

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

03/07/2019

Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung
mittels Trockensschlackengranulation

FORWÄRTS 2.0

Projektnummer: 853550

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2016
Projektende	28/02/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Primetals Technologie Austria GmbH (PTAT) voestalpine Stahl GmbH (VAS) FEhS - Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS) Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik (MUL)
AnsprechpartnerIn	DI Robert Neuhold
Postadresse	Turmstraße 44
Telefon	+43 732 6592 73948
Fax	
E-mail	robert.neuhold@primetals.com
Website	Primetals.com

Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation

FORWÄRTS 2.0

(

AutorInnen:

Robert Neuhold (PTAT)

Thomas Fenzl (PTAT)

Bernhard Rummer (VAS)

David Algermissen (FEhS)

Klaus Doschek-Held (MUL)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	6
2.1	Kurzbeschreibung des Projekts.....	6
2.2	Relevanz des Vorhabens in Bezug auf die Ausschreibung.....	7
2.3	Stand der Technik / Stand des Wissens.....	8
2.3.1	Das Produkt Hochofenschlacke	8
2.3.2	Nassgranulation – konventionelles Granulationsverfahren zur Hüttensand- Herstellung.....	9
2.3.3	Hüttensand als Zementbestandteil – relevante Eigenschaften	9
2.3.4	Verfahren der Abwärmerückgewinnung eines Trockengranulators.....	10
2.4	Problemstellung und Ziele	12
2.4.1	Vorteile einer wasserfreien Trockengranulation.....	12
2.4.2	Aktuelle Problemstellungen in der Trockengranulation	12
2.4.3	Ziele	12
3	Inhaltliche Darstellung.....	14
3.1	Arbeitspaket 1: Versuchsstandaufbau	14
3.1.1	Ziele	14
3.1.2	Beschreibung der Inhalte	14
3.2	Arbeitspaket 2: Testbetrieb im Maßstab 2 t/min.....	15
3.2.1	Ziele	15
3.2.2	Beschreibung der Inhalte	15
3.3	Arbeitspaket 3: Auswertung und Analyse	15
3.3.1	Ziele	15
3.3.2	Beschreibung der Inhalte	15
3.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die industrielle Umsetzung	16
3.4.1	Ziele	16
3.4.2	Beschreibung der Inhalte	16
3.5	Arbeitspaket 5: Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung	16
3.5.1	Ziele	16
3.5.2	Beschreibung der Inhalte	16
3.6	Arbeitspaket 6: Projektmanagement.....	17
3.6.1	Ziele	17
3.6.2	Beschreibung der Inhalte	17
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	18
4.1	Ergebnisse der einzelnen Projektziele.....	18
4.1.1	Errichtung einer Demonstrationsanlage	18
4.1.2	Erforschung der Verfahrensgrenzen hinsichtlich Schlackenchemismus und - temperatur	18

4.1.3	Erforschung und Festlegung der Abluftmenge, -temperatur und -zusammensetzung als Kennzahlen für die nachgeschalteten Prozesse der Wärmerückgewinnung	18
4.1.4	Nachweis der Schlackenproduktqualität hinsichtlich zementtechnischer Eigenschaften	19
4.1.5	Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des Verfahrens	19
4.1.6	Entwicklung eines Scale-Up Modells für die erste industrielle Anlage resultierend aus experimentellen und simulatorischen Untersuchungen	19
4.1.7	Vorbereitung der wissenschaftlichen Verbreitung und wirtschaftliche Verwertung der neuen Technologie	20
4.2	Ergebnisse AP1 – Versuchsstandaufbau	20
4.2.1	Vergabe aller Fertigungen und Zukäufe der Pilotanlage	20
4.2.2	Detektion von Betriebspunkten, die vom vorliegenden Design nicht vollständig abgedeckt werden können	20
4.2.3	Adaptierung der bereits ausgelegten Anlage	23
4.2.4	Fortsetzung der Fertigungen und Beginn der Montage im Sept. 2017	23
4.2.5	Fertigstellung der Montage und IBN Juni 2017	25
4.2.6	Modifikationen am Granulator im Zuge des Anlagenbetriebes	26
4.3	Ergebnisse AP2 – Testbetrieb im Maßstab 2 t/min	29
4.3.1	Herausforderungen im Versuchsbetrieb:	30
4.3.2	Behobene Problemfelder:	32
4.3.3	Bestehende Problemstellungen:	34
4.4	Ergebnisse AP3 – Auswertung und Analyse	36
4.4.1	Eigenschaften von Hochofenschlacke	36
4.4.2	Prozessanalyse	39
4.4.3	Visuelle Auswertemethoden:	41
4.4.4	Untersuchungen an DSG-Pellets aus Versuch 16 (FEhS)	43
4.5	Ergebnisse AP4 – Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die industrielle Umsetzung ...	58
4.5.1	MSR-System – Rotationszerstäubung	63
4.5.2	Rotationskörper-Geometrie- und Stoffeigenschaftsuntersuchungen durch MUL	64
4.6	Ergebnisse AP5 – Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung	67
4.7	Ergebnisse AP6 – Projektmanagement	67
5	Ausblick und Empfehlungen	68
6	Literaturverzeichnis	69
6.1	Publikationen	69
6.2	Patentanmeldung	72
7	Kontaktdaten	73

2 Einleitung

Aus Hochofenschlacke produzierter Hüttensand wird als Hauptbestandteil für die Zementherstellung und als Betonzusatzstoff eingesetzt. Der Stand der Technik in der Gewinnung von Hüttensand aus Hochofenschlacke sind Verfahren zur Nassgranulation. FORWÄRTS 2.0 wird weltweit erstmals durch eine neue Technologie Hochofenschlacke bis zum semi-industriellen Maßstab trocken granulieren um hochqualitativen Hüttensand zu erzeugen und die erhebliche thermische Energie der Schlacke (rd. 1,5 GJ/t) für Wärmerückgewinnung zu nutzen. Durch diese neue Technologie können gegenüber dem Stand der Technik weltweit 284 PJ p.a. thermische Energie, 100 PJ p.a. Trocknungsenergie (Hüttensand bei 10 M% Restfeuchte) und 95% Wasser eingespart werden. Mit der Option der elektrischen Energierückgewinnung entspricht dies einem weltweiten CO₂ Einsparungspotential von 17 Mio. Tonnen p.a.

2.1 Kurzbeschreibung des Projekts

Ausgangssituation

Aus Hochofenschlacke produzierter Hüttensand wird als Hauptbestandteil für die Zementherstellung eingesetzt. Der Stand der Technik in der Gewinnung von Hüttensand aus Hochofenschlacke ist die Nassgranulation, wo der Hüttensand für die Zementherstellung mit hohem Energieaufwand nachgetrocknet und das hohe energetische Potential der Schlacke nicht verwertet wird. Bei der Trockengranulation ergibt sich hingegen durch den hohen Energieinhalt der Abluft des Granulators eine Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. Aufgrund ungelöster technischer Herausforderungen wurde weltweit bis heute kein Verfahren zur trockenen Granulation von Stahlwerks- oder Hochofenschlacke großtechnisch umgesetzt. Im Rahmen des Vorgängerprojektes FORWÄRTS (e!MISSION, Projektnummer: 838725) erforschte das Konsortium Methode und Konzept für ein neuartiges Verfahren zur Trockengranulation.

Ziele und Innovationsgehalt

FORWÄRTS 2.0 wird auf dieser Basis Hochofenschlacke bis zum semi-industriellen Maßstab trocken granulieren um hochqualitativen Hüttensand (Qualität vergleichbar mit der Nassgranulation) zu erzeugen. Dies soll Wassereinsparungen bis zu 95% und die Vermeidung von Trocknungsenergie für den Hüttensand (132 kWh/t Hüttensand bei 10 M% Restfeuchte) ermöglichen. Die zentrale Fragestellung von FORWÄRTS 2.0 wird sein, wie sich die Qualität der Schlacke unter realen Bedingungen (Hüttenwerk) verhält, wenn die Luftmenge in einem geschlossenen System so weit gedrosselt wird, dass es zu einer erheblichen Luftherwärmung durch den Wärmeübergang von Schlacke an Luft kommt (Wärmerückgewinnung - Auswirkungen auf den gesamten Granulationsprozess).

Folgende Innovationsziele sollen in FORWÄRTS 2.0 im Trockengranulationsverfahren im Maßstab einer semi-industriellen Nutzung umgesetzt werden:

- ausreichend hoher glasiger Anteil im Granulat bei gleichzeitig hoher Ablufttemperatur für ein effizientes Wärmerückgewinnungssystem
- System zum Schlackenhandling
- robuste Granulationsanlage

Angestrebte Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Partner im Projekt können dadurch ihre Grundlagen-Expertise im Bereich der metallurgischen Industrie mit dem Schwerpunkt Verwertung von Reststoffen und industrielle Energietechnik essentiell ausbauen. Die Industriepartner werden nach Projektabschluss über im industriellen Umfeld einzigartiges Gesamtprozess-Know-how in den folgenden Bereichen verfügen:

- Prozessoptimierung hinsichtlich Abluftmenge, -temperatur und -zusammensetzung als Kennzahlen für die nachgeschalteten Prozesse der Wärmerückgewinnung
- Scale-Up Modell für die erste industrielle Anlage resultierend aus experimentellen und simulatorischen Untersuchungen
- Gesamtkonzeption einer Trockengranulationsanlage inkl. Wärmerückgewinnung unter realen Bedingungen

2.2 Relevanz des Vorhabens in Bezug auf die Ausschreibung

Das Konsortium adressiert den Ausschreibungsschwerpunkt „2. Energieeffizienz und Energieeinsparungen“ und den Subschwerpunkt „2.1 Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe“. Es werden insbesondere die folgenden F&E Themen adressiert:

- Optimierung bestehender und Entwicklung neuer energie- und ressourceneffizienter Produktionsverfahren und Produkte: innovative Entwicklungen in der Thermoprozesstechnik (v.a. Eisen- und Stahlindustrie)
- Abwärmenutzung und (integrierte) Abwärmespeicherung
- Anwendung innovativer Mess-, Sensor-, Steuerungs- und Regelungstechnik zur energetischen Optimierung von industriellen Prozessen

Oberstes Ziel ist es, Emissionen in der Produktion bei gleichbleibender bzw. verbesserter Produktqualität zu reduzieren.

FORWÄRTS 2.0 trägt zur Erreichung aller drei Programmziele bei:

Die neue Technologie soll durch ein technisch und wirtschaftlich verwertbares Konzept weltweite Einsparungen von 284 PJ p.a. thermischer Energie, 100 PJ p.a. Trocknungsenergie und 95% Wasser gegenüber dem Stand der Technik ermöglichen. Mit der Option der Energierückgewinnung

entspricht dies einem weltweiten CO₂ Einsparungspotential von 17 Mio. Tonnen p.a. Die Partner PTAT und VAS sichern sich ihre Technologieführerschaft und stärken den Standort in Österreich.

2.3 Stand der Technik / Stand des Wissens

2.3.1 Das Produkt Hochofenschlacke

Beim Hochofenprozess entstehen pro Tonne Roheisen ca. 0,3 t, beim Abstich etwa 1500°C heiße flüssige Schlacke, bei einem durchschnittlichen Schlackenfluss von ca. 2 t/min, der aber auch bis zu 6 t/min betragen kann. Die Hochofenschlacke nach Abstich besteht überwiegend aus CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. Weltweit werden ca. 400 Mio. t Hochofenschlacke p.a. erzeugt. Ein Anteil von ca. 210 Mio. t Hochofenschlacke pro Jahr kann aufgrund der weltweit installierten Hochofenrößen für den Zweck der Trockengranulation herangezogen werden. Aus der flüssigen Hochofenschlacke werden in der Regel zwei Produkte gewonnen, die kristalline Hochofenstückschlacke und der glasige Hüttensand, welche sich aufgrund der Abkühlungsbedingungen in ihrer Morphologie und in ihren technischen Eigenschaften grundsätzlich unterscheiden.

2.3.1.1 Kristalline Hochofenstückschlacke (Hochofen-Stückschlacke)

Europaweit werden heute nur noch etwa 15% der flüssigen Hochofenschlacke in Schlackenbeete gegossen, in denen die Schlacke an der Luft, teilweise unterstützt durch das Besprengen mit geringen Mengen Wasser, langsam abkühlt. Durch die langsame Erstarrung bildet sich ein kristallines Gefüge aus. Durch mechanische Aufbereitung der erkalteten Hochofenstückschlacke als künstliches Gestein werden überwiegend Gesteinskörnungen und Baustoffgemische für den Straßen- und Betonbau hergestellt. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die gesamte Enthalpie der Schlacke ungenutzt bleibt.

2.3.1.2 Glasige Hochofenschlacke (Hüttensand)

Mit seit Jahren stetig steigendem Anteil wird aus flüssiger Hochofenschlacke Hüttensand produziert. Hierzu wird die Schlacke in Granulationsanlagen durch Einsatz großer Mengen Wasser schnell "abgeschreckt", so dass ein feinkörniges, amorphes, aber auch nasses Produkt, der sogenannte Hüttensand, entsteht. Aufgrund der "eingefrorenen" Kristallisationsenergie bildet der auf Zementfeinheit gemahlene Hüttensand in Verbindung mit Wasser und bei gleichzeitiger Aktivierung Hydratationsprodukte (latent-hydraulisches Verhalten). Diese entsprechen im Wesentlichen den Hydratationsprodukten von Portlandzementklinker, der Hauptkomponente des Portlandzements.

Damit ist die wesentliche Voraussetzung für die Verwendung von Hüttensand als Bindemittel in der Baustoffindustrie gegeben. Hüttensand wird daher heute überwiegend in gemahlener Form als Hauptbestandteil von Zement verwendet.

Die klassische Herstellung von Zementklinker aus Kalkstein, Sand, Ton und weiteren Komponenten erfordert einen Hochtemperaturprozess (rd. 1450 °C), der einen hohen

Rohstoffbedarf, einen hohen Primärenergieaufwand und hohe spezifische CO₂-Emissionen (rd. 1t CO₂ je t Klinker) bedingt. Die Substitution von Zementklinker durch Hüttensand ist weltweit für die Zementindustrie eine sehr wirtschaftliche Alternative, da hohe Energiekosten eingespart werden und sich die CO₂-Bilanz der Unternehmen deutlich verbessert. Mit jeder Tonne Hüttensand als Klinkerersatz kann ca. 1 t CO₂ eingespart werden.

2.3.2 Nassgranulation – konventionelles Granulationsverfahren zur Hüttensand-Herstellung

In den meisten integrierten Hüttenwerken wurden in den vergangenen Jahren die Hochöfen mit Nassgranulationsanlagen ausgerüstet. Das Nassgranulations-Verfahren, das mit einem hohen Wasser/Schlacke-Verhältnis von etwa 10:1 arbeitet, ist zwar robust gegen etwaige Schwankungen der Schlackenmenge und -eigenschaften und bei der Verwendung von Kondensationstürmen umweltfreundlicher als die Beetabkühlung, besitzt aber folgende Nachteile:

Trotz mechanischer Entwässerung in Trommeln, Silos oder Halden verbleibt eine Restfeuchte von 5-20 M.-% im Hüttensand. Für die Zementherstellung muss daher das Produkt mit hohem Energieaufwand nachgetrocknet werden. Der Energiebedarf für die Hüttensandtrocknung beträgt bei 10 M.-% Restfeuchte rd. 132 kWh/t.

Bei den offenen Verfahren, die aber heute in Europa kaum noch Anwendung finden, kann es zur Freisetzung von schwefelhaltigem Wasserdampf kommen und es muss entsprechend viel Frischwasser (rd. 1 m³/t) in das System nachgeliefert werden.

Bei der Abschreckung von Schlacke mit Wasser bleibt das nach dem Abstich vorhandene hohe energetische Potential der Schlacke (~ 1,5 GJ/t) ungenutzt, da es lediglich zur Wasser-Erwärmung/-Verdampfung führt.

Da für die Granulation vorzugsweise kaltes Wasser verwendet wird, muss das Kreislaufwasser in Kühltürmen, die z.T. mit elektrisch betriebenen Ventilatoren ausgerüstet sind, abgekühlt werden. In der Regel wird die auf einem niedrigen Temperaturniveau liegende Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

2.3.3 Hüttensand als Zementbestandteil – relevante Eigenschaften

Hüttensand ist ein latent-hydraulischer Stoff. Dies bedeutet, dass er nach alkalischer oder sulfatischer Anregung festigkeitsbildende Reaktionsprodukte ausbildet. Welchen Festigkeitsbeitrag Hüttensand in einem Bindemittel tatsächlich leistet, hängt von verschiedenen Parametern ab. Wesentlich sind dabei das Reaktivitätspotential des Hüttensands, seine Feinheit nach der Mahlung und die Wahl des Anregers. Im Einflussbereich des Hüttenwerks liegen das Reaktivitätspotential des ungemahlten Hüttensands und dessen physikalische Eigenschaften.

Maßgeblichen Einfluss auf das Reaktivitätspotential eines Hüttensands haben die chemische Zusammensetzung und der Glasgehalt. Je saurer Hochofenschlacken sind, d.h. je geringer ihre Basizität ist, ausgedrückt z.B. als das Verhältnis CaO/SiO_2 , $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ oder $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$, desto einfacher können sie glasig erstarren. Dem Glasgehalt des Hüttensandes wird eine große Bedeutung auf dessen latent-hydraulische Eigenschaft zugewiesen.

In der aktuellen EN 197-1 sowie in der Norm für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff EN 15167 existiert die Forderung nach einem Mindestglasgehalt von nur 2/3. Im Mittel liegt aber der z.B. in der FEhS-Hüttensanddatei erfasste Glasgehalt bei 96 Vol.-%. Die Spannweite ist mit 10 Vol.-% bis 100 Vol.-% zwar sehr groß, bei 91% der Werte beträgt der Glasgehalt jedoch > 90 Vol.-%. Daher wird häufig ein maximaler Glasgehalt auch mit optimalen hydraulischen Eigenschaften des Hüttensands in Verbindung gebracht.

Die Anforderungen der Zementnorm EN 197-1 an die chemischen Eigenschaften des Hüttensands beschränken sich auf die Basizität $(CaO+MgO)/SiO_2$, die größer 1 sein muss, und die Summe aus CaO, MgO und SiO₂, die mindestens zwei Drittel betragen muss.

Die physikalischen Eigenschaften des Hüttensands hängen von den Eigenschaften der flüssigen Hochofenschlacke, insbesondere von deren Viskosität und von der Granulationsanlage bzw. den gewählten spezifischen Granulationsbedingungen ab.

Sieblinie – In den meisten Fällen liegt die maximale Hüttensandkorngröße unter 3 mm. Je feiner die Sieblinie eines Hüttensands ist, desto langsamer erfolgt auf Grund des erhöhten Sickerwiderstands seine Entwässerung. Auch der Mahl widerstand wird von der Sieblinie beeinflusst. Hüttensandpellets aus der klassischen Luftgranulation weisen heute eine Sieblinie auf, die mit Sieblinie nassgranulierter Hüttensande vergleichbar ist.

Kornhabitus – Typisch für die meisten Hüttensande ist die scharfkantige Form der mehr oder weniger porösen Partikel. Die Scharfkantigkeit der Glaspartikel führt zu einer hohen Abrasivität des Materials, die bei der Auslegung von Mahlanlagen, Rohrleitungen und Transporteinrichtungen berücksichtigt werden muss.

Schüttdichte – Die Schüttdichte eines Hüttensands hängt von seiner Sieblinie, der Kornform und der Rohdichte bzw. Porosität ab. Die Schüttdichte beeinflusst Wasserrückhaltevermögen, Mahlbarkeit und Transporteigenschaften des Hüttensands.

Rohdichte und Porosität – Hüttensande können sich hinsichtlich der Rohdichte und der Porosität deutlich voneinander unterscheiden, auch wenn sie gleichermaßen aus modernen Nassgranulationsanlagen stammen. Diese Parameter werden durch die Viskosität (abhängig von chemischer Zusammensetzung und Temperatur der Schmelze) sowie durch die Granulationsbedingungen bestimmt und nehmen ebenfalls Einfluss auf Wasserrückhaltevermögen, Mahlbarkeit und Transporteigenschaften des Hüttensands.

2.3.4 Verfahren der Abwärmerückgewinnung eines Trockengranulators

Durch die Abfuhr der Wärme bei der Trockengranulation an Luft ergibt sich, im Gegensatz zur Methodik der Nassgranulation, eine Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. Dies basiert darauf, dass durch die Wasserkühlung bei der Nassgranulation der Exergieinhalt der flüssigen Schlacke fast vollständig in Anergie umgewandelt wird. Hingegen kann bei einer Trockengranulation durch den hohen Exergieinhalt der Abluft des Granulators das Wärmeenergiepotential dieser Luft für weitere Prozesse genutzt werden. Auf einige Möglichkeiten zu dieser Wärmerückgewinnung, wird im Folgenden eingegangen:

2.3.4.1 Dampferzeugung im Kessel

Für die weitere Nutzung von Wärmeenergie einer Abluft wird meist ein anderer Wärmeenergieträger (z.B. Wasserdampf) bevorzugt. Die Dampferzeugung erfolgt in einem Dampfkessel, bestehend aus den Wärmetauscherkomponenten Vorwärmer, Verdampfer und ev. Überhitzer (siehe Abbildung 1). Mit einem einfachen „1-Druck“-Dampfkessel kann der heißen Abluft (~ 600°C), je nach erforderlichen Dampfparametern, bis zu ca. 75% der Wärmeenergie für die Dampfproduktion entzogen werden (Kesselwirkungsgrad).

2.3.4.2 Stromerzeugung

Ein Dampfkessel in Kombination mit einer Dampfturbine + Generator, inklusive den weiteren Komponenten eines Dampfkraftwerksprozesses, kann für die Produktion von Strom konzeptioniert werden (siehe Abbildung 1). Der realisierbare Wirkungsgrad eines einfachen Dampfkraftwerksprozesses (1-Druck-Prozess) für die Abwärmerückgewinnung der Granulatorabluft (~ 600°C) beträgt in etwa 25%. Durch die Anwendung eines teureren Mehrdruckprozesses lässt sich dieser Wirkungsgrad nochmals deutlich steigern.

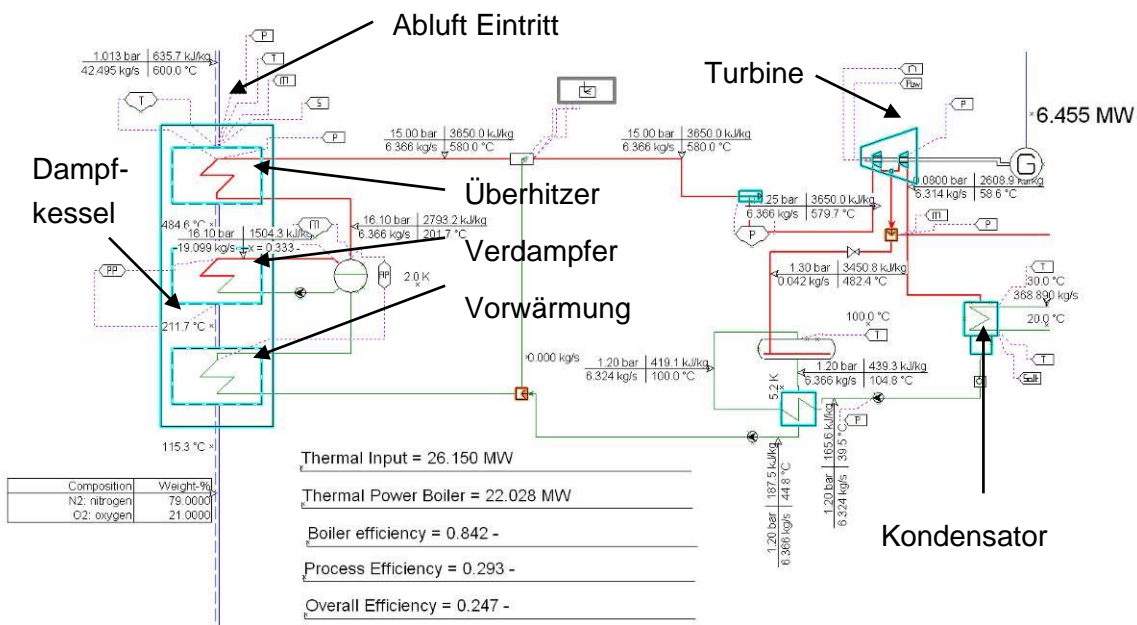


Abbildung 1: Beispiel für einen Dampfkessel mit Dampfkraftwerksprozess zur Stromerzeugung

2.3.4.3 Trocknung + Vorwärmung

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der heißen Abluft des Granulators ist die Vorwärmung bzw. Trocknung von Einsatzstoffen. Durch die Reduktion der Feuchtigkeit und eine Erwärmung von Ausgangsstoffen kann der Energiekonsum von Prozessen erheblich gesenkt werden. Für diese Vorwärmung bzw. Trocknung von Materialien kommen Anlagen wie ein Trommeltrockner, Fließbettrockner und Bandrockner zum Einsatz.

