

Abschlussbericht zum r+Impuls-Verbundvorhaben

KONDEOS Förderkennzeichen 033R216

Anlage zur definierten Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metallfraktionen



Georgsmarienhütte
GMH GRUPPE

FKZ 033R216 A



HERMANN RAUEN GMBH & CO.
VORM. STEINHADEL RAUEN

FKZ 033R216 B



FKZ 033R216 C

INSTITUT FÜR
BAUSTOFF
FORSCHUNG

FEhs

FKZ 033R216 D

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

FKZ 033R216 E

Offen im Denken

Zuwendungsempfänger:

- **Georgsmarienhütte GmbH (Projektkoordinator)**
Neue Hüttenstraße 1, 49124 Georgsmarienhütte
- **Hermann Rauen GmbH & Co. vorm. Steinhandel Rauen**
Felsenstr. 32, 45479 Mülheim an der Ruhr
- **DK Recycling und Roheisen GmbH**
Werthausen Straße 182, 47053 Duisburg
- **FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.**
Bliersheimer Str. 62, 47229 Duisburg
- **Universität Duisburg-Essen - Institut für Technologien der Metalle**
Friedrich-Ebert-Str. 12, 47119 Duisburg

Autoren:**Georgsmarienhütte GmbH**

- Dr.-Ing. Manuel Foppe
- Marek Kassenbrock, M.Sc.

ITM – Universität Duisburg-Essen

- Julian Kuschewski, M.Sc.
- Bettina Vennemann, B.Sc.
- Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.

- David Algermissen, M.Sc.
- Dominik Ebert, M.Sc.

Hermann Rauen GmbH & Co. vorm. Steinhandel Rauen

- Dipl.-Ing. Hamid Tabani
- Dipl.-Ök. Hans-Joachim Rauen

DK Recycling und Roheisen GmbH

- Dipl.-Ing. Dennis Kuhlendahl

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2019 - 31.03.2023

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Kurzdarstellung..... | 9 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 9 |
| 1.2 | Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde | 11 |
| 1.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 14 |
| 1.4 | Wissenschaftlicher und technischer Stand | 17 |
| 1.4.1 | Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden..... | 18 |
| 1.4.2 | Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste..... | 18 |
| 1.5 | Zusammenarbeit der Projektpartner mit anderen Stellen..... | 18 |
| 2 | Eingehende Darstellung..... | 19 |
| 2.1 | Resultate des Forschungsvorhabens..... | 19 |
| 2.1.1 | Konditionierungsversuche an einer Prototyp-Anlage | 19 |
| 2.1.2 | Aufbereitung der Reaktionsprodukte..... | 23 |
| 2.1.3 | Bewertung der Reaktionsprodukte..... | 36 |
| 2.1.4 | Bau und Inbetriebnahme angepasster Brechaggregate..... | 49 |
| 2.1.5 | Bau und Inbetriebnahme der betrieblichen Konditionierungsanlage | 49 |
| 2.1.6 | Ökonomische und ökologische Bewertung | 54 |
| 2.2 | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 57 |
| 2.3 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 59 |
| 2.4 | Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortschreitenden Verwertungsplans | 60 |
| 2.5 | Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen..... | 61 |
| 2.6 | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse..... | 61 |
| 3 | Erfolgskontrollbericht | 62 |
| 4 | Berichtsblatt..... | 63 |
| 4.1 | ISBN oder ISSN | 63 |
| 4.2 | Berichtsart..... | 63 |
| 4.3 | Titel | 63 |
| 4.4 | Autoren | 63 |
| 4.5 | Abschlussdatum des Vorhabens | 63 |
| 4.6 | Veröffentlichungsdatum | 64 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.7 | Form der Publikation..... | 64 |
| 4.8 | Durchführende Institutionen..... | 64 |
| 4.9 | Ber. Nr. Durchführende Institutionen..... | 64 |
| 4.10 | Förderkennzeichen | 64 |
| 4.11 | Seitenzahl | 64 |
| 4.12 | Fördernde Institutionen | 64 |
| 4.13 | Literaturangaben..... | 65 |
| 4.14 | Tabellen | 65 |
| 4.15 | Abbildungen | 65 |
| 4.16 | Zusätzliche Angaben | 65 |
| 4.17 | Vorgelegt bei..... | 65 |
| 4.18 | Kurzfassung..... | 65 |
| 4.18.1 | Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik..... | 65 |
| 4.18.2 | Begründung/Zielsetzung der Untersuchungen..... | 66 |
| 4.18.3 | Methode..... | 66 |
| 4.18.4 | Ergebnis..... | 67 |
| 4.18.5 | Schlussfolgerung | 67 |
| 4.19 | Schlagwörter | 67 |
| 4.20 | Verlag | 68 |
| 4.21 | Preis..... | 68 |
| 5 | Literaturverzeichnis..... | 69 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------------|--|----|
| Abbildung 1: | Stoffströme und Ablauf von der Stahlherstellung bis zum EOS-Baustoff. | 10 |
| Abbildung 2: | Schematischer Ablauf der Konditionierung [11]. | 19 |
| Abbildung 3: | Abguss der EOS im flüssigen Zustand. | 20 |
| Abbildung 4: | Vergleich der Behandlungsmethoden der Elektroofenschlacke. | 21 |
| Abbildung 5: | Aussortieren von metallischen Anteilen mittels eines Magnetbaggers. | 24 |
| Abbildung 6: | Zerkleinerung der Rohrschlacke mittels Backenbrecher. | 24 |
| Abbildung 7: | Magnetische Trennung der EOS mittels eines Überbandmagneten. | 25 |
| Abbildung 8: | Bestückung der Absiebanlage mit EOS der Körnung 0 – 45 mm, um eine Trennung zwischen den Fraktionen 0 – 11 mm und 11 – 45 mm zu erhalten. | 25 |
| Abbildung 9: | Absiebung der EOS von 0 – 45 mm auf eine Fraktion von 0 – 11 mm. | 26 |
| Abbildung 10: | Reinigung der EOS mittels Wasserbedüsung, um abschlämmbare Bestandteile von der Körnung zu separieren. | 26 |
| Abbildung 11: | Handmuster der gewaschenen und gesiebten EOS. | 27 |
| Abbildung 12: | Abfüllung der aufbereiteten Schlacke in Bigbags für den weiteren Transport. | 27 |
| Abbildung 13: | Manuell aussortierte Metallteile der Probe BTI 71. | 28 |
| Abbildung 14: | Teilprobe BTI71 B1 nach der Teilung mittels eines Riffelteilers. | 29 |
| Abbildung 15: | Nicht-magnetische Probe nach dem Brechen auf ca. 15 mm, BTI71 B1. | 30 |
| Abbildung 16: | Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B1. | 30 |
| Abbildung 17: | Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B1 inkl. händisch aussortiertes Material. | 31 |
| Abbildung 18: | Magnetischer Anteil nach manueller Abscheidung, BTI71 B1. | 31 |
| Abbildung 19: | Wiederfindungsrate des Trommelmagneten, BTI71 B1. | 32 |
| Abbildung 20: | Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B2. | 33 |
| Abbildung 21: | Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B2 inkl. händisch aussortiertes Material. | 33 |
| Abbildung 22: | Magnetischer Anteil nach manueller Abscheidung, BTI71 B2. | 34 |
| Abbildung 23: | Wiederfindungsrate des Trommelmagneten, BTI71 B2. | 34 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Abbildung 24: | Zusammenhang zwischen der Mo-Konzentration und dem SiO ₂ -Gehalt bei langsamer Abkühlung ohne eine Reduktion; mit Grenzwerten gemäß EBV. | 37 |
| Abbildung 25: | Zusammenhang zwischen der Mo-Konzentration und dem SiO ₂ -Gehalt bei schneller Abkühlung ohne eine Reduktion; mit Grenzwerten gemäß EBV. | 38 |
| Abbildung 26: | Einstufung in die Materialklassen SWS-1, SWS-2, >SWS-2 für verschiedene Behandlungen der EOS. | 39 |
| Abbildung 27: | Kornverteilung einer Probe der aufbereiteten Schlacke. | 40 |
| Abbildung 28: | Separationseisen der EOS, welches durch die Aufbereitung von der nichtmetallischen Fraktion getrennt wird. | 41 |
| Abbildung 29: | Lichtmikroskopische Aufnahme der schlackenlastigen Phase (grüne Matrix mit stengelartigen Ausscheidungen) des Separationseisens. | 42 |
| Abbildung 30: | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der schlackenlastigen Phase des Separationseisens. | 42 |
| Abbildung 31: | Lichtmikroskopische Aufnahme der eisenlastigen Phase des Separationseisens. | 43 |
| Abbildung 32: | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der eisenlastigen Phase des Separationseisens. | 43 |
| Abbildung 33: | Ton-Graphit Tiegel der Größe und Bauform A3. | 44 |
| Abbildung 34: | Regulus des Umschmelzversuchs von Separationseisen zur Bestimmung des Metallgehalts. | 44 |
| Abbildung 35: | Schlacke des Umschmelzversuchs von Separationseisen zur Bestimmung des Metallgehalts. | 45 |
| Abbildung 36: | Lichtmikroskopische Aufnahme der Schlacke des Umschmelzversuchs. | 45 |
| Abbildung 37: | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Schlacke des Umschmelzversuchs. | 46 |
| Abbildung 38: | Lichtmikroskopische Aufnahme des Regulus des Umschmelzversuchs. | 46 |
| Abbildung 39: | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Regulus des Umschmelzversuchs. | 47 |
| Abbildung 40: | Überschäumen der Schlacke während des Einblasens des Reduktionsmittels. | 48 |
| Abbildung 41: | Schematischer Aufbau der Befüllung, des Wägesystems, und der Förderleitung der Konditionierungsanlage. | 50 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| Abbildung 42: | Entwicklung der mittleren Einblasrate für Quarzsand im Laufe der Optimierungen. Die Versuche A (rot) kennzeichnen den Ausgangszustand mit einer mittleren Einblasrate von 87 kg/min, die Versuche B (orange) zeigen die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 133 kg/min durch eine Optimierung der Drosselgröße in der Einblasanlage sowie die Versuche C (grün) die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 140 kg/min durch eine zusätzliche Optimierung der Einblasparameter..... | 51 |
| Abbildung 43: | Entwicklung der mittleren Einblasrate für die Mischung 1 (Kohlenstoff, Ferrosilizium und Quarzsand) im Laufe der Optimierungen. Die Versuche A (rot) kennzeichnen den Ausgangszustand mit einer mittleren Einblasrate von 140 kg/min, die Versuche B (grün) zeigen die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 166 kg/min durch eine Optimierung der Einblasparameter. | 51 |
| Abbildung 44: | Kamera, die durch die Temperatur die austretende Schlacke erkennt und ein Signal zur Förderung des Konditionierungsmittel an die Steuerung der Einblasanlage sendet. | 52 |
| Abbildung 45: | Behandlung der flüssigen Schlacke durch Einblasen des Konditionierungsmittels über eine verfahrbare Lanze..... | 52 |
| Abbildung 46: | Einrichtung zur Untersuchung eines Einsatzes von alternativen Fördertechniken..... | 53 |
| Abbildung 47: | Versuchsaufbau zur Optimierung der Fördertechnik: Verkürzung der Anlaufzeit durch Einsatz eines Schneckenförderers..... | 53 |
| Abbildung 48: | Entstehung des EOS-Baustoffs und des Eisenbasismaterials..... | 55 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabelle 1: | Prozentuale Eingruppierung der behandelten EOS (8-11 mm) in die Materialklassen der EBV, basierend auf der Mo-Auslaugung aus dem Schüttelverfahren 2:1, getrennt nach reduzierender (Mischung 1) und nicht reduzierender Behandlung (Quarzsand)..... | 37 |
| Tabelle 2: | Gewichtete Mittelwerte der prozentualen Verbesserung der Mo-Auslaugung aus dem Schüttelverfahren 2:1 der schnell abgekühlten EOS (8-11 mm), getrennt nach Schrottmenü und entsprechender Sandbehandlung..... | 38 |
| Tabelle 3: | Auslaugverhalten einer Referenzprobe, einer magnetischen Probe und einer nicht magnetischen Probe der aufbereiteten Schlacke. | 41 |
| Tabelle 4: | Chemische Zusammensetzung der schlackelastigen Phase des Separationseisens. | 42 |
| Tabelle 5: | Chemische Zusammensetzung der eisenlastigen Phase des Separationseisens. | 43 |
| Tabelle 6: | Chemische Zusammensetzung der Schlacke des Umschmelzversuchs..... | 45 |
| Tabelle 7: | Chemische Zusammensetzung des Regulus des Umschmelzversuchs..... | 46 |

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Im Jahr 2021 wurden in der Bundesrepublik rund 40,2 Millionen Tonnen Rohstahl hergestellt, wobei etwa 30 Prozent dieser Produktionsmenge aus Elektrostahlwerken stammten [1, 2]. Im Zuge der Elektrostahlerzeugung fielen durchschnittlich rund 150 kg Schlacke pro Tonne Rohstahl als Nebenprodukt an [3]. Folglich erreichte die Gesamtproduktion von Elektroofenschlacke (EOS) in Deutschland 1,8 Millionen Tonnen. Die Nebenprodukte der Stahlindustrie werden weiterverarbeitet und finden zum Beispiel im Straßen- und Wegebau als Ersatzbaustoffe Verwendung.

Aufgrund der Einführung der bundesweit gültigen Ersatzbaustoffverordnung (EBV) steht jedoch die Verwendung von Elektroofenschlacke aus der Qualitätsstahlherstellung als Baustoff in Frage [4]. Dieser Umstand ist auf die Notwendigkeit einer Anpassung der Elutionsverfahren und der veränderten Grenzwerte zurückzuführen. Gemäß dem Stand der Technik würde ein beträchtlicher Teil der in Deutschland produzierten Elektroofenschlacke durch das Inkrafttreten der EBV als unverkäuflich betrachtet werden, sodass sie deponiert werden müsste.

Im Rahmen der Fördermaßnahme "r+Impuls - Innovative Ressourceneffizienz - Impulse für industrielle Ressourceneffizienz" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde eine Konditionierungsanlage für Elektroofenschlacken im Industriemaßstab entwickelt. Das Hauptziel bestand darin, Elektroofenschlacke so zu konditionieren, dass ihr Einsatz für bautechnische Zwecke auch unter zukünftigen strengen Umweltverträglichkeitsanforderungen möglich ist, sodass auch weiterhin nachhaltig Primärrohstoffe und Deponiekapazitäten geschont werden können.

Die Konditionierung der Elektroofenschlacke erfolgt durch das Einblasen eines Konditionierungsmittels in die flüssige Schlacke während des Schlackenabstichs in einen Kübel. Durch dieses Verfahren ist es möglich die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Schlacke gezielt zu steuern, um positive Auswirkungen auf ihre Umwelteigenschaften zu erzielen. Die Umwelteigenschaften der Elektroofenschlacke werden insbesondere durch das Auslaugverhalten bestimmt. Durch die Konditionierung erreicht die EOS ein Auslaugverhalten, das dem einer natürlichen Gesteinskörnung ähnelt, wodurch die höheren Anforderungen an die Umweltverträglichkeit erfüllt werden. Gleichzeitig sollen höhere mechanische

Festigkeiten, aufgrund der veränderten Zusammensetzung und der Beschaffenheit der Elektroofenschlacke, als bei natürlichen Gesteinskörnungen erreicht werden.

Die Reihenfolge der Arbeitsschritte von der Stahlherstellung bis zum Baustoff aus Elektroofenschlacke ist in der **Abbildung 1** veranschaulicht.

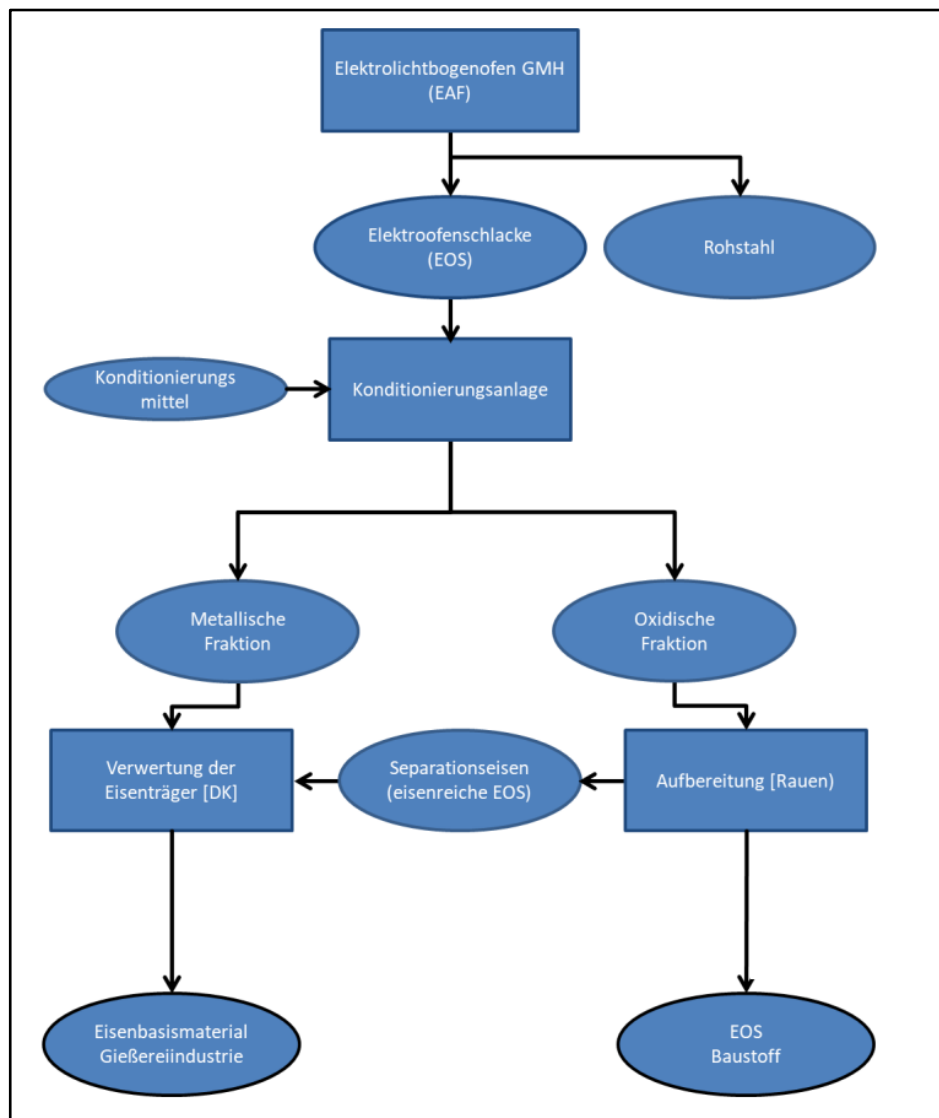


Abbildung 1: Stoffströme und Ablauf von der Stahlherstellung bis zum EOS-Baustoff.

