

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

28/06/2016

Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenslackengranulation

FORWÄRTS

Projektnummer: 838725

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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

Ausschreibung	01. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01/03/2013
Projektende	28/02/2016
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	Andrea Werner
Postadresse	Turmstraße 44
Telefon	+4379265922971
Fax	-
E-mail	andrea.werner@primetals.com

Website

www.primetals.com

Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenslackengranulation

FORWÄRTS

AutorInnen:

Andrea Werner (PTAT)
Thomas Bürgler (VAS)
David Algermissen (FEhS)
Klaus Doschek (MUL)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	6
2.1	Kurzbeschreibung des Projektes	6
2.2	Relevanz des Vorhabens in Bezug auf die Ausschreibungsschwerpunkte.....	7
2.3	Stand der Technik bzw. Stand des Wissens	10
2.3.1	Das Produkt Hochofenschlacke	10
2.3.2	Nassgranulation – konventionelles Granulationsverfahren zur Hüttensand- Herstellung.....	11
2.3.3	Hüttensand als Zementbestandteil – relevante Eigenschaften	12
2.4	Problemstellung.....	13
2.5	Methode	15
2.6	Aufbau der Arbeit.....	17
2.7	Innovationsgehalt	17
3	Inhaltliche Darstellung.....	20
3.1	Arbeitspaket 1: Gesamtkonzept und Methode	20
3.1.1	Ziele.....	20
3.1.2	Beschreibung der Inhalte	20
3.2	Arbeitspaket 2: Versuchsstandaufbau.....	20
3.2.1	Ziele.....	20
3.2.2	Beschreibung der Inhalte	21
3.3	Arbeitspaket 3: Versuchsdurchführung	21
3.3.1	Ziele.....	21
3.3.2	Beschreibung der Inhalte	21
3.4	Arbeitspaket 4: Auswertung	22
3.4.1	Ziele.....	22
3.4.2	Beschreibung der Inhalte	22
3.5	Arbeitspaket 5: Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung	22
3.5.1	Ziele.....	22
3.5.2	Beschreibung der Inhalte	22
3.6	Arbeitspaket 6: Projektmanagement	23
3.6.1	Ziele.....	23
3.6.2	Beschreibung der Inhalte	23
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	24
4.1	Ergebnisse zu Arbeitspaket 1	25
4.1.1	Wirbelschicht-Versuchsanlage an der MUL	25
4.1.2	Untersuchung des Anlagenstandorts und Einplanung der Prototypanlage	26
4.1.3	Schlackenfluss-Regelung für die Versuchsanlage.....	33

4.1.4	3D Konstruktionsmodell und Detail-Engineering	35
4.1.5	CFD Simulation wassergekühlte Wand	40
4.1.6	Granulationsversuche bei Swerea MEFOS, Lulea, Schweden	40
4.1.7	Behördengenehmigung für den Versuchsbetrieb der Prototypanlage	42
4.1.8	Abwicklung von Zukaufkomponenten.....	42
4.1.9	Sicherheitsanalyse.....	42
4.2	Ergebnisse zu Arbeitspaket 4	42
4.2.1	Produktuntersuchungen zu konventionell erzeugten Hüttensand	42
4.2.2	Modellierung der Viskosität	48
4.3	Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt.....	52
5	Ausblick und Empfehlungen.....	53
6	Literaturverzeichnis.....	55
7	Anhang	58
8	Kontaktdaten.....	59

2 Einleitung

FORWÄRTS wird durch neue Technologien Hochofenschlacke trocken granulieren um hochqualitativen Hüttensand zu erzeugen und die erhebliche thermische Energie der Schlacke (rd. 1,5 GJ/t) für Wärmerückgewinnung 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 Projektes

Ziel von FORWÄRTS ist die Weiterentwicklung eines Verfahrens, um die beim Hochofenprozess erzeugte und beim Abstich ca. 1500 °C heiße Schlacke einerseits trocken zu granulieren, und dabei ein Produkt mit gleichen oder besseren Eigenschaften gegenüber dem herkömmlich über Nassgranulation erzeugten Hüttensand zu erzeugen und um andererseits gleichzeitig die erhebliche thermische Energie der Schlacke (rd. 1,5 GJ/t) für Wärmerückgewinnung zu nutzen. Dies soll durch experimentelle Untersuchungen mit schmelzflüssigen Hochofenschlacken am Gelände eines Hüttenwerkes erreicht werden.

Es ist heute Stand der Technik, dass schmelzflüssige Hochofenschlacken in Granulationsanlagen unter Verwendung von großen Wassermengen schnell abgekühlt werden. Dabei entsteht glasiger Hüttensand, der vor einer weiteren Verarbeitung in der Zement- und Betonindustrie mit hohem Energieaufwand getrocknet werden muss. Bei dieser konventionellen Nassgranulationstechnik, wie auch bei der alternativen Beetabkühlung zu kristalliner Stückschlacke, besteht weiterhin auch nicht die Möglichkeit, das erhebliche Wärmepotential der flüssigen Schlacke zu nutzen. Die flüssigen Hochofenschlacken stellen eine der größten, noch ungenutzten Hochtemperaturpotentiale der Eisen- und Stahlindustrie dar, wodurch die Wärmerückgewinnung aus Schlacken für diese Industrie von großer Bedeutung ist. Durch den Einsatz des alternativen Kühlmediums Luft ermöglicht FORWÄRTS die Wärmerückgewinnung aus Schlacken auf hohem Temperaturniveau.

Projektziele:

1. Bislang ungenutzte Abwärmequellen (~ 1,5 GJ/t Schlacke) durch ein neues Verfahren (Trockengranulation) nutzbar machen
2. Der daraus entstehende "Hüttensand" muss mindestens die gleiche Produktqualität (> 95 % Glasgehalt, Festigkeitseigenschaften, Abriebverhalten, Korngröße, Abbindeverhalten) wie bei der Nassgranulation (Stand der Technik) haben
3. Eine 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 (bis 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 durch Klinkersubstitution)

2.2 Relevanz des Vorhabens in Bezug auf die Ausschreibungsschwerpunkte

Das Projekt FORWÄRTS behandelt prioritär: Themenfeld 1 „Energieeffizienz und Energieeinsparungen“; Subschwerpunkt 1.1 „Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe“

Begründung: Die Erzeugung von Eisen und Stahl ist ein entscheidender Beitrag zur Stärkung der österreichischen Wirtschaft und hat ein enormes Potential zur Steigerung der Energieeffizienz. Das Projekt FORWÄRTS versetzt österreichische Unternehmen in die Lage, in der Eisen- und Stahl-Herstellung große Mengen bestehender Energie zu nutzen und die Kuppelprodukte besser zu verwerten. Jedes Jahr werden weltweit ca. 400 Mio. Tonnen Hochofenschlacken erzeugt, welche mit Temperaturen von bis zu 1500 Grad Celsius zu Nebenprodukten verarbeitet werden, ohne jedoch diese hohen Temperaturen bzw. die enthaltene Energie (1,5 GJ pro Tonne Schlacke) zu nutzen. FORWÄRTS wird diese Energie nutzbar machen, indem ein innovatives Verfahren zur Trockengranulation erforscht sowie erste Versuche in Kombination mit „echter“ Schlacke aus Hochöfen durchgeführt werden.

Gegenüber der bisher üblichen Hochofenschlacke-Verwertung werden durch FORWÄRTS die Verfahrensgrundlagen für eine Wärmerückgewinnung weiter ausgebaut, um die Enthalpie von schmelzflüssiger Hochofenschlacke auf hohem Temperaturniveau für nachgeschaltete Prozesse nutzbar zu machen. Bei den bisherigen Verfahren zur Hochofenschlacke-Verwertung bleibt das nach dem Abstich vorhandene hohe energetische Potential der Schlacke ungenutzt, da es lediglich zur Wassererwärmung bzw. Verdampfung führt. Außerdem kann das entstandene Schlackenprodukt weiterhin uneingeschränkt als Hauptbestandteil für die Zementherstellung und als Betonzusatzstoff eingesetzt werden, wobei allerdings im Gegensatz zum Stand der Technik FORWÄRTS wasserfrei arbeiten wird und damit der hohe Energieaufwand für die Trocknung des Hüttensands vermieden wird.

Bei Annahme der Gesamtproduktion eines integrierten Hüttenwerks in der Größe der voestalpine Stahl mit einer Hochofenschlacke-Jahresproduktion von rund 1,8 Mio. Jahrestonnen und dem thermischen Energiepotential pro Tonne erzeugter Hochofenschlacke mit rund 1,5 GJ, ergibt sich ein Einsparungspotential von etwa 79 MW thermisch oder 19 MW elektrisch. Der durchschnittliche Energieverbrauch pro Tonne Roheisen von 18,7 GJ/t wird zu ca. 75 % über Primärenergieträger (hauptsächlich Koks) und

zu rund 25 % aus Brenngasen und elektrischer Energie abgedeckt. FORWÄRTS könnte somit eine Energieeinsparung durch verminderten Brennstoffeinsatz von 2,4 % ermöglichen.

Die CO₂-Emissionen durch die elektrische Energierückgewinnung würden sich bei diesem Beispiel um mehr als 41.000 Tonnen pro Jahr verringern. Durch das Entfallen der Trocknungsenergie für den Hüttenand verringert sich der CO₂ Ausstoß pro Jahr um weitere rund 55.000 Tonnen. In Summe ergibt sich eine Gesamtreduktion der CO₂ Emission von mehr als 96.000 Tonnen für ein integriertes Hüttenwerk in der Größenordnung der voestalpine Stahl. Bezogen auf etwa 8,4 Mio. Einwohner in Österreich könnte diese Entwicklung die jährliche Pro-Kopf-Emission an CO₂ um mehr als 11 kg senken.

Diese beachtliche Energieeffizienz wird in FORWÄRTS durch neue Modelle, Prozesse und Technologien zum Einsatz der Trockengranulation erreicht. Neben der Ressourceneinsatzoptimierung (Material und Energie) können auch Qualitäts- und Produktionsvorteile (Kosten und Effizienz) generiert werden. Durch Einsatz von FORWÄRTS in der Eisen- und Stahlindustrie können nach internen Schätzungen etwa 1,8 Euro je Tonne an Kosten für die Produktion von Roheisen eingespart werden.

Ausschreibungsziele: FORWÄRTS erfüllt folgende Ausschreibungsziele von 1.1 „Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe“:

Leitfaden e!Missi0n.at	Beitrag von FORWÄRTS
– ...Treibhausgasemissionen in der Produktion reduzieren und gleichzeitig innovative und weltmarktfähige Produkte entwickeln...	Durch FORWÄRTS können weltweit 17 Mio. Tonnen CO ₂ pro Jahr eingespart und die weltweit einzigartige Wärmerückgewinnung bei Hochofenschlacken der Stahlindustrie realisiert werden!
– ...Reduktion des Energieeinsatzes in Prozessen durch Entwicklung und Einsatz neuer Verfahren und Materialien sowie Entwicklung der dazu notwendigen Maschinen- und Anlagentechnik...	Der Energieeinsatz im Roheisenproduktionsprozess wird um 2,6% reduziert durch das neue FORWÄRTS Verfahren und umfasst auch die nötige Anlagentechnik!
– ...Prozesse basierend auf chemischer, thermischer, mechanischer und elektrischer Energie entlang der gesamten Prozesskette	FORWÄRTS behandelt v.a Prozesse basierend auf thermischer und elektrischer Energie!
– ...(Weiter-) Entwicklung von Schlüsseltechnologien, Komponenten, Materialien und Verfahren mit erheblichem Emissionsreduktionspotenzial	Wärmerückgewinnung im Rahmen der Trockengranulation ist als Schlüsseltechnologie, Komponente der Eisen- und Stahlerzeugung und als Verfahren mit erheblichem Emissionsreduktionspotenzial

	einzustufen und betrifft Materialien (Hochofenschlacken)!
– Optimierung bestehender und Entwicklung neuer energieeffizienter Produktionsprozesse in Simulation und Experiment z. B. durch die Modifikation von Prozessparametern, Substitution von Betriebsstoffen, Einsatz neuer oder verbesserter Komponenten und Reorganisation	FORWÄRTS wird die optimierten Technologien und Prozesse simulieren und als Experiment durch Einsatz beim Hochofen durchführen!
– Reduktion des Energieeinsatzes im Prozess durch Entwicklung und Einsatz neuer Verfahren, Materialien sowie Apparate-/Anlagentechniken in energieintensiven Industriebranchen	Die nötige Trocknungsenergie wird durch FORWÄRTS um 132 kWh/t Hochofenschlacke reduziert. Der Stahlerzeugungsprozess ist mit 18,7 GJ/t Roheisen einer der energieintensiven der Industriebranche!
– Nutzung von Abwärme im industriellen Bereich (z. B. Abgas, Abwasser etc.) durch thermische Speicher, Aufbereitung mittels Hochtemperaturwärmepumpen oder Umwandlung in elektrische Energie	Durch die Wärmerückgewinnung kann das hohe Potential der Abwärme (1500 Grad Celsius) der Hochofenschlacken genutzt werden!
– (Weiter-)Entwicklung von energieeffizienten Verfahren und Technologien zur Reduktion und (innerbetrieblichen) Nutzung von Treibhausgasemissionen aus industriellen Produktionsprozessen	Die avisierte Reduktion der Treibhausgase durch FORWÄRTS in Stahlerzeugungsprozessen beträgt weltweit 10,7 Mio. Tonnen CO ₂ pro Jahr!

FORWÄRTS trägt darüber hinaus mit folgenden Aspekten zur Erreichung der drei übergeordneten Ziele des Klima- und Energiefonds bei:

- Ziel 1: Beitrag zur Erfüllung der energie-, klima- und technologiepolitischen Vorgaben der österreichischen Bundesregierung: FORWÄRTS ist eine technologische Entwicklung, die durch die Energieeinsparung von 2,4 % pro Tonne Roheisen einen wertvollen Beitrag liefert.
- Ziel 2: Erhöhung der Leistbarkeit von nachhaltiger Energie und innovativen Energietechnologien: durch die Wärmerückgewinnung kann die kostenintensive Stahlindustrie wettbewerbsfähiger gemacht werden.
- Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet innovativer Energietechnologien: Die bestehende Technologieführerschaft u.a. durch die heimische Stahlindustrie (VASL), innovative Anlagenbauer (PTAT) und Forschungseinrichtungen (MUL und FEhS) wird durch FORWÄRTS ausgebaut, gestärkt und die internationale Sichtbarkeit erhöht. FORWÄRTS

trägt auch zur wirtschaftlichen Stärke der österreichischen Akteure durch Energieeffizienz bei und kann durch massive CO₂-Reduktionen ein Aushängeschild der heimischen Klimaschutzpolitik werden.

