung und Einsparungspotentiale gegeben werden. Im Bereich der Hochofenschlacke werden grundlegende Eigenschaften, die aktuelle Verwendung und die Entwicklung der Energierückgewinnung näher behandelt. Um den Entwicklungsstand der Energierückgewinnungsverfahren zu erfassen, werden die aktuellen Konkurrenzverfahren und Forschungsgruppen näher beschrieben.

Anhand der Versuchsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wird die Entwicklung der trockenen Granulation nach dem Rotating-Cup Verfahren näher erläutert. Anschließend werden die Voraussetzungen für die energetische Betrachtung der Einzelversuche geschaffen, indem die Systemgrenzen und die Messdatenerfassung festgelegt werden.

Desweiteren werden die Messdaten der drei durchgeführten Versuchskampagnen aufgearbeitet, um eine Vergleichbarkeit der Einzelversuche zu ermöglichen. Dazu wird der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung von Schlacke und Luft im Granulator herangezogen. Die erhaltenen Werte werden anschließend tabellarisch und grafisch aufbereitet und miteinander verglichen. Abschließend soll auf Basis der Literaturrecherche der aktuelle Entwicklungsstand der Granulation im internationalen Vergleich betrachtet werden.

2. Aktuelle Energiesituation in der Eisen- und Stahlindustrie

Die Eisen- und Stahlindustrie ist eine der wichtigsten Säulen der Wirtschaft und gleichzeitig eine der energieintensivsten Sparten, mit einem ungefähren Anteil von 4-5 % des weltweiten Energieverbrauches. Gleichzeitig, besitzt sie auch noch ein erhebliches Energieeinsparungspotential, zum Beispiel im Produktionsbereich. [2, 3]

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Primärmetallproduktion einen signifikanten Einfluss auf die Umwelt besitzt. Aus der Abbildung 2.1 können die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten der Metallindustrie für 2010 entnommen werden. In diesem Zusammenhang kann durch die stoffliche Verwertung der Hochofenschlacke und der Wärmerückgewinnung beim Granulationsprozess der Gesamtanteil der Eisen- und Stahlindustrie erheblich nach unten korrigiert werden. [2, 3]

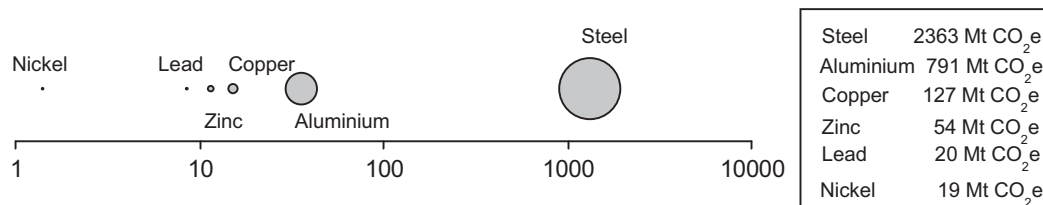


Abbildung 2.1.: Globale Treibhausgasemissionen nach CO₂-Äquivalenten in der Primärmetallproduktion für 2010 [3]

In den vergangenen Jahrzehnten machte die Metallbranche bereits enorme Fortschritte im Bereich der Energieeffizienzsteigerung. Somit ist es zum Beispiel gelungen den spezifischen Energieverbrauch von Stahl in den USA von 48 auf 20 GJ/Tonne in der Zeit von 1960-2000 zu senken. Dies konnte mit Hilfe unzähliger Innovationen und neuen Technologien realisiert werden. Anhand von heutigen Studien wird das Gesamtenergieeinsparungspotential in einem Bereich von 20-30 % angesetzt. Die folgende Abbildung 2.2 zeigt das mögliche Einsparungspotential in Form von Treibhausgasemissionen mit Hilfe der trockenen Granulation. [3, 4]

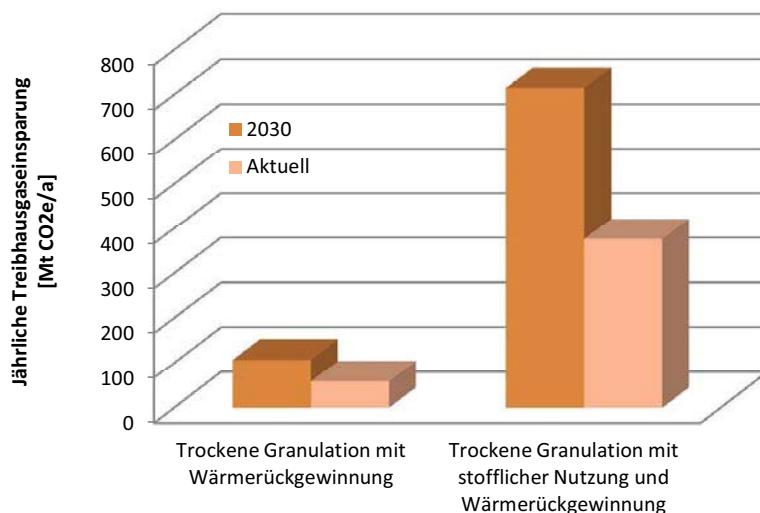


Abbildung 2.2.: Jährliches Treibhausgaseinsparungspotential der trockenen Granulation nach [3]

Für Konzern und Unternehmen ist es wichtig die Effizienzsteigerung im Energiebereich voranzutreiben. Es gibt die verschiedensten Ansätze, um die bis dato ungenutzten Energiereserven in den diversen Prozessschritten nutzbar zu machen. Dies geschieht in den meisten Fällen durch Ausnutzung von inhärenten Energieströmen aus Abfall- und Nebenprodukten. Die Energie, die es in der Eisen- und Stahlindustrie primär nutzbar zu machen gilt, steckt im Produkt, in der flüssigen Schlacke und im Prozessabgas. Diese Verteilung der Hauptenergieströme eines durchschnittlichen Hüttenwerkes lässt sich der Abbildung 2.3 entnehmen. [2, 5]

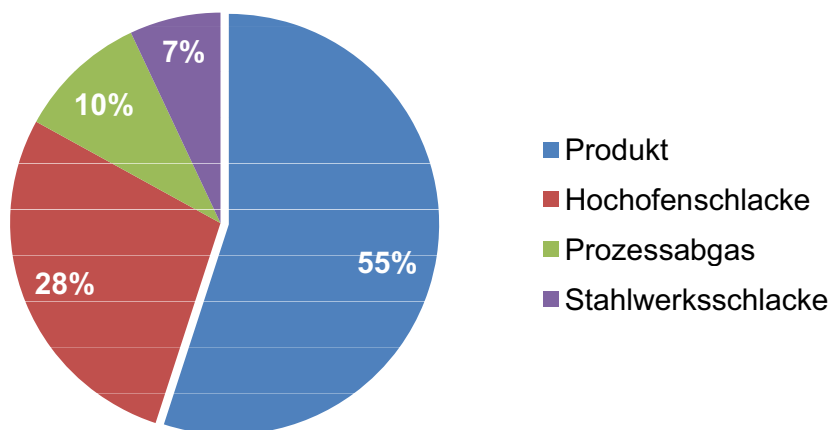


Abbildung 2.3.: Verteilung der Hauptenergieströme eines durchschnittlichen Hüttenwerkes nach[6]

Bei einer effizienteren Prozessgestaltung können im optimalen Fall die Kosten und Umweltbelastung gesenkt werden. In der folgenden Tabelle 2.1 wird der aktuelle Stand der Energierückgewinnung am Beispiel der Prozessabluftnutzung in chinesischen Hüttenwerken näher erläutert. Dabei zeigt sich, dass noch ein erhebliches Verbesserungspotential in den einzelnen Prozessbereichen vorhanden ist. [4, 7]

Tabelle 2.1.: Aktueller Stand der Energierückgewinnung aus der Prozessabluft von Hüttenwerken in China für 2011 nach [8]

Prozess	Gesamte Energiemenge	Rückgewonnene Energiemenge	Rückgewinnungsrate
	[GJ/t-Stahl]	[GJ/t-Stahl]	[%]
Kokerei	0,93	0,08	8,2
Sinterei/Pelletierung	1,56	0,28	18,0
Hochofen	8,0	4,62	57,8
Stahlerzeugung	1,81	0,81	44,8
Walzen	1,01	0,28	27,2

Um eine bessere Bewertung von Abwärme durchführen zu können, empfiehlt es sich diese nicht nur nach Quantität sondern auch nach Qualität zu bewerten. Eine mögliche Einteilung kann dabei in drei Temperaturbereiche erfolgen [8]:

- Minderwertig: kleiner 150 °C; Abdampf, Heißwasser
- Mittelwertig: 150 – 500 °C; Gichtgas, Kokereigas
- Hochwertig: größer 500 °C; Hochofenschlacke, Stahlwerksschlacke, Konvertergas

Auf Basis von statistischen Daten wird in Tabelle 2.2 die aktuelle Situation in China im Bereich der Energierückgewinnungsraten nach den oben genannten Temperaturbereichen dargestellt. Die Werte beziehen sich dabei auf die Produktion von einer Tonne Stahl. [8]

Tabelle 2.2.: Aktueller Stand der Energierückgewinnung von drei verschiedenen Qualitäten von Abwärme nach Temperaturbereiche in der Eisen- und Stahlindustrie in China für 2011 nach [8]

Qualität	Gesamte Energiemenge	Rückgewonnene Energiemenge	Rückgewinnungsrate
	[GJ/t-Stahl]	[GJ/t-Stahl]	[%]
Minderwertig	2,89	0,22	1,59
Mittelwertig	2,19	0,66	30,2
Hochwertig	3,36	1,49	44,4

Die Abbildung 2.4 zeigt die Verteilung der ungenutzten Energiereserven nach den oben erwähnten Temperaturbereichen in China.



Abbildung 2.4.: Ungenutzte Energiereserven nach Aufteilung in drei Temperaturbereiche der Eisen- und Stahlindustrie am Beispiel Chinas nach [8]

Zusammenfassend bietet Hochofenschlacke aufgrund der hohen Produktionsrate von 275 kg Schlacke pro Tonne Roheisen und den hohen Abstichttemperaturen von 1450-1500 °C einen wichtigen Ansatzpunkt zur weiteren Energieeffizienzsteigerung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in weiterer Folge näher auf die Energierückgewinnung aus schmelzflüssiger Hochofenschlacke mit Hilfe der trockenen Granulation eingegangen. Zurzeit wird diese nur stofflich verwertet, zum Beispiel in der Zement- und Baustoffindustrie. Doch bei allen aktuellen Verwertungsmethoden gehen die hohen Energieinhalte von circa 1,5 GJ/Tonne Schlacke verloren. Aufgrund des weltweiten Schlackenaufkommens und den bereits vorhandenen Absatzmärkten für die Produkte ist es sinnvoll die bis dato ungenutzte Energie zusätzlich nutzbar zu machen.

3. Grundlegendes zu Hochofenschlacke

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften von Hochofenschlacke, der Anfall in integrierten Hüttenwerken und dessen Verwendung behandelt.

Der Begriff „Schlacke“ stammt aus der Metallurgie und bezeichnet jene nichtmetallischen und mineralischen Phasen, die sich bei der Metallherstellung bilden. Die Hochofenschlacke im Speziellen bildet sich aus der Gangart, den Zuschlägen und den geschmolzenen Koksbestandteilen bei 1450 °C bis 1600 °C. Sie übernimmt dabei folgende metallurgischen Aufgaben [9, 10]:

- nichtmetallische Erzbegleitphasen und Koksaschen aufnehmen
- Roheisen entschwefeln
- niedrigen Schmelzpunkt aufweisen
- leichte Abtrennbarkeit, Düninflüssigkeit

Nach dem heutigen Stand der Technik fallen in modernen integrierten Hüttenwerken pro Tonne Roheisen circa 275 kg Hochofenschlacke mit einem Energieinhalt von 1,5 GJ/t an. Somit bildet die Hochofenschlacke mengen- und energiemäßig den größten Anteil der Abfall und Nebenprodukte in der Eisen- und Stahlindustrie. In der folgenden Abbildung 3.1 wird der Anfall von Hochofenschlacken in einem integrierten Hüttenwerk im Verhältnis zu den Abfall- und Reststoffströmen dargestellt. [5, 11, 12]

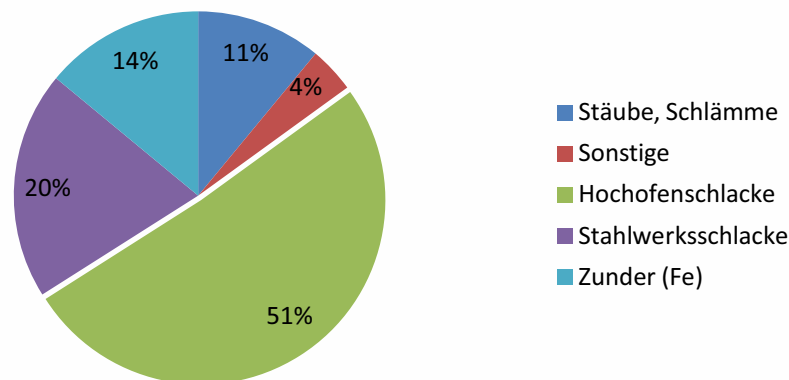


Abbildung 3.1.: Charakteristisches Abfall- und Reststoffverhältnis eines modernen integrierten Hüttenwerkes nach [11]

Hochofenschlacke entsteht wie bereits erwähnt beim sogenannten Hochofenprozess aus dem Nebengestein (Gangart), nicht brennbaren Bestandteilen der Reduktions- und Brennstoffe (Koks) und den Zuschlagstoffen (Kalkstein, Dolomit, Bauxit, u.a.). Die Zuschlagstoffe dienen der Schlackenbildung und heben die Basizität, siehe Tabelle 3.1, der Hochofenschlacke, wodurch die Entschwefelungsreaktion ermöglicht wird.

Die Hauptbestandteile der Schlacke nach dem Abstich sind die folgenden Hauptbestandteile CaO, SiO₂, Al₂O₃ und MgO. In Summe nehmen sie einen Massenprozentanteil von größer 95 % ein. Die Tabelle 3.1 zeigt die typische Zusammensetzung von Hochofenschlacke. [11, 13]

Tabelle 3.1.: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung von Hochofenschlacke [11]

Parameter	Einheit	Richtwert
SiO ₂	[M.-%]	33-40
Al ₂ O ₃	[M.-%]	8-14
CaO	[M.-%]	31-42
MgO	[M.-%]	7-15
Fe _{gesamt}	[M.-%]	0,2-0,7
Mn _{gesamt}	[M.-%]	0,2-0,8
P ₂ O ₅	[M.-%]	0,3-1,2
Na ₂ O	[M.-%]	0,3-1,2
K ₂ O	[M.-%]	0,6-1,2
S _{gesamt}	[M.-%]	0,7-1,6
TiO ₂	[M.-%]	0,1-2,7
B ₁ [CaO/SiO ₂]	[-]	0,8-1,2
B ₂ [(CaO+MgO)/SiO ₂]	[-]	1,0-1,3

Die Bestandteile der Hochofenschlacke bilden beim langsamen Abkühlen in sogenannte Schlackenbeete kristalline Mischphasen aus. Im Gegenteil dazu bilden sich beim schnellen Abkühlen, zum Beispiel bei der nassen Granulation, amorphe Strukturen. Diese verschiedenen Abkühlvorgänge können anhand des Glasgehaltes charakterisiert werden. Das glasige Erstarren der Hochofenschlacke ist eine Voraussetzung für die latent-hydraulischen Eigenschaften von Hüttensand und dessen stoffliche Verwertung in der Zementindustrie. Für den Einsatz als Klinkersubstitut sind Glasgehalte von > 95 % gewünscht. Der große Nachteil des aktuellen Verwertungsverfahrens liegt im ungenutzten Energieinhalt der Schlacke beziehungsweise in den nachgeschalteten, energieintensiven Aufbereitungsschritten. [5, 12, 13]

In den letzten vier Jahrzehnten hat es viele Bemühungen zur Prozessentwicklung auf dem Gebiet der Energierückgewinnung aus Schlacke gegeben, doch bis heute hat es kein Verfahren zu Serienreife gebracht. Aufgrund des großen Energieinhaltes der Schlacke und der aktuellen politischen Situation wird wieder intensiv an den verschiedensten Verfahrensansätzen geforscht. Dabei gilt die trockene Granulation als der vielversprechendste Ansatz. Die ersten Konzepte dazu wurden bereits in den den frühen 1980er Jahre getätigt. Grundsätzlich wird bei den Verfahren der trockenen Granulation die flüssige Schlacke mit Hilfe von Luft zerteilt. Die rückgewonnene Energie kann zum Beispiel zur Produktion von Heißdampf oder Verstromung genutzt werden. [5, 7, 14]

Bei der Nutzung von schmelzflüssiger Hochofenschlacke zur Energierückgewinnung gibt es einige schlackenspezifische Eigenschaften zu beachten. Folglich wird auf diese näher eingegangen.

3.1. Eigenschaften von Hochofenschlacke

Bei der trockenen Granulation kommt es zum Zusammenwirken verschiedenste Eigenschaften der Hochofenschlacke, die den Granulationsprozess beeinflussen können. Dabei sind die Oberflächenspannung, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit die drei wichtigsten Grundeigenschaften der Hochofenschlacke. Allen dreien ist deren Abhängigkeit von der Temperatur und Basizität (Zusammensetzung) gemeinsam.

Basizität

Die Entschwefelung und -phosphorung von Stahl ist von der Aktivität von freien Sauerstoff ($a_{O^{2-}}$) in der Schmelze abhängig. Aufgrund der Schwierigkeit die Aktivität der Schlacken mit ihren verschiedensten Zusammensetzungen zu messen, haben sich in der Praxis Summenparameter zur Bestimmung der Basizität entwickelt. Den einfachsten Parameter stellt dabei das Verhältnis von CaO zu SiO₂ da, vergleiche Formel 3.1.[15, 16]

Es gibt noch zwei verbreitete Berechnungsmöglichkeiten der Basizität, siehe Formel 3.2 und 3.3. Durch die verschiedensten Definitionen ist es wichtig in der Industrie beziehungsweise in der Forschung die Basizität stets vorweg zu definieren, um etwaigen Missverständnissen vorzubeugen. Die wichtigsten Basizitäten sind der Aufzählung zu entnehmen [17]:

$$B_1 = \frac{CaO}{SiO_2} = C/S \quad (3.1)$$

$$B_2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} = (C + M)/S \quad (3.2)$$

$$B_3 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = (C + M)/(S + A) \quad (3.3)$$

Im Allgemeinen werden die Schlacken je nach Reaktionsverhalten in basische und saure Schlacken eingeteilt. Basische Schlacken haben eine Basizität $> 1,2$ und weisen daher einen Überschuss an basischen Oxiden auf (CaO, MgO, MnO, ...). Im Gegensatz dazu haben saure Schlacken eine Basizität kleiner 1,0 und beinhalten daher mehr basische Oxide (SiO₂, P₂O₅, ...). Die Schlacke an sich strebt eine neutrale Basizität 1,1 an und reagiert daher mit basischen beziehungsweise sauren Oxiden. [18]

Der Einfluss der Basizität auf die Schlackeneigenschaften und die daraus folgende Granulation kann der Tabelle 3.2 entnommen werden. [15, 19]

Tabelle 3.2.: Einfluss der Basizität auf die Eigenschaften von Hochofenschlacke nach [15, 19]

Eigenschaft	Basizität hoch	Basizität niedrig
Entschwefelung	wird begünstigt	wird herabgesetzt
Entphosphorung	wird begünstigt	wird herabgesetzt
Oberflächenspannung	Erhöhung	Erniedrigung
Grenzflächenspannung	Erhöhung	Erniedrigung
Viskosität	Erniedrigung	Erhöhung
Schmelzpunkt	Erhöhung	Erniedrigung
spezifische Wärmekapazität	Erniedrigung	Erhöhung
Wärmeleitfähigkeit	Erniedrigung	Erhöhung
Glasgehalt bei Granulation	Erniedrigung	Erhöhung

Temperatur

Die Temperatur der schmelzflüssigen Hochofenschlacke ist ein wichtiger Einflussfaktor, denn die oben genannten Eigenschaften hängen direkt von dieser ab. Schon eine Temperaturänderung um zehn Grad kann zu wesentlichen Änderungen der Granulationsbedingungen führen. Beim Hochofenprozess fällt die Schlacke normalerweise mit der annähernd gleichen Temperatur im Bereich von 1450-1600 °C an.

Die chemische Zusammensetzung und die Temperatur der schmelzflüssigen Hochofenschlacke haben großen Einfluss auf folgende Eigenschaften:

- Oberflächenspannung Φ [mN/m]
- Viskosität η [Pa*s]
- Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K]

In Folge wird der Zusammenhang der Parameter näher erläutert. Dabei wird grundsätzlich in drei Klassen von Hochofenschlacke nach ihrer Basizität unterschieden [20]:

- HOS Typ A: „sauer“ B_1 [C/S] < 1,0
- HOS Typ B: „mittel“ B_1 [C/S] = 1,1
- HOS Typ C: „basisch“ B_1 [C/S] > 1,2

Oberflächenspannung

In dem für den Abstich typischen Temperaturbereich von 1450°C bis 1600°C ist die Oberflächenspannung hauptsächlich von der Basizität abhängig. Bei gleichbleibender Temperatur und erhöhter Basizität (CaO- beziehungsweise MgO-Gehalt) steigt die Oberflächenspannung. Aus der folgenden Abbildung 3.2 können die Abhängigkeiten der Basizität und der Temperatur in Bezug auf die Oberflächenspannung abgelesen werden. [13, 17]

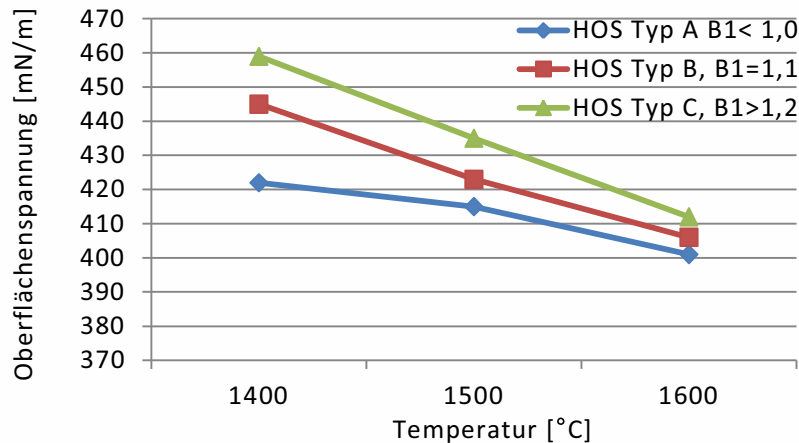


Abbildung 3.2.: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung von Hochofenschlacke nach [20]

Allgemein nimmt die Oberflächenspannung mit sinkender Temperatur leicht zu, beziehungsweise mit steigender Temperatur ab. Bei der Ausbildung einzelner Partikel spielt die Oberflächenspannung eine große Rolle. Je größer die Oberflächenspannung ist, desto schneller zieht sich der Tropfen wieder zusammen. Dies ist wiederum relevant für die glasige Erstarrung des Gefüges, denn eine Kugel besitzt die geringste volumenbezogene Oberfläche und bietet somit eine kleine Energieaustauschfläche. Dadurch kann die geforderte Abkühlrate zum glasigen Erstarren eventuell nicht erreicht werden. Grundsätzlich erstarren längliche Partikel besser im Vergleich zu kugelförmigen Partikeln, aufgrund ihres günstigen Oberfläche- zu Volumen-Verhältnisses im Vergleich zu kugelförmigen Partikeln. [13]

Zusammenfassend kann die Auswirkung der Schlackentemperatur auf die Oberflächenspannung und die daraus folgende Partikelform an folgenden Punkten festgemacht werden [13]:

- Niedrige Schlackentemperatur¹ → hohe Oberflächenspannung → keine Zerteilung möglich
- Mittlere Schlackentemperatur¹ → mittlere Oberflächenspannung → Kugelform
- Hohe Schlackentemperatur¹ → niedrige Oberflächenspannung → längliche Form

Viskosität

Grundsätzlich lassen sich bei der trockenen Granulation dünnflüssige Schlacken besser behandeln als dickflüssige. Dabei ist es auch wichtig, wie schnell die Viskosität bei fallender Temperatur zunimmt. Grundsätzlich neigen kalkreiche Schlacken (hohe C/S-Basizität) dazu schneller zähflüssig zu werden als kieselsäurereiche Schlacken (niedrige C/S-Basizität). Dies ist durch einen steileren Anstieg im Viskositätsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur charakterisiert und in der Abbildung 3.3 ersichtlich. [13, 17]

¹Der Einfluss ist auch von der chemischen Zusammensetzung abhängig, somit kann keine Temperatur angegeben werden

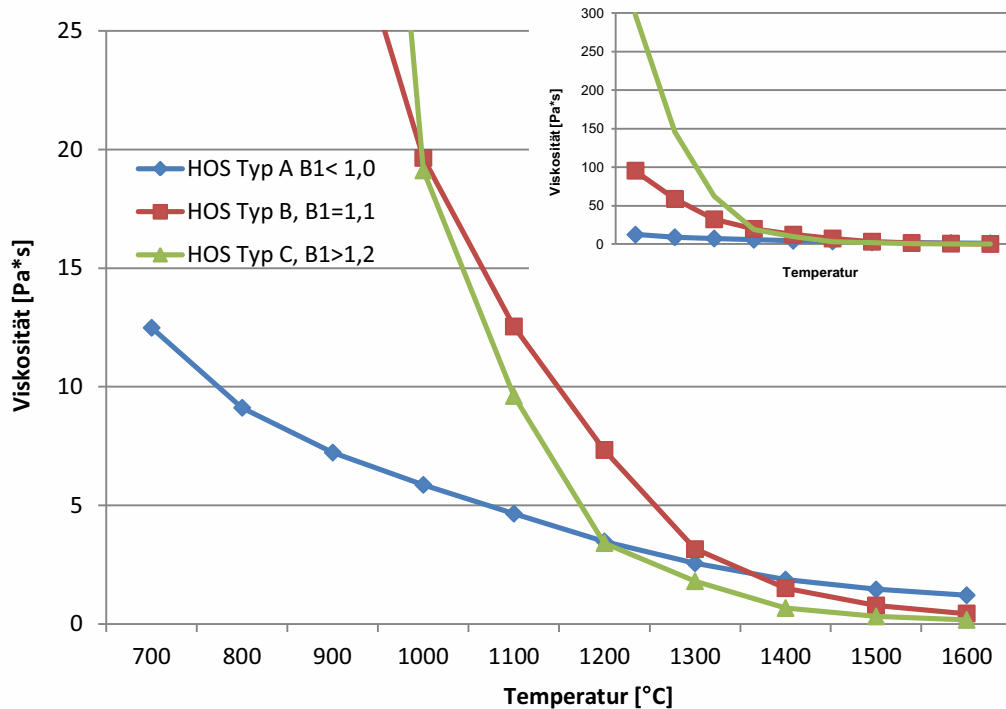


Abbildung 3.3.: Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Hochofenschlacke nach [20]

Aus der vorherigen Abbildung lässt sich der stetige Anstieg der Viskosität bei abnehmender Temperatur erkennen. Eine flache Viskositätskurve ist charakteristisch für Schlacken, die sogenannten „langen Gläsern“ entsprechen. Diese bilden bei einer scherenden Beanspruchung und kalter Umgebung Fasern aus. Im typischen Abstichtemperaturbereich hat die Hochofenschlacke eine Viskosität zwischen $0,6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ und $0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei $1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Viskosität kann mit jener von Transformatorenöl bei Raumtemperatur verglichen werden. [13]

Für die bisherige nasse Granulation hat sich gezeigt, dass sich Hochofenschlacken in einem Bereich zwischen $0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ optimal für die Produktion von qualitativem Hüttensand eignen. Bei einer zu zähflüssigen Schlacke ($\eta > 0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) verringert sich der Glasgehalt, ist sie zu niedrig ($\eta < 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), kann es zur unerwünschten Faden- bzw. Wollebildung kommen. In der folgenden Tabelle 3.3 werden Viskositäten verschiedene Stoffe aufgelistet. [13]

Tabelle 3.3.: Vergleich der Viskosität von verschiedenen Stoffen [13]

Stoff	Viskosität η [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
Bitumen 50/70 ($75 \text{ }^\circ\text{C}$)	100
Kalk-Natron-Glas ($1400 \text{ }^\circ\text{C}$)	10
Transformatorenöl ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)	1
HOS Abstich ($1450\text{-}1600 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,1 - 0,8
LD-Schlacke Abstich ($1650 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,01 - 0,2
Roheisen ($1400 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,001 - 0,002
Wasser ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,001

Zusammenfassend ist die Viskosität der flüssigen Schlacke gleichermaßen von ihrer Temperatur und chemischen Zusammensetzung (Basizität) abhängig. Die chemische Zusammensetzung nimmt besonderen Einfluss, wenn es um die Faden- bzw. Wollebildung durch die Netzwerkbildner SiO_2 und Al_2O_3 geht. [13]

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein essentieller Parameter für eine optimale Energierückgewinnung. Die Wärmeübertragung von Schlacke kann durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung erfolgen. Eine konkrete Wärmeleitfähigkeit wird nur in den seltensten Fällen veröffentlicht, da diese meist auf Interpolationen von synthetischen Schlacken basiert. [13, 21]

Bei der Betrachtung der Abbildung 3.4 fällt auf, dass bei hohen Temperaturen die Wärmeleitfähigkeit rapide abnimmt. Daher besitzt Hochofenschlacke beim Abstich nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,1 bis 0,9 W/mK. [13, 21]

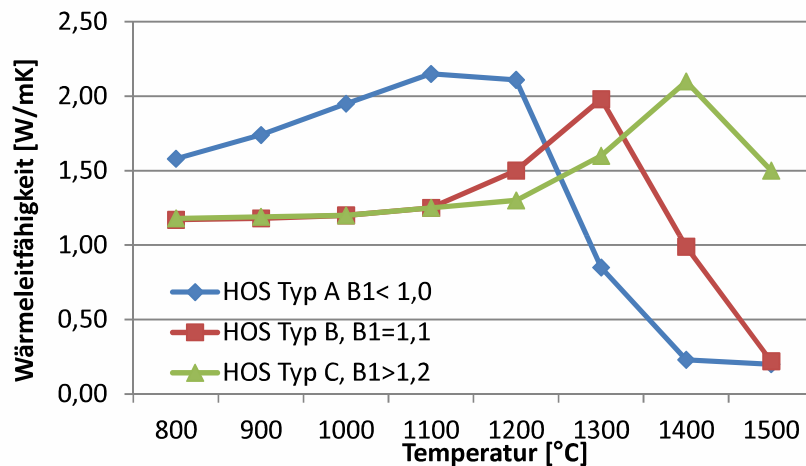


Abbildung 3.4.: Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Hochofenschlacke nach [20]

Aufgrund des niedrigen Wärmeleitfähigkeitswertes kommt es bei der Nachbehandlung von Hochofenschlacke zur Deckelbildung bei Kontakt mit Luft und anderen Materialien. Dies gründet auf dem Umstand, dass Wärme nur sehr schlecht an die Oberfläche transportiert wird, beziehungsweise der Wärmetransport innerhalb der Schlacke nur sehr langsam vonstatten geht. Dies erschwert das Schlackenhandling und beeinflusst auch die Energierückgewinnung. [13, 21]