Die Elektroofenschlacke wird beim Austritt aus dem Elektrolightbogenofen mittels der entwickelten Anlage mit einem Konditionierungsmittels behandelt. Nach der Konditionierung entstehen eine gröbere metallische und eine oxidische Fraktion, die durch eine Magnetabscheidung voneinander getrennt werden können. Weiterhin ist noch ein Teil der oxidischen Fraktion metallisch, sodass bei der Aufbereitung dieser Fraktion zusätzlich eine sehr eisenreiche Teilfraktion der EOS, das sogenannte Separationseisen, gewonnen wird. Das Separationseisen wird im Anschluss

zusammen mit der metallischen Fraktion der Stahlherstellung zugeführt. Der Rest der oxidischen Fraktion wird nach der Aufbereitung als EOS-Baustoff vermarktet. Nach einer erfolgreichen Einbindung der Konditionierungsanlage in den regulären betrieblichen Ablauf eines Elektrostahlwerks steht eine innovative Technologie zur Verfügung, mit der die EOS als ressourceneffizienter Baustoff nachhaltig genutzt und die Metallfraktion in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden kann.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das anwendungsorientierte Verbundvorhaben "KondEOS" zeichnet sich durch die Zusammenarbeit von Projektpartnern aus, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Erzeugung der Schlacke bis zur separaten Verwertung der mineralischen und metallischen Fraktionen tätig sind und mit ihrem jeweiligen speziellen Know-how dazu beigetragen haben, die technischen Arbeitsziele gemeinsam zu erreichen. Es ist eine automatisierte industrietaugliche Demonstrationsanlage entwickelt, gebaut und optimiert worden, mit der eine EOS im flüssigen Zustand so konditioniert werden kann, dass diese zukünftigen Umweltbestimmungen entspricht und gute bauphysikalische Eigenschaften aufweist. Es werden Schlacken und Metallfraktionen in konstanten Qualitäten erzeugt, die für einen externen Recyclingprozess unabdingbar sind.

Die beteiligten Forschungseinrichtungen führten im Labor- und Technikumsmaßstab Untersuchungen durch, um die Auswirkungen der Konditionierung der Schlacke unter verschiedenen Parametern zu beurteilen. Diese Ergebnisse wurden anschließend unter realen industriellen Bedingungen validiert. Das Projekt konzentrierte sich dabei auf die folgenden spezifischen Teilziele:

- Einstellung des Konditionierungs- bzw. Reduktionsmittels.
- Einbringung des Konditionierungs- bzw. Reduktionsmittels.
- Möglichkeiten der Separation der Metallphase im flüssigen Zustand.
- Möglichkeiten der Separation der Metallphase im festen Zustand.
- Erzeugung einer gleichbleibenden EOS-Qualität.
- Anpassung und Evaluierung der technischen Aufbereitungsparameter.
- Wiederverwertung der metallischen Phase.

Durch die Zusammenarbeit der im Folgenden aufgeführten Projektpartner war sichergestellt, dass sowohl die erforderliche Fachkompetenz als auch ein Großteil der erforderlichen Anlagen vorhanden waren.

Die Georgsmarienhütte GmbH (GMH)

Die Georgsmarienhütte wurde 1856 gegründet und ist wiederum Namensgeberin für die Stadt an diesem Standort. Seitdem ist die GMH fest in der Region verankert und die Stahlproduktion sichert seit vielen Generationen Arbeitsplätze.

Die GMH setzt seit 1994 einen Gleichstrom-Lichtbogen ein, mit einer jährlichen Rohstahlproduktion von knapp 1.000.000 Tonnen und setzt seit Jahren Maßstäbe für eine nachhaltige Produktion. Hierbei kommt ausschließlich aufbereiteter, sortierter Stahlschrott zum Einsatz, sodass Ressourcen geschont werden und der Wertstoffkreislauf optimiert wird. Die GMH hat als erstes Stahlwerk eine Auszeichnung als Klimaschutzunternehmen erhalten und nahm bereits an einer Vielzahl von Forschungsvorhaben teil. Mit der eigenen Initiative „NoWaste“ setzte die GMH bisher schon Maßstäbe im Umweltschutz und in der Erhöhung der Kreislaufwirtschaft. Ein Schwerpunkt der GMH liegt auf einer nachhaltigen Stahlproduktion. Mit „Green Steel“ verfolgt die GMH das Ziel klimaneutralen Stahl herzustellen.

Um auch in Zukunft die mit dem Elektrolichtbogenofen produzierte Schlacke in den Wertstoffkreislauf zu integrieren, übernahm die GMH die Rolle des Projektkoordinators im Konsortium.

Hermann Rauen GmbH & Co. vorm. Steinhandel Rauen (Rauen)

Die Hermann Rauen GmbH & Co. vormals Steinhandel Rauen (Rauen) wurde 1888 gegründet und beschäftigt sich seit über 125 Jahren mit Baustoffen unterschiedlichster Art. Im Rahmen dieser Tätigkeiten werden seit den 40er Jahren, lange bevor der Gedanke des Umweltschutzes in den gesellschaftlichen Fokus rückte, nicht natürliche Gesteinskörnungen aus Eisenhüttenschlacken produziert und gehandelt. Es werden Wasserbausteine, Gleisschotter und Mineralgemische für den Verkehrswegebau deutschlandweit und in den Niederlanden vermarktet, die aus den Schlacken der Duisburger Unternehmen Hüttenwerke Krupp-Mannesmann GmbH und thyssenkrupp Steel Europe AG hergestellt werden. Das Unternehmen Rauen vermarktet pro Jahr mehr als eine ½ Mio. t nicht natürlicher Gesteinskörnungen und leistet damit schon

seit Jahrzehnten einen kontinuierlichen und wichtigen Beitrag zu einer reduzierten Verwendung von Primärbaustoffen, wodurch natürliche Ressourcen geschont werden.

DK Recycling und Roheisen GmbH (DK)

Die DK recycelt eisenhaltige Filterstäube aus der Stahlindustrie und aus Unternehmen der Metallverarbeitung, indem aus den gelieferten Reststoffen in Duisburg mit hoher Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit Roheisen für die Gießereiindustrie und ein Zinkkonzentrat produziert werden. Dabei baut die DK auf weit über 100 Jahre Tradition und ein selbst entwickeltes, einzigartiges Verwertungsverfahren. Dieses arbeitet auf Basis des klassischen Sinter- und Hochofenprozesses und ist inzwischen als DK-Prozess bekannt und anerkannt. Ein Verfahren ganz im Sinne der Kreislaufwirtschaft und Abfallgesetze, mit dem jährlich ca. 500.000 Tonnen eisenhaltiger Reststoffe mit einer Ressourceneffizienz von 98 % zuverlässig und umweltgerecht in Form von Gießereiroheisen und Nebenprodukten in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden.

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS)

Das FEhS - Institut für Baustoff-Forschung e.V. verfügt über 60 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Prüfung und Überwachung industrieller Nebenprodukte und Baustoffe. In verschiedenen Forschungsschwerpunkten werden die Verwendbarkeit von Schlacken in der Bauindustrie, die Umweltverträglichkeit unterschiedlichster Nebenprodukte, die Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Schlackenmetallurgie sowie die Herstellung von Düngemitteln aus Schlacken untersucht. Das Institut verfügt über umfangreiche Analyseeinrichtungen in verschiedenen Laboren, die eine systematische Charakterisierung der Schlacke nach unterschiedlichen Konditionierungen ermöglichen, sodass die Eigenschaften der konditionierten Elektroofenschlacke beschrieben, dokumentiert und so gezielt weiterentwickelt werden konnten. Aufgrund langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitsforschung ist das FEhS in der Lage, die ökologischen Aspekte der Konditionierung von Elektroofenschlacke fundiert zu beurteilen. Das Institut kann die Auswirkungen der Konditionierung auf die Umweltbewertung und Nachhaltigkeit analysieren und spielt dabei eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Umweltauswirkungen der Schlackenverwertung spielen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des FEhS-Instituts sind grundsätzlich praxis- und anwendungsorientiert, um die Vermarktung dieser Materialien zu unterstützen.

Lehrstuhl für Metallurgie und Umformtechnik am Institut für Technologien der Metalle (ITM)

Der Lehrstuhl für Metallurgie und Umformtechnik am Institut für Technologien der Metalle (ITM) der Universität Duisburg-Essen verfügt über umfangreiche theoretische und praktische Erfahrung in der Thermodynamik und Kinetik metallurgischer Reaktionen. Durch frühere Projekte hatte der Lehrstuhl bereits Fachkenntnisse zu den theoretischen Grundlagen des aktuellen Vorhabens erworben. Darüber hinaus verfügt der Lehrstuhl über entsprechende Schmelzaggregate und Analyseverfahren, die es ermöglichen, die erforderlichen Prozessparameteroptimierungen sowie die Produkte im Labor- und Technikumsmaßstab zu untersuchen und zu bewerten und so grundlegende Erkenntnisse zur Konditionierung zu erarbeiten.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß der ursprünglichen Planung haben die Projektpartner die folgenden Arbeitspakete bearbeitet, wobei auch Änderungen vorgenommen wurden, die sich aus den Erkenntnissen der laufenden Untersuchungen ergeben haben.

- **Konditionierungsversuche an Prototyp-Anlage (Arbeitspaket 1)**

Bei der GMH wurden Versuche mit einer Prototyp-Anlage durchgeführt, um erforderliche Prozessoptimierungen zu ermitteln. Anhand der Analyse der Ergebnisse wurde der Einfluss einzelner Parameter wie Reduktionsmittel bzw. Konditionierungsmittel, Reaktionszeiten und Schlackenhandling auf die Schlacke und Metallfraktion untersucht. Dadurch konnten gezielte Anpassungen vorgenommen werden, um die gewünschten Reaktionsprodukte zu erzielen und die Effizienz der Elektroofenschlacke-Konditionierung zu verbessern.

- **Aufbereitung der Reaktionsprodukte (Arbeitspaket 2)**

Nach der Erzeugung der Elektroofenschlacke wurde die Aufbereitung der Schlacke getestet. Dabei wurden die oxidische und metallische Phase voneinander getrennt, um die oxidische Phase anschließend auf eine für die baustoffliche Verwendung geeignete Korngröße bzw. Korngrößenverteilung zu bringen. Aufgrund der spezifischen physikalischen Eigenschaften der EOS war eine spezielle Aufbereitungstechnik erforderlich. Die Aufbereitung der Schlacke

sollte ursprünglich von Rauen am Standort Duisburg durchgeführt werden. Da aber im Verlauf des Projektes Rauen der Vertrag für den Aufbereitungsstandort Duisburg nicht verlängert wurde, erfolgte in Absprache mit dem BMBF die Verlegung der Aufbereitung an den Standort Georgsmarienhütte, wo die GMH sowohl über einen geeigneten Platz als auch die erforderliche Genehmigung zur Aufbereitung der Schlacke verfügt.

Da für die zielführende Durchführung des Vorhabens die Expertise von Rauen unabdingbar war, wurde die Aufbereitung im weiteren Verlauf durch einen externen Dienstleister, das Unternehmen Schürmeyer GmbH durchgeführt, das grundsätzlich Erfahrung auf dem Gebiet der Schlackenaufbereitung hat und über entsprechende Standardgeräte, aber nicht über die spezialisierte Anlagentechnik von Rauen verfügt. Vor diesem Hintergrund wurde die erforderliche Aufbereitung unter der Anleitung von Rauen in mehreren, durchaus sich mehrfach wiederholenden Schritten durchgeführt, sodass die erforderliche Qualität der Aufbereitung erzielt werden konnte. Damit konnte das Fachwissen von Rauen weiterhin in dem Vorhaben genutzt werden und Rauen kann dieses Know-how zukünftig für die Vermarktung der produzierten Schlacke verwerten.

- **Bewertung der Reaktionsprodukte (Arbeitspaket 3)**

In diesem Arbeitspaket wurden die aufbereiteten Reaktionsprodukte analysiert und bewertet. Die Bewertung der konditionierten EOS erfolgte anhand ihrer umweltrelevanten Eigenschaften. (Elutionsversuche, Feststoffanalyse, usw.) in Hinblick auf die Ersatzbaustoffverordnung und die technischen Eigenschaften, unter den Aspekten der Einsatzmöglichkeiten als Baustoff.

Die Erstarrungsstruktur der konditionierten EOS wurde mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie untersucht, da die Erstarrungsstruktur eine wichtige Rolle bei der Optimierung des Konditionierungsprozesses spielt.

Die metallische Phase der konditionierten EOS, auch Separationseisen genannt, wurde durch Umschmelzversuche und anschließende Funkenemissionsspektrometrie analysiert. Außerdem kamen Methoden wie Licht- und Rasterelektronenmikroskopie zum Einsatz. Diese Analysen lieferten Informationen über die Qualität und Verwertbarkeit des Separationseisens.

Die positiven Ergebnisse ermöglichten es, das Separationseisen in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen, sodass es von der DK Recycling und Roheisen GmbH weiterverarbeitet werden konnte.

- **Bau und Inbetriebnahme angepasster Brechaggregate (Arbeitspaket 4)**

Wie bereits in der o.g. Stellungnahme zum Arbeitspaket 2 beschrieben, konnten die ursprünglich von Rauen am Standort Duisburg geplanten Arbeiten nicht durchgeführt werden, da Rauen der Standortvertrag nicht verlängert wurde. Vor diesem Hintergrund erfolgte die erforderliche Aufbereitung der Schlacke durch einen externen Dienstleister auf dem Gelände der GMH unter der Anleitung von Rauen in mehreren, durchaus sich mehrfach wiederholenden Schritten, sodass kein neues Brechaggregat angeschafft und in Betrieb genommen werden musste. Somit ist das Arbeitspaket 4 entfallen.

- **Bau und Inbetriebnahme der betrieblichen Konditionierungsanlage (Arbeitspaket 5)**

Da die vorangegangenen Arbeitspakete erfolgsversprechende Ergebnisse lieferten, wurde im Rahmen des Arbeitspakets 5 der Bau und die Inbetriebnahme der industriellen Konditionierungsanlage durchgeführt. Hierbei stand neben der Einhaltung des Umwelt- und Arbeitsschutzes auch die Integration in den betrieblichen Ablauf der Stahlerzeugung im Fokus, da größere Verzögerungen eine Unwirtschaftlichkeit bedeutet hätten.

- **Ökonomische und Ökologische Bewertung (Arbeitspaket 6)**

Um den Erfolg des Projektes zu bewerten, wurde im letzten Schritt eine ökonomische und ökologische Bewertung der Anlage durchgeführt. Besonders sind hier folgende Aspekte zu nennen:

- Die Vermarktungsbasis der EOS bleibt erhalten.
- Aus der Metallphase wird ein neues Produkt, das in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt wird.
- Die Nutzung von Deponieraum wird reduziert.
- Der Ressourceneinsatz von Primärrohstoffen wird verringert.

- Aus dem verringerten Primärrohstoffeinsatz ergibt sich eine Verringerung des Energieaufwands und somit der Treibhausgasemissionen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

In Deutschland werden jährlich rund 13 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken im Baustoffwesen verwertet. Der Straßen-, Erd- und Wegebau nimmt dabei einen Anteil von etwa 80 % an der Verwendung der Elektroofenschlacke (EOS) ein, wodurch der offene Einbau von EOS einen wichtigen Markt darstellt [5]. Allerdings ist der Einsatz der EOS in diesen Bereichen aufgrund von Änderungen der Ersatzbaustoffverordnung, die die Qualität der Schlacke bewertet, gefährdet. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass mehr als die Hälfte der Elektrostahlwerke bei der Umsetzung der neuen Verordnung die Anforderungen an den offenen Einbau, aufgrund des Auslaugverhaltens bestimmter Elemente, nicht mehr erfüllen würden [6]. In verschiedenen Forschungsvorhaben konnte festgestellt werden, dass Bindungsmechanismen genutzt werden können, um diese Elemente in die Schlackenphase einzubinden und dadurch das Auslaugverhalten zu verbessern [3, 7]. Für das Element Chrom wurden bereits entsprechende Maßnahmen identifiziert und erprobt [8].

Die Umweltverträglichkeit der Elektroofenschlacke wird anhand der möglichen Veränderung des Grundwassers beurteilt. Hierfür werden Elutionsversuche durchgeführt, insbesondere das S4-Verfahren. Dabei wird die Schlacke 24 Stunden lang mit demineralisiertem Wasser im Verhältnis von zehn Teilen Wasser zu einem Teil Feststoff geschüttelt, um anschließend das Eluat zu analysieren. Die geltenden Grenzwerte für die Elution sind in den technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB) festgelegt [9, 10]. Mit der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) werden sowohl veränderte Elutionsverfahren als auch neue Grenzwerte festgelegt. Eine unveränderte Produktion der Schlacke hätte zur Folge, dass die bisher im offenen Straßenbau verwendete EOS deponiert werden müsste. Zudem wurde Molybdän als zusätzlicher Parameter eingeführt, für den bisher keine Möglichkeiten der Beeinflussung bekannt waren. Im Vorlaufprojekt wurde gezeigt, dass die Konditionierung der Schlacke durch die Reduktion der Metalloxide zu einer signifikanten Verringerung der Molybdänauslaugung führt [11]. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Molybdän an

eisenreiche Phasen gebunden ist, die wesentlich zur Auslaugung beitragen. Eine Verifizierung unter industriellen Bedingungen war aufgrund der begrenzten Zeit und Anzahl der Versuche im Vorlaufprojekt nicht möglich.

Die Aufbereitung der Elektroofenschlacke zielt darauf ab Korngrößen und Kornbänder zu erzeugen, die im Straßen- und Wegebau als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen verwendet werden können. Die EOS stellt aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Abrasion eine große Herausforderung für die Aufbereitungstechnik dar. Die Aufbereitung der EOS erfolgt in mehreren Schritten. Darunter sind magnetisches Trennen, Brechen und Sieben, wobei jeder dieser Schritte mehrere Teilprozesse umfasst. Durch eine geeignete Verschaltung der einzelnen Prozessschritte wird eine technisch verwendbare Korngröße erreicht.