2.3 Stand der Technik bzw. Stand des Wissens

2.3.1 Das Produkt Hochofenschlacke

Beim Hochofenprozess entstehen pro Tonne Roheisen ca. 0,3 t heiße Schlacke mit einer Abstichtemperatur von etwa 1500 °C und einem durchschnittlichen Schlackenfluss von ca. 2 t/min, der aber auch zeitweise bis zu 6 t/min betragen kann. Die Hochofenschlacke nach Abstich besteht überwiegend aus CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, aber auch Fe, Mn, S und anderen Nebenbestandteilen. Weltweit werden heute jährlich ca. 400 Mio. t Hochofenschlacke erzeugt. Ein Anteil von ca. 210 Mio. t Hochofenschlacke pro Jahr kann aufgrund der weltweit installierten Hochofengrößen 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.

- 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. Zusätzlich benötigt man einen hohen Platzbedarf für eine solche Anlage innerhalb des Hüttenwerks.

- Glasige Hochofenschlacke (Hüttensand)

Mit seit vielen 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, z.B. gemäß EN 197-1 "Normalzement", und als

Zusatzstoff gemäß EN 15167 "Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel" 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 sowie hohe spezifische CO₂-Emissionen (rd. 1 t 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. Dies ist nicht allein durch die Einsparung an Primärenergie beim Sinterprozess bedingt, sondern ganz wesentlich durch die Vermeidung der Freisetzung des im Kalkstein chemisch gebundenen Kohlendioxids.

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 trotzdem folgende Nachteile:

- Trotz mechanischer Entwässerung in Trommeln, Silos oder Halden verbleibt i.d.R. eine Restfeuchte von 5-20 M.-% im Hüttensand. Für die Zementherstellung muss das Produkt daher zuvor 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. Geschlossene Granulationsanlagen führen das Wasser im Kreislauf und verhindern die Emission von schwefelhaltigem Wasserdampf.
- 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 ungemahlene Hüttensands und dessen physikalischen Eigenschaften.

Maßgeblichen Einfluss auf das Reaktivitätspotential eines Hüttensands haben die chemische Zusammensetzung und der Glasgehalt. Aber auch der Schmelzvergangenheit der Hochofenschlacke wird Einfluss zugeschrieben. 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 leichter 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 $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$, die größer 1 sein muss, und die Summe aus CaO, MgO und SiO_2 , die mindestens zwei Drittel betragen muss. Es lassen sich folgende vereinfachte Aussagen über die Auswirkungen der chemischen Zusammensetzung treffen:

- Eine erhöhte Basizität CaO/SiO_2 beeinflusst die gesamte Festigkeitsentwicklung positiv.
- Der Ersatz von CaO durch MgO bleibt nur unterhalb von rd. 10 M.-% ohne negativen Festigkeitseinfluss.
- Höhere Al_2O_3 -Gehalte > 14 M.-% beeinflussen die Frühfestigkeit insbesondere nach 1-2 Tagen signifikant positiv, wohingegen bei Gehalten > 20 M.-% die Spätfestigkeiten abnehmen können.
- Erhöhte TiO_2 -Gehalte zw. 1-3 M.-% beeinträchtigen die Festigkeit nach 1-7 Tagen signifikant.
- Erhöhte Alkalioxidgehalte wirken sich festigkeitsfördernd aus.

Die physikalischen Eigenschaften des Hüttensands hängen einerseits von den Eigenschaften der flüssigen Hochofenschlacke, insbesondere von deren Viskosität, und

andererseits 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 Mahlwiderstand wird von der Sieblinie beeinflusst. Hüttensandpellets aus der klassischen, heute aber nur noch sehr selten verwendeten Luftgranulation weisen 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 die Granulationsbedingungen bestimmt und nehmen ebenfalls Einfluss auf Wasserrückhaltevermögen, Mahlbarkeit und Transporteigenschaften des Hüttensands.

2.4 Problemstellung

Flüssige Hochofenschlacken stellen das größte bisher noch ungenutzte 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.

Bei offenen Nassgranulationsanlagen kommt es weiters zur Freisetzung von schwefelhaltigem Wasserdampf, wodurch die Umwelt belastet wird und laufend Frischwasser (rd. 1 m³/t) in das System nachgespeist werden muss. Geschlossene Nassgranulationsanlagen führen das Wasser zwar im Kreislauf und vermindern die Emission von schwefelhaltigem Wasserdampf, jedoch weisen sowohl offene als auch geschlossene Nassgranulationsanlagen einen hohen Energiebedarf für die Förderung der großen Wassermengen auf. 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.

Der durch Nassgranulation erzeugte Hüttensand enthält trotz mechanischer Entwässerung in Trommeln, Silos und Halden eine Restfeuchte von 5 - 20 M.-%. Für die Zementherstellung muss das Produkt daher zuvor mit hohem Energieaufwand nachgetrocknet werden. Der Energiebedarf für die Hüttensandtrocknung beträgt bei 10 M.-% Restfeuchte rd. 132 kWh/t.

Eine Möglichkeit, den hohen Wassereinsatz sowie den Energieeinsatz zur Trocknung des feuchten Hüttensandes zu vermeiden, besteht in der trockenen Zerteilung und schnellstmöglichen Abkühlung ("Abschreckung") der flüssigen Schlacke. Die zwingende Voraussetzung für die Einführung eines solchen alternativen Verfahrens ist, dass ein trockenes Produkt mit gleichen oder besseren Eigenschaften gegenüber dem herkömmlich bei der Nassgranulation erzeugten Hüttensand entsteht. Dies gilt im Besonderen für den Glasgehalt (Ziel > 95 Vol.-%), der eine wesentliche Einflussgröße für die Reaktivität und damit die Qualität des Hüttensandes darstellt. Diese Faktoren wirken sich unmittelbar auf die Festigkeit der damit hergestellten Zemente und Betone aus. Der geforderte Glasgehalt kann aber nur durch eine schlagartige Abkühlung unter die Transformationstemperatur von ca. 900 °C realisiert werden. Dies ist beim wasserfreien Abschrecken der flüssigen Hochofenschlacke um ein vielfaches schwieriger als bei der konventionellen Wassergranulation, da hier mit großem Wasserüberschuss die Transformationstemperatur schnell erreicht und unterschritten wird.

Im Gegensatz hierzu ist bei einer wasserfreien Trockengranulation die Trocknung des entstehenden Produkts überflüssig. Allein hierdurch kann überschlägig im Vergleich zu einer Tonne nass granulierten Hüttensands eine CO₂-Verringerung von ca. 30 kg/t angesetzt werden. Bei einer für FORWÄRTS 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 die damit verbundenen CO₂-Emissionen in erheblichem Maße vermieden werden.

In der Vergangenheit sind verschiedene Verfahren zur Trockengranulation von Eisenhüttenschlacken und auch zur Wärmerückgewinnung aus den schmelzflüssigen Schlacken in der Literatur vorgestellt und auch patentiert worden. Betrieblich wird bis heute weltweit KEINES dieser Verfahren für die Abschreckung zur Erzeugung einer glasigen Hochofenschlacke genutzt.

Die Entwicklung eines Verfahrens zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke unter dem Aspekt der Wärmerückgewinnung wird durch die Tatsache begünstigt, dass PTAT bzw.

die darin aufgegangenen Unternehmensteile von British Steel (heute TataSteel) / Davy bereits zwei Forschungsprojekte für die Trockengranulation von Schlacke, jedoch OHNE den Aspekt der Wärmerückgewinnung, verfolgt hatten. Diese basierten beide auf dem Zerteilen der flüssigen Hochofenschlacke durch eine rotierende Scheibe ("Rotating Cup" oder Davy-Verfahren) und Abkühlung durch große Luftmengen unter Umgebungsbedingungen. D.h. durch die großen Luftmengen wurden während der trockenen Granulation KEINE erhöhten Ablufttemperaturen erreicht, die Granulation fand unter Umgebungsbedingungen statt, wodurch das Potential für eine Wärmerückgewinnung nicht gegeben war.

Diese zwei Forschungsprojekte zeigten, dass Schlacke trocken zu einem absatzfähigen Portlandzementklinker-Substitut granuliert werden kann, wenn die blitzartige Abkühlung der Schlacke unter die Transformationstemperatur von $\sim 900^{\circ}\text{C}$ erfolgt.

Die zentrale Fragestellung von FORWÄRTS wird daher sein, wie sich die Produktqualität 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 gesamten Granulationsprozess hat.

2.5 Methode

Das „Rotating Cup“-Verfahren basiert auf der Zerteilung der flüssigen Hochofenschlacke durch einen Drehteller (siehe Abbildung 1). Die so gebildeten flüssigen Schlacketröpfchen müssen schnellstmöglich unter die Transformationstemperatur abgekühlt werden, um ein hüttensandähnliches Schlackegranulat zu erzeugen, das als Portlandzementklinker-Substitut eingesetzt werden kann. Die Abkühlung der Schlackentröpfchen erfolgt durch Luft, die sich durch den Wärmeübergang von Schlacke an Luft erwärmt.

Eine erste Potenzialabschätzung des „Rotating Cup“-Verfahrens unter dem Aspekt der Wärmerückgewinnung zeigt, dass sich aus einem $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ heißen Schlackenmassenstrom von ca. 1 t/min als energetisch gut verwertbares „Produkt“ ein Heißluftstrom von $\sim 125.000\text{ Nm}^3/\text{h}$ mit einer Temperatur von $\sim 600^{\circ}\text{C}$ ergeben würde. Die heiße Abluft kann dabei im geschlossenen Kreislauf über einen Wärmetauscher bzw. Abhitzekeessel geführt werden. Die gewinnbare thermische Energie durch Dampferzeugung entspräche einer Leistung von $\sim 21,5\text{ MW}$ thermisch bzw. $\sim 29\text{ t/h}$ überhitzten Dampf, welcher direkt in das Dampfnetz des Hüttenwerks eingespeist werden kann (siehe Abbildung 1).

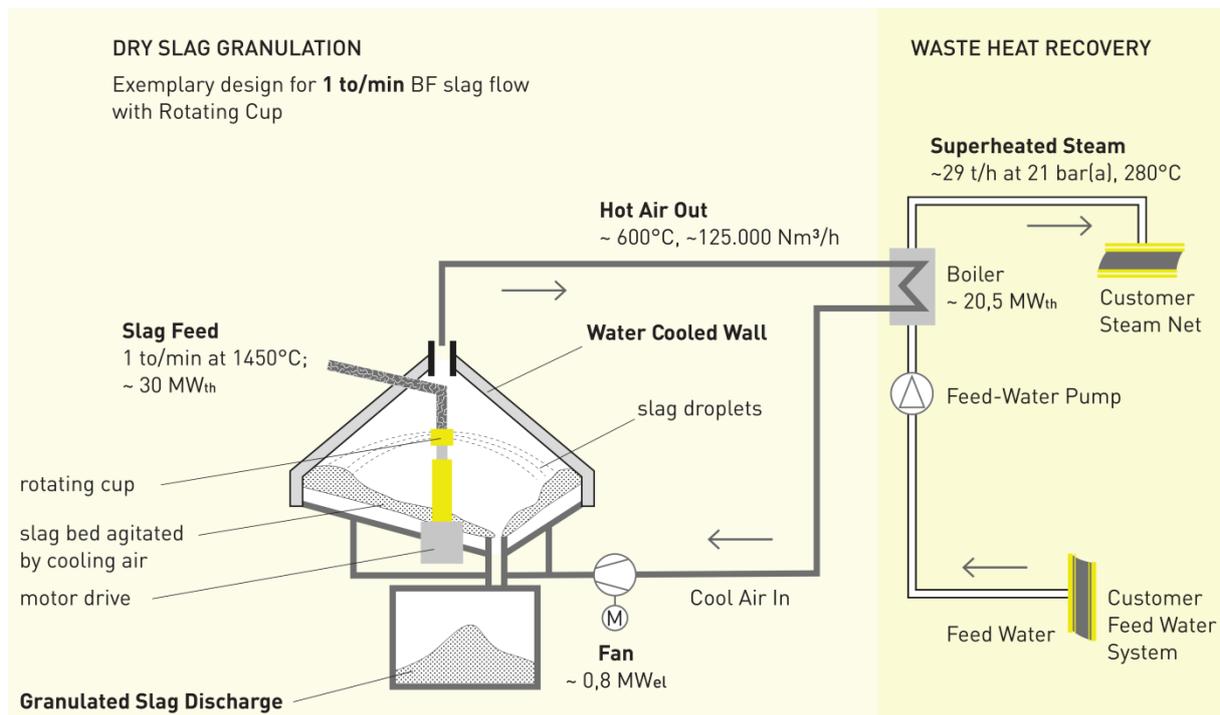


Abbildung 1: Konzept des "Rotating Cup"-Verfahrens. Energetische und Potentialabschätzung der trockenen Granulation von Hochofenschlacke durch das "Rotating Cup"-Verfahren

Durch den unbekanntem Einfluss der erhöhten Lufttemperatur auf den gesamten Granulationsprozess konnte jedoch nicht auf die bisherigen Forschungen von PTAT zum „Rotating Cup“-Verfahrens ohne Wärmerückgewinnung, die um 1990 durchgeführt wurden, aufgebaut werden. Für die Entwicklung eines Verfahrens zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke mit Wärmerückgewinnung musste als erstes neues Grundlagenwissen durch experimentelle und theoretische Arbeiten im Zuge einer Forschungskooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft erworben werden.

Daher wurde im Jahr 2011 eine Kooperation zwischen Siemens Deutschland, Siemens VAI (heute PTAT) MUL und FEhS gebildet, um in einem Verbundvorhaben die Grundlagen zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke unter dem Aspekt der Wärmerückgewinnung zu erarbeiten. Ein Teil dieses Forschungsvorhaben mit dem Titel „Erforschung eines Verfahrens zur trockenen, glasigen Erstarrung von schmelzflüssiger Hochofenschlacke kombiniert mit einer Wärmerückgewinnung – DSG“ wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über den Projektträger Jülich (PTJ) öffentlich gefördert. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde zunächst eine Vielzahl an Schmelzversuchen im Labor des FEhS – Instituts durchgeführt. Die Resultate der unterschiedlichen Temperaturen, Rotationsgeschwindigkeiten und Drehtellerkonstruktionen waren u.a. die Basis für die Simulationsmodelle von Siemens, um den Granulationsprozess in größeren Maßstäben abbilden zu können.