Zusammenfassend ergeben sich folgende wesentliche Eigenschaften von Hochofenschlacke [22]:

- Oberflächenspannung ist gering
- Viskosität nimmt mit fallender Temperatur stark zu
- Wärmeleitfähigkeit ist gering

3.2. Verwendung von Hochofenschlacken

In Abhängigkeit vom Abkühlvorgang lässt sich die Hochofenschlacke in den verschiedensten Bereichen stofflich verwerten. Die Produkte werden zum Beispiel in der Zementindustrie als Klinkersubstitut, im Fertigbeton, im Straßenbelag, als Tragschicht im Straßenbau und als Bergversatz eingesetzt. Mit Hilfe der Abkühlbedingungen und den verschiedensten Verfahren können die Eigenschaften der Schlacke für den jeweiligen Bedarfsfall optimal angepasst werden. Daher ist es wichtig für die Verfahrensentwicklung, die Qualitätsmerkmale der bereits etablierten Produkte zu erreichen, um die bestehenden Absatzmärkte zu bedienen. [2, 11, 23] In der folgenden Abbildung 3.5 werden mögliche Hochofenschlackenprodukte und deren Verwendung dargestellt. Dabei sei besonders auf die Kristallstruktur hingewiesen, welche von der Abkühlrate abhängt. [11]

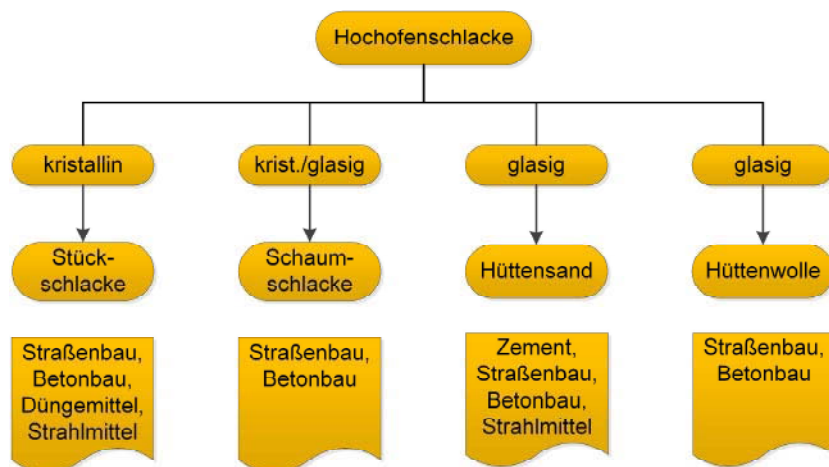


Abbildung 3.5.: Übersicht der Verarbeitungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Hochofenschlacke nach [11]

Aus dem Hochofenprozess werden hauptsächlich Hochofenstückschlacke und Hüttensand gewonnen. Basierend auf den jeweiligen Anforderungsprofilen der Produkte wird die Zusammensetzung der Einsatzstoffe im Hochofen eingestellt. Aufgrund dieser aktiven Steuerung der Eigenschaften kommt es zu einer Qualitätssteigerung der Schlacke ohne Einfluss auf die Qualität des Roheisens. Somit bestimmt nicht nur das Endprodukt „Stahl“ den Herstellungsprozess, sondern auch die Schlackeneigenschaften. Desweiteren haben sich in den letzten Jahren dauerhafte und wirtschaftliche Verwendungen der Produkte entwickelt und repräsentieren einen aktiven Absatzmarkt. Auf Basis dieser Umstände können die Hochofenstückschlacke und der Hüttensand auch von Rechts wegen als Nebenprodukte angesehen werden. [24]

In Europa werden hauptsächlich Hüttensand mit circa 80 % und Hochofenstückschlacke mit 20 % hergestellt. Der wesentliche Herstellungsunterschied wird in folge noch näher erläutert. [11]

Hochofenstückschlacke - Schlackenbeete

Zur Herstellung von Hochofenstückschlacke wird die schmelzflüssige Hochofenschlacke in dünnen Lagen in sogenannte Schlackenbeete verkippt, wobei die Schlacke durch Luftkontakt langsam kristallin erstarrt, siehe Abbildung 3.6. In vereinzelt Fällen wird zusätzlich Wasser oberflächlich mit einer Sprinkleranlage aufgebracht, um den Abkühlvorgang zu beschleunigen. Diese Methode repräsentiert den einfachsten Weg der stofflichen Verwertung von Hochofenschlacke. [14, 24]



Abbildung 3.6.: voestalpine Stahl GmbH in Linz – Schlackenbeete

Die erstarrte Schlacke wird anschließend mechanisch mit Radladern herausgearbeitet und je nach Anwendungsfall zu Stückgut gebrochen, siehe Abbildung 3.7. Die Aufbereitung beinhaltet eine Kombination aus Zerkleinerungsaggregaten, Klassieranlagen und Sortierstufen. Zum größten Teil findet die Hochofenstückschlacke Anwendung im Straßen-, Wege- und Gleisbau als Schotter, Splitte, Brechsande oder Mineralstoffgemisch. In der Landwirtschaft wird gemahlene Hochofenstückschlacke auch als Düngemittel unter dem Namen Hüttenkalk verwendet. [14, 24]



Abbildung 3.7.: voestalpine Stahl GmbH in Linz – Aufbereitung Hochofenstückschlacke

In der Abbildung 3.8 sind exemplarisch zwei Endprodukte, Gleisschotter und Streusplitt, abgebildet. Dabei ist deutlich die unterschiedliche Korngröße erkennbar. [14]



(a) Gleisschotter 0/63 mm



(b) Streusplitt 0/32 mm

Abbildung 3.8.: voestalpine Stahl GmbH in Linz – Hochofenstückschlacke

Hüttensand - Nassgranulation

Für die Hüttensandproduktion kommt nach dem aktuellen Stand der Technik die nasse Granulation zum Einsatz. Dabei wird die schmelzflüssige Hochofenschlacke schnell mit Wasser abgekühlt und erstarrt unter Ausbildung glasiger Phasen, siehe Abbildung 3.9. Durch diese Prozessführung können der geforderte hohe Glasgehalt und die daraus resultierenden latent hydraulischen Eigenschaften des Granulates garantiert werden. [7]



(a) Spritzkopf vor der Granulation



(b) Spritzkopf beim Granulieren

Abbildung 3.9.: Nassgranulation von Hochofenschlacke zu Hüttensand [25]

Aufgrund seiner guten latent-hydraulischen Eigenschaften und einer ähnlichen Zusammensetzung wie Portlandzementklinker, wird Hüttensand für die Herstellung von Bindemitteln herangezogen. Dabei müssen Grenzwerte nach DIN EN 15167-1 für Hüttensandmehl eingehalten werden, vergleiche Tabelle 3.4. [24]

Tabelle 3.4.: Grenzwerte von Hüttensand für den Einsatz in der Zementindustrie

Parameter	Einheit	Grenzwert DIN EN 15167-1
Magnesiumoxid	[M.-%]	≤ 18
Sulfid	[M.-%]	$\leq 2,0$
Sulfat	[M.-%]	$\leq 2,5$
Chlorid	[M.-%]	$\leq 0,10$
Glühverlust	[M.-%]	$\leq 3,0$
Glasgehalt	[-]	$\geq 2/3$
B ₁ [C/S]	[-]	$\geq 2/3$
B ₂ [(C+M)/S]	[-]	$> 1,0$

Beim Einsatz in der Bindemittelindustrie können Hüttensandgehalte von bis zu 35 % für Portlandzemente und 36 % bis 95 % für Hochofenzemente vorkommen. Bei der Anwendung von Hüttensand in der Zementindustrie können erhebliche Energiemengen und CO₂-Emissionen im Vergleich zum herkömmlichen Herstellungsprozess eingespart werden, ungefähr eine Tonne CO₂ pro Tonne Zement. [11]

In der folgenden Abbildung 3.10 ist Hüttensand der voestalpine Stahl GmbH Linz beispielhaft abgebildet. [2, 24]



(a) Hüttensand



(b) Hüttensand Haldenlagerung

Abbildung 3.10.: voestalpine Stahl GmbH Linz – Hüttensand

Obwohl die nasse Granulation eine sehr effektive und robuste Methode zur Behandlung von Hochofenschlacke darstellt, um die geforderten Qualitätskriterien der Zement- und Baustoffindustrie zu erreichen, ist es möglich die thermische Energie der Schlacke nutzbar zu machen. Im Gegenzug werden pro Tonne Schlacke noch ungefähr 10 Tonnen Wasser, wovon etwa 1-1,5 Tonnen verdampfen, gebraucht. Die Löslichkeit von Alkalien sowie die Freisetzung von Schwefelwasserstoff stellen weitere Umweltproblematiken der nassen Granulation dar. [7, 11, 17]

Zusammengefasst repräsentiert die nasse Granulation von Hochofenschlacke den Stand der Technik zur Herstellung von Hüttensand. Die nachfolgende Aufzählung soll jedoch die Nachteile einer solchen Behandlung mit Wasser in der Praxis aufzeigen [2]:

- Wasserverbrauch: Für die Granulation werden große Mengen an Wasser benötigt. Der Verbrauch bewegt sich in einem Bereich von 1,0–1,2 Tonnen Wasser pro Tonne Schlacke. [26]
- Energieverlust: Die in der Schlacke beinhaltenete Energie von rund 1,5 GJ/t geht durch die Entstehung von großen Mengen an Niedertemperaturdampf verloren.
- Emissionen: Bei der Reaktion von Schlacke und Wasser können Schwefeldioxid SO_2 , Schwefelwasserstoff H_2S und andere Sulfatverbindungen entstehen.
- Zusatzenergie: Für die Trocknung des Granulates werden rund 132 kWh/t verbraucht.

Dem gegenüber bietet die trockene Granulation ebenso die Möglichkeit ein glasiges Produkt herzustellen, bei der gleichzeitigen Nutzung des Energieinhaltes in Form von Heißgas, Dampf oder chemischer Energie. Aus diesem Grund hat sich die Forschung nach einem geeigneten Verfahren zur Energierückgewinnung aus schmelzflüssiger Schlacke auf die trockene Granulation verlagert. Das Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das die stoffliche Verwertung von Hochofenschlacke und Wärmerückgewinnung aus dem Granulationsprozess ermöglicht. [7, 27]

Die ersten Versuche zur trockenen Granulation wurden bereits in den 1930er Jahren durchgeführt, doch erst seit den frühen 1980ern wird in Europa und Japan auf wissenschaftlicher Ebene an geeigneten Verfahren geforscht. Daraus resultierten die ersten Labor- und Pilotanlagen, wobei die unterschiedlichsten Ansätze der Granulierung und der Energierückgewinnung zur Anwendung kamen. Diese Unterschiede werden im Kapitel 3.4 näher erläutert. Allerdings konnte sich bis heute keines dieser Verfahren am freien Markt durchsetzen. [7]

3.3. Energieinhalt von Hochofenschlacke

Der Energieverbrauch in den Hochtemperaturschritten der Metallindustrie lässt sich auf vier Ströme zurückführen: das Metall, die Schlacke, das Abgas und die natürlichen Verluste in die Atmosphäre. Dabei bildet die Schlacke den größten Anteil in Abhängigkeit vom Schlacke/Metall Verhältnis und der Abtrenntemperatur. Als Beispiel wird bei der Stahlherstellung von einem Energieverbrauch von 10-15% für die Schlacke ausgegangen. Im Jahr 2012 wurden mit dem Hochofenprozess weltweit 1,1 Mrd. Tonnen Roheisen erzeugt. Daraus ergeben sich rechnerisch bei einer Produktionsrate von 275 kg/Tonne Roheisen ungefähr 303 Mio. Tonnen Hochofenschlacke. Desweiteren ergibt sich daraus ein Energieinhalt von circa 126 TWh/a, den es für die Zukunft nutzbar zu machen gilt, um die Effizienzsteigerung der Eisen- und Stahlindustrie weiter voran zu treiben. [7, 12]

Der berechnete Energieinhalt repräsentiert die thermische Energie der Schlacke, die von der Abtrennung bis zum Erreichen der Umgebungstemperatur von 25 °C freigesetzt werden kann. Dies ist der Maximalwert, wenn die Schlacke langsam und kristallin erstarrt. [7]

Aus der Abbildung 3.11 ist auch ersichtlich, dass die Hochofenschlacke mit rund 47 % den größten Anteil der Weltproduktion an metallurgischen Schlacken einnimmt. Dies ist mit ein Grund, warum der aktuelle Fokus auf der Energierückgewinnung aus Hochofenschlacke liegt. Denn sie bietet nicht zuletzt aufgrund der hohen Produktionsrate ein enormes Potential zur Energienutzung. [7]

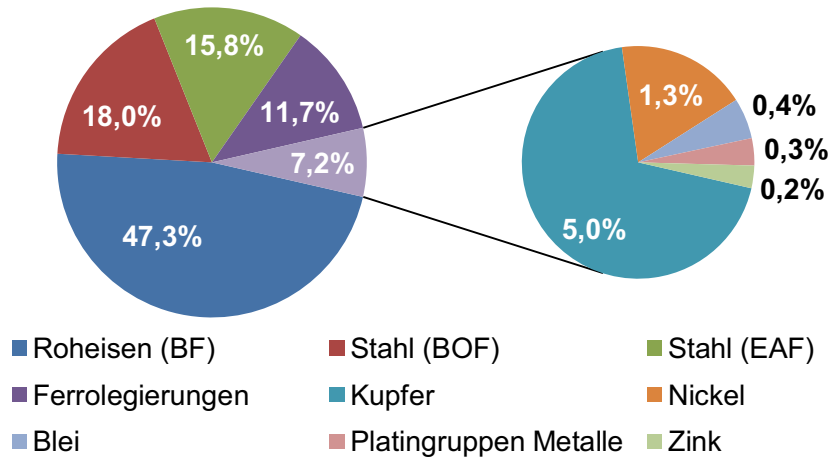


Abbildung 3.11.: Anteil von Eisenschlacken an der Gesamtenergie von Schlacken nach [7]

Der Energieinhalt von Hochofenschlacke wird in der Abbildung 3.12 noch einmal in Abhängigkeit von der Abstich- und Endtemperatur dargestellt. [14, 28]

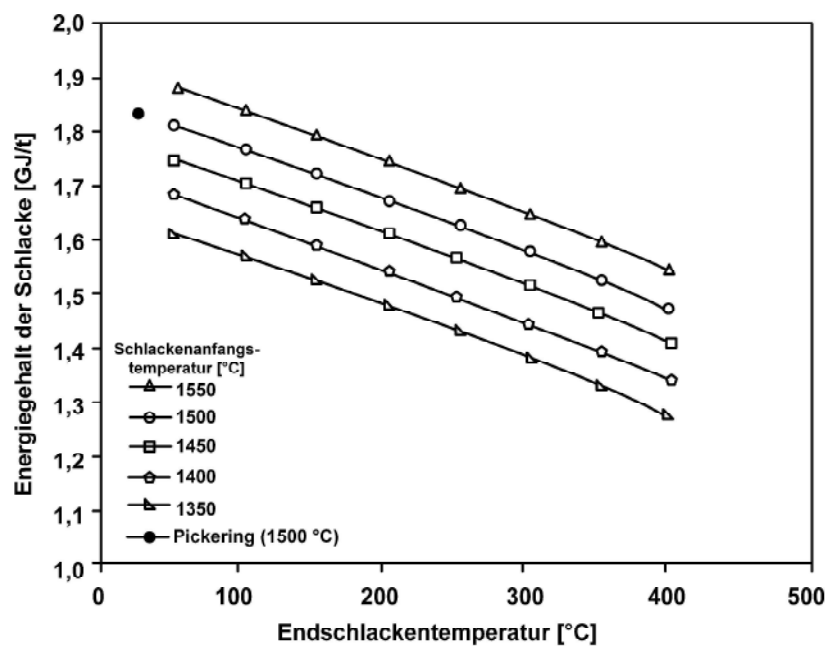


Abbildung 3.12.: Wärmeenergie von Hochofenschlacke nach [14]

Wie bereits vorher erwähnt zielt die Verarbeitung der flüssigen Hochofenschlacke auf die Herstellung eines Granulates, das einen Glasgehalt größer 95 % aufweist. Bei der Ausbildung dieser amorphen Phasen werden circa 17 % des Energieinhaltes der Schlacke für die Phasenumwandlung von kristallin zu amorph benötigt. Diese Energie kann nicht für eine weitere Nutzung zurückgewonnen werden und ist daher als Verlust anzusehen. Der Phasenübergang beziehungsweise die Kristallisationsenthalpie wird in der folgenden Abbildung 3.13 für Hochofenschlacke nochmal explizit in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. [7]

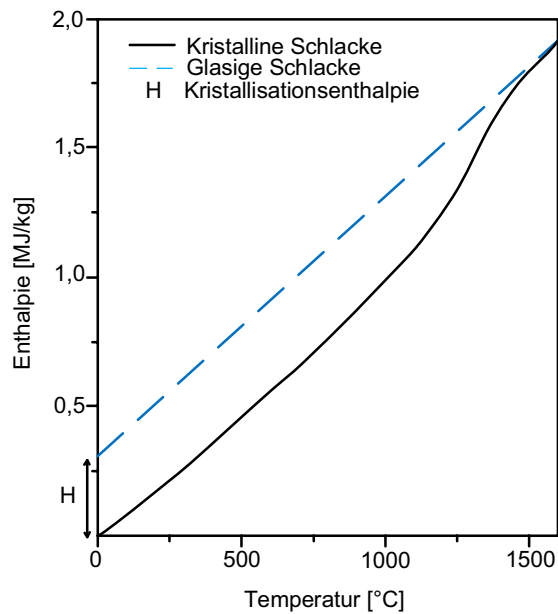


Abbildung 3.13.: Temperaturabhängigkeit des Wärmeinhaltes von Hochofenschlacke im Zwei-Phasensystem, glasig/kristallin [29]

3.4. Energierückgewinnung aus Hochtemperaturschlacken

Frühere Versuche der Energierückgewinnung aus Hochofenschlacken haben bereits gezeigt, dass es möglich ist die Energie durch Luft rückzugewinnen, doch bis dato konnte sich noch kein Verfahren zur trockenen Granulation am Markt durchsetzen.

Auf Basis von numerischen Methoden und experimentellen Messungen der Temperaturverteilung innerhalb eines Schlacketropfens hat sich gezeigt, dass sich schon in einem kleinen Tropfen ein großer Temperaturgradient ausbildet. Um dies zu veranschaulichen, wird in der Abbildung 3.14 ein solcher Temperaturverlauf in einem Schlacketropfen dargestellt. [7, 30]

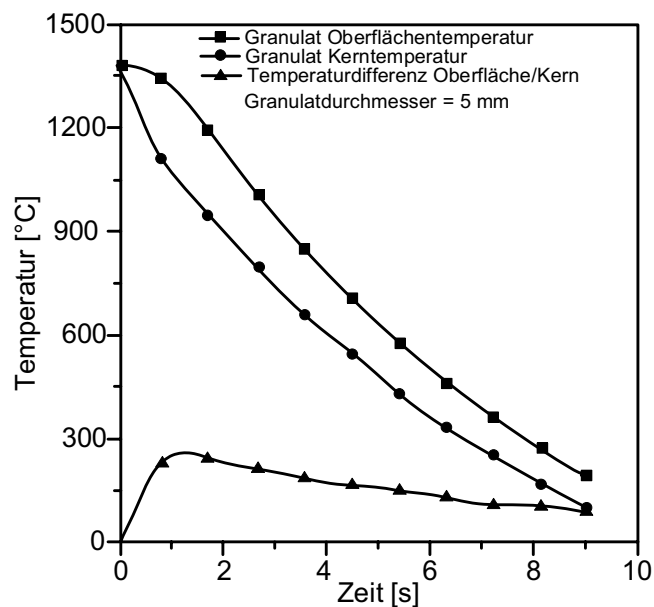


Abbildung 3.14.: Temperaturverlauf in einem 5 mm Hochofenschlacketropfen beim Abkühlen nach [31]

In der vorhergehenden Abbildung zeigt sich, dass der Temperaturunterschied von der Oberfläche bis zum Kern 200 °C betragen kann. Dies ist ein fundamentaler Umstand, den es bei einer effektiven Energierückgewinnung durch eine trockene Granulation zu beachten gilt. [7, 30]

Als Voraussetzung für ein wirtschaftliches Verfahren gilt es, ein glasiges Produkt bei gleichzeitiger effizienter Energierückgewinnung zu erzeugen. Um dabei einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten, sollte die flüssige Schlacke in stabförmige Tropfen zerteilt werden. Versucht man die Energie ohne Behandlung beziehungsweise Zugabe etwaiger Hilfsstoffe rückzugewinnen, kann nur ein geringer Wirkungsgrad erreicht werden. Dabei ist es auch nicht möglich, die raschen Abkühlraten für die Ausbildung der amorphen Phasen zu erreichen, die für den nötigen Glasgehalt essentiell sind. [7]

In der Vergangenheit wurde versucht die Energie der Schlacke mit Hilfe von geschmolzenem Salz nutzbar zu machen. Bei diesem Versuch wurde Schlackestrom in eine Salzschnmelze gekippt und die Temperaturerhöhung des Bades gemessen. Dabei wurde ein Wirkungsgrad von ungefähr 66 % erreicht, wobei das Produkt vergleichbare Eigenschaften wie Hüttensand aufwies. [7, 32]

Aktuell wird bei der Energierückgewinnung aus Hochofenschlacke versucht die Energie in Form von heißer Luft, Dampf oder chemischer Energie rückzugewinnen. Die Versuchsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik zielt auf die Produktion von heißer Abluft. In der Zukunft kann diese Energie auf den verschiedensten Wegen genutzt werden, je nach den lokalen Gegebenheiten beziehungsweise dem Bedarf des Betreibers.

Infolge widmet sich das Kapitel den Verfahren der Energierückgewinnung aus Hochofenschlacke, im Speziellen der trockenen Granulation. Dabei wird näher auf die einzelnen Entwicklungsschritte der vergangenen Jahrzehnte eingegangen. Bereits in den frühen 1980er Jahren gab es die ersten Versuchsanlagen, die sich auf wissenschaftlicher Ebene mit der trockenen Granulation beschäftigten. Grundsätzlich bestehen die Verfahren aus einem Granulationsmechanismus und einem Energierückgewinnungsschritt. Die Unterteilung erfolgt in physikalische und chemische Verfahren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die physikalischen Methoden näher behandelt. Die Unterscheidung der physikalischen Granulationsmethoden erfolgt in [27]:

- Mechanische Granulation
- Druckluft-Granulation
- Zentrifugal-Granulation

3.4.1. Mechanische Granulationsmethoden

Zu Beginn der Forschung im Bereich der trockenen Granulation von Hochofenschlacke kamen mechanische Granulationsverfahren zum Einsatz. Diese konnten mit den einfachsten Mitteln umgesetzt werden. [27]

Feststoff/Schlacken Zusammenstoßverfahren

Wie man aus dem Namen schließen kann, wird der flüssige Schlackestrom durch den Zusammenstoß mit bereits festen Partikeln zerteilt. Dieser Prozessablauf kann der Abbildung 3.15 entnommen werden. Dabei wird der flüssige Schlackestrom mit bereits granulierten, festen

Schlackepartikel vermischt und es kommt zur Ausbildung von neuem Granulat. Diese gebildeten Schlackepartikel gelangen gemeinsam mit den recycelten Partikeln in ein Wirbelbett, wobei der Energieaustausch zwischen Granulat und Luft stattfindet. Das produzierte Granulat hat eine Korngröße kleiner 6 mm, wobei der Anteil von 0-3 mm wieder in den Granulator rückgeführt wird. Bei diesem Prozess kann gesättigter Wasserdampf mit ungefähr 250 °C, bei einem Wirkungsgrad von circa 65 % ausgekoppelt werden. Dieses Verfahren konnte sich bis jetzt nicht kommerziell durchsetzen, doch aktuell verfolgt die Firma Paul Wurth wieder diesen Ansatz der Granulation, vergleiche Kapitel 4.1. [7, 27, 33, 34]

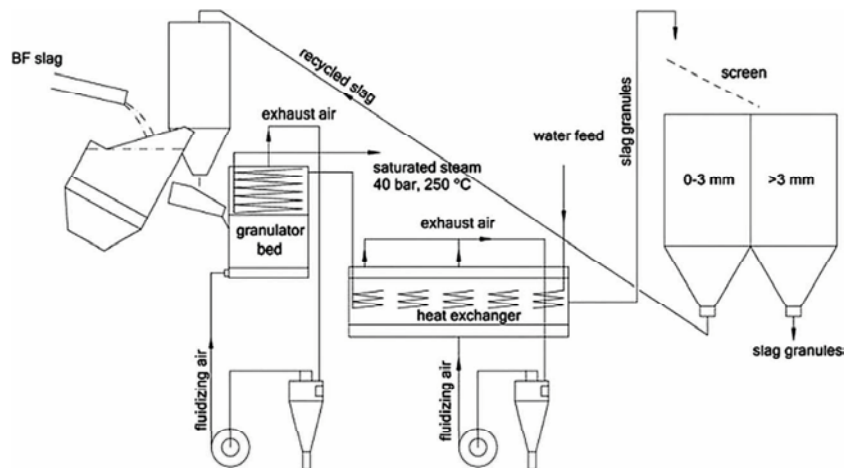


Abbildung 3.15.: Zusammenstoßverfahren zur Granulation von Hochofenschlacke der schwedischen Gruppe Merotec [7]

Rührverfahren

Beim mechanischen Rührprozess wird der flüssige Schlackestrom durch, das Rühren zerkleinert. Die japanische Firma Kawasaki Steel Corporation hat als erste eine Anlage basierend auf dieser Rührtechnik gebaut. Der Granulationsprozess wird in der folgenden Abbildung 3.16 dargestellt. [35, 36]

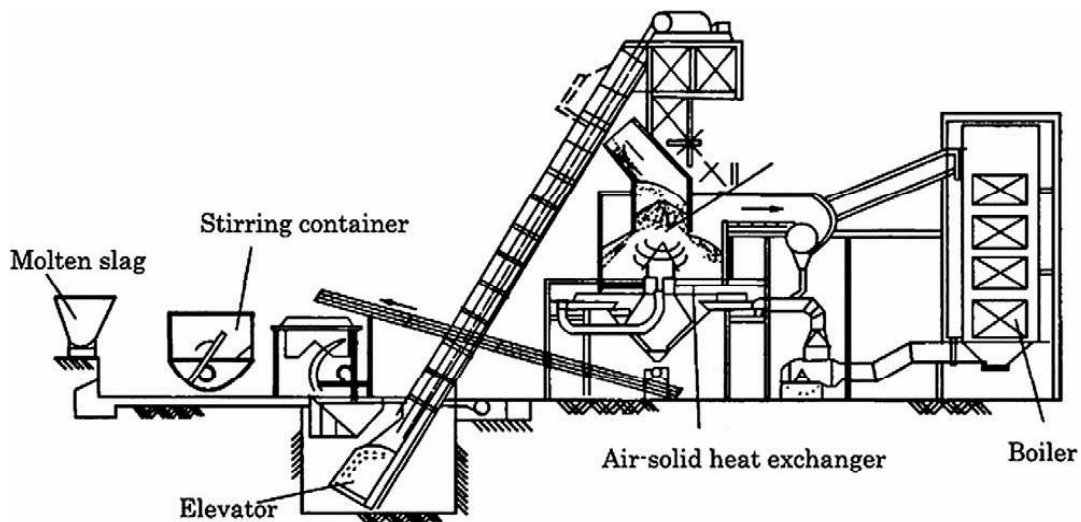


Abbildung 3.16.: Mechanischer Rührprozess in einem Rührbehälter zur Granulation von Hochofenschlacke der Firma Kawasaki Steel Corporation [35]

Die schmelzflüssige Schlacke wird durch die Bewegung eines Rührwerkes in einem halbkugelförmigen Behälter zerkleinert. Dabei wird die Energie der Schlacke mit Hilfe von Wasserrohren, die an der Behälterwand angebracht sind, abgeleitet. Danach wird die granulierten Schlacke in ein Wirbelbett gekippt, um die restliche Energie rückzugewinnen. Bei diesem Prozess erreicht man einen Wirkungsgrad von ungefähr 59 %. [27]

In einem anderen Rührprozess der Firma Sumitoma Metal wird die flüssige Schlacke mit Hilfe einer rotierenden Schnecke, wie in Abbildung 3.17 abgebildet, zerkleinert. Der Energieaustausch erfolgt über den Mantel und die Schneckenachse, die mit Wasser durchströmt werden. Die Schlacke wird am Ende mit einer ungefähren Temperatur von 900 °C ausgetragen. Daraus resultiert auch der geringe Wirkungsgrad von nur rund 50 %. [35, 36, 37, 38]

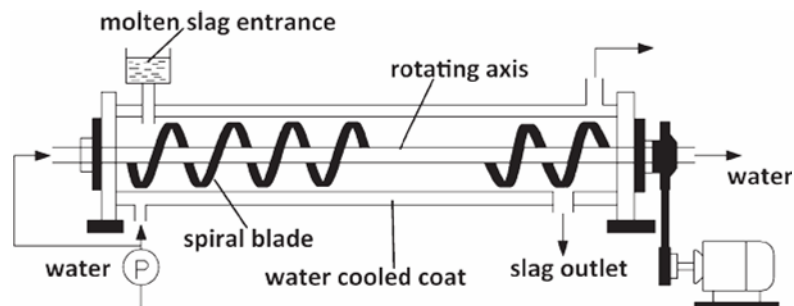


Abbildung 3.17.: Mechanischer Rührprozess mit einer rotierenden Schnecke zur Granulation von Schlacke der Firma Sumitoma Metal [37]

Der große Nachteil der beiden beschriebenen Verfahren ist die Herstellung relativ großer Schlackepartikel. Diese sind für die Energierückgewinnung wenig effektiv und können auch stofflich nicht weiter genutzt werden. Daher konnten sich die beiden Verfahren nicht kommerziell durchsetzen. [27]

Drehtrommelverfahren

Beim Drehtrommelverfahren wird die mechanische Einwirkung auf den Schlackefilm durch die Rotationsbewegung ausgenutzt. Diese Technik wurde schon in den frühen 1980er Jahren von der Firma Ishikawajimae Harima Heavy Industries und Sumitomo Metal angewandt und mündet in dem in Abbildung 3.18 dargestellten Drehtrommel-Granulationsprozess. [27, 36]

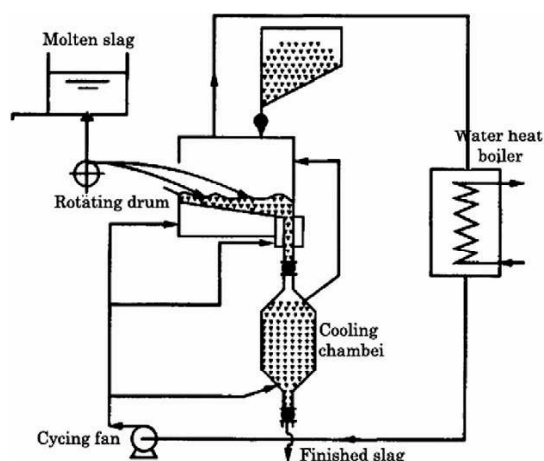


Abbildung 3.18.: Prozessschema der Drehtrommelgranulation von Hochofenschlacke der Firma Ishikawajimae Harima Heavy Industries [36]

Dabei wird die Schlacke direkt auf die Drehtrommel aufgegeben und zerteilt. Die Schlackepartikel werden aufgefangen und in eine Kühlkammer geleitet, wobei der Energieaustrag mittels Luft stattfindet. Dabei kann eine Ablufttemperatur von bis zu 500 °C bei einem Wirkungsgrad von 60 % erreicht werden. [27, 36]

Aus diesem Verfahren hat sich kurze Zeit später die Doppeltrommelgranulation der Firma Sumitomo Metal entwickelt, siehe Abbildung 3.19. Bei dieser Weiterentwicklung kommen zwei gegenläufige Trommeln zum Einsatz. Dabei erfolgt die Schlackenaufgabe zwischen den beiden Drehtrommeln. Durch die gegenläufige Drehbewegung wird die Schlacke zerteilt. Der Wärmeaustausch findet zwischen der Schlacke und dem in den Rollen befindlichen, leicht flüchtigen Kühlmittel statt. Bei dieser Verfahrensart konnte ein Wirkungsgrad von 40 % bei einem Glasgehalt des Granulates von 80 % erreicht werden. Die große Schwierigkeit dieses Verfahrens liegt in der Abtrennung der Schlacke von der Trommel. Dieser Umstand macht das Verfahren sehr wartungsanfällig und beeinflusst den Energieaustausch negativ. [27, 39]

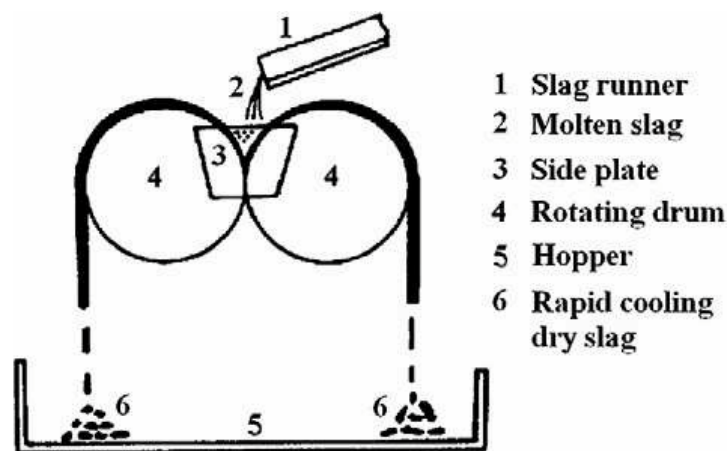


Abbildung 3.19.: Prozessschema einer Doppeltrommelgranulation von Hochofenschlacke der Firma Sumitomo Metal [39]

In den letzten Jahren hat die Forschung auf dem Gebiet der mechanischen Zerkleinerung an Bedeutung verloren, mit Ausnahme der Forschungstätigkeit der Firma Paul Wurth. Grundsätzlich kann der Rückgang des Interesses an folgenden Punkten festgemacht werden [27]:

- Die Qualität des produzierten Schlackengranulates entspricht größtenteils nicht den geforderten Kriterien. Die gekühlten Partikel besitzen beim Austrag eine unregelmäßig große Korngröße und können dadurch keiner ökonomischen Nutzung zugeführt werden. Um eine weitere Nutzung zu ermöglichen, müsste ein Brecher nachgeschaltet werden, der sich aber negativ auf den Gesamtenergieverbrauch auswirkt.
- Die Schlacke wird bei einer relativen hohen Temperatur von 500–900 °C ausgetragen, daraus resultiert der geringe Wirkungsgrad dieser Verfahren.