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.

Es wurden keine geschützten Verfahren, Patente oder Konstruktionen genutzt.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die für diesen Schlussbericht verwendete Literatur und deren Quellen sind am Ende des Schlussberichtes angegeben.

1.5 Zusammenarbeit der Projektpartner mit anderen Stellen

Im Laufe des Forschungsvorhabens wurde die Aufbereitung der EOS unter anderem von der Firma Schürmeyer GmbH unter der Anleitung von Rauen übernommen. Die Schürmeyer GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Hilter im Landkreis Osnabrück. Im Jahr 1992 wurde das Unternehmen von Marc Schürmeyer gegründet, der seither als Geschäftsführer agiert.

Das Unternehmen bietet ein umfangreiches Leistungsspektrum an. Neben dem qualifizierten Abbruch und Rückbau von Bauwerken ist das Unternehmen im gewerblichen Güterverkehr als Entsorgungsfachbetrieb zertifiziert. Des Weiteren ist die Firma Schürmeyer als Hüttenwerksdienstleister bei der GMH mit der Aufbereitung von sekundärmetallurgischen Schlacken und mineralischen Reststoffen beauftragt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Resultate des Forschungsvorhabens

2.1.1 Konditionierungsversuche an einer Prototyp-Anlage

In der ersten Projektphase wurden Versuche mit einer Prototyp-Einblasanlage aus dem Vorlaufprojekt bei der GMH durchgeführt [11]. Diese Versuche dienten zur Ermittlung nötiger Prozessoptimierungen, um die Konditionierung der Schlacke effizient auszulegen. Auf der Grundlage einer Versuchsmatrix wurde zunächst eine fundierte Datenbasis erzeugt. Durch Versuche mit einzelnen Stoffen und möglichen Mischungen aus diesen kristallisierte sich ein Konditionierungsstoff als geeignet heraus.

2.1.1.1 Konditionierung

Der Ablauf der Stahlherstellung inkl. der Schlackenherstellung ist in **Abbildung 1** veranschaulicht. Der Ablauf der Konditionierung ist schematisch in **Abbildung 2** dargestellt.

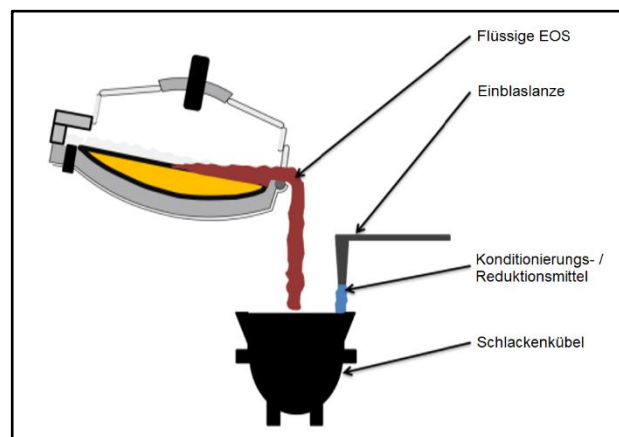


Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Konditionierung [11].

Während des Schmelzprozesses im Elektrolichtbogenofen erfolgt eine kontinuierliche Abführung der Elektroroofenschlacke durch eine Schlackentür in einen sich unter dem Ofen befindenden Schlackenkübel. Zum Abschluss des Schmelzprozesses wird die flüssige EOS durch die Neigung des Elektrolichtbogenofens dekantiert. Simultan zur kontinuierlichen Abführung der Elektroroofenschlacke erfolgt die Zuführung des Konditionierungs- bzw. Reduktionsmittels durch die Konditionierungsanlage in den Schlackenkübel. Die Konditionierungsanlage besteht unter anderem aus einer Einblaslanze inkl. der nötigen Fördermaschine, mit der das Konditionierungsmittel in die Schlacke befördert wird. Durch das parallele und kontinuierliche Einblasen wird

eine homogene Durchmischung des Konditionierungsmittels und der flüssigen EOS gewährleistet. Wird ein Reduktionsmittel eingeblasen, so werden die noch in der Schlacke vorliegenden Metalloxide reduziert. Die Metallpartikel agglomerieren zu Tropfen bzw. teils zu größeren Granalien [11]. Durch die Reduktion der Oxide entstehen Metallpartikel, die eine höhere Dichte als die oxidische Phase besitzen, sodass sie aus der Schlacke „herausregnen“. Ein Konditionierungsmittel verändert die Schlacke bezüglich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Ist der Abguss der Schlacke beendet, wird der Schlackenkübel zu einem Schlackenbeet gefahren, um dort abgekippt zu werden (**Abbildung 3**).



Abbildung 3: Abguss der EOS im flüssigen Zustand.

2.1.1.2 Bewertung der Reduktion / Konditionierung

Mit einer Mischung aus Quarzsand, Kohlenstoff und Ferrosilizium als **Reduktionsmittel** konnte eine Reduktion der Schlacke erzielt werden, die sich positiv auf die Auslaugung - vor allem von Molybdän - auswirkte. Bei der Durchführung einer Reduktion der Schlacke ist die Kübellogistik ein wichtiger Aspekt. Zu Beginn der Versuche betrug die Verweilzeit der Schlacke mit dem Reduktionsmittel in dem Schlackenkübel 24 Stunden. Diese Verweilzeit erschwerte im Rahmen des Vorhabens die Kübellogistik, da im regulären Produktionsprozess die Verweilzeit nach dem Produktionsende der jeweiligen Charge ca. 15 Minuten beträgt. Des Weiteren war bei dieser Verweilzeit eine Feuerfestauskleidung des Gefäßes notwendig, um den Schlackenkübel vor einer zu starken thermischen Belastung zu schützen. Die Feuerfestauskleidung des Gefäßes ist sowohl kosten- als auch zeitintensiv

(Trockenzeit der Feuerfestmasse) und macht das Vorhalten einer Vielzahl von Schlackenkübeln notwendig. Durch eine schrittweise Anpassung konnte zum einen die benötigte Verweilzeit auf eine Stunde verringert werden und zum anderen durch die Verringerung der Verweilzeit auf die Feuerfestauskleidung des Gefäßes verzichtet werden. Im Rahmen des Vorhabens wurde gezeigt, dass grundsätzlich die Einbindung einer Reduktion der Schlacke in den Produktionsablauf aus technischer Sicht möglich ist. Jedoch ergeben sich wirtschaftliche Hemmnisse, wie bspw. hohe Kosten für die einzelnen Stoffe der Reduktionsmischung sowie Kosten für das emittierte CO₂ (EU-ETS), das während der Reduktion der Metalloxide durch den Kohlenstoff aus der Reduktionsmischung entsteht. Unter Berücksichtigung aller Aspekte ist es zum derzeitigen Zeitpunkt und angesichts steigender Rohstoffpreise auch zukünftig nicht wirtschaftlich, eine Reduktion mit Primärrohstoffen in den Produktionsablauf einzubinden.

Vielversprechende Resultate wurden durch eine **Sandbehandlung** mit Quarzsand als Konditionierstoff erzielt. Durch die Zugabe wurde das Auslaugverhalten der EOS dahingehend verändert, dass sicher die Materialklasse SWS-2 nach der Ersatzbaustoffverordnung eingehalten werden konnte. Die Einflüsse des eingesetzten Schrottes und der **Abkühlungsgeschwindigkeit** auf das Auslaugverhalten konnten anhand der durchgeführten Versuche besser verstanden werden. Bei den behandelten Schlacken wurden unterschiedliche Schrottmenüs mehrmalig erprobt und die Abkühlungsgeschwindigkeit gezielt variiert.

Die **Abbildung 4** vergleicht die erprobten Behandlungsmethoden. Unabhängig des eingesetzten Schrottmenüs halten alle mit Sand behandelten Schlacken die Materialklasse SWS-2 sicher ein.

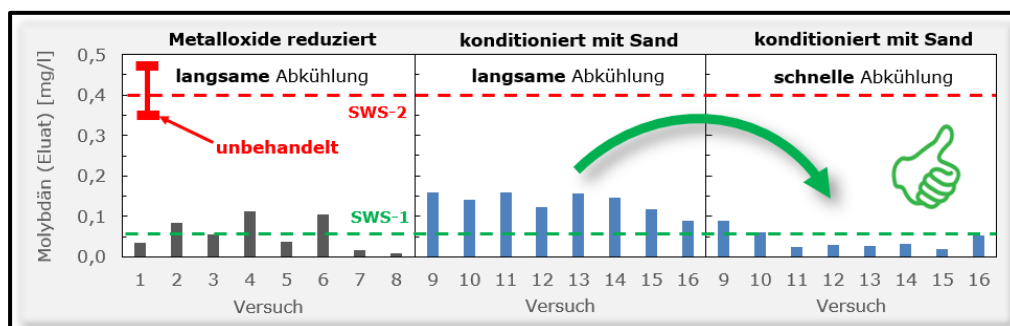


Abbildung 4: Vergleich der Behandlungsmethoden der Elektroofenschlacke.

Die langsame Abkühlung erfolgte entsprechend des Standardprozesses durch das Abkippen der flüssigen Schlacke in ein Schlackenbeet (**Abbildung 3**). Eine schnelle

Abkühlung wurde erreicht, indem eine Baggerschaufel in die flüssige Schlacke eingetaucht wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination einer Sandbehandlung und einer schnellen Abkühlung die Molybdänauslaugung weiter verringert werden kann und größtenteils die Materialklasse SWS-1 erreicht wird.

Die Zugabe des Sands veränderte das Auslaugverhalten der Elektroofenschlacke so, dass die Anforderungen der Materialklasse SWS-2 gemäß der Ersatzbaustoffverordnung erfüllt wurden. Die Effekte des verwendeten Schrotts und der Abkühlungsgeschwindigkeit auf das Auslaugverhalten wurden durch die durchgeführten Versuche besser erfasst. In den behandelten Schlacken wurden verschiedene Schrottanteile wiederholt getestet und die Abkühlungsgeschwindigkeit gezielt variiert, um die Einflüsse genauer zu verstehen. Die Sandbehandlung senkt die Viskosität der Schlacke. Diese Verringerung führt zur Agglomeration metallischer Partikel in der flüssigen Schlacke und weniger zur Bildung eines kompakten metallischen Regulus im Bodenbereich der Pfanne. Experimente mit variierender Sandmenge ergaben, dass eine Zugabe von etwa 15 % Sand eine Trennung von etwa 14 % magnetischer / metallischer Fraktion während der Aufbereitung bewirkt.

2.1.1.3 Ermittlung nötiger Anlagenoptimierung

Für eine erfolgreiche Behandlung der Schlacke muss sowohl eine konstante als auch eine ausreichende Förderung des Konditionierungsmittels gewährleistet werden. Zunächst wurde eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt, um die maßgebenden Parameter zu identifizieren und diese gezielt einstellen zu können. Im Rahmen der Parameterstudie wurden unter anderem die Drosselgröße, der Kammerdruck und die Fördergasmenge variiert. Des Weiteren wurde der Auflockerungszustand der Konditionierungsmischung gezielt verbessert.

Eine weitere Herausforderung war die Ansprechverzögerung, die aus der pneumatischen Förderung der Konditionierungsmischung resultiert. Um bei einem unregelmäßigen Schlackenfluss dennoch eine ausreichende Behandlung zu gewährleisten, ist ein hoher Automatisierungsgrad notwendig.

Unvermeidlich ist bei einer pneumatischen Förderung eine Ansprechverzögerung. Da das Material nicht wie bei einem Förderband oder einem Rohrkettentransporter dauerhaft ansteht, erreicht das Konditionierungsmittel die Schlacke erst zeitverzögert. Daher wurden die Auswirkungen dieses Umstandes und mögliche Alternativen überprüft.

2.1.2 Aufbereitung der Reaktionsprodukte

Das Hauptziel der Schlackenaufbereitung besteht darin, Gesteinskörnungen herzustellen, die den Normen entsprechen und für entsprechende Anwendungen sowie darüber hinaus als Baumaterial in der Zement- und Betonindustrie vermarktet werden können. Dieser Prozess zielt darauf ab, eine nachhaltige und vielseitige Nutzung von Eisenhüttenschlacken in unterschiedlichen industriellen und infrastrukturellen Bereichen zu ermöglichen.

2.1.2.1 Aufbereitung

Die Aufbereitung einer Schlacke erfolgt in der Regel in Abhängigkeit ihrer stofflichen Zusammensetzung. Dabei ist bereits der Entstehungs- und Abkühlungsprozess der Schlacke als Teil des anschließenden Aufbereitungsprozesses zu verstehen.

Aufgrund der vorgegebenen Taktzeit der Schlackenabstiche durch den Elektroofen sowie der internen Stahlwerks- und Kübellogistik war es notwendig die Abkühlzeiten der Schlacke im Kübel und den Beginn der Separation von Metalltropfen – ein Prozess, bei dem Metalltropfen von der Schlacke abgetrennt werden – von den ursprünglich geplanten 24 Stunden im Projekt erheblich zu verkürzen. Dies erwies sich insbesondere für die Konditionierstoff-Mischung 1 (Kohlenstoff, Ferrosilizium und Quarzsand) als entscheidend, um dem erzeugten Reduktionsmetall ausreichend Zeit für eine effektive Segregation zu geben, was die spätere Trennung von Metall und Schlacke erleichtert.

Im ersten Schritt wird die erkaltete Schlacke aus dem Schlackenbeet ausgebaggert und per LKW oder Radlader zur Aufbereitungsanlage transportiert, um dort einem Vorlager zugeführt zu werden

Vor der Aufbereitung wurde die Schlacke durch Magnetbagger (**Abbildung 5**) von metallischen Anteilen sowie, wenn vorhanden, von weiteren Begleitelementen befreit und durch einen „Pulverisierer“ vorgebrochen. Somit lag die Rohschlacke in einer Körnung vor, die für die erste Brechstufe geeignet war. Die separierten groben Metallanteile konnten bereits erneut dem Stahlerzeugungsprozess zugeführt werden.



Abbildung 5: Aussortieren von metallischen Anteilen mittels eines Magnetbaggers

Die Schlacke wurde durch einen hydraulischen Backenbrecher in eine Kornklasse kleiner 80 mm gebrochen. In der ersten Brechphase bot der hydraulische Antrieb der Brechbacken die Sicherheit, dass die noch vorhandenen, in der Schlacke eingeschlossenen, Eisenreste die Brechaggregate nicht zerstören.



Abbildung 6: Zerkleinerung der Rohschlacke mittels Backenbrecher.

Im weiteren Verlauf wurde die Schlacke an mehreren Stationen durch Überbandmagnete von metallischen Anteilen befreit (**Abbildung 7**), um dann über Förderbänder der zweiten Brechstufe zugeführt werden zu können. Getestet wurden

im Backenbrecher verschiedene Brechwerkzeuge. Ziel war eine hohe Zerkleinerungsstufe, um ein verkaufsfähiges kubisches Endprodukt zu erhalten.



Abbildung 7: Magnetische Trennung der EOS mittels eines Überbandmagneten

Über nachgeschaltete Siebmaschinen wurde die Schlacke auf verschiedene Fraktionen abgesiebt.

Abbildung 8 zeigt die Bestückung einer Siebanlage, welche die EOS von einer Körnung von 0 – 45 mm auf die Fraktionen 0 – 11 mm und 11 – 45 mm aufteilt.



Abbildung 8: Bestückung der Absiebanlage mit EOS der Körnung 0 – 45 mm, um eine Trennung zwischen den Fraktionen 0 – 11 mm und 11 – 45 mm zu erhalten.

In **Abbildung 9** wird der genannte Absiebungsprozess dargestellt. Eine Fraktion der Schlacke von 0 – 11 mm wurde zur weiteren Verarbeitung einem Fremdunternehmen übergeben. Dort wurde die EOS zunächst auf eine Körnung von 0 - 3 mm gebrochen.



Abbildung 9: Absiebung der EOS von 0 – 45 mm auf eine Fraktion von 0 – 11 mm.

Anschließend erfolgt eine Separation des Eisenanteils mittels eines Überbandmagneten, um metallische Bestandteile zu entfernen. Die EOS wird dann durch Wasserbedüsung gewaschen, um noch vorhandene Verunreinigungen zu entfernen (**Abbildung 10**).



Abbildung 10: Reinigung der EOS mittels Wasserbedüsung, um abschlämbbare Bestandteile von der Körnung zu separieren.

In diesem Schritt werden abschlämbbare Bestandteile von der Körnung separiert. Nach dem Waschvorgang wird die EOS getrocknet, um die Feuchtigkeit zu entfernen und die Lagerfähigkeit zu gewährleisten.

Die gewaschene und gesiebte Schlacke ist in der folgenden **Abbildung 11** dargestellt.



Abbildung 11: Handmuster der gewaschenen und gesiebten EOS.

Abschließend erfolgt das Klassieren der getrockneten EOS in verschiedene Fraktionen, um die gewünschten Korngrößen zu erhalten. Dieser Prozess ermöglicht die Herstellung unterschiedlicher Produktvarianten, die den Anforderungen verschiedener Anwendungsbereiche gerecht werden.



Abbildung 12: Abfüllung der aufbereiteten Schlacke in Bigbags für den weiteren Transport.

Nach dem Aufbereitungsprozess steht eine in mehreren Fraktionen abgeseiebte Schlacke zur Verfügung. Das gebrochene Korn hat eine annähernd kubische Form mit hoher Festigkeit ohne Verklebungen bzw. Verklumpungen. In den Gesteinskörnungen sind in allen Fraktionen weiterhin sichtbare bzw. messbare Fe-Granalien vorhanden, die nur durch weitere Zerkleinerung der Schlackenkörner magnetisch separiert werden

können. Für den weiteren Transport wird die Schlacke über eine Abfüllstation in Bigbags befördert. Dieser Prozess ist in **Abbildung 12** dargestellt.