An der MUL wurde ein Versuchstand errichtet, um in mengenmäßig größeren experimentellen Untersuchungen die Funktionalität des Verfahrens nachzuweisen. Sowohl die Simulationsergebnisse als auch die ersten experimentellen Versuchsergebnisse mit dem Versuchstand sind vielversprechend, jedoch standen für einen Versuch an der MUL maximal 300 kg flüssige Schlacke zur Verfügung, wodurch die Versuchszeit auf einige Minuten beschränkt war. Die bisherigen Ergebnisse zeigten dennoch schon sehr erfolgreich auf, dass das Prinzip des „Rotating-Cup“ unter dem Aspekt der Wärmerückgewinnung kurzzeitig funktioniert. Aber die in weiterer Folge wichtigen und essenziellen Langzeitversuche konnten am Versuchstand aufgrund der begrenzten Hochofenschlackenmenge nicht durchgeführt werden. Die logische Konsequenz aufgrund der erfolgreichen Grundlagenforschung im Technikumsmaßstab ist die Einbindung der VAS als Stahlwerksbetreiber, um die Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse für die Wirtschaft voranzutreiben und einen Prototypen im semi-industriellen Maßstab zu erreichen.

Für die Markteinführung von industriellen Anlagen zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke mit Wärmerückgewinnung wird ein Zeitrahmen von 1 bis 2 Jahren nach dem Abschluss dieses Forschungsprojektes angestrebt. Durch FORWÄRTS kann eine weltweite CO₂-Reduktion von insgesamt 17 Mio. Tonnen pro Jahr erreicht werden.

2.6 Aufbau der Arbeit

Das Forschungsvorhaben FORWÄRTS wurde in die 6 Arbeitspakete nach **Tabelle 1** unterteilt.

Für detailliertere Informationen zu den Arbeitspaketen siehe Kapitel 3.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

AP Nr.	AP Titel
1	Gesamtkonzept und Methode
2	Versuchsstandaufbau
3	Versuchsdurchführung
4	Auswertung
5	Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung
6	Projektmanagement

2.7 Innovationsgehalt

Die Innovationen von FORWÄRTS werden im Folgenden zusammengefasst:

- Versprühen/Zerstäuben für versch. Schlackenzusammensetzungen und -temperaturen
- ausreichend hoher glasiger Anteil des erzeugten Schlackeprodukts

- hohe Ablufttemperatur
- Reduktion von Falschluff
- Konstruktion eines geeigneten Granulat-Austragemechanismus
- effizientes Wärmerückgewinnungssystem erarbeiten

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen wird auf dem Versprühen/Zerstäuben der Schlacke am „Rotating Cup“ liegen. Ziel ist es, für die vorherrschende Schlackenzusammensetzungen und -temperaturen geeignete Bedingungen für die Granulation zu erforschen. Wesentliche Parameter, die dabei variiert werden können, sind der Schlackenmassenstrom und die Cupdrehzahl. Aber auch alternative geometrische Formen für den „Rotating Cup“ sind angedacht.

Entscheidend für eine erfolgreiche Granulation ist der Geschwindigkeitsvektor und die Form und Größe der sich ausbildenden Partikel beim Verlassen des „Cups“. Während der Flugphase der Partikel muss ein ausreichender Wärmeübergang gewährleistet werden, damit die erstarrte Hülle der Schlackepartikel beim Auftreffen auf die Granulatorwand nicht aufbricht. Ein Aufplatzen der Partikel an der Wand des Granulators würde zu Anbackungen führen, wodurch der Granulatorbetrieb eingeschränkt oder für Reinigungs- und Wartungsarbeiten unterbrochen werden müsste. Dies hätte auch einen Stillstand für die Wärmerückgewinnung zur Folge, wodurch sich langwierige An- und Abfahrprozeduren und Versorgungsengpässe bei den Abnehmern der Wärmerückgewinnung ergeben würden. Deshalb dürfen die Partikel eine bestimmte Größe nicht überschreiten, da der Wärmeübergang sonst nicht ausreichen würde, um das Aufplatzen an der Wand zu verhindern.

Eine wichtige Eigenschaft der Schlacke für ihr Granulationsverhalten ist die Basizität, da diese (neben der Temperatur) einen großen Einfluss auf die Viskosität der Schlacke hat. Die Vermutung liegt nahe, dass bei einem Überschreiten bzw. Unterschreiten von Basizitätswerten keine akzeptable Granulation der Schlacke mehr möglich ist. Diese Grenzen müssen im Zuge der experimentellen Untersuchungen ermittelt werden. Ein weiterer Punkt, der während der experimentellen Arbeiten genauer betrachtet werden muss, ist der Austrag des granulierten Materials aus dem Granulator. Besonderes Augenmerk muss hier auf die Füllstandregelung bzw. kontinuierliche Massenflussregelung des trockenen Granulats und das Vermeiden von großen Falschluffmengen über die Austragsöffnung gelegt werden.

Ein wesentlicher Forschungsbeitrag werden auch die zementtechnischen Untersuchungen des trockenen Schlackeprodukts sein. Das Schlackeprodukt muss z.B. einen ausreichend hohen glasigen Anteil besitzen, um ein für die Zementindustrie geeignetes Produkt zu liefern. Bei Nichterfüllung der geforderten zementtechnischen Eigenschaften könnte dies das Scheitern des Trockengranulationsverfahrens bedeuten.

Schlussendlich soll nach Erfüllung der oben erwähnten Bedingungen der Fokus auf das Wärmerückgewinnungspotential gelegt werden. Ziel ist es, eine möglichst hohe Ablufttemperatur zu erreichen, da dies einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der verschiedenen nachfolgenden thermischen Prozesse hat. Eine hohe Ablufttemperatur kann vorwiegend durch eine Verringerung des Kühlluftmassenstromes erreicht werden. Dies birgt aber die Gefahr, dass auf Grund der hohen Lufttemperaturen keine ausreichende Kühlung der Schlackepartikel während der ersten Flugphase stattfindet und somit die Partikel an der Granulatorwand anpacken oder die nötigen Produkteigenschaften (Glasgehalt, zementtechnische Reaktivität) durch zu geringe Kühlung nicht erreicht werden. Auch hier werden aller Voraussicht nach Grenzwerte für einen minimalen Kühlluftmassenstrom auftreten, die für verschiedene Schlackezusammensetzungen und -massenströme im Zuge der experimentellen Untersuchungen zu ermitteln sind.

Eine Analyse des Abgases wird Aufschluss auf dessen Zusammensetzung geben. Von großem Interesse ist der anfallende Staubgehalt im Abgas, der während des Granulationsprozesses von der Luft mittransportiert wird, aber auch ein möglicher SO₂-Gehalt, der durch den Granulationsprozess im Abgas entstehen könnte. Anhand der Ergebnisse aus der Abgasanalyse, dem Luftmassenstrom und der Abgastemperatur können die Potenziale der nachfolgenden thermischen Prozesse (z.B. Dampferzeuger) aufgezeigt werden und die Notwendigkeit von Abgasbehandlungssysteme eruiert werden.

3 Inhaltliche Darstellung

Nachfolgend werden die Arbeitspakete von FORWÄRTS näher beschrieben.

3.1 Arbeitspaket 1: Gesamtkonzept und Methode

3.1.1 Ziele

- Entwicklung eines Scale-Up-Modells
- Erstellen eines Gesamtkonzeptes für den Prototypen
- Kalkulation von Prozessparametern
- Verfahrenstechnische Auslegung des Versuchsstandes; Konstruktionsmodell des Versuchsstandes
- Mess- und Regeltechnikkonzept
- Organisation und Auslegung der Medienversorgung am Versuchstand
- Entwicklung des Konzepts für einen Granulator inkl. Wärmerückgewinnung im industriellen Maßstab

3.1.2 Beschreibung der Inhalte

Basis für den Start des Projektes FORWÄRTS war die genaue Festlegung der Anlagengröße/kapazität und die Dauer, mit der die Versuche durchgeführt werden sollen, sein. Für den Prototypen müssen basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenforschung des Vorprojekts „DSG“ technische Berechnungen zur Auslegung durchgeführt werden, um anschließend ein Konstruktionsmodell auszuarbeiten. Die Berechnungen werden unter anderem auch zeigen, wie groß die Massen/Volumenströme der benötigten Medien ausfallen werden. Die Medienversorgung des Versuchsstandes muss einerseits durch bauliche Maßnahmen (Dimensionierung Gebläse, Schlackenrinne), andererseits durch organisatorische Maßnahmen (Schlacketransport zum Granulator, Erdgasversorgung etc.) sichergestellt werden.

Durch die zunächst angedachte geänderte Schlackeanlieferung über Schlackenpfannen zum Versuchsstand ist eine Methodik zu generieren, die den Ansprüchen der Versorgung des Granulators gerecht wird. Basierend auf den Forschungsergebnissen wird weiters ein Konzept für eine Anlage im industriellen Maßstab erarbeitet werden.

3.2 Arbeitspaket 2: Versuchsstandaufbau

3.2.1 Ziele

- Fertigung des Granulators; Aufbau und Komplettierung des Versuchsstandes
- Fertigungs- und Bauüberwachung

- Sicherstellung der Medienversorgung des Versuchstandes
- Einbinden der Mess- und Regeltechnik
- Wärmerückgewinnungsanbindung
- Funktionstest des Versuchstandes im „KALTEN“ Zustand
- Funktionstest des flüssigen Schlackehandlings
- Anlage in betriebsbereiten Zustand setzen

3.2.2 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 betriebsbereiten 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 Scale-Up-Granulator (Metallbau etc.). Der Prototyp wird so konzipiert und implementiert, dass er den sicherheitstechnischen Standards einer Industrieanlage genügt und den robusten Anforderungen des Hüttenwerks standhält. Die entsprechende Infrastruktur ist für den Betrieb des Prototypen im Hüttenwerk anzupassen.

3.3 Arbeitspaket 3: Versuchsdurchführung

3.3.1 Ziele

- Erfolgreicher Betrieb der Versuchsanlage
- Durchführung von mindestens 4 Versuchskampagnen
- Abschluss der Kampagnen mit hoher Erfolgsquote hinsichtlich der Projektziele

3.3.2 Beschreibung der Inhalte

Geplant ist die Durchführung von 4 Versuchskampagnen. Erst nach Absolvierung der ersten Granulationsversuche kann die Anzahl der Granuliersversuche pro Tag bzw. pro Kampagne genau kalkuliert werden.

Ein Granuliersversuch wird folgende Haupttätigkeiten beinhalten:

- Einstellen von Anlagenparameter
- 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 Prozessparameter für nachfolgende Versuche
- Optimierung des Granulationsprozesses

3.4 Arbeitspaket 4: Auswertung

3.4.1 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

3.4.2 Beschreibung der Inhalte

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. 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 der Ablufttemperatur. 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. Im Abschlussbericht erfolgt eine detaillierte Zusammenfassung und Erläuterung der Ergebnisse.

3.5 Arbeitspaket 5: Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung

3.5.1 Ziele

- Erarbeitung und Durchführung eines Disseminationsplanes
- Verfassung, Publikation und Präsentation wissenschaftlicher Ergebnisse
- Vorbereitung der Verwertung 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.

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" oder "European Slag Conference".

- Vorträge bei Siemens-internen Veranstaltungen, wie z.B. Siemens Product Line Day

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

3.6.2 Beschreibung der Inhalte

Die Hauptaufgaben der Projektkoordination sind die Abstimmung mit den Team-MitgliederInnen, 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.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Zuge des Projektverlaufs zeigte sich, dass die Umsetzung des AP 1 arbeits- und zeitintensiver ist als ursprünglich angenommen.

Durch die Festlegung des endgültigen Anlagenstandorts am Hochofen A mit direkter Schlackenversorgung über ein Rinnensystem vom Hochofenabstich wurde Ende 2014 die Entscheidung getroffen, die Kapazität der Prototyp-Versuchsanlage von ursprünglich 1 t/min Schlackenfluss auf die doppelte Kapazität von 2 t/min Schlackenfluss anzupassen.

Diese neue Schlackenkapazität von 2 t/min entspricht dem durchschnittlichen Schlackenfluss eines Abstichs am Hochofen A. Dadurch wird durch die im bereits großtechnischen Maßstab durchgeführten Versuche direkt auf eine industrielle Nutzbarkeit des Verfahrens rückgeschlossen werden können.

Die Kapazitätsanpassung hatte jedoch zur Folge, dass die verfahrenstechnische Auslegung und das Einplanungsmodell entsprechend angepasst und überarbeitet werden mussten. Die darauf folgende Erarbeitung des Konstruktionsmodells und der Detailengineering Unterlagen stellte das Konsortium jedoch vor größere Herausforderungen als ursprünglich angenommen und nahm schlussendlich mehr Zeit in Anspruch als geplant.

Bis zum Ende der FORWÄRTS-Projektlaufzeit konnten die ursprünglich in Kapitel 3 definierten Arbeitspakete nicht vollständig fertiggestellt werden. Tabelle 2 zeigt einen Überblick des Fertigstellungsgrads der Arbeitspakete innerhalb der FORWÄRTS-Projektlaufzeit.

Tabelle 2: Fertigstellungsgrad der ursprünglich definierten Arbeitspakete bis zum Ende der FORWÄRTS Projektlaufzeit

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad
1	Gesamtkonzept und Methode	95%
2	Versuchsaufbau	5%
3	Versuchsdurchführung	0%
4	Auswertung	15%
5	Wissenschaftliche Verbreitung und Verwertung	50%
6	Projektmanagement	50%

Im Folgenden werden auszugsweise die innerhalb des FORWÄRTS-Berichtszeitraums erarbeiteten Ergebnisse aus AP 1 und AP 4 dargestellt.

4.1 Ergebnisse zu Arbeitspaket 1

4.1.1 Wirbelschicht-Versuchsanlage an der MUL

Mit Projektstart erfolgte die Planung einer kleinen Wirbelschichtanlage (vergleiche Abbildung 2), welche am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der MUL errichtet und betrieben werden soll. Ziel war in einem ersten Schritt die Messung des Druckverlustes einer gasdurchströmten Schüttung, welche aus trocken granulierter Schlacke gebildet wird. Dabei sollen möglichst genau die Prozessbedingungen nachgebildet werden, die sich in späterer Folge auch in der Prototyp-Versuchsanlage wiederfinden. In dem in Kapitel 2.5 diskutierten Vorgängerprojekt konnte bereits im Technikumsmaßstab Schlacke trocken granuliert werden.

Hinsichtlich Korngröße und Kornhabitus eignet sich dieses Material hervorragend für die weiteren Untersuchungen. Die Wirbelschicht-Versuchsanlage wurde so konzipiert, dass nicht nur der Druckverlust, sondern auch die Abkühlung der einzelnen Partikelschichten gemessen und anschließend analysiert werden kann.

Nach sorgfältiger Planung konnte der Messaufbau mit an der Montanuniversität vorhandenem Material erfolgen und in Betrieb genommen werden. Die Anlage besteht aus einer Regelstrecke mit der Luft in das System eingebracht wird. Hierbei können verschiedenste Betriebsbedingungen eingestellt und nachgebildet werden.

Im Hauptaggregat befindet sich die trocken granuliert Hochfenschlacke (Abbildung 3). Diese kann je nach Anwendungsfall über Heißluft direkt vorgewärmt werden. Die Messdatenerfassung registriert über einzelne Sensoren alle wichtigen Drücke und Temperaturen, die später zur Datenauswertung benötigt werden.