2.4 Problemstellung und Ziele

Flüssige Hochofenschlacken stellen eine der größten ungenutzten Hochtemperaturpotentiale der Eisen- und Stahlindustrie dar. Bei der konventionellen Nassgranulationstechnik bleibt das hohe energetische Potential der Schlacke (~ 1,5 GJ/t) ungenutzt, da es lediglich zur Wasser-Erwärmung/-Verdampfung führt.

2.4.1 Vorteile einer wasserfreien Trockengranulation

Bei einer wasserfreien Trockengranulation ist die Trocknung des entstehenden Produkts überflüssig. Dies entspricht einer potentiellen Wertsteigerung von trockenem Hüttensand von ca. 4,00 EUR pro Tonne. Allein hierdurch kann im Vergleich zu einer Tonne nassgranulierten Hüttensands eine CO₂-Verringerung von ca. 30 kg/t angesetzt werden. Bei einer für FORWÄRTS 2.0 nutzbaren Weltproduktion von ca. 210 Mio. t Hüttensand pro Jahr entspricht dies einer möglichen CO₂-Minderung von über 6,3 Mio. t pro Jahr. Der entscheidende Vorteil der Trockengranulation ist aber, dass durch eine nachgeschaltete Wärmerückgewinnung zusätzlich die Abwärme aus dem Abkühlprozess genutzt werden kann. Je nach Nutzungsmöglichkeit ist der direkte Einsatz für Vorwärm- oder Heizzwecke, aber auch die Produktion von Prozessdampf und/oder Strom möglich. Dadurch können natürliche Brennstoffressourcen eingespart und CO₂-Emissionen vermieden werden.

2.4.2 Aktuelle Problemstellungen in der Trockengranulation

Bis dato wurden unzählige Verfahren zur Trockengranulation von Eisenhüttenschlacken und auch zur Wärmerückgewinnung aus den schmelzflüssigen Schlacken in der Literatur vorgestellt und patentiert. Bis heute wird weltweit KEIN Trockengranulationsverfahren zur Erzeugung einer glasigen Hochofenschlacke betrieblich genutzt.

Die zentrale Fragestellung von FORWÄRTS 2.0 wird daher sein, wie sich die Qualität der Schlacke unter realen Bedingungen (in einem Hüttenwerk) verhält, wenn die Luftmenge in einem geschlossenen System so weit gedrosselt wird, dass es zu einer erheblichen Lufterwärmung durch den Wärmeübergang von Schlacke an Luft kommt bzw. welche Auswirkungen die erhöhte Lufttemperatur auf den Gesamtprozess hat.

2.4.3 Ziele

Die Effektivität und Effizienz des Projektkonzeptes von FORWÄRTS 2.0 zeigt sich insbesondere durch die Zerstäubung der heißen Schlacke zu feinen Partikeln. Der trockene Granulationsprozess ermöglicht dadurch eine direkte Wärmeübertragung von heißen Schlackepartikeln an Luft als Wärmeträgermedium. Energieverluste durch zwischengeschaltete Wärmeübertrager werden vermieden. Die dadurch produzierte heiße Luft kann direkt in nachgeschalteten Prozessen zur Dampf- und Stromproduktion oder zum Vorwärmen oder Trocknen von Betriebsmedien verwertet werden. Weiters erfolgt ein rasches Abkühlen der Schlackepartikel im Luftstrom, wodurch die Produkteigenschaften mit herkömmlichem Hüttensand vergleichbar sind (Glasgehalt > 95%). Dadurch kann das entstandene Schlackeprodukt weiterhin uneingeschränkt als Hauptbestandteil

für die Zementherstellung und als Betonzusatzstoff eingesetzt werden. Im Gegensatz zur konventionellen Nassgranulation arbeitet dieses Verfahren wasserfrei, wodurch der hohe Energieaufwand für die Trocknung des Hüttensands vermieden wird. Des Weiteren soll eine möglichst hohe Ablufttemperatur im System erreicht werden, sodass die enthaltene Energie der Schlacken durch Wärmerückgewinnung bestmöglich nutzbar gemacht wird.

2.4.3.1 Übergeordnete Projektziele

1. Bislang ungenutzte Abwärmequellen (~ 1,5 GJ/t Schlacke) durch ein neues Verfahren (Trockengranulation) nutzbar machen
2. Hüttensand mit einer Produktqualität vergleichbar mit der Nassgranulation (Stand der Technik) (> 95% Glasgehalt, Festigkeitseigenschaften, Abriebverhalten, Korngröße, Abbindeverhalten) erreichen
3. Größtmögliche CO₂ Einsparung durch Trockenschlackegranulation in der Eisen- und Stahlindustrie (weltweit ~ 10,7 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr)
4. Wasserverunreinigungen vermeiden (auf Null)
5. Wassereinsparung (auf 95%)
6. Vermeidung von Trocknungsenergie für den Hüttensand (132 kWh/t Hüttensand bei 10 M% Restfeuchte) und eine größtmögliche CO₂ Einsparung für die Zementindustrie (weltweit über 6,3 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr)

Konzept und Methode zur Entwicklung der neuen Technologie wurden im Rahmen von FORWÄRTS umgesetzt.

2.4.3.2 Detailziele FORWÄRTS 2.0

- | | |
|---|-----|
| 1. Errichtung einer Demonstrationsanlage | AP1 |
| 2. Erforschung der Verfahrensgrenzen hinsichtlich Schlackenchemismus und -temperatur | AP2 |
| 3. Erforschung und Festlegung der Abluftmenge, -temperatur und -zusammensetzung als Kennzahlen für die nachgeschalteten Prozesse der Wärmerückgewinnung | AP2 |
| 4. Nachweis der Schlackeproduktqualität hinsichtlich zementtechnischer Eigenschaften | AP3 |
| 5. Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des Verfahrens | AP4 |
| 6. Entwicklung eines Scale-Up Modells für die erste industrielle Anlage resultierend aus experimentellen und simulatorischen Untersuchungen | AP4 |
| 7. Vorbereitung der wissenschaftlichen Verbreitung und wirtschaftliche Verwertung der neuen Technologie | AP5 |

3 Inhaltliche Darstellung

Das Forschungsvorhaben FORWÄRTS 2.0 wurde in die 6 Arbeitspakete nach Tabelle 1 unterteilt. Nachfolgend werden die Arbeitspakete von FORWÄRTS 2.0 näher beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

AP Nr.	AP Titel
1	Versuchsstandaufbau
2	Testbetrieb im Maßstab 2 t/min
3	Auswertungen und Analysen
4	Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die industrielle Umsetzung
5	Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung
6	Projektmanagement

3.1 Arbeitspaket 1: Versuchsstandaufbau

3.1.1 Ziele

- Fertigung des Granulators; Aufbau und Komplettierung des Versuchsstandes
- Fertigungs- und Bauüberwachung
- Sicherstellung der Medienversorgung des Versuchstandes
- Einbinden der Mess- und Regeltechnik
- Funktionstest des Versuchstandes im „KALTEN“ Zustand
- Funktionstest des flüssigen Schlackehandlings
- Funktionstest des Versuchstandes im „WAREN“ Zustand
- Anlage in betriebsbereiten Zustand setzen

3.1.2 Beschreibung der Inhalte

In diesem Arbeitspaket werden alle Maßnahmen zur Inbetriebnahme des Granulators am neuen Standort der VAS durchgeführt. Zur Fertigstellung des Arbeitspaketes soll sich der Versuchsstand in betriebsbereitem Zustand befinden um die anschließende erste Versuchskampagne starten zu können.

Der Versuchsaufbau umfasst Antriebe (Gebläse, Rotating Cup-Motor, Klappen, Ventile etc.), Mess- und Regeltechnik (Feldgeräte zur Temperatur-, Druck- und Durchflussüberwachung, Ventile, Frequenzumrichter, übergeordnete Prozesssteuerung, Leitsystem, Human-Machine-Interface etc.) sowie den Granulator inklusive dazugehöriger Luftkanäle und Schlackenrinnenerweiterung (Metallbau, Stahlbau, Apparatebau etc.). Die Demonstrationsanlage wird so konzipiert und implementiert, dass sie den sicherheitstechnischen Standards einer Industrieanlage genügt und den robusten Anforderungen des Hüttenwerks standhält. Die entsprechende Infrastruktur ist für den Testbetrieb der Demonstrationsanlage im Hüttenwerk anzupassen.

3.2 Arbeitspaket 2: Testbetrieb im Maßstab 2 t/min

3.2.1 Ziele

- Erfolgreicher Testbetrieb der Versuchsanlage
- Durchführung der geplanten Versuchskampagnen
- Abschluss der Kampagnen mit hoher Erfolgsquote hinsichtlich der Projektziele

3.2.2 Beschreibung der Inhalte

Die Durchführung der Versuche ist in mehreren Kampagnen geplant. Erst nach Absolvierung der ersten Granuliersversuche kann die Anzahl der Granuliersversuche pro Tag bzw. pro Kampagne genau kalkuliert werden.

Ein Granuliersversuch wird folgende Haupttätigkeiten beinhalten:

- Einstellen von Anlagenparametern
- Start der kontinuierlichen Schlackezufuhr
- Messwert- und Sichtkontrolle und ev. manuelles Nachregeln/Einschreiten
- Aufzeichnung von Messwerten / Protokollführung
- Granulat- und Schlackeprobeentnahme für Untersuchungen von FEhS
- Analyse des Versuches mit anschließender Wahl von Prozessparametern für nachfolgende Versuche innerhalb der Versuchskampagne
- Optimierung des Granulationsprozesses

3.3 Arbeitspaket 3: Auswertung und Analyse

3.3.1 Ziele

- Erstellen von Kampagnenberichten
- Analyse von Schlacke und Granulat und Bewertung von Granulatqualität
- Auswertung von Messergebnissen und Abgleich mit Granulat- und Schlackeanalysen
- Eruiieren von optimalen Prozessparametern
- Definition von Korrelationen zwischen Prozessbedingungen und dem Granulatprodukt
- Erstellung des Abschlussberichtes

3.3.2 Beschreibung der Inhalte

Produktuntersuchungen

In erster Instanz wird für jede Kampagne die Analyse des gewonnenen Produktes von großer Bedeutung sein. Nur über diese Ergebnisse kann schlussendlich eine Aussage über die Qualität der Versuche getätigt werden.

Auswertung der Versuchsergebnisse

Durch das Abgleichen der Messergebnisse mit den Produktanalysen soll auf die am besten geeigneten Prozessparameter, wie z.B. Cupdrehzahl, Luftmassenstrom für eine bestimmte

Schlackenzusammensetzung, rückgeschlossen werden. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Minimierung des Abluftmassenstroms um die Ablufttemperatur zu steigern. Auch die nicht erfolgreichen Versuche bzw. Produktergebnisse mit nicht ausreichender Qualität werden näheren Untersuchungen unterzogen, da diese wertvolle Aussagen über Grenzbereiche der Schlackengranulation liefern sollen.

3.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die industrielle Umsetzung

3.4.1 Ziele

- Entwicklung des Konzepts für einen Granulator inkl. Wärmerückgewinnung im industriellen Maßstab
- Erstellung eines Wärmerückgewinnungskonzept im integrierten Hüttenwerk
- Erarbeitung eines Logistikkonzepts für das trockene Granulat im integrierten Hüttenwerk
- Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsrechnung für einen Granulator inkl. Wärmerückgewinnung im industriellen Maßstab

3.4.2 Beschreibung der Inhalte

Ziel dieses Arbeitspaketes wird es sein die Ergebnisse aus dem Testbetrieb der Demonstrationsanlage soweit abzuleiten und zu interpretieren um ein Konzept für einen Granulator inkl. Wärmerückgewinnung im industriellen Maßstab zu erarbeiten. Dies erfolgt durch Erarbeitung des Logistikkonzepts für das trockene Granulat, des nachgeschalteten Wärmerückgewinnungskonzepts und der Wirtschaftlichkeitsrechnung des gesamten Prozesses.

3.5 Arbeitspaket 5: Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung

3.5.1 Ziele

- Erarbeitung und Durchführung eines Disseminationsplanes
- Verfassung von Publikation und Präsentation der wissenschaftlichen Ergebnisse
- Vorbereitung der Evaluierung durch Analyse möglicher zukünftiger Verwertungen der Technologie

3.5.2 Beschreibung der Inhalte

In diesem Arbeitspaket werden die Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen auf nationaler sowie internationaler Ebene geplant und koordiniert. Die Ergebnisse werden für die richtigen Zielgruppen aufbereitet und präsentiert. Das Konsortium plant in Zuge von FORWÄRTS 2.0 mindestens 12 Konferenzbeiträge auf nationaler und internationaler Ebene.

Folgende Aktivitäten sind in diesem Bereich geplant:

Veröffentlichungen in ausgewählten Journals, wie z.B. in „Stahl und Eisen“ oder „Metals Magazine“.

Vorträge bei internationalen Konferenzen wie z.B. Global Slag Conference & Exhibition.

Vorträge bei MUL-internen Veranstaltungen, wie z.B. ASMET Forum für Metallurgie und Werkstofftechnik

Für diese Aktivitäten wird entsprechendes Material (z.B. Fachartikel, Folien, Poster, Flyer, Broschüren, etc.) vorbereitet.

3.6 Arbeitspaket 6: Projektmanagement

3.6.1 Ziele

- Effiziente Gesamtkoordination und -organisation des Projekts inkl. Sicherung der strategischen Zielrichtung und Projektcontrolling
- Vorbereitung und Durchführung aller Projektmeetings
- Sicherstellung der wissenschaftlichen Qualität
- Funktionierende Kommunikation im Konsortium sowie mit dem Fördergeber
- Management der erforderlichen Verträge (Konsortialvertrag) und des Budgets
- Projektteamsitzungen

3.6.2 Beschreibung der Inhalte

Die Hauptaufgaben der Projektkoordination sind die Abstimmung mit den Team-Mitgliedern, die Sicherstellung des Arbeitsflusses durch entsprechende Ressourceneinteilung, die Überwachung des Fortschritts, die termingerechte Lieferung der Dokumente sowie das Kontrollieren der Ergebnisse. Laufende und regelmäßige Projektteamsitzungen stellen die Basiskommunikation im Projektteam sicher. Ebenso werden in den vorgesehenen Zeitabständen die Projektberichte an den Förderabwickler geliefert. Projektberichte werden vom Koordinator mit Unterstützung der Projektpartner erstellt.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Ergebnisse der einzelnen Projektziele

4.1.1 Errichtung einer Demonstrationsanlage

Die Pilotanlage wurde im Zeitraum von Herbst 2016 bis Frühjahr 2017 neben dem Hochofen A der voestalpine Stahl GmbH am Standort Linz errichtet. Die Montagetätigkeiten wurden mit Mai 2017 abgeschlossen. Parallel wurde bereits im April 2017 mit den Signaltests und der Kaltinbetriebnahme begonnen. Nach Abschluss aller Funktionstests erfolgte am 8. Juni 2017 der erste Granulationsversuch mit der Trockenschlackengranulationsanlage.

4.1.2 Erforschung der Verfahrensgrenzen hinsichtlich Schlackenchemismus und -temperatur

In über mehr als 35 Granulationsbetriebstage wurde die Anlage getestet. In diesen Versuchen wurde unmodifizierte Hochofenschlacke verarbeitet mit entsprechender Streuung der Schlackenzusammensetzung und dessen Temperatur. Zur Reduzierung des Temperaturverlustes der Schlacke bis zum Granulator wurde die Schlackenrinne meistens beheizt.

Es konnten unterschiedlichste Schlackeneigenschaften – Temperaturen von 1380 – 1515°C und Schlackenbasizitäten (Verhältnis $\text{CaO} / \text{SiO}_2$) von 0,85 – 1 – granuliert werden.

Im Zuge der Versuche wurden meist durchschnittliche Schlackenmengen von 0,5 t/min verarbeitet. Es gab bei einzelnen Versuchen Schlackenmengenspitzen bis über 1 t/min bzw. Durchschnittsmengen von über 0,75 t/min. Bei diesen Versuchen traten jedoch vermehrt Probleme am Drehteller, am Wassermantel und/oder in der Wirbelschicht auf.

Nach derzeitigen Erkenntnissen wurde mit diesen Schlackenmengen die Anlagenkapazität der Demonstrationsanlage erreicht.

4.1.3 Erforschung und Festlegung der Abluftmenge, -temperatur und -zusammensetzung als Kennzahlen für die nachgeschalteten Prozesse der Wärmerückgewinnung

Die Richtigkeit der Energie-/Prozessbilanzen gemäß der prozesstechnischen Auslegung der Demonstrationsanlage konnte nachgewiesen werden. Die Ablufttemperaturen stellten sich gemäß der vorhandenen Schlackenmenge und der eingestellten Prozessluftmenge und Verteilung ein. Im Anlagenbetrieb konnten Ablufttemperaturen von über 400°C erreicht werden.

Aufgrund der niedrigeren Schlackenkapazität der Anlage und somit weniger notwendiger Prozessluftmenge konnte bis jetzt keine höhere Ablufttemperatur erreicht werden. Eine weitere Reduktion der Prozessluft würde die Stabilität der Wirbelschicht und somit die Anlagenstabilität negativ beeinflussen.

4.1.4 Nachweis der Schlackenproduktqualität hinsichtlich zementtechnischer Eigenschaften

Das erzeugte Trockenschlackengranulat wurde umfangreichen produkt- und zementtechnischen Untersuchungen unterzogen. Zu diesen gehören u.a. Kornhabitus,, Kornporosität, Sieblinie, Mahlbarkeit, Phasenzusammensetzung (Glasgehalt), Druckfestigkeiten, Hydrationswärme. Während sich die Korneigenschaften signifikant von denen nass granulierten Hüttensands unterscheiden, liegen die zementtechnischen Produktqualitäten nahe bei denen des nass granulierten Hüttensands. Eine Verwendung der trocken granulierten Hochofenschlacke auf der gleichen zementtechnischen Prozessroute wie bei nass granuliertem Hüttensand scheint somit möglich.

4.1.5 Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des Verfahrens

Durch den industrienahen Anlagenbetrieb – direkter Anschluss am Hochofen – ist mit dem Demonstrationsanlagenbetrieb ein erster wesentlicher Nachweis erbracht, dass ein solches Verfahren direkt am Hochofen umgesetzt und betrieben werden kann. Teilbereiche der Anlage müssen noch detailliert werden um einen industriellen Anlageneinsatz zu ermöglichen. Insofern kann derzeit die Wirtschaftlichkeit der Trockenschlackengranulation noch nicht zu Gänze beurteilt werden.

Am Standort Linz trägt der Aspekt der Energierückgewinnung einer solchen Anlage den wesentlichen Anteil zur möglichen Wirtschaftlichkeit bei. Eine allgemein gültige Aussage bzgl. der Wirtschaftlichkeit dieser Technologie kann aufgrund unterschiedlichster Rahmenbedingungen nicht getroffen werden.

Je nach Standort sind die Aspekte Energierückgewinnung, Wassereinsparung, Umweltaspekte bzw. Alternative zur (bestehenden) Nassgranulation für die Wirtschaftlichkeit von verschieden großer Bedeutung.

4.1.6 Entwicklung eines Scale-Up Modells für die erste industrielle Anlage resultierend aus experimentellen und simulatorischen Untersuchungen

Die max. Anlagenkapazität wurde an der Demonstrationsanlage anhand der Vielzahl von Versuchen evaluiert (siehe zu Ziel 2). Man ist durch den Demonstrationsanlagenbetrieb zur Erkenntnis gekommen, dass ein Scale-Up der Schlackenflusskapazität am Drehteller um ein Vielfaches, aufgrund der Komplexität des Prozesses und dessen Einflussfaktoren nur durch analytische Methoden nicht möglich ist.

Eine weitere Steigerung der Schlackenflusskapazität am Drehteller kann nur durch weitere umfangreiche Versuche erzielt werden. Für einen industriellen Einsatz dieser Technologie müsste nach derzeitigem Entwicklungsstand eine ähnliche Anlagenkapazitätsgröße zum Einsatz kommen und entsprechend installiert werden:

- An Hochöfen entsprechender Kapazität
- Oder, eine Vielzahl dieser Anlagen an einem Hochofen

- Und mit Hilfsequipment, z.B.: Schlackenpuffer für die Reduzierung des max. Schlackenflusses

Neben dem zentralen Element des Drehtellers sind kapazitätskritische Elemente wie der „wassergekühlte Mantel“ (Granulat-Partikel-Auftreff-Equipment) und die Wirbelschicht ebenfalls von einem Scale-Up betroffen.

Für diese Bauteile wurde im Versuchsbetrieb ausreichend Erfahrung gesammelt (Wärmestromdichten, Leerrohrgeschwindigkeiten, Geometrien etc.) um einen Scale-Up durchzuführen. Auch diverse Umbauarbeiten wurden im Zuge des Demonstrationsbetriebes am Wassermantel und der Wirbelschicht durchgeführt und optimiert.

4.1.7 Vorbereitung der wissenschaftlichen Verbreitung und wirtschaftliche Verwertung der neuen Technologie

Es gab eine Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen dieses Projekts durch die Projektpartner. Die Auflistung ist in Kapitel 6 zu finden.

4.2 Ergebnisse AP1 – Versuchsstandaufbau

4.2.1 Vergabe aller Fertigungen und Zukäufe der Pilotanlage

Folgende Lieferanten wurden für die Hauptaggregate ausgewählt:

Granulator:	Maschinenfabrik Liezen
Austragsequipment:	Geroldinger GmbH
Gebälse:	TLT
Zyklon:	PM Technologies
Fertigung/Montage:	Binder Industrieanlagenbau GmbH

4.2.2 Detektion von Betriebspunkten, die vom vorliegenden Design nicht vollständig abgedeckt werden können

4.2.2.1 Vertiefende Untersuchungen zur Wirbelschichtbildung inkl. CFD-Simulationen

Zur Verifizierung der noch offenen Betriebspunkte wurde eine Feststoff Simulation aufgesetzt in der die Ausbildung der Wirbelschicht untersucht wurde. Ziel war es die Fluidisierung des Granulatbettes unter Berücksichtigung der vorhandenen Geometrie der Granulieranlage bewerten zu können. Mittels CFD Simulation konnten die Partikelverteilung, Durchmischung und die Temperaturverteilung der Partikel und der Gasphase nachgebildet werden. Die Simulationen wurden isotherm und thermal durchgeführt.