2.1.2.2 Bewertung der Aufbereitbarkeit

Wie bereits zu Beginn des Projekts vermutet, erwies sich der Aufbereitungsaufwand als überdurchschnittlich anspruchsvoll, da die Brechprozesse mehrfach wiederholt werden müssen. Aufgrund des verstärkten Verschleißes muss die Häufigkeit von Instandsetzungsarbeiten angepasst werden. Die speziell konditionierte Rohschlacke weist, im Vergleich zu den konventionell hergestellten Schlacken, eine höhere Festigkeit auf und ist grobkörniger mit geringen Feinanteilen. Der in den einzelnen Schlackenkörnern vorhandene eingeschmolzene Eisenanteil bleibt weiterhin präsent. Dies führt zu einem erheblichen Aufwand und einem beträchtlichen Energieeinsatz bei der Materialaufbereitung in Bezug auf die Anlagentechnik. Die aufbereitete EOS-Chargen konnten zwar verarbeitet werden, jedoch erzielten die Aufbereitungsprozesse aufgrund der kompakten und dichten Beschaffenheit des Ausgangsmaterials nur begrenzt eine geeignete Korngrößenverteilung für den Einsatz im Straßenbau.

Um eine optimierte mechanische Aufbereitung zu entwickeln, wurden am ITM der Universität Duisburg-Essen Versuche durchgeführt, die eine möglichst gute Trennung zwischen metallischen und mineralischen Anteilen zum Ziel hatten.

Zunächst wurden sehr große Metallteile (**Abbildung 13**) händisch aussortiert, da diese in den Anlagen des Lehrstuhls nicht zu bearbeiten sind.



Abbildung 13: Manuell aussortierte Metallteile der Probe BTI 71.

Anschließend wurden die restlichen Partikel ebenfalls manuell auf ca. 50 mm Korngröße zerkleinert und mit Hilfe eines Riffelteilers in Teilproben von ca. 10 – 15 kg geteilt.

Eine Teilprobe wurde mittels eines einfachen, überlaufenden Trommelmagnetabscheiders dreifach magnetisch getrennt und die Massenanteile nach jedem Durchgang dokumentiert. Eine weitere Teilprobe wurde zunächst in einem Backenbrecher auf eine Korngröße von ca. 15 mm gebrochen, bevor auch an dieser Fraktion die dreifache magnetische Trennung durchgeführt wurde. Diese Untersuchung sollte zeigen, ob eine bessere Trennschärfe der Magnetabscheidung durch das vorherige Brechen auf eine kleine Korngröße erreicht werden kann. Zur Vergleichbarkeit wurde die erste Teilprobe, die vor der Magnetabscheidung nicht kleiner gebrochen wurde, im Anschluss ebenfalls auf ca. 15 mm gebrochen.

Beide Fraktionen wurden erneut einer magnetischen Trennung unterzogen, diesmal jedoch manuell. Da auf diese Weise eine noch einmal wesentlich bessere Trennschärfe zu erwarten war, wurden diese Massenanteile der manuellen Magnetabscheidung als Referenz herangezogen. So konnte beurteilt werden, welcher der Aufbereitungsansätze ein optimales Ergebnis mit dem geringsten Aufwand liefert.

Die untersuchte Probe (BTI 71) umfasst eine Masse von 55,8 kg. Die Masse der zunächst händisch aussortierten Metallteile von ca. 50 mm beträgt 3,96 kg, was einem Anteil von 7,1 % entspricht. Anschließend wurde die Probe zweifach mit einem Riffelteiler in Teilproben von je 12,7 kg geteilt, die im weiteren Verlauf als **BTI71 B1** und **BTI71 B2** bezeichnet werden.

Die Teilprobe **BTI71 B1** wurde zunächst mit einem Backenbrecher auf eine Korngröße von ca. 15 mm gebrochen (**Abbildung 14**), um zu untersuchen, ob die geringere Korngröße einen Einfluss auf die Magnetseparation hat.



Abbildung 14: Teilprobe BTI71 B1 nach der Teilung mittels eines Riffelteilers.

Anschließend wurde die Probe unter Einsatz eines überlaufenden Trommelmagnetabscheiders dreifach separiert, in dem die nicht-magnetischen Anteile des ersten und zweiten Durchlaufs erneut auf den Abscheider aufgegeben wurde.



Abbildung 15: Nicht-magnetische Probe nach dem Brechen auf ca. 15 mm, BTI71 B1.

Erwartungsgemäß konnte beobachtet werden, dass der magnetische Anteil von Durchgang zu Durchgang steigt, diese Steigung jedoch immer geringer wird.

Die in **Abbildung 16** dargestellten Werte beziehen sich auf die bereits von großen Metallteilen befreiten Teilprobe.

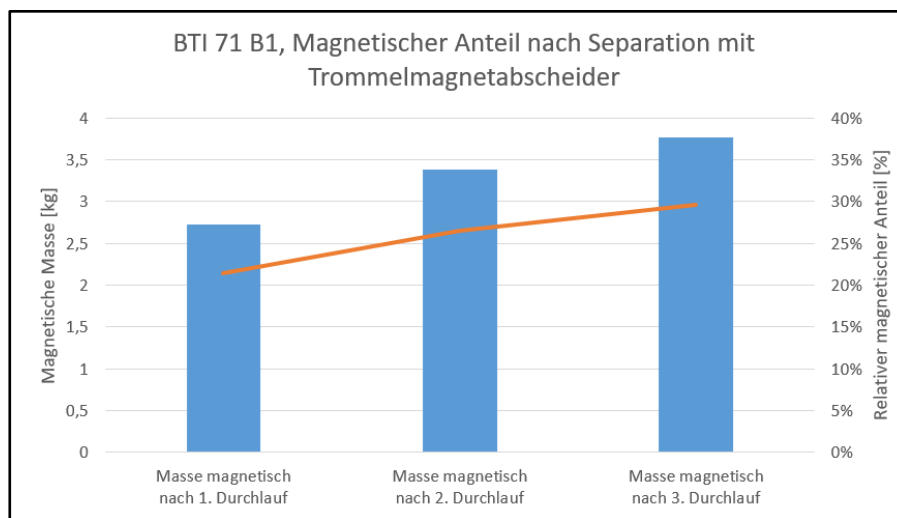


Abbildung 16: Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B1.

Da die ursprüngliche Probe zweifach geteilt wurde, jede Teilprobe also ein Viertel der Masse darstellt und unter der Annahme, dass die aussortierten Metallteile vollständig der magnetischen Fraktion zuzuordnen sind, kann ein Viertel dieser aussortierten

Metallteile zusätzlich der Gesamtmassen der Teilprobe und dem magnetischen Anteil der Teilprobe zugeordnet werden. Dies wird in **Abbildung 17** dargestellt.

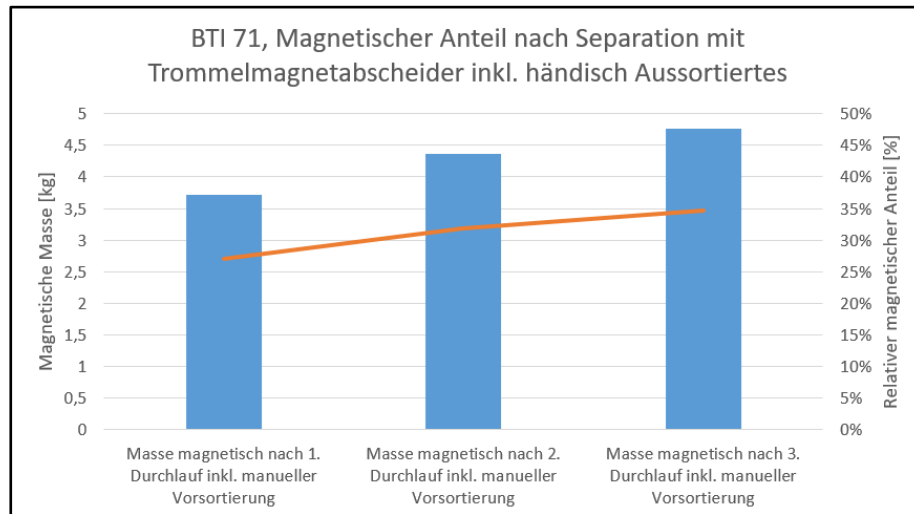


Abbildung 17: Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B1 inkl. händisch aussortiertes Material.

Um die Trennschärfe des Magnetabscheiders zu überprüfen, wurden die beiden erzeugten Fraktionen – magnetisch und nicht-magnetisch – anschließend noch einmal manuell getrennt, in dem jedes Partikel mit einem Permanentmagneten untersucht wurde.

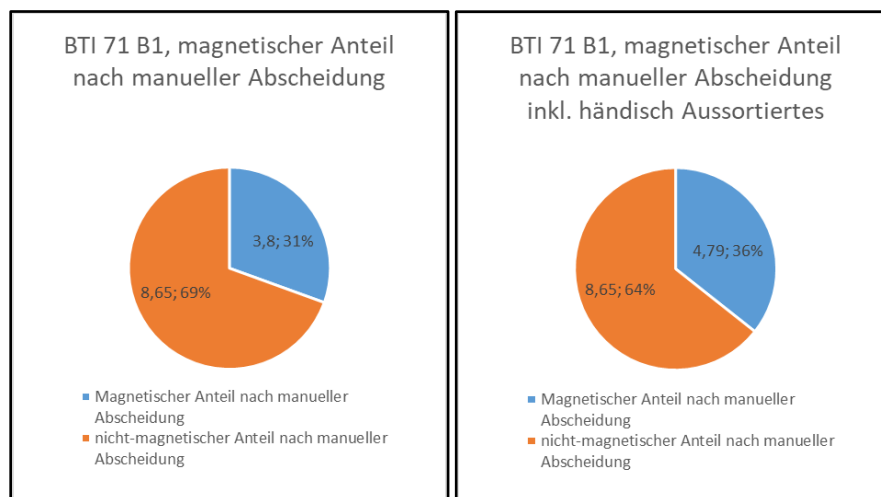


Abbildung 18: Magnetischer Anteil nach manueller Abscheidung, BTI71 B1.

Abbildung 18 zeigt die magnetischen Anteile der manuellen Abscheidung mit und ohne Berücksichtigung der händisch aussortierten, großen Metallpartikel. Der auf diese Weise festgestellte magnetische Anteil liegt nur minimal über dem Anteil, der durch den dritten Durchgang mit dem Trommelmagneten gefunden wurde.

Unter der Annahme, dass die manuelle Magnetseparation eine annähernd vollständige Trennung der magnetischen und der nicht-magnetischen Fraktion ermöglicht, können diese Daten als Referenz für den Trommelmagnetabscheider herangezogen werden.

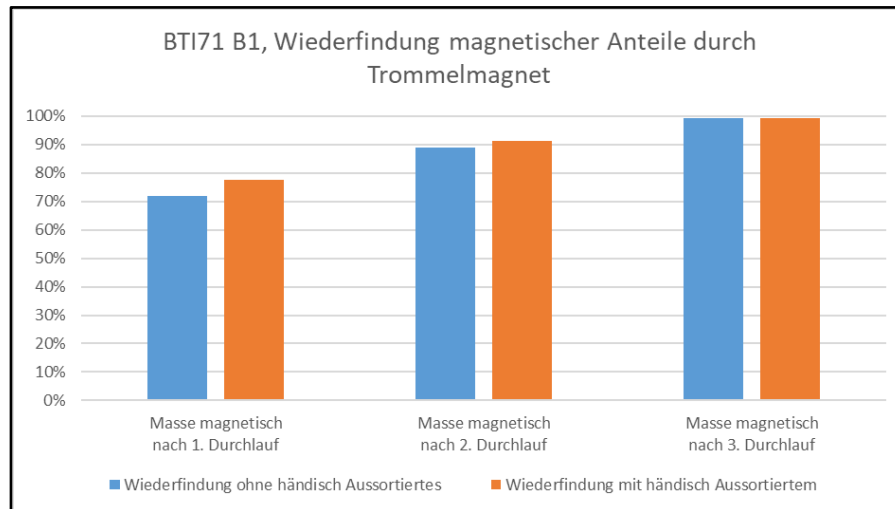


Abbildung 19: Wiederfindungsrate des Trommelmagneten, BTI71 B1.

Aus diesem Vergleich (**Abbildung 19**) ist ersichtlich, dass der erste Durchlauf mit dem Trommelmagneten nur etwa 70-75 % des potenziellen magnetischen Anteils abscheiden kann, während beim zweiten Durchlauf bereits 90 % erzielt werden. Ein dritter Durchlauf ergibt eine Steigerung auf nahezu 100 %.

Die Teilprobe **BTI71 B2** wurde, anders als die Teilprobe B1, vor der Magnetabscheidung nicht mit dem Backenbrecher auf eine Korngröße von 15 mm gebrochen, sondern in der ursprünglichen Form (Zerkleinerung von Hand auf 56 mm) belassen. Die Teilprobe B2 wurde jedoch ebenfalls dreifach magnetisch getrennt. Der Vergleich dieser Teilproben soll eine Einschätzung des erforderlichen, jedoch noch wirtschaftlichen, Aufbereitungsaufwands ermöglichen.

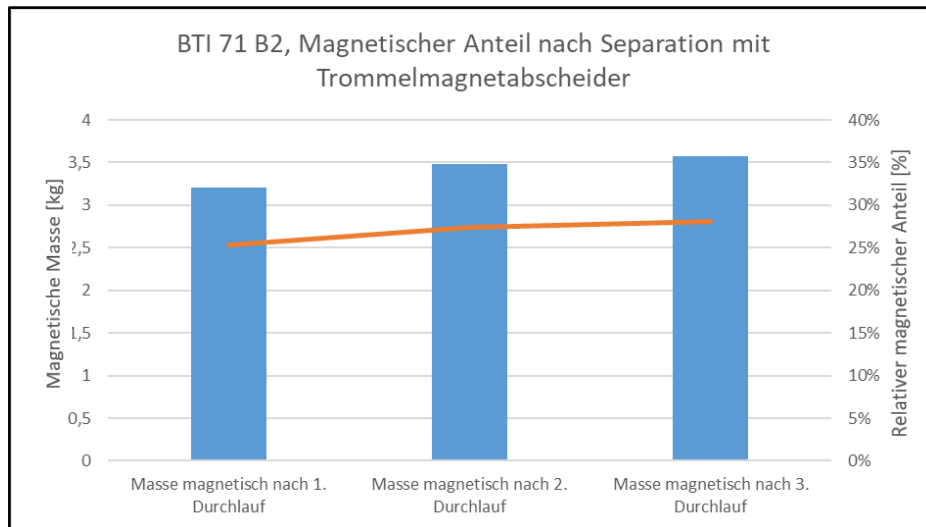


Abbildung 20: Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B2.

Auch bei der in **Abbildung 20** dargestellten Teilprobe B2 zeigt sich eine Steigerung des magnetischen Anteils mit zunehmender Anzahl an Separationsdurchgängen. Im Vergleich zur Probe B1 ist diese Steigerung jedoch von Durchgang zu Durchgang geringer. Gleichzeitig ist der magnetische Anteil insgesamt jedoch etwas geringer als bei der Probe B1. Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass größere Partikel des Versuchsmaterials, die kleinere magnetische Anteile haben, durch den Trommelmagneten nicht separiert werden können, da die magnetisierbare Masse im Vergleich zur Gesamtmasse des Partikels zu gering ist, um am Magneten haften zu bleiben.

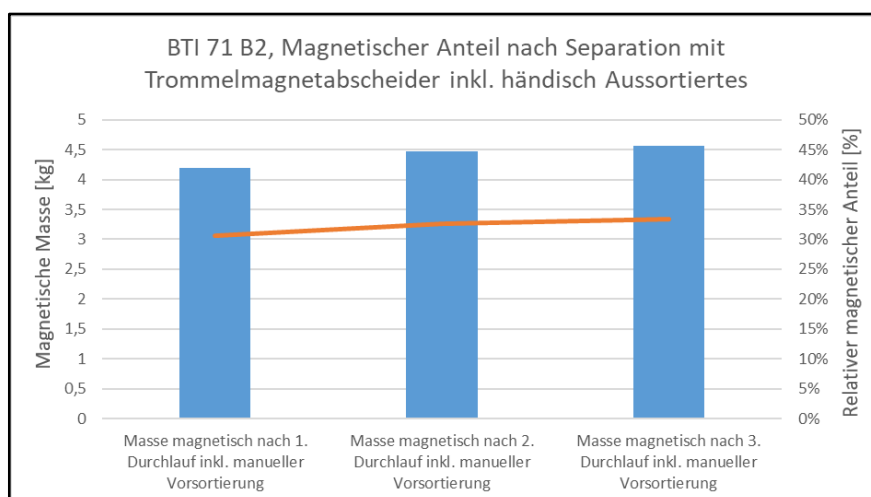


Abbildung 21: Magnetischer Anteil nach der Separation mit einem Trommelmagnetabscheider, BTI71 B2 inkl. händisch aussortiertes Material.

Die in **Abbildung 21** dargestellte Einbeziehung der händisch aussortierten, großen Metallpartikel bestätigt diese Ergebnisse.

Bei dieser Teilprobe B2 wurde anschließend ebenfalls eine manuelle magnetische Trennung durchgeführt. Im Unterschied zur Probe B1 wurden die magnetische Fraktion und die nicht-magnetische Fraktion unabhängig voneinander untersucht (**Abbildung 22**). Dabei konnte festgestellt werden, dass nach den drei Abscheidungsdurchläufen nur noch ca. 3,5 – 5 % der jeweiligen Fraktion falsch zugeordnet wurde, was grundsätzlich als sehr hohe Trennschärfe anzusehen ist.

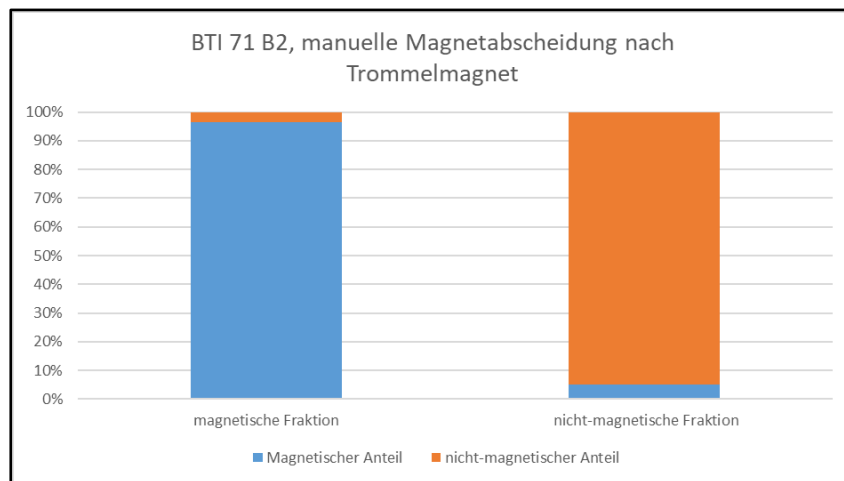


Abbildung 22: Magnetischer Anteil nach manueller Abscheidung, BTI71 B2.