3.4.2. Druckluft Granulationsmethoden

Die Druckluftmethoden basieren auf der Zuhilfenahme von hohen Luftgeschwindigkeiten beziehungsweise Druckluftströmen zur Granulation. Die meist hohen Luftmengen ermöglichen rasche Abkühlraten bei der Zerteilung des flüssigen Schlackestromes. [27]

In den 1980er Jahren wurde in Japan ein Prototyp in Betrieb genommen, siehe Abbildung 3.20. Dabei wurde die Luft als einziges Medium zur Energierückgewinnung genutzt und direkt in einem Generator verstromt. Die Pilotanlage erreichte bei einem Schlackeneinsatz von 18 t/h eine Abgastemperatur von 450–500 °C. Dies entsprach einem Wirkungsgrad von 48 %, wobei der Glasgehalt mehr als 95 % betrug. Dieser Gehalt ist mit der nassen Granulation vergleichbar, aber aufgrund des komplizierten apparativen Aufbaues und des hohen Energieaufwandes konnte sich das Verfahren nicht durchsetzen. [27, 40]

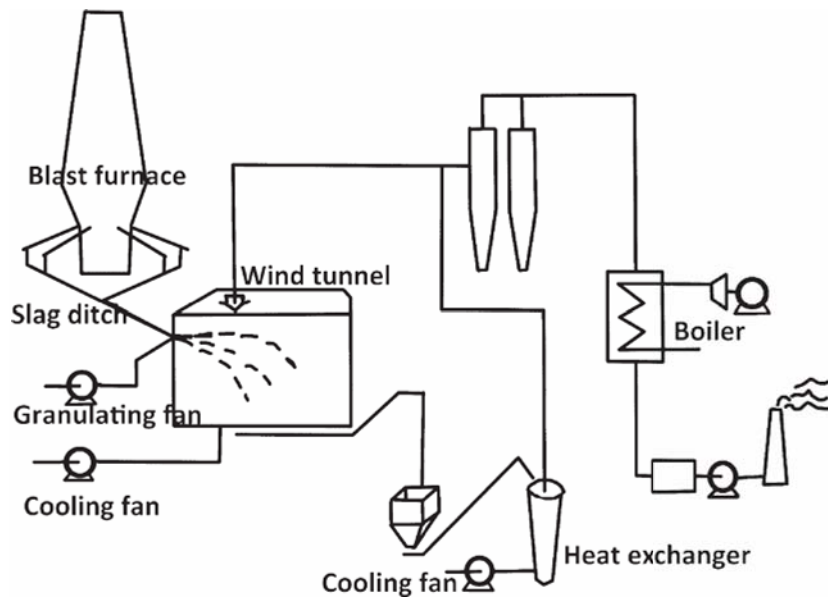


Abbildung 3.20.: Prozessschema einer japanischen Druckluftgranulation von Hochofenschlacke [40]

Das Verfahren wurde vom Russischen Ural Stahlinstitut weiterentwickelt, vergleiche Abbildung 3.21. Dabei wurde das System um eine Vibrationsrinne und einen Wirbelbettreaktor erweitert. Bevor der Schlackestrom auf die Vibrationsrinne trifft wird dieser mit Hilfe einer Luftdüse zerteilt. Durch die Vibrationsrinne wird das Zusammenpacken des Granulates verhindert und in den Wirbelbettreaktor transportiert. Die gekühlte Schlacke wurde mit einer Temperatur von 160–200 °C entnommen. Durch diese Erweiterung konnte eine Energieeffizienzsteigerung erreicht werden. [27, 37]

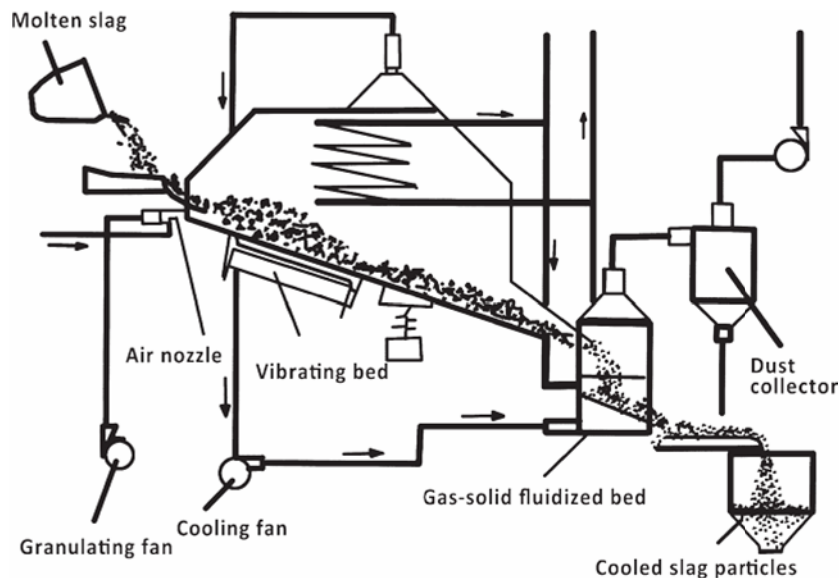


Abbildung 3.21.: Prozessschema einer Druckluftgranulation von Hochofenschlacke des Russischen Ural Stahlinstitutes [40]

Zusammenfassend sind die Druckluft Granulationsverfahren im Vergleich zu den mechanischen Verfahren besser zur Energierückgewinnung geeignet. Dies führte dazu, dass solche Anlagen auch einige Zeit, vor allem im asiatischen Raum betrieben wurden. Sie konnten sich aber auf lange Sicht nicht durchsetzen, da diese Granulationsmethoden einen hohen apparativen Aufwand und Energiebedarf besitzen. Desweiteren wird ein gutes Fließverhalten der Schlacke vorausgesetzt, das nicht immer garantiert werden kann. [27]

3.4.3. Zentrifugal Granulationsmethoden

Die Zentrifugal Granulationsmethoden sind jene Verfahren mit dem größten Potential zur stofflichen und energetischen Verwertung von Hochofenschlacke. Dabei kommen der Rotating Cup Atomizer (RCA) und der Spinning Disc Atomizer (SDA) zu Einsatz. Die Versuchsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik basiert auf dem RCA Verfahren. [27]

Rotating Cup Atomizer (RCA) Verfahren

Bei diesem Granulationsansatz steht ein schnell rotierender Drehteller im Mittelpunkt. Die flüssige Schlacke wird direkt auf diesen aufgebracht und durch die Rotationsbewegung kommt es zur Zerteilung der Schlacke in einzelne Tropfen, die radial nach außen geschleudert werden. Gleichzeitig wird Luft von unten in den Granulatorraum geleitet, um die Partikel abzukühlen. Bei diesem Vorgang entsteht ein feines, glasiges Granulat und heiße Prozessluft, die den Granulator nach oben hin verlässt. [27]

Der erste Prototyp einer solchen Anlage wurde in den frühen 1980er Jahren in Großbritannien gebaut und betrieben, siehe Abbildung 3.22. [27, 29, 34]

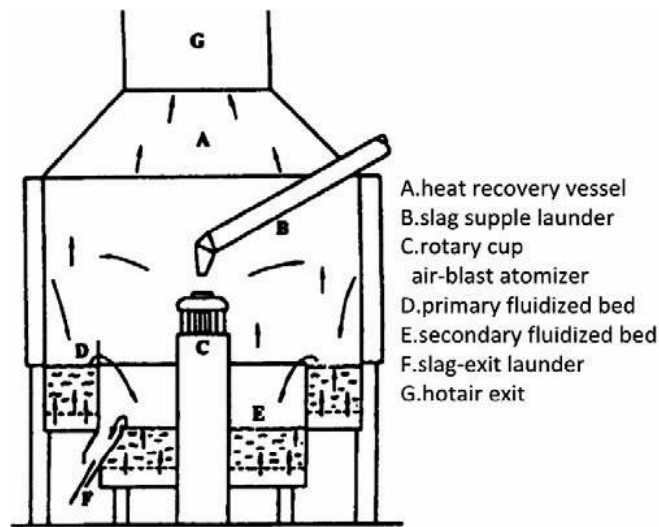


Abbildung 3.22.: Rotating Cup Atomizer (RCA) Granulationsverfahren von Hochofenschlacke von Pickering [34]

Durch den schnell rotierenden Drehteller wird der auftreffende Schlackestrom zerteilt und die einzelnen Partikeln fallen in ein Wirbelbett, in dem sie mit Luft abgekühlt werden. Der Abkühlvorgang erfolgt so rasch, dass die Schlacke amorph erstarrt. In der zweiten Stufe fällt das Granulat in ein weiteres Wirbelbett, worin die restliche Energierückgewinnung stattfindet. Die dabei entstehenden Schlackepartikel haben einen Durchmesser von ungefähr 2 mm und einen Glasgehalt von über 95 %. Bei diesen Versuchen wurde ein Wirkungsgrad von 59 % erzielt, wobei die Schlackepartikel schon bei einer Temperatur von rund 250 °C entnommen wurden. [27, 41]

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Prozess hatte großen Einfluss auf zukünftige Entwicklungen. Als Beispiel kann die in der Abbildung 3.23 dargestellte Versuchsanlage von Mizouchi genannt werden. [27, 42]

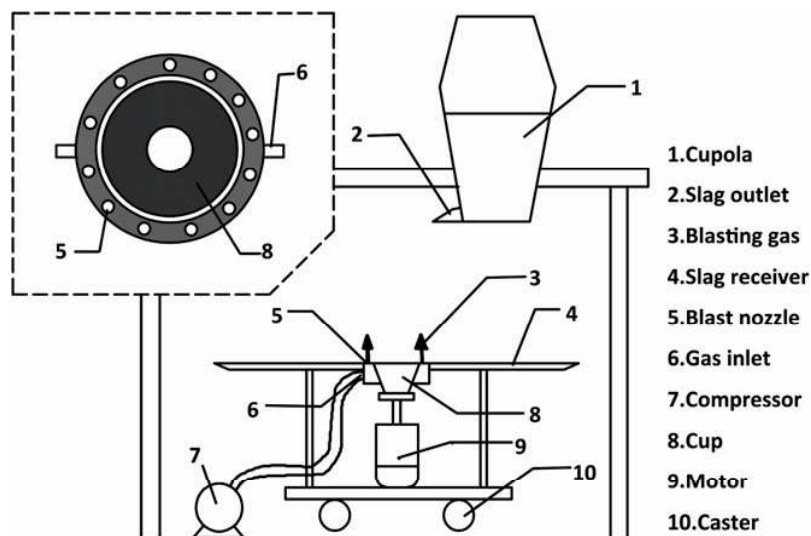


Abbildung 3.23.: Versuchsapparatur nach dem RCA Verfahren von Mizouchi [42]

Bei diesem Verfahren wird die schmelzflüssige Schlacke mit Hilfe einer Kombination aus Drehteller und Luftdüsen granuliert. Dabei wurden speziell die Auswirkungen der Drehtellergeschwindigkeit, Schlackenviskosität und Prozessluftmenge auf die entstehende Partikelgröße untersucht. Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten [27]:

- Eine hohe Drehtellergeschwindigkeit resultiert in einer kleinen Partikelgröße, aufgrund der starken Zentrifugalkräfte. Wenn sich die Rotationsgeschwindigkeit in einem Bereich von 10-30 U/s bewegt, ist ein signifikanter Einfluss auf die Partikelgröße in einem Bereich von 1-6 mm zu beobachten.
- Der Durchmesser der Partikel nahm mit sinkender Schlackenviskosität ab.
- Eine hohe Luftmenge erzeugt feine Schlackepartikel mit geringen Durchmessern und hohen Glasgehalten. Dies kann durch die große Stoßkraft der Zentrifugalkraft und die rasche Abkühlrate erklärt werden.

Desweiteren wurde auf der Northeast Universität in China der Einfluss der Drehtellergeometrie und des Drehtellerdurchmessers auf die Partikelgröße untersucht. Dabei zeigte sich, dass bei einer größeren Kante am Drehtellerrand und einer Geschwindigkeiten unter 1000 U/min im Durchschnitt kleinere Partikel entstehen. Dieser Effekt verliert seine Wirkung, wenn die Geschwindigkeit auf über 1000 U/min gesteigert wird. Dies wurde dadurch erklärt, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Schlackefilm über den Drehteller rutscht ohne richtig Kontakt zu haben. Hinsichtlich der Energierückgewinnung wurden Rohre an der Granulatorwand, installiert um Heißwasser zu produzieren. Der schematische Versuchsaufbau wird in der folgenden Abbildung 3.23 aufgezeigt. [27, 43]

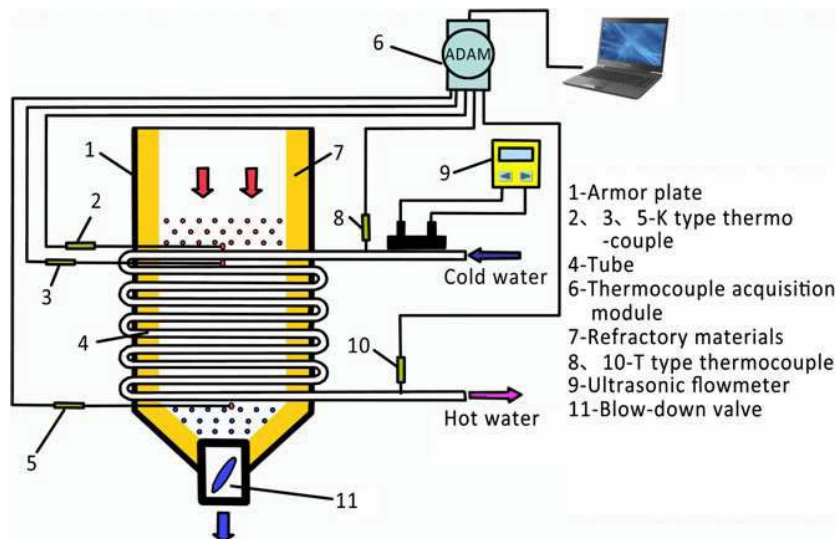


Abbildung 3.24.: Versuchsausrüstung der Northeast Universität (China) nach dem RCA Prinzip mit Energierückgewinnung [43]

Spinning Disk Atomizer (SDA) Verfahren

Beim SDA Verfahren wird die schmelzflüssige Schlacke mit Hilfe einer schnell rotierenden Scheibe granuliert. Der Unterschied zum Rotating Cup Atomizer (RCA) liegt im Wesentlichen im Aufbau des Granulators. Die Zerteilung der Schlacke erfolgt wie beim RCA aufgrund der Zentrifugalkräfte, die auf den Schlackestrom wirken. [27]

An der Universität von Hokkaido wurde eine Laboranlage gebaut, um die Partikelbildung im Granulationsprozess zu erforschen. Dazu wurde die Granulation mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Der apparative Aufbau kann der folgenden Abbildung 3.25 entnommen werden. [27]

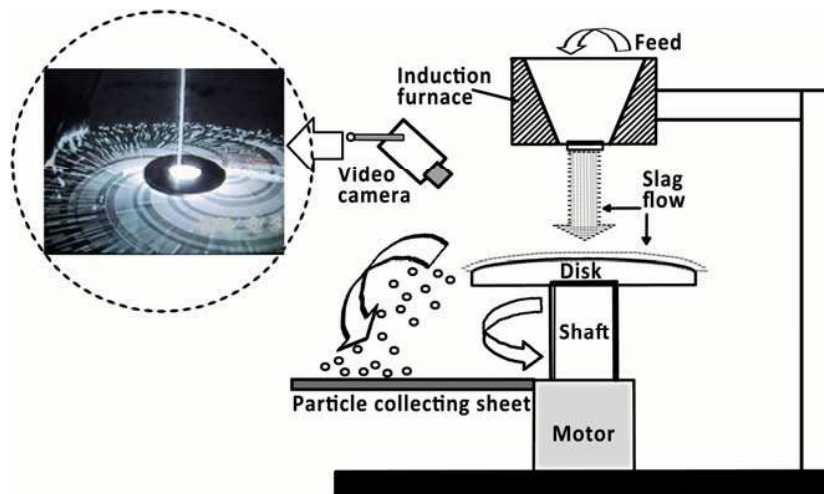


Abbildung 3.25.: Versuchsanlage der Hokkaido Universität (China) nach dem SDA Prinzip [27]

Mithilfe dieser japanischen Versuchsanlage, dass die Schlacke zu Beginn des Prozesses auf der Scheibe einen Film ausbildet, der sich anschließend in kleine Fäden aufteilt. Je weiter die Schlacke radial nach außen gelangt, brechen die Fäden auf und es bildet sich Granulat. Mit Versuchsaufbau wurde Granulat mit einer Korngröße von 0,6-0,8 mm erzeugt. Anhand der generierten Messergebnisse wurde eine mathematische Simulation erstellt, um den Zusammenhang zwischen Scheibendurchmesser, Temperatur und Partikelgröße zu klären. Daraus konnte abgeleitet werden, dass der Einfluss der Drehtellergeschwindigkeit, Schlackenviskosität und Prozessluftmenge auf die Partikelgröße ähnlich wie beim RCA ist. Somit gibt es keinen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Verfahren. [27]

Eine Gruppe der Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) hat eine Granulationanlage basierend auf dem SDA entwickelt. Ein wesentliches Merkmal dieser Anlage ist die Trennung der Granulation von der Energierückgewinnung. [27] Im ersten Schritt wird die Schlacke mittels einer schnell drehenden Scheibe zerteilt. Dabei werden die Schlackepartikel mit einem nach oben gerichteten Luftstrom unter die Transformationstemperatur von 900 °C abgekühlt. Im anschließenden zweiten Prozessschritt werden die Schlackepartikel in einem Festbettreaktor mit Luft unter 50 °C abgekühlt. Die erzeugte Heißluft erreicht eine Temperatur von rund 600 °C. CSIRO arbeitet aktuell an der Realisierung einer großtechnischen Versuchsanlage, siehe Kapitel 4.3. [27]

Zusammenfassend

Für stoffliche Verwertung und die Wärmerückgewinnung aus Hochofenschlacke ist die Granulation ein kritischer Prozessschritt. Dieser hat Einfluss auf die Partikeleigenschaften und in weiterer Folge auf den Wirkungsgrad der Energierückgewinnung. Vergleicht man die Zentrifugal Granulation mit den bisher angewandten Methoden, können der geringe Energieverbrauch

sowie der einfache und kompakte Anlagenaufbau hervor gestrichen werden. Es ist auch möglich die Qualität und Korngröße der Schlackepartikel anhand der Prozessparameter wie Drehgeschwindigkeit, Granulatorgröße und Prozessluftmenge zu steuern. Darüber hinaus können mit der Zentrifugalgranulation die verschiedensten Energierückgewinnungsmethoden bedient werden. Dabei stellen der RCA und SDA die beiden Hauptrichtungen der aktuellen Forschung zur Energierückgewinnung aus schmelzflüssiger Schlacke dar. [27]

In der folgenden Tabelle 3.5 werden noch einmal alle vorhergehenden Granulationsverfahren überblicksartig zusammengefasst. Daraus ist eindeutig ersichtlich, dass die Partikelgröße von der mechanischen Granulation zur Zentrifugalgranulation deutlich abgenommen hat. Aufgrund der gesunkenen Partikelgröße kann auch ein höherer Wirkungsgrad und eine bessere Produktqualität erzielt werden. [27]

Tabelle 3.5.: Zusammenfassung der Granulationsverfahren und Energierückgewinnungsmethoden nach [27]

Forschergruppe/Firma	Granulation	Partikelgröße [mm]	Wärmetauscher	Wirkungsgrad [%]
Merotec (Schweden)	Feststoff Zusammenstoß	3	Wirbelbett	65
Kawasaki steel (Japan)	Mechanischer Rührer	40	Plattentauscher	50
Sumitomo metal (Japan)	Mechanischer Rührer	20	Plattentauscher	50
Ishikawajimae Harima Heavy Industries and Sumitomo Metal (Japan)	Drehtrommel	10	Wirbelbett	60
NKK corporation (Japan)	Doppeldrehtrommel	–	Plattentauscher	40
Six major Japanese steel companies (Japan)	Luftdüsen	–	Wirbelbett	48
Pickerung (UK)	Rotating Cup	2	Wirbelbett	59
Mizuochi (Japan)	Rotating Cup	2-4	–	–
CSIRO (Australien)	Spinning Disc	1-2	Festbett	70

4. Aktuelle Konkurrenzverfahren und Forschungsgruppen

Der ungenutzte Energieinhalt von flüssiger Hochofenschlacke steht im Fokus einiger Forschungsgruppen wie zum Beispiel Paul Wurth (PW), Central Iron and Steel Research Institute China (CISRI), Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research (CSIRO) und Siemens VAI (SVAI). Die dabei verwendeten Verfahren basieren auf den verschiedensten Technologien der Energierückgewinnung wie der Rückgewinnung mit Luft, durch Kühlrohre oder durch das Mischen mit anderen Feststoffen. [28]

4.1. Paul Wurth (PW)

Paul Wurth setzt bei der trockenen Granulation als einziges Unternehmen auf ein Verfahren ohne rotierenden Drehteller. Die Granulation basiert dort auf einer Festkörperabkühlung, wobei die flüssige Hochofenschlacke in einen Kübel vergossen und mit Metallkugeln über den ganzen Querschnitt vermischt wird, vergleiche Abbildung 4.1. [44, 45]



Abbildung 4.1.: Grundprinzip der Festkörperabkühlung der Firma Paul Wurth zur Energierückgewinnung aus schmelzflüssiger Hochofenschlacken [44]

Die Kugeln dienen als Kühlelemente, indem sie eine große Kontaktfläche für den Energieübergang zu Verfügung stellen, und ermöglichen somit das Erreichen der notwendigen Abkühlrate für ein glasiges Erstarrung der Hochofenschlacke. In etwa 30 Sekunden stellt sich ein Gleichgewicht bei ungefähr 600 bis 800 °C zwischen der Schlacke und den Metallkugeln ein. Daraus resultiert die Erstarrung der Schlacke unter Ausbildung glasiger Phasen, in denen die Metallkugeln eingeschlossen sind, siehe Abbildung 4.2. [44, 46]



(a) Mischung Hochofenschlacke/Metallkugeln



(b) Mischung in der Anlage

Abbildung 4.2.: Glasig erstarrte Hochofenschlacke vor der anschließenden Aufbereitung nach dem Granulationsverfahren der Firma Paul Wurth [45]

Die entstandene Mischung (Schlacke/Metallkugeln) ist sehr brüchig und zerfällt zu einer losen Mischung nach dem Kontakt mit einer starren Wand. Dies kann schon durch die Aufgabe in den Wärmetauscher gegeben sein. Dort wird die Mischung anschließend nach dem Gegenstromprinzip mit Luft auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Die Kühlung kann über einen Schachtkühler, Röhrenkühler, Kugel- oder Rohrmühlen geschehen. Dabei können theoretische Abgastemperaturen von 500 bis 700 °C erreicht werden. Abschließend werden die Metallkugeln aus der abgekühlten Mischung mittels Magnetabscheider abgetrennt und in den Prozess rückgeführt. Der gesamte Prozessablauf kann zusammengefasst der Abbildung 4.3 entnommen werden. [44, 45]

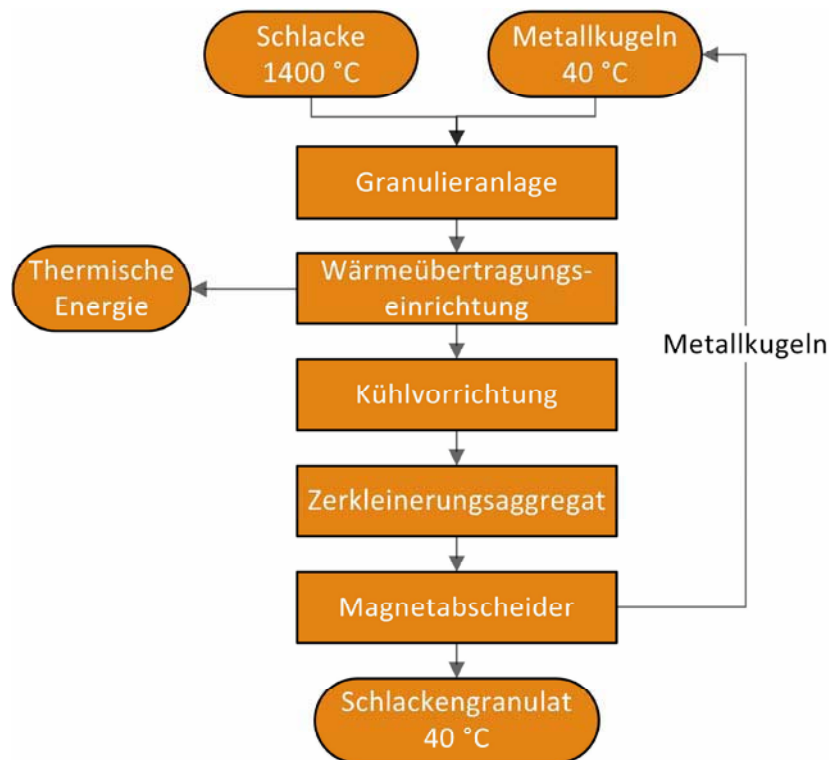


Abbildung 4.3.: Fließbild des Granulationsverfahrens der Firma Paul Wurth nach [44]

Nach den ersten erfolgreichen Vorversuchen baute Paul Wurth 2009 eine Versuchsanlage am Werksgelände der Dillinger Hütte (ROGESA), siehe Abbildung 4.4. [44, 45]



Abbildung 4.4.: Versuchsanlage der Firma Paul Wurth am Werksgelände der Dillinger Hütte der Firma ROGESA [44]

Bei diesen Tests konnten die Abkühlrate und Behältergeometrie optimiert werden. Am Ende konnten 700 kg Hochofenschlacke in einem einzelnen Behälter behandelt werden, welche in weiterer Folge in der Pilotanlage zum Einsatz kommen sollen. [44]

Insgesamt konnten wertvolle Resultate und Erkenntnisse aus den Versuchen gewonnen werden. Produktseitig wurde ein hoher Glasgehalt erreicht, der mit der nassen Granulation vergleichbar ist. Somit ist auch die erste Grundvoraussetzung für die stoffliche Verwertung der Hochofenschlacke gegeben. Bei näheren Untersuchungen und Vergleichen mit konventionellem Hüttensand durch das FEhS-Institutes lagen die folgenden Parameter ihrer vorgeschriebenen Bereiches [45]:

- Chemische Zusammensetzung
- Glasgehalt
- Korngrößenverteilung
- Verarbeitbarkeit (Wasserbedarf, Abbindezeit, ...) von Schlackezement mit 50 M.-% und 75 M.-% Hochofenschlacke
- Mahlbarkeit und Mahlenergie

Auf Basis dieser erfolgreichen Versuche ist es Paul Wurth gelungen eine Abmachung mit ROGESA zu schließen, die den Bau einer Pilotanlage am Gelände der Dillinger Hütte bis zum Sommer 2013 in zwei Phasen ermöglicht, siehe Abbildung 4.5. In der ersten Phase soll ein maximaler Schlackestrom von 6 Tonnen/min behandelt werden. Eine Energierückgewinnung ist in dieser Phase noch nicht angedacht, sondern soll nach einer Optimierung des Granulationsprozesses implementiert werden. Die vollständige Anlage soll am Ende 2000 Tonnen Hochofenschlacke pro Tag verarbeiten und dabei einen kontinuierlichen Heißdampfstrom liefern. Diese Anlage würde die erste großtechnische Referenzanlage nach diesem Granulationsprinzip darstellen. [44, 45]