Folgend die Ergebnisse für die Partikelverteilung, sowie für die Temperaturverteilung der Gasphase und der Temperaturverteilung der Partikel

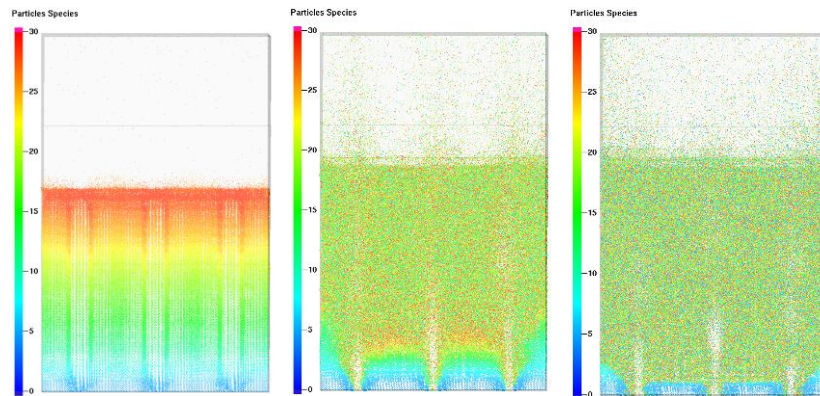


Abbildung 2: Ergebnisse für die Partikelverteilung

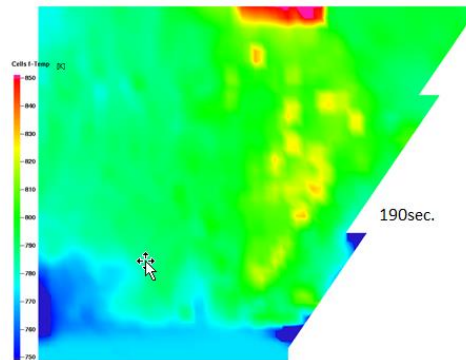


Abbildung 3: Ergebnisse für die Temperaturverteilung der Gasphase

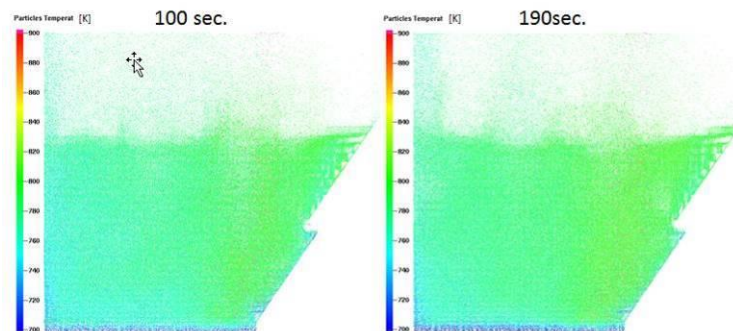


Abbildung 4: Ergebnisse für die Temperaturverteilung der Partikel

4.2.2.2 Pilotanlage zur Simulation des WS Betriebs bei gleichzeitigem Materialaustrag aus dem Granulator

Nach tieferführenden Untersuchungen der Betriebspunkte wurde festgestellt, dass das Granulatbett während des Betriebes den Zustand des Festbettes verlässt und sich eine Wirbelschicht ausbilden wird. Berechnungen haben gezeigt, dass der Übergang vom Festbett in ein Wirbelbett bei einer Leerrohrgeschwindigkeit im Bereich zwischen 0,7 und 1,0 m/s erfolgen wird. Da die Luftverteilung durch das Balkensystem nicht gleich verteilt sein wird, wird von einer inhomogenen Granulatbettverteilung ausgegangen.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der zweite Punkt, der näher untersucht wurde ist der Geleizeitige Austrag und die Kühlluft einbringung durch die Oszillomatbalken.

Zur Abklärung der oben beschriebenen Punkte wurde eine Pilotanlage im Technikum der Fa. Geroldinger errichtet und betrieben.

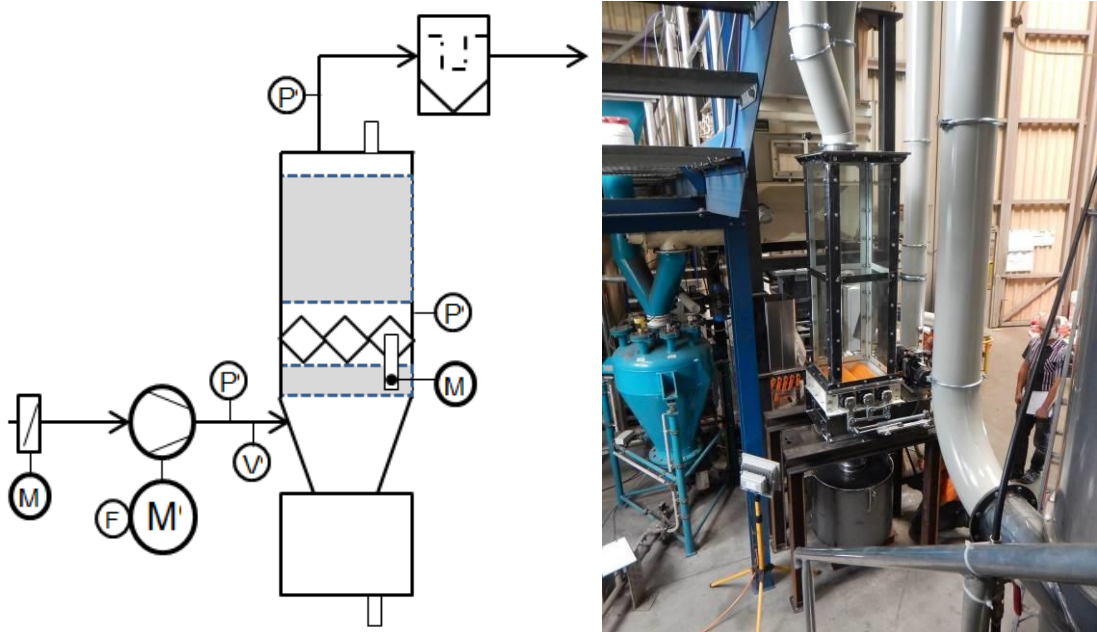


Abbildung 5: Schema der Pilotanlage und Aufbau im Technikum Fa. Geroldinger

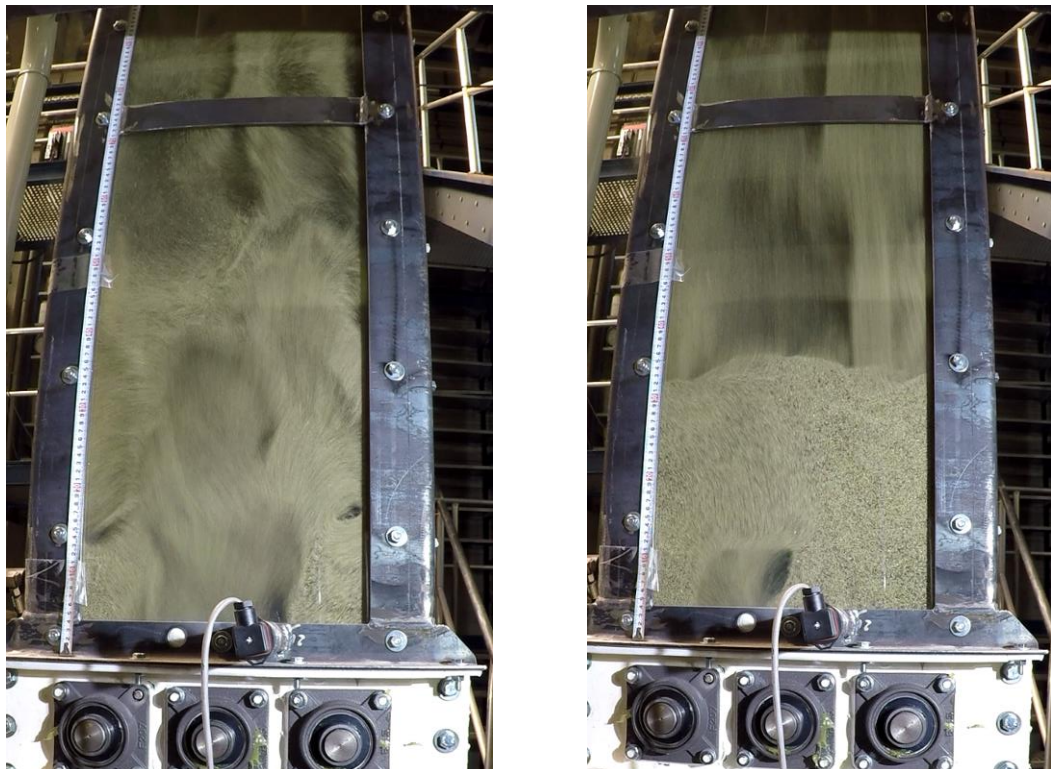


Abbildung 6: Versuchsbetrieb mittels Hüttensand

4.2.3 Adaptierung der bereits ausgelegten Anlage

Anhand der Ergebnisse der CFD Simulationen und der Versuche mit der Pilotanlage wurde das Design der Granulieranlage adaptiert. Um zusätzlich für den Wirbelschichtbetrieb geeignet zu sein, musste vor allem die Standfestigkeit der Anlage für eine Temperatur von 500°C überarbeitet werden und der höhere Verschleiß berücksichtigt werden. Durch kurzzeitigen Stopp der Fertigung wurden die erforderlichen Adaptierungen umgesetzt und ein leichter Verzug der Inbetriebnahme in Kauf genommen. Die betroffenen Bereiche waren hier hauptsächlich im Bereich der Granulatorfertigung und beim Austragsequipment angesiedelt.

Ergänzung einer Entstaubungsanlage

Neben den Adaptierungsmaßnahmen der sich bereits in Fertigung befindenden Anlagenteilen wurde auch noch eine Entstaubungseinheit erforderlich. Hierzu wurde eine Entstaubung mittels Zyklonen ergänzt.

4.2.4 Fortsetzung der Fertigungen und Beginn der Montage im Sept. 2017



Abbildung 7: Oszillomataustrag Fa. Geroldinger

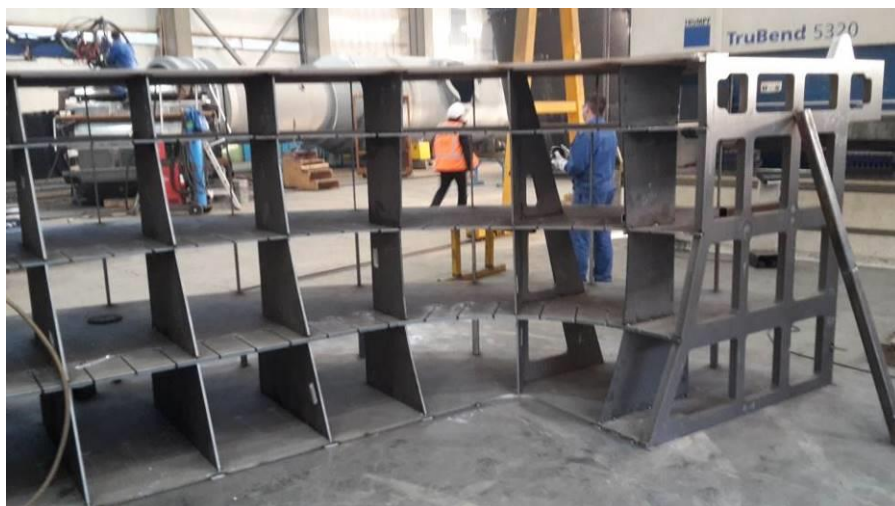


Abbildung 8: Enclosure-Fertigung bei MFL

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 9: Fertigung Granulatorbrücke bei MFL



Abbildung 10: Fertigung Water Cooled Wall bei MFL



Abbildung 11: Gebläsefertigung bei TLT

4.2.5 Fertigstellung der Montage und IBN Juni 2017



Abbildung 12: Ansichten von der Dry Slag Granulation Anlage bei voestalpine Stahl GmbH



Abbildung 13: Granulationsbetrieb mit der Dry Slag Granulation Anlage bei voestalpine Stahl GmbH

4.2.6 Modifikationen am Granulator im Zuge des Anlagenbetriebes

Im Zuge der Versuche konnten mehrere Problemfelder im Granulator identifiziert werden die den stabilen Granulationsbetrieb negativ beeinträchtigten. In folgenden Unterpunkten sind die wesentlichen getätigten Umbau-/Verbesserungsmaßnahmen dargestellt:

4.2.6.1 Wirbelschichtboden

Der Wirbelschichtboden ist ein zentrales Element des Granulators. Ohne eine über die gesamte Fläche gut ausgebildeten Wirbelschicht entsteht das Potential, dass teilweise noch flüssige Partikel nicht in die kühlere Wirbelschicht „hineingezogen“ und schnell abgekühlt/erstarrt werden, sondern dass diese an der Oberfläche liegen bleiben und mit weiteren Partikel zu einem größeren Agglomerat verschmelzen können.

Der installierte „Balkenboden“ verursachte Anfangs gleich mehrere Probleme. Der Randbereich war undicht und die Sandfüllung konnte seitlich auslaufen. Die Spalte im Randbereich verursachten über dies hinaus eine zu hohe Luftleckage in diesen Bereichen. Durch die Installation von U-Profilen unterhalb der Balken im Randbereich konnten diese Probleme fürs Erste beseitigt werden.

Im Betrieb stellte sich das Prinzip der unregelmäßigen Luftzufuhr zu beiden Wirbelschichtbereichen als Problem dar. Sobald sich ein Ungleichgewicht – unterschiedliche Wirbelbetthöhen – eingestellt hat verlagerte sich die Luftverteilung automatisch in Richtung des geringeren Widerstandes, somit zum Wirbelschichtbereich mit niedrigerer Betthöhe. Der Effekt verstärkte sich durch die vermehrte Materialumschichtung in den nebenliegenden Wirbelschichtbereich aufgrund der erhöhten

Luftzufuhr. Durch die Installation zweier Luftklappen konnte die Regelung der Luftmengen zu den beiden Wirbelschichtbereichen und die Stabilisierung beider Wirbelschichtbetten erzielt werden.

Das Balkensystem als Wirbelschichtboden war für die Lufteindüsung/-verteilung mit gleichzeitiger Funktion des Granulataustrags – öffnen der Balkenspalte – vorgesehen. Durch die Öffnung der Spalte erfolgte allerdings eine Destabilisierung des Wirbelschichtbetriebes. Im ersten Schritt wurde der Granulataustrag vom Balkensystem entkoppelt indem das Granulat über einen neuen Materialschacht durch einen Balken nach unten abgezogen wird. Im zweiten Schritt wurde über dem Balkensystem ein Wirbelschicht-Lochboden realisiert um die Wirbelschichtbettau Ausbildung zu optimieren.



Abbildung 14: Ausgebildete Wirbelschicht im Granulator

4.2.6.2 Drehteller

In den Versuchen wurden eine Vielzahl von verschiedenen Drehteller getestet. Bei einer Vielzahl von Varianten kam es zu unerwünschten Effekten wie Schlackenanhaftungen und Verschleißerscheinungen. Es kamen sowohl verschiedene Geometrien als auch Materialien zum Einsatz. Auch eine Vorwärmung bzw. Beheizung des Drehtellers wurde getestet.

4.2.6.3 Schlackenzufuhr

Ein weiterer essentieller Faktor für eine erfolgreiche Granulation ist der Zufuhr der Schlacke auf den Drehteller. Im Versuchsbetrieb wurden verschiedene Konzepte getestet. Am Vielversprechendsten sind Varianten, die ein Schlackenreservoir beinhalten und die Schlacke über eine Blende zum Drehteller fördert. Diese Kombination sorgt selbst bei variablen Schlackenmengen für einen Vollstrahl. Des Weiteren ist eine Vorwärmung & Beheizung in diesem Bereich essentiell um Schlackenerstarrungen soweit wie möglich zu reduzieren. Eine neuerliche Verwendung einer solchen Schlackenzufuhrvariante ohne Wartungs-/Reinigungsarbeiten für einen folgenden Betrieb war aber aufgrund von Schlackenerstarrungen an der Blende nicht möglich.

4.2.6.4 Wasserpaneele

Im Umfeld des Drehtellers waren zu Beginn der Versuche mehrere Bauteile angeordnet, dessen Oberfläche – im Gegensatz – zum Wassermantel nicht gekühlt ist. Während den ersten Versuchen stellte sich heraus, dass der Drehteller in verschiedenen Betriebszuständen doch Schlackenspritzer in nicht vorgesehene Richtungen verursacht. Wenn solche Schlackenspritzer an ungekühlten Bauteilen landen, kleben diese dort fest und erstarren. Erst bei ausreichender Größe fallen diese ab. Größere Schlackenpackungen im Granulator verursachen aber Probleme indem diese entweder direkt den Granulationsprozess stören (z.B.: ragen in die Flugbahn flüssiger Schlackenpartikel) oder unterbinden in Teilbereichen der Wirbelschicht eine Fluidisierung. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden kritische ungekühlte Bauteile mit wassergekühlten Paneelen ausgekleidet. Diese erweisen sich äußerst effektiv um Schlackenanhäufungen zu vermeiden.

4.3 Ergebnisse AP2 – Testbetrieb im Maßstab 2 t/min

Tabelle 2: Versuchsübersicht

Versuchsübersicht Hauptprozessdaten							
Anzahl Versuche: 41		Granulationsdauer	Ø Schlackenfluss (Massenbilanz)	Ø Schlackenfluss (Energiebilanz)	Gesamt Schlackenmenge	Max. Wirbelschicht Temperatur	Max. Abluft Temperatur
[#]		[min]	[t/min]	[t/min]	[t]	[°C]	[°C]
Maximum		59	0,76	0,76	29,2	497	407
Minimum		5	0,12	0,13	1,7	61	66
Average		31	0,46	0,51	14,8	292	266
Total		1260	-	-	592	-	-

4.3.1 Herausforderungen im Versuchsbetrieb:

4.3.1.1 Effekte am Drehteller:

Durch die visuelle Aufnahme der Granulation am Drehteller können teilweise verschiedene Effekte beobachtet werden, die zu einer reduzierten Granulationsqualität führen (siehe Abbildung 15). Zu diesen zählen:

- Schlechte Benetzung des Drehtellers
- Frühzeitige Partikelablösung
- Exzentrisch auftreffender inhomogener Schlackenstrahl
- Materialverschleiß des Drehtellers
- Zu große Partikel verlassen den Drehteller

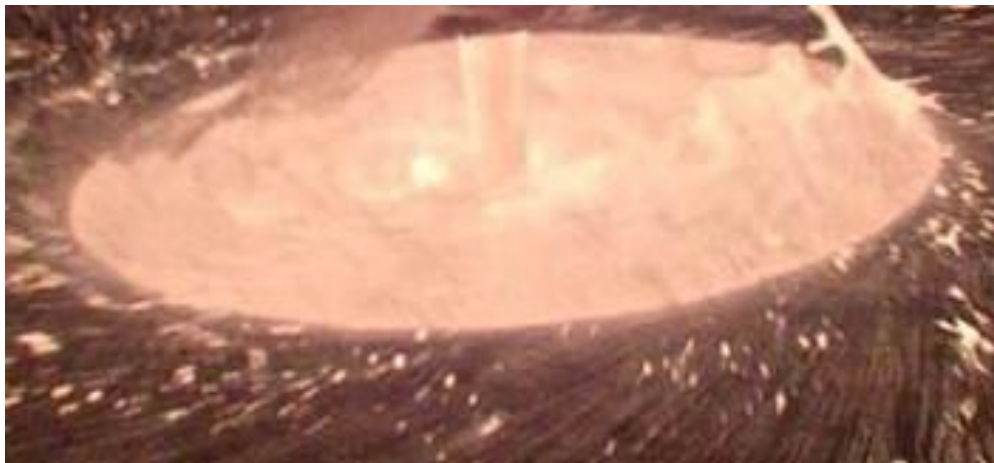


Abbildung 15: Visuelle Beobachtung von Effekten am Drehteller

Durch die visuellen Beobachtung der Granulation am Drehteller können die Auswirkungen von den verschiedenen Geometrien und Materialien der Drehteller beobachtet werden.

4.3.1.2 Schlackenspritzer vom Drehteller

Aufgrund von entstehenden Schlackenspritzern im Granulationsbetrieb am Drehteller und naheliegenden Anlagenteilen kam es in mehreren Versuchen zu wachsenden Schlackenerstarrungen die den Granulationsbetrieb teilweise massiv beeinflussten.



Abbildung 16: Mögliche Auswirkung von Schlackenspritzer am Drehteller

Durch das Absenken des Drehtellers und Bearbeitung von Oberflächen rund um den Granulator sind erste Maßnahmen zur Reduktion dieses Problems eingeleitet worden. Weitere Maßnahmen, wie z.B. die Installation von wassergekühlten Bauteilen wurden realisiert.

4.3.1.3 Schlackenzufuhr / Schlackenflussregulierung

Die Pilotanlage zur Trockenschlackengranulation kann nicht den zur Verfügung stehenden Schlackenfluss am Hochofen A verarbeiten. Über ein entwickeltes Schlackenflussregulierungssystem wird der Schlackenfluss zum Granulator limitiert. Dieses System wurde durch den Einsatz verschiedener Geometrien und operativen Abfolgen optimiert und erfüllt nun die gesetzten Anforderungen.



Abbildung 17: Schlackenflussregulierungssystem

Allgemein mussten viele weitere Abläufe und Einrichtungen für die optimale Schlackenzufuhr zum Granulator optimiert werden. Zu diesen gehören:

Schlackenzufuhr: Durchmesserwahl und Zentrierung des „Durchgangslochs“ zum Drehteller

Notabschaltprozedere: Stopfen für Schlackenflussregulierer, Sandeinwurf etc.

Schlackenabzweiger Notbeet / Granulator

Des Weiteren ist eine möglichst hohe Schlackentemperatur ein wichtiger Parameter für eine qualitativ hochwertige Granulation. Neben dem Deckel auf der Schlackenrinne, welche die Strahlungsverluste minimiert, ist ein Rinnenbrennersystem zur Vorwärmung der Rinne installiert. Durch die Optimierung der Abdichtungen an der Rinne und Leistungssteigerung des Brenners können mittlerweile Vorwärmtemperaturen von bis zu $>700^{\circ}\text{C}$ über die nahezu gesamte Länge der Schlackenrinne zum Granulator erzielt werden.

4.3.1.4 Agglomerationsbildungen von Schlacke im Granulator:

Durch einen nicht idealen Granulationsprozess am Drehteller (siehe Punkt 1) kann es zu dem Effekt kommen, dass Partikel nicht die notwendige Geschwindigkeit erfahren und somit deren Flugbahn niedriger ist als die sonst übliche. Diese Partikel können unterhalb der wassergekühlten Bereichs auftreffen und anhaften. Größere Brocken können sich demnach unterhalb des wassergekühlten Bereichs bilden und in die Wirbelschicht rutschen. Diese blockieren dann in Teilbereichen die Wirbelschichtausbildung und der Granulationsprozess muss abgebrochen werden.



Abbildung 18: Agglomerationsbrocken im Granulator

4.3.2 Behobene Problemfelder:

Zwei wesentliche Problemfelder im Versuchsbetrieb konnten durch die Umbauten im Granulator im Sommer/Herbst 2018 beseitigt werden:

4.3.2.1 „Schlacken-Tropfsteinbildung“ über dem Drehteller

Durch die Aufgabe der Schlacke im Zentrum des Drehtellers und dessen Beschleunigung kommt es je nach Prozessbedingungen und Drehtellertyps bzw. dessen Zustand zu Schlackenspritzern, die an der Einhausung des Granulators oberhalb des Drehtellers auftreffen und festkleben. Weitere

Partikel folgen und es kommt zur Bildung von herunterwachsenden Tropfsteinen. Diese wachsen teilweise zu einer Größe an die, bereits in den Granulierungsprozess hineinragen.

Diese Problemstelle wurde durch das Anbringen eines wassergekühlten Paneels oberhalb des Drehtellers behoben. Schlackenspritzer, die auf dem wassergekühlten Paneel landen, werden sofort an dessen Kontaktstelle abgekühlt und können auf der glatten Oberfläche des Paneels nicht mehr haften. Der Bereich oberhalb des Drehtellers bleibt somit frei von Schlackenpackungen / Tropfsteinen.