Vergleichbar mit Probe B1 wurde ebenfalls die Wiederfindung berechnet, also wie hoch der durch den Trommelmagnetabscheider separierte Anteil an der durch manuelle Trennung ermittelten, maximalen magnetischen Masse ist.

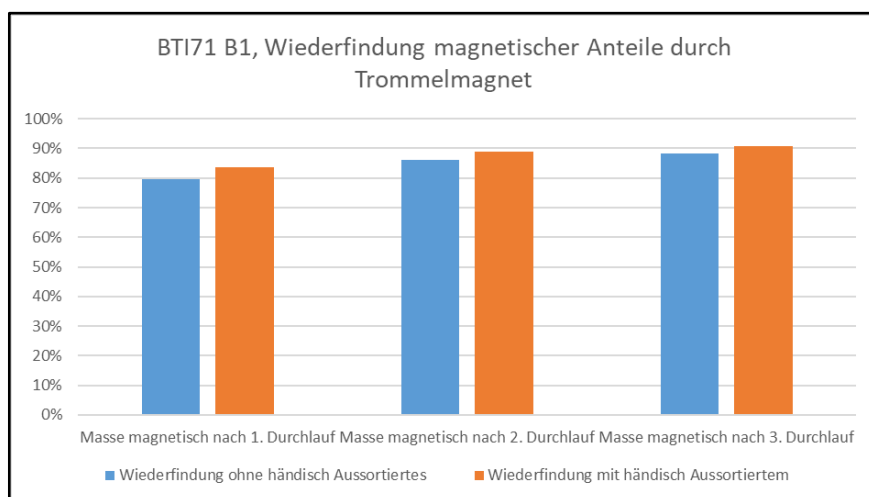


Abbildung 23: Wiederfindungsrate des Trommelmagneten, BTI71 B2.

Der direkte Vergleich mit Probe B zeigt, dass die anfängliche Wiederfindungsrate nach dem ersten Durchlauf um ca. 10 % höher liegt, die Steigung durch weitere Durchläufe jedoch geringer ausfällt. Das finale Niveau der Wiederfindung erreicht hierbei nur ca. 90 %, während bei Probe B1 nahezu 100 % erreicht wurde. Durch eine weitere

Zerkleinerung werden demnach weitere magnetische Partikel aus der Schlackenmatrix ganz oder teilweise befreit, wodurch diese ebenfalls durch eine magnetische Trennung separiert werden können. Die Untersuchungen am Lehrstuhl lassen darauf schließen, dass dadurch weitere 7 % bis 20 % der magnetischen Fraktion separiert werden können, wobei diese magnetische Fraktion nicht zwangsläufig mit einer vollständig metallischen Phase gleichzusetzen ist.

Die am ITM durchgeführten Versuche zeigen, dass die Aufbereitung der konditionierten Rohschlacke eine große Herausforderung darstellt. Dies liegt vor allem an der bemerkenswerten Härte und Grobkörnigkeit der Schlacke sowie den eingeschlossenen Metallpartikeln in den Schlackenkörnern, die die Materialaufbereitung erheblich erschweren.

In den Laborversuchen mussten große, nahezu vollständig metallische Partikel zunächst von Hand abgetrennt werden. Die anschließenden Versuche mit einem überlaufenden Trommelmagnetabscheider ergaben, dass der Abscheider zwar einen Großteil der magnetischen Fraktion separieren kann, jedoch nicht in einem einzigen Durchlauf. Erst nach mehreren Durchgängen konnte nahezu 100 % des potenziellen magnetischen Anteils abgetrennt werden, wobei eine vollständig manuelle Trennung der metallischen Partikel als Referenz herangezogen wurde. Dies zeigt, dass die Trennschärfe des Magnetabscheiders verbessert werden kann, insbesondere durch eine vorherige Zerkleinerung des Materials auf eine kleinere Korngröße.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass eine weitere Zerkleinerung des Materials zusätzliche magnetische Partikel aus der Schlackenmatrix freisetzen kann. Dies bedeutet, dass weitere 7 % bis 20 % der magnetischen Fraktion durch eine verbesserte Zerkleinerung und Magnetabscheidung separiert werden können. Es ist jedoch anzumerken, dass diese magnetische Fraktion nicht notwendigerweise vollständig aus metallischen Komponenten besteht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Aufbereitung speziell konditionierter Rohschlacke für den Einsatz im Straßenbau eine komplexe Aufgabe ist, bei der verschiedene Faktoren wie Korngröße, Magnetabscheidung und Zerkleinerung berücksichtigt werden müssen. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt können dazu beitragen, den Aufbereitungsaufwand zu optimieren und die Effizienz bei der Gewinnung von verwendbarem Material zu steigern. Weitere Forschung könnte sich darauf konzentrieren, die wirtschaftlichste Methode für die Schlackenaufbereitung zu

identifizieren und den Energieeinsatz weiter zu reduzieren. Ein möglicher Ansatz könnte dabei beispielsweise der Einsatz kaskadierter, aushebender Magnetabscheider mit unterschiedlichen Feldstärken sein.

2.1.2.3 Ermittlung nötiger Anlagenoptimierung

Aufgrund der unerwarteten Kündigung des Standortvertrages in Duisburg hatte Rauen keinen Zugang mehr zu den verfügbaren Aufbereitungsanlagen. Da die Fachkenntnisse von Rauen für die erfolgreiche Durchführung des Projekts unverzichtbar waren, wurde die Aufbereitung wie bereits oben beschrieben im weiteren Verlauf von externen Dienstleistern übernommen.

Eine detaillierte Beschreibung ist in **Kapitel 2.1.4 „Bau und Inbetriebnahme angepasster Brechaggregate“** zu finden.

2.1.3 Bewertung der Reaktionsprodukte

Diese umfassende Bewertung der Reaktionsprodukte erfolgt im Hinblick auf die umweltrelevanten Eigenschaften der konditionierten Elektroofenschlacke, unter anderem anhand von Elutionsversuchen und Feststoffanalysen. Diese Analysen stehen im Zusammenhang mit den Vorgaben der Ersatzbaustoffverordnung [4]. Ebenfalls werden die technischen Eigenschaften der konditionierten EOS untersucht, insbesondere im Kontext ihrer Verwendbarkeit als Baustoff.

2.1.3.1 Bewertung der oxidischen Phase

Die etwa 150 behandelten Chargen wurden gemäß der neuen Ersatzbaustoffverordnung untersucht. Der Fokus lag hierbei auf dem Schüttelverfahren 2:1 in den Kornfraktionen von 8 - 11 mm sowie 0 – 22,4 mm mit einem Feinanteil von < 4 mm von 45 Gew.-%. Für den finalen Großversuch wurde zudem das Aufwärts-Perkolationsverfahren genutzt, um die Wirksamkeit der Konditionierung auch mit diesem deutlich aufwändigeren Referenzverfahren zu zeigen. Neben der Auslaugung wurden die chemische und mineralogische Zusammensetzung untersucht, um Rückschlüsse auf die Wirkung der Konditionierstoffe zu erhalten, da die Mechanismen bisher noch nicht vollständig geklärt sind.

Durch die Konditionierstoff-Mischung 1, welche auch Reduktionsmittel enthält, war es bei regulärer Beetabkühlung möglich die Molybdänauslaugung zu verringern und die

entsprechenden Grenzwerte der Materialklasse SWS-1 einzuhalten. Jedoch wurde die Auslaugung von Vanadium negativ beeinflusst, sodass die EOS die Vorgaben der Materialklasse SWS-1 nicht einhalten konnte. Dahingegen führte eine reine Quarzsandbehandlung bei üblicher Beetabkühlung zwar ebenfalls zu einer Verringerung von Molybdän, jedoch nicht in dem Maße wie mit Reduktionsmitteln. Ein Vergleich für Molybdän ist in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Prozentuale Eingruppierung der behandelten EOS (8-11 mm) in die Materialklassen der EBV, basierend auf der Mo-Auslaugung aus dem Schüttelverfahren 2:1, getrennt nach reduzierender (Mischung 1) und nicht reduzierender Behandlung (Quarzsand).

| Molybdän | SWS-1 | SWS-2 | > SWS-2 |
|------------------------------|-------|-------|---------|
| Konditionierstoff-Mischung 1 | 65% | 35% | 0% |
| Quarzsand | 29% | 69% | 2% |

Die reduzierende Behandlung einer EOS bringt jedoch diverse Nachteile mit sich:

- CO₂ Emissionen bei Reduktion bzw. CO₂-Fußabdruck des Reduktionsmittels.
- Starkes Schäumen / Übersäumen des Kübels bei der Behandlung.
- Hohe Kosten für die Reduktionsmittel.

Aus den aufgeführten Gründen wurde der weitere Fokus auf die reine Behandlung mit Quarzsand, ohne Reduktionsmittel, gelegt.

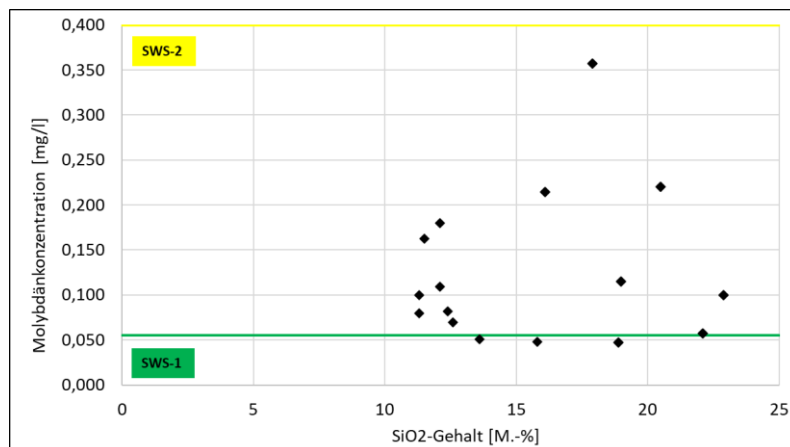


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen der Mo-Konzentration und dem SiO₂-Gehalt bei langsamer Abkühlung ohne eine Reduktion; mit Grenzwerten gemäß EBV.

Während bei der langsamen Abkühlung kein statistisch erkennbarer Zusammenhang der Molybdänauslaugung mit den untersuchten Parametern, wie beispielsweise dem SiO₂ Gehalt der EOS, identifiziert werden konnte (**Abbildung 24**), war dies jedoch bei der schnellen Abkühlung der Fall (**Abbildung 25**).

Es ist zu vermuten, dass durch die langsame Abkühlung diverse weitere Einflussfaktoren bei der Kristallisation zu betrachten sind, welche sich wiederum auf die Auslaugung auswirken, die bei einer schnell abgekühlten, feinkristallinen Struktur eine untergeordnete Rolle spielen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden mehrere Kampagnen durchgeführt, mit einem regulären, aber auch einem vergleichsweise hohen Eintrag an Molybdän in den Elektroofen, welcher über den Schrotteintrag gesteuert wurde. Dadurch sollte der positive Einfluss einer Quarzsandbehandlung und einer schnellen Abkühlung auch in einem Worst-Case-Szenario verifiziert werden. Dabei wurde parallel immer eine Probe schnell abgekühlt und zur Referenz eine weitere Probe regulär im Beet abgekühlt.

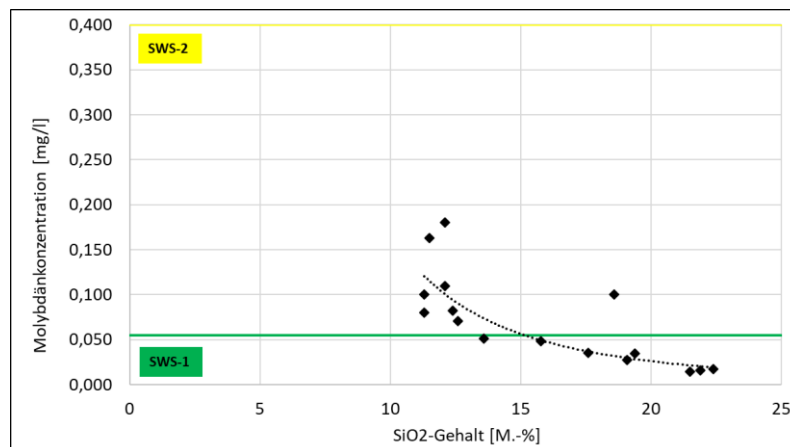


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen der Mo-Konzentration und dem SiO₂-Gehalt bei schneller Abkühlung ohne eine Reduktion; mit Grenzwerten gemäß EBV.

Tabelle 2 stellt die einzelnen Werte gegenüber. Die schnelle Abkühlung erfolgte zunächst mittels Löffelprobe aus dem Schlackekübel und dem Abkippen auf eine wassergekühlte Metallplatte. Später wurde eine kalte Baggerschaufel genutzt, welche kurzzeitig in den Schlackekübel getaucht wurde und an welcher die Schlacke schnell erstarrte.

Tabelle 2: Gewichtete Mittelwerte der prozentualen Verbesserung der Mo-Auslaugung aus dem Schüttelverfahren 2:1 der schnell abgekühlten EOS (8-11 mm), getrennt nach Schrottmenü und entsprechender Sandbehandlung.

| Vergleich langsame Abkühlung / schnelle Abkühlung | Hoch Mo- Schrottmenü mit Sandbehandlung | Reguläres Schrottmenü mit Sandbehandlung | Reguläres Schrottmenü ohne Sandbehandlung |
|--|--|---|--|
| Molybdän- Auslaugung | -69 % | -58 % | -19 % |

Mit dieser schnellen Abkühlung konnte, im Gegensatz zur langsamen Abkühlung, der Grenzwert für Molybdän der Materialklasse SWS-1 für 83 % der Chargen eingehalten werden. Ein sicheres Einhalten zu 100 % war jedoch mit der durchgeführten schnellen Abkühlmethodik nicht möglich.

Über alle Grenzwerte der EBV betrachtet führt die Konditionierung in Kombination mit einer schnellen Abkühlung zu einer Einstufung in die Materialklasse SWS-1 für etwa die Hälfte der Schlacken. Des Weiteren wurde zum Projektende nochmal die Einstufung der EOS ohne eine Behandlung überprüft, da sich dies durch leicht variierende Einsatzstoffe über die Projektlaufzeit ändern kann. Wie in **Abbildung 26** gezeigt, hat sich die Ausgangssituation jedoch nicht geändert, was die Wirksamkeit der Konditionierung bestätigt. Ohne Konditionierung könnte SWS-2 nicht sicher eingehalten werden.

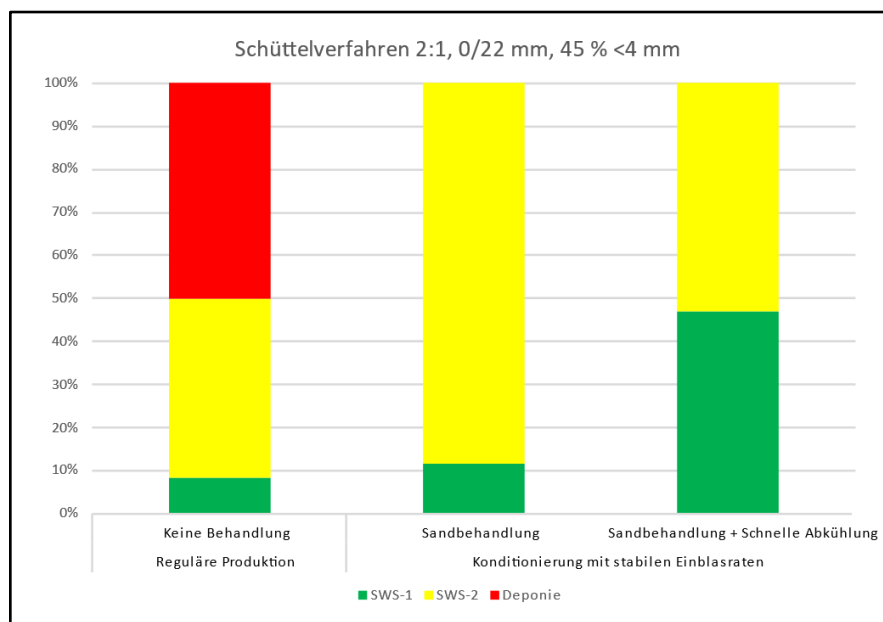


Abbildung 26: Einstufung in die Materialklassen SWS-1, SWS-2, >SWS-2 für verschiedene Behandlungen der EOS.

In der groß angelegten Versuchskampagne mit insgesamt 30 Chargen wurde ein Gesamtvolumen von etwa 700 Tonnen konditioniert. Auch hier wurde die gleiche Analytik wie bei den Einzelchargen durchgeführt, ergänzt um das aufwändigere Aufwärts-Perkolationsverfahren, welches gemäß EBV jedoch als Referenzverfahren für den Eignungsnachweis durchzuführen ist.

Die erzielten Ergebnisse weisen nach, dass die Konditionierung der Elektroofenschlacke zu einer sicheren Einhaltung der Anforderungen der Materialklasse SWS-2 führt, was einen positiven Beitrag zur Nachhaltigkeit und

Umweltverträglichkeit des Endprodukts im Baugewerbe darstellt. Die Abkühlung entspricht dabei der heutigen Betriebspraxis.

Neben dem Fokus auf die Auslaugeigenschaften wurden auch Prüfungen für die technische Eignung im Verkehrswegebau durchgeführt, wie die Volumenbeständigkeit, Schlagversuch, etc. Hierbei konnte tendenziell eine leichte Verbesserung ermittelt werden. Damit wurde das Ziel erreicht, dass die Konditionierung die technischen Eigenschaften der EOS nicht verschlechtert und heute übliche Anwendungsgebiete bedient werden können.

2.1.3.2 Bewertung der metallischen Phase

Im Rahmen des Forschungsvorhabens kam es zu der Vermutung, dass Molybdän sich vermehrt in der magnetischen Fraktion anreichert und somit auch dort vermehrt auslaugt. Aus diesem Grund wurde am ITM eine Probe der aufbereiteten Schlacke gesiebt und magnetisch getrennt. Im Anschluss wurde für beide Fraktionen wieder eine Kornverteilung zusammengesetzt, welche der ursprünglichen Kornverteilung entspricht. Für die Untersuchung wurde eine Probe aufbereiteter Schlacke mit einer Gesamtmasse von 50,84 kg verwendet.

