

Nachhaltigkeit durch Schlackenverarbeitung – Wärmerückgewinnung und Trockengranulation –

Felix G. Firsbach und Dieter G. Senk

1.	Ursprung von Schlackensystemen	280
2.	Trockengranulation versus Nassgranulation	280
2.1.	Umweltverträglichkeit	281
2.2.	Energieeffizienz	283
3.	Beschreibung und Beurteilung aktueller Entwicklungen	283
3.1.	Liquid Droplet Heat Exchanger der CSIRO	283
3.2.	Muldenband nach Hulek.....	285
3.3.	Schlacke-Stahlkugel-Konzept von Paul Wurth	286
3.4.	TRSC und GLASS-A des Instituts für Eisenhüttenkunde	288
4.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	290
5.	Literatur.....	290

Schlacken der Eisen- und Stahlmetallurgie sind ein wertvolles Nebenprodukt der Großindustrie geworden. Unabhängig von welchem verfahrenstechnischen Aggregat sie stammen, Hochofen zur Roheisenerzeugung oder Konverter zur Rohstahlherstellung, existieren seit Jahrzehnten sehr verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für Schlacken in Abhängigkeit von ihrer chemischen Zusammensetzung. Einige ihrer beispielhaftesten Anwendungen sind im Straßenbau als Straßenbelag, teilweise sogar als *Flüsterasphalt*, sowie in der Agrarindustrie als Düngemittel. Im Hochofen fallen etwa 25 Prozent der Roheisenmasse zusätzlich als Schlacke an; beim Konverterprozess sind es weitere 10 Prozent der Rohstahlmenge.

Neben der bereits erfolgreichen und etablierten materiellen Verwertung metallurgischer Schlacken, beinhalten sie noch ein großes, bisher ungenutztes Potential: thermische Energie. Aufgrund der hohen Temperaturen metallurgischer Prozesse können Schlacken bis zu 1.700 °C heiß abgestochen werden.

Dieser Artikel soll einen Überblick über metallurgische Schlackensysteme schaffen sowie verschiedene, aktuelle Ansätze zur Schlackenwärmerückgewinnung vorstellen. Ältere Ansätze können bei Lindner [10] und Hüttenmeister [5] nachgeschlagen werden.

1. Ursprung von Schlackensystemen

Schlacken sind Nebenprodukte der Metallurgie und umfassen nichtmetallische und mineralische Oxid-Systeme. Sie entstehen bei der Roheisen- und Stahlherstellung und haben unter anderem die Funktion bestimmte metallurgische Arbeiten am Primärprodukt Stahl zur Qualitätssicherung und -erhöhung zu erfüllen sowie gezielt Elemente aus dem Stahl zu entfernen und aufzunehmen. Typische Schlacken der Eisen- und Stahlmetallurgie sind die Hochofenschlacke, die Konverterschlacke, die Elektroofenschlacke und die geringen Mengen an sekundärmetallurgischen Schlacken [18].

Schlacken sind von ihrer Beschaffenheit und chemischen Zusammensetzung vergleichbar mit Magma, der natürlichen Gesteinsschmelze unterhalb des Erdmantels. Wie Magma auch sind Schlacken der Eisen- und Stahlindustrie vorerst Silikatschmelzen mit unterschiedlichen Anteilen an SiO_2 . Magma unterscheidet anhand der Abkühlgeschwindigkeit zu Plutonit und Vulkanit – langsam und grobkörnig-kristallin erstarrt und feinkörnig-kristallin erstarrt mit amorphen Anteilen. Ein weiteres Produkt des alltäglichen Gebrauchs mit mehr als 70 Gew.-% SiO_2 -Anteilen, welches mit hohen Abkühlgeschwindigkeiten amorph erstarrt, ist Glas. Aufgrund der unterschiedlichen Aggregate und Chargen- sowie Tages-individuell anfallenden Aufgabenbereichen der Schlacken unterscheiden sie sich chemisch von Magma hauptsächlich in einem Bestandteil: Kalk (CaO). Dies ist in Tabelle 1 verdeutlicht. Während alle anderen Bestandteile der Schlacke ihren Ursprung in natürlicher Gangart und Gesteinen haben, ist Kalk ein spezielles Additiv der Metallurgie, welches zum Beispiel zur Entschwefelung, Entphosphorung und zur Konditionierung der Schlacke bezüglich der dynamischen Viskosität eingesetzt wird [17].

	SiO_2	Al_2O_3	CaO & MgO	Rest*
	Gew.-%			
Hochofenschlacke	37	10	50	3
Gelber Neapolitanischer Tuff	60	20	7	13

Tabelle 1:

Typische chemische Zusammensetzungen von Hochofenschlacke und gelbem neapolitanischen Tuff

* TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , MnO , K_2O , Na_2O

Quelle: Senk, D.; Firsbach, F.: Quality and Use of Blast Furnace Slags. In: 3rd International VDEh-Seminar: Iron Making (International Blast Furnace Course), Köln, 2015

2. Trockengranulation versus Nassgranulation

Die bisher gängigsten Verfahren zur Verarbeitung von den hauptsächlich anfallenden Schlacken sind das Schlackenbeet und das INBA-Verfahren und werden der sogenannten Nassgranulation zugeordnet. Beide haben gemeinsam, dass sie Wasser zur beschleunigten Erstarrung von Schlacke verwenden. Sie unterscheiden sich jedoch grundsätzlich in den Bereichen der Abkühlrate, sodass im Schlackenbeet kristalline und porige Schlackenstücke gewonnen werden können, wohingegen das INBA-Verfahren feinen, glasigen Hüttensand erzeugt. Im Folgenden werden diese Verfahren, welche in jedem europäischen integrierten Hüttenwerk eingesetzt werden, auf ihre Umweltverträglichkeit und Energieeffizienz hin diskutiert.