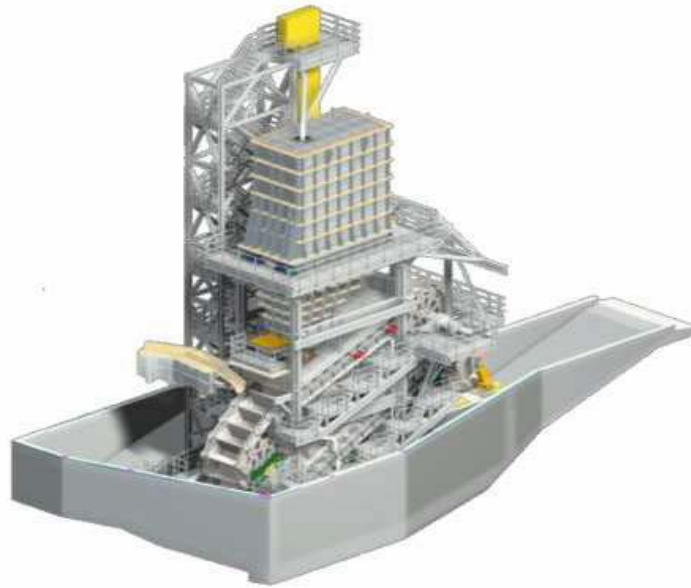


Abbildung 4.5.: Modell der Pilotanlage der Firma Paul Wurth mit einer Kapazität von 6 t/min flüssiger Hochofenschlacke [46]

Die allgemeinen Zielvorgaben für dieses Verfahren können in drei Punkte zusammengefasst werden und decken sich in den Grundzügen mit den anderen Konkurrenzverfahren [44]:

- Rasche Abkühlrate, um die glasige Erstarrung der Schlacke zu gewährleisten
- Hohe Energieübertragung aus der Mischung (Schlacke/Metallkugeln)
- Schaffung einer großen Austauschfläche der gebrochenen Mischung

In der Tabelle 4.1 ist die Machbarkeitsstudie des von Paul Wurth entwickelten Verfahrens zur Energierückgewinnung dargestellt. Die Berechnung basiert dabei auf folgenden Daten [44]:

- Schlackenproduktion 680.000 t/a
- Erlöse Schlackenprodukt 20 €/t
- Wasserkosten 0,5 €/m³
- Stromkosten 50 €/MWh
- Erdgaskosten 29 €/MWh

Tabelle 4.1.: Machbarkeitsstudie der Firma Paul Wurth des Granulationsverfahren nach [44]

	Option A: Stromproduktion	Option B: Heißluft Nutzung
Investment	26 Mio. €	22 Mio. €
Energieproduktion	6 MW _{elektrisch}	22 MW _{thermisch}
Interner Zinsfuß	46 %	73 %
Amortisationszeit	4,3 Jahre	3,4 Jahre

Die Hauptvorteile des Paul Wurth Verfahrens im Vergleich zu anderen trockenen Granulationstechnologien sind die [45]:

- Unabhängigkeit vom Schlackenmassstrom
- Unabhängigkeit von den physikalischen Schlackeneigenschaften

4.2. Central Iron and Steel Research Institute China (CISRI)

Zur Zeit gibt es in China einige Forschungsprojekte, die sich mit der trockenen Granulation von Hochofenschlacke nach dem RCA Prinzip beschäftigen. Diese unterstehen alle der China Iron and Steel Research Institute Group (CISRI). [47]

Aktuell wird eine Versuchsanlage an der Universität von Wuhan betrieben. Mit dieser ist es möglich 5 kg schmelzflüssige Hochofenschlacke zu behandeln, siehe Abbildung 4.6. [47]



(a) Außenansicht



(b) Granulatorraum



(c) Innenansicht Granulatorraum Drehteller



(d) Granulationsvorgang

Abbildung 4.6.: Laboranlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke nach dem RCA Verfahren an der Universität von Wuhan[48]

Mit dieser Anlage gilt es den Einfluss folgender Prozessparameter zu verifizieren [47]:

- Drehtellergeschwindigkeit, -material, -geometrie
- Schlackenmassstrom
- Abstand Abstichloch zum Drehteller
- Schlackenwollenbildung

Um den Einfluss des Drehtellermaterials und der Drehtellergeometrie auf die Granulation zu bestimmen, wurden die verschiedensten Drehteller-Typen bei der Granulation getestet, vergleiche Abbildung 4.7. [47]

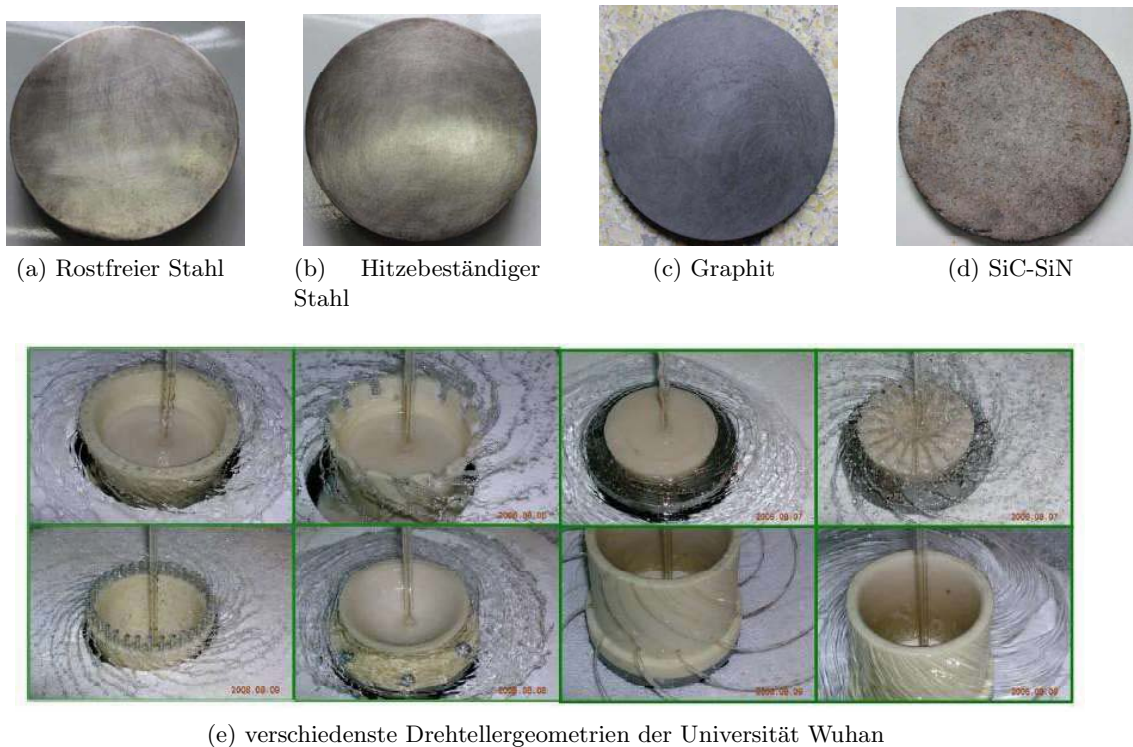


Abbildung 4.7.: Drehtellergeometrien der Laborversuchsanlage der Universität Wuhan [48]

Aus den Untersuchungen konnten folgende Parameter für eine optimale Prozessführung abgeleitet werden [47]:

- Drehtellermaterial: Graphit
- Drehtellergeschwindigkeit: zwischen 1500 und 2300 U/min

Mit diesem Setup konnten Glasgehalte größer 88 % erreicht werden. Je höher die Schlackentemperatur und die Rauheit der Drehtelleroberfläche sind, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit der Schlackewollenbildung, vergleiche Abbildung 4.8. [47]

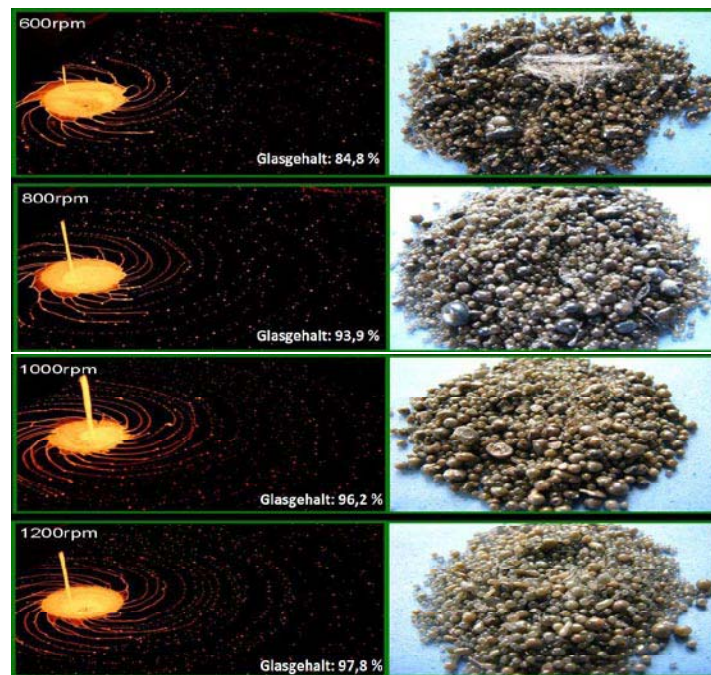
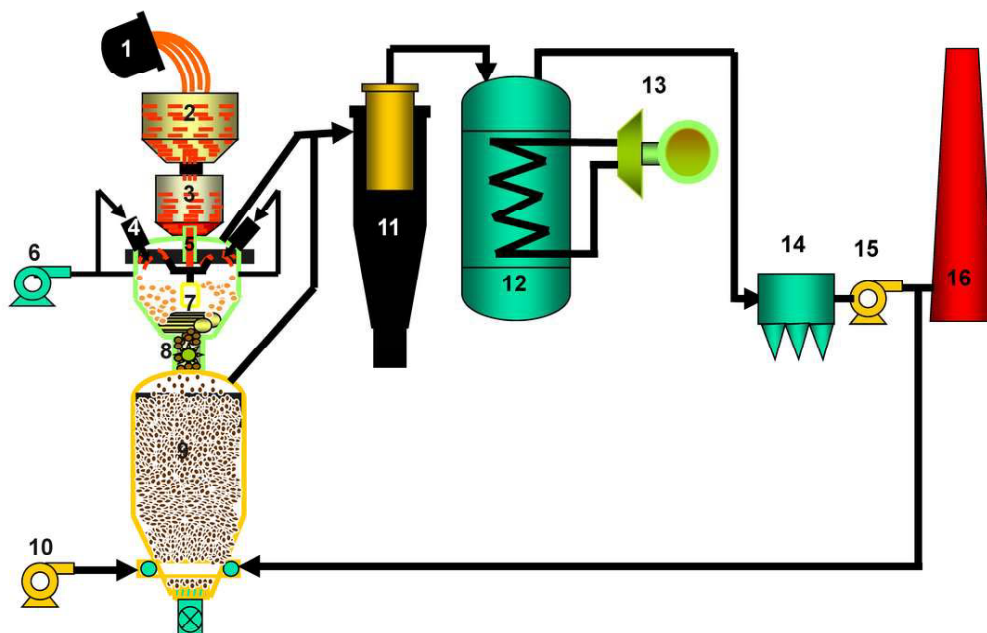


Abbildung 4.8.: Produkte der Laboranlage in Abhängigkeit von der Drehtellergeschwindigkeit der Universität Wuhan nach [48]

Mit Hilfe der generierten Daten wurden mathematische Modelle für die weitere Verfahrensentwicklung erstellt. Basierend auf experimentellen Versuchen und den mathematischen Modellen wurde eine großtechnische Anlage geplant. Das Verfahren wird im folgenden Fließbild dargestellt, siehe Abbildung 4.9. [47]



- (1) Schlackenkübel, (2) Schlackentank, (3) Schlackenverteiler, (4) Hochdruckluftdüsen, (5) Düsenstein, (6) Primär Kühlluftgebläse, (7) Walzenbrecher, (8) Austragsrad, (9) Vertikales Wirbelbett, (10) Sekundär Kühlluftgebläse, (11) Staubabscheider, (12) Kessel, (13) Dampfgenerator, (14) Feinstaubabscheider, (15) Kamin

Abbildung 4.9.: Prozessfließbild zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke mit Wärmerückgewinnung des CISRI [47]

Bei diesem System wird die flüssige Schlacke zu Beginn zentral auf den Drehteller aufgegeben und dort durch die Zentrifugalkräfte zerteilt. Die Partikeln werden anschließend Richtung Granulatorwand geschleudert und prallen von dort in einen Wirbelschichtwärmetauscher ab. Darin werden diese rasch durch Luft abgekühlt. [47]

Der Schlackeneingangsstrom wird mittels eines Schiebersystems am Zwischenbehälter geregelt, um einen kontinuierlichen Zufluss am Drehteller zu gewährleisten. Der Transport von dem Granulationsraum zum Wirbelschichtwärmetauscher wird durch zwei Walzenbrecher realisiert. Dabei werden beide Walzenrollen von innen mit Wasser gekühlt, um die Oberflächentemperatur unter 300 °C zu halten. Um den Prozess besser steuern zu können, sind im Granulationsraum noch zusätzliche Hochgeschwindigkeits-Luftdüsen verbaut, die den Abkühlvorgang der Schlacke unter 750 °C unterstützen. Die finale Ablufttemperatur erreicht ungefähr 700 °C, wobei die Schlacke mit einer Temperatur von kleiner 150 °C dem System entnommen wird. [47]

Eine wichtige Erkenntnis aus den bereits durchgeführten Versuchen ist der Einfluss der Prozessluftmenge auf den Glasgehalt und die Abgastemperatur. Dieser Zusammenhang kann der Abbildung 4.10 entnommen werden. Daraus ist die indirekte Proportionalität der Ablufttemperatur zum Glasgehalt in Abhängigkeit der Prozessluftmenge ableitbar. [47]

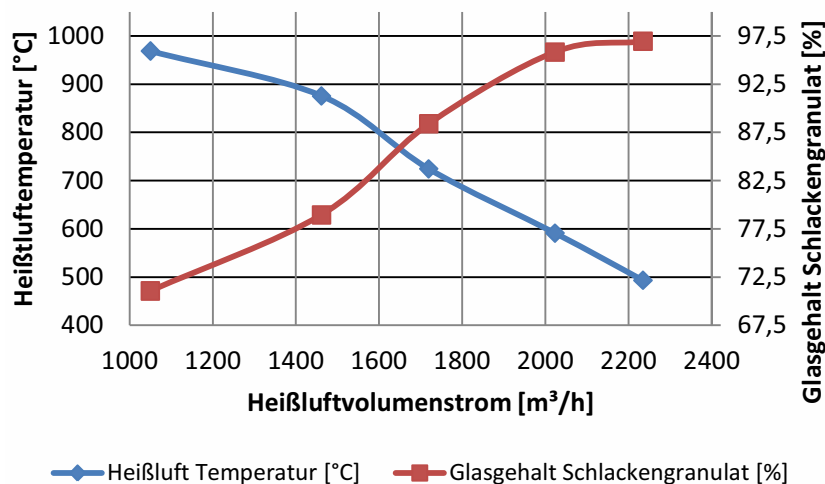


Abbildung 4.10.: Abhängigkeit des Glasgehaltes und der Heißlufttemperatur von dem Prozessluftvolumenstrom bei den Laborversuchen der Universität Wuhan nach [47]

Für die weitere Entwicklung wurde auch für dieses Verfahren eine Energiebilanz mit folgenden Angaben angesetzt [47]:

- Eingangsenergiemenge 2,1 GJ (von 1,2 Tonnen Schlacke)
- Ausgangsenergiemenge 1,6 GJ (Heißlufttemperatur 594 °C)

Daraus errechnet sich ein Wirkungsgrad für die Wärmeübertragung zwischen Schlacke und Luft von circa 77%.

4.3. Australia's Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation (CSIRO)

Aufgrund des steigenden Interesses der Industrie an einer neuen Möglichkeit der Behandlung von Hochofenschlacke wurde 2002 die Forschung auf dem Gebiet der trockenen Granulation aufgenommen. Zu Beginn galt es die Grundlagen der trockenen Granulation zu erfassen und mit Hilfe von computergestützten Simulationen zu validieren. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Tropenverhalten der Schlacke auf der Drehscheibe beziehungsweise an der Granulatorwand gelegt. Dazu wurde ein eigener Versuchsaufbau installiert, mit dem es möglich ist den Aufprall eines einzelnen Partikels mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufzunehmen, siehe Abbildung 4.11. [49, 50]

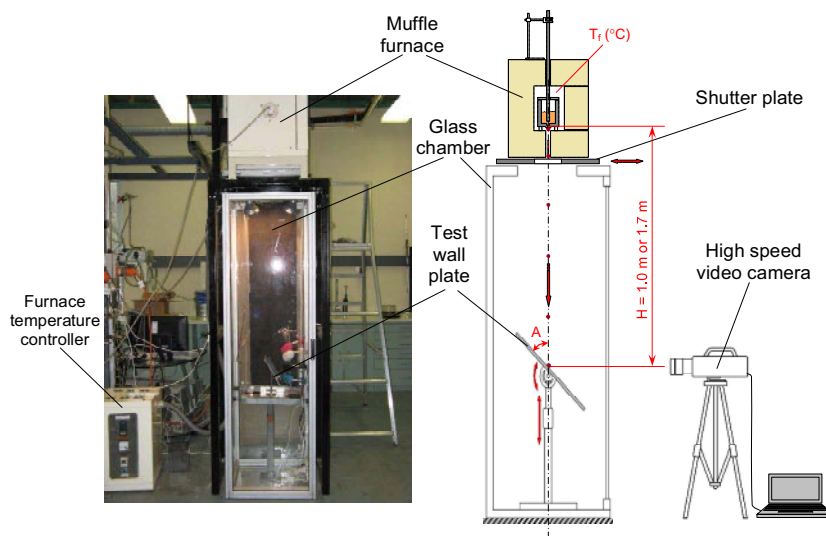


Abbildung 4.11.: Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Aufprallverhalten eines Schlacketropfens auf einer Testplatte unter verschiedenen Winkeln von CSIRO [14]

Mit Hilfe der aufgenommen Hochgeschwindigkeitsbilder ist es möglich das Verhalten der Schlackentropfen in Abhängigkeit von der Fallhöhe und dem Plattenwinkel beim Auftreffen zu charakterisieren. In der folgenden Abbildungen 4.12 wird die Aufpralleigenschaft und Formbildung eines Schlacketropfen dargestellt. Daraus lässt sich schön der Aufprall und die daraus resultierende Deformation erkennen, die in Abhängigkeit zur Schlackentemperatur, Fallhöhe, Plattenmaterial und Plattenwinkel steht. [49]

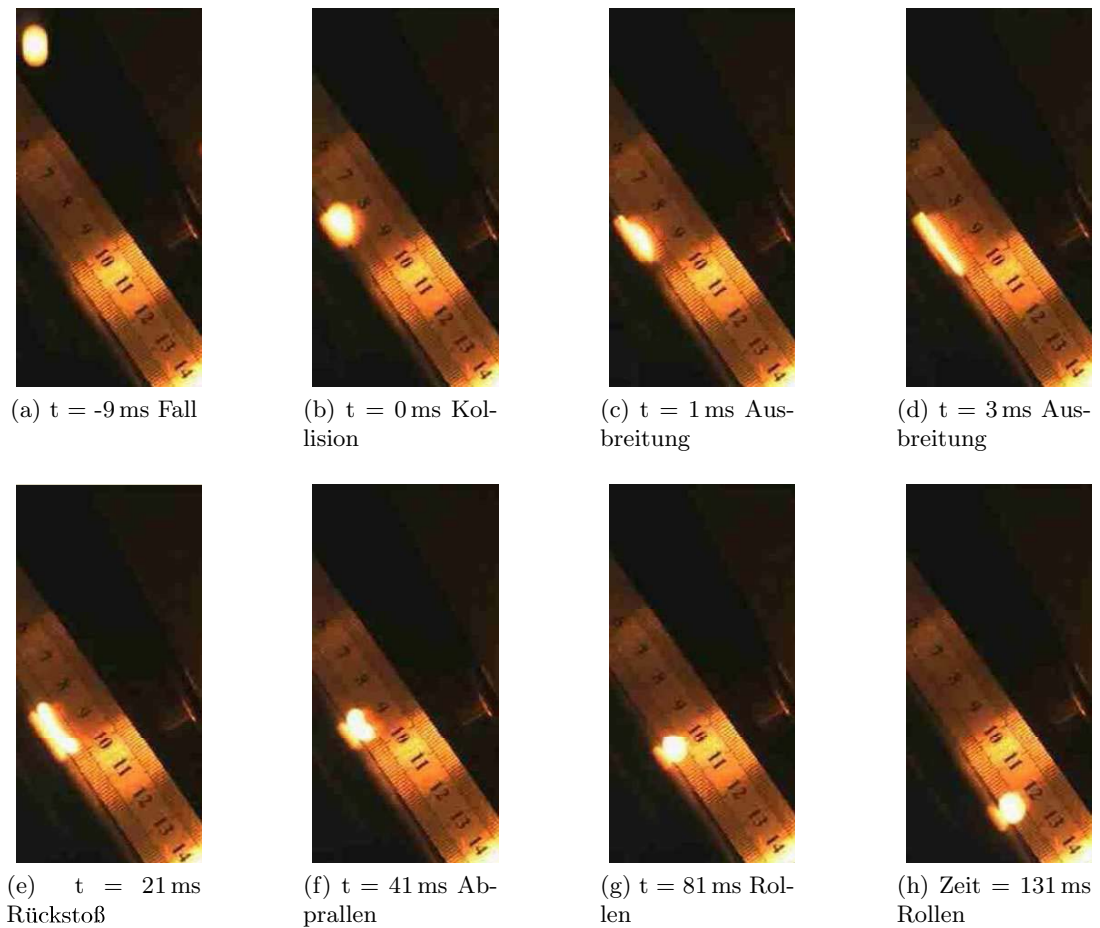


Abbildung 4.12.: Aufpralleigenschaften und Formbildung eines Schlackentropfen unter folgenden Bedingungen: Edelstahlplatte, Winkel 30° , Temperatur 1500°C und Fallhöhe 1,7 m [49]

Aus den gesammelten Grundlagendaten entwickelte sich im Jahr 2007 das erste Konzeptfließbild einer möglichen trockenen Granulation von Hochofenschlacke zur Energierückgewinnung. Das Konzept basiert auf einem zweistufigen Granulations- beziehungsweise Energierückgewinnungsprozess, vergleiche Abbildung 4.13. [14, 50]

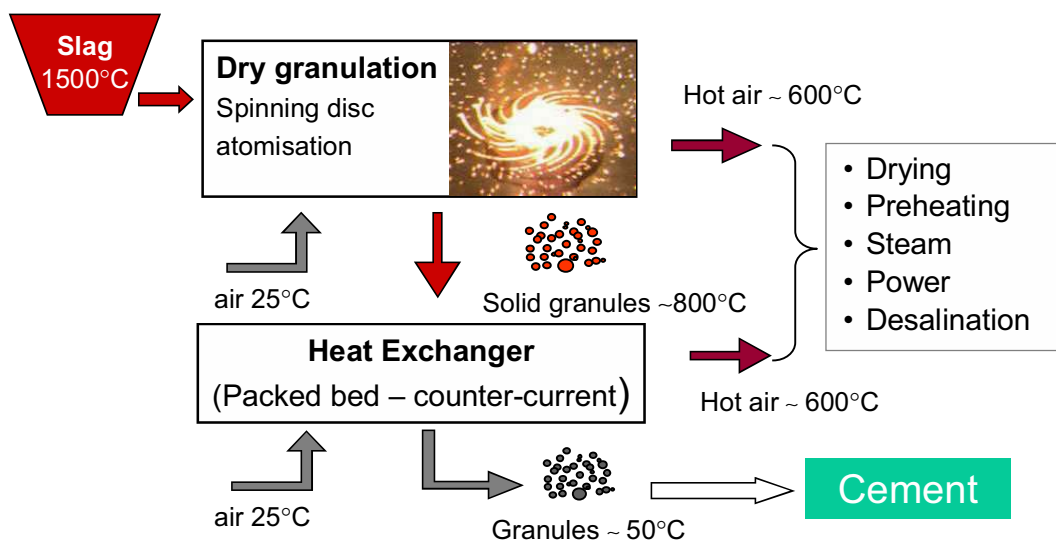


Abbildung 4.13.: Konzeptfließbild zur trockenen Granulation mit Wärmerückgewinnung über ein Festbett der CSIRO [14]

Um das entwickelte Konzept zu bestätigen, wurde eine Versuchsanlage mit einem Durchmesser von 1,2 m und einer Schlackenrate von 10 kg/min gebaut, siehe Abbildung 4.14. Mit Hilfe von CFD Modellierungen wurde versucht die Zerteilung der Schlacke auf der Scheibe, die Tropfenabkühlung und -erstarrung auf Basis der gewonnenen Versuchsdaten zu validieren. Für die Granulation der Hochofenschlacke in einem Temperaturbereich von 1450-1500 °C wurde eine 70 mm Scheibe verwendet. Das hergestellte Granulat ist zu 90 % kleiner als 1,5 mm und weist einen hohen Glasgehalt auf. Aufgrund der limitierten flüssigen Schlackenmenge, die zu Verfügung steht könnten mit dieser Anlage nur Abgastemperaturen von 300 °C erreicht werden, obwohl es rechnerisch bis zu 600 °C sein sollten. [14, 51]



Abbildung 4.14.: Versuchsanlage (SDA) mit einem Durchmesser von 1,2 m und einer Schlackenrate von 10 kg/min der CSIRO [51]

Basierend auf den guten Versuchsdaten der 1,2 m Anlage wurde die nächste Ausbaustufe mit 3 m Durchmesser und einer Schlackenrate von 100 kg/min geplant und errichtet, siehe Abbildung 4.15. Mit dieser Anlage werden zur Zeit weiter Optimierungen des Prozesses durchgeführt und auch andere Schlackentypen getestet. [14, 51]



Abbildung 4.15.: Versuchsanlage (SDA) mit einem Durchmesser von 3 m und einer Schlackenrate von 100 kg/min der CSIRO [52]

Für das Verfahrenskonzept wurde auch eine Energiebilanz, siehe Tabelle 4.2, basierend auf folgenden Daten erstellt [14]:

- Eingangsschlackentemperatur 1500 °C
- Ausgangsgranulattemperatur 100 °C
- Eingangslufttemperatur 25 °C
- Ausgangsheißlufttemperatur 600 °C

Tabelle 4.2.: Energiebilanz des Granulationsverfahrens der CSIRO [14]

Energie [GJ/h]			
Eingang		Ausgang	
Schlacke	63,6	Heißluft	44,5
Luft	0,0	Granulat	2,1
		Verluste	17,0
Summe	63,6		63,6

Aus der Energiebilanz errechnet sich ein Wirkungsgrad von circa 70 %. Sie wurde zusammen mit den Simulationsmodellen und den Versuchsergebnissen für die Planung der nächsten Ausbaustufe mit 7,6 m herangezogen. Die Anlage soll pro Jahr 300.000 Tonnen Hochofenschlacke verarbeiten. Dafür wurde desweiteren eine Machbarkeitsstudie erstellt. In Folge wird die nasse Granulation mit dem SDA Granulationsverfahren hinsichtlich Investitions- und Betriebskosten verglichen und grafisch gegenübergestellt, siehe Abbildung 4.16 und 4.17. [14]

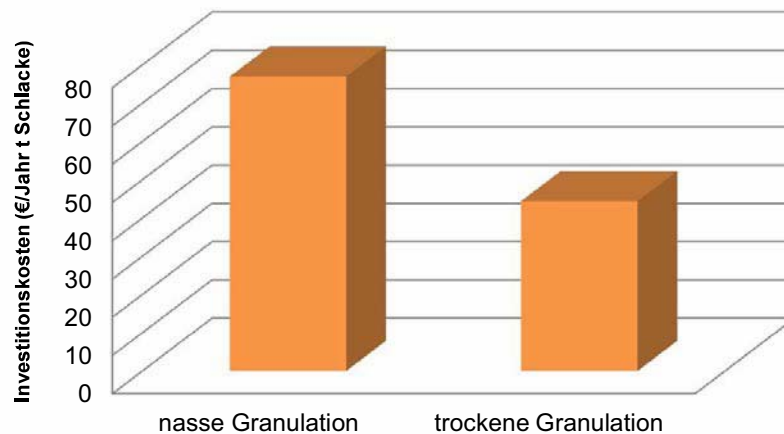


Abbildung 4.16.: Investitionskosten der trockenen Granulation nach dem SDA Verfahren der CSIRO im Vergleich zu der nassen Granulation nach [14]

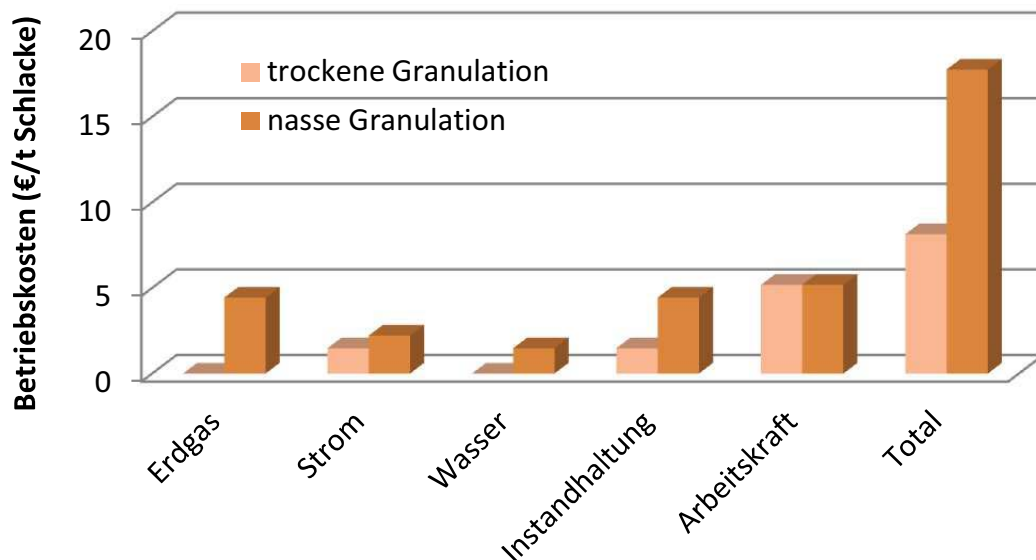


Abbildung 4.17.: Betriebskosten-Vergleich der trockenen Granulation nach dem SDA Verfahren der CSIRO und der nassen Granulation nach [14]

Aus den beiden Diagrammen 4.16 und 4.17 kann der wirtschaftliche Vorteil einer trockenen SDA Granulation gegenüber einer konventionellen nassen Granulation abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse sind auch richtungsweisend für das RCA Verfahren, da diese Verfahren nahezu identisch sind. Auf Basis der Literaturdaten und im direkten Vergleich kann die Forschergruppe von CSIRO als direkter Konkurrent zu der Versuchsanlage in Leoben gesehen werden.

4.4. Siemens VAI (SVAI)

Die Siemens VAI beziehungsweise darin aufgegangene Unternehmensteile von British Steel haben bereits zwei Versuchsanlagen betrieben. In beiden Fällen kam das Rotating-Cup Verfahren zum Einsatz.