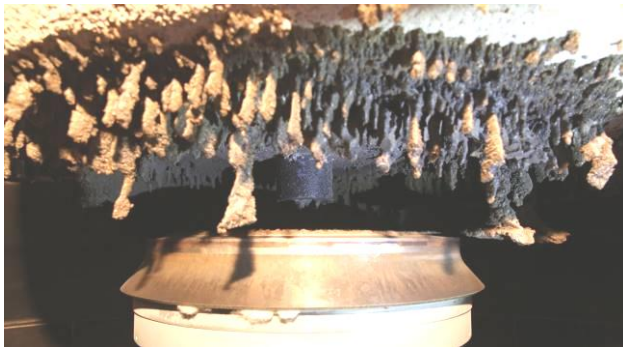


Abbildung 19: Zustand des Bereichs oberhalb des Drehtellers nach dem Granulationsbetrieb
Links: ohne Wasserpaneel Rechts: Mit Wasserpaneel

4.3.2.2 Agglomerationsbildung an Flansch unterhalb des Wassermantels

Aufgrund von Problemen bei der Granulation am Drehteller kann es zu einer Partikelausbildung kommen die nicht die ausreichende Geschwindigkeit besitzt um am Wassermantel aufzuprallen. Diese Partikel – meist größeren Masse – können aufgrund ihrer erhöhten Fallbewegung unterhalb des Wassermantels auftreffen. Dieser un-(schlecht-)gekühlte Bereich besitzt hohes Potential, dass Schlacke haften bleibt und erstarrt. Mit nachfolgenden Partikel können sich größere Agglomerate ausbilden, die schlussendlich in das Wirbelbett abrutschen und dort in Bereichen die Wirbelbettauusbildung unterbinden.

Der Bereich unterhalb des Wassermantels wurde nun mit einem weiteren wassergekühlten Ring geschützt. Vor allem bei problematischen Zuständen an der Drehtellerkonstruktion ist das Granulatorumfeld nun deutlich resistenter gegen problematische Schlackenagglomerationen.



Abbildung 20: Links: Der Bereich unterhalb des Wassermantels ist äußerst sensibel bzgl. Schlackenanhaftungen. **Rechts:** Der neu installierte Wasserring verhindert das Anhaften von Schlackepartikel und lässt diese in das Wirbelbett fallen um dort abgekühlt zu werden

4.3.3 Bestehende Problemstellungen:

4.3.3.1 Drehteller

Das Anforderungsprofil an einen Drehteller für die Schlackengranulation ist hoch. Zu diesem gehören u.a. folgende Punkte:

- Gleichbleibende Bedingungen am Drehteller: Keine Schlackenanhaftungen oder sich wiederkehrend lösende Schlackenanhaftungen
- Verschleiß-, Temperatur-, Chemische- Beständigkeit gegenüber einem Umfeld von bis zu 1500°C heißer Schlacke
- Benetzungsfähigkeit der Schlacke: Rotationssymmetrische Verteilung und Beschleunigung der Schlacke am Drehteller. Schlacke darf sich nicht vorzeitig vom Drehteller lösen
- Drehtellerfestigkeit muss den hohen Temperaturen und Drehzahlen bis zu 1500min⁻¹ standhalten.

Im Laufe des Versuchsbetriebs wurden viele verschiedene Drehteller mit unterschiedlichsten Materialien und Geometrien getestet. Es konnte noch kein Drehteller gefunden werden, der dem oben angeführten Anforderungsprofil vollkommen entspricht. Die Entwicklung am Drehteller konnte somit noch nicht erfolgreich abgeschlossen werden.

4.3.3.2 Granulatorbrücke

Eine damals aus statischen Gründen implementierte „Brücke“ trennt zwei Wirbelschichtböden im Granulator. Dies sorgt, wie weiter oben im Bericht detaillierter erläutert, für meist kritische Agglomerationen von Schlacke auf der Brücke. Auch die neu installierten „Wirbelschichtboxen“ auf der Brücke konnten noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

Zusätzliche freiliegende, ungekühlte Kanten und die geringe Wirbelschichthöhe können weiterhin die Bildung von Schlackenagglomerationen in diesem Bereich nicht gänzlich verhindern.



Abbildung 21: Links: Brücke im Granulator vor dem Umbau auf Wirbelschichtboxen.
Rechts: Brücke im Granulator nach Umbau auf Wirbelschichtboxen.

In Zukunft kann dieses Problem allerdings mit einem durchgehenden Wirbelschichtboden gelöst werden. Für eine Neukonstruktion des Granulator ist eine solche Brücke nicht notwendig.

4.3.3.3 Schlackenzufuhr am Drehteller

Es wurden verschiedene Methoden der Schlackenzufuhr auf den Drehteller getestet. Für gute Granulationsbedingungen am Drehteller sind folgende Eigenschaften des Schlackenstrahls von Vorteil:

- rotationssymmetrischer Strahl
- Vollstrahl / kein Hohlstrahl
- Zentrierung des Schlackenstrahls auf den Mittelpunkt des Drehtellers
- Niedrige (vertikale) kinetische Energie der Schlacke
- Keine / wenige Anfrierungen von Schlacke im Schlackenzufuhrelement
- Wiederverwendbarkeit des Schlackenzufuhrelements nach einer Granulation oder einfacher Wechsel bis zum darauffolgenden Abstich
- Zusätzlich muss das Element der Schlackenzufuhr noch einen variablen Schlackenmassenstrom bedienen können, um die Anforderungen eines Hochofens erfüllen zu können.
- Unterschiedliche Konzepte sind in Planung.

4.4 Ergebnisse AP3 – Auswertung und Analyse

4.4.1 Eigenschaften von Hochofenschlacke

4.4.1.1 Physikalische Stoffeigenschaften von Hochschlacke

Zur einfacheren Abschätzung des Verhaltens von Hochofenschlacke und der daraus folgenden Auswirkung auf die Rotationszerstäubung, ist eine Betrachtung der physikalischen Stoffeigenschaften (dynamische Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte) notwendig. Über die chemische Zusammensetzung und die Temperatur der Schlacke sollen die physikalische Stoffeigenschaften näherungsweise aus vorhandenen und anhand von Literaturmodellen bestimmt werden.

Über die Berechnungsgrundlage nach Mudersbach (Mudersbach 2009) und Ehrenberg et al. (Ehrenberg und Algermissen 2016) ergeben sich folgende Werte in Tabelle 3 der Stoffdaten für die Hochofenschlacke des Hochofens A der voestalpine Stahl in Linz.

Tabelle 3: Physikalische Stoffeigenschaften der Hochofenschlacke der VAS Linz – Hochofen A (Mudersbach 2009) (Ehrenberg und Algermissen 2016)

Temperatur	1380°C	1500°C	Einheit
Dichte	2728	2767	kg·m ⁻³
Oberflächenspannung	0,425	0,413	N·m ⁻¹
Dynamische Viskosität	1,688	0,806	Pa·s

Zu Beginn wird die dynamische Viskosität behandelt, da diese die größte Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und Temperatur aufweist, siehe Abbildung 22

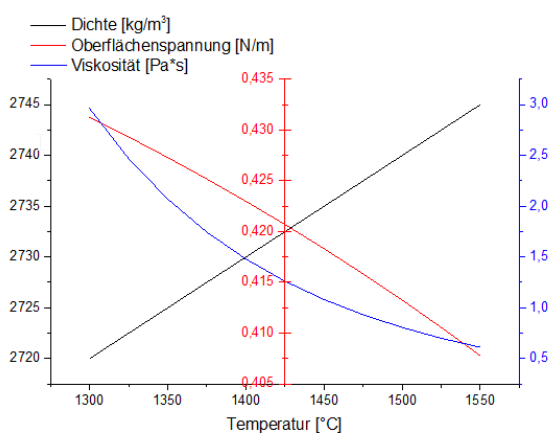


Abbildung 22: Physikalische Stoffdaten (Dichte, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität) der Hochofenschlacke in Abhängigkeit von der Temperatur der VAS Linz – Hochofen A nach (Mudersbach 2009)(Ehrenberg und Algermissen 2016)

4.4.1.2 Viskosität

Über eine Literaturstudie wurden aktuelle Modelle und Messwerte erfasst und in eine Datenbank implementiert, welche als Datenbasis für die mathematische Näherung der dynamischen Viskosität

dient. Dabei werden die chemische Zusammensetzung und die Temperatur der Schlacke berücksichtigt. Für die folgende chemische Zusammensetzung konnte mittels linearer Multiregressionsanalysen (MLR) die dynamische Viskosität im Vergleich zu anderen Modellen bestimmt werden, siehe Tabelle 4 und Abbildung 23.

Tabelle 4: Mathematische Näherung der dynamischen Viskosität für die VAS Linz – Hochofen A

Temperatur [°C]	Massenanteil w [Ma.-%]				dynamische Viskosität [Pa·s]			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MLR	lida et. La (lida und Guthrie 2015)	FEhS (Ehrenberg und Algermissen 2016)	FEhS/10
1380	36,99	38,30	11,72	8,87	0,69	0,45	1,62	0,162
1440	36,99	38,30	11,72	8,87	0,41	0,34	1,18	0,118
1500	36,99	38,30	11,72	8,87	0,24	0,28	0,875	0,0875

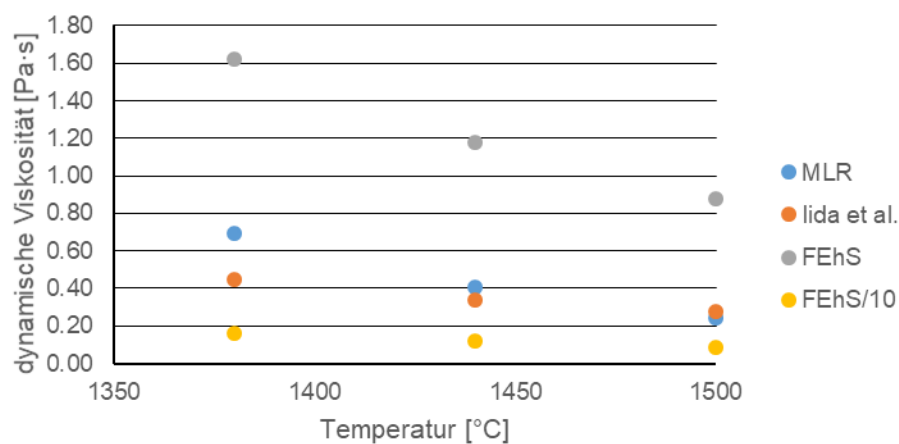


Abbildung 23: Vergleich der dynamischen Viskosität

Das aufgestellte Modell soll zukünftig mittels praktischer Versuche (Ausflussversuch, Hochtemperaturviskosimeter-Messung) und mathematischer Simulationen (InterFoam) evaluiert werden.

4.4.1.3 Abriebverhalten

Um das Verhalten von Trockenschlackengranulat bezüglich des Abriebs in einer Wirbelschicht besser beurteilen zu können, wurden in einer Anlage im Labormaßstab Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse das Abriebverhalten von Trockenschlackengranulat mit dem von konventionellem, nass granuliertem, Hüttensand vergleichen.

Im Ersten Schritt wurden 9 Proben aus Trockenschlackengranulat für 5, 30 bzw. 120 Minuten einer Belastung von 1, 2 bzw. 3 Metern pro Sekunde Leerrohrgeschwindigkeit ausgesetzt (Abbildung 24). Diese Versuche zeigten, dass keine signifikante Verschiebung zu kleineren Korngrößen

festzustellen ist. Einzig der Siebschritt 0,5 mm zeigt einen Abfall, welcher aber auf einen Austrag aus der Wirbelschicht und nicht auf Abrieb zurückzuführen ist.

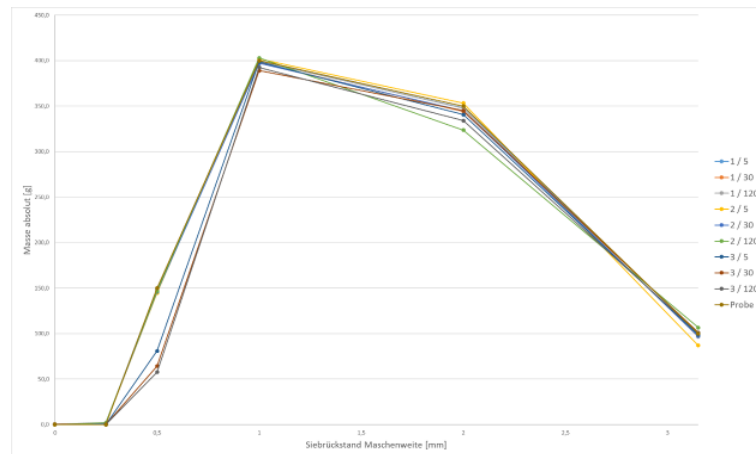


Abbildung 24: Absolute Korngrößenverteilung nach unterschiedlichen Belastungen (Mally in Bearbeitung)

Für einen vergleichenden Versuch mit konventionellem Hüttensand beschränkte man sich aufgrund obiger Erkenntnisse auf eine Leerrohrgeschwindigkeit von 2 Metern pro Sekunde und eine Belastungsdauer von 120 Minuten. Die Korngrößenverteilung nach der Belastung (Abbildung 25) ist ähnlich derer von Trockenschlackengranulat.

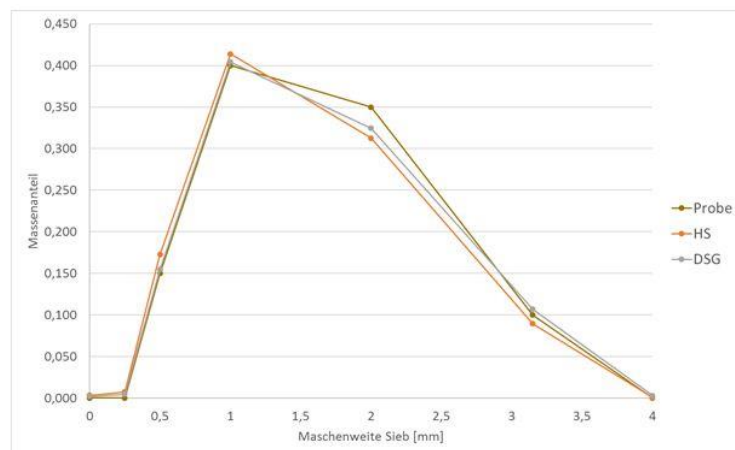


Abbildung 25: Korngrößenverteilungen Probe bzw. Hüttensand und Trockenschlackengranulat nach 120 Minuten Belastung (Mally in Bearbeitung)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei einer gleichmäßigen Belastung von 2 bis 3 Metern pro Sekunde kein Zerfall bzw. keine Teilung von Partikeln zu erwarten ist. Staub durch Oberflächenabrieb kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, sollte aber aufgrund des runderen Kornes von Trockenschlackengranulat geringer ausfallen als bei konventionellem Hüttensand.

4.4.2 Prozessanalyse

Nach jedem Versuch wird die Granulationsanlage gründlich untersucht. Der Fokus liegt dabei auf folgenden Punkten:

- Verschleiß am Granulator und Drehteller
- Umfang an Granulationsprodukt und verfestigte Schlacke im Granulator

Umweltrelevante Parameter, Massen- und Energiebilanzen, Abgasparameter, etc.

Alle aufgezeichneten Messwerte der einzelnen Versuche werden sorgfältig ausgewertet und analysiert. In der folgenden **Tabelle 5** sind typische Hauptparameter eines erfolgreichen Versuchs beschrieben (stationäre Prozessbedingungen)

Tabelle 5: Typische Hauptparameter eines Granulationsversuchs

Average Slag Flow	30-40	[ton/hour]
Duration of granulation	~ 60	[min]
Granulated slag	30-40	[ton]
Temperature of fluidized bed / granulate discharging temperature	~ 300	[°C]
Off gas temperature	~ 350	[°C]
Total process air flow	~ 170,000	[Nm ³ /h]

Basierend auf den aufgezeichneten Daten werden Massen- und Energiebilanzen erstellt. Diese Informationen sind essentiell für die Ermittlung des Schlackenflusses und der Anpassung der Schlackenflussberechnungssysteme. Eine typische Energiebilanz über einen Versuch zeigen folgend die **Abbildung 26** und **Abbildung 27**.

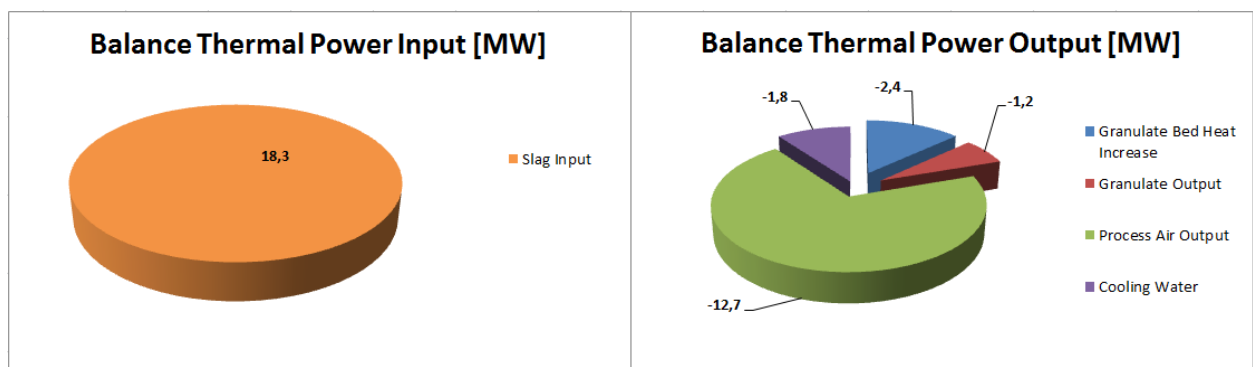


Abbildung 26: Thermische Leistungsbilanz eines typischen Granulationsversuchs

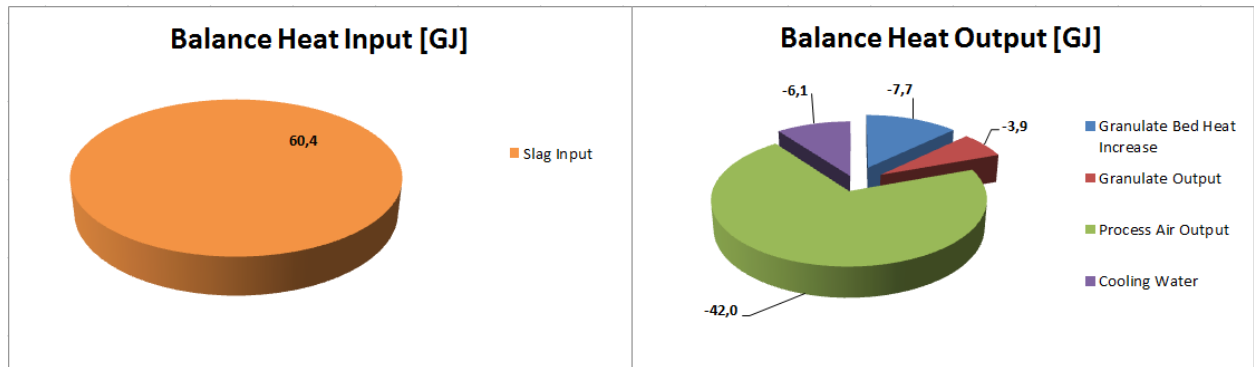


Abbildung 27: Energiebilanz eines typischen Granulationsversuchs

In einem typischen Granulationsbetrieb werden annähernd stationäre thermische Bedingungen erst nach ungefähr 20 bis 30 Minuten Granulationsdauer erreicht. Eine typische Analyse der Hauptprozessdaten über den zeitlichen Fortschritt des Granulationsprozesses ist in folgender Abbildung dargestellt:

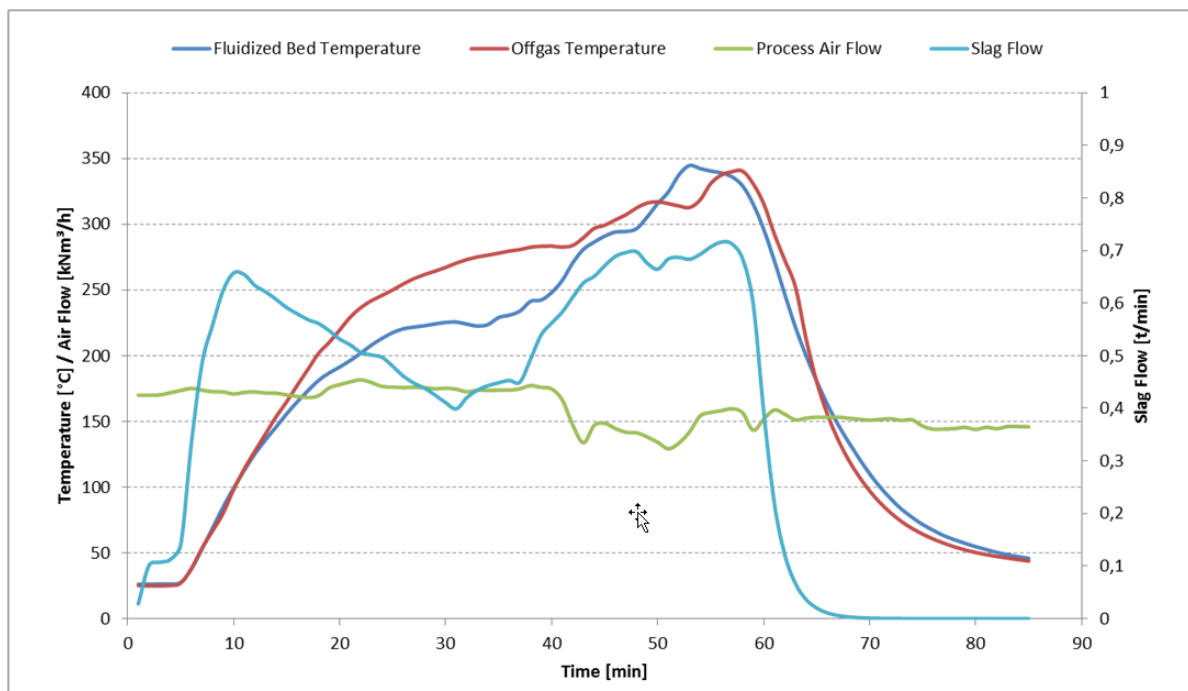


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der Hauptprozessdaten

In regelmäßigen Abständen (je nach Versuchsergebnisse und Massenanteil Trocken- bzw. Nassgranulat) werden Materialproben des Granulats am Austrag der Anlage genommen.