2.1. Umweltverträglichkeit

Die Nassgranulation von Hochofenschlacke wird unterteilt in 1) die langsame Erstarrung im Schlackenbeet oder -trog zur (Hochofen)Stückschlacke und 2) das INBA-Verfahren zur raschen Abkühlung zu Hüttensand. Beide Verfahren sind kostenintensiv und erlauben keine Wärmerückgewinnung.

Das Schlackenbeet benötigt große Flächen und Mengen an Wasser für eine beschleunigte, wenn auch nicht glasige, Erstarrung der schmelzflüssigen Schlacke. Aufgrund der kristallinen Struktur der Schlacke erreicht diese eine Mohshärte von 5 bis 6, je nach chemischer Zusammensetzung [19]. Somit befindet sich die Härte der Stückschlacke zwischen jener von Apatit und Orthoklas. Das härteste Mineral Diamant hat eine Mohshärte von 10.

Um die Erstarrung der sich selber wärmeisolierenden, heißen Schlacke zu beschleunigen, wird diese mit Wasser besprüht. Hierfür werden etwa 1,9 m³ Wasser pro Tonne Schlacke aufgewendet. Zur Veranschaulichung wird dies in Bild 1 dargestellt. Für einen Hochofen mit einer Leistung von 5.900 Tonnen Roheisen pro Tag ergibt dies einen Wasserbedarf von etwa 25.700 hl täglich. In der Regel haben Schlackentröge eine Tiefe von 8 m und umfassen eine Fläche von beispielsweise 25 x 15 m². Sie werden erst ausgehoben, wenn sie vollständig gefüllt sind. Einige Hochofen besitzen Schlackenbeete in direkter Nähe zum Aggregat. Aufgrund der örtlichen Begrenzungen sind diese mit 1 m Tiefe wesentlich flacher und umfassen Flächen mit beispielsweise 400 m². Der Wasserbedarf von Schlackenbeeten ist um den Faktor 2 kleiner, da nach jedem Abstich das Beet bereits geleert werden kann. Der Vorteil der Stückschlacke im Straßenbau ist ihre vergleichsweise hohe Härte. Diese wirkt sich jedoch negativ auf die Aushebung der Beete und Tröge aus. Hier werden ein Großbagger und bis zu zwei Muldenkipper benötigt, um eine Ausbrechleistung von 200 bis 350 Tonnen Schlacke pro Stunde zu realisieren.



Bild 1:

Wasseranwendung auf einem noch heißen Schlackenbeet in den USA

Quelle: Morian, D. A.; Perera, R.; Van Dam, T. J.: Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements (Final Report FHWA-HIF-12-008). Federal Highway Administration, U.S.A., Washington DC, 2012

Aufgrund seiner hohen Verfügbarkeit und Verlässlichkeit steht das INBA-Verfahren der Paul Wurth S.A. in der Neuzeit stellvertretend für die Nassgranulation einer metallurgischen Schlacke: der Hochofenschlacke. Glasig erstarrte Hochofenschlacke

(Hüttensand) wird seit bereits über 100 Jahren als Zusatz zum Portlandklinker, dem Ausgangsmaterial für Zement, hinzugegeben. Die Verwendung von Hüttensand als Zement-Additiv hat neben optimierten Eigenschaften in der Anwendung als Beton oder im konstruktiven Ingenieurbau den Vorteil, dass mit steigenden Massenanteil an Hüttensand in der Zementmischung linear die CO₂-Emission der Zementherstellung sinkt. Anschaulich ist dies in Bild 2 dargestellt [3].

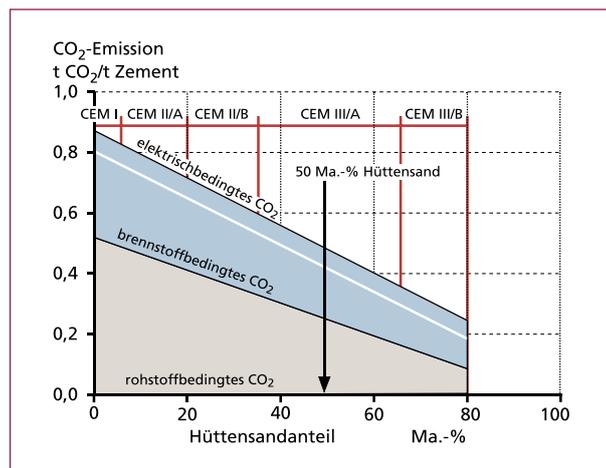
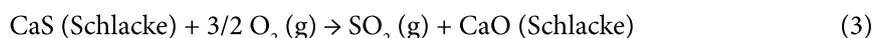
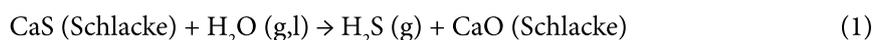


Bild 2:

CO₂-Emission der Produktion von drei der fünf Zementarten aufgetragen mit zunehmenden Anteil an Hüttensand: Portlandzement CEM I, Portlandhüttenzement CEM II und Hochofenzement CEM III

Quelle: Hoening, V.; Schneider, M.: CO₂ reduction in the cement industry, Konferenzvortrag. In: 5th Intl. VDZ-Congr. – Technical Field 6, Düsseldorf, 2002

Im Vergleich zu Schlackenbeet und -trog benötigt das INBA-Verfahren weniger Raum, ist jedoch umso wasserintensiver bei einem Wasserverbrauch von 3,000 m³/h [4] oder 5 m³/t Schlacke [14]. Obwohl Ansätze und Verfahren im INBA-System vorhanden sind, die Schlacke zu entwässern und das Wasser im Kreislauf zuführen, dürfen Verdampfungen und anderweitige Emissionen nicht vernachlässigt werden. Kritisch sind Reaktionen zwischen dem in der Schlacke gebundenen Schwefel und Sauerstoff oder Wasser, welche zu korrosiven H₂S-, H₂SO₄- und SO₂-Gasen führen [2, 7, 11]:



Bezüglich der Produkte Stückschlacke und Hüttensand und deren weiterer Verwertung im Straßenbau oder als Düngemittel sind die Nassverfahren ein umweltverträgliches materielles Recycling von Schlacken. Dieses wird von Umweltverbänden befürwortet [15] und erreicht bereits weltweit eine Quote von 80 bis 100 Prozent [22]. Nicht nur werden Ressourcen eingespart und geschont, sondern direkt CO₂-Emissionen in nachgeschalteten Industrien, wie der Zementindustrie, reduziert. Von Nachteil sind jedoch zum einen der energieintensive mechanische Aufwand in Bezug auf die Aushebung der Beete und Tröge und zum anderen die Verwendung von großen Mengen an Wasser sowie die daraus erfolgende Emission von korrosiven Gasen. Zuletzt ist es bisher noch nicht mit Industriereife gelungen eine Wärmerückgewinnung der hochtemperierten Schlacke zu ermöglichen.

Aufgrund dieser Bedingungen ist eine Neuausrichtung der Schlackenverarbeitung in Hinsicht auf die Verwendung von Wasser notwendig. Die Vermeidung von Wasser im direkten Kontakt als Kühlmedium hin zum indirekten Kontakt als Wärmeträgermedium ermöglicht eine gleichbleibend erfolgreiche und umweltverträgliche materielle Verarbeitung des mineralischen Rohstoffes Schlacke, verhindert Emissionen und ermöglicht gleichzeitig eine lukrative und umweltverträgliche Wärmerückgewinnung. Diese Trockengranulation ist demnach ein Ziel zur erhöhten Umweltverträglichkeit der Verwertung von Schlacken.

2.2. Energieeffizienz

Gemeinsam mit den wertvollen mineralischen Bestandteilen des Oxid-Systems Schlacke wird den jeweiligen Aggregaten Hochofen oder Konverter thermische Energie beim Abstich entzogen. Jedes Jahr werden etwa 1,67 Milliarden Tonnen Rohstahl weltweit erzeugt [23]. Hierfür werden etwa 752 Millionen Tonnen Hochofen- und Konverterschlacke weltweit produziert [22]. Die Abstichtemperatur liegt, je nach Aggregat, bei 1.400 und 1.600 °C [16] und die über die Temperatur durchschnittliche Wärmekapazität bei 1,4 kJ/kg K [5]. Hierdurch ergibt sich ein weltweiter, jährlicher und thermischer Verlust von

$$752 \text{ Mio t/a Schlacke} \times 1,4 \text{ kJ/kg K} \times 1500 \text{ K} = 1.580 \text{ PJ/a.} \quad (4)$$

Allein für die deutsche Stahlindustrie, welche im Jahr 2014 etwa 43 Millionen Tonnen Rohstahl und somit etwa 20 Millionen Tonnen Schlacken der Eisen- und Stahlmetallurgie produzierte, ergibt dies ein thermisches, ungenutztes Potential von

$$20 \text{ Mio t/a Schlacke} \times 1,4 \text{ kJ/kg K} \times 1500 \text{ K} = 42 \text{ PJ/a.} \quad (5)$$

Bei Nutzung dieses Potentials in deutschen Hüttenwerken entspricht das dem Anteil der erneuerbaren Energien am Brutto-Endenergieverbrauch (BEEV) der Bundesrepublik Deutschland der letzten Jahre [1]. Um diese zu realisieren werden seit einigen Jahrzehnten Verfahren zur trockenen Granulation inklusiver Schlackenwärmerückgewinnung entwickelt. Der Arbeitspunkt zwischen effizienter Granulation zu glasigen oder gering-porösen Schlackenprodukten steht hierbei im zu überwindenden Kontrast zur effektiven Wärmerückgewinnung.

3. Beschreibung und Beurteilung aktueller Entwicklungen

Aktuelle und stark umworbene Verfahren zur Verarbeitung von Schlacken, besonders von Hochofenschlacke, wurden bereits zuvor ausführlich diskutiert [5, 10]. Im Folgenden seien deswegen weitere sehr aussichtsreiche und interessante Ansätze vorgestellt, welchen weniger Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

3.1. Liquid Droplet Heat Exchanger der CSIRO

Der Liquid Droplet Heat Exchanger (LDHX, deutsch: Wärmetauscher für flüssige Tropfen) ist ein Forschungsprojekt der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Beim LDHX werden oxidische Schlackenschmelzen zu

Tropfen verdüst und die Wärmeenergie der Tropfen durch ein Wärmeträgermedium entzogen. Der Verfahrens-Demonstrator ist in Bild 3 gezeigt. Die Wärmerückgewinnung ist derzeitiger Stand der Forschung.

In der Schmelzkammer werden Kalziumoxide und Aluminiumoxide zu gleichen Teilen und der Gesamtmasse von 500 g zu einer synthetischen Schlacke vermischt. Diese wird auf 1.700 °C erhitzt und unter Inertgasatmosphäre erschmolzen. Die so erzeugte Schlackenschmelze wird durch eine Graphitdüse mit bis zu 2 bar gedrückt, sodass ein flüssiger, laminarer Schlackenstrahl entsteht, dessen Tropfen im Anschluss glasig erstarren und ihre Wärme an ein Trägermedium abgeben können.

Durch das Verdüsen der schmelzflüssigen Schlacke zerfällt der noch etwa 1.660 °C heiße Schlackenstrahl durch Kapillarkräfte zu feinen Tropfen mit möglichst homogenem Kornband. Pneumatisches Klopfen mit Frequenzen bis zu 200 Hz kann hinsichtlich des Kornbands der Tropfen und den Abständen des Lösens der Tropfen eine Reduzierung der Schlackenstrahllänge um bis zu 40 Prozent bewirken. Die Korngrößenverteilung der erzeugten Tropfen ist mit einer durchschnittlichen Größe von 2,3 mm und einer Streuung von 1 mm äußerst gering, wie in Bild 4 ersichtlich. Der realisierbare Schlackenmassenstrom liegt bei etwa 10 g/s (36 kg/h) [20, 21].