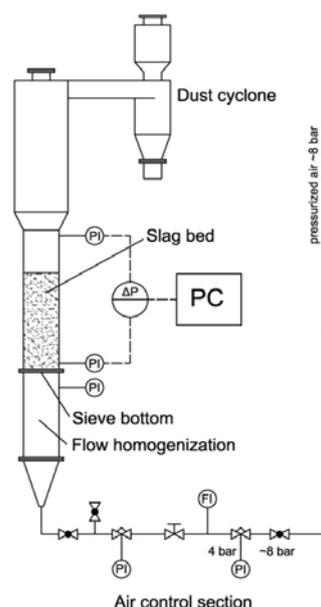


Abbildung 2: Schema der Wirbelschichtanlage an der MUL



Abbildung 3: Wirbelschicht-Versuchsanlage

Die Beheizung des Systems erfolgt über einen Widerstandsofen, der die Luft auf die gewünschte Temperatur bringt.

Mit Hilfe dieses Versuchsaufbaus konnten zahlreiche Messungen hinsichtlich des Druckverlusts gasdurchströmter Schlackenschüttungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Wirbelschicht-Versuchsanlage wurden schlussendlich für die verfahrenstechnische Auslegung des Prototypen verwendet.

4.1.2 Untersuchung des Anlagenstandorts und Einplanung der Prototypanlage

In Zuge von AP 1 wurden drei mögliche Standorte für den Prototyp am Gelände der VAS in Linz untersucht.

4.1.2.1 Aufstellung des Prototypen bei den Schlackenbeeten

Dies hat zur Folge, dass die schmelzflüssige Schlacke mit Schlackenkübel über das Eisenbahnnetz vom Hochofen zur Versuchsanlage transportiert werden muss (vergleiche Abbildung 4 und Abbildung 5).



Abbildung 4: Schlackenbeete VASL



Abbildung 5: Transportroute Hochofen-Schlackenbeet

Für die Untersuchung des Anlagenstandorts am Schlackenbeet, wurden Schlackentemperatur-Messkampagnen durchgeführt, um die Temperaturverluste der Schlacke durch den Transport in Schlackenkübeln zu untersuchen, da durch eine zu geringe Temperatur der Schlacke ein qualitativer Granulationsprozess nicht gewährleistet werden könnte (geringe Produktqualität).

Insgesamt wurden drei Schlackentemperatur-Messkampagnen am Gelände der VAS durchgeführt.

- Messkampagne 01 (27.03.2013)

In Zuge von Messkampagne 01 erfolgten Schlackentemperatur-Messungen in denen von der VAS verwendeten Schlackenkübeln, um die Abkühlung der Schlacke während des Transportes vom Hochofen zu den Schlackenbeeten zu erfassen (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Temperaturmessungen in einem Schlackenkübel

Des Weiteren wurde erprobt, ob ein langsames und geregeltes Abkippen aus der Schlackenpfanne in das Schlackenbeet überhaupt möglich sei. Dies ist in späterer Folge wichtig für die Regulierung des Schlackenflusses in die Versuchsanlage (vergleiche Abbildung 7).



Abbildung 7: Abkippen der Schlacke aus dem Schlackenkübel

Weiters wurde ein Kübeldeckel für den Transport der Schlackenkübel verwendet, um die Temperaturverluste der Schlacke zu minimieren (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Abheben des Deckels von dem Schlackenkübel

Die Ergebnisse der Messkampagne 01 waren nicht zufriedenstellend. Es kam zu einer massiven Deckelbildung auf den Schlackenkübeln, wodurch ein kontrolliertes Auskippen der Schlacke erschwert wurde. Auch der Einsatz von Reisasche, welche die Deckelbildung verhindern soll, brachte nur unwesentlich bessere Ergebnisse. Weiters lag die Schlackentemperatur weit unter der beim Eintreffen am Beet erwarteten Minimaltemperatur von $\sim 1400^{\circ}\text{C}$. Es konnte auch kein signifikanter Unterschied der Schlackentemperatur bei der Abdeckung des Schlackenkübeln mit einem Deckel festgestellt werden.

- Messkampagne 02 (30.07.2013)

Für die Messkampagne 02 wurde ein neuer Deckel für den Schlackenkübel gefertigt und ein bestehender VAS-Schlackenkübel mit Feuerfestmaterial ausgekleidet. Dieser modifizierte Schlackenkübel konnte an den bestehenden Torpedo - Brennerständen der VAS auf $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ Oberflächentemperatur des Feuerfestmaterials aufgeheizt werden (siehe Abbildung 8). Dadurch sollten die Temperaturverluste der Schlacke beim Transport des Schlackenkübeln zu den Schlackenbeeten reduziert werden.

Die Schlackentemperatur mit dem modifizierten Schlackenkübel lag wieder unter der notwendigen Minimaltemperatur von $\sim 1400^{\circ}\text{C}$. Die aufwendige Modifikation und Vorwärmung des Schlackenkübeln ergab keine signifikante Schlackentemperatur-Erhöhung im Vergleich zur Messkampagne 01.



Abbildung 9: Modifizierte Schlackenkübel-Zustellung mit Feuerfestmaterial (links) und Aufheizung an bestehendem Torpedo – Brennerstand (rechts)

- Messkampagne 03 (17.09.2013)

Die Versuchsergebnisse der Messkampagnen 01 und 02 legten nahe, dass die Schlacke den größten Temperaturverlust bereits beim Befüllen der Schlackenkübel erfährt. Durch die baulichen Gegebenheiten fällt die Schlacke ca. 8 m im freien Fall von der Hochofen-Gießhalle in die Schlackenkübel.

Schlacketemperatur-Messungen mittels Pyrometer in der Schlackenrinne der Hochöfen # A und #5 im Zuge der Messkampagne 03 bestätigten, dass die Schlacke durch den freien Fall in die Schlackenkübel ~ 100 – 150°C verliert und somit beim Verlassen des Hochofenstandorts schon unter der Minimaltemperatur von ~1400°C liegt (siehe Abbildung 10).

Durch den Nachweis der zu niedrigen Schlackentemperaturen durch das Schlackenkübelhandling konnten die Schlackenbeete im September 2013 als Anlagenstandort ausgeschlossen werden.



Abbildung 10: Schlacketemperatur-Messung in der Schlackenrinne am Hochofen #A

4.1.2.2 Aufstellung der Pilotanlage im Bereich der Hochofenanlage #A und Hochofenanlage # 5 und # 6

Die Ergebnisse der drei Schlackenkübel-Messkampagnen zeigte, dass eine Schlackenversorgung direkt über ein Rinnensystem vom Hochofenabstich zur Versuchsanlage benötigt wird, um die Temperaturverluste der Schlacke gering zu halten (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).



Abbildung 11: VAS Hochöfen # 5 und # 6

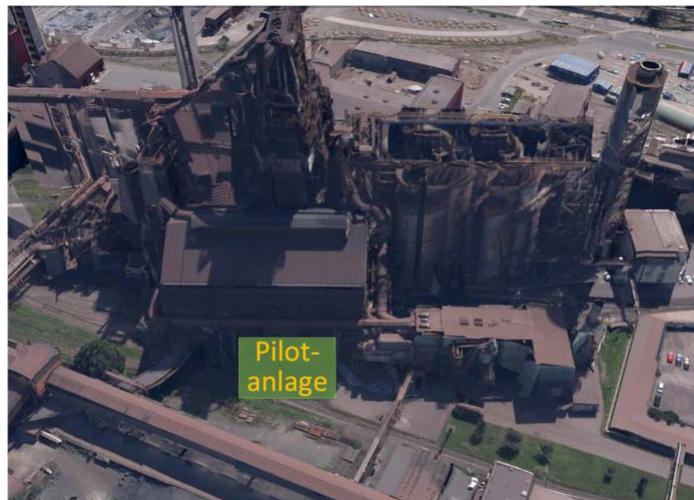


Abbildung 12: VAS Hochofen # A

Im Oktober 2013 begannen die Untersuchungen des Anlagenstandorts am Hochofen # A bzw. an den Hochöfen # 5 und # 6. Auf Grund der Platzverhältnisse konnten die Hochöfen # 5 und # 6 als Anlagenstandort ausgeschlossen werden.

Die Untersuchungen des Anlagenstandorts Hochofen # A zeigten, dass das Notgießbeet an der Nordhalle die idealen Voraussetzungen für die Errichtung des Prototypen bietet. Im Herbst 2013 wurde offiziell entschieden, dass der Prototyp im Notgießbeet des Hochofen #A (Nordhalle) errichtet wird (siehe hierzu Abbildung 13 und Abbildung 14).

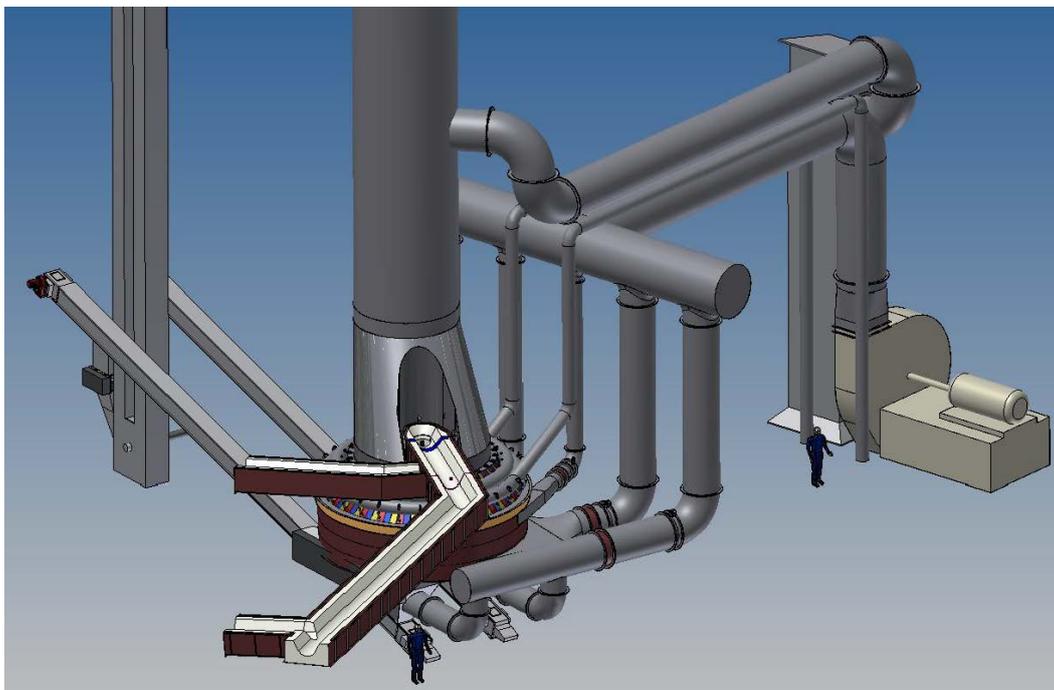


Abbildung 13: 3D Model Prototyp Versuchsanlage für den Anlagenstandort Nordhalle Notgießbeet des Hochofens #A (Stand Februar 2014)

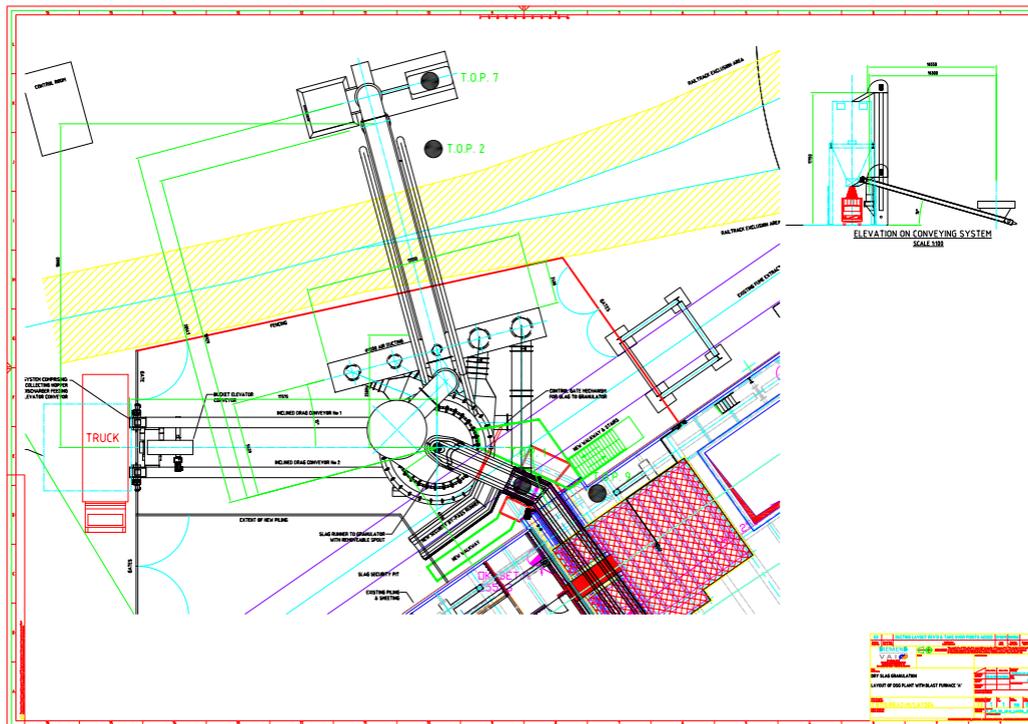


Abbildung 14: Layout Entwurf Prototyp-Versuchsanlage für Anlagenstandort Nordhalle Notgießbeet des Hochofens #A (Stand Februar 2014)

4.1.3 Schlackenfluss-Regelung für die Versuchsanlage

Das ursprüngliche Konzept für die Prototypanlage sah eine Maximalkapazität von ~1 t/min Schlackenfluss vor. Der durchschnittliche Schlackenfluss des Hochofens A beträgt jedoch ~2 t/min mit Peak Flows bis zu ~6 t/min.

Durch die direkte Schlackenversorgung des Prototypen über die Schlackenrinne des Hochofens #A musste daher ein Konzept für die Einregulierung der Schlackenmenge erarbeitet und getestet werden. Über einen Schlackenstaustein soll ein definierter Schlackenfluss zum Prototypen geleitet werden. Der Schlackenüberschuss soll in das bestehende Schlackenkübelssystem abgeleitet werden (siehe Abbildung 15).