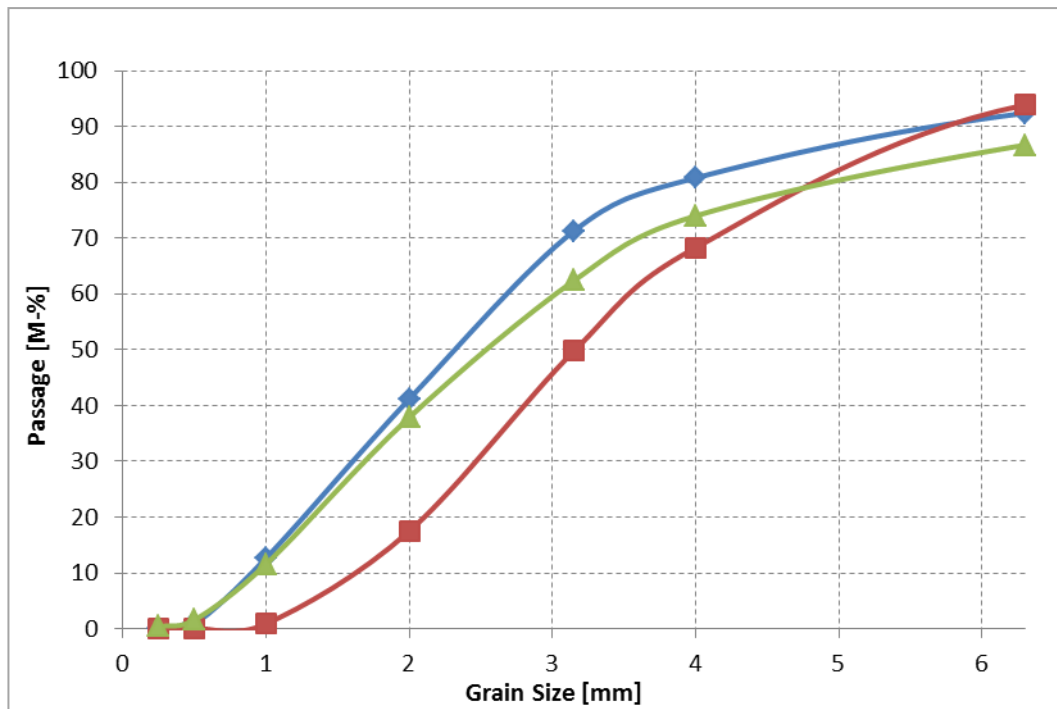


Abbildung 29: Typische Korngrößenverteilungen des Granulatprodukts

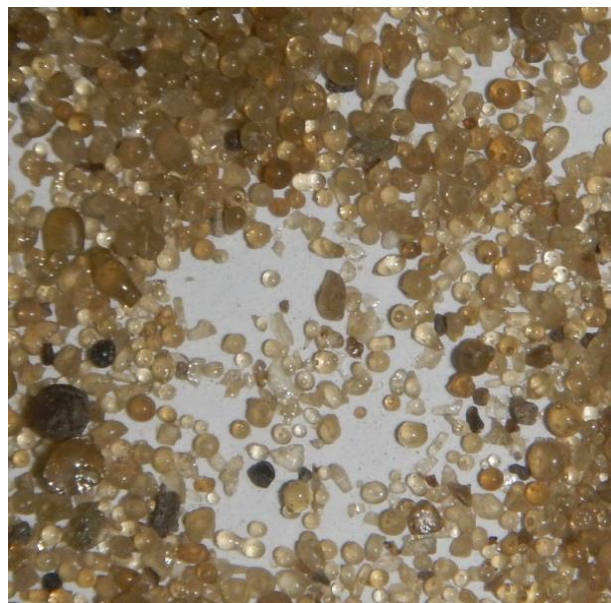


Abbildung 30: „Zoomfoto“ des Granulatprodukts mit überwiegender Anteil an Trockengranulat

4.4.3 Visuelle Auswertemethoden:

Durch diverse installierte Kamerasysteme, die den Granulationsprozess überwachen, können Rückschlüsse auf die Granulationsqualität getroffen werden.

4.4.3.1 Partikelkamera

Ein Kamerasystem erstellt Bildaufnahmen mit sehr kurzer Belichtungszeit vom „Granulationsschirm“. Mithilfe von Bildanalyseanwendungen können produzierte Partikelgrößen über den gesamten Granulationsbetrieb ermittelt werden und falls notwendig mit Änderungen von Prozessparametern darauf reagiert werden.

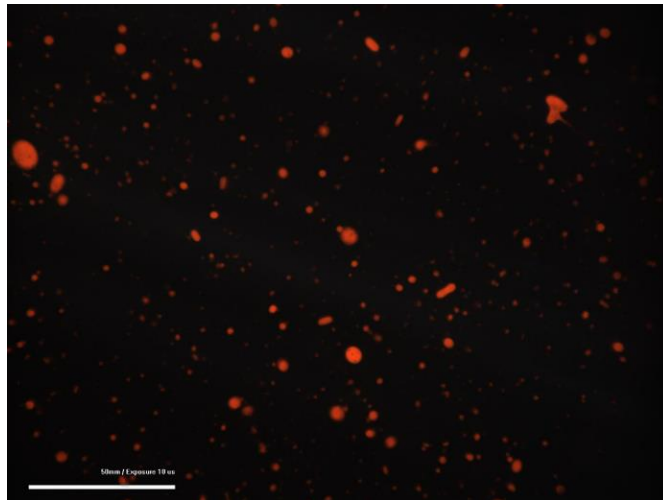


Abbildung 31: Bildaufnahme Partikelanalyse

4.4.3.2 High Speed Kamera

Eine installierte Highspeed Kamera, deren Blick auf den Rand des Drehtellers gerichtet ist, generiert Bildaufnahmen vom Granulationsprozess. Mit einer Bildfrequenzrate von 500 – 4000 Bilder pro Sekunde können die einzelnen Schritte des Granulierprozesses ausgewertet werden. Der Schlackenfilm am Drehteller zerreißt in einzelne Fäden; dieser wiederum zerfällt in einzelne Partikel, die sich aufgrund dessen Oberflächenspannung zu runde Partikel zusammenziehen.

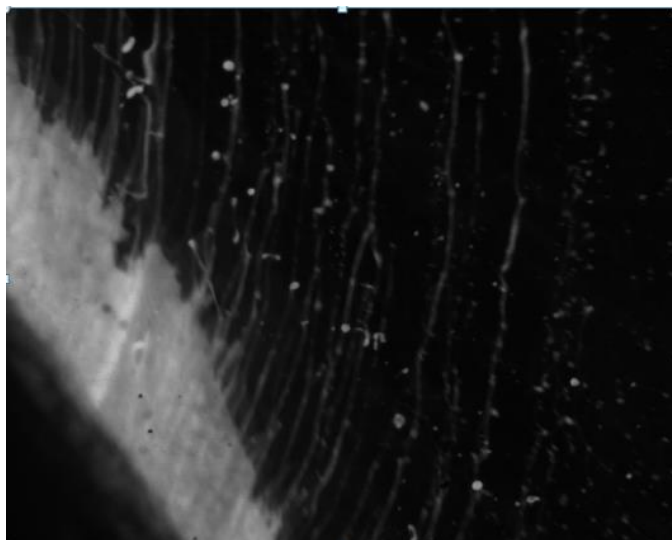


Abbildung 32: Granulationsprozess aufgenommen mit der High Speed Kamera

4.4.4 Untersuchungen an DSG-Pellets aus Versuch 16 (FEhS)

Nachfolgend werden die Ergebnisse zu der Probe aus Versuch 16 beschrieben.

4.4.4.1 Probenübersicht

Tabelle 6 gibt eine Probenübersicht. Die Untersuchungen wurden im Wesentlichen an einer Durchschnittsprobe durchgeführt (Abbildung 33, Abbildung 34). Aus dem Vorgänger-BMWi-Projekt hatten sich Hinweise ergeben, dass DSG-Pellets eine geringere Reaktivität aufweisen könnten als konventionell erzeugter Hüttensand. Analog zur Probe P1 ("Mischprobe 1") wurde daher auch die Probe aus Versuch 16 ("Mischprobe 2") zunächst bei 4 mm abgeseibt. Aus der Teilprobe < 4 mm (78 M.-%, wie bei Probe P1) wurden überwiegend kugelige Partikel über ihre Rollwirkung physikalisch separiert, klassiert und zusätzlich untersucht (Abbildung 35, Abbildung 36). Die Wahl der Siebweite 4 mm erfolgte, da bei dieser Größe sowohl Hüttensand- als auch DSG-Partikel erfasst und von gröberem Agglomeraten etc. abgetrennt werden können.

Der DSG-Pellets-Anteil an der Teilprobe < 4 mm betrug 35 M.-%, d.h. auf die Gesamtprobe bezogen nur 27 M.-%. Daraus folgt, dass alle Untersuchungsergebnisse an der Gesamtprobe primär durch die Eigenschaften des Hüttensands sowie der gröberem Probenbestandteile (Agglomerate etc.) geprägt werden! Auf die Fraktion < 1,0 mm entfielen 21 M.-% und auf die Fraktion 1,0-3,15 mm 79 M.-%. Beim eher scharfkantigen Material < 4 mm, das primär aus dem verwendeten Hüttensand bestand und dessen Anteil 65 M.-% betrug (bezogen auf die Gesamtprobe 51 M.-%) entfielen auf die Fraktion < 1,0 mm 10 M.-%, auf die Fraktion 1,0-3,15 mm 67 M.-% und auf die Fraktion 3,15-4 mm 23 M.-%.

Aus Abbildung 35 und Abbildung 36 gehen die rundlich-kugelige Form und der Glascharakter der DSG-Pellets sehr gut hervor. REM-Aufnahmen bestätigen die Kornform und die porenarme Struktur der DSG-Pellets (Abbildung 37, Abbildung 38).

Als Vergleich dienen die Hüttensand-Monitoring-Probe I/2017 vom Hochofen A (Labor-Nr. 1095/17) und eine weitere, später entnommene Hüttensandprobe vom Hochofen A (Labor-Nr. 1350/17). Deren Eigenschaften variieren im Rahmen der üblichen Streubreiten.

4.4.4.2 Glasgehalt

Der Glasgehalt wird im FEhS-Institut lichtmikroskopisch ermittelt. Nach vorsichtigem Mörsern der Gesamtprobe und Aussieben der Fraktion 40-60 µm (Abbildung 39) wird ein Streupräparat hergestellt. Anschließend werden 1000 Partikel im Durchlichtmikroskop unter Verwendung eines Lambda-Plättchens zwischen Polarisator und Analysator ausgewertet.

Die Glasgehalte der 3 Proben sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Unterschiede sind gering. Die Mischprobe, die neben den DSG-Pellets und Hüttensand auch gröbere Agglomerate enthält, weist einen geringfügig niedrigeren Glasgehalt auf, der jedoch für die zementtechnische Leistungsfähigkeit völlig ausreichend ist.

Eine Röntgenbeugungsanalyse bestätigt den hohen Glasgehalt der Mischprobe. Lediglich geringe Anteile an Åkermanit und Merwinit wurden bestimmt (Abbildung 40).

4.4.4.3 Chemische Zusammensetzung

In Tabelle 9 ist die chemische Zusammensetzung der Mischprobe aus Versuch 16 zusammengefasst. Sie weicht nur durch eine etwas erhöhte Basizität und einen etwas niedrigeren Al_2O_3 -Gehalt von der üblichen Zusammensetzung der Hochofenschlacke am HO A in Linz ab. Zur Bewertung der zementtechnischen Leistungsfähigkeit der DSG-Pellets wurden diese aufwändig aus der Mischprobe händisch separiert (vgl. Abschnitt 4.4.4.5). Tabelle 9 beinhaltet auch die chemischen Analysen für diese DSG-Pellet-Fractionen < 1 mm und 1,0 - 3,15 mm. Sie unterscheiden sich nicht signifikant von der Analyse der Durchschnittsprobe.

4.4.4.4 Physikalische Eigenschaften

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der physikalischen Analysen der Mischprobe aus Versuch 16 zusammengefasst. Auffällig ist die hohe Schüttdichte des Materials. Die Reindichten der kugeligen Bestandteile der Probe sind nur geringfügig niedriger als die der Mischprobe ($2,92 \text{ g/cm}^3$ für die DSG-Pellets < 1,0 mm und $2,91 \text{ g/cm}^3$ für die DSG-Pellets 1,0-3,15 mm statt $2,93 \text{ g/cm}^3$). Die Sieblinie der Mischprobe ist deutlich gröber als die des Hüttensands, was durch die in Abbildung 33 erkennbaren groben Bestandteile erklärt werden kann.

Der Mahlenergiebedarf der Mischprobe, standardmäßig ermittelt im Zeiseltest an der Fraktion 0,5-1,0 mm, ist etwas geringer als der des Hüttensands HS 1, aber sehr ähnlich dem Energiebedarf des Hüttensands HS 2 (Abbildung 41). Aufgrund des hohen Glasgehalts und der geringen Porosität liegt der Mahlenergiebedarf zur Einstellung einer bestimmten Feinheit bei allen 3 Proben im oberen Erfahrungsbereich für Hüttensande (gestrichelte Grenzlinien).

4.4.4.5 Zementtechnische Eigenschaften

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der zementtechnischen Untersuchungen zusammengefasst. Zum Vergleich dienen die Werte sowohl der beiden Hüttensande des Hochofens A als auch diejenigen des Portlandzements CEM I 42,5 R, der für die 50/50-Mischungen verwendet wurde.

Die Untersuchungen folgen dem Konzept der Hüttensand-Datei des FEHS-Instituts. Der auf eine Standardfeinheit gemahlene Hüttensand wird sowohl mit 25 M.-% gemahlenem Portlandzementklinker (spezifische Oberfläche rd. $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$) und Sulfatträgern (Gesamtsulfatgehalt 4,5 M.-%) als auch mit 50 M.-% Portlandzement CEM I 42,5 R (spezifische Oberfläche rd. $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$) ohne weitere Sulfatzugabe kombiniert. Die Untersuchungsmethoden folgen DIN EN 196.

Um dem möglicherweise spezifischen Verhalten der DSG-Pellets innerhalb der Probe aus Versuch 16 nachgehen zu können, wurden auch mit der gemahlene Fraktion 1,0-3,15 mm 75/25-Mischungen mit Klinker und Sulfatträgern hergestellt und es wurden sowohl die Festigkeits- als auch die Hydratationswärmeentwicklung gemessen (Tabelle 10, Abbildung 43). Für zusätzliche 50/50-Kombinationen lag nicht genug Material vor.

Im Alter von 28, 91 und 180 Tagen zeigen bei einem Hüttensandanteil von 75 M.-% sowohl die Zemente mit der Mischprobe als auch die Zemente mit den separierten DSG-Pellets etwas geringere Festigkeiten. Im Alter von 1 und 2 Tagen sind keine Unterschiede erkennbar. Allerdings nimmt zu diesem Zeitpunkt der grundsätzlich eher reaktionsträgere Linzer Hüttensand bei üblicher

Feinheit ohnehin kaum an der Hydratphasenbildung teil. Eine mögliche (Teil-)Ursache für die Unterschiede in höherem Hydratationsalter kann in der etwas geringeren Feinheit der DSG-Pellets und dem etwas höheren Al_2O_3 -Gehalt des Hüttensands HS 2 liegen. Allerdings lagen dafür die Basizitäten sowohl der Mischprobe als auch der beiden separierten DSG-Pellet-Fraktionen etwas höher als beim Hüttensand HS 2. Die chemische Zusammensetzung scheidet demnach als Ursache für die niedrigere Reaktivität der DSG-Pellets aus. Bei der 50/50-Kombination zeigt der Zement mit der Mischprobe keine signifikant niedrigere Festigkeit als die Zemente mit den beiden Hüttensanden HS 1 und HS 2.

Die Hydratationswärmen unterscheiden sich nicht signifikant. Allerdings ist die Wärmeentwicklung bei einem Hüttensandanteil von 75 M.-% ohnehin nur gering, verglichen mit den 50/50-Kombinationen oder dem Portlandzement.

4.4.4.6 Ergänzende Aussagen zur Probe LZ 6757-02

Die Probe LZ 6757-02 wurde wie die vorstehend diskutierte Probe aus Versuch 16 gehandhabt, insbesondere wurden die DSG-Pellets händisch separiert. Um dem spezifischen Verhalten der DSG-Pellets innerhalb der Probe LZ 6757-02 nachgehen zu können, wurden auch mit den gemahlten Fraktionen < 1 mm und > 2 mm Mischungen mit Klinker und Sulfatträgern hergestellt und es wurden sowohl die Festigkeits- als auch die Hydratationswärmeentwicklung gemessen.

Im Alter von 1 und 2 Tagen dominiert der Einfluss des Klinkers und zu diesem Zeitpunkt nimmt der grundsätzlich eher reaktionsträgere Linzer Hüttensand bei üblicher Feinheit ohnehin kaum an der Hydratphasenbildung teil. Die Festigkeiten unterscheiden sich daher nur wenig.

Nach 7 Tagen hingegen ist erkennbar, dass die DSG-Pellets zu geringeren Festigkeiten der Hochofenzemente führen als die konventionell erzeugten Hüttensande. Insbesondere zum Hüttensand HS 2, der chemisch am ehesten den DSG-Pellets entspricht, besteht ein signifikanter Unterschied. Dieser kann nicht allein auf die etwas geringere Feinheit der gemahlten DSG-Proben zurückgeführt werden. Die Festigkeitsdifferenzen sind auch nach 28 Tagen signifikant (Abbildung 44).

Zwischen den Hochofenzementen mit DSG-Pellets der Fraktionen < 1 mm und > 2 mm besteht kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung.

Tabelle 6: Probenübersicht

Bezeichnung	Proben-Nr.	vom
Mischprobe Versuch 16	P2018-01348/00	
Kugelige Anteile 1,0 - 3,15 mm	P2018-01348/02	13.02.18
Kugelige Anteile < 1,0 mm	P2018-01348/03	
HS HO A (Labor-Nr. 1095/17)	P2017-02881	23.06.17
HS HO A (Labor-Nr. 1350/17)	P2017-03977	17.07.17

Tabelle 7: Glasgehalte [Vol.-%]

Bezeichnung	Glas
Mischprobe	98,9
Kugelige Anteile 1,0 - 3,15 mm	99,5
Kugelige Anteile < 1,0 mm	99,7
HS 1 HO A (Labor-Nr. 1095/17)	99,9
HS 2 HO A (Labor-Nr. 1350/17)	99,3

Tabelle 8: Physikalische Eigenschaften

	Mischprobe Versuch 16	HS 1 HO A (Labor-Nr. 1095/17)	HS 2 HO A (Labor-Nr. 1350/17)	
FEhS-Nr.	P2018-01348/00	P2017-02881	P2017-03977	
Reindichte	2,93	2,89	2,90	g/cm ³
Rohdichte	2,85	2,85	2,86	g/cm ³
Schüttdichte	1,70	1,30	1,30	g/cm ³
Gesamtporosität	2,8	1,5	1,2	Vol.-%
Restfeuchte	0,0	2,4	1,0	M.-%
Vickershärte HV_{0,1}	606	610	606	-
< 6,3 mm	81,4	-	-	M.-%
< 4,0 mm	68,5	-	-	M.-%
< 3,15 mm	59,2	93,8	93,8	M.-%
< 2 mm	34,2	-	-	M.-%
< 1,0 mm	7,0	40,5	41,5	M.-%
< 0,5 mm	0,2	12,9	11,1	M.-%
< 0,2 mm	0,02	2,7	1,4	M.-%
< 0,09 mm	0,02	0,7	0,3	M.-%
< 0,063 mm	0,00	0,4	0,1	M.-%

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung

	Mischprobe Versuch 16	DSG-Pellets 1,0-3,15 mm	DSG-Pellets < 1 mm	HS 1 HO A (Labor-Nr. 1095/17)	HS 2 HO A (Labor-Nr. 1350/17)	
FEhS-Nr.	P2018-01348/00	P2018-01348/02	P2018-01348/03	P2017-02881	P2017-03977	
SiO₂	37,8	37,7	37,6	39,2	38,0	M.-%
Al₂O₃	10,5	10,7	10,7	11,2	12,4	M.-%
FeO	0,13	0,31	0,31	0,28	0,32	M.-%
TiO₂	0,50	0,50	0,50	0,57	0,61	M.-%
MnO	1,04	1,13	1,13	1,29	1,48	M.-%
CaO	35,5	36,0	36,1	33,9	33,7	M.-%
MgO	10,0	10,3	10,4	10,4	11,3	M.-%
Na₂O	0,39	0,39	0,40	0,45	0,44	M.-%
K₂O	1,21	1,25	1,27	1,51	1,98	M.-%
Na₂O-Äquivalent	1,19	1,25	1,27	1,44	1,74	M.-%
S_{ges.}	0,80	-	-	0,71	0,63	M.-%
SO₃	0,17	-	-	0,11	< 0,07	M.-%
Sulfid S²⁻	0,77	-	-	0,66	0,61	M.-%
P₂O₅	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,10	M.-%
Chlorid Cl⁻	0,0080	-	-	0,0017	0,0050	M.-%
Gebundenes CO₂	0,09	0,16	0,16	0,07	0,05	M.-%
Gebundenes H₂O	0,08	0,04	0,05	0,09	0,16	M.-%
Chrom-VI	-	-	-	-	< 1,0	mg/kg
CaO/SiO₂	0,94	0,95	0,96	0,87	0,89	-
(CaO+MgO)/SiO₂	1,21	1,28	1,24	1,13	1,18	-
F-Wert	1,33	-	-	1,25	1,32	-

Tabelle 10: Zementtechnische Eigenschaften

	Mischprobe Versuch 16		DSG-Pellets 1,0 - 3,15 mm		HS 1 HO A (Labor-Nr. 1095/17)		HS 2 HO A (Labor-Nr. 1350/17)		CEM I 42,5 R	
FEhS-Nr.	P2018-01348/00		P2018-01348/02		P2017-02881		P2017-03977		P2016-02593	
HS / KL (CEM I)	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	0/100	-
S_m (HS)	4290		4150		4200		4200		3270	cm ² /g
d'_{RRSB} (HS)	16		19		15		15		23	µm
n_{RRSB} (HS)	0,901		1,009		0,941		1,003		1,054	-
Wasseranspruch	26,5	26,5	-	-	27,0	26,5	26,0	26,0	29,0	M.-%
Erstarrungszeiten	4:35- 6:05	3:45- 4:40	-	-	3:30- 5:20	3:35- 5:00	3:50- 6:10	4:10- 5:20	3:30- 4:55	h:min
Ausbreitmaß	210	212	201	-	223	229	224	227	205	mm
Hydratationswärme 7d	201	252	212	-	214	245	218	244	350	J/g
R_{c, 1d}	2,2	5,6	2,2	-	2,2	6,0	2,7	6,2	19,0	MPa
R_{c, 2d}	4,9	14,1	4,8	-	5,1	14,7	6,0	14,5	34,4	MPa
R_{c, 7d}	24,7	35,4	25,3	-	23,4	34,3	28,8	34,8	57,6	MPa
R_{c, 28d}	42,2	57,4	41,6	-	44,6	55,2	46,1	57,2	70,1	MPa
R_{c, 91d}	53,4	66,7	48,2	-	57,2	69,5	56,7	67,4	80,2	MPa
R_{c, 180d}	58,8	71,6	55,6	-	57,9	75,2	60,7	75,7	81,0	MPa
Aktiv.-Index 7d *	-	61	-	-	-	59	-	60	100	%
Aktiv.-Index 28d *	-	82	-	-	-	79	-	82	100	%