Die Kornverteilung des Materials nach dem Sieben ist in der folgenden **Abbildung 27** dargestellt.

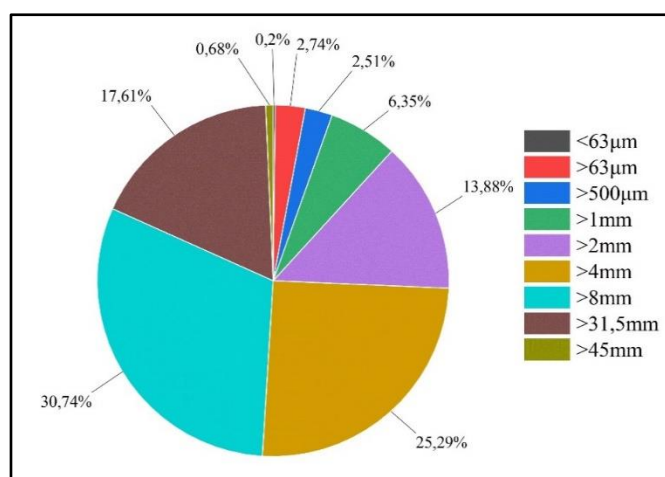


Abbildung 27: Kornverteilung einer Probe der aufbereiteten Schlacke.

Eine anschließende magnetische Trennung ergab einen Anteil der magnetischen Fraktion von 55,19 % und einen Anteil der nicht-magnetischen Fraktion von 44,81 %. Zur Überprüfung der oben genannten Vermutung wurde eine Referenzprobe (entsprechend des Ausgangsmaterials), eine magnetische Probe und eine

nichtmagnetische Probe in Zusammenarbeit mit dem FEhS auf das Auslaugverhalten untersucht. Eine Übersicht der ermittelten Werte ist in der **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Auslaugverhalten einer Referenzprobe, einer magnetischen Probe und einer nicht magnetischen Probe der aufbereiteten Schlacke.

| | Einheit | Probe Referenz | Probe nicht magnetisch | Probe magnetisch |
|-----------------|---------|----------------|------------------------|------------------|
| pH-Wert | | 11,1 | 11,119 | 11,068 |
| Molybdän | µg/l | 80,5 | 87 | 78 |

Die Analyse der Molybdän-Auslaugungswerte lässt den Schluss zu, dass das Auslaugverhalten nicht in direkter Abhängigkeit von den magnetischen Eigenschaften der Schlacke steht. Sowohl die Ergebnisse der Referenzprobe, als auch jene der magnetischen und nicht-magnetischen Proben sind derart ähnlich, dass kein erkennbarer Zusammenhang zwischen dem Auslaugverhalten und einer magnetischen Anziehungskraft besteht.

Um eine mögliche Rückführung des Separationseisens (**Abbildung 28**) in den Stahlerzeugungsprozess zu bewerten, wurde am ITM das Separationseisen genauer untersucht.



Abbildung 28: Separationseisen der EOS, welches durch die Aufbereitung von der nichtmetallischen Fraktion getrennt wird.

Im ersten Schritt wurde das Separationseisen mit einer Nasstrennmaschine zerschnitten und metallographische Schliffe wurden hergestellt, um Informationen über die Zusammensetzung zu erhalten. Das Separationseisen lässt sich in schlackelastige und eisenlastige Phasen unterteilen. **Abbildung 29** zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme der schlackenlastigen Phase.

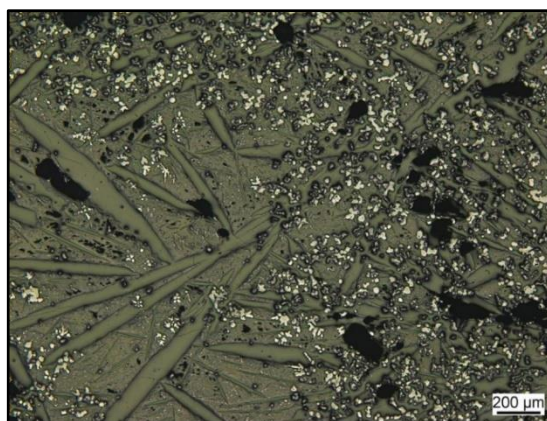


Abbildung 29: Lichtmikroskopische Aufnahme der schlackenlastigen Phase (grüne Matrix mit stengelartigen Ausscheidungen) des Separationseisens.

Um die Zusammensetzung der schlackenlastigen Phase zu bestimmen, wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie diverse EDX-Spektren (**Abbildung 30**) erstellt.

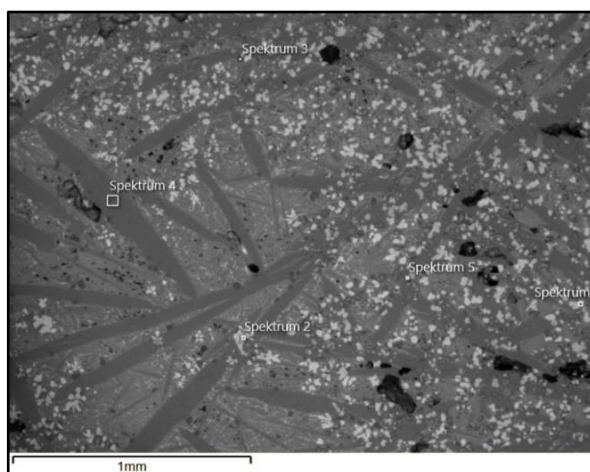


Abbildung 30: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der schlackenlastigen Phase des Separationseisens.

Die Ergebnisse der einzelnen EDX-Spektren sind in der folgenden **Tabelle 4** aufgeführt.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der schlackelastigen Phase des Separationseisens.

| | C | O | Mg | Al | Si | P | Ca | Ti | V | Cr | Mn | Fe |
|----------------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|
| Spek. 1 | 3.81 | 26.57 | 7.74 | 2.53 | 5.00 | - | 7.08 | 0.15 | 0.30 | 1.07 | 8.15 | 37.60 |
| Spek. 2 | 3.38 | 27.78 | 9.84 | 2.55 | 5.50 | - | 8.55 | 0.14 | 0.28 | 1.91 | 7.39 | 32.68 |
| Spek. 3 | 4.09 | 32.07 | 6.73 | 9.54 | 5.46 | - | 8.65 | 0.30 | 0.47 | 15.42 | 4.20 | 13.07 |
| Spek. 4 | 5.12 | 33.92 | 5.66 | 1.19 | 15.35 | 0.23 | 30.96 | - | - | - | 1.94 | 5.63 |
| Spek. 5 | 3.21 | 32.67 | 5.99 | 5.13 | 5.01 | - | 7.98 | 0.21 | 0.20 | 22.90 | 4.13 | 12.58 |

Aus den Spektren 1 und 2 ist zu erkennen, dass es sich um eisenreiche Oxide mit höheren Calcium-, Magnesium-, und Mangangehalten handelt. Demgegenüber

zeichnen sich die Spektren 3 und 5 durch deutlich geringere Eisengehalte aber dafür höhere Chromgehalte aus, wobei aus der Höhe der Sauerstoffgehalte geschlossen werden kann, dass es sich hier vermutlich um Oxide handelt. Die Gehalte der anderen Elemente sind ähnlich wie in den Spektren 1 und 2. Im Gegensatz dazu deutet das Spektrum 4 darauf hin, dass es sich bei den länglichen stengelartigen Ausscheidungen um ein Calciumsilikat handelt.

Analog zur Analyse der schlackenlastigen Phase wurde die eisenlastige Phase mittels Lichtmikroskopie (**Abbildung 31**) und Rasterelektronenmikroskopie (**Abbildung 32**) untersucht.

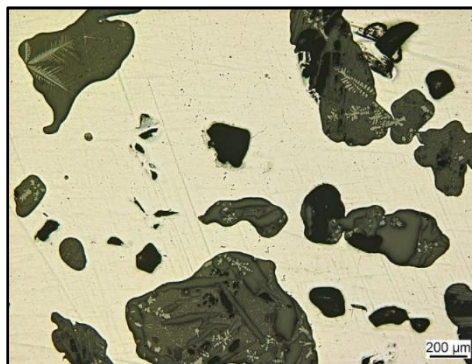


Abbildung 31: Lichtmikroskopische Aufnahme der eisenlastigen Phase des Separationseisens.

Das Ergebnis eines Summenspektrums der REM-Aufnahme aus **Abbildung 32** ist in der folgenden **Tabelle 5** dargestellt.

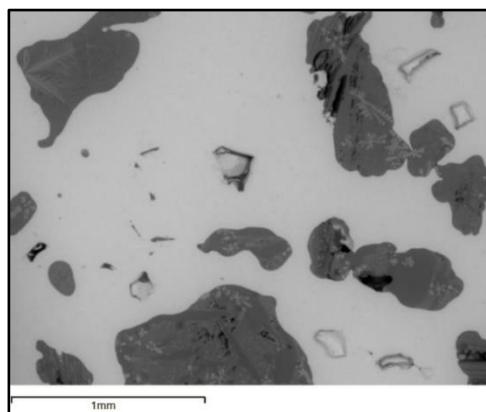


Abbildung 32: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der eisenlastigen Phase des Separationseisens.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der eisenlastigen Phase des Separationseisens.

| C | O | Mg | Al | Si | S | Ca | Ti | Cr | Mn | Fe | Cu | Gesamt |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|--------|
| 3.82 | 4.97 | 1.71 | 1.72 | 4.13 | 0.12 | 5.50 | 0.09 | 0.09 | 1.13 | 76.50 | 0.23 | 100.00 |

Um einen Einsatz des Separationseisen bei der DK zu überprüfen, wurden am ITM eine Probe des Separationseisens umgeschmolzen, der mengenmäßige Metallgehalt bestimmt und der metallische Regulus als auch die Schlacke analysiert.

Für den Umschmelzversuch wurde eine Probe des Separationseisen (361,13 g) in einen A3 Ton-Graphit Tiegel (**Abbildung 33**) gegeben und mit Graphit überschüttet, um das Separationseisen vollständig zu reduzieren.



Abbildung 33: Ton-Graphit Tiegel der Größe und Bauform A3.

Das Material wurde mittels eines 25 kW Induktionsofens auf 1600 °C erhitzt, um im Anschluss die Temperatur für 5 Minuten zu halten. Im nächsten Schritt wurde der Ofen ausgeschaltet und das Material im Tiegel erstarren gelassen. Die Masse des entstandenen Regulus (**Abbildung 34**) beträgt 245,96 g. Der Metallgehalt liegt demnach bei 68 %.



Abbildung 34: Regulus des Umschmelzversuchs von Separationseisen zur Bestimmung des Metallgehalts.

Abbildung 35 zeigt die Schlacke, die während des Umschmelzversuchs entstanden ist. Für eine genauere Untersuchung wurden sowohl der Regulus als auch die Schlacke licht- und rasterelektronenmikroskopisch untersucht.



Abbildung 35: Schlacke des Umschmelzversuchs von Separationseisen zur Bestimmung des Metallgehalts.

Die chemische Zusammensetzung der Schlacke ist in **Tabelle 6** aufgelistet.

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung der Schlacke des Umschmelzversuchs.

| C | O | Mg | Al | Si | S | Ca | Ti | Mn | Fe | Gesamt |
|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|--------|
| 9.97 | 33.85 | 9.60 | 7.69 | 10.17 | 0.26 | 26.03 | 0.47 | 1.57 | 0.38 | 100.00 |

Aus der chemischen Analyse ist zu entnehmen, dass es sich bei der Schlacke um ein Oxidsystem auf der Basis von Calcium, Silicium, Magnesium und Aluminium handelt.

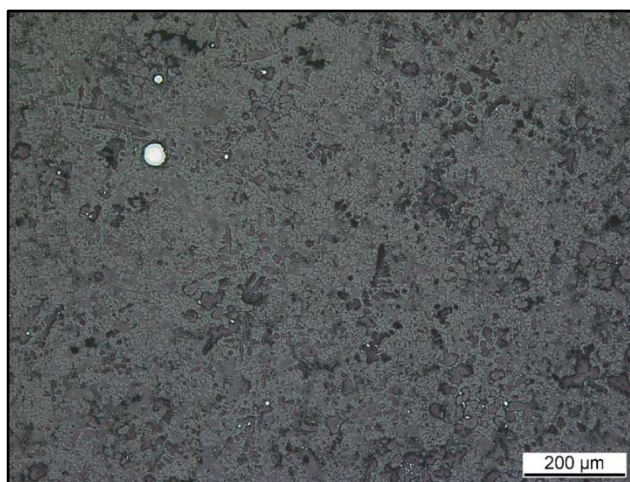


Abbildung 36: Lichtmikroskopische Aufnahme der Schlacke des Umschmelzversuchs.

Der **Abbildung 36** und ganz besonders der **Abbildung 37** ist aufgrund der unterschiedlich dunkelgefärbten Bereiche zu entnehmen, dass sich aus der ursprünglich flüssigen Schlacke zwei Phasen ausgeschieden haben.

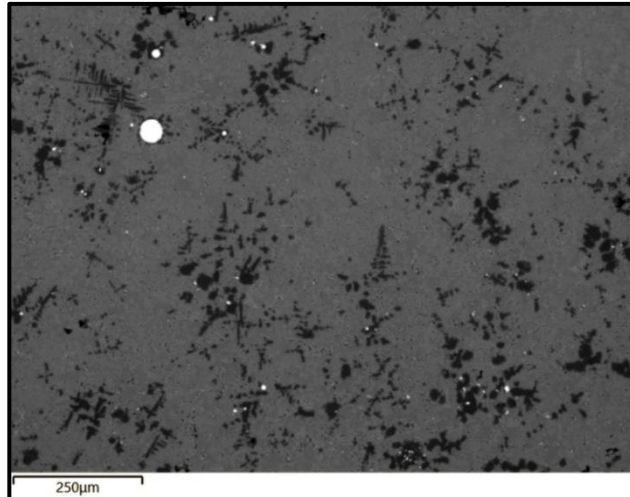


Abbildung 37: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Schlacke des Umschmelzversuchs.

In der **Abbildung 37** zeigt die dunklere Phase sehr deutlich dendritische Strukturen, was bedeutet, dass diese Oxidphase zuerst aus dem flüssigen Zustand kristallisiert ist und im Weiteren dann die restliche Schlackenphase im Verlauf der Abkühlung erstarrt ist. Die hellen, kreisrunden Partikel zeigen Bereiche, in denen flüssiges Metall erstarrt ist.



Abbildung 38: Lichtmikroskopische Aufnahme des Regulus des Umschmelzversuchs.

Das Ergebnis des Summenspektrums des Regulus ist in **Tabelle 7** dargestellt.

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des Regulus des Umschmelzversuchs.

| C | O | Si | P | S | Cr | Mn | Fe | Gesamt |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 28.40 | 0.56 | 0.28 | 0.03 | 0.03 | 0.44 | 1.28 | 68.99 | 100.00 |

Aus der **Abbildung 38** und der **Abbildung 39** ist zu entnehmen, dass sich übereutektische Graphitausscheidungen in dem Eisen befinden, was durch den intensiven Kontakt mit dem Graphit nicht verwunderlich ist. Durch den Kontakt mit dem Kohlenstoff war die Eisenschmelze im flüssigen Zustand an Kohlenstoff gesättigt, sodass eine übereutektische Zusammensetzung ($> 4,5\% \text{ C}$) vorlag.

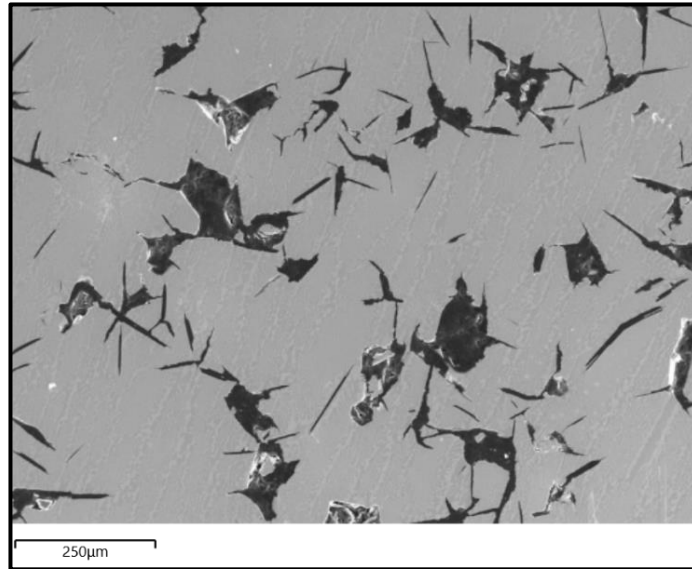


Abbildung 39: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Regulus des Umschmelzversuchs.

Im Verlauf der Erstarrung hat sich der Graphit primär ausgeschieden, was an der flächigen, unregelmäßigen und zum Teil nadelartigen Struktur des Graphits zu erkennen ist.

Neben dem Eisen sind in der metallischen Matrix die Mangan- und Chromgehalte erhöht, die aber einem prinzipiellen weiteren Einsatz zur Erzeugung von Roheisen nicht entgegenstehen.

2.1.3.3 Ermittlung angepasster Prozessparameter

Aufgrund der vielfältigen nachteiligen Auswirkungen, die mit der reduzierenden Behandlung der Elektroofenschlacke (EOS) einhergehen, wurde die Entscheidung getroffen, die Anpassung der Prozessparameter auf die reine Behandlung mit Quarzsand zu fokussieren. Die reduzierende Behandlung mit Kohlenstoff bringt mehrere Nachteile mit sich. Darunter fallen die Emissionen von CO_2 während des Reduktionsprozesses. Zudem ist das Auftreten eines starken Schäumens oder Überschäumens des Schlackenkübels während der Behandlung ein Problem, das die Prozessstabilität beeinträchtigt (**Abbildung 40**). Die hohen Kosten, die mit der Beschaffung der erforderlichen Reduktionsmittel verbunden sind, stellen eine weitere

Hürde dar. Angesichts dieser Herausforderungen wurde beschlossen den Fokus auf die Behandlung mit Quarzsand zu richten. Dieser Ansatz verspricht die genannten Probleme zu umgehen und die gewünschten Verbesserungen im Auslaugverhalten der EOS zu erzielen.