Anfang der 1990er Jahre wurde in Redcar (UK) eine Demonstrationsanlage gebaut, die ungefähr 8500 Tonnen pro Tag Hochofenschlacke verarbeitet. Der Versuchsaufbau bestand nur aus einem rotierenden Drehteller, der den auftreffenden Schlackenstrom zerteilt und Richtung Wand schleudert, siehe Abbildung 4.18. Der Abstand zwischen Drehteller und Granulatorwand beträgt circa 10 m. Aufgrund dieser großen Distanz können die notwendige Abkühlrate der Schlackepartikel garantiert werden, um ein Anpacken an der Wand zu verhindern. Als Produkt kann bei den Versuchen amorph erstarrtes Granulat gewonnen werden, welches mittels Bagger aus dem Granulator entfernt wurde. [53]

Bei der Versuchsdurchführung steht primär die Durchführbarkeit der trockenen Granulation von Hochofenschlacke im Vordergrund und es wurde kein Augenmerk auf eine Energierückgewinnung gelegt. Zur damaligen Zeit war der politische und wirtschaftliche Druck noch nicht so hoch wie heute, weshalb das Projekt zunächst nicht weiterverfolgt wurde. [53]

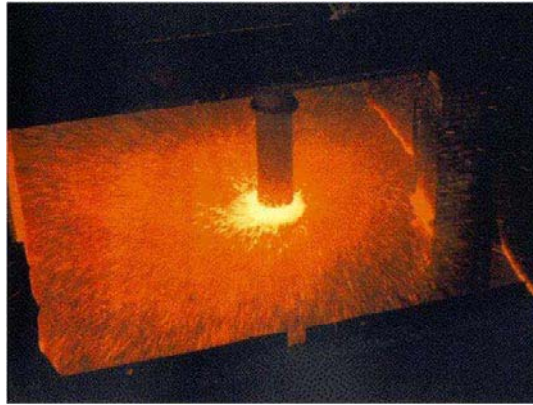


Abbildung 4.18.: Siemens VAI Vorversuche trockene Granulation von Hochofenschlacke in Redcar (UK) [53]

Ungefähr zehn Jahre später wurde die zweite kompaktere Versuchsanlage in Vitkovice (CZ) im Rahmen des ZeroWaste-Projektes installiert. Dabei wurde der Versuchsaufbau erheblich erweitert und das Granulatorkonzept weiterentwickelt, siehe Abbildung 4.19. Die Auslegung erfolgte auf einen Schlackenstrom von rund 20 kg/min. Auch bei diesen Versuchen konnten vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf die Produktqualität der granulierten Hochofenschlacke erzielt werden. Doch auch diesmal wurde keine Energierückgewinnung berücksichtigt, was sich an der offenen Bauweise des Granulators erkennen lässt.



Abbildung 4.19.: Siemens Vorversuche zur trockene Granulation von Hochofenschlacke in Vitkovice (CZ) [53]

Beide Versuchsanlagen bewiesen, dass es möglich ist mit der trockenen Granulation von Hochofenschlacke ein vergleichbares Produkt zur Nassgranulation herzustellen. Die augenscheinlichen Unterschiede die sich beim Vergleich von nass und trocken granulierter Hochofenschlacke ergeben, sind durch die Korngrößenverteilung und Kornform gegeben, vergleiche Abbildung 4.20. Diese Unterschiede können durch die notwendige Aufbereitung vor dem Einsatz in der Zement- und Baustoffindustrie zum Teil vernachlässigt werden.

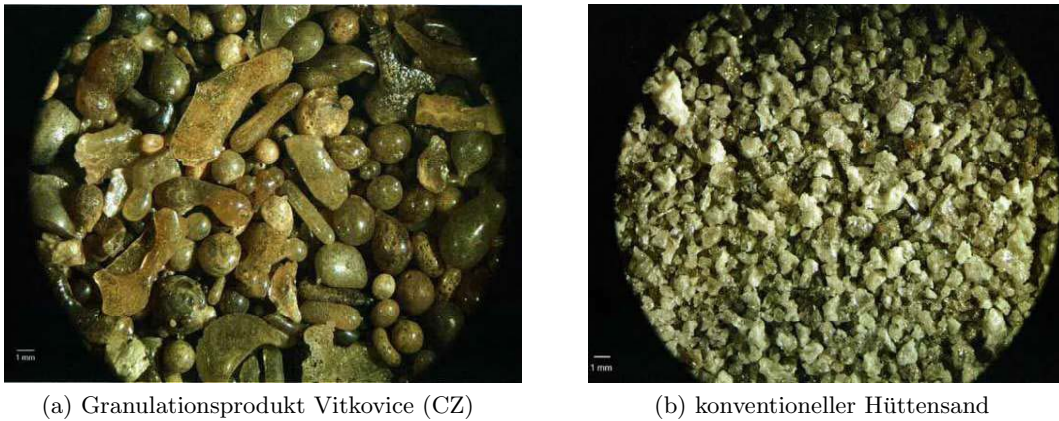


Abbildung 4.20.: Optischer Vergleich des Granulationsproduktes aus Vitkovice mit konventionellem Hüttensand [53]

Mit steigenden Energiepreisen und dem Ruf nach ständiger Effizienzsteigerung wurde die Forschung auf diesem Gebiet wieder aufgenommen und mündete im Bau der Versuchsanlage im Technikum des Lehrstuhles für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben. Bei dieser Versuchsanlage steht neben der ausreichenden Granulatqualität auch die Energierückgewinnung im Fokus.

Das Prinzip basiert wie bereits erwähnt auf dem Rotating-Cup Verfahren und kann der folgenden Abbildung 4.21 entnommen werden.

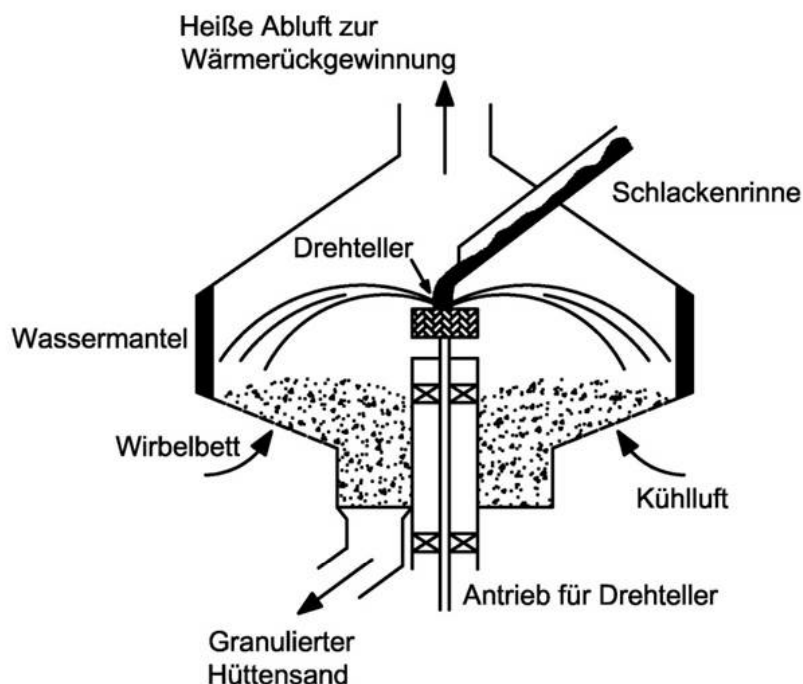


Abbildung 4.21.: Prozessschema der trockenen Granulation mit Wärmerückgewinnung der Firma Siemens VAI [53]

Den Mittelpunkt der Anlage bildet der rotierende Drehteller, der den mittig auftreffenden Schlackestrom zerteilt und die entstehenden Schlacketropfen Richtung Granulatorwand schleudert. Im Flug vom Drehteller bis zur Wand werden die Partikeln soweit abgekühlt, dass sich eine feste Schlackenpartikeloberfläche ausbildet. Von der Wand prallen sie ab und fallen in ein Wirbelbett, das durch einen speziellen Luftverteilerboden in Bewegung gehalten wird. Der

Wärmeübergang von Schlacke zur Luft erfolgt im Flug des Partikels beziehungsweise anschließend im Wirbelbett. Die heiße Prozessluft wird am Granulatorkopf abgezogen und kann für eine weitere energetische Nutzung herangezogen werden.

Die nächste Stufe der trockenen Granulation von Hochofenschlacke kann in der Realisierung einer großtechnischen Anlage gesehen werden. Diese Anlage könnte wie in der Prozessübersicht an einem exemplarischen 1 t/min Modell, siehe Abbildung 4.22, dargestellt aussehen.

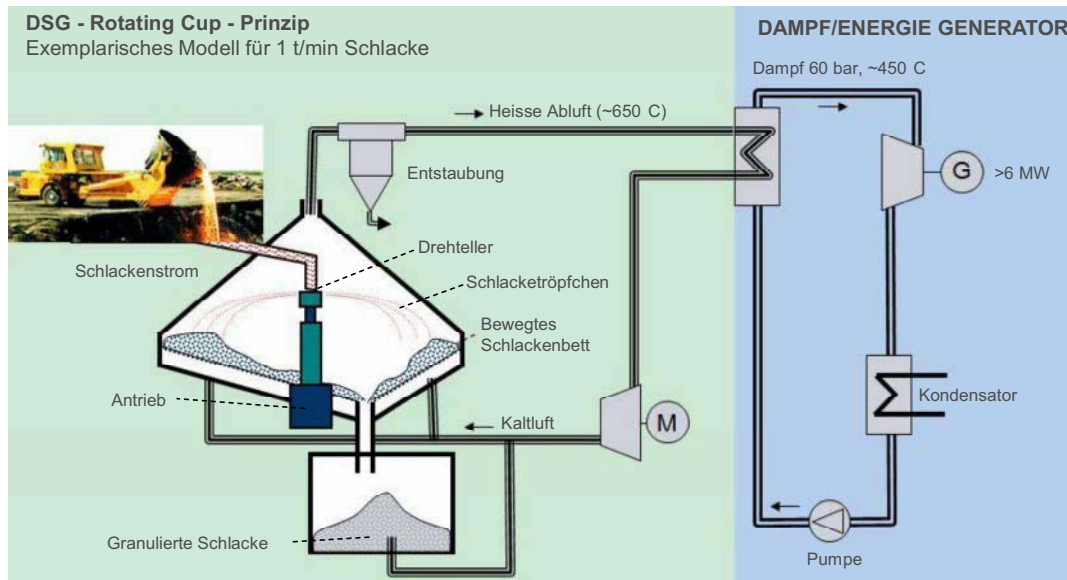


Abbildung 4.22.: Prozessübersicht der Firma Siemens VAI einer möglichen Integrierung eines exemplarischen 1 t/min Modells zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke in ein Hüttenwerk [53]

Der blau dargestellte Bereich in der Abbildung kann je nach Bedarfsfall und örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

In der Tabelle 4.3 ist die Machbarkeitsstudie des von Siemens VAI entwickelten Verfahrens zur Energierückgewinnung dargestellt. Die Berechnung basiert auf folgenden Daten. Die Erlöse der eingesparten CO₂-Zertifikaten und den Produkteinsatz in der Zementindustrie wurden nicht berücksichtigt [54]:

- Schlackenproduktion 2 t/min
- Dampferzeugung (60 bar, 430 °C) 45 t/h
- Betriebsstunden 8400 h/a
- Stromkosten 75 €/MWh

Tabelle 4.3.: Machbarkeitsstudie der Firma Siemens VAI des Granulationsverfahrens nach [54]

	Stromproduktion
Investment	36 Mio. €
Energieproduktion	12 MW _{elektrisch}
Amortisationszeit	4,8 Jahre

5. Beschreibung der Versuchsanlage

Das folgende Kapitel beinhaltet die Versuchsanlagenbeschreibung der Technikumsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben.

Auf Basis experimenteller Voruntersuchungen seitens der Siemens VAI wurde im Technikum des Lehrstuhles für Thermoprozesstechnik eine Anlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke nach dem Rotating-Cup Verfahren errichtet, vergleiche Kapitel 4.4. Die Hauptanlagenkomponenten sind der folgenden Aufzählung und dem Aufstellungsplan, siehe Abbildung 5.1, zu entnehmen:

- Granulator (1)
- Kippvorrichtung für Schlackenkübel (2)
- Gasbrenner für Luftvorwärmung (3)
- Wasserquenche (4)
- Saugzuggebläse (5)
- Rohrleitungssystem (6)
- Schlackenkübel (7)

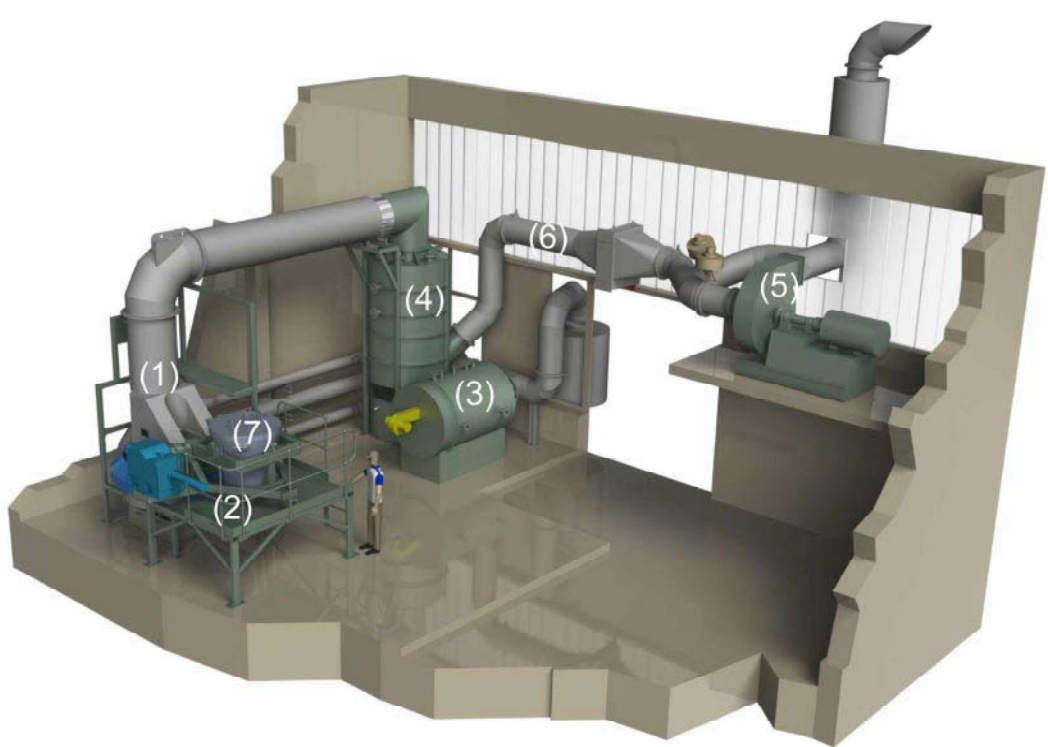


Abbildung 5.1.: Aufstellungsplan der Technikumsanlage

Durch den Einsatz einer Vielzahl von Mess- und Regeltechnikeinrichtungen und der dazugehörigen speicherprogrammierbaren Steuerung ist es möglich die Anlage über eine Software aus einer separaten Steuerwarte zu betreiben. Dieser Aufbau ermöglicht die Erfassung und Speicherung aller während eines Granulationsversuches generierten Messsignale und bildet somit die Basis für eine spätere Versuchsauswertung.

Bei der Durchführung eines Granulationsversuches werden maximal 300 kg Hochofenschlacke durch den im Technikum vorhandenen Flashreaktor aufgeschmolzen. Um diese in den Reaktor einbringen zu können, muss sie vorher getrocknet und fein aufgemahlen werden.[55]

Die eigentliche Versuchsanlage ist mit einem Saugzuggebläse ausgestattet, welches den nötigen Volumenstrom an Luft für die Granulation bereitstellt. Die von außen angesaugte Prozessluft kann im Bedarfsfall vorgewärmt werden, um den kontinuierlichen Prozess der Granulation zu simulieren. Die Homogenisierung des Brennerabgases und der Frischluft erfolgt in einem statischen Mischer. Anschließend erfolgt die Aufteilung der maximal 150 °C heißen Prozessluft in drei Granulatorzuleitungen.[55]

Mit Hilfe der Schlackenkübelkippvorrichtung, vergleiche Abbildung 5.2, wird die schmelzflüssige Schlacke von oben über eine vorgeheizte Rinne mittig auf den Drehteller aufgebracht. Dabei kann der Schlackestrom in einem Bereich von 20-60 kg/min eingestellt werden.[55]



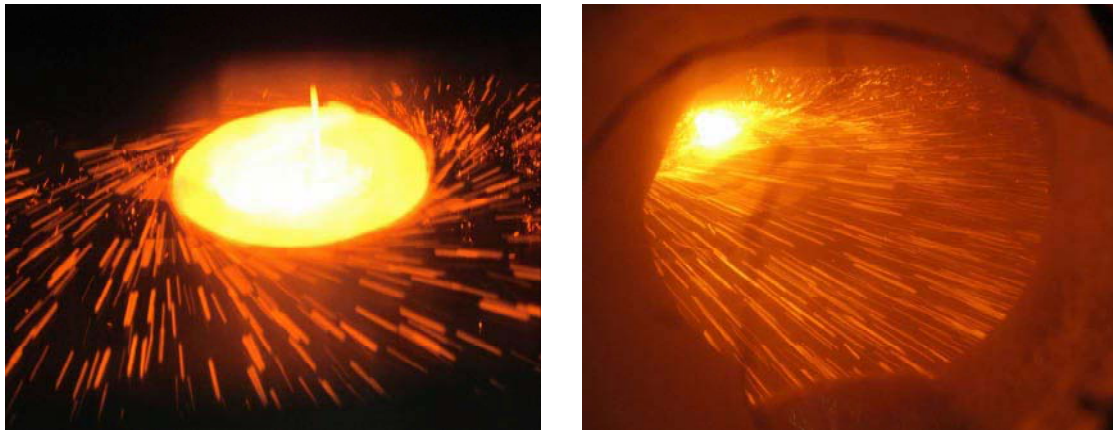
(a) Zeitrafferaufnahme Kippvorgang



(b) Schlackenstrom in Rinne

Abbildung 5.2.: Kippvorgang des Schlackenkübels in die Technikumsanlage

Beim Auftreffen auf dem Drehteller kommt es zur Zerteilung des Schlackestromes aufgrund der wirkenden Zentrifugalkräfte, siehe Abbildung 5.3. Dabei werden die Partikel radial Richtung Granulatorwand geschleudert, kühlen im Flug unter die Transformationstemperatur ab und fallen als festes Granulat in ein bewegtes Wirbelbett. Eventuelle Anpackungen an der Granulatorwand sollen zusätzlich durch den außen angebrachten Wassermantel verhindert werden. Der Granulatorboden ist so gestaltet, dass durch die Luftverteilung ein sich ständig bewegendes Wirbelbett gewährleistet ist. Dadurch ist ein guter Wärmeübergang von Schlacke zur Luft gegeben. [55]



(a) Ansicht durch das Seitenfenster

(b) Ansicht durch das Infrarotkamerafenster

Abbildung 5.3.: Granulationsvorgang am Drehteller der Technikumsanlage

Bei der Granulation wird die Prozessluft von unten in den Granulatorraum eingebracht und kühlt wie vorher erwähnt die Schlackepartikel im Flug nach dem Gegenstromprinzip ab. Die Granulatorhaube ist mit speziellen Strömungsgleichrichtern ausgestattet und ermöglicht es, heiße Prozessluft über die Abgasstrecke abzuziehen ohne feine Partikel auszutragen. Anschließend wird die heiße Abluft über eine Quenche mit Hilfe von Wasser auf eine Temperatur kleiner 60°C abgekühlt, um das Saugzuggebläse zu schützen. Danach wird der abgekühlte Luftstrom über einen Tropfenabscheider geführt und verlässt die Halle über den Kamin. Der Austrag der granulierten Schlacke erfolgt über vier Auslässe am Granulatorboden. [55]

Bei einer industriellen Realisierung der trockenen Granulation kann die produzierte Heißluft zum Beispiel zur Dampferzeugung dienen und in weiterer Folge über eine Dampfturbine verstromt werden. Rechnerisch ergeben sich bei einem Massenfluss von einer Tonne Schlacke pro Minute eine thermische Leistung von 20 MW beziehungsweise eine elektrische Leistung von 6 MW, die rückgewonnen werden kann, vergleiche Kapitel 4.4. [55]

Die Durchführung eines Einzelversuches zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke erfordert einen hohen Arbeits- und Personalaufwand. Zu Beginn wird der Schlackenkübel über Nacht auf circa 1200°C vorgeheizt. In diesen Kübel wird anschließend die schmelzflüssige Hochofenschlacke mit circa 1500°C abgestochen und in die Kippvorrichtung am Granulator vom Keller ins Erdgeschoss manipuliert. Danach erfolgt der Kippvorgang mit einem einstellbaren Schlackenfluss zwischen 20 und 60 kg/min. Die Schlacke gelangt über die vorgeheizte Rinne mittig auf den Drehteller und wird dort granuliert. [55]

Die eben genannten Schritte werden in der Abbildung 5.4 graphisch in Anlehnung an die örtlichen Gegebenheiten im Technikum TPT dargestellt. Aktuell können pro Tag zwei Granulationsversuche durchgeführt werden.

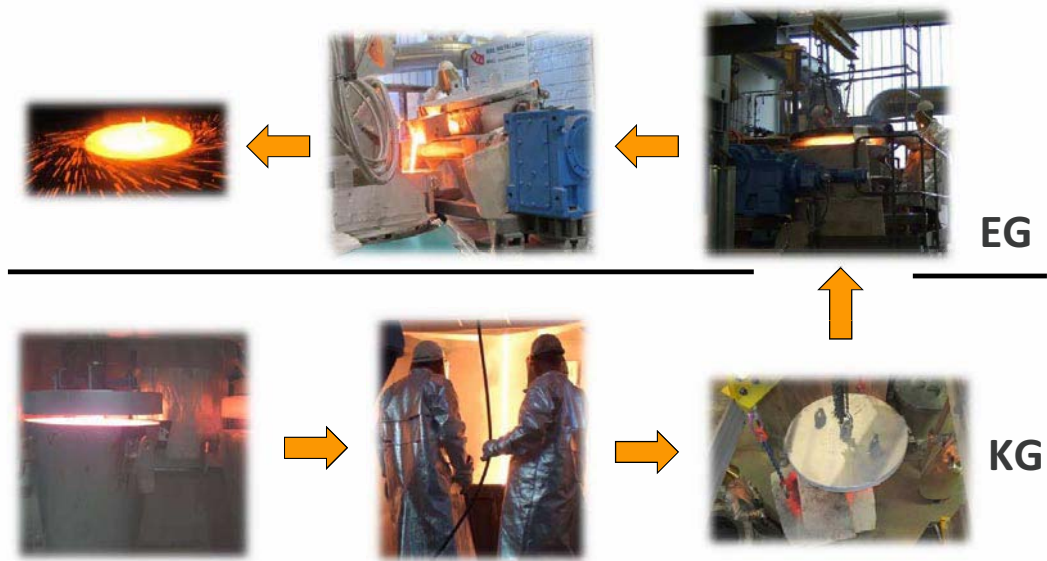
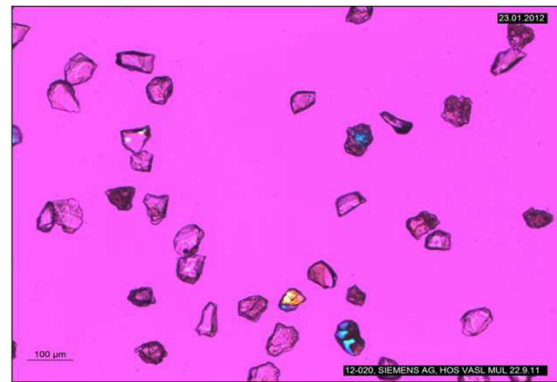


Abbildung 5.4.: Einzelversuchsablauf der Technikumsanlage

Am Ende eines Einzelversuches erhält man ein Granulationsprodukt, vergleiche Abbildung 5.5a, das für weitere Laboruntersuchungen aufbereitet und verschickt wird. Um den Granulationsverlauf des Versuches grundsätzlich zu bewerten, empfiehlt es sich, den Glasgehalt mit Hilfe eines Lichtmikroskops, wie in Abbildung 5.5b dargestellt zu bestimmen. Über den Glasgehalt kann die erforderliche Abkühlungsrate zur glasigen Erstarrung des Schlackepartikels quantifiziert werden.



(a) Granulationsprodukt



(b) Lichtmikroskopieaufnahme

Abbildung 5.5.: Granulationsprodukt der Technikumsanlage

Im besten Fall kann bei einem Granulationsversuch ein amorphes Granulationsprodukt mit vergleichbaren Eigenschaften von Hüttensand am Granulatorboden ausgetragen, die Schlackewollenbildung verhindert und eine Ablufttemperatur von mindestens 400 °C generiert werden.

Bei der Planung und Errichtung der Versuchsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wurde eine Vielzahl von Mess- und Regeltechnikeinrichtungen berücksichtigt, um den Prozess ganzheitlich zu erfassen. Mit der dazugehörigen speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ist es möglich, die Granulationsanlage über eine Software zu betreiben. Zusätzlich können durch diesen Aufbau alle generierten Messsignale erfasst und gespeichert werden.

In der Technikumsanlage sind folgende Messeinrichtungen verbaut:

- 31 Thermoelemente Typ-K
- Quotientenpyrometer
- IR-Kamera
- Hochtemperaturanemometer (HTA)
- 22 Druckmessungen (Drucksensoren, Druckmessdosen)
- 5 Durchflussmessungen
- 3 Wiegezellen

6. Praktische Durchführung

Zu Beginn der Arbeit wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die sich mit den grundlegenden Eigenschaften von Hochofenschlacke, konventionellen Behandlungsmethoden, Hüttensand, der geschichtlichen Entwicklung der trockenen Granulationsmethoden und den aktuellen Konkurrenzverfahren beschäftigt. Auf Basis dieser Recherche konnten die Behandlungswege der Hochofenschlacke und die Vorteile der trockenen Granulation ausgearbeitet werden. In Folge wird näher auf die energetische Betrachtung beziehungsweise auf die daraus resultierende Berechnung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung eingegangen.

6.1. Bilanzgrenze der energetischen Betrachtung

Für die energetische Betrachtung des Granulationsprozesses galt es zu Beginn die Systemgrenzen zu definieren. Allgemein können Bilanzgleichungen für alle extensiven Größen aufgestellt werden. Kernpunkt ist dabei die Festlegung eines Kontrollvolumens (Bilanzraum) und die daraus folgenden Bilanzgrenzen. Das Kontrollvolumen kann die verschiedensten Formen annehmen zum Beispiel eines differentiellen Volumenanteils oder eines Anlagenteils. Grundsätzlich richtet sich die Wahl der Kontrollvolumina immer nach der Aufgabenstellung. [56]

Im Fall der Technikumsanlage sollte die Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft erhoben werden. Dafür wurde der Granulator mit dem mittig sitzenden Drehteller als Bilanzraum gewählt, siehe Abbildung 6.1.

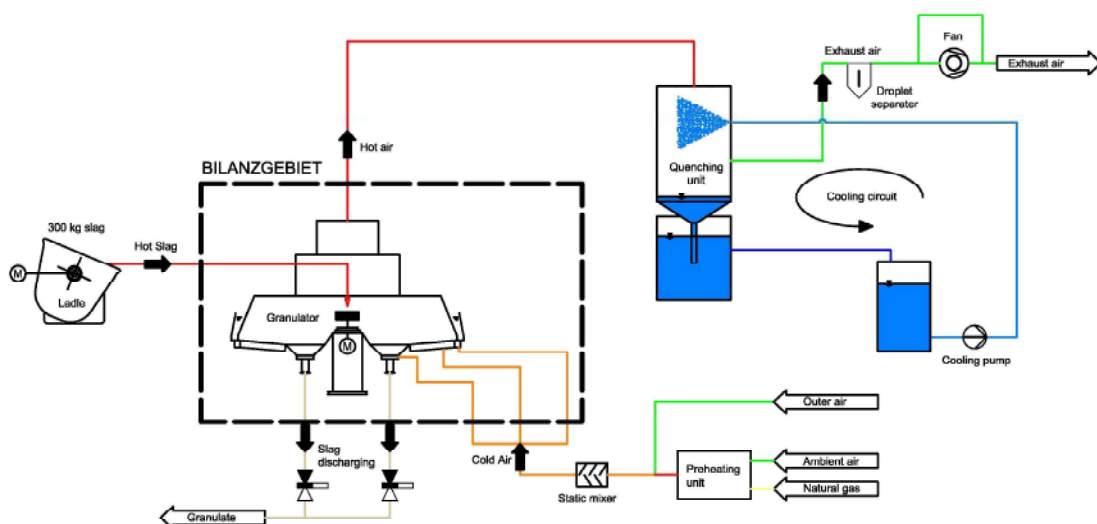


Abbildung 6.1.: Bilanzgrenze der energetischen Betrachtung der Technikumsanlage [57]

Aus der festgelegten Bilanzgrenze ergeben sich folgende Ein- und Ausgangsströme (Schlacke, Luft, Wasser) für die energetische Betrachtung, welche in der Abbildung 6.2 dargestellt sind.

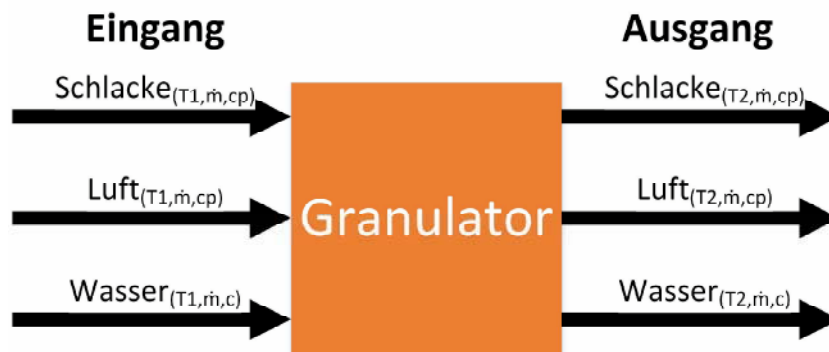


Abbildung 6.2.: Ideale Bilanzströme der energetischen Betrachtung des Granulators

Auf Basis dieser Bilanzgrenze galt es aus den zur Verfügung stehenden Messeinrichtungen jene zu identifizieren, die die jeweiligen Temperaturen T und Massenströme \dot{m} der Bilanzströme erfassen. Die für die Berechnung notwendigen spezifischen Wärmekapazitäten für Luft [58] und Wasser [59] wurden der Literatur entnommen. Dabei wurde für Luft eine mittlere spezifische Wärmekapazität in einem Bereich von 0 bis 300 °C angenommen. Der Wert für Hochofenschlacke wurde vom Institut für Baustoff Forschung FEhS in Deutschland bestimmt, siehe Tabelle 6.1. [20]

Tabelle 6.1.: Wärmekapazität von Hochofenschlacke nach [20]

Schlackentyp	Tempertur [°C]	WÄRMEKAPAZITÄT c_p [kJ/kg*K]		
		A	B	C
HOS Typ A: "sauer" $B1 < 1,0$	827	1,05	1,04	1,04
HOS Typ B: "mittel" $B1 = 1,1$	1227	1,10	1,09	1,09
HOS Typ C: "basisch" $B1 > 1,2$	1427	1,13	1,12	1,11
	Mittelwert	1,09	1,08	1,08

Zur weiteren Betrachtung wurde ein zusätzlicher Bilanzstrom für die Verluste (Messfehler, Strahlungsverluste,...) eingeführt, vergleiche Abbildung 6.3.