* Gem. EN 15167-1 mind. 45 % nach 7d und 70 % nach 28d



Abbildung 33: Mischprobe Versuch 16



Abbildung 34: Mischprobe aus Versuch 16 im Auflichtmikroskop



Abbildung 35: Kugelige Anteile 1,0 - 3,15 mm aus Versuch 16



Abbildung 36: Kugelige Anteile < 1,0 mm aus Versuch 16

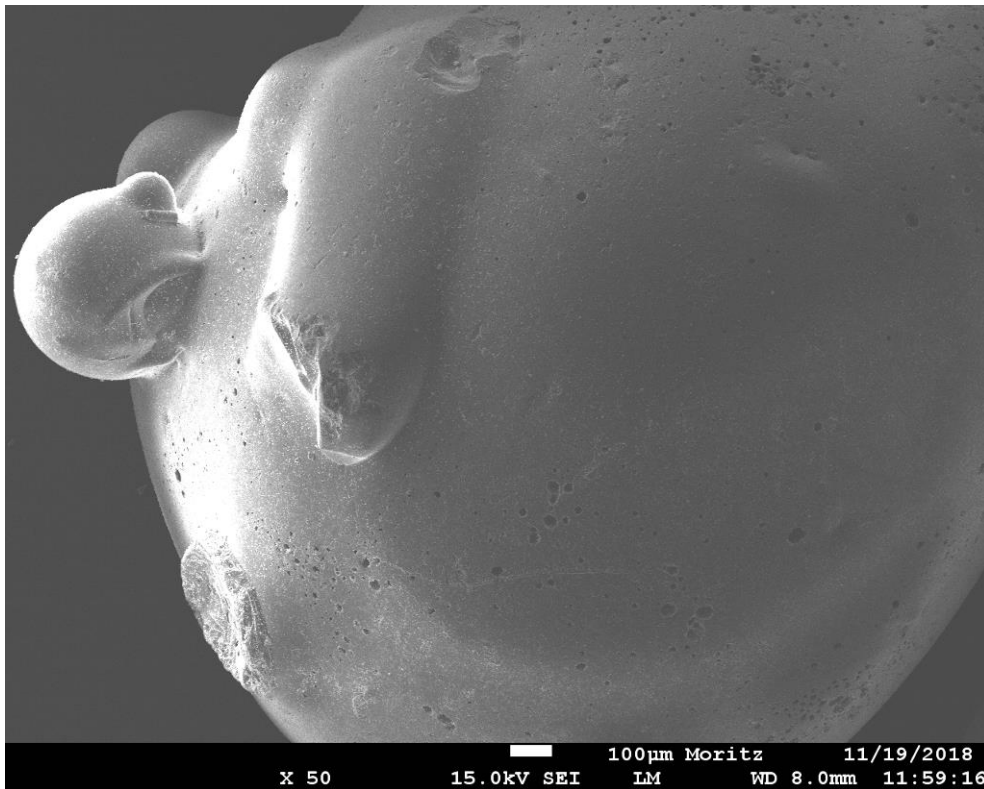


Abbildung 37: Kugelige Anteile 1,0 - 3,15 mm aus Versuch 16

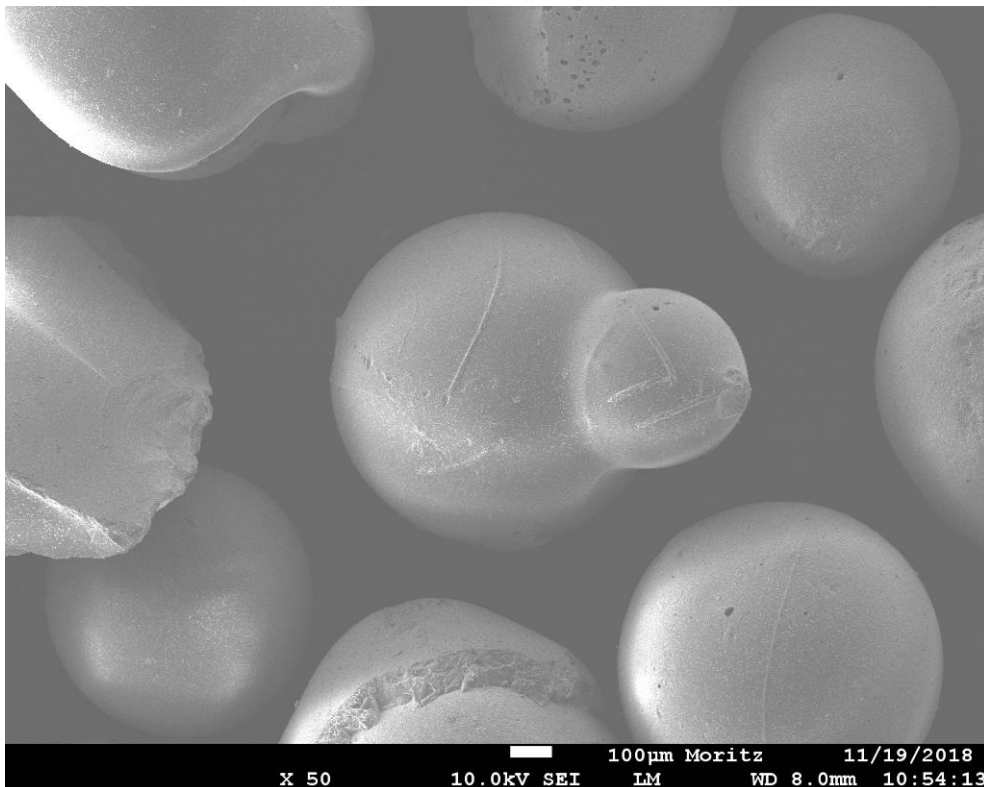


Abbildung 38: Kugelige Anteile < 1,0 mm aus Versuch 16

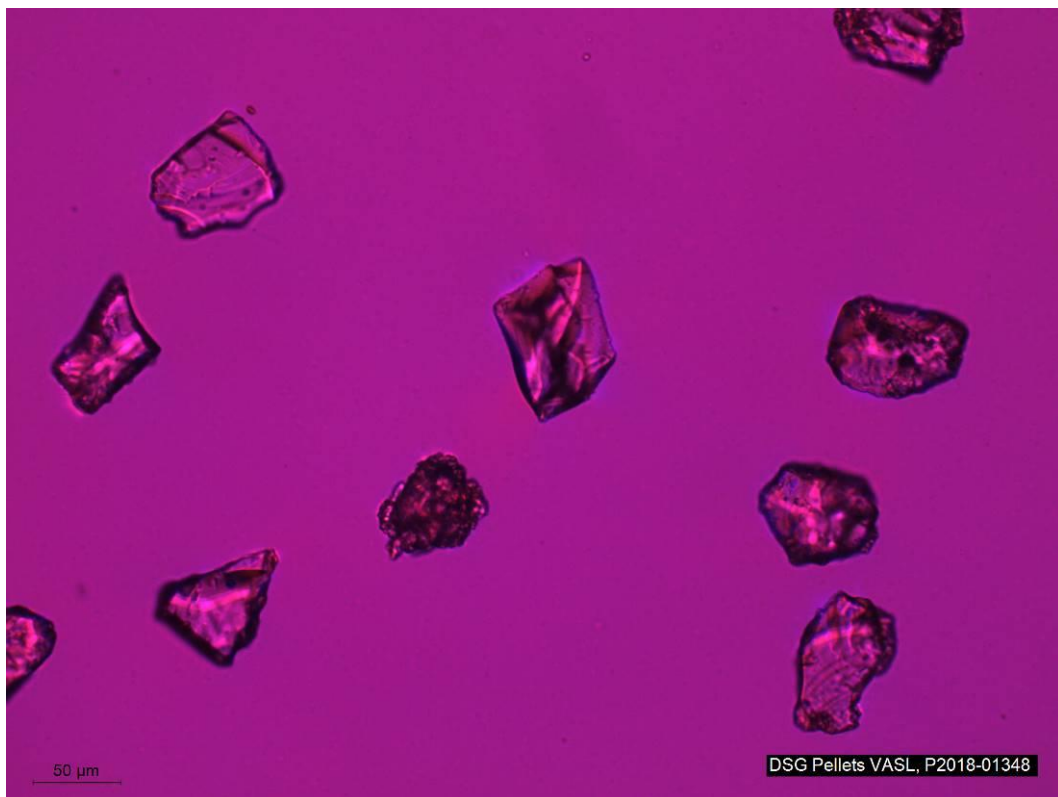
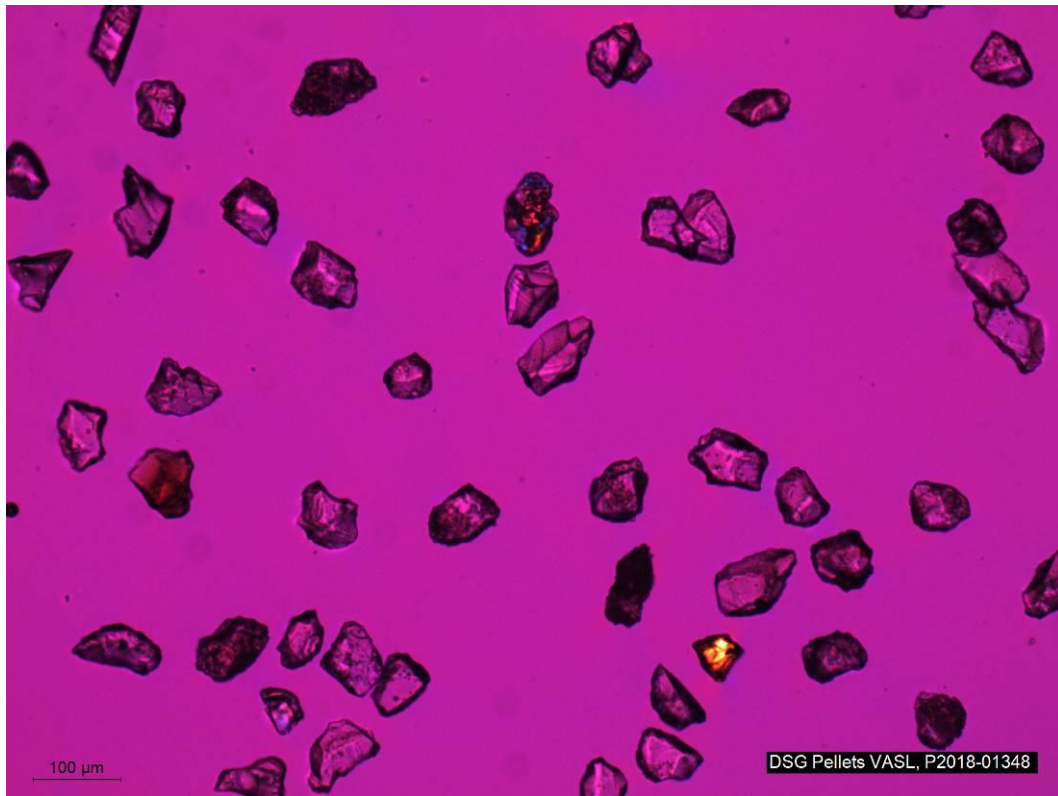


Abbildung 39: Gemörserte Mischprobe aus Versuch 16 im Durchlichtmikroskop
(Fraktion 40-60 µm)

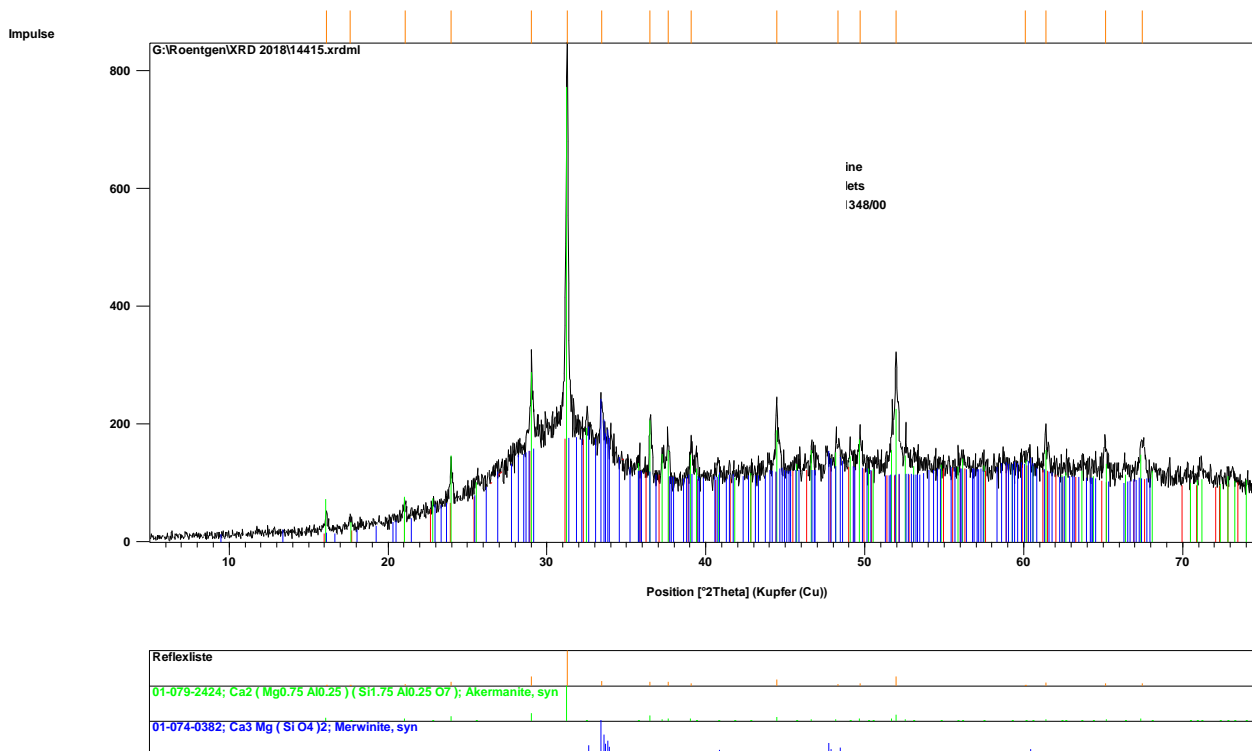


Abbildung 40: Röntgenbeugungsanalyse der Mischprobe aus Versuch 16

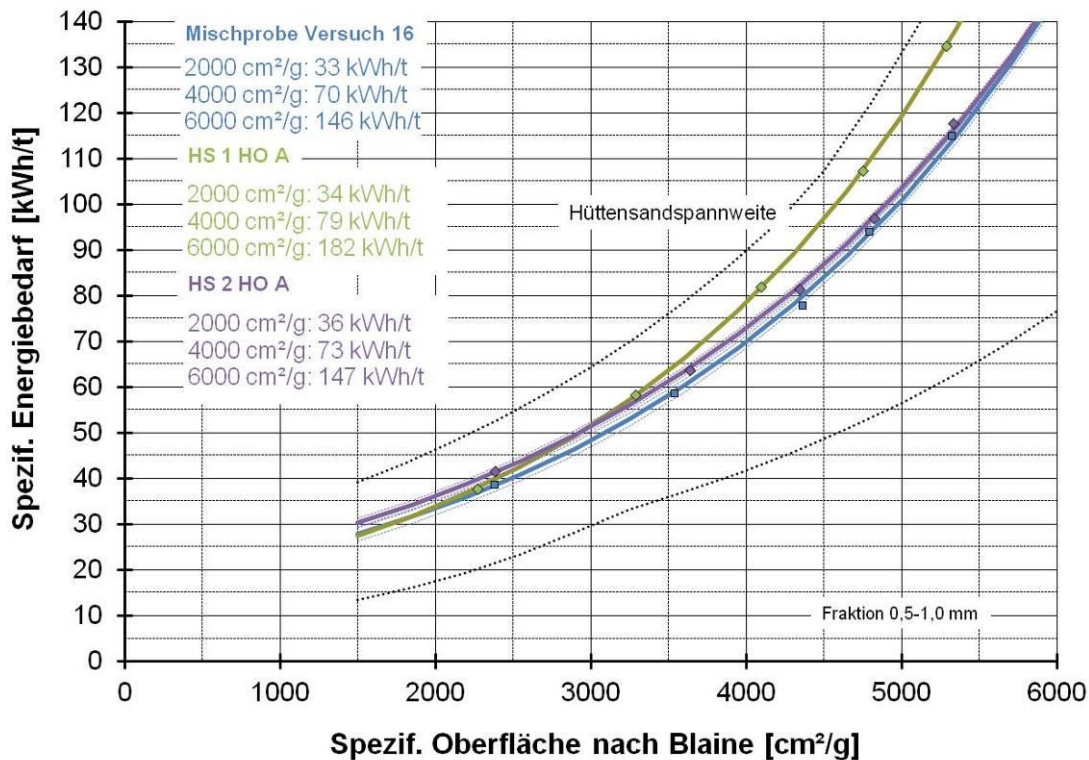


Abbildung 41: Mahlbarkeit nach Zeisel (Fraktion 0,5-1,0 mm)

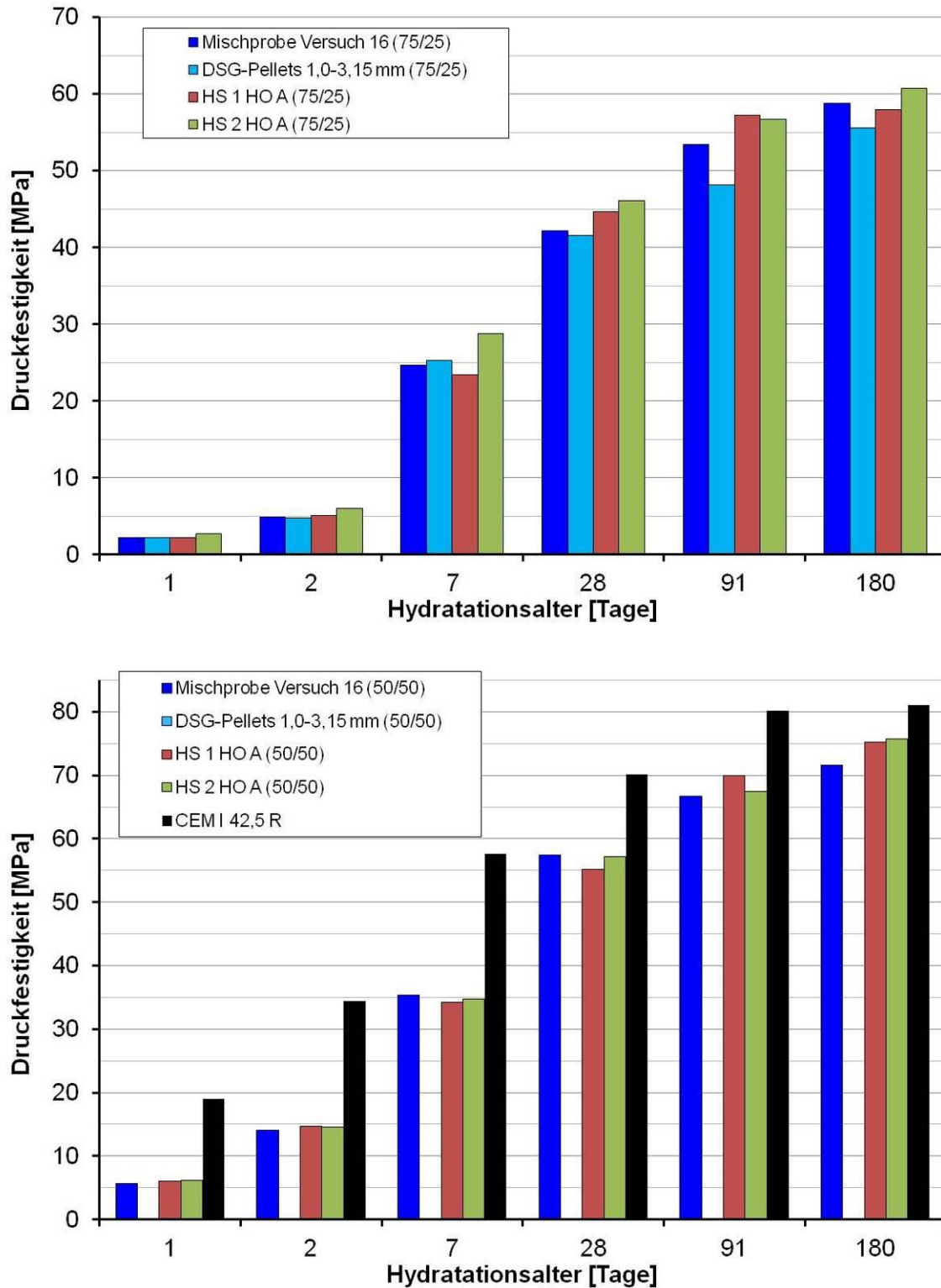


Abbildung 42: Mörteldruckfestigkeiten gem. EN 196-1 (Probe Versuch 16)

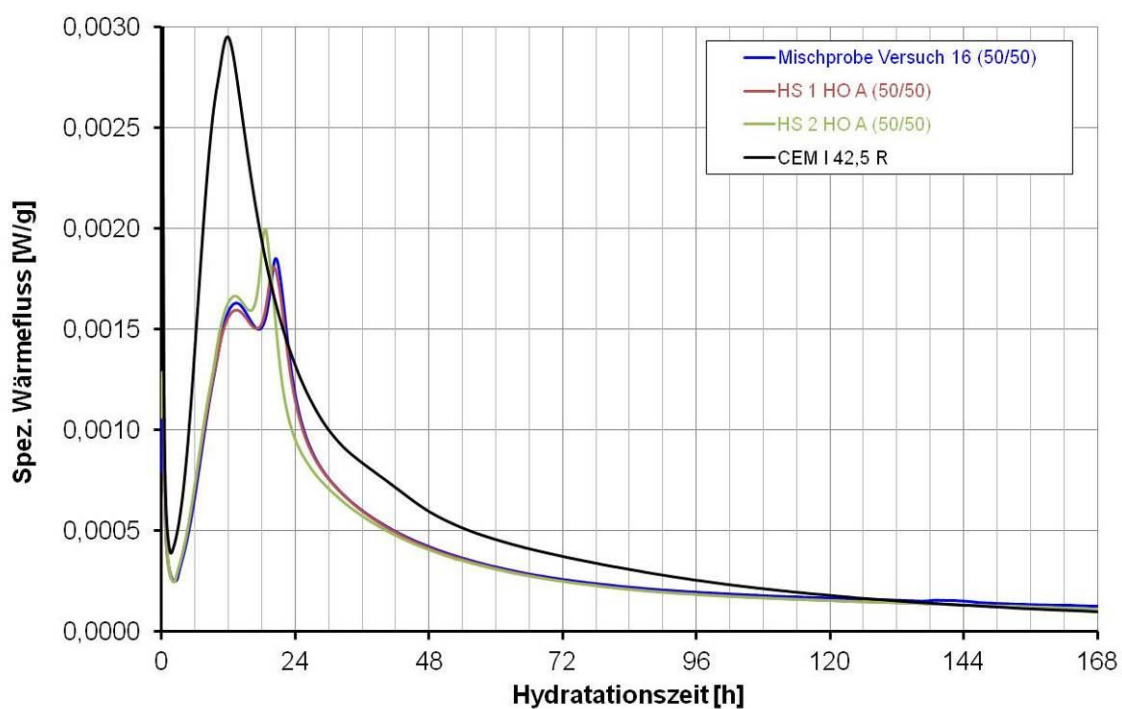
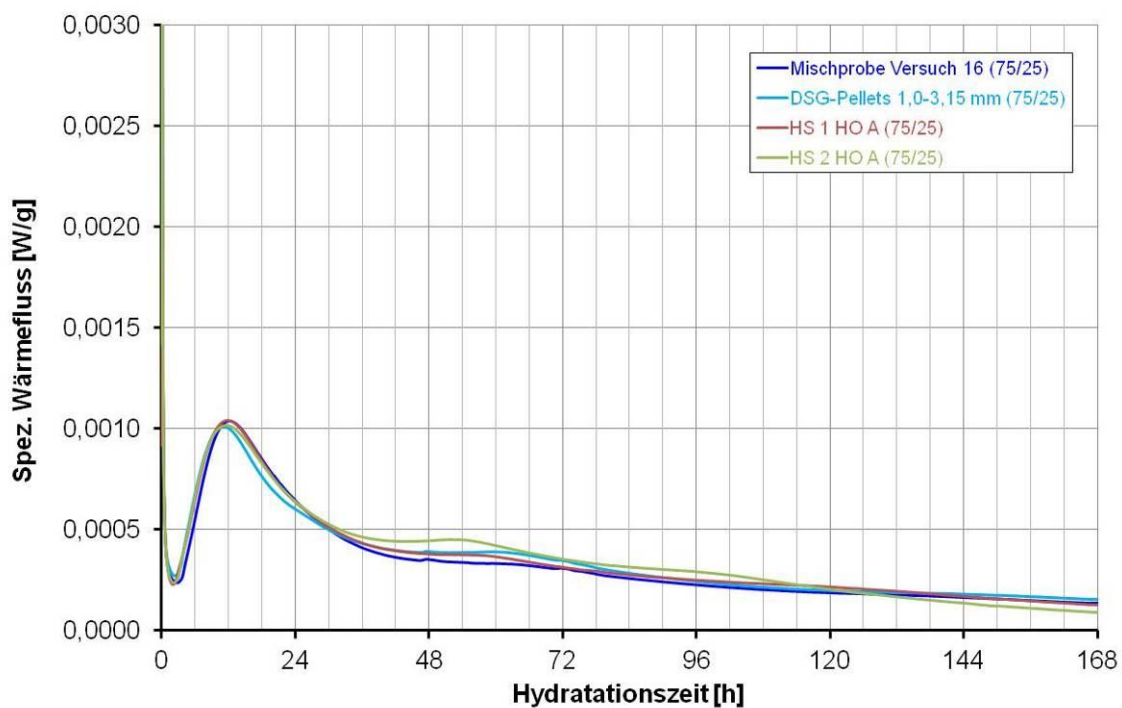