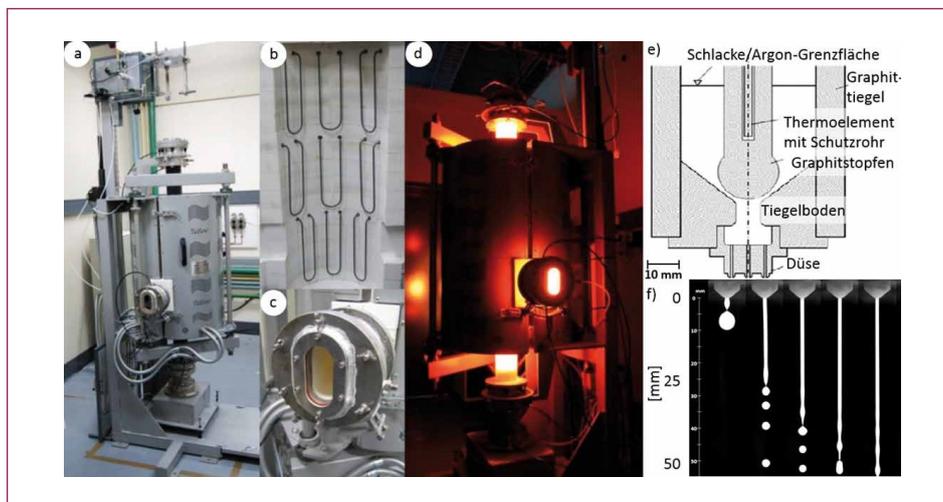


Bild 3: Aufbau des Demonstrators, a) Gesamtanlage, b) Heizspindeln, c) Schauglas, d) LDHX im Heißversuch, e) Schematischer Aufbau der dreiköpfigen Düse, f) Strahllängen in Abhängigkeit von Pressdruck

nach Wegener, M.; Kuhlmeier, T.; Muhmood, L.: Controlled Disintegration of Multiple Jets of Molten Slag. ISIJ International, p. 2761–2766, 2014

und Wegener, M.; Muhmood, L.; Sun, S.; Deev, A.: Towards a Slag Droplet Heat Exchanger – Capillary Breakup of Molten Oxide Jets. In: High Temperature Processing Symposium 2014, Melbourne, Australien, 2014

Für die Modellierung und Bewertung des Verfahrens wurden die temperaturabhängige Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung bestimmt. Hierfür wurden die Gleichungen (4), (5) und (6) empirisch entwickelt.

$$\rho = -1,337 \times \vartheta + 5013,3 \quad (6)$$

$$\mu = 2,5881 \times 10^{27} \times \vartheta^{-8,7071} \quad (7)$$

$$\sigma = -9,25 \times 10^{-5} \times \vartheta + 0,776 \quad (8)$$

Mit ρ = Dichte
in kg/m^3
 ϑ = Temperatur der Schlacke
in $^{\circ}\text{C}$
 μ = Dynamische Viskosität
in $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 σ = Oberflächenspannung
in N/m

Das vorgestellte Verfahren LDHX ist vielversprechend durch seinen Ansatz der präzisen Einstellung eines amorphen Kornbandes der produzierten amorphen Schlacke. Aufgrund der frühen Entwicklungsphase ist die Wärmerückgewinnung noch nicht realisiert und eine zeitnahe Umsetzung im Industriemaßstab noch nicht absehbar.

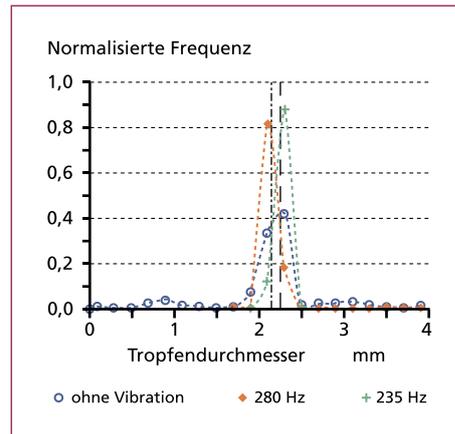


Bild 4: Kornband einer Düse bei verschiedenen Vibrationsfrequenzen

nach Wegener, M.; Muhmood, L.; Sun, S.; Deev, A.: Towards a Slag Droplet Heat Exchanger – Capillary Breakup of Molten Oxide Jets. In: High Temperature Processing Symposium 2014, Melbourne, Australien, 2014

3.2. Muldenband nach Hulek

Das Muldenband (Conveyer Belt) ist eine Erfindung von Anton Hulek. Es ermöglicht schmelzflüssige Hochofen- oder Stahlwerksschlacken trocken, mit geringer Abkühlrate kristallin erstarren zu lassen. Die thermische Energie der Schlacke wird mittels Kühlluft entzogen und zur Rückgewinnung abgeführt. Das Patent sieht drei Anlagenbereiche vor: Die Verteilerrinne, das Muldenband und den Kühlturm. Sie sind in Bild 5 dargestellt [6].

In der Verteilerrinne wird die schmelzflüssige Schlacke gesammelt und gepuffert. Sie garantiert eine homogene Beaufschlagung des nachgeschalteten Muldenbandes. Auf das Endlosband mit gusseisernen oder stählernen Mulden wird die schmelzflüssige Schlacke gegossen und erstarrt in Blöcken. Die thermische Energie der Schlacke wird mittels Strahlung in einer Haube über dem Muldenband aufgenommen sowie durch Konvektion eines Wärmeträger-Gases in Kühlkanälen unterhalb des Muldenbandes gesammelt. Die Zieltemperatur der Schlackenplatten liegt bei $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei einer Fördergeschwindigkeit von 2 bis 8 m/min und einer Förderdauer von 5 bis 15 min ergeben sich somit Abkühlraten von 0,5 bis 1,7 K/s . Im Anschluss an die Behandlung im Muldenband werden die Schlackenplatten der Stärke 20 bis 50 mm auf einen Stachelbrecher befördert, welche sie zu körnigem Material mahlt. Dieses Material wird in einem

Kühlturm auf angestrebte 200 °C abgekühlt. Die Temperaturdifferenz von $\Delta T = 800 \text{ K}$ wird im Abhitzekeessel (8) zur Dampferzeugung genutzt, um über Entspannungsturbinen beispielsweise Strom zu erzeugen.