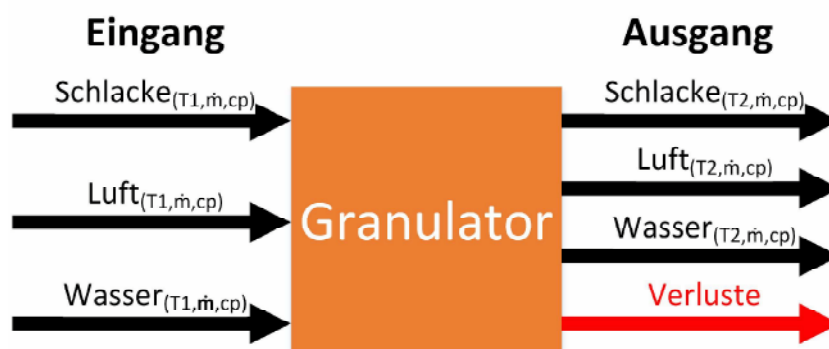


Abbildung 6.3.: Bilanzströme des Granulators inklusive Verluste

Für eine vollständige energetische Betrachtung der Granulation konnten nicht alle Daten repräsentativ erfasst werden. Daher mussten Annahmen für folgende Werte getroffen werden:

- Schlackenausgangstemperatur
- Wassermassenstrom Kühlmantel
- Falschlufteintrag Granulator

Um die Schlackenausgangstemperatur am Granulatorboden zu erfassen, ist ein gleichmäßig verteiltes Granulatbett notwendig. Dies kann bei der Versuchsanlage aber nicht gewährleistet werden, weshalb ist eine repräsentative Erfassung der Temperatur nicht möglich ist. Daher wurde die Schlackenausgangstemperatur mit 100 °C angenommen. Bei einer eventuellen großtechnischen Umsetzung wird dieser Wert für die Entnahme der Schlacke angestrebt. Dieser Wert wird auch in der Literatur zum Beispiel bei CSIRO [14] angegeben, weshalb es legitim scheint mit dieser Temperatur für eine erste Abschätzung zu rechnen.

Der Massenstrom des eigentlich stationären Wassers im Kühlmantel ergibt sich aus der Division der Masse durch den Betrachtungszeitraum in Sekunden. Dazu wurde die Masse über das Volumen aus dem 3-D Modell mit 275 kg Wasser berechnet.

Um die Messdatenauswertung zu vereinfachen, wurden Excel-Vorlagen mit den benötigten Messsignalen erstellt, welche auch gleichzeitig die weitere Aufbereitung der Daten erleichtert. Die Messdatenauswertung wird im folgenden Punkt 6.2 anhand eines Beispielen näher beschrieben.

Mit den zusammengefassten Excel-Daten kann die Berechnung des Wärmestromes \dot{Q} [kJ/s] der einzelnen Ein- und Ausgangsströme durchgeführt werden. Der Wärmestrom \dot{Q} ist das Produkt der Multiplikation der spezifischen Wärmekapazität c_p [kJ/kg*K], des Massenstroms \dot{m} [kg/s] und der Temperaturdifferenz ΔT , vergleiche Formel 6.1.

$$\dot{Q} = c_p * \dot{m} * \Delta T \quad (6.1)$$

Für den Bilanzraum entspricht der Wirkungsgrad η der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft und errechnet sich aus der Division des Differenzwärmestromes von Luft $\Delta\dot{Q}_{Luft}$ durch den Differenzwärmestrom von Schlacke $\Delta\dot{Q}_{Schlacke}$, vergleiche Formel 6.2.

$$\eta = \frac{Nutzen}{Aufwand} = \frac{\Delta\dot{Q}_{Luft}}{\Delta\dot{Q}_{Schlacke}} \quad (6.2)$$

6.2. Ermittlung der relevanten Größen

Infolge wird auf die Messpunktanordnung eingegangen und die verwendeten Messeinrichtungen werden erklärt. Die schematische Gesamtübersicht der Messeinrichtungen und deren Anordnung können dem Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild im Anhang B.1 entnommen werden. Nachstehend wird ein Ausschnitt des Granulators in der Abbildung 6.4 gezeigt.

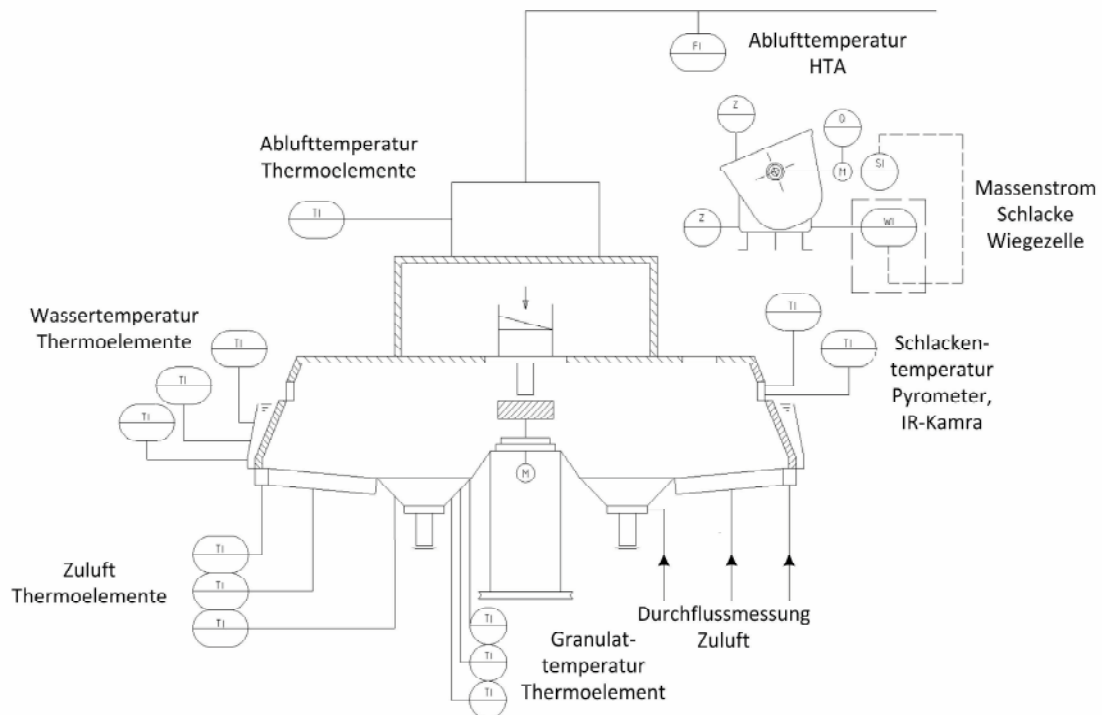


Abbildung 6.4.: Messpunkte des Granulators aus dem Rohrleitungs- und Instrumentenfließbildes der Technikumsanlage

Grundsätzlich gilt es, die Eingangs- und Ausgangsströme des Granulators für die energetische Betrachtung zu erfassen, vergleiche Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2.: Auflistung der Ein- und Ausgangsströme des Granulators und deren messtechnische Erfassung

	Eingang	Ausgang
Temperatur [°C]	Schlacke - Pyrometer Drehteller	Schlacke - Thermoelemente Typ K, Granulatorraum
	Luft - Thermoelemente Typ K Granulatorverteilerboden	Luft - Thermoelemente Typ K Granulatorhaube
	Wasser - Thermoelemente Typ K Wassermantel	Wasser - Thermoelemente Typ K Wassermantel
Massenstrom [kg/s]	Schlacke - Wiegezeile Kippvorrichtung	Schlacke - Wiegezeile Kippvorrichtung
	Luft - Durchflussmessung Pitotrohr Granulatorzuleitung	Luft - Hochtemperaturanemometer (HTA) Abgasleitung
	Wasser - Wassermantelvolumen und Versuchsdauer	Wasser - Wassermantelvolumen und Versuchsdauer

Bei der Temperaturerfassung kommen Thermoelemente in den verschiedensten Bauarten zum Einsatz. Desweiteren wird für die Bestimmung der Schlackeneingangstemperatur ein Quotientenpyrometer verwendet. Zusätzlich ist für die Verifizierung des heißen Abluftstroms eine zusätzliche Hochtemperaturanemometermessung angedacht.

Alle in der Anlage eingesetzten Thermoelemente entsprechen dem Typ-K, in den verschiedensten Bauarten in Abhängigkeit vom Einsatzort und den dort vorherrschenden Bedingungen. Dabei wird durch die thermoelektrische Umwandlung von Wärme in elektrische Energie ein Messsignal generiert. Dieses wird über die Prozesssteuerung umgewandelt und zur Temperaturüberwachung und -anzeige in der Software verwendet. Einige Thermoelemente dienen auch zur Referenzmessung für andere Messeinrichtungen wie zum Beispiel für die Durchflussmessung in den drei Granulatorzuleitungen.

Für die Messung der drei Luftzuleitungen am Granulator wurden pro Ring vier Thermoelemente, in Summe zwölf Stück, verbaut. Die Temperaturmesspunkte wurden symmetrisch in den drei Verteilerringen am Granulatorboden angebracht, vergleiche Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5.

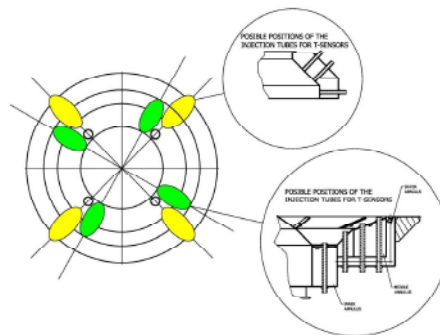


Abbildung 6.5.: Eingangslufttemperaturmessung in den drei Verteilerringen am Granulatorboden der Technikumsanlage

Zur Messung der Luftausgangstemperatur wurden an der Granulatorhaube Thermoelemente in vierfacher Ausführung installiert, vergleiche Abbildung 6.4. Diese dienen neben der Hochtemperaturanemometermessung der Bestimmung der Ablufttemperatur. Für die Messung der Wassertemperatur im Kühlmantel wurden an der Außenseite drei Thermoelemente in unterschiedlichen Ebenen angebracht.

Durch den Einsatz eines Quotientenpyrometers ist es möglich, eine punktuelle, berührungslose Temperaturmessung der am Drehteller auftreffenden Schlacke durchzuführen. Zusätzlich ist noch eine IR-Kamera verbaut, die es ermöglicht den Partikelflug vom Drehteller bis zur Granulatorwand zu registrieren. In der folgenden Abbildung 6.6 werden der Messaufbau sowie die Messpunkte des Quotientenpyrometers und der IR-Kamera im Granulatorraum der Technikumsanlage dargestellt.

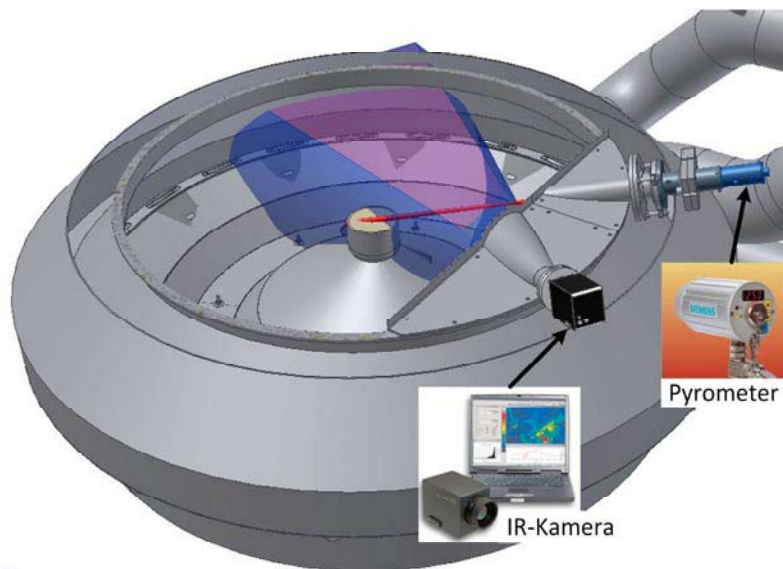


Abbildung 6.6.: Messaufbau und -punkte des Quotientenpyrometer und der IR-Kamera im Granulator der Technikumsanlage

Mit der Hochtemperaturanemometermessung kann unter Anwendung einer geeigneten Messmethode über die Drehzahl des Flügelrades der Volumen- beziehungsweise Massenstrom der Abluftströmung berechnet werden. Die Drehzahl des luftgelagerten Flügelrades ist direkt proportional zur Anströmgeschwindigkeit im Rohr. Um von der Drehzahl auf den Volumen- beziehungsweise Massenstrom zu schließen, ist eine vorgeschaltete Kalibrierung des Flügelrades vom Hersteller unter vorgegebenen Bedingungen und Volumenströmen notwendig. Diese liefert eine Kalibrationsgerade, mit der in weiterer Folge die Berechnung durchgeführt werden kann. In der Abbildung 6.7 sind Messaufbau und -lanze des Hochtemperaturanemometers dargestellt.

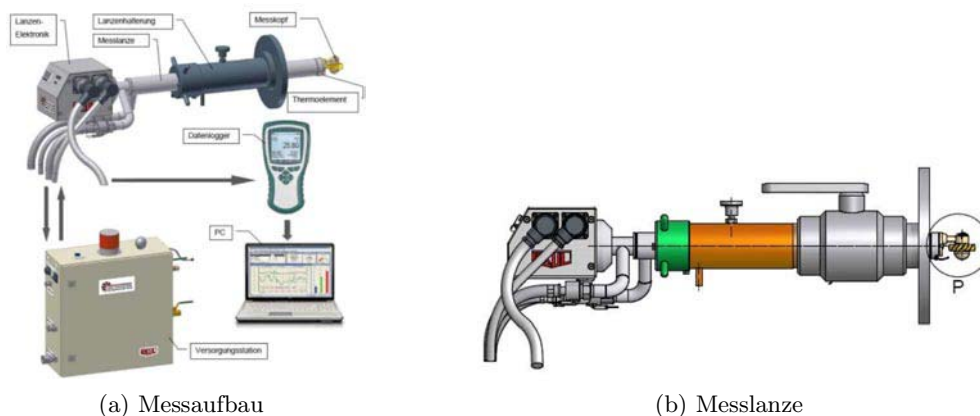


Abbildung 6.7.: Messaufbau und -lanze des Hochtemperaturanemometers (HTA)

Für die Messungen wurden eigene Messstutzen in vier Rohrebenen der Abgasleitung berücksichtigt. Im Rahmen der Kaltinbetriebnahme wurde die komplette Mess- und Regeltechnik der Anlage getestet und auch die ersten HTA-Messungen durchgeführt, um sich mit dem Messsystem vertraut zu machen. Mit Hilfe der HTA-Messung galt es den Luftvolumenstrom, der den Granulator nach oben hin verlässt zu quantifizieren. Jene Messwerte sollten dabei helfen den Falschlufteintrag über die Dichtungen des Granulators abzuschätzen.

Dafür wurden zwei Messmethoden für die spezifischen Anlagengegebenheiten ausgearbeitet, basierend auf der Log-linear Methode und dem Schwerlinienverfahren. Die erstellten Messroutinen befinden sich exemplarisch im Anhang A.1 und A.2. Die beiden Verfahren unterscheiden sich grundsätzlich in der Anzahl der Messpunkte und deren Anordnung im Rohrquerschnitt, vergleiche Abbildung 6.8.

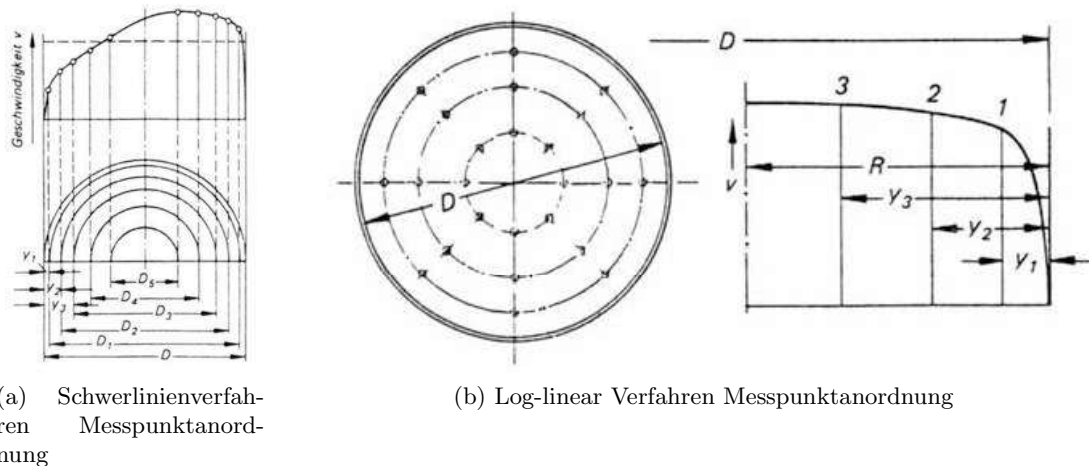


Abbildung 6.8.: Messverfahren/-methoden zur Volumenstrombestimmung [60]

Nach den ersten Messungen musste die Log-linear Methode aufgrund der Messpunktanordnung in horizontaler und vertikaler Ebene verworfen werden, denn der Messstutzenwechsel ist mit einem großen arbeits- und zeittechnischen Aufwand verbunden. Desweiteren besteht die Gefahr bei jeder Änderung des Messaufbaues die Messlanze beziehungsweise das vorne angebrachte Flügelrad zu beschädigen. Daher wurde das Schwerlinienverfahren mit den Messpunkten in einer Rohrebene bevorzugt.

Zu Beginn der ersten Messungen wurde ein Messintervall in Absprache mit dem Hersteller von 60 s pro Messpunkt gewählt. Nach einigen Messungen wurde diese Zeit auf 30 s gesenkt, da die bis dato generierten Werte über diesen Zeitraum annähernd konstant waren. Bei der ersten Versuchskampagne wurde die HTA-Messung aus sicherheitstechnischen Gründen nicht durchgeführt. Daher konnte der eventuelle Falschlufteintrag der Anlage im Prozess nicht gemessen werden.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von schmelzflüssiger Hochofenschlacke von 300 kg pro Versuch ergeben sich bei einer Kipprate von 20 kg/min eine maximale Versuchsdauer von rund 15 Minuten. In dieser Zeit stellt sich nur ein relativ kurzer stationärer Zustand ein, da sich die Anlage zu Beginn noch im Anfahrbetrieb befindet und noch mehr Schlacke benötigen würde, um das Gleichgewicht länger zu halten. Während diesem kurzen stationären Zustand ist es nicht möglich die vorgegebenen Punkte für die HTA-Messung abzufahren. Daher wurde die Abluftmessung mit dem HTA für die Versuchsdurchführung der Technikumsanlage in den weiteren Kampagnen nicht mehr berücksichtigt.

Zur Bestimmung des stationären Durchflusses der drei Zuluftleitungen in den Granulatorraum wurden Pitotrohre verbaut, siehe Abbildung 6.9a. Die Messung erfolgt nach dem Prinzip eines Staurohres, wobei der entstehende Unterdruck an Differenzmessdruckumformer, siehe Abbildung 6.9a weitergegeben und in ein elektrisches Messsignal umgewandelt wird. Anschließend wird das elektrische Signal unter Einbeziehung der Temperatur in der Prozesssteuerung in einen Luftmassenstrom umgerechnet und wird zur Steuerung der drei Regelklappen der Zuleitung des Granulators verwendet.



(a) Pitotrohr (Staurohr)
Durchflussmessung



(b) Differenzdruckumformer

Abbildung 6.9.: Stationäre Durchflussmessung in der Granulatorzuleitung der Technikumsanlage

Zur Erfassung des Schlackenmassstromes wurden drei Wiegezellen in der Kübelkippvorrichtung verbaut. Dieses Signal wird über die Prozesssteuerung in einen Massenstrom umgerechnet.

6.3. Datenaufbereitung und Auswertung

Mit Hilfe der umfangreichen Messdatenerfassung ist es möglich nach Beendigung des Versuches alle Daten mit Hilfe der Software IbaAnalyzer[©] 5.18.1 auszuwerten, siehe Abbildung 6.10.

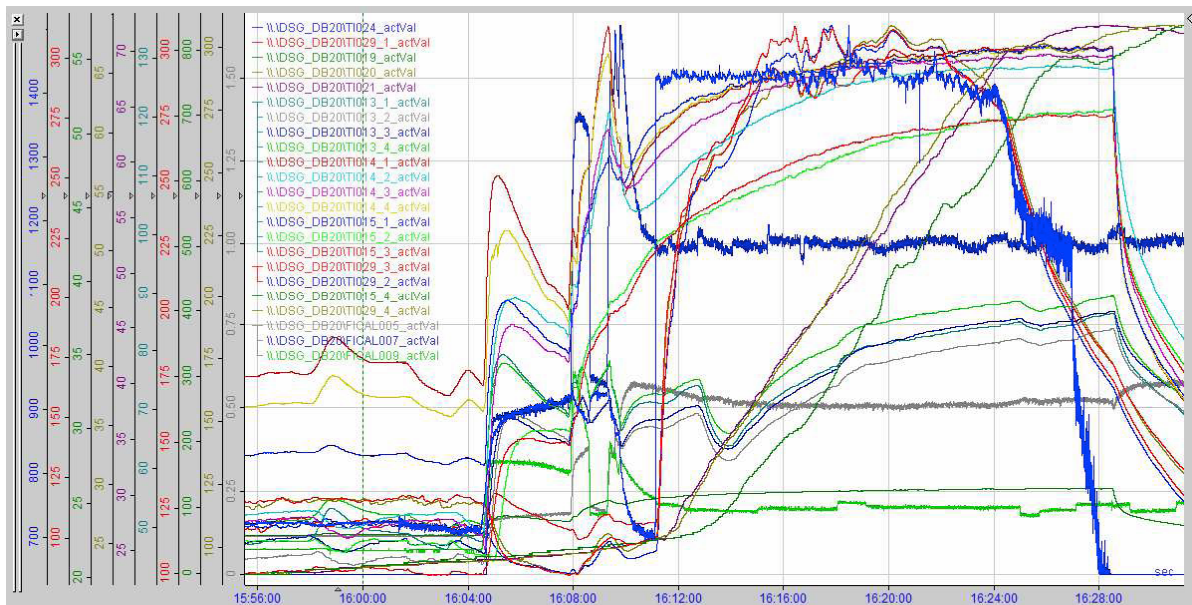


Abbildung 6.10.: Analysenfenster IbaAnalyzer der relevanten Messsignale für die Messdatenauswertung

Die Schritte der Versuchsauswertung für die energetische Betrachtung und der daraus resultierende Wirkungsgrad der Wärmeübertragung werden anhand eines Einzelversuches näher erläutert. Über die Pyrometertemperatur am Cup, Schlackenmassenstrom und die Ablufttemperatur an der Granulatorhaube wird der stabile Zustand im Granulator ermittelt. In der folgenden Abbildung 6.11 ist der stationäre Zustand eines Granulationsversuches dargestellt. Für diesen Bereich wird anschließend der Wirkungsgrad berechnet.

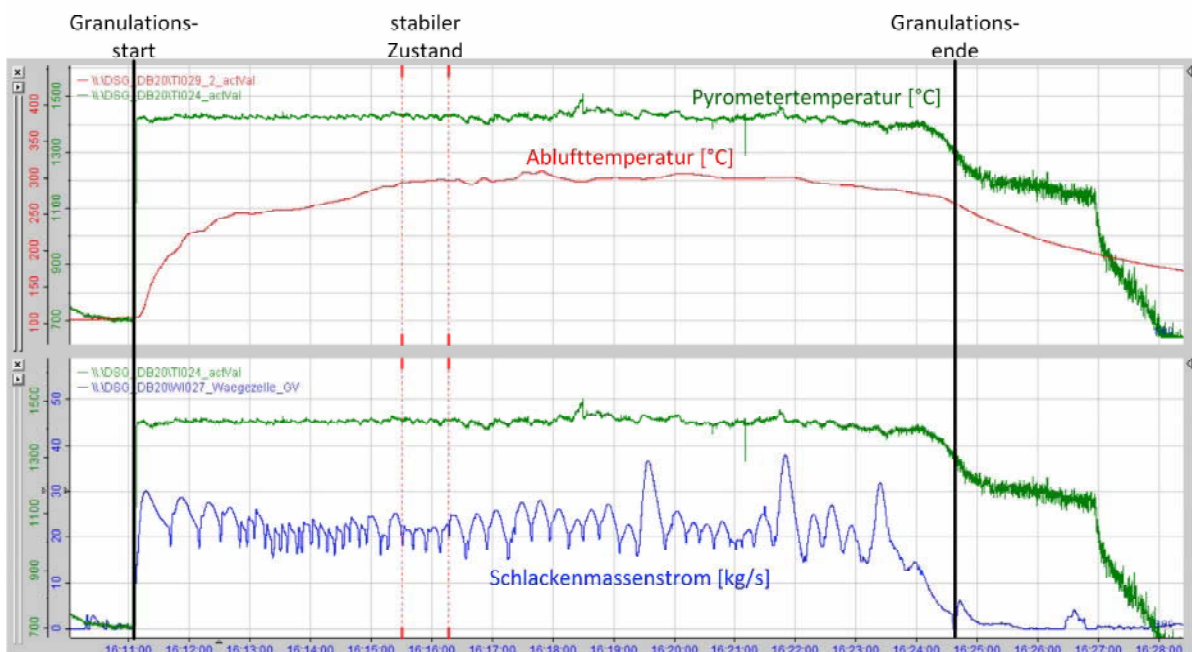


Abbildung 6.11.: Stationärer Zustand beim Granulationsprozesses

Nachdem der stabile Zustand bestimmt wurde, können die benötigten Messdaten dem Programm entnommen werden. Dazu gibt es eine eigene statistische Auswerteeinheit, die die markierten Anfangs- und Endwerte und zusätzlich die Mittelwerte über den markierten Bereich ausgibt. Die Daten werden anschließend in die vorher erstellte Excel-Vorlage eingetragen. Die Tabelle 6.3 zeigt exemplarisch die erfassten Messdaten für die weitere Berechnung des Wirkungsgrades.

Tabelle 6.3.: Excel-Vorlage der Messdatenerfassung für die Bestimmung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der Versuchsanlage

Efficiency
reference temperature = 273,15 [K]
 $Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$
 $\eta = \Delta Q_{\text{Slag}} / \Delta Q_{\text{Air}}$

K01_V05

stady state TI024	start	15:45:33	end	15:46:58	sum [min:ss]	00:01:25
					sum [s]	85

Water	IN	OUT	Air Inlet	
TI019	19,0	21,1	FICAL05	0,41
TI020	27,0	31,2	FICAL07	0,53
TI021	29,3	34,4	FICAL09	0,26
average [°C]	25,1	28,9	sum [kg/s]	1,2

Slag					
flow WI_027	18,8	[kg/min]	cup TI024	1448,2	[°C]

Air Inlet						
TI013_1	31,0	TI014_1	29,6	TI015_1	29,8	
TI013_2	30,9	TI014_2	30,7	TI015_2	29,4	
TI013_3	31,9	TI014_3	30,4	TI015_3	28,6	
TI013_4	33,2	TI014_4	29,8	TI015_4	29,1	average IN
average [°C]	31,7	average	30,1	average	29,2	30,4

Air Outlet	
TI029_1	224,8
TI029_2	224,8
TI029_3	219,9
TI029_4	237,8
average [°C]	226,8

Anschließend werden die gemittelten Messwerte übersichtlich in einer Tabelle zusammengeführt, um den Wirkungsgrad nach den Formeln 6.1 und 6.2 zu berechnen, siehe Tabelle 6.4.

Tabelle 6.4.: Zusammenfassung der Messdaten zur Berechnung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der Versuchsanlage

K02/V03				
Eingang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	1429,40	0,36	1,08	553,1
Luft	105,07	1,71	1,02	183,7
Wasser	35,87	5,98	4,18	896,3
			Total	1633,1

Ausgang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	100,00	0,36	1,08	38,7
Luft	294,66	1,71	1,02	515,1
Wasser	38,37	5,98	4,18	958,7
Verluste				120,5
			Total	1633,1

K02/V03	ΔT [°C]	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	ΔQ [kJ/s]	η
Schlacke	1329,40	0,36	1,08	514	0,64
Luft	189,59	1,71	1,02	331	

Die berechneten Werte der Versuche werden abschließend miteinander verglichen. Der daraus errechnete Mittelwert wird danach den aktuellen Konkurrenzverfahren gegenübergestellt, siehe Kapitel Ergebnisse. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Güte des Granulationsvorganges ziehen, die als Indikatoren für den Entwicklungsstand im Vergleich zur Konkurrenz dienen. Die vollständigen Datenaufbereitung befindet sich im Anhang C.1 bis C.3.

Desweiteren wurden Sankey-Diagramme zur Visualisierung der Wärmeströme erstellt. In der folgenden Abbildung 6.13 ist der Versuch K01/V05 exemplarisch dargestellt.

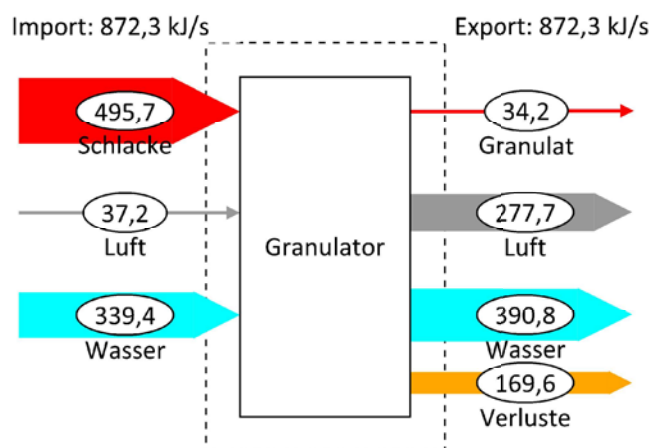


Abbildung 6.12.: Sankey-Diagramm der Wärmeströme eines Einzelversuches

6.4. Ergebnisse und Diskussion

Für die energetische Betrachtung des trockenen Granulationsprozesses wurden die Bilanzgrenzen um den Granulator gelegt. Darin sind die drei Hauptströme Schlacke, Luft und Wasser enthalten. Bei der Betrachtung geht es vordergründig um die Erfassung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft. Dieser Wirkungsgrad ist ein Indikator der für den Vergleich der einzelnen Versuche herangezogen werden. Die auftretenden Verluste werden in einem Term zusammengefasst und beinhalten Strahlungsverluste über den Stahlbau, Falschlufteinträge und Messfehler. Um den Falschluff-Eintrag im System zu verifizieren, wurde zu Beginn eine HTA-Messung angedacht, aber aufgrund der Prozessbedingungen, im Speziellen aufgrund der kurzen Versuchszeiten, war es nicht möglich eine repräsentative Messung durchzuführen. Es wurde versucht über den Weg von Kaltmessungen eine Ableitung für den Falschluffeintrag zu erhalten, doch dies gelang aufgrund der hohen Anzahl an veränderlichen Parametern des Systems nicht. Grundsätzlich bietet die HTA-Messung eine gute Möglichkeit Hochtemperatur-Gasströme zu erfassen. Es sei aber erwähnt, dass Messungen von Strömungen in einem Kanal mit einer Sonde immer fehlerbehaftet sind. Alleine die Sonde kann die Strömung schon massiv beeinflussen. Daher ist es besonders wichtig, sich vorher zu überlegen wie die Messung durchzuführen ist, beziehungsweise wie mit den generierten Messergebnissen umgegangen wird. Die Werte sollten immer kritisch betrachtet und auf Plausibilität geprüft werden. Daher wurde die Annahme getroffen, dass der Luftmassenstrom im Granulator konstant ist. Der Falschluffeintrag ist Teil des Ausgangsluftmassenstroms an der Granulatorhaube, kann aber nicht quantifiziert werden und findet somit keine direkte rechnerische Berücksichtigung. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass der Ausgangsmassenstrom größer als der Eingangstrom ist. Somit fällt mehr heißes Abgas an als bei der Berechnung berücksichtigt wird. Folglich ist der Wirkungsgrad in Wirklichkeit höher.