Abbildung 43: Hydratationswärmeentwicklung (Probe Versuch 16)

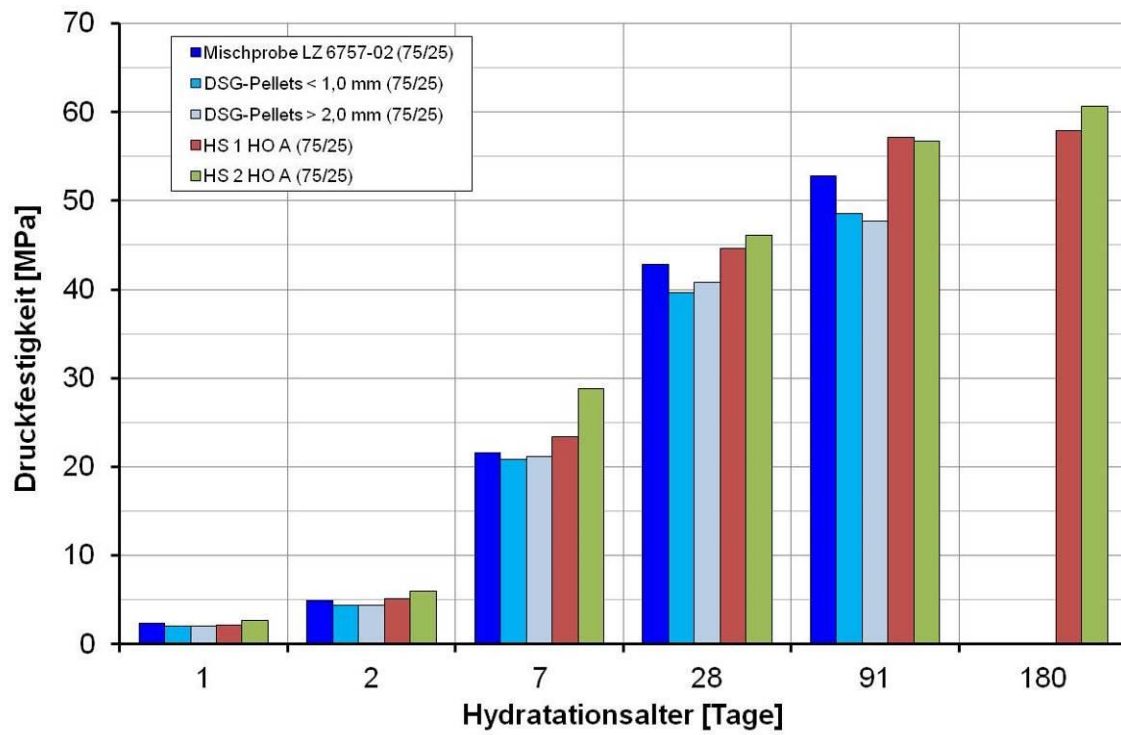


Abbildung 44: Mörteldruckfestigkeiten gem. EN 196-1 (Probe LZ 6757-02)

4.5 Ergebnisse AP4 – Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die industrielle Umsetzung

Die Versuchsergebnisse mit der Pilotanlage lieferten wesentliche Erkenntnisse für die Konzeptionierung einer industriellen Gesamtanlage. Die Prozessparameter der vorab erstellten Anlagenenergiebilanzierung wurden bei thermisch stationären Pilotanlagenbetrieb bestätigt. Die Abgaszieltemperaturen von >500°C konnten zwar mit dem Pilotanlagenbetrieb noch nicht erreicht werden, dies sollte aber aus derzeitiger Sicht zukünftig möglich sein. (wenn durch die derzeitigen Umbauten ein stabiler Anlagenbetrieb möglich wird)

Mit der derzeitigen Annahme, dass eine industrielle Anlagenkapazität von 2t/min umsetzbar wird, wurde ein Gesamtanlagenkonzept mit einer Energierückgewinnung über Dampferzeugung entwickelt:

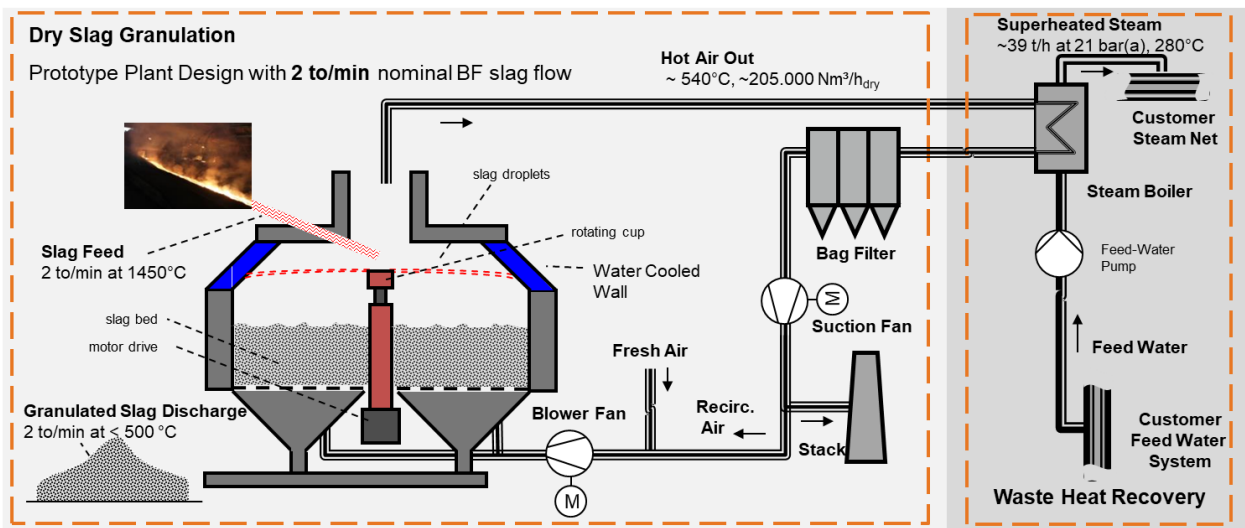


Abbildung 45: Industrielles Anlagenkonzept Trockenschlackengranulation mit Wärmerückgewinnung

Ein spezielles Augenmerk bei dem Konzept wurde auf die Gesamtenergieeffizienz gelegt. Je nach aktueller Anlagenkapazität soll die Dampfkesselabluft (bis zu ~200°C warm) zum Granulator rezirkuliert werden. Bei max. Schlackenfluss soll die Luft nicht rezirkuliert werden. Dieses Konzept ermöglicht ein Gesamtsystem, das bei niedriger Auslastung eine sehr hohe Energieeffizienz besitzt, aber auch die Größe der Anlagenkomponenten in Grenzen hält, da die Anlage bei max. Schlackenfluss mit kühler Frischluft betrieben werden kann.

Ein nicht unerheblicher Energieanteil der bis zu 500°C heiße Granulataustrag würde mit dem dargestellten System noch verloren gehen. Konzepte mit einem nachgeschalteten Feststoff – Plattenwärmetauscher sind derzeit in Arbeit. Damit könnte noch zusätzlicher Satttdampf produziert werden und das Granulatprodukt auf <200°C abgekühlt werden.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Anhand des Prozessschemas ist ersichtlich, dass eine Gesamtanlage eine Vielzahl an Anlagenbauteile umfasst. Um zu prüfen ob die Bestückung eines Hochofens mit einer Granulationsanlage mit Wärmerückgewinnung möglich ist, wurde die Einplanung einer Industrieanlage am Beispiel des Hochofen A vorangetrieben.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

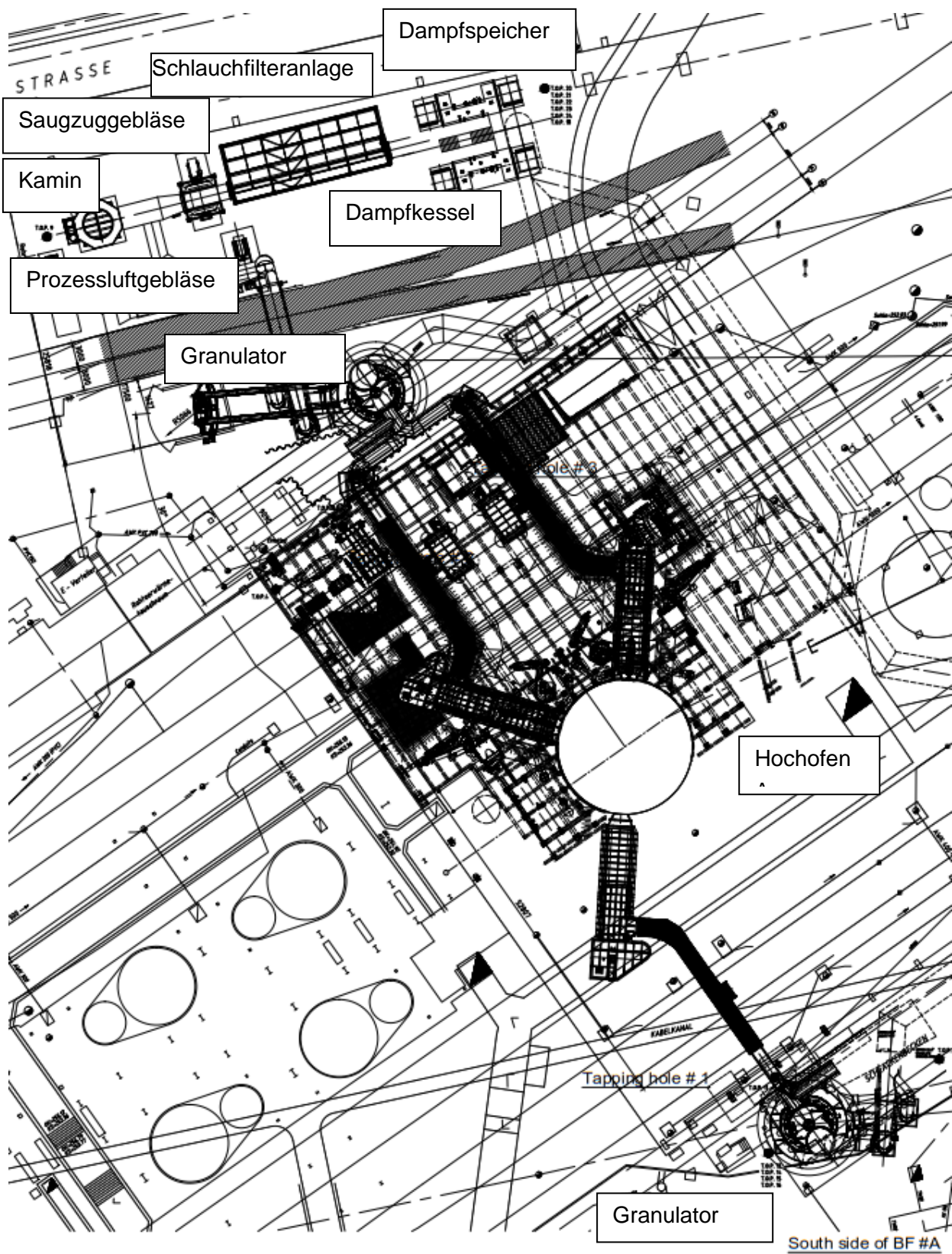


Abbildung 46: Layout Industrielles Anlagenkonzept Trockenschlackengranulation mit Wärmerückgewinnung

Der Hochofen A der Voestalpine Linz GmbH hat 3 aktive Abstichlöcher, d.h. es gibt 3 Schlackenrinnen dessen Schlacke zu einer Granulationsanlage geleitet werden muss. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten können nur 2 dieser Schlackenrinnen zusammengeführt werden; d.h. es müssen zumindest 2 Granulatoren eingesetzt werden. Beide Granulatoren werden zentral mit Prozessluft versorgt und auch die Abluft beider Granulatoren wird zusammengeführt und der Wärmerückgewinnung und Abgasreinigung zugeführt.

Der Schlackenfluss eines Abstiches ist nicht konstant. Des Weiteren ist im normalen Betrieb eine Pause zwischen zwei Abstichen und somit kein Schlackenfluss. Dies hat dementsprechend auch Auswirkungen auf den Prozessabluftvolumenstrom und dessen Temperatur nach dem Granulator. Das Wärmerückgewinnungssystem würde somit stark zeitlich schwankende Dampfmengen produzieren.

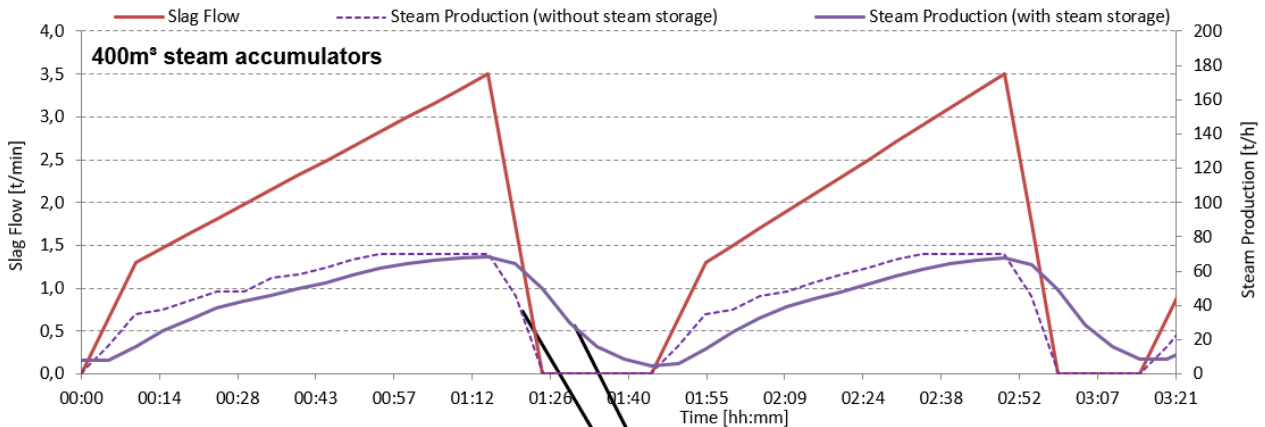
Am Beispiel der Voestalpine Stahl GmbH wäre eine Dampfeinspeisung in eine bestehendes Dampfnetz die bevorzugte Variante einer Wärmerückgewinnung. Am Dampfnetz sind eine Vielzahl von Erzeugern und Verbrauchern angeschlossen und ist mit Regelmechanismen versehen, sodass die Versorgung bzw. Dampfparameter sichergestellt werden. Eine solch große Schwankungsbreite der Dampfeinspeisung, die eine industrielle Granulationsanlage erzeugen würde, würde eine Gefahr für das Dampfnetz darstellen.

Der max. Gradient des Anstiegs- bzw. Abfalls der Dampfeinspeisungsmenge muss daher reduziert werden. Dies kann mit Dampfspeichern erfolgen. Es wurde daher eine Simulation mit verschiedenen Dampfspeichergrößen gestartet um zu evaluieren welche Speichermenge für eine Einbindung in das Dampfnetz notwendig sein wird. Mit 400m³ Dampfspeicher konnte der Gradient der Dampfmenge von max. 9t/h auf 4t/h reduziert werden. Diese Reduktion würde ausreichend sein für eine Einbindung in das Dampfnetz.

Eine weitere Herausforderung stellt die ständige Bereitstellung von überhitztem Dampf dar. In Zeiten keiner Dampfproduktion im Kessel und der Entnahme von Dampf aus den Dampfspeichern, kann nur Sattdampf zur Verfügung gestellt werden. Um aber ständig den Dampf zu überhitzen wurde ein Konzept entwickelt, mit dem mit geringen zusätzlichen Energiebedarf eine Überhitzung sichergestellt werden kann. Ein im Prozessluftabgasrohr installierter „Gichtgasbrenner“ wird bei Bedarf gestartet und überhitzt den Sattdampf bei Bedarf im Überhitzer des Dampfkessels.

Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Slag curve selection:

- Ø slag flow = 1,7 t/min (based on operation time, 8404h/a)
- Ø slag flow = 2,1 t/min (based on slag tap time)
- Ø tap duration = 80 min
- Ø tap breaks = 17 min
- Annual slag flow = 865.000 t_{slag}
- Values fits to voestalpine BF A data base*

Gradient at tap ending:

- With steam accus: 4,1 t/h per minute
- Without steam accus: 9,0 t/h per minute

Steam production (with steam storage):

- Average = 40,7 t/h
- Maximum = 70,0 t/h
- Minimum = 2,8 t/h

Abbildung 47: Reduktion des Dampf einspeisegradients mittels Dampfspeicher

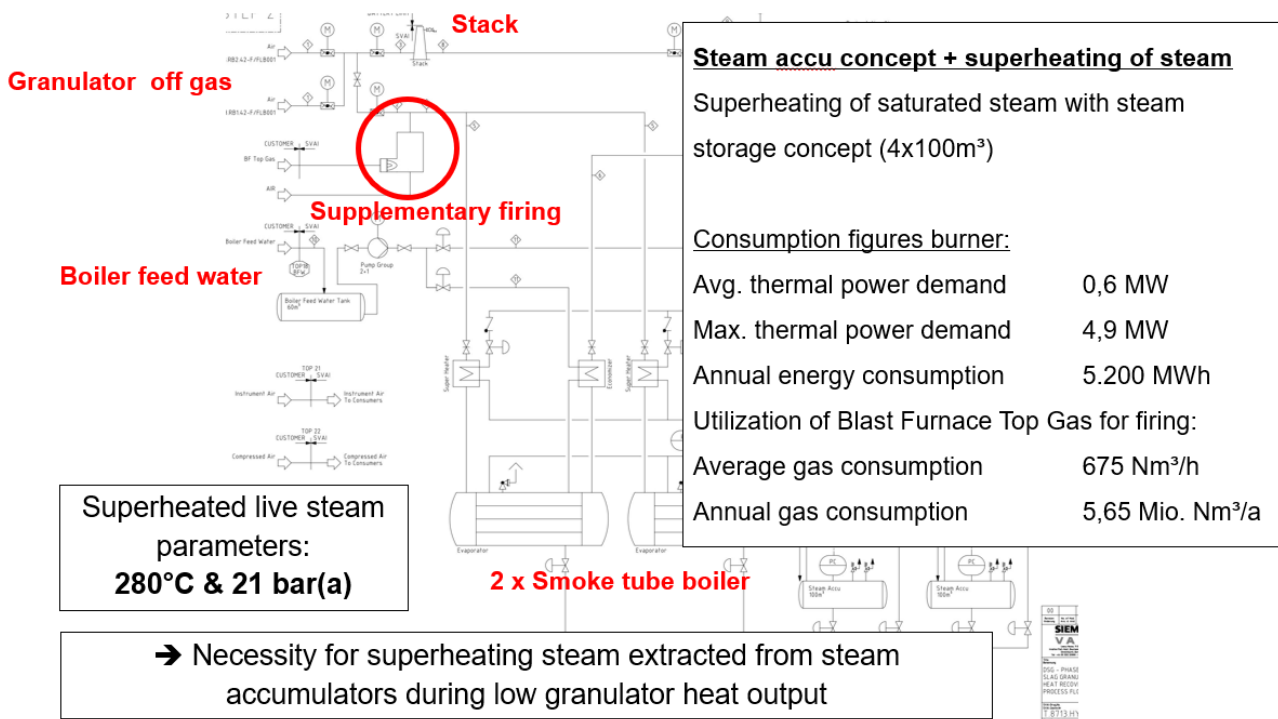


Abbildung 48: Dampfüberhitzungskonzept mit Gichtgasbrenner

4.5.1 MSR-System – Rotationszerstäubung

Im Zuge dieses APs wurde die Forschung an messbaren Qualitätsmerkmalen für den automatisierten Betrieb der Trockengranulationsanlage weitergeführt. Mit Hilfe eines Laborscheibenzerstäubers wurden die potentiellen Qualitätsmerkmale Fadenanzahl und Schlackenfilmhöhe mittels CCD-Kamera bildlich erfasst und ausgewertet, sowie mit vorhandenen empirischen Modellen verglichen.

Die Messung der Schlackenfilmhöhe ergab keine nachvollziehbaren Werte, dies ist auf die Schwierigkeit der optimalen optischen Erfassung zurückzuführen. Durch die Messung der Fadenanzahl konnte ein Bereich der optimalen Fadenbildung erfasst werden, vergleiche Abbildung 49.

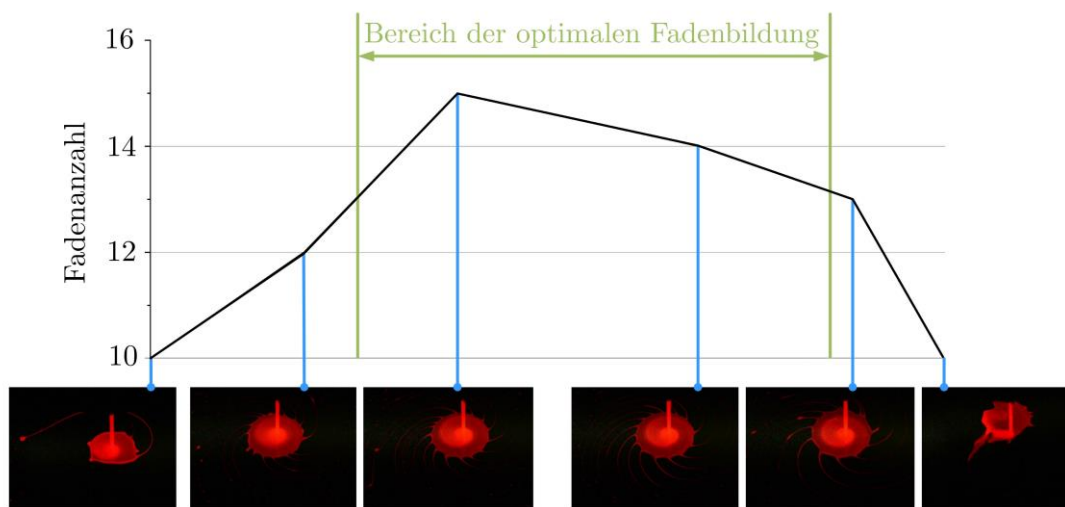


Abbildung 49: Bereich der optimalen Fadenbildung an der Laboranlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik (Hohenberger 2017)

Im optimalen Fall produzierte die Laboranlage unter den gewählten Parametern 14 – 15 Fäden. Durch einen Vergleich dieser Werte und jenen der errechneten Ergebnisse, von empirischen Modellen aus Literaturen, kann die Anwendbarkeit der Modelle für die Laboranlage und für die Zerstäubung von Hochofenschlacke bestimmt werden, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Fadenanzahl nach den Modellen der Literaturrecherche (Hohenberger 2017)

Versuch-Nr.	Hinze et al. (Hinze und Milborn 1950)	Eisenklam (Eisenklam 1964)	Frost (Frost 1981)	Kamiya (Kamiya 1972)	Kitamura et al (Kitamura und Takahashi 1992)	Liu et al. (Liu et al. 2014)	Wang et al. (Wang et al. 2014)
V3	13,0	15,1 18,5	16,9	3,4	7,6	14,2	17,2
V4	12,7	15,0 18,4	16,7	3,3	7,2	13,9	16,9

V5	13,1	15,1 18,5	16,9	3,4	7,7	14,28	17,2
----	------	--------------	------	-----	-----	-------	------

In weiterer Folge soll eine Überprüfung der Fadenanzahl als geeignetes Qualitätsmerkmal durchgeführt werden. Dazu sind Messungen an der größeren Laboranlage mit einer höheren Einschmelzmenge (InduMelt Versuchsanlage), sowie nach Möglichkeit eine Implementierung der Fadenanzahl-Messung bei der Pilotanlage in Linz geplant.

Die InduMelt Anlage soll es ermöglichen die Versuchsbedingungen aus dem Labor an jenen der Pilotanlage in Linz anzunähern. Für die Versuche wurde eine Schlackenmenge von 2,7 kg eingeschmolzen. Die Versuchsanlage mit dem dazugehörigen Messaufbau ist in Abbildung 50 dargestellt.