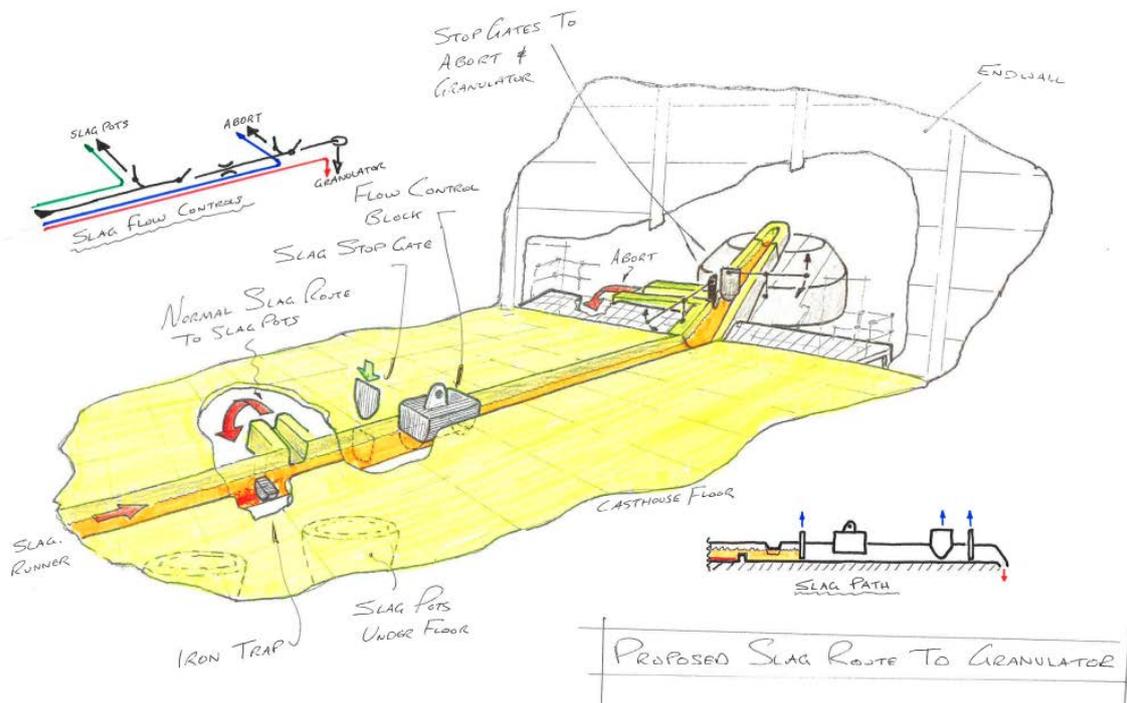


Abbildung 15: Konzept Schlackenstromregulierung für den Prototypen am Hochofen #A

An die Planung anschließend erfolgte die Durchführung eines Versuches, bei dem die Schlacke direkt vom Hochofen #A über einen Schlackenstaustein mengenmäßig begrenzt wurde (vergleiche Abbildung 16).



Abbildung 16: Schlackenstromregulierung mit Schlackenstaustein am Hochofen #A

Der Versuch der Schlackenstromregelung am 29.01.2014 zeigte, dass das erarbeitete Konzept eine funktionierende Lösung ist. Lediglich die Dimension des Lochsteins muss durch weiterführende Berechnungen und Versuche angepasst werden.

Die Versuche zur Schlackenstromregelung zeigten weiters, dass die Temperaturverluste der Schlacke gering gehalten werden können.

4.1.4 3D Konstruktionsmodell und Detail-Engineering

Die verfahrenstechnische Auslegung und Einplanung der Prototyp-Versuchsanlage für die erhöhte Schlackenfluss-Kapazität von 2 t/min wurde Mitte 2015 abgeschlossen.

Bis zum Projektende von FORWÄRTS konnten das Detail-Engineering zu 95% abgeschlossen werden.

Dies beinhaltet folgende Engineering Pakete:

- Schlackenrinnensystem
- Luftleitungssystem
- Granulator
 - Abzugshaube
 - Wassergekühlte Wand
 - Luftgekühlter Boden mit Unterstützungsstruktur
 - Granulatorplattform
 - Drehtellereinheit
- Medienleitungen

Abbildung 17 bis Abbildung 20 zeigen nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Granulator Konstruktionsmodell und den über siebenhundert Detail-Engineering Zeichnungen, die für die Fertigung produziert wurden

Abbildung 21 zeigt das gesamte Konstruktionsmodell der Anlage zum Ende des Berichtszeitraums von FORWÄRTS.

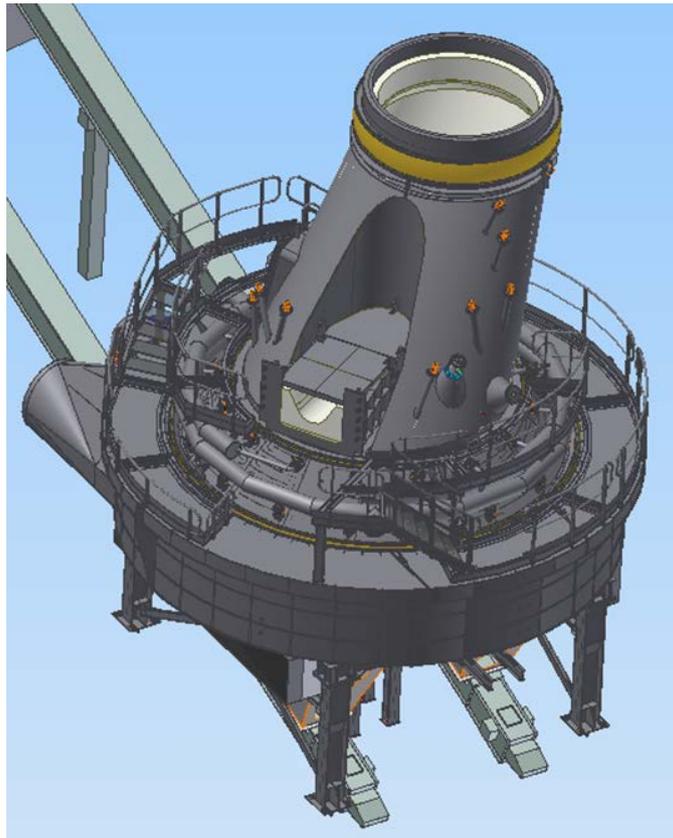


Abbildung 17: Konstruktionsmodell Granulator

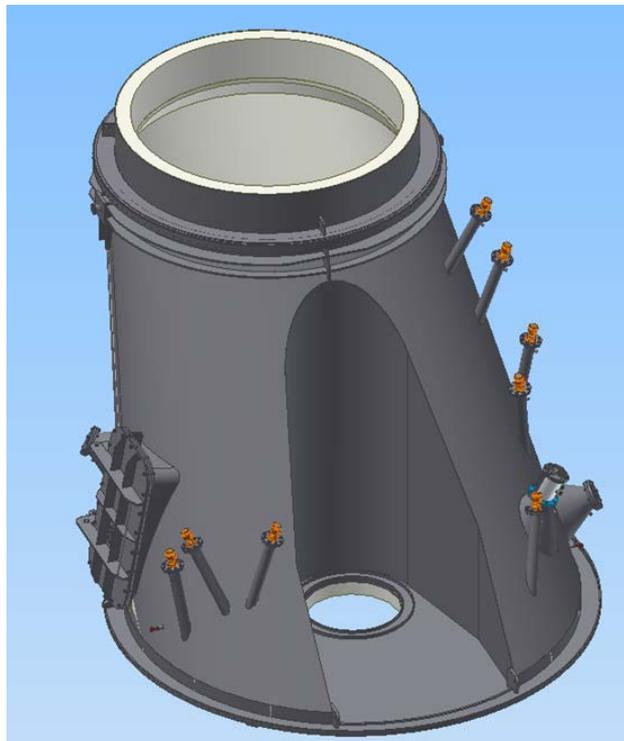


Abbildung 18: Konstruktionsmodell Granulator-Abzugshaube-

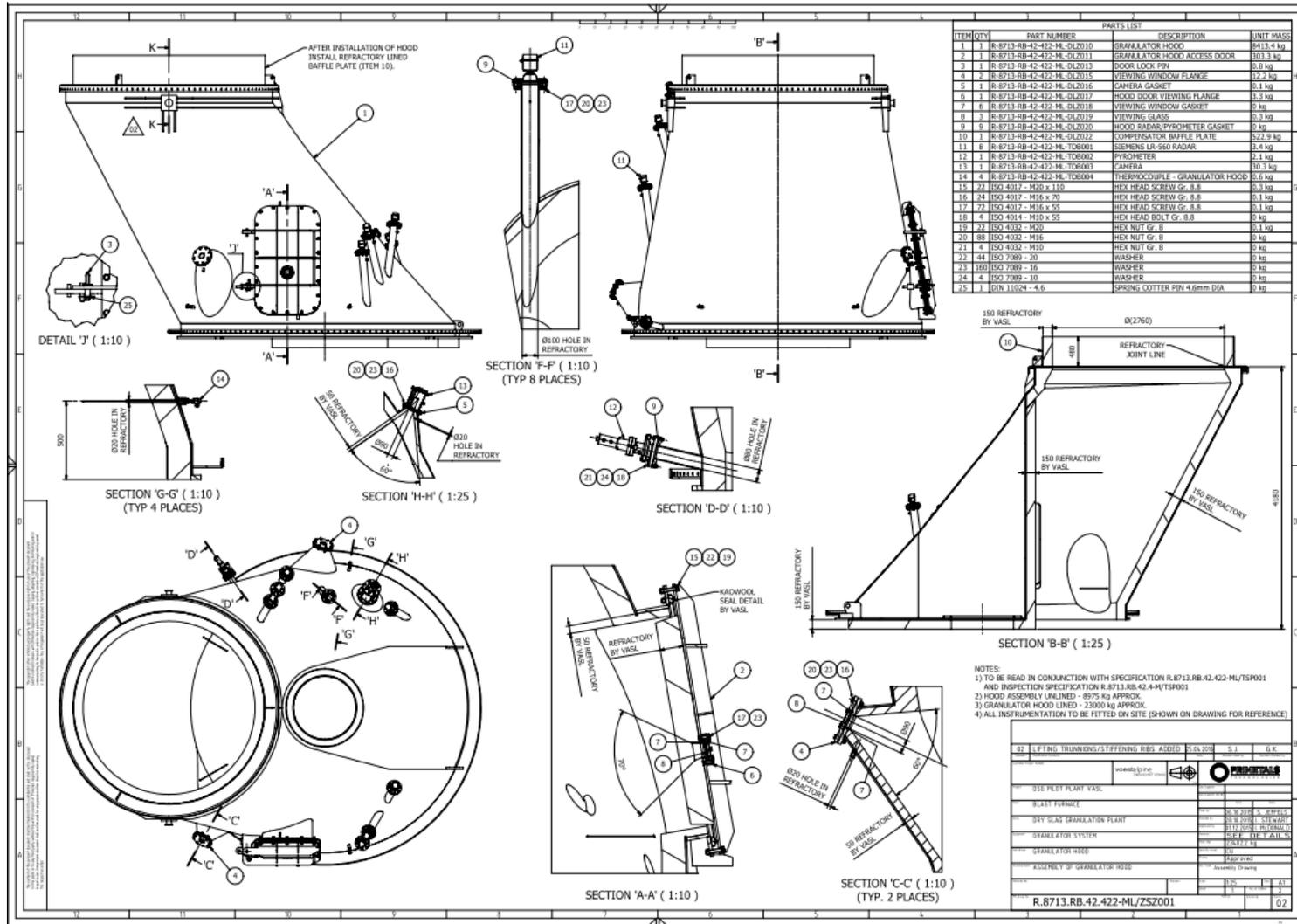


Abbildung 19: Detail-Engineering-Zeichnung Granulator-Abzugshaube

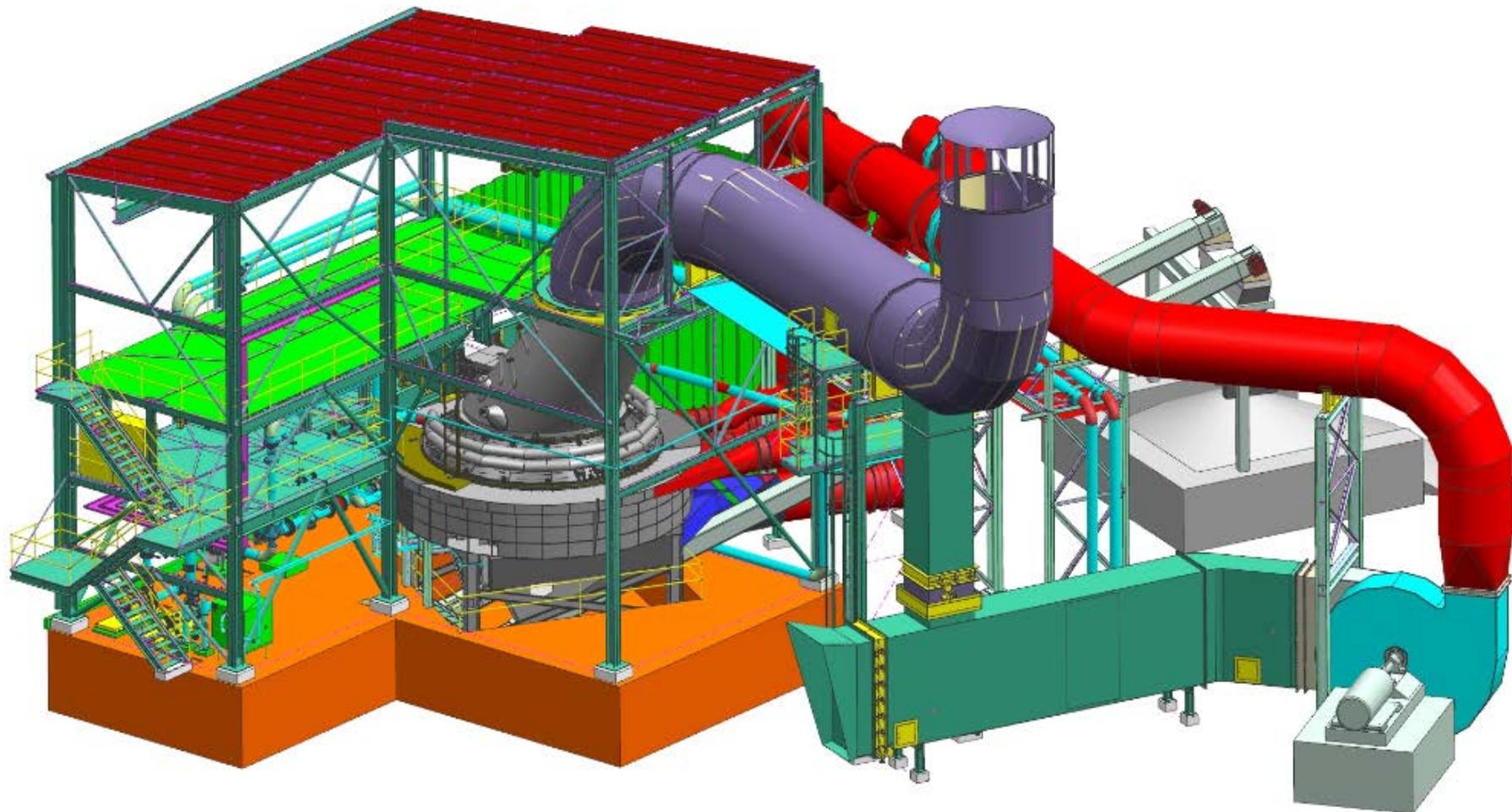


Abbildung 21: Konstruktionsmodell Prototypanlage

4.1.5 CFD Simulation wassergekühlte Wand

Das Strömungsverhalten der wassergekühlten Wand des Granulators wurde mit Hilfe von einer CFD Simulation überprüft.