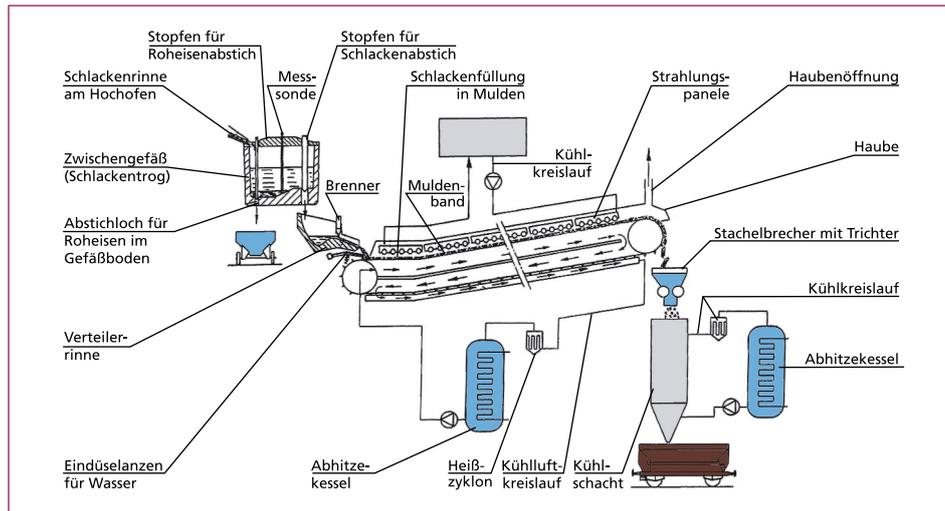


Bild 5: Schematische Zeichnung des Muldenbandes

Quelle: Hulek, A.: Verfahren und Anlage zur Trockenkühlung von metallurgischen Schlacken mit Wärmerückgewinnung. Deutschland Patent EP 1 083 236 A1, 09 09 1999

Das Patent nach Hulek stellt ein äußerst interessantes Verfahren zur rekuperativen Schlackenwärmerückgewinnung dar. Forschungsergebnisse oder erste Vorversuche liegen jedoch nicht direkt vor. Das Patent kann lediglich mit dem im Folgenden vorgestellten GLASS-A des IEHK verglichen werden.

3.3. Schlacke-Stahlkugel-Konzept von Paul Wurth

Das von der Firma Paul Wurth SA. entwickelte Verfahren zur trockenen Schlackengranulation umfasst die amorphe Erstarrung von Hochofenschlacke mit einer gleichzeitigen Wärmerückgewinnung. Die Verfahrensentwicklung hat bereits den Entwicklungsstand an einem Demonstrator erfolgreich verlassen und im November 2013 eine Pilotanlage für Industrierversuche bei der AG der Dillinger Hüttenwerke an Hochofen 4 aufgebaut und ausführlich untersucht. 2013 erhielt die Paul Wurth SA hierfür den zweijährlich vergebenen *FEDIL Environment Award* im Bereich *Processes* der *Business Federation Luxembourg FEDIL* [12].

Nach dem entwickelten und in Bild 6 dargestellten Schlacke-Stahlkugel-Konzept werden der schmelzflüssigen Hochofenschlacke mit 1.450 °C und einem Massenstrom von bis zu 8 t/min kalte Stahlkugeln mit Umgebungstemperatur – ideell mit 20 °C abgeschätzt – zugemischt. Das so gewonnene heiße Gemisch aus flüssiger Schlacke und Stahlkugeln hat eine mittlere Temperatur von 650 °C, verlor somit durch den Mischvorgang rapide 800 °C, sodass die an den Stahlkugeln haftende Schlacke amorph erstarren kann.

Das Gemisch wird nun zur Wärmerückgewinnung in einen Gegenstrom-Festbett-Wärmetauscher gegeben, in welchem es seine thermische Energie an Luft abgibt, die, in Abhängigkeit vom Volumenstrom der Luft, eine Zieltemperatur von 600 °C erzielen soll. Nachdem das Gemisch auf unter 50 °C abgekühlt wurde, wird es durch Backenbrecher zerkleinert und die Stahlkugeln mittels Magnetabscheider von der Schlacke getrennt. Die Stahlkugeln werden konzeptionell wiederverwendet und die Schlacke liegt nun zerkleinert als Hüttensand vor.

Das Verfahren hat sich bei den Industrierversuchen (Bild 7) als äußerst robust und zuverlässig im Testbetrieb erwiesen. Es konnte Hochofenschlacke mit hohen amorphen Anteilen erzeugt, sowie thermische Energie gewonnen werden. Von Nachteil erwies sich jedoch die Limitation des Verfahrens auf 80 t Schlacke pro Tag, bedingt durch die Menge an Stahlkugeln, sowie ein maximaler glasiger Anteil von 92 Prozent – mindestens 95 Prozent werden von der Zementindustrie, dem Hauptabnehmer des Hüttensandes, gefordert. Im Gegensatz zum Verfahren von Hulek, welches eine Wärmerückgewinnung im gesamten Temperaturspektrum von 1.450 °C bis Umgebungstemperatur ermöglichen soll, ist das Verfahren von Paul Wurth auf den kleineren Temperaturbereich von 650 °C bis Umgebungstemperatur beschränkt.