Im Rahmen der Versuchsdatenauswertung kann es zu Problemen bei der Bestimmung der Schlackentemperatur am Drehteller mit dem Quotientenpyrometer kommen. Dies geschieht zum Beispiel, wenn sich Zapfen beim Düsenstein ausbilden und die freie Sicht des Messstrahls versperren. Dadurch kommt es zu Fehlmessungen, die deutlich in der Messaufzeichnung erkennbar sind. Desweiteren konnte der Schlackenmassenstrom nicht über den verbauten PID-Regler eingestellt werden. Dafür wären Kippversuche mit schmelzflüssiger Schlacke notwendig. Daher musste der Schlackenmassenstrom manuell, durch ein- und ausschalten des Kippmotors, geregelt werden. Dadurch kann es zu Abweichungen vom Sollwert kommen und der kontinuierliche Schlackenstrom ist nicht mehr gewährleistet. Diese Abweichung galt es auch bei der Versuchsdatenauswertung zu berücksichtigen.

Bei der Versuchsdurchführung wurde Hochofenschlacke von der Firma voestalpine Stahl GmbH in Linz (VASL) und der ThyssenKrupp AG (THY) verwendet. Typische spezifischen Wärmekapazitäten der Schlacken flossen in die Berechnung ein. Insgesamt wurden 19 Einzelversuche in drei Kampagnen durchgeführt. Daraus konnten drei Versuche für eine nähere energetische Betrachtung herangezogen werden. Bei den anderen war aufgrund der Prozessführung beziehungsweise Fehlversuchen keine sinnvolle Berechnung möglich. Außerdem wurde von einer Granulationsrate größer 85 % als Kriterium für die Versuchsdatenauswertung Abstand genommen.

Es ergeben sich folgende Ergebnisse für die Berechnung der Wirkungsgrade der Einzelversuche, siehe Tabelle 6.5.

Tabelle 6.5.: Zusammenfassung der berechneten Wirkungsgrade der durchgeführten Versuche zur trockenen Granulation

Versuchsnummer	THY K01/V05	THY K02/V03	VASL K03/V10	SVAI MW
Wirkungsgrad η	0,52	0,64	0,60	0,59
Glasgehalt [V.-%]	> 95	> 95	> 99	
Granulationsrate [%]	95	72	n.b. ¹	

¹nicht bestimmbar, aufgrund des Versuchsverlaufes (Anpackungen,...)

Berechnet man den Mittelwert aus den ausgewerteten Versuchen erhält man einen Wirkungsgrad von 59 %, siehe Abbildung 6.13 roter Balken.

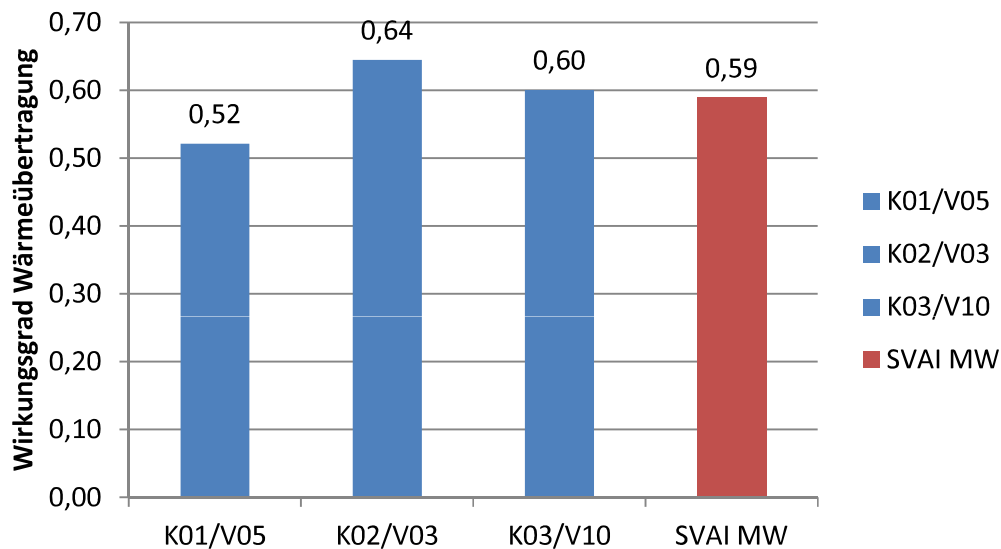


Abbildung 6.13.: Berechnete Wirkungsgrade der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der durchgeführten Versuche

Der Mittelwert der Einzelversuche wird den Konkurrenzverfahren gegenübergestellt und in der Tabelle 6.6 abgebildet. Daraus lässt sich erkennen, dass sich die aktuellen Konkurrenzverfahren in einem Bereich befinden. Dabei sei nochmal darauf hingewiesen, dass die Vergleichsdaten aus der Literatur stammen und nur als Anhaltspunkte angesehen werden dürfen.

Tabelle 6.6.: Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren anhand von Literaturwerten mit den Versuchsergebnissen

Firma	PW	CISRI [47]	CSIRO [14]	SVAI MW	SVAI Max
Wirkungsgrad η	–	0,77	0,70	0,59	0,64
Granulationsverfahren	ZSV ¹	RCA ²	SDA ³	RCA ²	RCA ²

¹Zusammenstoß Verfahren; ²Rotating Cup Atomizer; ³Spinning Disc Atomizer

Eine besondere Schwierigkeit bei der Auswertung lag darin, dass nicht alle notwendigen Daten vollständig erfasst werden konnten. Daher mussten sinnvolle Annahmen getroffen werden. Dies betrifft im Speziellen die Schlackenausgangstemperatur im Granulator, die mit 100 °C für die Berechnung angenommen wurde.

Für eventuelle weitere Versuche kann die durchgeführte Auswertung und Darstellung als Vorlage herangezogen werden. Zusätzlich wurde auch eine Analysenroutine für die Datenerfassungssoftware erstellt, die alle relevanten Signale passend darstellt. Dadurch ist eine schnelle Verifizierung der Granulationsversuche möglich. Zusätzlich kann der berechnete Wirkungsgrad als Indikator für den aktuellen Entwicklungsstand angesehen werden. Aktuell befindet sich der Wirkungsgrad unterhalb der Konkurrenzverfahren, vergleiche Abbildung 6.14.

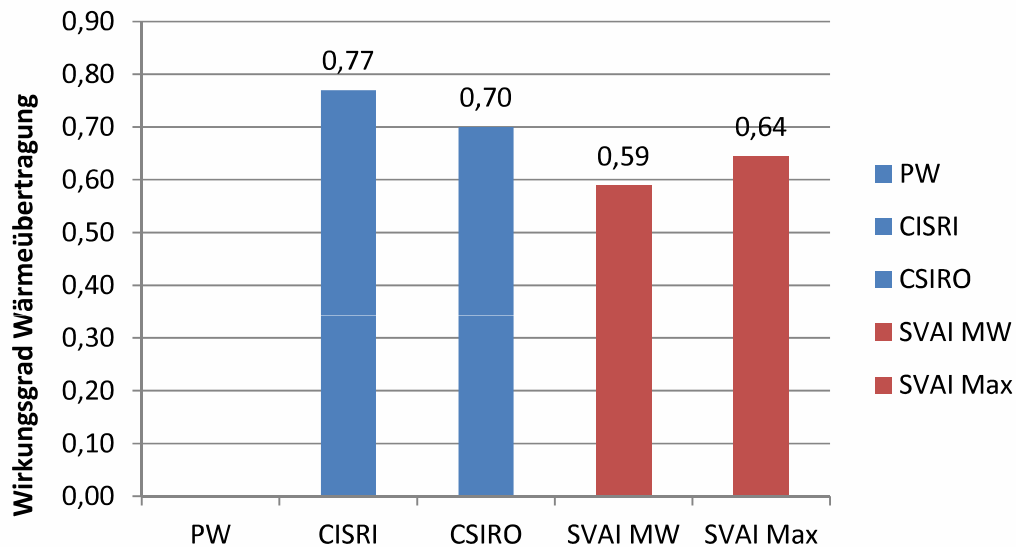


Abbildung 6.14.: Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren mit dem Mittelwert und Maximalwert der Einzelversuche

7. Zusammenfassung

Bei der Eisen- und Stahlproduktion in einem integrierten Hüttenwerk gehen heute noch ungefähr 10 % der Abwärme durch Schlacken verloren. Für Hochofenschlacke geht man von einem Verlust von 1,5 GJ/t aus. Bisweilen gibt es keine großtechnische Behandlung, die es ermöglicht diese Energie zu nutzen. Viele Verfahren und Entwicklungen sind bisher an den schwierigen Eigenschaften der flüssigen Hochofenschlacke gescheitert, dies betrifft folgende [22]:

- Oberflächenspannung ist gering
- Viskosität nimmt mit fallender Temperatur stark zu
- Wärmeleitfähigkeit ist gering

Bei der Betrachtung der geschichtlichen Entwicklung der Granulationsmethoden über die letzten Jahrzehnte wurden die unterschiedlichen Verfahrensansätze kennengelernt. Diese unterteilen sich in mechanische Granulation, Druckluft-Granulation und Zentrifugal-Granulationen. Daraus lässt sich die momentane Entwicklung in Richtung Zentrifugal-Granulation ableiten. [13]

Die Eisen- und Stahlindustrie strebt danach, die Prozesse energieeffizienter zu gestalten und die Treibhausgase zu reduzieren. Die trockene Granulation von Hochofenschlacke stellt einen wichtigen Ansatzpunkt zur Ausnutzung bis dato ungenutzter Energiequellen. Aktuell wird der größte Teil der europäischen Hochofenschlacke in nassen Granulationsanlagen behandelt, etwa 80 %. Dabei entsteht der sogenannte Hüttensand, der in der Zement- und Baustoffindustrie Einsatz findet. Aus dieser Behandlung ergeben sich folgende Nachteile [2]:

- Wasserverbrauch: Für die Granulation werden ungefähr 6-10 Tonnen Wasser pro Tonne Schlacke benötigt, davon gehen rund 1,0-1,2 Tonnen Wasser als Dampf bei offenen Systemen verloren. [26]
- Energieverlust: Die in der Schlacke beinhaltete Energie von rund 1,5 GJ/t geht durch die Entstehung von großen Mengen an Niedertemperaturdampf verloren.
- Emissionen: Bei der Reaktion von Schlacke und Wasser können Schwefeldioxid SO_2 , Schwefelwasserstoff H_2S und andere Sulfatverbindungen entstehen.
- Zusatzenergie: Für die Trocknung des Granulates werden rund 132 kWh/t verbraucht.

Als großer Vorteil der nassen Granulation muss die Robustheit und die Einfachheit des Prozesses hervor gestrichen werden. Besonders die Hochofenschlackenzusammensetzung und die Temperatur haben einen geringeren Einfluss auf die nasse Granulation im Vergleich zur trockenen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei der nassen Behandlung qualitativer Hüttensand entsteht. Dies ist bis dato nach dem jetzigen Entwicklungsstand für trockene Granulationen noch nicht gegeben. Es gibt bisweilen noch keine Erfahrung wie sich eine großtechnische Anlage bei hohen Schlackenmengen verhält, beziehungsweise wie der Granulationsprozess gesteuert werden kann. Bei solch einer Anlage ist es notwendig, die Prozessparameter der Granulation

(Drehtellergeschwindigkeit, Luftmenge,...) laufend an die aktuellen Gegebenheiten anzupassen. Dazu gibt es die verschiedensten Ansatzmöglichkeiten, von der Lastaufnahme des Drehtellermotors bis hin zu akustischen Steuerung anhand der charakteristischen Granulationsgeräusche. Daraus ergeben sich noch einige offene Fragestellungen für eine großtechnische Realisierung am Hochofen.

Zusammenfassend kann die Sinnhaftigkeit der trockenen Granulation von Hochofenschlacke grundsätzlich an der stofflichen Verwertung und der zusätzlichen Wärmerückgewinnung beim Granulationsprozess festgemacht werden. Des weiteren sind folgende Vorteile gegenüber der nassen Granulation zu nennen:

- Sinnvolle Nutzung der in der Schlacke enthaltenen Wärmeenergie
- Wegfall der Wasserwirtschaft und somit keine Wasserverschmutzung
- geringere Emissionsbelastung
- Erzeugung von Hüttensand
- Energieintensiver Trocknungsprozess der granulierten Schlacke entfällt

Auch im wirtschaftlichen Vergleich vom SDA-Verfahren mit der nassen Granulation, der von von CSIRO angestellt wurde, konnte die trockene Granulation mit rund 50 % Investitions- und Betriebskosteneinsparung punkten. Die Werte sind kritisch zu hinterfragen, jedoch lassen sie eine Grundtendenz erkennen.

Wird der aktuelle Forschungsbereich der trockenen Granulation betrachtet, wird grundsätzlich in zwei Granulationsmethoden unterschieden. Zum einen das Zusammenstoßverfahren und zum anderen die Zentrifugalgranulation, nach dem Rotating-Cup oder Spinning-Disk Verfahren.

Bei der Versuchsdatenauswertung der Einzelversuche zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft wurden Ergebnisse erzielt, die sich im Bereich der aktuellen Konkurrenzverfahren befinden, vergleiche Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1.: Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren anhand von Literaturwerten mit den Versuchsergebnissen

Firma	PW	CISRI [47]	CSIRO [14]	SVAI MW	SVAI Max
Wirkungsgrad η	–	0,77	0,70	0,59	0,64
Granulationsverfahren	ZSV ¹	RCA ²	SDA ³	RCA ²	RCA ²

¹Zusammenstoß Verfahren; ²Rotating Cup Atomizer; ³Spinning Disc Atomizer

8. Ausblick

Die trockene Granulation von Hochofenschlacke der Firma Siemens VAI bietet nach dem heutigen Entwicklungsstand noch Optimierungspotential im Bereich der Prozessführung und der Verfahrensgestaltung. Im Rahmen der Prozessführung ist besonders die Abhängigkeit des Granulationsvorganges am Drehteller von der Schlackenmenge und -zusammensetzung ein Thema. Dabei gilt es eine bestmögliche automatische Steuerung der Prozessparameter, wie zum Beispiel der Drehtellergeschwindigkeit und der Prozessluftmenge zu entwickeln, um eine gleichbleibende Produktqualität zu gewährleisten. Gleichzeitig soll unter dieser Voraussetzung die höchstmögliche Abgastemperatur erreicht werden. Möglich wäre zum Beispiel eine akustische Steuerung über die charakteristischen Granulationsgeräusche oder über die Lastaufnahme des Drehtellermotors.

Um eine gute Wissensbasis für die großtechnische Realisierung bieten zu können, sind noch weitere Versuche unter möglichst realen Bedingungen und über einen längeren Zeitraum notwendig. Dazu werden größere Schlackenmengen benötigt, die zum Beispiel durch den Bau einer Pilotanlage direkt am Hochofen realisiert werden können. Für eine Laboranlage gilt es, die Möglichkeit abzuklären, ob die Hochofenschlacke eventuell über einen induktiven Prozess bereitgestellt werden kann. Dadurch würden sich eine größere Versuchsanzahl und auch mehr Variationen in der Versuchsdurchführung ergeben. Dabei wären die Drehtellergeometrie, eine erhöhte Prozesslufttemperatur von 600-700 °C und die Verwendung eventueller Einbauten im Granulator interessante Fragestellungen. Desweiteren sollte das einstufige Verfahren noch einmal betrachtet und die Vor- und Nachteile gegenüber einem zweistufigen Verfahren ausgearbeitet werden.

Aus der energetischen Betrachtung der Granulationsversuche entstand ein Bewertungsverfahren, das es ermöglicht, die Einzelversuche untereinander und mit anderen Verfahren zu vergleichen. Dies wird durch die Berechnung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft ermöglicht. Dieser Bewertungsansatz kann für eventuelle weitere Versuche herangezogen werden.

Bei der industriellen Umsetzung einer Granulationsanlage mit Energierückgewinnung aus Hochofenschlacke gilt es für die weitere Forschung folgende Punkte zu berücksichtigen [27]:

- Die Produktqualität, um den geforderten Glasgehalt und die dazu notwendige Abkühlrate zu gewährleisten.
- Im Optimalfall fällt die rückgewonnene Energie aus der schmelzflüssigen Schlacke in einem kontinuierlichen und dauerhaften Prozess an. Die Schlacke an sich fällt aber normalerweise in einem diskontinuierlichen Prozess an. Das Zusammenführen dieser beiden Prozesse birgt noch eine gewisse Problematik, die es für die zukünftige Industrieanwendung zu lösen gilt.

- Die Hochtemperatur-Energierückgewinnung und -Behandlung sind beides Schlüsseltechnologien um die nachhaltige Entwicklung der Eisen- und Stahlindustrie weiter voran zu treiben.

Desweiteren gibt es eine eine Vielzahl von Einflussfaktoren in einem integrierten Hüttenwerk, die den Herstellungsprozess und das resultierende Produkt, den Hüttensand, beeinflussen können. Dieser Umstand wird nochmals in der folgenden Abbildung 8.1 mit den verschiedenen Einflüssen aufgezeigt. [10]

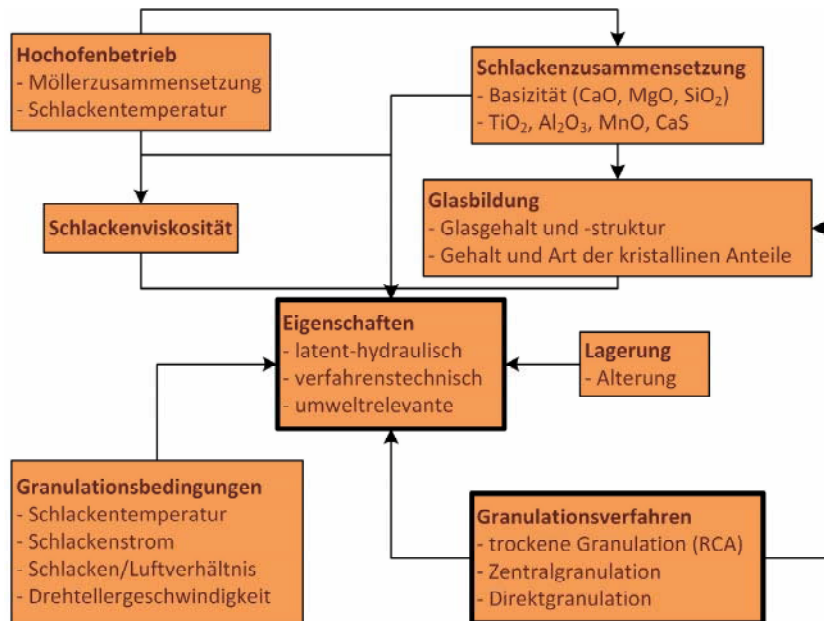


Abbildung 8.1.: Einflussparameter eines Hüttenwerkes auf die Eigenschaften ungemahlene Hüttensandes nach [61]

Dabei bildet die eigentliche Granulation nur einen Teil im Gesamtproduktionsprozess, womit ihr Einfluss auf die Schlacke beziehungsweise deren Endproduktqualität begrenzt ist. Daher sollte der trockene Granulationsprozess so gestaltet werden, dass er mit den verschiedensten Ausgangsbedingungen zurende kommt und eine immer gleichbleibende Produktqualität gewährleistet. Diese geforderte Robustheit muss der Prozess noch über längere Versuchszeiten bestätigen. [10]

Die Schlackenbehandlung ist gegenwärtig ein großes Thema und wird von den verschiedensten Forschungsgruppen vorangetrieben. Der nächste Schritt dabei ist der Bau einer großtechnischen Pilotanlage in einem Hüttenwerk, um die Voraussetzungen für eine baldige Marktreife der trockenen Granulation zu schaffen.

Nomenklatur

Chemische Formelzeichen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
CaO	Calciumoxid
CO_2	Kohlendioxid
Fe	Eisen
H_2S	Schwefelwasserstoff
K_2O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid
Mn	Mangan
NaO	Natriumoxid
P_2O_5	Phosphorpentoxid
S	Schwefel
SiO_2	Siliciumoxid
SO_2	Schwefeldioxid
TiO_2	Titanoxid

Symbole

%	Prozent	
€	Euro	
°	Grad	
°C	Grad Celsius	
a	Aktivität	
a	Jahr	
CO_{2e}	Kohlenstoffdioxid Äquivalent	
c_p	Wärmekapazität	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
GJ	Gigajoule	
h	Stunde	
K	Kelvin	
kg	Kilogramm	
kJ	Kilojoule	
kWh	Kilowattstunde	
m	Meter	
$M. - \%$	Massenprozent	
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
m^3	Kubikmeter	
min	Minute	

<i>Mio.</i>	Million	
<i>MJ</i>	MegaJoule	
<i>mm</i>	Millimeter	
<i>Mrd.</i>	Milliarde	
<i>MW</i>	Megawatt	
<i>MW</i>	Mittelwert	
<i>MWh</i>	Megawattstunde	
<i>mN</i>	Millinewton	
<i>Pa</i>	Pascal	
\dot{Q}	Wärmestrom	<i>kJ/s</i>
<i>s</i>	Sekunde	
<i>T</i>	Temperatur	
<i>TWh</i>	Terawattstunde	
<i>U</i>	Umdrehung	
<i>V. – %</i>	Volumenprozent	
<i>W</i>	Watt	

Griechische Symbole

Φ	Oberflächenspannung	<i>mN/m</i>
Δ	Delta	–
η	Viskosität	<i>Pa * s</i>
λ	Wärmeleitfähigkeit	<i>W/m * K</i>
η	Wirkungsgrad	–

Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics
CISRI	Central Iron and Steel Research Institute China
CSIRO	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CZ	Tschechien
FEhS	Institut für Baustoff-Forschung e.V.
HTA	Hochtemperaturanemometer
IR	Infrarot
PW	Paul Wurth
RCA	Rotating Cup Atomizer
ROGESA	Roheisengesellschaft Saar mbH
SDA	Spinning Disc Atomizer
SVAI	Siemens VAI
THY	ThyssenKrupp AG
UK	Vereinigtes Königreich Großbritannien
VASL	voestalpine Stahl GmbH in Linz

Literaturverzeichnis

- [1] BRABENDER ; FEHS INSTITUT FÜR BAUSTOFF FORSCHUNG E.V. (Hrsg.): *Entwicklung eines Prozesses zur Trockenengranulation von Hochofenschlacken: Transport und Speicherung von flüssiger Hochofenschlacke und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für eine Zentralgranulation*. Duisburg, 26.08.2009
- [2] ZHANG, Hui ; DONG, Liang ; LI, Hui-quan ; CHEN, Bo ; TANG, Qing ; FUJITA, Tsuyoshi: Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese steelmaking plant: A hybrid material/energy flow analysis case study. In: *Sustainable Energy Technologies and Assessments 2* (2013), S. 67–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2013.03.003>. – DOI 10.1016/j.seta.2013.03.003. – ISSN 22131388
- [3] NORGATE, Terry ; JAHANSHAH, Sharif: Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be? In: *Minerals Engineering 24* (2011), Nr. 14, S. 1563–1570. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.007>. – DOI 10.1016/j.mineng.2011.08.007. – ISSN 08926875
- [4] VATANAKUL, Maytinee ; CRUZ, Elizabet ; MCKENNA, Kerry ; HYNES, Rory ; SARVINIS, Jim: Waste Heat Utilization to Increase Energy Efficiency in the Metals Industry. In: NEELAMEGGHAM, Neale R. (Hrsg.): *Energy Technology 2011: Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gas Reduction Metallurgy and Waste Heat Recovery*. Hoboken and N.J : John Wiley & Sons, 2011. – ISBN 1118036514, S. 5–16
- [5] STEINDL, Franz: *Modellversuche bei der Mikrogranulation von Hochofenschlacke*, Montanuniversität Leoben, Diss., 2004. <http://media.obvsg.at/AC04359664-2001>
- [6] ZHANG, Xipeng ; ZHOU, Shouhang: The prospect of sensible heat recovery of blast furnace slag. In: CHINA INTERNATIONAL MINING EXCHANGE (Hrsg.): *The 7th China Iron and steel annual meeting proceedings*, 2009
- [7] BARATI, M. ; ESFAHANI, S. ; UTIGARD, T. A.: Energy recovery from high temperature slags. In: *Energy 36* (2011), Nr. 9, S. 5440–5449. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.007>. – DOI 10.1016/j.energy.2011.07.007. – ISSN 03605442
- [8] MA, Guang-yu ; CAI, Jiu-ju ; ZENG, Wen-wei ; DONG, Hui: Analytical Research on Waste Heat Recovery and Utilization of China's Iron & Steel Industry. In: *Energy Procedia 14* (2012), S. 1022–1028. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1049>. – DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.1049. – ISSN 18766102
- [9] SCHENK, Johannes ; LEHRSTUHL FÜR METALLURGIE - MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN (Hrsg.): *Eisen- und Stahlmetallurgie: Vorlesungsskriptum WS 2010/11*. Leoben, 2010
- [10] EHRENBERG, Andreas: Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. In: *Beton Information* (2006), Nr. 4, S. 67–95

- [11] GARA, Stefan ; SCHRIMPF, Sabine: *Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie*. http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.at%2Ffileadmin%2Fsite%2Fpublikationen%2FM092.pdf&ei=edf6Uff4HaLe7AbPuYH4CA&usg=AFQjCNFKk-4jrGzj10rYAF_LpULrv7Bopw&bvm=bv.50165853,d.ZGU. Version: 1998
- [12] BARATI, Mansoor: Energy intensity and greenhouse gases footprint of metallurgical processes: A continuous steelmaking case study. In: *Energy* 35 (2010), Nr. 9, S. 3731–3737. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.022>. – DOI 10.1016/j.energy.2010.05.022. – ISSN 03605442
- [13] BRABENDER ; FEHS INSTITUT FÜR BAUSTOFF FORSCHUNG E.V. (Hrsg.): *Entwicklung eines Prozesses zur Trockenengranulation von Hochofenschlacken: Transport und Speicherung von flüssiger Hochofenschlacke und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für eine Zentralgranulation*. Duisburg, 26.08.2009
- [14] NORGATE, Terry ; XIE, Dongsheng ; JAHANSHAH, Sharif: Technical and economic evaluation of slag dry granulation. In: ASSOCIATION FOR IRON & STEEL TECHNOLOGY (Hrsg.): *AISTech 2012 - The Iron & Steel Technology Conference and Exposition*, 2012, S. 35–46
- [15] ALLIBERT, M.: *Slag atlas*. 2nd ed. Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1995. – ISBN 978-3-514-00457-3
- [16] ONLINE GIESSEREI LEXIKON: *Basizität*. http://www.giessereilexikon.com/index.php?option=com_content&view=article&id=61%3Abasizitaet&catid=2%3Ab&lang=de. Version: 03.08.2013
- [17] BABICH, A.: *Ironmaking: Textbook*. Aachen : Mainz, 2008. – ISBN 3-86130-997-1
- [18] HASSE, Stephan: *Giesserei Lexikon*. 19., [überarb.] Aufl., Ausgabe 2008. Berlin : Schiele & Schön, op. 2007. – ISBN 9783794907533
- [19] RIMSER, Alexander: *Planung und Bau einer Anlage zur Trockenschlackengranulation: Schwerpunkt EMSR-Technik*. Leoben, 2012
- [20] EHRENBERG, Andreas ; MUDERSBACH, Dirk: *Dry Slag Granulation with Heat Recovery - DSG*. Leoben, 19.10.2012
- [21] GOTO, K. S. ; LINDER, K. H.: Thermal conductivities of blast furnace slags and continuous casting powders in the temperature range 100 to 1550 degree C. In: *Stahl und Eisen* (1985), Nr. 105, S. 1387
- [22] MOON, Ji-Woon ; KIM, Hyun-Soo ; SASAKI, Yasushi: Energy Recuperation from Slags. In: SLAG VALORISATION SYMPOSIUM (Hrsg.): *Proceedings of First International Slag Valorisation Slag Symposium*, 2009, S. 143–150
- [23] THIENEL, K.-Ch.: *Baustoffkreislauf Eisenhüttenschlacken und Hüttensand*, Universität der Bundeswehr München, Diss., 29.11.2010
- [24] BEZIRKSREGIERUNGEN, STAATLICHE AMT FÜR UMWELT UND ARBEITSSCHUTZ OWL, LANDESUMWELTAMT, STAATLICHE UMWELTÄMTER: *Vereinbarung über die rechtliche Behandlung von Hüttensand und Hochofen-stückschlacke der Firma ThyssenKrupp Stahl*

- AG. http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CFIQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.umwelt.nrw.de%2Fumwelt%2Fpdf%2Ferlass_TK_Steel_homepage.pdf&ei=PBQfUuaWIEsv0QXXtIAI&usg=AFQjCNGEZax8y1ANc3rTLP_63kfzNe14wg&bvm=bv.51495398,d.d2k. Version: 2006
- [25] EHRENBERG, Andreas: Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. In: *Beton Information* (2006), Nr. 5, S. 35–63
- [26] HAO, Guo ; SHOUHANG, Zhou: Discussion about heat recovery technology of blast furnace slag. In: *The proceeding of ironmaking technology conference and ironmaking academic annual meeting*, 2010
- [27] ZHANG, Hui ; WANG, Hong ; ZHU, Xun ; QIU, Yong-Jun ; LI, Kai ; CHEN, Rong ; LIAO, Qiang: A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. In: *Applied Energy* (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.019>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2013.02.019. – ISSN 03062619
- [28] DELBECQ, Jean-Marie ; FRANCESCHINI, Gilles ; FIXARIS, Marc: Blast-Furnace and Steel-making Slags: Which Future Valorisation in the Next 20 Years? In: MALFLIET, Annelies (Hrsg.): *Proceedings of the third International Slag Valorisation Symposium*. Leuven : Ku Leuven, 2013. – ISBN 978–94–6018–637–0, S. 257–268
- [29] PICKERING, S. J. N. ; HAY, N. ; ROYLANCE, T. F. ; THOMAS, G. H.: New process for dry granulation and heat recovery from slag. In: *Ironmaking an Steelmaking from molten blast-furnace slag* 12 (1985), Nr. 1, n/a. <http://masters.donntu.edu.ua/2005/fizmet/konchenko/library/article11.htm>
- [30] GOTO, K. S. ; GUDENAU, Heinrich W. ; NAGARA, Kazuhiro ; LINDER, K. H.: Wärmeleitfähigkeit von Hochofenschlacke und Stranggießpulverim Temperaturbereich von 100-1550 Grad Celsius. In: *Stahl und Eisen* 105 (1985), Nr. 24, S. 1387–1394
- [31] YOSHINAGA, Mayumi ; FUJII, Koichi ; SHIGEMATSU, Tatsuhiko ; NAKATA, Tetsuro: Dry Granulation and Solidification of Molten Blast Furnace Slag. In: *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* 22 (1982), Nr. 11, S. 823–829. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational1966.22.823>. – DOI 10.2355/isijinternational1966.22.823. – ISSN 0021–1583
- [32] DONALD, J. ; PICKLES, C. A.: Energy recovery from molten ferrous slags using a molten salt medium, 1977, S. 681–692
- [33] TIBERG, N.: Heat recovery from molten slag. A new Swedish granulation technique, 2010, S. 1837–1842
- [34] BISIO, G.: Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. In: *Energy* 22 (1997), Nr. 5, S. 501–509. – ISSN 03605442
- [35] FUJII, Hiroo ; FUJITA, Tsutomu ; HASHIZUME, Shigeyuki ; KATAYAMA, Hideo ; NAKAMURA, Masashi ; OKUNO, Ryuzo ; TANAKA, Kiyooki: *Apparatus for heat recovery from molten slag*. 21.09.1982
- [36] SHUN, Li: Heat Recovery from B.F. Slag at home and abroad. In: *Industrial Heating* 38 (2009), Nr. 5, S. 23–25