Die Simulation des ursprünglichen Designs ergab, dass es bei den 180° Umlenkungen zu Ablösungen der Strömung kommt. Mit Hilfe der CFD Simulation wurde das Design mit Umlenkblechen adaptiert, wodurch die Strömung optimiert und das Ablösen der Strömung verhindert wird.

4.1.6 Granulationsversuche bei Swerea MEFOS, Lulea, Schweden

Ziel der Versuche bei Swerea MEFOS waren die Kompetenzerweiterung in Bezug auf Schlackehandling und –flussregulierung sowie Partikelflug und –verteilung. Zusätzlich wurde das Partikelverhalten an einer wassergekühlten Wand betrachtet.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen daraus fließen in weiterer Folge in das Scale-up der Prototyp-Versuchsanlage in Linz ein. Swerea MEFOS in Lulea hat eine bestehende Versuchsanordnung zur trockenen Granulation von Schlacke ohne Wärmerückgewinnung für mehrere Tonnen Schlacke im Einsatz, siehe Abbildung 22.



Abbildung 22: Versuchsstand in Lulea (Schweden)

Eine große Herausforderung bei der Behandlung von Schlacke liegt in der Bereitstellung, in unserem Fall der zentralen Aufbringung eines geregelten Schlackestroms auf den Rotating-Cup. Dies hat in der Vergangenheit schon öfters zu Problemen geführt und war schon Inhalt der durchgeführten Versuche direkt am Hochofen A in Linz (siehe Kapitel 4.1.3).

In Lulea wurde die Möglichkeit genutzt ein Stopfensystem, siehe Abbildung 23, welches über eine Hebevorrichtung gesteuert werden konnte, zu testen. Die Vergleichmäßigung und Regelung des Schlackenflusses stellt einen wichtigen Einflussparameter für die Güte der Granulation dar.



Abbildung 23: Schlackenflussregelung in Lulea (Schweden)

Abgesehen von Schlackenflussregelung konnte auch eine wassergekühlte Wand und das Partikelverhalten beim Auftreffen auf diese betrachtet werden. Dies wurde durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Granulationsvorganges ermöglicht. Zusätzlich wurde der Versuch auch noch fotografiert. Aus diesen Aufnahmen, vergleiche Abbildung 24, kann über die Belichtungszeit unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen auf die Fluggeschwindigkeit der Partikel geschlossen werden.



Abbildung 24: Partikelzerteilung und -flug in Lulea (Schweden)

4.1.7 Behördengenehmigung für den Versuchsbetrieb der Prototypanlage

Für den ordnungsgemäßen Versuchsbetrieb der Prototypanlage am Werksgelände der voestalpine Stahl GmbH in Linz wurde eine Behördengenehmigung der Prototypanlage eingeholt. Hierzu wurden eine entsprechende Projektbeschreibung inklusive der technischen Daten der Anlage und die Einreichpläne erstellt.

Der positive Bescheid für den Versuchsbetrieb der Anlage wurde im Sommer 2015 von der Behörde erteilt.

4.1.8 Abwicklung von Zukaufkomponenten

Für den Zukauf von Anlagenkomponenten und Leistungen, wie Granulator-Fertigung, Fertigung des Luftleitungssystems inklusive Unterstützungskonstruktion, Fertigung des Schlackenrinnensystems inklusive Unterstützungskonstruktion, Fertigung des Austragssystems, Fluid-Equipment, wie Pumpen und Wärmetauscher, Rohrleitungskompensatoren, Montage, Bau, usw. wurden Technische Spezifikationen erstellt.

Diese Zukaufspezifikationen stellten die Basis für die Angebotslegung durch mindestens drei Lieferanten pro Komponente/Leistung dar.

Die Angebote wurden technisch und kaufmännisch evaluiert und auf Basis eines Vergabevorschlags an den Bestbieter vergeben.

Bis zum Ende des Berichtszeitraums wurden ~ 30 % der Anlagenkomponenten bestellt.

Nach der Bestellung ging die Koordination und Schnittstellenabklärung zwischen Lieferanten der Anlagenkomponenten und dem Projektteam nahtlos weiter, um das Detail-Engineering der Prototypanlage zu komplettieren.

4.1.9 Sicherheitsanalyse

Im Herbst 2015 wurde die Sicherheitsanalyse der Prototypanlage durchgeführt. Hierfür wurden in einem einwöchigen Workshop zusammen mit dem Projektteam der Prozess mit den einzelnen Anlagenteile und möglichen Störfallszenarien betrachtet, bewertet und nötige Maßnahmen für die Umsetzung der Prototypanlage festgelegt.

4.2 Ergebnisse zu Arbeitspaket 4

4.2.1 Produktuntersuchungen zu konventionell erzeugten Hüttensand

4.2.1.1 Untersuchungsziele

Neben den Projektzielen im Hinblick auf die verfahrenstechnischen Fragen des Rotating-Cup Verfahrens ist ein wesentliches weiteres Projektziel, dass insbesondere die zementtechnischen Eigenschaften des zu erzeugenden Schlacke-Granulats weitestgehend denen entsprechen, die herkömmlich erzeugte Hüttensande aufweisen. Da die Prototyp-Versuchsanlage an einem Hochofen der voestalpine in Linz realisiert wird ist es demnach

notwendig, zunächst die Eigenschaften der in Linz konventionell durch Nassgranulation erzeugten Hüttensande zu charakterisieren. Da in diesem Projekt unveränderte, betrieblich erzeugte Schlacke verarbeitet wird, dienen die Ergebnisse der Hüttensandcharakterisierung als Referenz für die Eigenschaften des Schlacke-Granulats.

Durch die durch FEhS durchgeführten Untersuchungen kann nach Inbetriebnahme der Prototyp-Versuchsanlage und der Charakterisierung des erzeugten Schlacke-Granulats unmittelbar eine Bewertung von dessen Eigenschaften erfolgen, ohne erst weitere Untersuchungen an Hüttensanden abwarten zu müssen.

4.2.1.2 Untersuchungsergebnisse

Um eine breite Datenbasis zur Verfügung zu haben wurden zu jeweils zwei Terminen Hüttensande der Linzer Hochöfen Nr. 5, 6 und A beprobt und chemisch, physikalisch und zementtechnisch charakterisiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind nachstehend kurz zusammengefasst.

4.2.1.2.1 Kornhabitus

Die nachfolgenden Bilder zeigen die 6 Linzer Hüttensande im Auflichtmikroskop. Bedingt durch erhöhte MnO-Gehalte erscheinen die Hüttensandkörner bräunlich gefärbt. Dies dürfte auch für das trockene Schlacke-Granulat zu erwarten sein.

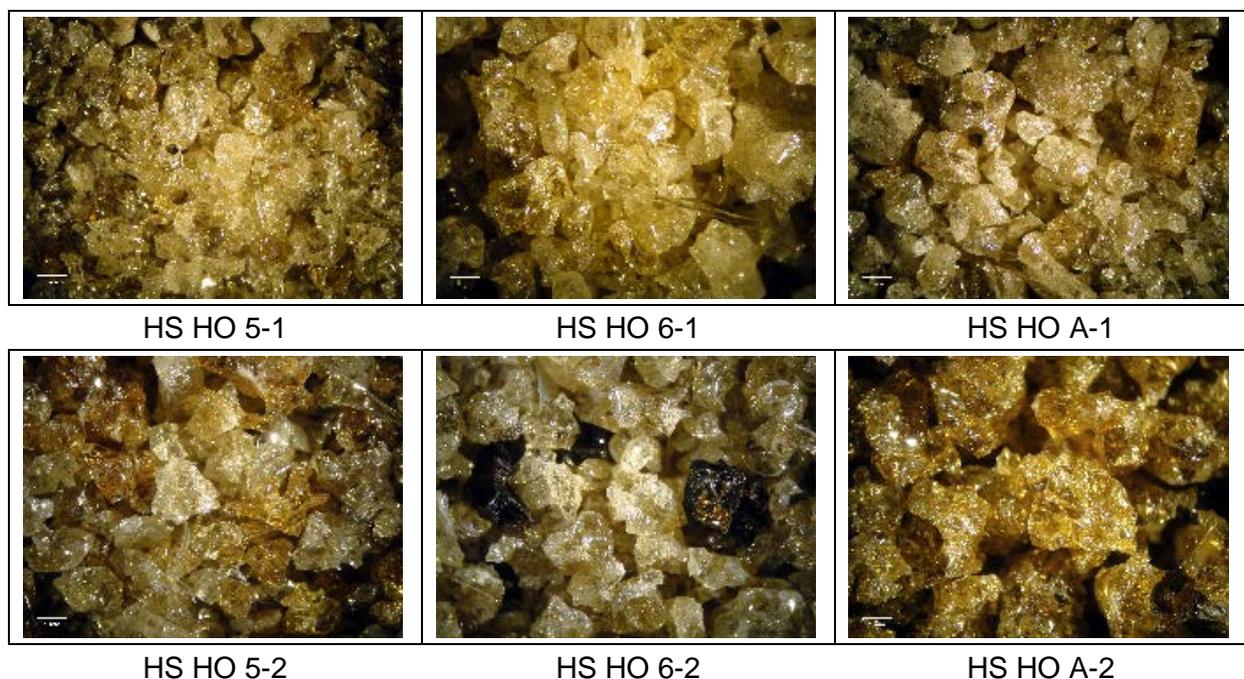


Abbildung 25: Linzer Hüttensande im Auflichtmikroskop

4.2.1.2.2 Glasgehalt

Der Glasgehalt der Hüttensande wurde im Durchlichtmikroskop an der Fraktion 40/63 µm einer vorsichtig gemörserten Durchschnittsprobe durch Bewertung von je rd. 1000 Einzelkörnern ermittelt. In Tabelle 3 sind die Werte zusammengestellt. Sie liegen weit über den Anforderungen der europäischen Zementnorm EN 197-1 und der Norm für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff EN 15167-1 ("2/3").

Tabelle 3: Glasgehalte der Linzer Hüttensande

HS	HO 5-1	HO 6-1	HO A-1	HO 5-2	HO 6-2	HO A-2	
Glas	99,4	99,2	99,7	99,8	99,2	95,0	Vol.-%

4.2.1.2.3 Chemische Zusammensetzung

In Tabelle 4 ist die chemische Zusammensetzung der Linzer Hüttensande aufgeführt.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Linzer Hüttensande

HS	HO 5-1	HO 6-1	HO A-1	HO 5-2	HO 6-2	HO A-2	
Unlöslicher Rückst.	0,27	0,23	0,06	0,27	0,24	0,27	M.-%
SiO ₂	40,0	39,5	38,9	38,8	39,5	39,8	M.-%
Al ₂ O ₃	12,7	11,3	13,3	13,5	12,5	11,3	M.-%
FeO	0,28	0,24	0,27	0,33	0,37	0,50	M.-%
TiO ₂	0,55	0,43	0,45	0,47	0,52	0,45	M.-%
MnO	1,41	1,19	0,86	1,02	1,43	1,25	M.-%
CaO	36,0	37,2	36,5	36,0	35,7	36,1	M.-%
MgO	7,29	9,22	8,16	8,45	8,42	9,21	M.-%
Na ₂ O	0,27	0,26	0,30	0,20	0,21	0,19	M.-%
K ₂ O	0,97	1,06	0,99	1,02	1,17	0,95	M.-%
Na ₂ O-Äquivalent	0,90	0,95	0,94	0,87	0,97	0,81	M.-%
S _{ges.}	0,79	0,74	0,98	1,12	0,72	0,65	M.-%
SO ₃	0,14	0,13	0,15	0,06	0,04	0,04	M.-%
S ²⁻	0,83	0,70	0,96	1,18	0,70	0,64	M.-%
P ₂ O ₅	0,03	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	M.-%
CO ₂	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	M.-%
H ₂ O	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	M.-%
C+M+S	83,2	86,0	83,5	83,2	83,6	85,1	M.-%
C/S	0,90	0,94	0,94	0,93	0,90	0,91	-
(C+M)/S	1,08	1,18	1,15	1,14	1,12	1,14	-
F-Wert	1,27	1,31	1,37	1,36	1,29	1,27	-

Auffällig sind vergleichsweise hohe Alkali- und MnO-Gehalte sowie eine niedrige Basizität. Die Anforderung von EN 197-1 und 15167-1 ((CaO+MgO)/SiO₂ > 1,0) wird jedoch erfüllt. TiO₂- und S-Gehalte liegen auf niedrigem Niveau. Der Al₂O₃-Gehalt liegt leicht über dem

Durchschnitt vieler europäischer Hüttensande. Die niedrigen Gehalte an chemisch gebundenem CO₂ und H₂O zeigen, dass es sich um frische Proben handelte.

4.2.1.2.4 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften sind von Bedeutung im Hinblick auf das Entwässerungsverhalten, Transport und Lagerung sowie die Mahlbarkeit. Hier dürften die größten Unterschiede zu dem künftigen trockenen Schlacke-Granulat liegen, was vorteilhaft, aber auch nachteilig sein kann.

Auffällig sind die dichte Struktur der Hüttensandkörner (geringe Porosität, hohe Roh- und Schüttdichte) und die für Hüttensand relativ eher gröbere Sieblinie (Tabelle 5).