Bild 6:

Technisches Konzept der Paul Wurth Anlage

nach Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation and Energy Recovery. In: Slag Valorisation Symposium Zero Waste, Leuven, Belgien, 2015 und Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation with Energy Recovery: Operation of Full Scale Pilot Plant. In: Metec & 2nd ESTAD, Düsseldorf, 2015



Bild 7:

a) Pilotanlage am Standort der AG der Dillinger Hüttenwerke, b) heißes Gemisch aus flüssiger Schlacke und Stahlkugeln während der Abkühlung

Quellen: Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation and Energy Recovery. In: Slag Valorisation Symposium Zero Waste, Leuven, Belgien, 2015

Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation with Energy Recovery: Operation of Full Scale Pilot Plant. In: Metec & 2nd ESTAD, Düsseldorf, 2015

Metallurgische Nebenprodukte

Demnach stehen 800 °C der Schlacke, etwa 55 Prozent der thermischen Energie, nicht zur Wärmerückgewinnung zur Verfügung. Weiter ist der Verschleiß der Stahlkugeln unvorhergesehen hoch.

3.4. TRSC und GLASS-A des Instituts für Eisenhüttenkunde

Das Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen entwickelte in den letzten Jahren zwei Verfahren zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke: Den *Twin-Roll-Slag-Caster* (TRSC) und das *Granulation of Liquid to Amorphous Solidified Slag – Aggregate* (GLASS-A).

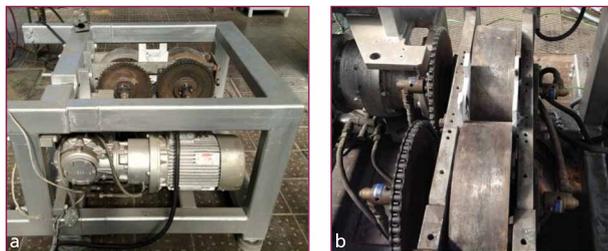


Bild 8:

- a) Seitenansicht des TRSC-Demonstrators des IEHK,
- b) Stahlrollen des TRSC

Die Stahlrollen des **Twin-Roll-Slag-Caster** haben einen Durchmesser von 335 mm und eine Stärke von 103 mm und sind in Bild 8 dargestellt. Sie sind über stufenlos-verstellbare Achsen aufgehängt, um verschiedene Modi mit variierenden Spaltmaßen zwischen den Rollen zu fahren. Gekühlt werden die Rollen indirekt mit Wasser der Temperatur 8 bis 15 °C und einem Volumenstrom von bis zu 18 l/min. Über die Umdrehungsgeschwindigkeit der Rollen lässt sich die Fördergeschwindigkeit der Schlacke einstellen. Sie variiert zwischen 0,5 bis 5 m/min.

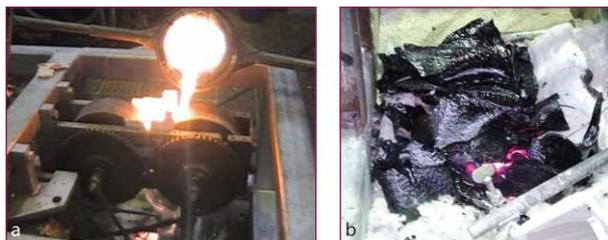


Bild 9:

- a) Abguss schmelzflüssiger Schlacke auf den TRSC,
- b) > 95 Vol.-% glasig erstarrte Schlackeplatten der Stärke 5 mm kurz nach Verarbeitung

Bild 9 a zeigt den Abguss von 1.500 °C heißer Hochofenschlacke auf den TRSC. Dieser wird zuerst mit einem Kaltstopfen, ähnlich dem Kaltstrang des Stranggusses, verschlossen. Bei Erreichung einer gewissen Füllhöhe werden die Rollen angefahren, um nach einer variierenden Anfahrtzeit ihre volle Umdrehungsgeschwindigkeit zu erreichen. Bild 9 b zeigt zu mindestens 95 Vol.-% amorph erstarrte Schlackenplatte kurz nach einem Durchlauf. Aufgrund der hohen Abkühlraten springt das Schlacken-Glas energisch. Wie bei der Massenglasproduktion müsste sichergestellt werden, dass nach Unterschreitung des Glaspunktes das Glas bzw. die glasige Schlacke kontrolliert und langsam abkühlt, um ein Brechen zu vermeiden. Diese spontanen, spröden Brüche sind jedoch von Vorteil, da für das Mahlen der glasigen Schlackenplatten nun vergleichsweise weniger

mechanische Arbeit aufgewendet werden muss als bei Stückschlacke. Aufgrund der amorphen Struktur und dem gleichen Chemismus wie Hüttensand bietet sich der Einsatz in der Zementindustrie an.

Das GLASS-A ist das zweite Aggregat des IEHK zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke mit integrierter Wärmerückgewinnung. Sie ist aufgeteilt in drei Module: 1) primärer, 2) sekundärer und 3) tertiärer Wärmetauscher (WT). Jedes Modul ist auf unterschiedliche Bereiche der Wärmeübertragung ausgelegt, wie Tabelle 2 zeigt. Das GLASS-A soll mindestens 5 mm starke Schlackenplatten im kontinuierlichen Betrieb erzeugen und gleichzeitig ein oder mehrere Wärmeträgermedien für die Anwendung in parallelen Prozessen nutzen. Das Kernstück ist eine kupferne oder stählerne Kühlplatte, welche durch indirekte Wasserkühlung hohe Abkühlraten erreicht und Emissionen von SO_2 oder H_2S reduziert und verhindert.