Abbildung 40: Übersäumen der Schlacke während des Einblasens des Reduktionsmittels.

Bei einer umfassenden und detaillierten Evaluierung sämtlicher Grenzwerte gemäß den Vorgaben der Ersatzbaustoffverordnung stellte sich heraus, dass die synergetische Anwendung von Konditionierung und rascher Abkühlung eine bedeutsame Auswirkung auf die Klassifizierung der Elektroofenschlacke hat. Diese kombinierte Vorgehensweise ermöglicht eine Einordnung von etwa der Hälfte der Schlacken in die strenger regulierte Materialklasse SWS-1 gemäß den festgelegten Richtlinien. Dabei wird deutlich, dass die gewählte Methodik eine substantielle Verbesserung der Umwelteigenschaften und der Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards im Zusammenhang mit der Schlackenverwertung im Baubereich bewirkt.

Eine rasche Abkühlung der gesamten Schlackenmenge gestaltet sich gegenwärtig auf industrieller Ebene als nicht realisierbar. Erste Ansätze beschäftigen sich mit dem Einsatz von wassergekühlten Kupferplatten, um die Wärmeabführung der Schlacke möglichst zügig zu bewerkstelligen. Eine vertiefte Ausarbeitung dieser Idee bedarf allerdings zusätzlicher umfassender Untersuchungen und könnte potenziell im Rahmen eines zukünftigen Forschungsprojekts konkretisiert und verwirklicht werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bestimmung geeigneter Prozessparameter zu dem Schluss führt, dass die Konditionierung der Elektroofenschlacke mit Quarzsand eine effektive Maßnahme darstellt. Dieser Ansatz

wurde im Rahmen des Forschungsprojekts erfolgreich in den Produktionsprozess der GMH implementiert.

2.1.4 Bau und Inbetriebnahme angepasster Brechaggregate

Aufgrund der unerwarteten Kündigung des Standortvertrages in Duisburg hatte Rauen keinen Zugang mehr zu den verfügbaren Aufbereitungsanlagen, da die Anlagentechnik und die hier zuständigen Mitarbeiter in eine neu gegründete Gesellschaft übergegangen sind, an der Rauen nicht mehr beteiligt war. Da für die zielführende Durchführung des Vorhabens die Expertise von Rauen unabdingbar war, wurde die Aufbereitung im weiteren Verlauf unter anderem durch den externen Dienstleister, die Schürmeyer GmbH durchgeführt, die über entsprechende Standardgeräte, jedoch nicht über die spezialisierte Anlagentechnik verfügte. Um dies zu kompensieren, wurde die erforderliche Aufbereitung unter der Anleitung von Rauen in mehreren, mehrfach wiederholenden Schritten auf dem Gelände des Verbundpartners GMH durchgeführt, sodass kein neues Brechaggregat angeschafft und in Betrieb genommen wurde.

2.1.5 Bau und Inbetriebnahme der betrieblichen Konditionierungsanlage

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte die zu Beginn des Projekts verwendete Prototypanlage zu einer Demonstrationsanlage weiterentwickelt werden, die in den normalen Stahlerzeugungsprozess der GMH eingebunden werden konnte. Die einzelnen Entwicklungsschritte werden im Folgenden näher beschrieben.

Der Aufbau der Befüllung und des Wägesystems ist in **Abbildung 41** schematisch dargestellt. Befüllt wird die Anlage mithilfe eines Krans, der Bigbags über die Anlage fährt und das Material dort einfüllt. Das Gewicht des Konditionierungsmittels, in diesem Fall Sand, wird durch eine Wägezelle unter dem Druckgefäß erfasst. So kann gemessen werden, wie viel Sand eingeblasen wird.

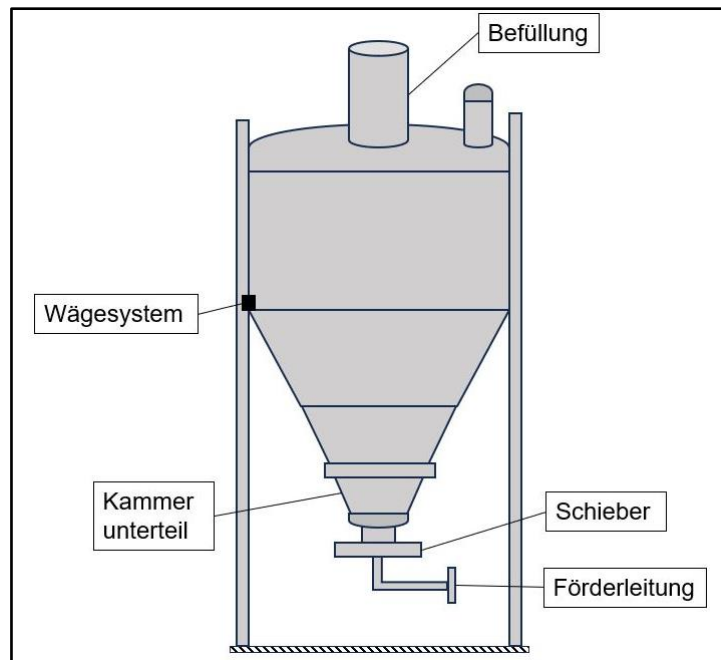


Abbildung 41: Schematischer Aufbau der Befüllung, des Wägesystems, und der Förderleitung der Konditionierungsanlage.

Durch die gezielte Variation der Drosselgröße, des Kammerdrucks, der Fördergasmenge und des Auflockerungszustandes konnte die Förderrate schrittweise erhöht werden. Die Drosselgröße beschreibt den Auslassquerschnitt am Sendegefaß der Förderanlage. Der Vergleich der mittleren Einblasrate zwischen dem Ausgangszustand (A) und der optimierten Drosselgröße (B) sowie einer zusätzlichen Anpassung der Einblasparameter (C) ist in der **Abbildung 42** aufgetragen. Die mittlere Einblasrate konnte um 61 % im Vergleich zum Ausgangszustand (A) gesteigert werden, was einer Erhöhung der Einblasrate von 87 kg/min auf 140 kg/min entspricht. Die Anlage zeigte unter Verwendung der optimierten Drosselgröße noch variierende Fördermengen mit einer Spannweite von 43 kg/min, die durch die Parameteranpassung auf 18 kg/min verringert werden konnte.

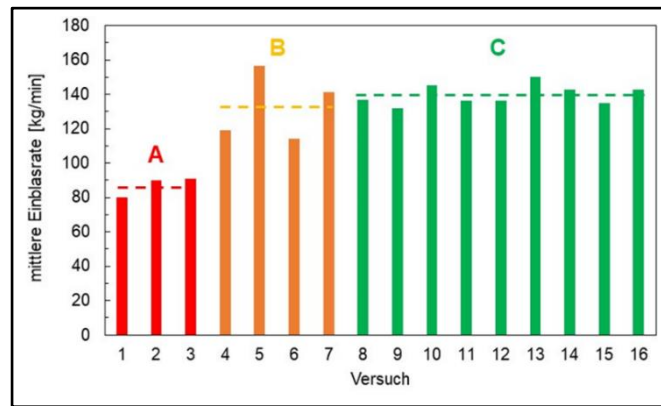


Abbildung 42: Entwicklung der mittleren Einblasrate für Quarzsand im Laufe der Optimierungen. Die Versuche A (rot) kennzeichnen den Ausgangszustand mit einer mittleren Einblasrate von 87 kg/min, die Versuche B (orange) zeigen die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 133 kg/min durch eine Optimierung der Drosselgröße in der Einblasanlage sowie die Versuche C (grün) die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 140 kg/min durch eine zusätzliche Optimierung der Einblasparameter.

Bei der Reduktionsmischung (Kohlenstoff, Ferrosilizium und Quarzsand) wurde ebenfalls ein vergleichbares Verbesserungspotenzial erreicht. Der **Abbildung 43** kann eine Steigerung um 19 % von 140 kg/min auf 166 kg/min entnommen werden.

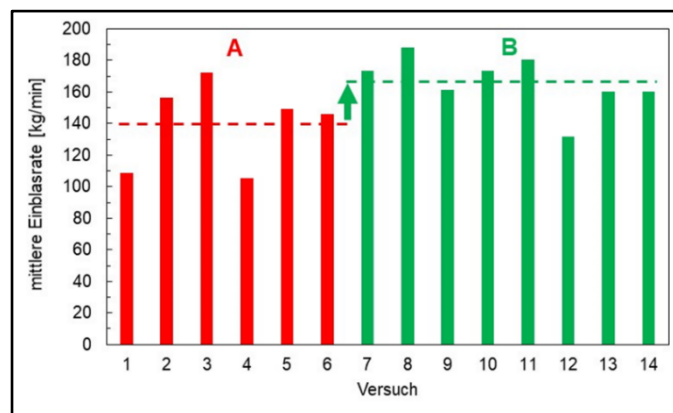


Abbildung 43: Entwicklung der mittleren Einblasrate für die Mischung 1 (Kohlenstoff, Ferrosilizium und Quarzsand) im Laufe der Optimierungen. Die Versuche A (rot) kennzeichnen den Ausgangszustand mit einer mittleren Einblasrate von 140 kg/min, die Versuche B (grün) zeigen die Erhöhung der mittleren Einblasrate auf 166 kg/min durch eine Optimierung der Einblasparameter.

Darüber hinaus wurde die Streuung der mittleren Einblasrate um 15 % im Vergleich zu dem Ausgangszustand verringert. Die höhere Prozesssicherheit in Form einer konstanten Einblasrate ist für eine gleichmäßige Konditionierung von entscheidender Bedeutung. Dazu beigetragen hat zusätzlich die Beseitigung von Störungen, wie z. B. Stopfern, die zu Beginn der Optimierungen gehäuft auftraten.

Die Einblasanlage wurde durch eine Kamera erweitert, welche die fließende Schlacke anhand der Temperatur erkennt und daraufhin ein Signal zur Förderung des Konditionierungsmittels an die Steuerung der Einblasanlage sendet. So kann verhindert werden, dass bei unregelmäßigem Abfluss der Schlacke eingebrachte Sandmengen zu einem ungünstigen Zeitpunkt in den Kübel gelangen und nicht mit der flüssigen Schlacke reagieren können. Die Kamera ist in **Abbildung 44** dargestellt.



Abbildung 44: Kamera, die durch die Temperatur die austretende Schlacke erkennt und ein Signal zur Förderung des Konditionierungsmittels an die Steuerung der Einblasanlage sendet.

Zu Beginn der Behandlung muss eine Lanze über den Schlackenkübel gefahren werden. In der ersten Phase des Vorhabens erfolgte dies bei jeder Charge händisch. Im Rahmen des Projektes wurde eine hydraulische Vorrichtung entwickelt und installiert, sodass die Lanze (**Abbildung 45**) vollautomatisch zu Beginn der Behandlung über den Schlackenkübel gefahren werden kann.

Durch die pneumatische Förderung sowie die in Richtung Boden gerichtete

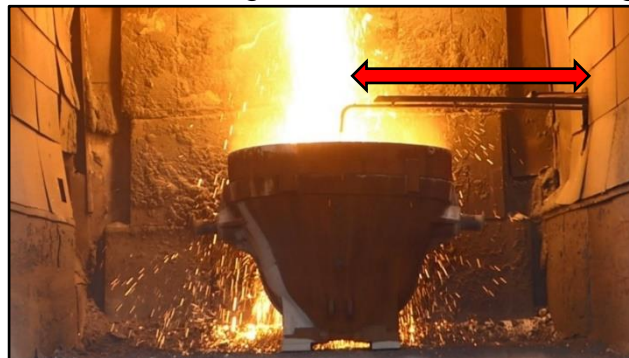


Abbildung 45: Behandlung der flüssigen Schlacke durch Einblasen des Konditionierungsmittels über eine verfahrbare Lanze.

Lanzenspitze (**Abbildung 45**) erfährt das Konditionierungsmittel einen Impuls in Richtung Boden. Die Verwendung eines Förderbandes oder eines Rohrkettenförderers

hätte den Vorteil, dass die Ansprechzeit deutlich verkürzt werden würde. Durch die Verwendung alternativer Fördertechnik würde der beschriebene Impuls wegfallen, sodass ein durch die Thermik verursachtes nach oben Tragen des Konditionierungsmittels entsteht. Um dies zu untersuchen, wurde im Rahmen des Vorhabens eine Einrichtung entwickelt und gebaut, mit der ein fehlender Impuls überprüft werden kann. In der **Abbildung 46** ist die eingesetzte Einrichtung dargestellt.



Abbildung 46: Einrichtung zur Untersuchung eines Einsatzes von alternativen Fördertechniken.

Die Einrichtung besteht aus einem Behälter, der von oben mit Bigbags befüllt werden kann. Das Material wird durch ein geneigtes Rohr über den Kübel geführt. In dem Rohr befindet sich ein Schieber, um das Rohr öffnen bzw. schließen zu können. Von dort



Abbildung 47: Versuchsaufbau zur Optimierung der Fördertechnik: Verkürzung der Anlaufzeit durch Einsatz eines Schneckenförderers.

fällt das Material, in diesem Fall der Sand, in den Schlackenkübel. **Abbildung 47** zeigt den Versuchsaufbau während der Konditionierung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass ein Hineinrieseln ausreichend ist, um das Konditionierungsmittel homogen in der Schlacke zu verteilen. Der Einsatz einer alternativen Fördertechnik ist daher möglich.

Durch die genannten Erkenntnisse und Umsetzungen konnte im Rahmen des Vorhabens eine Demonstrationsanlage entwickelt werden, die eine reproduzierbare Konditionierung der flüssigen Schlacke ermöglicht und betrieblich eingebunden werden kann.

2.1.6 Ökonomische und ökologische Bewertung

2.1.6.1 Ökonomische und ökologische Betrachtung

Das erfolgreich abgeschlossene Forschungsprojekt „KondEOS“ ermöglicht trotz der im August 2023 eingeführten Überarbeitung der Ersatzbaustoffverordnung [4] die weitere Vermarktungsbasis von Elektroofenschlacken aufrecht zu erhalten.

Bei der GMH entstehen jährlich 100.000 bis 120.000 Tonnen Elektroofenschlacke. Die Schlacke wird als Ersatzbaustoff vermarktet, sodass neben dem Roheisen die Schlacke als Nebenprodukt des Stahlerzeugungsprozesses gilt. Für die Schlacke gibt es beispielsweise Abnehmer in den Bereichen des Straßen- und Wegebaus. Wird der Prozess der Stahlerzeugung mittels Elektrolichtbogenöfen nicht entsprechend der neuen Grenzwerte angepasst, würden diese Einnahmen wegfallen und so der Elektrostahlindustrie in Deutschland starke finanzielle Probleme bereiten. Weiter würden Kosten für eine Deponierung anfallen. Außerdem ist die Deponiefläche in Deutschland nicht ausreichend, um die EOS deponieren zu können.

Mittels der entwickelten Konditionierungsanlage wird eine zuverlässige Einhaltung der Grenzwerte der Materialklasse SWS 2 gewährleistet. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in einigen Fällen sogar die Grenzwerte der höchsten Güteklasse SWS 1 einzuhalten und somit die Schlacke gewinnbringender zu vermarkten. Mit der Einhaltung der Grenzwerte der EBV kann die EOS in weiteren Anwendungsgebieten und Einbauweisen der EBV unter gebundenen Trag- und Deckschichten bis in definierten Wasserschutzgebieten eingesetzt werden. Somit trägt die entwickelte Konditionierungsanlage entscheidend zur Absatzsicherheit der EOS-Schlacken bei.

Das Separationseisen, das durch den Aufbereitungsprozess gewonnen wird, kann einerseits von der GMH selbst eingesetzt oder alternativ extern vermarktet werden. Dies trägt nicht nur zur Steigerung der Wertschöpfung bei, sondern fördert auch die Ressourceneffizienz und die Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie.

Durch die vollständige Verwertung der Produkte des Stahlerzeugungsprozesses mittels Elektrolichtbogenöfen werden weitere diverse ökologische Vorteile geschaffen. Eine potenzielle Deponierung der Elektroofenschlacke wird mit der entwickelten Methode ausgeschlossen, sodass die Deponiekapazitäten geschont werden und die Absatzsicherheit für die Elektroofenschlacke gegeben ist. Der Ressourceneinsatz von Primärrohstoffen wird verringert, sodass ebenfalls ein verminderter Energieaufwand entsteht und Treibhausgasemissionen vermindert werden, welche beim Abbau dieser Rohstoffe entstehen.

2.1.6.2 Charakterisierung der Produkte „konditionierte EOS“ und „Metall“

Für eine Beschreibung der Produkte "konditionierte EOS" und "Metall" gemäß der ausführlichen Vorhabensbeschreibung wird in **Abbildung 48** der Entstehungsprozess dieser Materialien veranschaulicht. Die konditionierte Schlacke kann dabei in ihre Endprodukte "EOS-Baustoff" und "Eisenbasismaterial" aufgeteilt werden. Dies ermöglicht eine klarere Darstellung der Wertschöpfungskette und der potenziellen Anwendungsfelder dieser Produkte im Gesamtkontext.

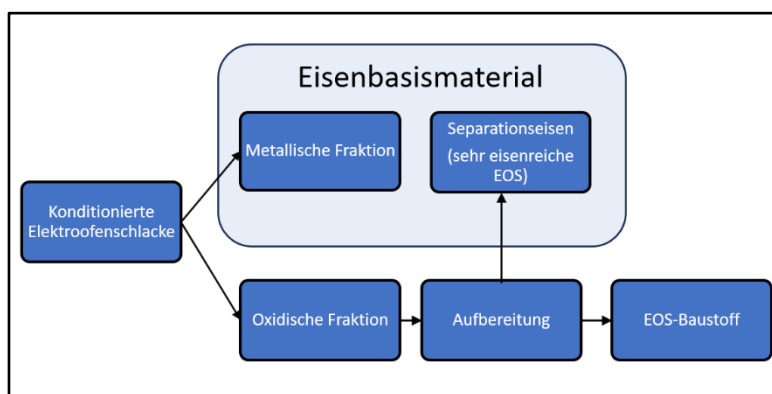


Abbildung 48: Entstehung des EOS-Baustoffs und des Eisenbasismaterials.