- [37] XIAOTIAN, D. A. I. ; YUANHONG, Q. I. ; CHUNXIA, Zhang: Development of Molten Slag Dry Granulation and Heat Recovery in Steel Industry. In: *Journal of Iron and Steel Research, International* 20 (2008), Nr. 7. http://gt.chinamet.cn/Jweb_gtyjxb_cn. – ISSN 1006706X
- [38] XU, Yongtong ; DING, Yi ; CAI, Zhangping ; LIU, Qing ; YE, Shufeng: Development of Heat Recovery From Blast Furnace Slag Using Dry Granulation Methods. In: *China Metallurgy* 17 (2007), Nr. 9, S. 23–25
- [39] YOSHIDA, H. ; NARA, Y. ; NAKATANI, G. ; ANAZI, T. ; SATO, H.: The technology of slag heat recovery at NKK, 1984
- [40] YONGTONG, Xu ; YI, Ding ; ZHANGPING, Cai ; QING, Liu ; SHUFENG, Ye: Development of Heat Recovery From Blast Furnace Slag Using Dry Granulation Methods. In: *China Metallurgy* 17 (2007), Nr. 9, S. 23–25
- [41] YULING, Qu ; YANLI, Mao ; DONGLI, Zhang ; ZHUO, Wang: Progress on granulation for blast furnace slag by rotary cup atomizer at home and abroad. In: *Energy for Metallurgical Industry* (2011), Nr. 4, S. 19–23
- [42] MIZUOCHI, Toshio ; AKIYAMA, Tomohiro ; SHIMADA, Taihei ; KASAI, Eiki ; YAGI, Jun-ichiro: Feasibility of Rotary Cup Atomizer for Slag Granulation. In: *ISIJ International* 41 (2001), Nr. 12, S. 1423–1428. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.41.1423>. – DOI 10.2355/isijinternational.41.1423
- [43] LIU, Jun X. ; YU, Qing B. ; DOU, Chen X. ; LI, Rong: Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Apparatus for Recovering the Waste Heat of Blast Furnace Slag. In: *Advanced Materials Research* 97-101 (2010), S. 2343–2346. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.2343>. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.2343. – ISSN 1662-8985
- [44] SCHÖNBECK, Joachim: Ecoplants Resource-efficient technologies. In: METAL BULLETIN (Hrsg.): *Ecoplants Resource-efficient technologie*, 2013
- [45] MOTZ, Heribert ; EHRENBERG, Andreas ; MUDERSBACH, Dirk: Dry solidification with heat recovery of ferrous slag. In: MALFLIET, Annelies (Hrsg.): *Proceedings of the third International Slag Valorisation Symposium*. Leuven : Ku Leuven, 2013. – ISBN 978-94-6018-637-0, S. 37–55
- [46] MOTZ, Heribert ; EHRENBERG, Andreas ; MUDERSBACH, Dirk: Dry Solidification with Heat Recovery of Ferrous Slag: Präsentation. In: MALFLIET, Annelies (Hrsg.): *Proceedings of the third International Slag Valorisation Symposium*. Leuven : Ku Leuven, 2013. – ISBN 978-94-6018-637-0
- [47] LI, Guangqiang ; ZHANG, Hua ; NI, Hongwei ; GUO, Muxing: Current Development of Slag Valorisation in China: Präsentation. In: MALFLIET, Annelies (Hrsg.): *Proceedings of the third International Slag Valorisation Symposium*. Leuven : Ku Leuven, 2013. – ISBN 978-94-6018-637-0
- [48] LI, Guangqiang ; ZHANG, Hua ; NI, Hongwei ; GUO, Muxing: Current Development of Slag Valorisation in China. In: MALFLIET, Annelies (Hrsg.): *Proceedings of the third International Slag Valorisation Symposium*. Leuven : Ku Leuven, 2013. – ISBN 978-94-6018-637-0, S. 57–68

- [49] JAHANSHAH, Sharif ; PAN, Yuhua ; XIE, Dongsheng: Some Fundamental Aspects of the Dry Slag Granulation Process. In: CHINESE ACADEMY OF SCIENCES (Hrsg.): *9th Int. Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*, 2012
- [50] XIE, D. ; PAN, Y. ; FLANN, R. ; WASHINGTON, B. ; SANETSIS, S. ; DONNELLEY, J. ; NORRIDGE, T. ; JAHANSHAH, S.: Heat Recovery from Slag through Dry Granulation. In: CENTRE FOR SUSTAINABLE RESOURCE PROCESSING AND CSIRO MINERALS (Hrsg.): *Proceeding of First CSR P Conference*, 2007, S. 29–30
- [51] JAHANSHAH, S. ; MATHIESON, J. G. ; RIDGEWAY, P.: Overview of the CO₂ breakthrough program and linkage to IISI. In: CENTRE FOR SUSTAINABLE RESOURCE PROCESSING (Hrsg.): *CSR P'08 - Delivering sustainable solutions to the minerals and metals industries*, 2008, S. 18–21
- [52] AUSTRALASIAN (IRON & STEEL) SLAG ASSOCIATION: A new integrate dry slag granulation (DSG) and heat recovery process. In: *Connections* 9 (2011), Nr. 8, 4. <http://www.asa-inc.org.au/connections/Connections-January2011/loader.swf>
- [53] MCDONALD, Ian ; WERNER, Andrea ; LONG, Eduard: Dry Slag Granulation - The environmental friendly way to making cement. In: THE INSTITUTE OF MATERIALS, MINERALS AND MINING (Hrsg.): *Conference on Waste Recovery in Ironmaking and Steelmaking Processes*, 2010
- [54] MCDONALD, Ian ; WERNER, Andrea ; DANOV, Vladimir ; SIEMENS VAI (Hrsg.): *Dry Slag Granulation with Heat Recovery: All Partners Meeting*. Leoben, 10.05.2012
- [55] KOFLER, Markus: *Beschreibung des Versuchsvorhabens und der Versuchsanlage, Schlackengranulierung Pilotanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik*. Leoben, 23.11.2011
- [56] DRAXLER JOSEF: *Energiebilanz*. Leoben, 2009
- [57] KOFLER, Markus: *Trockene Granulation von Hochofenschlacke in Arbeit*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Diss., 2014
- [58] BAEHR, H.D. ; DIEDERICHSEN, Chr.: Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen. In: *BWK* 40 (1988), Nr. 1/2
- [59] ATKINS, Peter W. ; PAULA, Julio d. ; TRAPP, Charles A.: *Physikalische Chemie*. 5. Aufl. Weinheim [u.a.] : VCH, 2013. – ISBN 3527335684
- [60] TESTO INDUSTRIAL SERVICES GMBH: *Volumenstrom-Fibel - Messtechnik und Kalibrierung*. <http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.testo-industrial-services.de%2Fbinary.ashx%2F6752%2Ffibel-volumenstrom.pdf&ei=ZmNtUqKFHvHo7Aaqi4DQDA&usg=AFQjCNEzIsZxgBUuhSAJNSb5mNI4qQoMEQ&bvm=bv.55123115,d.ZGU>. Version: 2010
- [61] EHRENBERG, Andreas ; MUDERSBACH, Dirk: *Dry Slag Granulation with Heat Recovery - DSG*. Leoben, 19.10.2012

Abbildungsverzeichnis

2.1. Globale Treibhausgasemissionen nach CO ₂ -Äquivalenten in der Primärmetallproduktion für 2010 [3]	4
2.2. Jährliches Treibhausgaseinsparungspotential der trockenen Granulation nach [3]	5
2.3. Verteilung der Hauptenergieströme eines durchschnittlichen Hüttenwerkes nach [6]	5
2.4. Ungenutzte Energiereserven nach Aufteilung in drei Temperaturbereiche der Eisen- und Stahlindustrie am Beispiel Chinas nach [8]	6
3.1. Charakteristisches Abfall- und Reststoffverhältnis eines modernen integrierten Hüttenwerkes nach [11]	8
3.2. Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung von Hochofenschlacke nach [20]	12
3.3. Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Hochofenschlacke nach [20]	13
3.4. Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Hochofenschlacke nach [20]	14
3.5. Übersicht der Verarbeitungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Hochofenschlacke nach [11]	15
3.6. voestalpine Stahl GmbH in Linz – Schlackenbeete	16
3.7. voestalpine Stahl GmbH in Linz – Aufbereitung Hochofenstückschlacke	16
3.8. voestalpine Stahl GmbH in Linz – Hochofenstückschlacke	17
3.9. Nassgranulation von Hochofenschlacke zu Hüttensand [25]	17
3.10. voestalpine Stahl GmbH Linz – Hüttensand	18
3.11. Anteil von Eisenschlacken an der Gesamtenergie von Schlacken nach [7]	20
3.12. Wärmeenergie von Hochofenschlacke nach [14]	20
3.13. Temperaturabhängigkeit des Wärmeinhaltes von Hochofenschlacke im Zwei-Phasensystem, glasig/kristallin [29]	21
3.14. Temperaturverlauf in einem 5 mm Hochofenschlacketropfen beim Abkühlen nach [31]	21
3.15. Zusammenstoßverfahren zur Granulation von Hochofenschlacke der schwedischen Gruppe Merotec [7]	23
3.16. Mechanischer Rührprozess in einem Rührbehälter zur Granulation von Hochofenschlacke der Firma Kawasaki Steel Corporation [35]	23
3.17. Mechanischer Rührprozess mit einer rotierenden Schnecke zur Granulation von Schlacke der Firma Sumito Metal [37]	24
3.18. Prozessschema der Drehtrommelgranulation von Hochofenschlacke der Firma Ishikawajimae Harima Heavy Industries [36]	24
3.19. Prozessschema einer Doppeltrommelgranulation von Hochofenschlacke der Firma Sumitomo Metal [39]	25
3.20. Prozessschema einer japanischen Druckluftgranulation von Hochofenschlacke [40]	26

3.21. Prozessschema einer Druckluftgranulation von Hochofenschlacke des Russischen Ural Stahlinstitutes [40]	27
3.22. Rotating Cup Atomizer (RCA) Granulationsverfahren von Hochofenschlacke von Pickerung [34]	28
3.23. Versuchsapparatur nach dem RCA Verfahren von Mizuochi [42]	28
3.24. Versuchsapparatur der Northeast Universität (China) nach dem RCA Prinzip mit Energierückgewinnung [43]	29
3.25. Versuchsapparatur der Hokkaido Universität (China) nach dem SDA Prinzip [27]	30
4.1. Grundprinzip der Festkörperabkühlung der Firma Paul Wurth zur Energierückgewinnung aus schmelzflüssiger Hochofenschlacken [44]	32
4.2. Glasig erstarrte Hochofenschlacke vor der anschließenden Aufbereitung nach dem Granulationsverfahren der Firma Paul Wurth [45]	33
4.3. Fließbild des Granulationsverfahrens der Firma Paul Wurth nach [44]	33
4.4. Versuchsanlage der Firma Paul Wurth am Werksgeländer der Dillinger Hütte der Firma ROGESA [44]	34
4.5. Modell der Pilotanlage der Firma Paul Wurth mit einer Kapazität von 6 t/min flüssiger Hochofenschlacke [46]	35
4.6. Laboranlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke nach dem RCA Verfahren an der Universität von Wuhan[48]	36
4.7. Drehtellergeometrien der Laborversuchsanlage der Universität Wuhan [48] . . .	37
4.8. Produkte der Laboranlage in Abhängigkeit von der Drehtellergeschwindigkeit der Universität Wuhan nach [48]	38
4.9. Prozessfließbild zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke mit Wärmerückgewinnung des CISRI [47]	38
4.10. Abhängigkeit des Glasgehaltes und der Heißlufttemperatur von dem Prozessluftvolumenstrom bei den Laborversuchen der Universität Wuhan nach [47] . .	39
4.11. Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Aufprallverhalten eines Schlackentropfens auf einer Testplatte unter verschiedenen Winkeln von CSIRO [14]	40
4.12. Aufpralleigenschaften und Formbildung eines Schlackentropfen unter folgenden Bedingungen: Edelstahlplatte, Winkel 30°, Temperatur 1500 °C und Fallhöhe 1,7 m [49]	41
4.13. Konzeptfließbild zur trockenen Granulation mit Wärmerückgewinnung über ein Festbett der CSIRO [14]	41
4.14. Versuchsanlage (SDA) mit einem Durchmesser von 1,2 m und einer Schlackenrate von 10 kg/min der CSIRO [51]	42
4.15. Versuchsanlage (SDA) mit einem Durchmesser von 3 m und einer Schlackenrate von 100 kg/min der CSIRO [52]	42
4.16. Investitionskosten der trockenen Granulation nach dem SDA Verfahren der CSIRO im Vergleich zu der nassen Granulation nach [14]	43
4.17. Betriebskosten-Vergleich der trockenen Granulation nach dem SDA Verfahren der CSIRO und der nassen Granulation nach [14]	44
4.18. Siemens VAI Vorversuche trockene Granulation von Hochofenschlacke in Redcar (UK) [53]	45
4.19. Siemens Vorversuche zur trockene Granulation von Hochofenschlacke in Vitkovice (CZ) [53]	45

4.20. Optischer Vergleich des Granulationsproduktes aus Vitkovice mit konventionellem Hüttensand [53]	46
4.21. Prozessschema der trockenen Granulation mit Wärmerückgewinnung der Firma Siemens VAI [53]	46
4.22. Prozessübersicht der Firma Siemens VAI einer möglichen Integrierung eines exemplarischen 1 t/min Modells zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke in ein Hüttenwerk [53]	47
5.1. Aufstellungsplan der Technikumsanlage	48
5.2. Kippvorgang des Schlackenkübels in die Technikumsanlage	49
5.3. Granulationsvorgang am Drehteller der Technikumsanlage	50
5.4. Einzelversuchsablauf der Technikumsanlage	51
5.5. Granulationsprodukt der Technikumsanlage	51
6.1. Bilanzgrenze der energetischen Betrachtung der Technikumsanlage [57]	53
6.2. Ideale Bilanzströme der energetischen Betrachtung des Granulators	54
6.3. Bilanzströme des Granulators inklusive Verluste	54
6.4. Messpunkte des Granulators aus dem Rohrleitungs- und Instrumentenfließbildes der Technikumsanlage	56
6.5. Eingangslufttemperaturmessung in den drei Verteilerringen am Granulatorboden der Technikumsanlage	57
6.6. Messaufbau und -punkte des Quotientenpyrometer und der IR-Kamera im Granulator der Technikumsanlage	58
6.7. Messaufbau und -lanze des Hochtemperaturanemometers (HTA)	58
6.8. Messverfahren/-methoden zur Volumenstrombestimmung [60]	59
6.9. Stationäre Durchflussmessung in der Granulatorzuleitung der Technikumsanlage	60
6.10. Analysenfenster ibaAnalyzer der relevanten Messsignale für die Messdatenauswertung	61
6.11. Stationärer Zustand beim Granulationsprozesses	61
6.12. Sankey-Diagramm der Wärmeströme eines Einzelversuches	63
6.13. Berechnete Wirkungsgrade der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der durchgeführten Versuche	65
6.14. Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren mit dem Mittelwert und Maximalwert der Einzelversuche	66
8.1. Einflussparameter eines Hüttenwerkes auf die Eigenschaften ungemahlener Hüttensandes nach [61]	70

Tabellenverzeichnis

2.1. Aktueller Stand der Energierückgewinnung aus der Prozessabluft von Hüttenwerken in China für 2011 nach [8]	6
2.2. Aktueller Stand der Energierückgewinnung von drei verschiedenen Qualitäten von Abwärme nach Temperaturbereiche in der Eisen- und Stahlindustrie in China für 2011 nach [8]	6
3.1. Durchschnittliche chemische Zusammensetzung von Hochofenschlacke [11]	9
3.2. Einfluss der Basizität auf die Eigenschaften von Hochofenschlacke nach [15, 19]	11
3.3. Vergleich der Viskosität von verschiedenen Stoffen [13]	13
3.4. Grenzwerte von Hüttsand für den Einsatz in der Zementindustrie	18
3.5. Zusammenfassung der Granulationsverfahren und Energierückgewinnungsmethoden nach [27]	31
4.1. Machbarkeitsstudie der Firma Paul Wurth des Granulationsverfahren nach [44]	35
4.2. Energiebilanz des Granulationsverfahrens der CSIRO [14]	43
4.3. Machbarkeitsstudie der Firma Siemens VAI des Granulationsverfahrens nach [54]	47
6.1. Wärmekapazität von Hochofenschlacke nach [20]	54
6.2. Auflistung der Ein- und Ausgangsströme des Granulators und deren messtechnische Erfassung	56
6.3. Excel-Vorlage der Messdatenerfassung für die Bestimmung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der Versuchsanlage	62
6.4. Zusammenfassung der Messdaten zur Berechnung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung von Schlacke zur Luft der Versuchsanlage	63
6.5. Zusammenfassung der berechneten Wirkungsgrade der durchgeführten Versuche zur trockenen Granulation	65
6.6. Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren anhand von Literaturwerten mit den Versuchsergebnissen	65
7.1. Vergleich der Wirkungsgrade der Konkurrenzverfahren anhand von Literaturwerten mit den Versuchsergebnissen	68
A.1. Messroutine HTA Schwerlinienverfahren	II
A.2. Messroutine HTA Log-linear Verfahren	III
B.1. Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild der Technikumsanlage	IV
C.1. Datenzusammenfassung Kampagne 01 Versuch 05	V
C.2. Datenzusammenfassung Kampagne 02 Versuch 03	VI

C.3. Datenzusammenfassung Kampagne 03 Versuch 10 VII

A. Messroutine HTA-Messung

Tabelle A.1.: Messroutine HTA Schwerlinienverfahren

Schwerlinienverfahren + Wichtungsfaktor - Volumenstrom

Schwerlinedurchmesser: $\sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}}$

Abstand der Schwerlinien von der Rückwand: $\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \right)$

$S_i = \frac{A_i}{A}$ $v_m = \sum_{i=1}^n v_i \cdot S_i$ $A = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$

Betriebspunkt XY

- D Rohrdurchmesser [mm] 800
- i Ordnungszahl von außen gezählt 5
- n Anzahl der Kreisringe A 0,503
- A Fläche [m²]

i	Schwerlinien durchmesser [mm]	Fläche Kreisring A _i [m ²]	Abstand Rückwand [mm]	Geschwin- digkeit v _i [m/s]	Wichtungs- faktor g _i	Geschwindig- keit v [m/s]
1	758,9	0,0503	20,5		0,1	0,0
2	669,3	0,1508	65,3		0,3	0,0
3	565,7	0,2513	117,2		0,5	0,0
4	438,2	0,3519	180,9		0,7	0,0
5	253,0	0,4524	273,5		0,9	0,0
6			526,5		0,9	0,0
7			619,1		0,7	0,0
8			682,8		0,5	0,0
9			734,7		0,3	0,0
10			779,5		0,1	0,0

v_m [m/s] #DIV/0! mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

V [m³/h] #DIV/0! Volumenstrom in [m³/h]

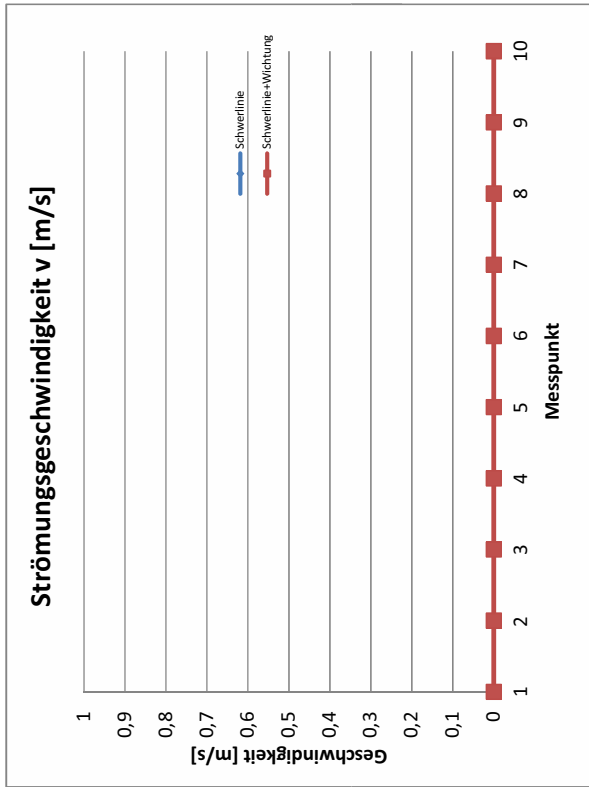


Tabelle A.2.: Messroutine HTA Log-linear Verfahren

Log-linear - Volumenstrom

Abstand der Schwerlinien
von der Rückwand:
 y/D

$$\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2x-1}{2x}} \right)$$

- D Rohrdurchmesser [mm]
- I Ordnungszahl von außen gezählt
- n Anzahl der Kreisringe
- A Fläche [m²]

Anzahl der Messkreise	$\frac{y}{D}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{y}{D}$
3	0,0321	0,1349	0,3208	-	-	-
4	0,0209	0,1172	0,1838	0,3448	-	-
5	0,0189	0,0765	0,1526	0,2169	0,3614	-
6	0,0138	0,0749	0,1137	0,1825	0,2414	0,3737

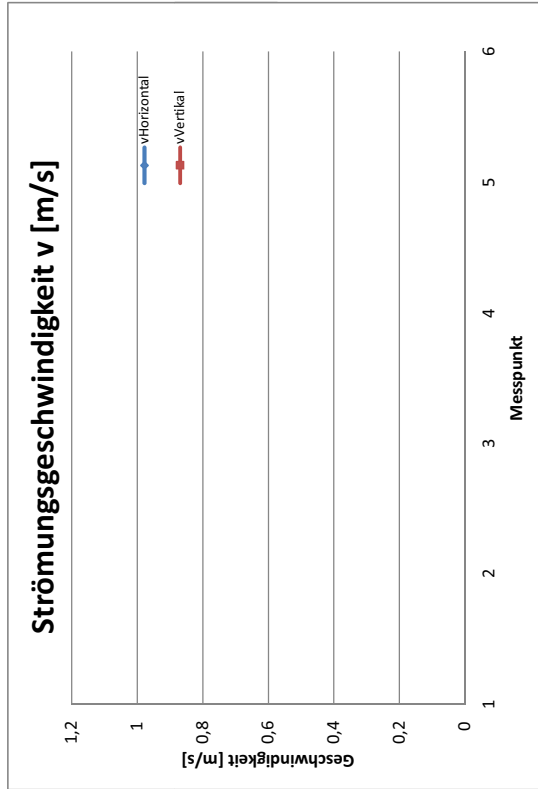
Bei der Wahl dieser Wandabstände entfällt eine Wichtung von Teilflächen

Betriebspunkt XY

- D 800
- n 5
- A 0,503

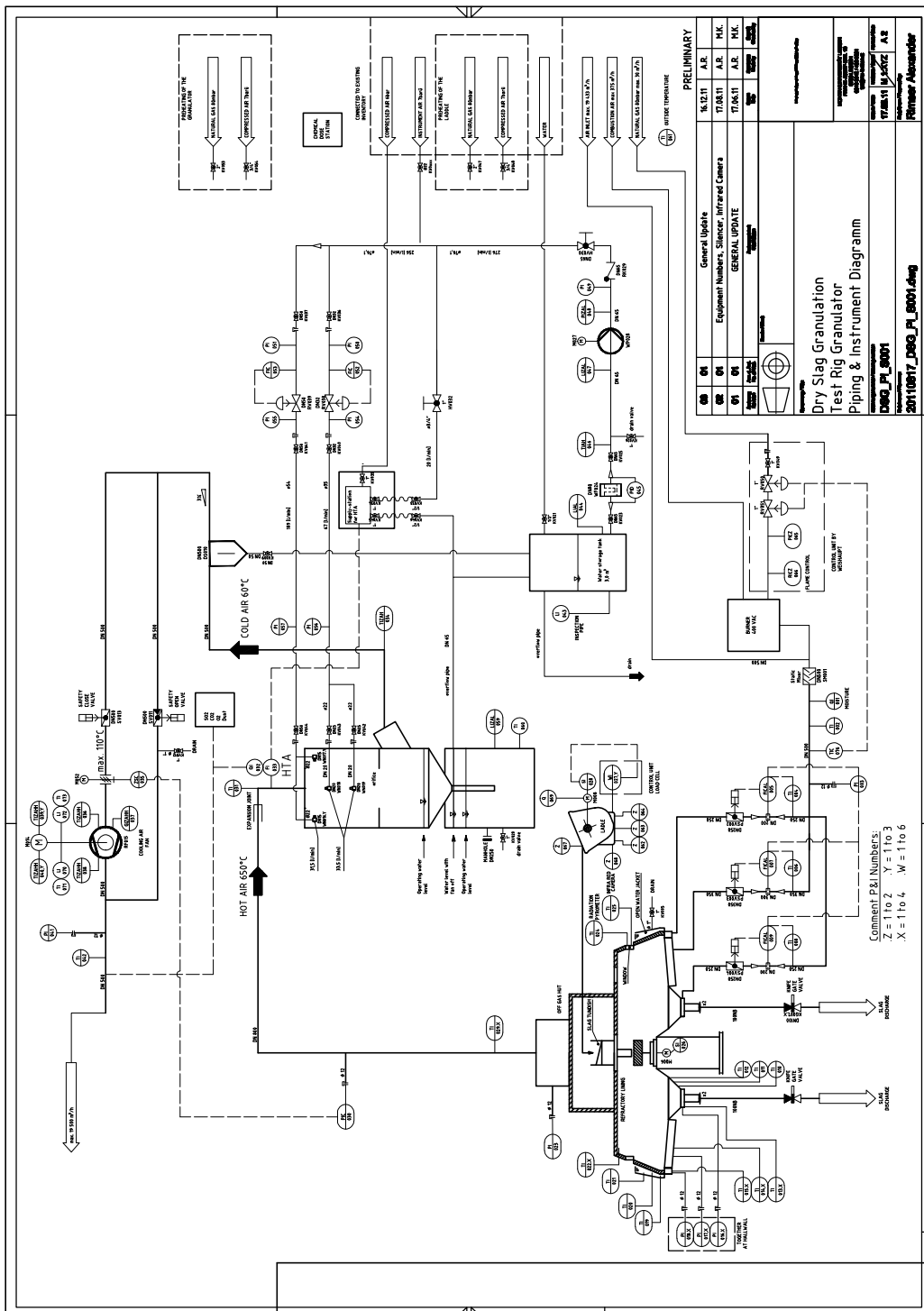
i	Abstand Rückwand [mm]	Geschwindigkeit $v_{\text{horizontal}}$ [m/s]	Geschwindigkeit v_{vertikal} [m/s]
1	25,7		
2	107,9		
3	256,6		
4	543,4		
5	692,1		
6	774,3		
v [m/s]		#DIV/0!	#DIV/0!
V [m³/h]		#DIV/0!	#DIV/0!

v_{gesamt} [m/s]	#DIV/0!	mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
V_{gesamt} [m ³ /s]	#DIV/0!	Volumenstrom in [m ³ /h]



B. Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild Technikumsanlage

Tabelle B.1.: Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild der Technikumsanlage



C. Datenzusammenfassung zur Berechnung des Wirkungsgrades

Tabelle C.1.: Datenzusammenfassung Kampagne 01 Versuch 05

K01/V05

Eingang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	1448,20	0,31	1,08	495,7
Luft	30,37	1,20	1,02	37,2
Wasser	25,10	3,24	4,18	339,4
			Total	872,3

Ausgang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	100,00	0,31	1,08	34,2
Luft	226,84	1,20	1,02	277,7
Wasser	28,90	3,24	4,18	390,8
Verluste				169,6
			Total	872,3

K01/V05	ΔT [°C]	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	ΔQ [kJ/s]	η
Schlacke	1348,2	0,31	1,08	461,4	0,52
Luft	196,5	1,20	1,02	240,5	

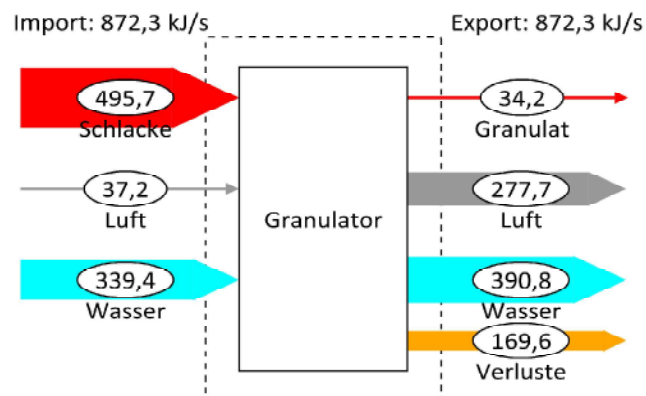


Tabelle C.2.: Datenzusammenfassung Kampagne 02 Versuch 03

K02/V03

Eingang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	1429,40	0,36	1,08	553,1
Luft	105,07	1,71	1,02	183,7
Wasser	35,87	5,98	4,18	896,3
			Total	1633,1

Ausgang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	100,00	0,36	1,08	38,7
Luft	294,66	1,71	1,02	515,1
Wasser	38,37	5,98	4,18	958,7
Verluste				120,5
			Total	1633,1

K02/V03	ΔT [°C]	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	ΔQ [kJ/s]	η
Schlacke	1329,40	0,36	1,08	514	0,64
Luft	189,59	1,71	1,02	331	

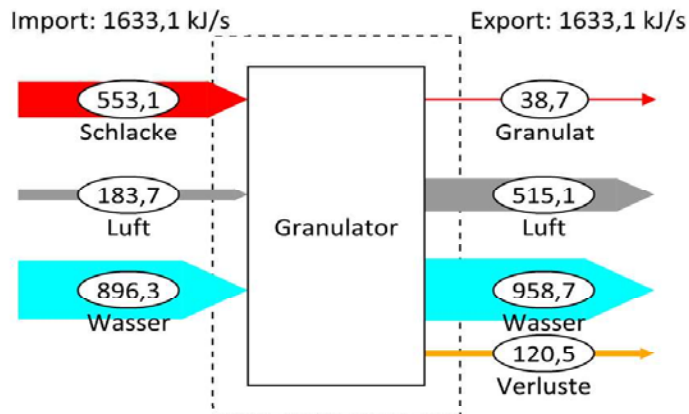


Tabelle C.3.: Datenzusammenfassung Kampagne 03 Versuch 10

K03/V10

Eingang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	1338,90	0,35	1,08	508,0
Luft	126,41	1,58	1,02	203,7
Wasser	29,50	3,99	4,18	491,5
			Total	1203,2

Ausgang	ΔT	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	Q [kJ/s]
Schlacke	100,00	0,35	1,08	37,9
Luft	303,15	1,58	1,02	488,6
Wasser	31,87	3,99	4,18	530,9
Verluste				145,8
			Total	1203,2

K03/V10	ΔT [°C]	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kg*K]	ΔQ [kJ/s]	η
Schlacke	1238,9	0,35	1,09	474,4	0,60
Luft	176,7	1,58	1,02	284,8	