	Konduktion	Konvektion	Strahlung
Primärer WT	x		
Sekundärer WT		x	
Tertiärer WT		x	x

Tabelle 2:

Zuordnung der Module des GLASS-A zu Mechanismen der Wärmeübertragung

Mithilfe der aufwendigen Konstruktion, um den verschiedenen Mechanismen der Wärmeübertragung zu entsprechen, ist es gelungen ein Verfahren zu konzipieren, welches effektiv die trockene Granulation mit der Wärmeübertragung kombiniert. Besondere Problemstellung dieser verfahrenstechnischen Zielsetzung sind die konträren Bedingungen an 1) eine glasige Schlacke durch hohe Abkühlraten und 2) eine hohe Rückgewinnung der thermischen Energie der Schlacke. Konservative Kalkulationen mit dem ersten Demonstrator ergeben, dass dieses Verfahren, mit den realisierten Modulen Primärer WT und Tertiärer WT, bei einem Schlackenmassenstrom von 12,0 kg/s einen glasigen Anteil von mindestens 95 Vol.-% in der Schlacke und mindestens 50 Prozent der thermischen Energie zurückgewinnen können. Das Verfahrenskonzept mit einer beispielhaften Schlackenplatte der Stärke 11 mm, erzeugt auf dem GLASS-A, ist in Bild 10 gezeigt.

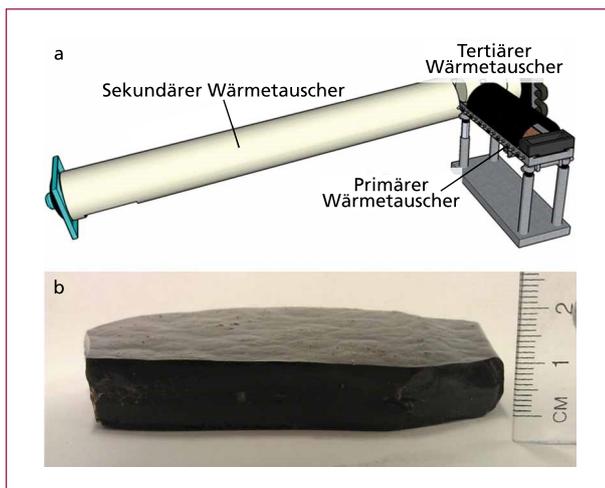


Bild 10:

a) Prinzipieller Aufbau des GLASS-A mit den drei Modulen Primärer, Sekundärer und Tertiärer Wärmetauscher*; b) Auf dem Demonstrator des GLASS-A erzeugte Schlackenplatte

*Quelle: Hüttenmeister, D.: Entwicklung einer Anlage zur amorphen Erstarrung flüssiger Hochofenschlacke mit gleichzeitiger Wärmerückgewinnung. Dissertationsschrift, IEHK der RWTH Aachen, 2015

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

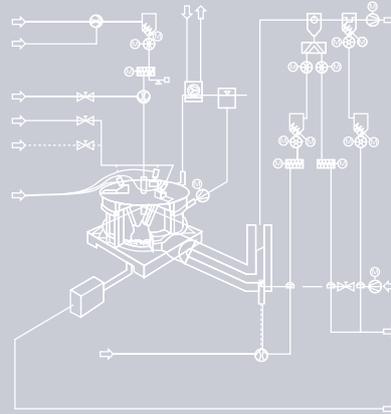
Die beschriebenen Ansätze und Forschungsvorhaben zeugen von der großen Notwendigkeit seitens der Industrie Schlackenwärme als energetischen Rohstoff zu gewinnen. Die trockene Verarbeitung von Schlacken führt zur optimierten Umweltverträglichkeit. Die Wärmerückgewinnung hat eine optimierte Energieeffizienz in Bezug auf die Behandlung von metallurgischen Schlacken zur Folge. Somit ist in Gänze der Sprung gelungen, ein ehemaliges Abfallprodukt mit großer Ähnlichkeit zu Gesteinsschmelzen zu einem hochwertigen Sekundärprodukt zu transformieren. Im letzten Schritt obliegt es der Forschung und Wissenschaft durch eine gezielte Konditionierung der Schlacken, ohne Einfluss auf vorgeschaltete Prozesse, diese als mineralischen Primärrohstoff aspektreicher und weiterhin umweltverträglich einzusetzen.

5. Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Erneuerbare Energien in Zahlen (Jahresbericht). Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart, 2015
- [2] Ehrenberg, A.: Hüttensand – ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft (Teil 1). Betoninformationen 46, 2006
- [3] Hoenig, V.; Schneider, M.: CO₂ reduction in the cement industry, Konferenzvortrag. In: 5th Intl. VDZ-Congr. – Technical Field 6, Düsseldorf, 2002
- [4] Holcim (Deutschland) AG: Hüttensandherstellung am Standort Salzgitter (Broschüre), Salzgitter, 2007
- [5] Hüttenmeister, D.: Entwicklung einer Anlage zur amorphen Erstarrung flüssiger Hochofenschlacke mit gleichzeitiger Wärmerückgewinnung. Dissertationsschrift, IEHK der RWTH Aachen, 2015
- [6] Hulek, A.: Verfahren und Anlage zur Trockenkühlung von metallurgischen Schlacken mit Wärmerückgewinnung. Deutschland Patent EP 1 083 236 A1, 09 09 1999
- [7] Jahanshahi, S.; Xie, D.; Pan, Y.; Ridgeway, P.; Mathieson, J.: Dry Slag Granulation with Integrated Heat Recovery, in METEC InSteelCon 2011, Düsseldorf, 2011
- [8] Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation and Energy Recovery. In: Slag Valorisation Symposium Zero Waste, Leuven, Belgien, 2015
- [9] Kappes, H.; Michels, D.: Dry Slag Granulation with Energy Recovery: Operation of Full Scale Pilot Plant. In: Metec & 2nd ESTAD, Düsseldorf, 2015
- [10] Lindner, K.-H.: Abwärmenutzung metallurgischer Schlacken. Dissertationsschrift, IEHK der RWTH Aachen, 1986
- [11] Leyser, P.; Cortina, C.: INBA® slag granulation system with environmental control of water and emissions. Millennium Steel, pp. 67-72, 2006
- [12] Moggridge, M.: Paul Wurth wins FEDIL Environment Award 2013. Steel Times International, 3. Dezember 2013
- [13] Morian, D. A.; Perera, R.; Van Dam, T. J.: Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements (Final Report FHWA-HIF-12-008). Federal Highway Administration, U.S.A., Washington DC, 2012
- [14] Schmidt, B.; Petersen, J.; Stubbe, G.: Optimised blast furnace slag water quenching with sulphur compounds control (Final Report), Directorate-General for Research and Innovation, European Commission, Düsseldorf, 2001