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften der Linzer Hüttensande

HS	HO 5-1	HO 6-1	HO A-1	HO 5-2	HO 6-2	HO A-2	
Schüttdichte	1,29	1,32	1,25	1,27	1,30	1,36	g/cm ³
Rohdichte	2,76	2,80	2,70	2,83	2,85	2,90	g/cm ³
Reindichte	2,91	2,92	2,90	2,92	2,91	2,92	g/cm ³
Porosität (berechnet)	5,1	4,0	6,9	2,9	1,9	0,6	Vol.-%
Anteil < 3,15 mm	93	90	94	94	89	89	M.-%
Anteil < 1,0 mm	34	28	32	36	26	24	M.-%
Anteil < 0,5 mm	9	6	7	10	8	5	M.-%
Anteil < 0,2 mm	1	1	1	2	2	1	M.-%
Anteil < 0,09 mm	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	M.-%
Anteil < 0,063 mm	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	M.-%

4.2.1.2.5 Mahlbarkeit

Die Mahlbarkeit wurde im Labor nach der Zeiselmethode sowohl an der Fraktion 0,5-1,0 mm als auch an der Originalkörnung ermittelt (Abbildung 26). Geprüft wurden nur die Proben HS HO 5-1, 6-1 und A-1. Es zeigte sich bei allen drei Proben ein hüttensandtypischer Mahlenergiebedarf (kWh/t) zur Einstellung typischer Zementfeinheiten (Abbildung 26 für Fraktion 0,5-1,0 mm). Dabei ist zu beachten, dass die Laborwerte nicht unmittelbar auf Industriemahlanlagen übertragbar sind, sondern in erster Linie relative Vergleiche zulassen.

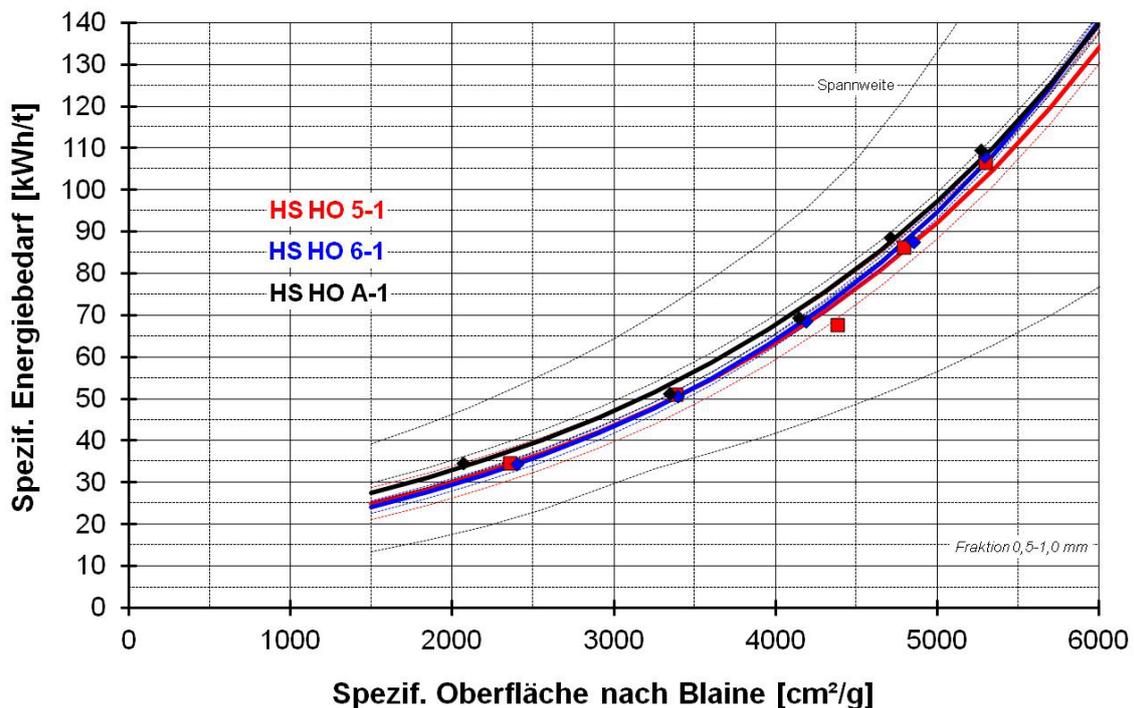


Abbildung 26: Mahlbarkeitskennlinien der Linzer Hüttensande (Zeiseltest), Fraktion 0,5-1,0 mm

4.2.1.2.6 Zementtechnische Eigenschaften

Zur Beurteilung der latent-hydraulischen Eigenschaft wurden die Hüttensande in der Laborkugelmühle auf rd. 4200 cm/g ($d' \approx 17 \mu\text{m}$) gemahlen und anschließend gemäß der standardisierten Vorgehensweise der "Hüttensanddatei" des FEhS-Instituts mit Portlandzementklinker L (4200 cm²/g) und Sulfatträger (4,5 M.-% SO₃) im Verhältnis HS/KL = 75/25 gemischt. Des Weiteren wurden Mischungen aus je 50 M.-% Hüttensandmehl und einem ebenfalls mit Klinker L industriell erzeugten Portlandzement CEM I 42,5 R gemäß DIN EN 15167-1 hergestellt. Mörtel- und Zementleimuntersuchungen erfolgten gemäß DIN EN 196. Die gleiche Vorgehensweise ist für die Untersuchungen an DSG-Pellets geplant.

Die Ergebnisse der zementtechnischen Untersuchungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die Festigkeitsentwicklung insbesondere bei den hüttensandreichen Kombinationen liegt unter derjenigen, die für andere europäische Hüttensande unter sonst gleichen Bedingungen beobachtet wird. Dies ist auf die Kapitel 4.2.1.2.3 diskutierte chemische Zusammensetzung zurückzuführen. Bei den mit großer Sicherheit erfüllten Anforderungen an den Aktivitätsindex nach EN 15167-1 ist zu beachten, dass sich diese auf ein Hüttensandmehl mit einer Mindestfeinheit von nur 2750 cm²/g beziehen.

Tabelle 1: Ergebnisse der zementtechnischen Untersuchungen mit Linzer Hüttensanden

	HO 5-1		HO 6-1		HO A-1		HO 5-2		HO 6-2		HO A-2		
HS/KL (CEM I)	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	75/25	50/50	
S _m (HS)	4220		4410		4210		4300		4120		4100		cm ² /g
d' (HS)	17		17		16		17		18		18		µm
n (HS)	0,84		0,93		0,91		0,83		0,92		0,86		-
Wasseranspr.	25,0	25,5	26,0	27,0	26,0	27,0	25,5	26,0	25,0	27,0	25,0	26,0	M.-%
Erstarren	4:10- 5:05	3:00- 3:50	3:55- 5:25	3:05- 4:00	4:25- 5:20	3:00- 4:10	4:20- 5:55	3:10- 4:10	4:30- 5:35	3:05- 4:25	3:55- 6:00	3:15- 4:15	h:min
Ausbreitmaß	226	228	223	225	227	224	228	228	226	232	229	226	mm
R _{c, 2d}	5,0	14,5	4,9	15,1	6,2	15,5	5,6	13,4	4,4	12,8	4,6	13,6	MPa
R _{c, 7d}	24,0	33,3	25,5	34,3	28,9	36,5	27,2	32,9	22,4	31,2	20,9	31,4	MPa
R _{c, 28d}	40,3	58,9	44,1	58,5	40,8	60,8	40,1	58,9	39,9	55,1	39,9	55,5	MPa
R _{c, 91d}	46,3	67,5	53,7	71,9	49,9	74,8	46,9	69,5	46,8	66,1	46,3	65,3	MPa
Aktiv.-Index 7 d *	-	67	-	69	-	74	-	61	-	58	-	59	%
Aktiv.-Index 28 d *	-	99	-	98	-	102	-	92	-	86	-	86	%

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

4.2.1.3 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Linzer Hüttensande eine im mittel- und westeuropäischen Vergleich unterdurchschnittliche Basizität aufweisen, wohingegen der Glasgehalt unkritisch hoch liegt. Als Maßstab dienen hierbei Analysen, die das FEhS-Institut in der Vergangenheit für seine Mitgliedsunternehmen erstellt hat.

Aus der unterdurchschnittlichen Basizität resultiert unmittelbar, dass sich die zementtechnische Leistungsfähigkeit der gemahlene Hüttensande unter sonst konstanten Bedingungen (Feinheit, Mischungsverhältnisse, Klinker, Sulfatträger und -gehalt) ebenfalls im unteren Bereich der Spannweite befindet. Dies dürfte künftig auch für gemahlene trockene Schlacke-Granulat mit vergleichbar hohem Glasgehalt gelten.

Für eine Vermarktung des trockenen Schlacke-Granulats resultiert daraus jedoch, wie bereits jetzt bei den Hüttensanden, kein (zusätzliches) Problem. Hüttensand wird in der Regel in relativer Nähe zu den Erzeugungsstätten vermarktet. Da die europäische Stahlerzeugung im Vergleich zu früher an wenigen Standorten konzentriert ist, gibt es praktisch nur wenig bis keine Konkurrenz zwischen Hüttensanden unterschiedlicher Reaktivität. Da unter dem Aspekt CO₂- und damit Klinkerfaktorverminderung die Zementindustrie, die als der maßgebende Abnehmer von Hüttensand gilt, weiterhin auf die Verwendung von glasiger Hochofenschlacke setzen dürfte, ist auch in Zukunft von einer quantitativen Nutzung des Linzer Hüttensands bzw. künftig des Linzer trockenen Schlacke-Granulats auszugehen.

4.2.2 Modellierung der Viskosität

4.2.2.1 Untersuchungsziele

In Hinsicht auf die Robustheit des DSG-Verfahrens ist die Viskosität der flüssigen Schlacke von entscheidender Bedeutung, da diese die Qualität des Granulats und die Funktionalität des Verfahrens beeinflusst. Eine zu hohe Viskosität würde zu einem Stoppen des Prozesses führen, da Schlacke nicht mehr dem Drehteller zugeführt werden könnte. Spätestens jedoch beim Auftreffen auf den Drehteller wäre eine Granulat-Herstellung ohne Fadenbildung nicht mehr möglich. Im Gegensatz dazu führt eine zu geringe Viskosität zu einer nicht ausreichend schnellen Erstarrung, das heißt zu einem verringerten Glasgehalt, sodass auch hier eine Granulat-Herstellung nicht möglich ist bzw. zu signifikant schlechteren zementtechnischen Eigenschaften führen würde.

Da die Schlackenviskosität durch die chemische Zusammensetzung und die Temperatur bestimmt ist, kann es bereits deutliche Unterschiede innerhalb eines Werkes bei den verschiedenen Hochöfen geben. Insbesondere die voestalpine Stahl Linz zeigt im mittel- und westeuropäischen Raum „saure“ Schlacken mit C/S-Basizitäten um die 0,9 auf (vgl. Tabelle 4), während andere Werke Schlacken mit Basizitäten um 1,1 aufweisen, wodurch sich

deutlich unterschiedliche Viskositäten ergeben. Ein Vergleich mit anderen Werken führt somit zu wichtigen Erkenntnissen hinsichtlich der Frage, ob die speziell für den Hochofen A ausgelegte DSG-Anlage auch für andere Hochofen der voestalpine bzw. auch andere Werke ohne weiteren großen Adaptionsaufwand genutzt werden kann und welchen Einfluss eventuelle zukünftige Änderungen der Schlackenzusammensetzung bei der voestalpine auf den DSG-Prozess haben werden.

4.2.2.2 Ergebnisse

Für die Berechnung der Viskosität wird ein durch das FEhS-Institut optimiertes Berechnungsmodell genutzt, welches auf Basis der chemischen Zusammensetzung die Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur darstellt. Zunächst wurden die auf ihre zementtechnischen Eigenschaften untersuchten Hüttensande für die Modellierung herangezogen, um die Spannweite innerhalb des Werks darzustellen.

Mitte 2015 wurden weitere Hüttensande untersucht, sowohl ein aktueller der VASL als auch drei weitere Hüttensande unterschiedlicher Hochofen anderer Werke, welche sich in ihrer chemischen Charakteristik deutlich unterscheiden und so die große Bandbreite im mittel- und westeuropäischen Raum hergestellter Hüttensande abdecken.

4.2.2.2.1 Chemische Zusammensetzung

In Tabelle 4 ist chemische Zusammensetzung der Linzer Hüttensande bereits aufgeführt.

In Tabelle 6 ist die chemische Zusammensetzung der zusätzlich Mitte 2015 analysierten Hüttensande dargestellt. Während der Hüttensand HO 6-3 eine noch geringere Basizität aufweist als die Hüttensande, deren Zusammensetzung in Tabelle 4 aufgeführt ist, zeichnen sich HS 1 und HS 2 durch eine höhere Basizität bei unterschiedlichen TiO₂-Gehalten und HS 3 durch einen vergleichsweise hohen Al₂O₃-Gehalt aus.

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung der Hüttensande von Mitte 2015

HS	HO 6-3	HS 1	HS 2	HS 3	
SiO ₂	39,5	37,0	36,8	34,1	M.-%
Al ₂ O ₃	14,1	11,7	11,4	14,5	M.-%
FeO	0,34	0,41	0,36	0,59	M.-%
TiO ₂	0,54	1,09	0,57	1,13	M.-%
MnO	1,24	0,39	0,30	0,30	M.-%
CaO	32,3	41,2	42,2	37,6	M.-%
MgO	9,42	6,79	6,89	9,57	M.-%
Na ₂ O	0,35	0,27	0,25	0,47	M.-%
K ₂ O	1,37	0,39	0,41	0,54	M.-%
S _{ges.}	0,87	1,26	1,29	1,19	M.-%
P ₂ O ₅	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	M.-%
C/S	0,82	1,11	1,15	1,10	-
(C+M)/S	1,06	1,30	1,33	1,38	-

4.2.2.2 Modellierung der Viskosität

Die Modellierung der Viskosität in Abbildung 27 zeigt, dass die Viskosität der Schlacken der Hochöfen A und 5 in einem jeweils engen Bereich liegt, wobei die Schlacken aus Hochofen A eine vergleichsweise niedrige Viskosität besitzen und damit im mittleren Bereich der Hochöfen der VAS liegen. Die Schlacken aus Hochofen 6 zeigen dagegen ein äußerst breites Spektrum an Viskosität auf und decken somit den gesamten Viskositätsbereich für die Linzer Schlacken ab.