Das entstandene Eisenbasismaterial eröffnet eine zirkuläre Wertschöpfung im Stahlerzeugungsprozess. Diese Rückführung des gesamten metallischen Anteils führt zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz und der Nachhaltigkeit in der Stahlindustrie, indem der Verbrauch von Primärrohstoffen reduziert wird.

Das als EOS-Baustoff bezeichnete Material entsteht nach der Aufbereitung und ist für eine Vielzahl an Anwendungsgebieten geeignet. Das größte Anwendungsgebiet ist der Straßen- und Wegebau. Hier kann durch die Konditionierung die Schlacke umweltschonend eingesetzt werden. Die physikalischen Eigenschaften der konditionierten EOS erlauben zudem eine breite Verwendung. Die oxidische Fraktion kann beispielsweise als effizientes Strahlmittel eingesetzt werden, das vielfältige Anwendungen in der Oberflächenbehandlung, Reinigung und anderen technischen Bereichen findet. Diese multifunktionale Verwendbarkeit trägt nicht nur zu einer nachhaltigen Nutzung von Ressourcen bei, sondern eröffnet auch neue Wege der Wertschöpfung aus einem Nebenprodukt der Stahlindustrie.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die präzise Allokation der finanziellen Ressourcen ist in den entsprechenden quantitativen Berichten der Partner aufgeführt. Die primären Aufgaben, die im Rahmen der Planung und Durchführung des Projekts gemäß **Abschnitt 1.3 Planung und Ablauf** definiert wurden, werden durch die relevanten Positionen der quantitativen Nachweise abgedeckt. Im Besonderen entstanden den Projektpartnern dabei folgende Kosten:

Position 0812 – Personalausgaben

Die Personenmonate wurden benötigt, um die vorgesehenen Arbeitspakete zu bearbeiten. Details hierzu sind dem nachfolgenden **Kapitel 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten** zu entnehmen.

Position 0813 – Material

Es wurden größere Mengen Material, welches für Konditionierungsversuche im Industriemaßstab benötigt wurde, angeschafft. Insbesondere ist hier das Reduktionsmittel FeSi 75 zu nennen.

Position 0846 – Dienstreisen

Reisekosten sind für die Projektpartner im Wesentlichen für die Durchführung der Betriebsversuche bei der GMH und für die Besuche der BMBF-Statuskonferenzen angefallen.

Position 0843 – Verbrauchsmaterial

Insbesondere bei der Durchführung von Laborversuchen und der Analyse der Betriebsversuche sind am ITM und bei dem FEhS Kosten für Verbrauchs- und Sachmittel angefallen. Im Wesentlichen beinhalten diese Kosten Laborverbrauchsmaterialien wie z.B. Tiegel, Thermoelemente und metallographische Verbrauchsmaterialien.

Position 0850 – Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 410/400 EUR im Einzelfall

Die Mittel wurden vorwiegend zur Anschaffung von Schlackenkübeln und zur Modifikation der Konditionierungsanlage verwendet (GMH).

Für die Analyse / Beurteilung der Konditionierungsprodukte wurden am ITM ein Schmelzaufschlussgerät, eine Nasstrennmaschine und eine Mikroskopmotorisierung angeschafft.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das wissenschaftliche und technische Personal und die Investitionen in Gegenstände wurden entsprechend der Planung wie folgt eingesetzt:

1. Konditionierungsversuche an einer Prototyp-Anlage
 - Einstellung des Reduktions- / Konditionierungsmittels (GMH / ITM / FEhS)
 - Bewertung der Reduktion / Konditionierung (GMH / ITM / FEhS)
 - Lokalisieren möglicher Anlagenoptimierungen (GMH / ITM / FEhS)
2. Aufbereitung der Reaktionsprodukte
 - Bewertung der Aufbereitbarkeit (Rauen).
 - Entwicklung eines Aufbereitungsprozesses (Rauen).
 - Betreuung der Aufbereitung durch einen externen Aufbereiter (Rauen)
3. Bewertung der Reaktionsprodukte
 - Untersuchung der Trennung zwischen der oxidischen und metallischen Phase (GMH / Rauen / FEhS / ITM)
 - Bewertung der oxidischen Phase (GMH / Rauen / FEhS / ITM)
 - Bewertung der metallischen Phase und deren Wiedereinsatz (DK / FEhS / ITM)
 - Überprüfung der Prozessparameter (GMH / Rauen)
4. Bau und Inbetriebnahme der betrieblichen Konditionierungsanlage
 - Umsetzung der Anlagenoptimierungen (GMH)
 - Modifizierung der Einblasanlage (GMH)
 - Automatisierung der Einblasanlage (GMH)
 - Umbau der Fördertechnik (GMH)
5. Ökonomische und ökologische Bewertungen des Verfahrens
 - Ökonomische Bewertung (GMH / ITM / FEhS / Rauen / DK)
 - Ökologische Bewertung (GMH / ITM / FEhS / Rauen / DK)
 - Weiterverwendung der Produkte (GMH / ITM / FEhS / Rauen / DK)

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortschreitenden Verwertungsplans

Kurzfristig:

Die in dem Vorhaben entwickelte Konditionierungsanlage stellt eine Möglichkeit zur Konditionierung von Elektroofenschlacke dar, ohne den zeitlichen Ablauf der Stahlherstellung mittels eines Elektrolichtbogenofens zu behindern.

Der kurzfristige Nutzen des Konditionierungsprozesses besteht darin, dass die Elektroofenschlacke damit ein Auslaugverhalten aufweist, das dem von natürlichen Gesteinskörnungen ähnelt. Dadurch erfüllt die Schlacke bereits in der aktuellen Verarbeitungsphase höhere Umweltverträglichkeitsanforderungen. Dies ermöglicht ihre Verwendung als Ersatzbaustoff im Bauwesen ohne die Freisetzung potenziell schädlicher Substanzen in die Umgebung.

Mittelfristig:

Die Akzeptanz und die Nutzung von Elektroofenschlacke als Baustoff können sich in der mittelfristigen Zukunft aufgrund ihrer verbesserten Umweltqualitäten erweitern, was zu einer effizienteren Ressourcennutzung und zur Reduzierung der Deponierung beiträgt.

Die Corona-Krise und auch die Veränderungen der Weltmarktstruktur haben verdeutlicht, wie fragil globale Lieferketten und wie volatil die Preise für Rohstoffe sind. Durch das Forschungsvorhaben ist ein Schritt zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft innerhalb Deutschlands gelungen.

Langfristig:

Mit der in diesem Vorhaben entwickelten Konditionierung von Elektroofenschlacken wird ein Beitrag geleistet, die Stabilität und die Wettbewerbsfähigkeit der Elektrostahlindustrie und der des Bauwesens in Deutschland weiterhin zu sichern. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels einer Konditionierung im flüssigen Zustand sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile entstehen. Der primäre Energie- und Rohstoffbedarf der Elektrostahlindustrie konnte mit Hilfe des Forschungsvorhabens reduziert werden.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem ZE keine technischen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

In dem Buch „MINERALISCHE NEBENPRODUKTE UND ABFÄLLE, BAND 9 – Aschen Schlacken, Stäube und Baurestmassen“ (ISBN 978-3-944310-58-9) ist in einem Beitrag die Konditionierung von Elektroofenschlacke zur Erzeugung eines EBV-konformen Produkts von dem Konsortium dieses Forschungsprojekts beschrieben worden. Dieses Buch erschien im Rahmen der Berliner Konferenz „Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2022“.

Weiter ist eine Veröffentlichung in dem FEhS-Report geplant. Der Report erscheint zweimal jährlich und beschreibt aktuelle Thematiken des Forschungsinstituts für Baustoff-Forschung.

Das „Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI“ hat im Rahmen der Fördermaßnahme „r+Impuls – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz“ eine Abschlussbroschüre veröffentlicht, in der die wichtigsten Ergebnisse des Projekts reflektiert werden.

Nach Veröffentlichung durch die TIB wird der Abschlussbericht ebenfalls auf der Website des Lehrstuhls „Metallurgie und Umformtechnik“ der Universität Duisburg-Essen unter dem Reiter „Projekte / Forschungsthemen“ verlinkt.

3 Erfolgskontrollbericht

Die Erfolgskontrollberichte werden von jedem Kooperationspartner selbständig eingereicht.

4 Berichtsblatt

4.1 ISBN oder ISSN

Keine

4.2 Berichtsart

Schlussbericht

4.3 Titel

„Anlage zur definierten Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metallfraktionen“

4.4 Autoren

- Dr.-Ing. Manuel Foppe, Georgsmarienhütte GmbH, (**GMH**)
- Marek Kassenbrock, M.Sc., Georgsmarienhütte GmbH, (**GMH**)
- Julian Kuschewski, M.Sc., Institut für Technologien der Metalle, Universität Duisburg-Essen, (**ITM**)
- Bettina Vennemann, B.Sc., Institut für Technologien der Metalle, Universität Duisburg-Essen, (**ITM**)
- Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike, Institut für Technologien der Metalle, Universität Duisburg-Essen, (**ITM**)
- David Algermissen, M.Sc., FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e.V., (**FEhS**)
- Dominik Ebert, M.Sc., FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e.V., (**FEhS**)
- Dipl.-Ing. Hamid Tabani, Hermann Rauen GmbH & Co., (**Rauen**)
- Dipl.-Ök. Hans Joachim Rauen, Hermann Rauen GmbH & Co., (**Rauen**)
- Dipl.-Ing. Dennis Kuhlendahl, DK Recycling und Roheisen GmbH, (**DK**)

4.5 Abschlussdatum des Vorhabens

31.03.2023

4.6 Veröffentlichungsdatum

Der Schlussbericht wird bis zum 30.09.2023 zu Publikationszwecken vorgelegt.

4.7 Form der Publikation

Schlussbericht

4.8 Durchführende Institutionen

- **Georgsmarienhütte GmbH**
Neue Hüttenstraße 1, 49124 Georgsmarienhütte
- **Hermann Rauen GmbH & Co. vorm. Steinhandel Rauen**
Felsenerstr. 32, 45479 Mülheim a.d. Ruhr
- **DK Recycling und Roheisen GmbH**
Werthausen Straße 182, 47053 Duisburg
- **FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.**
Bliersheimer Str. 62, 47229 Duisburg
- **Universität Duisburg-Essen - Institut für Technologien der Metalle**
Friedrich-Ebert-Str. 12, 47119 Duisburg

4.9 Ber. Nr. Durchführende Institutionen

Keine

4.10 Förderkennzeichen

FKZ 033R216 A bis E

4.11 Seitenzahl

69 Seiten

4.12 Fördernde Institutionen

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

53170 Bonn

4.13 Literaturangaben

11 Literaturangaben (s. Kapitel 5 Literaturverzeichnis)

4.14 Tabellen

7 Tabellen

4.15 Abbildungen

48 Abbildungen

4.16 Zusätzliche Angaben

Keine

4.17 Vorgelegt bei

-/-

4.18 Kurzfassung

4.18.1 Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

In Deutschland werden jährlich etwa 13 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken produziert, die hauptsächlich im Baustoffwesen Verwendung finden. Insbesondere sind hier der Straßen-, Erd- und Wegebau zu nennen. Allerdings werden zukünftige Regelwerksänderungen die Verwendung dieser Schlacken im offenen Straßenbau beeinträchtigen, was entsprechende Herausforderungen für Elektrostahlwerke und Unternehmen mit sich bringen würde, die sich mit der Aufbereitung und Vermarktung der Schlacken befassen.

Um die Umweltverträglichkeit der Elektroofenschlacke (EOS) zu bewerten, werden Elutionsversuche durchgeführt. Dabei sind die Grenzwerte in den technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau festgelegt. Geplante Änderungen in der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) könnten jedoch dazu führen, dass die EOS nicht mehr im offenen Straßenbau eingesetzt werden dürften und stattdessen deponiert werden müssten.

Im Vorlaufprojekt wurde festgestellt, dass die Konditionierung der Schlacke durch Reduktion der Metalloxide zu einer signifikanten Verringerung der Molybdänauslaugung führt, deren Grenzwerte einen der kritischen Parameter in der

EBV darstellt. Die Ergebnisse legen nahe, dass Molybdän hauptsächlich an eisenreiche Phasen gebunden ist, was maßgeblich zur Auslaugung beiträgt [11]. Aufgrund der begrenzten Zeit und Versuchsanzahl im Vorlaufprojekt war jedoch keine Verifikation unter industriellen Bedingungen möglich.

4.18.2 Begründung/Zielsetzung der Untersuchungen

Im Jahr 2021 wurden in der Bundesrepublik rund 40,2 Millionen Tonnen Rohstahl hergestellt, wobei etwa 30 Prozent dieser Produktionsmenge aus Elektrostahlwerken stammten [1, 2]. Im Zuge der Elektrostahlerzeugung fielen durchschnittlich rund 150 kg Schlacke pro Tonne Rohstahl als Nebenprodukt an [3]. Folglich erreichte die Gesamtproduktion von Elektroofenschlacke (EOS) in Deutschland 1,8 Millionen Tonnen. Die Nebenprodukte der Stahlindustrie werden weiterverarbeitet und finden zum Beispiel im Straßen- und Wegebau als Ersatzbaustoffe Verwendung.

Aufgrund der Einführung der bundesweit gültigen Ersatzbaustoffverordnung (EBV) steht jedoch die Verwendung von Elektroofenschlacke aus der Qualitätsstahlherstellung als Baustoff in Frage [4]. Dieser Umstand ist auf die Notwendigkeit einer Anpassung der Elutionsverfahren und der veränderten Grenzwerte zurückzuführen. Gemäß dem Stand der Technik würde ein beträchtlicher Teil der in Deutschland produzierten Elektroofenschlacke durch das Inkrafttreten der EBV als unverkäuflich betrachtet werden, sodass sie deponiert werden müsste.

Im Rahmen der Fördermaßnahme "r+Impuls - Innovative Ressourceneffizienz - Impulse für industrielle Ressourceneffizienz" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde eine Konditionierungsanlage für Elektroofenschlacken im Industriemaßstab entwickelt. Das Hauptziel bestand darin, Elektroofenschlacke so zu konditionieren, dass ihr Einsatz für bautechnische Zwecke auch unter zukünftigen strengen Umweltverträglichkeitsanforderungen möglich ist, sodass auch weiterhin nachhaltig Primärrohstoffe und Deponiekapazitäten geschont werden können.

4.18.3 Methode

Die Konditionierung der Elektroofenschlacke wird im flüssigen Zustand durchgeführt. Hierdurch ist es möglich, die in der Schlacke enthaltenen konventionellen Metalle des Stahlherstellungsprozesses in separierter metallischer Form zurückzugewinnen. Diese Methode erlaubt eine gezielte Steuerung der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Schlacke, um deren Umwelteigenschaften positiv zu

beeinflussen. Besonders das Auslaugverhalten hat erheblichen Einfluss auf die ökologischen Eigenschaften der Elektroofenschlacke.

4.18.4 Ergebnis

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens wurde eine industrielle Demonstrationsanlage entwickelt, die eine Konditionierung der Elektroofenschlacke ermöglicht, ohne den Ablauf der Stahlherstellung zu beeinflussen.

Durch den Prozess der Konditionierung wird eine Eigenschaftsmodifikation in der Elektroofenschlacke erzielt, die zu einem Auslaugverhalten führt, das vergleichbar mit dem von natürlichen Gesteinskörnungen ist. Diese Transformation ist von besonderer Bedeutung, da sie eine Erhöhung der Umweltverträglichkeit der Elektroofenschlacke ermöglicht. Die Angleichung des Auslaugverhaltens an das von natürlichen Gesteinskörnungen impliziert, dass die Schlacke eine verringerte Neigung zur Freisetzung von potenziell schädlichen Substanzen in die Umgebung aufweist.

Die Anpassung des Auslaugverhaltens trägt maßgeblich zur Optimierung der Umwelteigenschaften der Elektroofenschlacke bei, insbesondere im Hinblick auf ihre Verwendung als Ersatzbaustoff.

4.18.5 Schlussfolgerung

Das Forschungsvorhaben konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Konditionierungsanlage wurde erfolgreich bei der Georgsmarienhütte GmbH in den Stahlerzeugungsprozess implementiert. Durch die Erzielung einer geringen Auslaugung wird nicht nur die ökologische Nachhaltigkeit der Elektroofenschlacke verbessert, sondern es eröffnen sich auch neue Perspektiven für ihre breitere Verwendung in verschiedenen bautechnischen Anwendungen. Dieser Ansatz unterstreicht die Bedeutung von Forschung und Entwicklung bei der Gestaltung von Lösungen zur effizienteren Nutzung von Nebenprodukten der industriellen Produktion, die zugleich den ökologischen Anforderungen gerecht werden und zur Ressourcenschonung beitragen.

4.19 Schlagwörter

Schlacke, Konditionierung, Ersatzbaustoffverordnung, Nachhaltigkeit

4.20 Verlag

Keiner

4.21 Preis

Keiner

5 Literaturverzeichnis

- [1] Wirtschaftsvereinigung Stahl, "Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2022,"
- [2] EUROFER, "European Steel in Figures 2022,"
- [3] S. Schüler, D. Algermissen, H. Markus, D. Mudersbach und P. Drissen, "Metallurgische Maßnahmen zur Einstellung der Nachhaltigkeit von Elektroofenschlacke- Kreislaufwirtschaft stabil weiterentwickeln, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3," TK Verlag, 2016.
- [4] Bundesregierung, "Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung," 17 07 2017.
- [5] Daten des Fachverband Eisenhüttenschlacken e.V., 2016.
- [6] FEhS-Institut, "Untersuchungen des FEhS-Instituts," 2018, Duisburg.
- [7] AiF-Forschungsvorhaben 18812N: PROEOS - Nachhaltige Produktion, Aufbereitung und Nutzung von Elektroofenschlacken aus dem Stahlherstellungsprozess durch metallurgische Maßnahmen und einen neuartigen, geschlossenen Waschprozess, 2017.
- [8] European Commission, "Best Available Techniques Reference Document for Iron and Steel Production," Publications Office of the European Union, 2010, Brüssel.
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, "Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TLGestein-StB)," 2007.
- [10] DIN 38414-4 Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, 1984.
- [11] D. Algermissen, M. Cancarevic, R. Deike, M. Großarth, H.-J. Rauen, H. Schliephake und H. Tabani, "Abschlussbericht Definierte Metalloxidreduktion aus Elektroofenschlacken," Deutsche Bundestiftung, 2018.