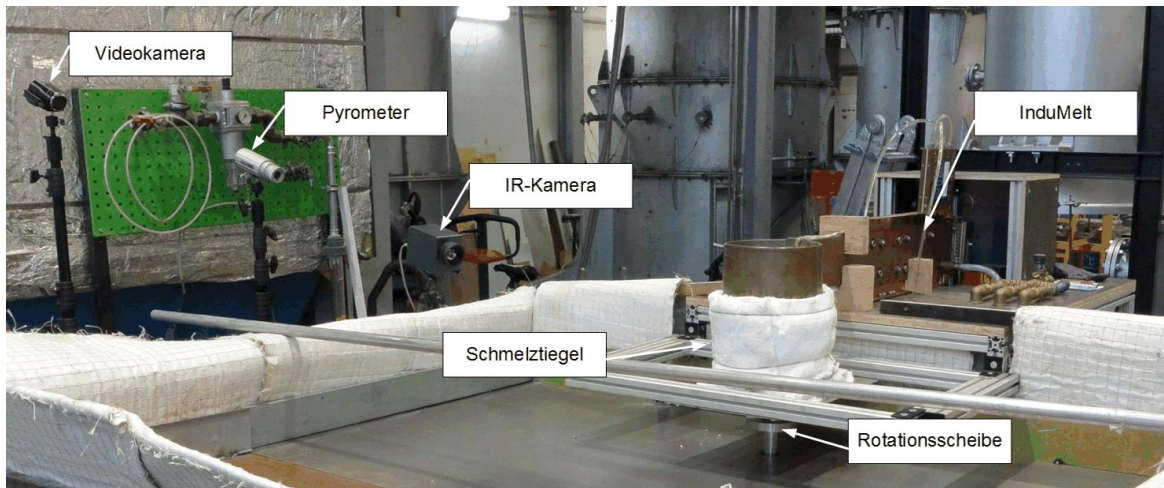


Abbildung 50: InduMelt Laborscheibenzerstärer mit Messaufbau am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben

4.5.2 Rotationskörper-Geometrie- und Stoffeigenschaftsuntersuchungen durch MUL

Für die Umsetzung einer industriellen Trockenschlackengranulationsanlage für die Verarbeitung von Schlackenflüsse $>1\text{t}/\text{min}$ in einer Anlage, werden nach derzeitigen Erkenntnissen alternative Rotationszerstübergerometrien zur Scheibe notwendig sein. Des Weiteren sind Methoden zu entwickeln, welche die Bestimmung von der physikalischen Stoffeigenschaften von Hochofenschlacken an verschiedenen Standorten ermöglicht. Dies ist notwendig um die Trockenschlackengranulationsanlage den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten anpassen und einen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

4.5.2.1 Rotationskörper – Geometriestudie

Um den negativen Effekten des Flüssigkeitszerfalls (Direkttropfen- und Lamellenzerfall) hinsichtlich des gewünschten Fadenzerfalls zu optimieren, wurden alternative Rotationskörperkonzepte getestet. Dazu wurde eine Trommel bzw. Trommelschlitzgeometrie getestet, siehe Abbildung 51.

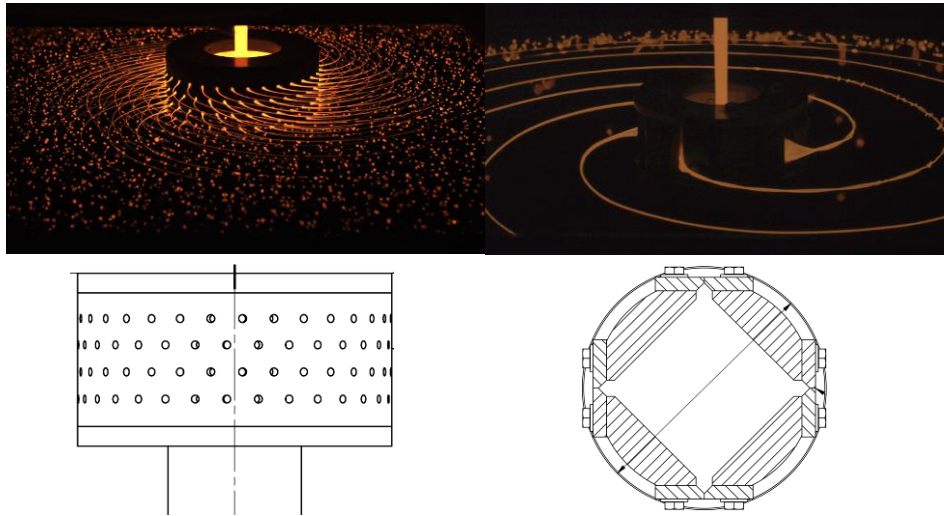


Abbildung 51: Rotationskörper – Trommel (links) / Trommelschlitze (rechts)

Dabei zeigte sich, dass die Trommelschlitzevariante ein größerer Potential zur industriellen Umsetzung als die Trommelvariante besitzt.

4.5.2.2 Chemische Zusammensetzung der Hochofenschlacke

Der zur Trockenschlackengranulation im Technikumsmaßstab verwendete Hüttensand wurde von der FEhS chemisch nach den angegebenen DIN-Normen analysiert. Diese Analysen lieferte folgende Zusammensetzung des Hüttensandes, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung des Hüttensandes der VAS Linz - Hochofen A

P2018-01561 Feststoffgehalte					
Parameter	Einheit	BSG	Messwert	DIN-Norm/Verfahren	
Aluminiumoxid	M.-%		11,8	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Basizität einfach CaO/SiO ₂			0,88	hauseigene PA	b)
Basizität erweitert (CaO+MgO)/SiO ₂			1,16	hauseigene PA	b)
C+M+S CaO+MgO+SiO ₂			81,58	hauseigene PA	b)
Calciumoxid	M.-%		33,3	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Eisen(III)oxid	M.-%		0,440	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Gesamter anorg. geb. Kohlenstoff (CO ₂)	M.-%	0,01	0,08	DIN EN 15936 [2012-11]	a)
Glühverlust (950 °C)	M.-%		-1,23	DIN EN 196-2 [2013-10]	a)
Glühverlust (berechnet Summe CO ₂ + H ₂ O)	M.-%	0,01	0,14	Berechnung Hausmethode	b)
Kaliumoxid	M.-%		1,25	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Magnesiumoxid	M.-%		10,4	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Mangan(II)oxid	M.-%		1,65	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Natriumoxid	M.-%		0,420	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Schwefel, gesamt	M.-%		0,440	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Siliciumoxid	M.-%		37,8	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Titanoxid	M.-%		0,600	DIN 51418-2 [2015-03]	b)
Wasser	M.-%	0,03	0,07	hauseigene PA	b)

Es wurde über die chemische Zusammensetzung die einfache Basizität (CaO/SiO_2) als Summenparameter bestimmt, bei der untersuchten Material handelt es sich um eine saure Schlacke. Dies hat erheblichen Einfluss auf die physikalischen Stoffeigenschaften und die Qualität der Rotationszerstäubung.

4.5.2.3 Physikalische Stoffeigenschaften von Hochschlacke

Zur einfacheren Abschätzung des Verhaltens von Hochofenschlacke und der daraus folgenden Auswirkung auf die Rotationszerstäubung, ist eine Betrachtung der physikalischen Stoffeigenschaften (Dichte, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität,) notwendig.

Die physikalischen Stoffeigenschaften der Hochofenschlacke wurden über instrumentelle Analyse derselben und über Literaturmodelle ermittelt. Der größte Einflussfaktor auf diese Stoffeigenschaften stellt die Temperatur gefolgt von der chemischen Zusammensetzung dar.

Wie in folgender

Abbildung 52 aufzeigt, besitzt die Viskosität eine große Abhängigkeit von der Temperatur.

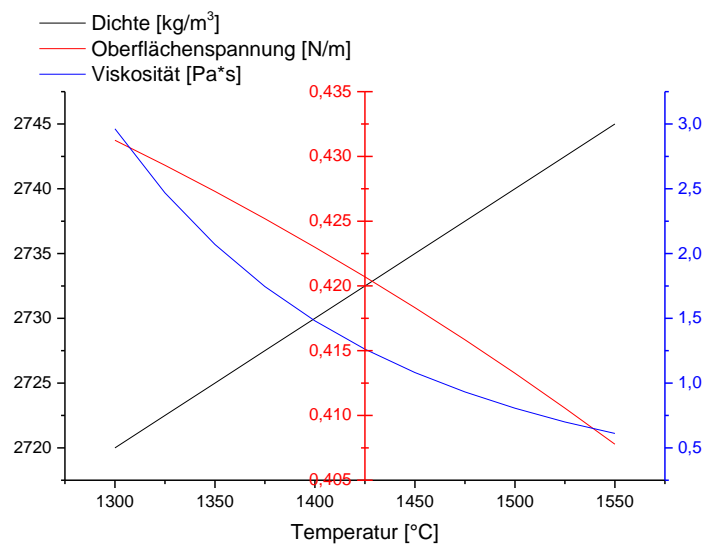


Abbildung 52: Physikalische Stoffdaten (Dichte, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität) der Hochofenschlacke in Abhängigkeit der Temperatur der VAS Linz - Hochofen A nach (Mudersbach 2009)(Ehrenberg und Algermissen 2016)

4.5.2.4 Viskosität

Um die Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur darzustellen wurde die Hochofenschlacke instrumentell mittels Hochtemperaturviskosimeter analysiert. Diese Analyse wurde am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde an der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Mit Hilfe der Messergebnisse, siehe Abbildung 53, konnte der Zusammenhang zwischen dynamischer Viskosität und Temperatur formelmäßig wie folgt zusammengefasst werden.

$$\ln(\eta) = -6,1924721 + 11512799 / T^2$$

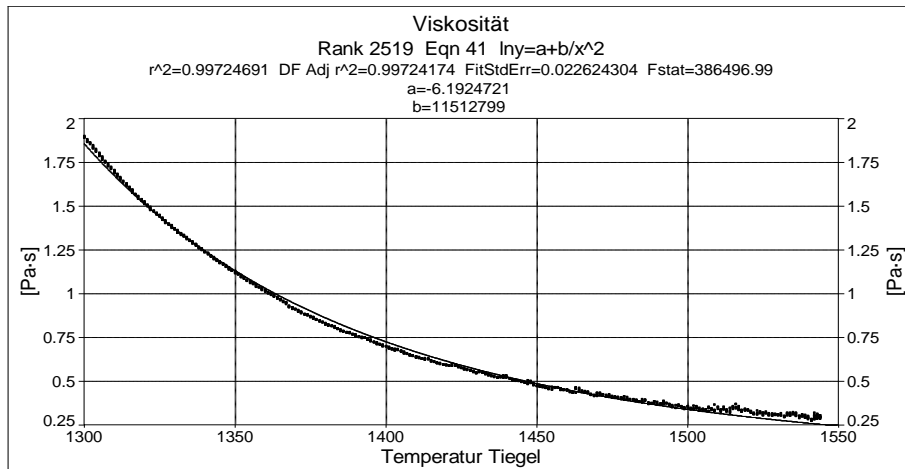


Abbildung 53: Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von der Temperatur

Daraus ergeben sich in 13 folgende Viskositäten für die Hochofenschlacke des Hochofen A in Linz (Arbeitsbereich der Trockenschlackengranulation 1380-1515°C).

Tabelle 13: Dynamische Viskositäten der Hochofenschlacke in Abhängigkeit der Temperatur

Temperatur [°C]	dynamische Viskosität [Pa·s]	Temperatur [°C]	dynamische Viskosität [Pa·s]
1300	1.86	1425	0.59
1325	1.44	1450	0.49
1350	1.13	1475	0.41
1375	0.90	1500	0.34
1400	0.73		

4.6 Ergebnisse AP5 – Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung

Im Zuge der Arbeiten von MUL im Arbeitspaketes 3 und 4 wurden die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten aufgearbeitet. Darüber hinaus wurden regelmäßig Publikationen im öffentlichen Rahmen erstellt. Es werden in Folge noch weitere wissenschaftliche Arbeiten und Publikationen angestrebt.

4.7 Ergebnisse AP6 – Projektmanagement

Laufende und regelmäßige Projektteamsitzungen im Projektteam wurden durchgeführt, um die Projektkoordination (Abstimmung mit den Team-Mitgliedern, Sicherstellung des Arbeitsflusses durch

entsprechende Ressourceneinteilung, Überwachung des Baufortschritts, termingerechte Lieferung der Dokumente sowie das Kontrollieren der Ergebnisse.) zu gewährleisten.

5 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund von noch offenen Problemstellungen werden die Granulationsversuche an der Demonstrationsanlage in Linz voraussichtlich bis Ende 2019 fortgeführt. Man erhofft sich, dass mit weiteren geplanten Umbauten bis dorthin ein stabiler Granulationsbetrieb möglich wird. Folgende essentiellen Punkte sollen bis Ende 2019 erreicht werden:

1. Findung einer Drehtellerausführung, dass den angeführten Anforderungen gerecht wird
2. Stabiles Granulatorumfeld: Keine größeren Schlackenrückstände im Granulator nach einem Betrieb
3. Findung der max. Schlackenkapazität der Demonstrationsanlage

Bei positivem Abschluss mit Ende 2019 soll die Entwicklung einer für den industriellen Dauerbetrieb tauglichen Gesamtanlage fortgeführt werden. Teilbereiche der Demonstrationsanlage sind nicht für einen industriellen Dauerbetrieb tauglich und müssen weiterentwickelt werden. Dies betrifft z.B. die Schlackenzufuhr zum Granulator und den automatisierten/schnellen Wechsel des Drehtellers. Es wird das Ziel verfolgt, dass in naher Zukunft die erste industrielle im Dauerbetrieb eingesetzte Hochofen Trockenschlackengranulationsanlage mit Wärmerückgewinnung entwickelt, errichtet und erfolgreich betrieben wird.

6 Literaturverzeichnis

Folgend die Auflistung der Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten und Patentanmeldungen, die im Zuge dieses Projektes entstanden sind:

6.1 Publikationen

- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald (2016a): Wärmerückgewinnung. In: Triple M (1), S. 4–5. Online verfügbar unter https://presse.unileoben.ac.at/de/3371/?tx_webloftdownloads_pi1%5Bdownloads%5D=58&tx_webloftdownloads_pi1%5Baction%5D=download&tx_webloftdownloads_pi1%5Bcontroller%5D=Downloads&cHash=7a180138bafa3ad5630c0cd82fd576b3, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald; Krenn, Jochen; Rauter, Mathias; Mally, Valentin; Geier, Bernhard (2016): Sekundärrohstoff- und Wärmerückgewinnung aus Eisenhüttenschlacken. In: Max Aicher Unternehmensgruppe (Hg.): Schlacken-Symposium 2016: Kreislaufwirtschaft stabil weiterentwickeln. Unter Mitarbeit von Dirk Mudersbach, Susanne Schüler, Tanja Raiger, Bastian Mangliers und Markus Kihm. Freilassing, S. 75–87.
- Werner, Andrea; McDonald, Ian; Fleischanderl, Alexander (2016): Dry Blast Furnace Slag Granulation with Waste Heat Recovery, Beitrag. In: ECIC (Hg.): European Coke and Ironmaking Congress. 7th European Coke and Ironmaking Congress. Linz, 12.-14.09.2016.
- Fenzl, Thomas (2016): Dry Blast Furnace Slag Granulation with Waste Heat Recovery, Präsentation. In: ECIC (Hg.): European Coke and Ironmaking Congress. 7th European Coke and Ironmaking Congress. Linz, 12.-14.09.2016.
- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald (2016b): Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation 2.0 - Umsetzung, Poster. In: Roland Pomberger (Hg.): Recy & DepoTech 2016. Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft & Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, Sondersession : Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, Österreich, 8.-11. November 2016.
- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald (2016c): Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation 2.0, Beitrag. In: Roland Pomberger (Hg.): Recy & DepoTech 2016. Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft & Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, Sondersession : Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, Österreich, 8.-11. November 2016, S. 767–768.
- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald (2017a): Dry Blast Furnace Slag Granulation with Waste Heat Recovery. Hg. v. Chalmers University of Technology. Department of Energy and Environment. Göteborg, Sweden. Online verfügbar unter

http://www.ieafbc.org/fileadmin/IEAFBC/IEA-FBC-ARCHIV/Reports/Country_Report_2011-2016.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.2019.

- Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald (2017b): Dry Blast Furnace Slag Granulation with Waste Heat Recovery. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hg.): IEA Wirbelschichttechnologie (FBC): Wirbelschichttechnik von Brennstoffen für eine saubere Energieerzeugung. Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien. Wien (49), S. 30. Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/endbericht_201749_fbc.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Fenzl, Thomas; Neuhold, Robert; Rummer, Bernhard (2017): Installation of a Dry Slag Granulation Pilot Plant at Blast Furnace A of voestalpine. In: ASMET - The Austrian Society for Metallurgy and Materials (Hg.): Book of Abstracts. European Steel Technology and Application Days - ESTAD 2017. Wien, 26.06-29.06. Wien, S. 26. Online verfügbar unter <http://bestevent.management/event/2/abstract-book.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Raupenstrauch, Harald (2017): Erfahrungsbericht FORWÄRTS 2.0 - Trockenschlackengranulation von Hochofenschlacke. Unter Mitarbeit von Ausseninstitut - Montanuniversität Leoben. Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Montanuniversität Leoben (Förderungsinformation und Beratungstag).
- Doschek, Klaus (2017a): Trockenschlackengranulation. In: Montanuniversität Leoben - Universitätslehrverband (Hg.): WerWasWo.Forschung@MUL. Unter Mitarbeit von Stephan Schuschnigg und Karin Schober. WerWasWo.Forschung@MUL. Leoben, Austria, 13.11.-28.11. Montanuniversität Leoben - Universitätslehrverband. Leoben, S. 57, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Doschek, Klaus; Ponak, Christoph; Raupenstrauch, Harald (2018): Thermoprozesstechnik - Beiträge zur Abfallvermeidung, Wertstoffrückgewinnung und Energieeffizienzsteigerung. In: ProcessNet - eine Initiative von DECHEMA und VDI-GVC (Hg.): Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Hochtemperaturtechnik. Bremen, Deutschland, 06.03.-07.03.
- Fleischanderl, Alexander (2018): FORWÄRTS 2.0 - Dry granulation of blast-furnace slag with heat recovery. In: energy innovation austria (1), S. 4–5. Online verfügbar unter https://www.energy-innovation-austria.at/wp-content/uploads/2018/02/eia_01_18_fin_englisch.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Fleischanderl, Alexander; Fenzl, Thomas; Neuhold, Robert (2018): Tapping Hot Slag for Energy. In: Metals Magazine (2), S. 54–59. Online verfügbar unter https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/metals-magazine/2018_02/MetalsMagazine-2-2018.pdf, zuletzt geprüft am 24.04.2019.
- Doschek-Held, Klaus; Hohenberger, Michael; Mühlbacher, Barbara; Ponak, Christoph; Raupenstrauch, Harald (2018a): Thermoprozesstechnik - Wertstoff- und Wärmerückgewinnung aus Eisenhüttenschlacken. In: Roland Pomberger (Hg.): POSTER-Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz. Recy & DepoTech. Leoben, 07.11-

- 09.11. Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft. Leoben: Eigenverl. Institut für Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft, S. 113–116.
- Doschek-Held, Klaus; Raupenstrauch, Harald; Ponak, Christoph; Hohenberger, Michael; Mühlbacher, Barbara (2018b): Poster - Thermoprozesstechnik – Wertstoff- und Wärmerückgewinnung aus Eisenhüttenschlacken. Online verfügbar unter http://www.recydepotech.at/media/1.17_Doschek-Held.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
 - Raupenstrauch, Harald; Doschek-Held, Klaus; Rieger, Johannes; Reiter, Wolfgang (2019): RecoDust—An Efficient Way of Processing Steel Mill Dusts. In: Journal of Sustainable Metallurgy 65 (11), S. 152. DOI: 10.1007/s40831-019-00216-y. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs40831-019-00216-y.pdf>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
 - Fleischanderl, Alexander; Fenzl, Thomas; Wulfert, Holger; Ruhkamp, Winfried (2019): Dry granulated BF sand: A groundbreaking and sustainable Innovation – Production process, product grinding and building materials investigations. In: Pro Global Media (Hg.): Global Slag Conference & Exhibition. Unter Mitarbeit von Robert McCaffrey. 14th Global Slag Conference & Exhibition. Aachen, 26.03-27.03. Surrey, UK: Pro Global Media Ltd. Online verfügbar unter <https://www.slideshare.net/LoescheLA/dry-granulated-bf-sand-a-groundbreaking-and-sustainable-innovation>, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
 - Fleischanderl, Alexander, Fenzl, Thomas, Neuhold, Robert (2018): “Dry Slag Granulation – The Future Way to Granulate Blast Furnace Slag” AISTech Association for Iron and Steel Technology, Philadelphia
 - Fleischanderl, Alexander, Fenzl, Thomas, Neuhold, Robert (2019): „Trockenschlackengranulation zu Hüttensand mit Wärmerückgewinnung – Entwicklungsstatus der Pilotanlage am Hochofen A der voestalpine“ In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen; Thome-Kozimiensky Verlag GmbH ISBN 978-3-944310-47-3 s.228 Wissenschaftliche Arbeiten
 - Stadlmayr, Ingrid (2016): Optimierung und Auslegung einer Laboranlage zur Trockenschlackengranulation. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, Leoben. Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.
 - Doschek, Klaus (2017b): Trockenschlackengranulation - Bewertung der Scheibenzerstäubung von Hochofenschlacke mittels interaktiver Bilderfassung. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben. Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.
 - Hohenberger, Michael (2017): Trockenschlackengranulation - Messbare Qualitätsmerkmale der Rotationsscheibenzerstäubung von Hochofenschlacke. Bachelorarbeit. Montanuniversität Leoben, Leoben. Thermoprozesstechnik.
 - Staltner, Dominik (2018): Modellierung des instationären Wärmeverlusts von Schlackenpartikel im Freeboardbereich einer Trockenschlackengranulationstechnologie. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Wien. Institut für Energietechnik und Thermodynamik. Online

verfügbar unter https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_272358.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2019.

- Keplinger, Thomas (2018): Dynamic simulation of waste heat recovery concepts for the iron and steel industry. Dissertation. Technische Universität Wien, Wien. Institut für Energietechnik und Thermodynamik. Online verfügbar unter <https://pub-mb.tuwien.ac.at/publist.php?lang=2&abt=50&ptyp=10&sgrp=-1&sort=3&inv=1&authinfo=1&nojava=1>, zuletzt geprüft am 24.04.2019.
- Hohenberger, Michael (2019): Optimierung einer Rotationszerstäubungsanlage zur Behandlung von Hochofenschlacke im Technikumsmaßstab. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, Leoben. Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

6.2 Patentanmeldung

- 2018E00192AT, 201800274, „Dry Slag Granulation off gas process control“

7 Kontaktdaten

Projektleiter

Dipl.-Ing. Robert Neuhold

Primetals Technologies Technologies Austria GmbH

Turmstraße 44, 4031 Linz

Telefon: +43732 6592 73948

E-Mail: robert.neuhold@primetals.com

Website: www.primetals.com

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

Dipl.-Ing. Thomas Bürgler

voestalpine Stahl GmbH

voestalpine-Straße 1, 4020 Linz

Telefon: +4350304 15 5106

E-Mail: thomas.buergler@voestalpine.com

Website: www.voestalpine.com

David Algermissen, M.Sc.

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.

Bliersheimer Str. 62, 47229 Duisburg - Rheinhausen

Telefon: 02065 99 45-12

E-Mail: d.algermissen@fehs.de

Website: www.fehs.de

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

Montanuniversität Leoben

Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben

Telefon: +43 3842 402 5801

E-Mail: harald.raupenstrauch@unileoben.ac.at

Website: www.unileoben.ac.at