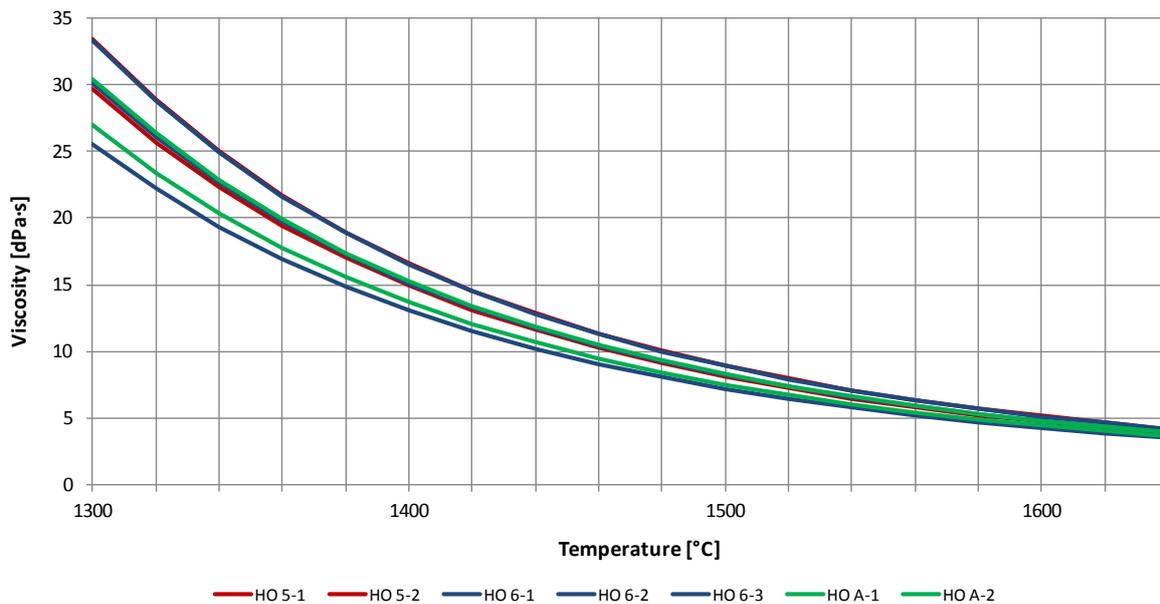


Abbildung 27: Modellierte Viskosität der Linzer Schlacken

Da die Basizität der Schlacken der VAS deutlich niedriger liegt als die von Hochofenschlacken anderer Werke ist auch deren Viskosität eine andere. In Abbildung 28 zeigt sich, dass die Linzer Hochofenschlacke viskoser als andere Schlacken ist, wobei die Diskrepanz in allen Fällen bei höheren Temperaturen geringer wird. Bereits Veränderungen der Viskosität im Bereich von 0,1 dPa·s wirken sich auf das Fließverhalten der Schlacke spürbar aus.

Die Viskositäten der HS 1, 2, 3 unterscheiden sich nicht signifikant. Daraus lässt sich folgern, dass der Einfluss der TiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt-Unterschiede im überprüften Rahmen gegenüber dem Einfluss der Basizität, die vergleichsweise ähnlich war, deutlich geringer ist.

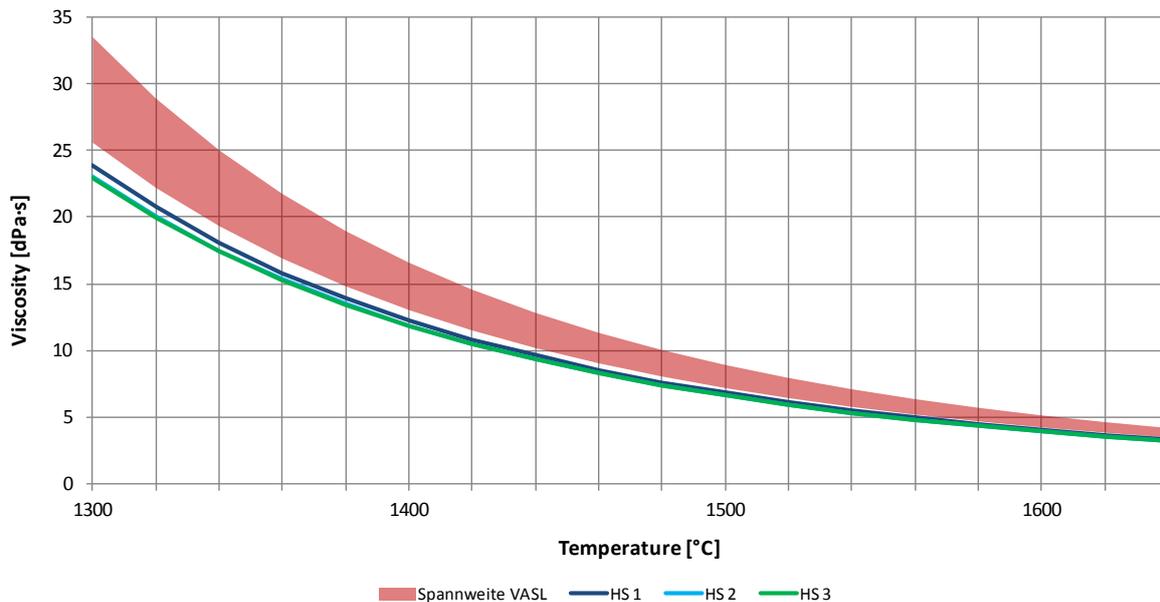


Abbildung 28: Spannweite der modellierten Viskosität von Hochofenschlacke der VAS und dreier anderer Werke

4.2.2.3 Schlussfolgerung

Die Analysen und Modellierungen zeigen, dass die Linzer Hochofenschlacken eine im mittel- und westeuropäischen Vergleich unterdurchschnittliche Basizität aufweisen, wodurch sich höhere Viskositäten ergeben.

Aber auch werksintern zeigen die Schlacken der verschiedenen Hochöfen deutliche Unterschiede in ihrer Viskosität. Hochofen 6 weist die größte Spannweite auf. Die im mittleren Bereich angesiedelten Viskositäten der Schlacken des Hochofens A stellen einen stabilen Mittelwert dar, sodass eine auf diese Schlacke adaptierte Anlage auch ohne größere Herausforderungen an den anderen Linzer Hochöfen ein gutes Granulationsergebnis liefern könnte.

Im Vergleich mit anderen Werken im mittel- und westeuropäischen Raum liegt die Viskosität der Linzer Schlacken höher, sodass bei beispielsweise 1450 °C Viskositätsunterschiede von etwa 20 % auftreten, die als signifikant gelten müssen.

Die auf den Hochofen A der VAS ausgelegte Anlage würde somit wohl nicht ohne Parameteranpassung an Hochöfen in einem anderen Werk mit Schlacken höherer Basizität genutzt werden können. Da diese Schlacken jedoch weniger viskos sind, wird eine Adaption als technisch gut umsetzbar angesehen, wohingegen im umgekehrten Falle bei einer deutlich höher viskosen Schlacke die DSG-Anlage durch Einfrierungen den Betrieb nicht fortsetzen könnte. Hier müsste mit einer höheren Schlacken-Temperatur gearbeitet werden, welche prozesstechnisch nicht trivial für eine Granulationsanlage erhöht werden kann und

ökonomisch nicht vertretbar ist. Aus Sicht des DSG-Verfahrens stellt somit die Linzer Hochofenschlacke einen Worst-Case dar.

4.3 Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt

Die erfolgreiche Umsetzung des im Forschungsteam erarbeiteten Konzepts des flüssigen Schlackenhandlings bewies wie so oft die gute Zusammenarbeit im Projektteam und kann als erfolgreiches Zusammenspiel von Wissenschaft und industrieller Praxis gelten.

Ein weiteres Highlight war die Verleihung des "Energy Globe STYRIA AWARD 2014" in der Rubrik Forschung an die Montanuniversität Leoben für ihre Grundlagenforschung zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke, die als Basis für FORWÄRTS durchgeführt wurde (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Preisverleihung Energy Globe STYRIA AWARD 2014 v.l.n.r. Mag. Peter Trummer (Vertriebschef der Energie Steiemark AG, Dr. Markus Kofler, Dipl. – Ing. Klaus Doschek und Univ. – Prof. Dr. Harald Raupenstrauch (alle Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Montanuniversität Leoben), Dr. Sybille Kusek (Geschäftsführerin LandesEnergieVerein)

5 Ausblick und Empfehlungen

Bis zum Ende der FORWÄRTS-Projektlaufzeit konnten die ursprünglich definierten Arbeitspakete nicht vollständig fertiggestellt werden.

Im Zuge des Projektverlaufs zeigte sich, dass die Umsetzung des AP 1 arbeits- und zeitintensiver ist als ursprünglich angenommen.

Zusammengefasst kann jedoch dennoch festgestellt werden, dass die bisherigen Arbeitsergebnisse vielversprechend für die weitere Entwicklung und Umsetzung einer Prototyp-Versuchsanlage sind.

Im Spätsommer 2015 wurde daher zusammen mit dem Klima- und Energiefonds und der Kommunalkredit Public Consulting (KPC) folgendes Förder-Set-Up für die weiterführenden Forschungsarbeiten an diesem sehr anspruchsvollen Projekt unter dem Akronym FORWÄRTS 2.0 erarbeitet (Abbildung 30).

FORWÄRTS 2.0 Funding Setup

Clima and Energy Fund (K&EF)		Kommunalkredit Public Consulting (KPC)	
• Program	Energieforschungsprogramm (2. AS)	• Program	Umweltförderung im Inland
• Funding	Scientific Work, Personnel Costs	• Funding	Equipment, Civil and Erection
• Consortium	PT, VAS, MUL, FEhS	• Consortium	PT (VAS, MUL, FEhS)
• Funding Rate	35% Indust. Partner 60% Scient. Partner	• Funding Rate	40%
• Approved Costs	€ 3.033.030.-	• Approved Costs	€ 6.996.173.-
• Approved Funding	€ 1.192.300.-	• Approved Funding	€ 2.782.478.-
• Project Time	3 years	• Project Time	3 years
• Processing	FFG Ecall	• Processing	KPC Platform / Email
• Funding Source	K&EF	• Funding Source	K&EF

Abbildung 30: Set-Up für die weiterführende Forschung von FORWÄRTS unter dem Akronym FORWÄRTS 2.0

Die zwei Förderungen wurden im Frühling 2016 in der Präsidiumssitzung des Klima- und Energiefonds positiv evaluiert und bewilligt. Projektstart von FORWÄRTS 2.0 ist der

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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

01.03.2016 und schließt somit nahtlos an das Projektende von FORWÄRTS (29.02.2016)
an.

6 Literaturverzeichnis

Folgende Publikationen wurden vom Konsortium in Zuge von FORWÄRTS getätigt:

1. Kofler, Markus; Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Wärmerückgewinnung aus Hochofenschlacke. 9. Minisymposium der Verfahrenstechnik. 2013. S. 153-156.
2. Kofler, Markus; Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Wärmerückgewinnung aus Hochofenschlacke. 2013. Postersitzung präsentiert bei 9. Minisymposium der Verfahrenstechnik, Leoben.
3. Kofler, Markus; Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Trockene Granulation von Hochofenschlacke zur Wärmerückgewinnung. "Zukunft der Energie und Energieversorgung" & "Energiemanagement in der energieintensiven Industrie". 2013. S. 158-159.
4. Kofler, Markus; Raupenstrauch, Harald: Energie aus Schlacke. Recycling-Magazin, 2013, S. 28-30.
5. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald; Kofler, Markus: Trockene Granulation von Hochofenschlacke zur Wärmerückgewinnung. 2013. Abstract von Jahrestreffen ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik.
6. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald; Kofler, Markus: Trockene Granulation von Hochofenschlacke zur Wärmerückgewinnung. 2013. Präsentation Jahrestreffen ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik.
7. Motz, H., A. Ehrenberg und D. Mudersbach: Dry solidification with heat recovery of ferrous slag, Slag Valorisation Symposium, The transition to sustainable materials management, Leuven, Belgium, 2013, 37–55.
8. McDonald, I.; A. Werner: Dry Slag Granulation - The Environmentally Friendly Way to Making Cement, 7th European Slag Conference, IJmuiden, Netherlands, 2013, 60–71.
9. McDonald, I.; A. Werner: Dry Slag Granulation – The Environmentally Friendly Way to Making Cement, AISTech 2013 - The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Pittsburgh, USA, 2013.
10. McDonald, I.; A. Werner: Dry slag granulation - the environmentally friendly way to making cement, Global Slag Conference and Exhibition 2013, Dubai, UAE, 2013.

11. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald; Kofler, Markus: Montanuniversität Leoben erhält Energy Globe STYRIA AWARD 2014 für Technologie zur trockenen Schlackengranulation. : Berg- und hüttenmännische Monatshefte : BHM, Band 159, 2014, S. 228-229.
12. Doschek, Klaus: Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation. 2014. Postersitzung präsentiert bei WerWasWo. Forschung@MUL 2014, Montanuniversität Leoben.
13. Doschek, Klaus: Grüner Stahl - die nächste Generation für Energieeffizienz. Green Tech Magazine - ECO World Styria Umwelttechnik Cluster, Band 2, 28.10.2014, S. 14-15.
14. Bettinger, D.; G. Enickl: Innovative Waste Heat Recovery Solutions, 1st European Steel Technology & Application Days (ESTAD), 31st Journées Sidérurgiques Internationales (JSI), Paris, Frankreich, 2014.
15. McDonald, I.: Dry slag granulation with heat recovery - an update, 10th Global Slag Conference & Exhibition, Aachen, 2014, 7.1-7.5.
16. Doschek, Klaus: "Green Steel" - Stahlproduktion geht effizienter; Luft verschafft Abkühlung. UmweltJournal : UJ / Fachzeitschrift für Umwelttechnik, Energie und Abfallwirtschaft, 01.2015, S. 2-2.
17. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: FORWÄRTS - Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation. 11. Minisymposium Verfahrenstechnik. Band 1 Wien : BOKU - Univ. of Natural Resources [u.a.], 2015. S. 204-207.
18. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Dry Slag Granulation with Heat Recovery. 2015. Postersitzung präsentiert bei 11. Minisymposium der Verfahrenstechnik, Wien, Österreich.
19. Doschek, Klaus: FORWÄRTS - Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation : Potentiale und Ausblick. 2015. ASMET Forum für Metallurgie und Werkstofftechnik 2015, Montanuniversität Leoben, Österreich.
20. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation 2.0 - Umsetzung. 2016. Abstract DepoTech 2016, Montanuniversität Leoben.
21. Doschek, Klaus; Raupenstrauch, Harald: Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation 2.0 - Umsetzung. 2016. Beitrag DepoTech 2016, Montanuniversität Leoben.

22. Ehrenberg, A., D. Mudersbach, A. Werner und V. Danov: Ein Verfahren zur trockenen Erstarrung schmelzflüssiger Hochofenschlacke mit dem Ziel der Wärmerückgewinnung, FEhS - Instiut für Baustoff Forschung e.V - Report 22 (2015), 1, 19–24.
23. McDonald, I.; A. Werner: Dry Slag Granulation with Heat Recovery, METEC & European Steel Technology and Application Days, Düsseldorf, Germany, 2015.
24. Ehrenberg, A.: Dry granulation of liquid blast furnace slag - 2 tasks and 2 methods, Proceedings 14th International Congress on the Chemistry of Cements, Peking, 13.-16.10.2015
25. McDonald, I.; A. Werner: Dry Slag Granulation with Heat Recovery, 8th European Slag Conference, Linz, Austria, 2015

7 Anhang

k.a.

8 Kontaktdaten

Projektleiter

Dipl.-Ing. Andrea Werner

Primetals Technologies Technologies Austria GmbH

Turmstraße 44, 4031 Linz

Telefon: +43732 6592 2971

E-Mail: andrea.werner@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