- [15] Schuster, H.: How is the environmental compatibility of steel slag applications to be benchmarked? In: 8th European Slag Conference, Linz, Österreich, 2015
- [16] Senk, D.; Babich, A.: Schachtöfen. In: Eisenmetallurgie – Eisenreduktion und Schachtöfen, Düsseldorf, Verlag Stahleisen, 2013, S 24-41
- [17] Senk, D.; Firsbach, F.: Quality and Use of Blast Furnace Slags. In: 3rd International VDEh-Seminar: Iron Making (International Blast Furnace Course), Köln, 2015
- [18] Senk, D.; Hüttenmeister, D.: Stahl und Schlacke – Ein Bund fürs Leben. In: Schlacken aus der Metallurgie, Neuruppin, TK Verlag, 2012, pp. 69-74
- [19] Smith, K. D.; Morian, D. A.; Van Dam, T. J.: Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements (Report FHWA-HIF-12-009). Federal Highway Administration, U.S.A., Washington, DC, 2012
- [20] Wegener, M.; Kuhlmeier, T.; Muhmood, L.: Controlled Disintegration of Multiple Jets of Molten Slag. ISIJ International, p. 2761–2766, 2014
- [21] Wegener, M.; Muhmood, L.; Sun, S.; Deev, A.: Towards a Slag Droplet Heat Exchanger – Capillary Breakup of Molten Oxide Jets. In: High Temperature Processing Symposium 2014, Melbourne, Australien, 2014
- [22] Worldsteel Association: Steel Industry By-products (Fact Sheet), 2014. Online: https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets/content/01/text_files/file/document/Fact_By-products_2014.pdf. [Zugriff am 29. Januar 2016]
- [23] Worldsteel Association: World Steel in Figures 2015 (Report), 2015; Online: <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/2015/World-Steel-in-Figures-2015/document/World%20Steel%20in%20Figures%202015.pdf>. [Zugriff am 29. Januar 2016]

Aschen • Schlacken • Stäube



Aschen • Schlacken • Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –

ISBN: 978-3-935317-99-3
 Erschienen: September 2013
 Gebundene Ausgabe: 724 Seiten
 mit zahlreichen farbigen Abbildungen
 Preis: 50.00 EUR

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky • Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

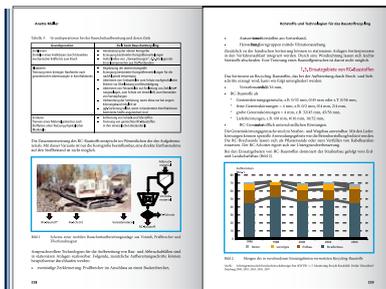
Der Umgang mit mineralischen Abfällen soll seit einem Jahrzehnt neu geregelt werden. Das Bundesumweltministerium hat die Verordnungsentwürfe zum Schutz des Grundwassers, zum Umgang mit Ersatzbaustoffen und zum Bodenschutz zur Mantelverordnung zusammengefasst. Inzwischen liegt die zweite Fassung des Arbeitsentwurfs vor. Die Verordnung wurde in der zu Ende gehenden Legislaturperiode nicht verabschiedet und wird daher eines der zentralen und weiterhin kontrovers diskutierten Vorhaben der Rechtssetzung für die Abfallwirtschaft in der kommenden Legislaturperiode sein. Die Reaktionen auf die vom Bundesumweltministerium vorgelegten Arbeitsentwürfe waren bei den wirtschaftlich Betroffenen überwiegend ablehnend. Die Argumente der Wirtschaft sind nachvollziehbar, wird doch die Mantelverordnung große Massen mineralischer Abfälle in Deutschland lenken – entweder in die Verwertung oder auf Deponien.

Weil die Entsorgung mineralischer Abfälle voraussichtlich nach rund zwei Wahlperioden andauernden Diskussionen endgültig geregelt werden soll, soll dieses Buch unmittelbar nach der Bundestagswahl den aktuellen Erkenntnis- und Diskussionsstand zur Mantelverordnung für die Aschen aus der Abfallverbrennung und die Schlacken aus metallurgischen Prozessen wiedergeben.

Die Praxis des Umgangs mit mineralischen Abfällen ist in den Bundesländern unterschiedlich. Bayern gehört zu den Bundesländern, die sich offensichtlich nicht abwartend verhalten. Der Einsatz von Ersatzbaustoffen in Bayern wird ebenso wie die Sicht der Industrie vorgestellt.

Auch in den deutschsprachigen Nachbarländern werden die rechtlichen Einsatzbedingungen für mineralische Ersatzbaustoffe diskutiert. In Österreich – hier liegt der Entwurf einer Recyclingbaustoff-Verordnung vor – ist die Frage der Verwertung von Aschen und Schlacken Thema kontroverser Auseinandersetzungen. In der Schweiz ist die Schlackenentsorgung in der Technischen Verordnung für Abfälle (TVA) geregelt, die strenge Anforderungen bezüglich der Schadstoffkonzentrationen im Feststoff und im Eluat stellt, so dass dies einem Einsatzverbot für die meisten Schlacken gleichkommt. Die Verordnung wird derzeit revidiert.

In diesem Buch stehen insbesondere wirtschaftliche und technische Aspekte der Entsorgung von Aschen aus der Abfallverbrennung und der Schlacken aus der Metallurgie im Vordergrund.



Bestellungen unter www.vivis.de
oder

Dorfstraße 51
 D-16816 Nietwerder-Neuruppin
 Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
 E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky