

Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlacken

Dirk Mudersbach und Heribert Motz

1.	Stand der Technik bei der Elektroofenschlackenproduktion und Nutzung.....	150
1.1.	Heutige Herstellung, Abkühlung und Aufbereitung	150
1.2.	Heutige Nutzung der Elektroofenschlacke	152
2.	Alternative Methoden zur Erstarrung von Stahlwerksschlacken	153
2.1.	Beispiele von Entwicklungen aus der Vergangenheit.....	153
2.2.	Alternative Erstarrung von Stahlwerksschlacken in einem geschlossenen System zur verbesserten Metallrückgewinnung (BSSF) .	155
2.3.	Trockene Erstarrung von Stahlwerksschlacke zur Wärmerückgewinnung (SLAG-REC, JFE).....	156
2.4.	Trockene Erstarrung mit Drehteller und Trommeln zur Energierückgewinnung (RIST-POSCO)	158
2.5.	Alternative Erstarrung der Elektroofenschlacke aus der Qualitätsstahlherstellung gekoppelt mit einer Wärmerückgewinnung (DEWEOS, G.A.P.)	160
3.	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
4.	Literatur	165

Im Jahr 2013 wurden in Deutschland knapp mehr als drei Millionen Tonnen Schlacke aus der Oxygenstahlerzeugung und etwa zwei Millionen Tonnen Elektroofenschlacke aus der Qualitäts- und Edelfstahlproduktion hergestellt, dazu kommen noch knapp unter einer Million Tonnen Stahlwerksschlacken aus Sonderverfahren dazu, somit ergab sich für das Jahr 2013 eine Gesamtproduktion an Stahlwerksschlacke von knapp sechs Millionen Tonnen in Deutschland [7], weltweit soll die jährliche Produktion von LD-Schlacke mehr als hundertfünfzig Millionen Tonnen betragen und für die Elektroofenschlacke bei mehr als zweihundert Millionen Tonnen liegen und dies mit einem angenommenen (theoretischen) Wert von über einer Milliarde USD [4]. Hierdurch ergibt sich weltweit ein großes Potenzial für die Nutzung der Stahlwerksschlacken und insbesondere auch der Elektroofenschlacke für die Bauwirtschaft. Elektroofenschlacke ist schon seit Jahrzehnten ein anerkanntes Produkt und wird heute nicht nur in Deutschland und Europa sondern auch weltweit erfolgreich als Straßen- und Deponiebaustoff, als Wasserbaustein, zur Bodenstabilisierung, als Strahlmittel oder als Gesteinskörnung im Beton eingesetzt. Diese Vielzahl an Anwendungen kann

einerseits nur durch eine geeignete Auswahl der Einsatzstoffe, eine gezielte Prozessführung im Elektroofen und andererseits durch eine adäquate Abkühlung, Behandlung und Aufbereitung gewährleistet werden. Insbesondere das Thema Erstarrung und deren Einfluss auf die Produktqualität der Stahlwerksschlacke soll in diesem Beitrag vertiefend betrachtet werden.

Unabhängig von dem bereits heute erreichten hohen Standard forschen die deutschen Stahlwerke und das FEhS-Institut [2] nach alternativen Prozessschritten und Nutzungsmöglichkeiten u.a. von Elektroofenschlacken. Beispiel hierfür ist z.B. die gezielte trockene Erstarrung gekoppelt mit einer Wärmerückgewinnung zur Nutzung des Energiepotenzials der Elektroofenschlacke bei der Abkühlung, verbunden mit der Herstellung eines normgemäßen Baustoffes mit hoher Produktqualität – DEWEOS = Definierte Erstarrung mit Wärmerückgewinnung von Elektroofenschlacke.

1. Stand der Technik bei der Elektroofenschlackenproduktion und Nutzung

1.1. Heutige Herstellung, Abkühlung und Aufbereitung

Die Förderung des Umweltschutzes ist seit jeher ein erklärtes Ziel der Politik. Ein Aspekt des Umweltschutzes ist es aber auch natürliche Ressourcen zu schonen, wozu z.B. die Nutzung von Eisenhüttenschlacken für den Verkehrswegebau seit langem beiträgt und Stand der Technik ist. In den letzten Jahrzehnten ist es durch die Umstellung metallurgischer Prozesse, z.B. die Einführung des Elektrolichtbogenofenverfahrens, auch zu veränderten Schlackentypen mit besonderen Eigenschaften gekommen, so dass z.B. Elektroofenschlacken heute in Deutschland etwa zu achtzig Prozent in der Bauwirtschaft eingesetzt werden können und nur etwa zehn Prozent der Gesamtproduktion deponiert werden müssen [7].

Voraussetzung für diese hohe Nutzungsrate ist, dass diese Schlacken nach bewusst eingestellter Produktion und Abkühlung im Stahlwerk in speziellen Aggregaten aufbereitet werden. Wie natürliche Gesteine werden auch die Schlacken nach Erstarrung in speziellen Anlagen gebrochen und abgeseibt, um vorgegebene Gesteinskörnungen und Baustoffgemische nach nationalen und europäischen Normen zu erzeugen. In den meisten Fällen sind diese Aufgabenstellungen zweigeteilt, auf der einen Seite produziert das Stahlwerk die schmelzflüssige Schlacke und nachfolgend sorgt der Schlackenaufbereiter und -vermarkter für die optimale Aufbereitung, dabei kann die Schnittstelle nach oder auch vor dem Schlackenbeet liegen, im Fall des bayrischen Stahlwerkstandortes wird die schmelzflüssige Elektroofenschlacke unter definierten Qualitätskriterien bei der Lech-Stahlwerke GmbH in Meitingen produziert und in einen Schlackenkübel

abgestochen. Damit gelangt die immer noch schmelzflüssige Schlacke zum Schlackenbeet, wo sie schnellstmöglich und emissionsfrei abgekühlt wird und erstarrt. Dieser Prozessschritt fällt schon in die Zuständigkeit der Max Aicher Umwelt GmbH. Die Max Aicher Umwelt GmbH ist dann auch nachfolgend für das Handling, die Aufbereitung und die Vermarktung der Elektroofenschlacke verantwortlich.

Jedoch ist diese Prozesskette nicht grundsätzlich an allen Standorten von Elektrostahlwerken so ausgelegt. Schon die Art des Abstichs aus dem Elektrolichtbogenofen unterscheidet sich, es gibt seitliche Abstichsysteme gemeinsam für den Rohstahl und die Schlacke oder getrennt, aber auch ein Bodenabstich des Rohstahls getrennt von der Schlacke wird praktiziert. Außerdem wird die Elektroofenschlacke dann entweder direkt in den *Keller* unter dem Ofen abgestochen (*Clean-Pit*) oder in Transportgefäße, die sogenannten Schlackentöpfe oder Schlackenkübel. In jedem Fall können direkt beim oder nach dem Abstich Maßnahmen notwendig sein, um das Aufschäumen der Schlacke zu verhindern. Dies kann die Zugabe von Feststoffen, wie Sand oder Schlacke in geeigneter Korngröße und Feuchte, sein oder das Besprühen der Schlacke mit einem feinen Wasserstrahl, dabei wird allerdings die Pfützenbildung vermieden. Beim *Clean-Pit-Verfahren* wird die Schlacke noch teilweise teigig mit Radladern in Transportcontainer gebracht und entweder an Luft oder in Tauchbecken weiter abgekühlt. All diese heutigen Maßnahmen zur definierten Erstarrung der Elektroofenschlacken dienen dem Ziel die Schlacke so schnell wie möglich, emissionsfrei und ohne hohen Wartungsaufwand abzukühlen, um zu gewährleisten, dass nach üblichen Tap-to-Tap-Zeiten von etwa einer Stunde die nächste Schlackencharge wieder störungsfrei abgekühlt werden kann.

Die heutigen Methoden der Erstarrung von Elektroofenschlacke sind allerdings nicht dazu geeignet mit einer Wärmerückgewinnung gekoppelt zu werden, weil heute genau das Gegenteil im Fokus steht, nämlich schnellst möglich die Wärme zu *vernichten*, damit die Schlacke ohne Verzögerungen gehandhabt werden kann. Ein heute immer noch unterschätzter zweiter Punkt, der einer erfolgreichen Wärmerückgewinnung entgegensteht, ist das Abschlacken bzw. Abkippen der schmelzflüssigen Schlacke selbst. Wenn keine Methoden entwickelt werden die schmelzflüssige Schlacke - bei Bedarf der nachgeschalteten Anlage zur definierten Erstarrung - in geeigneter Weise (ohne Wärmeverlust) zu transportieren, eventuell zu speichern und zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Menge an die richtige Stelle zu bringen, können die meisten bis heute entwickelten Verfahren zur Wärmerückgewinnung nicht funktionieren. Deswegen muss auch der Aspekt des Handlings der schmelzflüssigen Schlacke im Mittelpunkt der Forschung zur Wärmerückgewinnung bei einer alternativen Erstarrung stehen. Dieser *Nebenkriegsschauplatz* wird von vielen Entwicklern von Wärmerückgewinnungsanlagen für Eisen- und Metallhüttenschlacken unterschätzt. Im Fall der Stahlwerksschlacken und damit auch der Elektroofenschlacken kommt allerdings noch ein zusätzliches Problem erschwerend dazu, beim Abstich der Schlacke können noch erhebliche Mengen flüssigen Stahls mit fließen. Dabei handelt es sich nicht um kleine Granalien (bis ein

Zentimeter Durchmesser), die mit der Schlacke aus dem Ofen herausgetragen werden, sondern um große Mengen Rohstahls (bis zu einer Tonne). Anlagen zur Erstarrung der schmelzflüssigen Schlacke müssen auch für diesen Fall ausgelegt sein und bei einem solchen Ereignis nicht beschädigt oder sogar zerstört werden. Auch vom Wartungsaufwand für eine Anlage zur Erstarrung einer flüssigen Schlacke hängt die Entscheidung eines Betreibers ab, welches System installiert wird.

1.2. Heutige Nutzung der Elektroofenschlacke

Die technischen Voraussetzungen für eine Vermarktung beinhalten hauptsächlich die Korngrößenverteilung, die Festigkeit, die Kornform und den Widerstand gegen Verwitterung. Stahlwerksschlacken müssen auch die Anforderungen an die Raumbeständigkeit erfüllen, basierend auf Untersuchungen mit dem Dampfversuch. Im Fall der Elektroofenschlacken wird die Raumbeständigkeit hauptsächlich vom Gehalt an freiem Magnesiumoxid beeinflusst. Viele Untersuchungen der letzten dreißig Jahren haben sich mit der Optimierung der Produktion und Aufbereitung der Elektroofenschlacken beschäftigt, um eine Raumbeständigkeit des Produktes zu gewährleisten, die den Anforderungen genügt [10]. Dieser Aspekt wird jedoch schon u.a. im Beitrag *Einfluss der Metallurgie auf die Umweltverträglichkeit von Elektroofenschlacken* behandelt und soll an dieser Stelle kein Thema sein.

Eines der heutigen Hauptnutzungsgebiete für die Elektroofenschlacke ist die Anwendung im Straßenbau, wie z.B. als Körnung für ungebundene Schichten oder für Asphaltdecken. Die Elektroofenschlacke ist für diese Anwendungen besonders gut geeignet, da sie gegenüber dem Naturstein vergleichbare, teilweise bessere Eigenschaften aufweist, wie z.B. eine besonders raue Oberfläche der Einzelkörner. In Verbindung mit der Porosität der Elektroofenschlacke wird eine Oberflächenstruktur eingestellt, durch die eine hohe innere Stabilität der Baustoffgemische erreicht wird. Weiterhin ist hier die hohe Festigkeit der Elektroofenschlacken zu nennen, ermittelt z.B. durch den Schlagzertrümmerungswert. Oberflächeneigenschaften und ein gutes Benetzungsverhalten zwischen Gestein und Bitumen von über neunzig Prozent macht den Einsatz der Elektroofenschlacke im Asphalt bei besonders hoch belasteten Straßen vorteilhaft. Aus diesen Gründen wurde in den letzten dreißig Jahren eine Vielzahl von Straßen unter Nutzung von Elektroofenschlacken in den unterschiedlichsten Schichten gebaut, insbesondere als Gesteinskörnung für Asphaltdeckschichten.

Diese zuvor beschriebenen Eigenschaften der Elektroofenschlacken werden auch ganz maßgeblich von der Art der Erstarrung beeinflusst. Deshalb muss bei der Entwicklung von alternativen Erstarrungsmethoden, ob mit oder ohne gekoppelte Wärmerückgewinnung, auch immer der Aspekt der Schlackenproduktqualität berücksichtigt werden. Kein System zur Wärmeauskopplung aus schmelzflüssigen Schlacken kann sich am Markt durchsetzen, wenn nicht gewährleistet werden kann, dass die Schlacke mindestens auf dem gleichen Qualitätsniveau produziert wird, wie mit konventionellen Anlagen.

2. Alternative Methoden zur Erstarrung von Stahlwerksschlacken

Die Ausführungen in Kapitel 1 zeigen, dass die Elektroofenschlacke bereits heute weltweit ein auf dem Markt der Gesteinskörnungen akzeptiertes Produkt ist, welches teilweise bessere Eigenschaften aufweist, wie vergleichbare natürliche Gesteinskörnungen. Nichtsdestotrotz sind die Elektrostahlwerke in Deutschland, vom Westen bis zum Osten, wie z.B. die Benteler Steel/Tube GmbH in Lingen (BST) oder die Brandenburger Elektrostahlwerke GmbH (BES), und vom Norden bis zum Süden, wie z.B. die Georgsmarienhütte GmbH in Niedersachsen (GMH) oder die Lech-Stahlwerke GmbH in Bayern (LSW), gemeinsam mit dem FEhS-Institut bemüht die Herstellungsprozesse, die Erstarrungsmethoden, die Aufbereitung und damit auch die Qualität der Elektroofenschlacke weiter zu verbessern, um auch in Zukunft ein hochwertiges Produkt auf den Markt bringen zu können, welches auch weiter gegen die heutige Konkurrenz besteht oder auf noch höherwertigen Niveau vermarktet werden kann und auch weiterhin die aktuellen und die möglicherweise geänderten zukünftigen gesetzlichen Rahmenbedingungen erfüllt.

Nachfolgend werden nicht nur unterschiedliche, weltweit entwickelte Systeme vorgestellt, die eine alternative Erstarrung von Stahlwerksschlacken ermöglichen sollen, sondern auch ein System, welches aktuell in Deutschland von einem Elektrostahlwerk (GMH), einem Kupferhersteller (KME) und dem FEhS-Institut in Labor- und Betriebsversuchen entwickelt wird, um eine Wärmerückgewinnung während der Abkühlung der Elektroofenschlacken zu ermöglichen und die externe Nutzungsrate der Elektroofenschlacke zu steigern. Grundsätzlich muss ein System zur definierten Erstarrung mit oder ohne gekoppelte Wärmerückgewinnung die entstehenden Schlacken zeitnah ohne Verlängerung der Tap-to-Tap-Zeit aufnehmen und mit hoher Verfügbarkeit störungsfrei arbeiten. Je komplizierter eine Anlage für schmelzflüssige Schlacken ist, desto höher sind die Ausfallzeiten und die Wartungskosten.

2.1. Beispiele von Entwicklungen aus der Vergangenheit

Das Thema der definierten Erstarrung von Stahlwerksschlacken ist nicht neu. Auch schon in der Vergangenheit hat das FEhS-Institut eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden im Labormaßstab entwickelt und auch in Pilotversuchen getestet. Grundsätzlich muss zwischen trockenen Systemen (eventuell mit indirekter Wasserkühlung) und Systemen mit direktem Wasserkontakt unterschieden werden.

Im Gegensatz zu den reduzierten Schacht- und Hochofenschlacken mit Eisengesamtgehalten von kleiner 0,5 Ma.-% ist eine Wassergranulation für Stahlwerksschlacken nicht möglich, die eventuell vorhandene Menge Restmetallschmelze würde bei ungünstigem Verhältnis Wasser zu Schmelze zu einer Explosionsgefahr führen. Im Hinblick auf eine Wärmerückgewinnung sind die heutigen konventionellen Wassergranulationen sowieso nicht geeignet, denn die Effizienz der Wärmerückgewinnung über das Medium Wasser ist erst gegeben, wenn ein übersättigter Dampf mit mindestens einer Temperatur von 200 °C und 20 bar Druck generiert würde. Aktuelle Untersuchungen des FEhS-Instituts

zeigen aber, dass diese Forderung im Widerspruch zu einer langen Lebensdauer und einem geringen Wartungsaufwand dieser Anlagen steht. Dies heißt im Umkehrschluss, dass die geeignetste Methode die Wärme aus Schlacken zurückzugewinnen, die Generierung von heißer Luft ist. Die theoretischen Modellierungen zur höchstmöglichen Effizienz ergeben dazu unterschiedliche Mindesttemperaturen der Luft, die Werte liegen zwischen 450 und 650 °C. Dies sollte aber mit einem geeigneten System möglich sein zu realisieren, da die Schlacken selbst unterhalb der Erstarrungstemperatur noch immer Temperaturen von 1.000 bis 1.300 °C aufweisen. Es muss nun *nur noch* ein System zur definierten Erstarrung mit einer gekoppelten Wärmerückgewinnung entwickelt werden, welches dieses hohe Temperaturpotenzial der Schlacke nutzt und gleichzeitig teilweise große Volumina der schmelzflüssigen Schlacke mit nicht kontinuierlichen Flussmengen aufnehmen kann, zu minimalen Umwelt- und Emissionsbelastungen führt und einen geringstmöglichen Investitions- und Wartungsaufwand bedeutet. Dieser Aufgabe stellen sich aktuell weltweit eine Vielzahl von Forschungsstellen, Stahlwerken und Anlagenbauern.

Ein Beispiel für ein System zur alternativen Erstarrung von Stahlwerksschlacken, welches aber keine genügende Produktqualität erreichen kann, ist die Luftverdüsung von Stahlwerksschlacke oder auch als *Slag Atomising* bezeichnet [8]. Bei den Labor- und Betriebsversuchen des FEhS-Instituts zur Luftverdüsung (Bild 1) stand allerdings die Verbesserung der technischen Eigenschaften der Stahlwerksschlacken im Vordergrund, die Wärmerückgewinnung war in diesem offenen System kein Thema. Das gleiche gilt für das sogenannte *PS-Ball-Verfahren* von Ecomaister Co., LTD., Korea [3], obwohl Mitsubishi Heavy Industries, Japan, schon vor vierzig Jahren ein geschlossenes System der *air-blast-granulation* in Pilotanlagen getestet hat, damals schon mit dem Ziel der Wärmerückgewinnung [1]. Vergleichbar der Drehtellertechnik (*Rotating Cup*) der Siemens VAI für die Hochofenschlacke [6] wird dabei die heiße Luft direkt in der Partikelflughbahn erzeugt, es ist somit kein weiterer Transport der Schlackenpartikel mit einem möglichen Temperaturverlust notwendig. Bemerkenswerterweise war der Luftgranulation von Mitsubishi eine Behandlung der schmelzflüssigen Schlacke vorgeschaltet, um die Schlackenviskosität einzustellen und damit den Schlackenfluss zu optimieren.



Bild 1: Betriebsversuche zur Luftverdüsung von Stahlwerksschlacke in Deutschland

Die Raumbeständigkeit der luftverdünsten Stahlwerksschlacken kann durch die Bildung von gegenüber der konventionellen Abkühlung in Beeten anderen Mineralphasen verbessert werden, jedoch ist ein so feines, sphärisches Granulat (Bild 2) in den etablierten Nutzungswegen der Stahlwerksschlacken nicht einsetzbar. Deswegen ist die Verdüsung oder auch das Zersprätzen der flüssigen Schlacke mittels Drehtellertechnik keine geeignete Methode für die Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlacken, obwohl dabei eine große spezifische Oberfläche erzeugt wird, die eigentlich ideal geeignet ist für eine effektive Wärmerückgewinnung. Nichtsdestotrotz wurden und werden weltweit Systeme entwickelt, die den Aspekt einer hochwertigen Produktqualität der Stahlwerksschlacken nicht berücksichtigen. Bei der Erstarrung der Stahlwerksschlacken in diesen Systemen muss teilweise die Schlacke sogar deponiert werden, weil entweder die technischen Eigenschaften oder die Umweltverträglichkeit nicht dazu geeignet ist, das Material als Baustoff einzusetzen. Solche Systeme sind in Deutschland keine Alternative.



Bild 2:

Stahlwerksschlacke nach Luftverdüsung (PS-Balls mit dem Durchmesser bis etwa 5 mm)

Quelle: ecomaister.en.ecplaza.net/ps-ball-precious-slag-ball--291492-2200701.html

2.2. Alternative Erstarrung von Stahlwerksschlacken in einem geschlossenen System zur verbesserten Metallrückgewinnung (BSSF)

Das nun beschriebene Verfahren wurde ursprünglich auch mit dem Ziel der Wärmeauskopplung aus Stahlwerksschlacken entwickelt, inzwischen sind weltweit mehr als vierzig Anlagen für die schnelle Erstarrung von LD-Konverter- und Elektroofenschlacken errichtet worden und im betrieblichen Einsatz, jedoch ohne die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. Zu Beginn der Entwicklung dieses Systems wurden noch Versionen mit der Möglichkeit der Wärmerückgewinnung vorgestellt [5], die dann aber bei der Optimierung der Anlagentechnik zur Betriebsreife nicht realisiert werden konnte. Anfangs sollte das geschlossene System ohne eine direkte Wasserkühlung auskommen und hätte somit die Möglichkeit der Generierung heißer Luft ergeben. Die mit der großen Menge schmelzflüssiger Schlacke in das System eingebrachte Wärme machte aber eine direkte Wasserkühlung notwendig, damit kann mit dem BSSF-Verfahren keine Wärmerückgewinnung aus den Stahlwerksschlacken mehr dargestellt werden. Unabhängig davon hat das System aber gewisse Vorteile bzgl. Zeitdauer des Erstarrungsvorgangs, Platzbedarf, Metallseparation und Emissionen, auf der anderen Seite

aber auch Nachteile bezüglich der Schlackenqualität. Der Vorteil in Bezug auf eine saubere Metallseparation ist auch gleichzeitig der Nachteil bezüglich der Produktqualität der Schlacke. In der *Kugelmühle* (Bild 3) wird die spröde Schlacke direkt nach der Erstarrung sehr gut von dem duktilen Metall separiert, aber aufgrund der starken Beanspruchung auch zu einem sehr feinkörnigen Material aufgemahlen, mehr als 75 Prozent der Schlacke liegen nach Austrag kleiner fünf Millimeter vor [14].

Damit stellt das BSSF-Verfahren ein System dar mit dem eine alternative Erstarrung durchgeführt werden kann, aber weder eine Wärmerückgewinnung noch eine dem deutschen Standard entsprechende Produktqualität der Schlacke realisiert werden kann. Nichtsdestotrotz ist dieses System eine Konkurrenz für zukünftige Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlacken, denn kein Stahlwerk, welches eine BSSF-Anlage betreibt, wird kurz- oder mittelfristig eine zweite alternative Anlage – auch nicht mit Wärmeauskopplung – installieren bzw. die vorherige ersetzen.

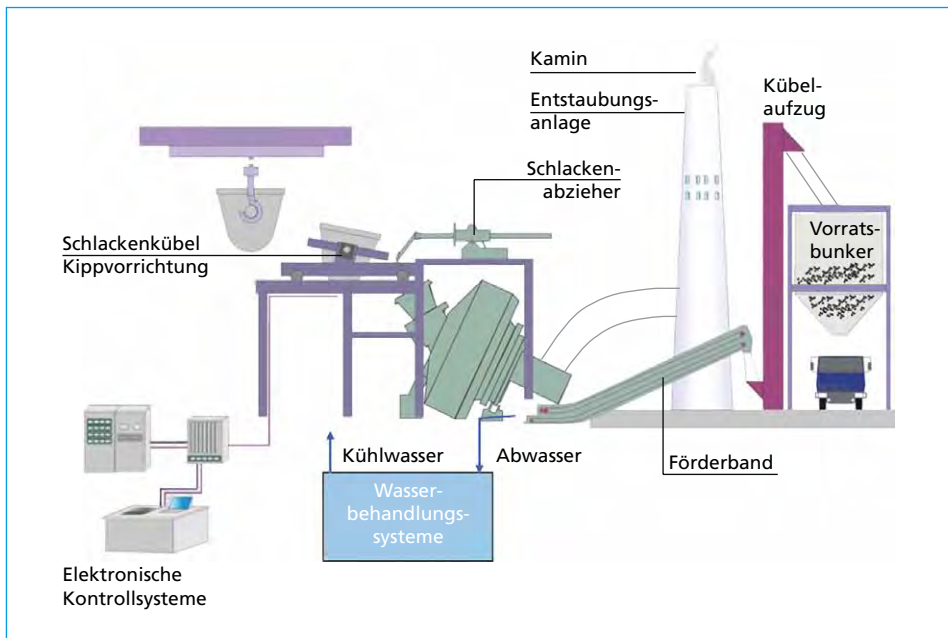


Bild 3: Verfahrensschema für das Baosteel Slag Short Flow (BSSF) Verfahren

2.3. Trockene Erstarrung von Stahlwerksschlacke zur Wärmerückgewinnung (SLAG-REC, JFE)

Auch andere Forschungsstellen, Anlagenbauer und Stahlwerke entwickeln aktuell Verfahren zur definierten Erstarrung von Elektrofenschlacken in vielen Fällen aber durchaus gekoppelt mit einer Wärmerückgewinnung. Im Folgenden soll an zwei aktuellen Beispielen die Vor- und Nachteile von Systemen mit indirekt gekühlten Kühltrommeln beschrieben werden.

Ein Beispiel aus Italien ist die Entwicklung des Systems SLAG-REC mit zwei indirekt wassergekühlten Stahltrommeln, die sich nach innen gegenläufig bewegen und durch einen Tundish mit flüssiger Elektroofenschlacke gespeist werden (Bild 4) [13]. Typische Probleme solcher Anlagen sind die Gefahr des Wärmeverlustes und von Verkrustungen und Verstopfungen im Bereich der Schlackenzufuhr und Speicherung der schmelzflüssigen Schlacke. In diesem speziellen Fall kommt noch das Problem der Abdichtung des Tundishes in Richtung des Trommelausgangs hinzu (Bild 4). Betriebsversuche haben gezeigt, dass die geringe Verweilzeit der schmelzflüssigen Schlacke an der drehenden Oberfläche der Trommeln teilweise dazu führt, dass noch nicht erstarrte Schlacke die Anlage verlässt, damit ist weder eine genügende Wärmerückgewinnung noch eine ausreichende Produktqualität zu erzielen. Außerdem kann das Größtkorn am Ende der Aufbereitung einer solch abgekühlten Schlacke nur so groß sein, wie der Spalt zwischen den Trommeln, der wiederum ist aber begrenzt durch die Möglichkeit der Erstarrung der Schlacke. Demzufolge ist auch bei diesem System eine z.B. Schotterkörnung schwierig zu realisieren. Zusätzlich ist die Wärmerückgewinnung in diesem System über das Medium Kühlwasser wenig effizient, da Kühlwassertemperaturen unter 100 °C eingestellt werden müssen, um zu gewährleisten, dass die Anlage keinen Schaden nimmt. Die ersten Pilotversuche haben darüber hinaus einen hohen Wartungsaufwand aufgrund von Anbackungen und Verkrustungen der Schlacke an den bewegten Teilen ergeben. Auch andere Systeme vergleichbarer Bauweise, insbesondere in Asien entwickelt, haben keine betriebliche Umsetzung erfahren.



Bild 4:

Betriebsversuche zur trockenen Abkühlung von Elektroofenschlacke mittels indirekt wassergekühlter Stahltrommeln in Italien

Quelle: Roberti, R; Svanera, M; SLAG-REC The innovative system for dry granulation of EAF slag, Poster Presentation Proceedings of 6th European Slag Conference, Ferrous Slag – Resource Development for an Environmentally Sustainable World, Madrid, Spain, 2010

Ein anderes Beispiel für die Verwendung von Kühltrommeln ist der Bau einer Pilotanlage zur Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlacken in Japan [15]. Das Stahlwerk JFE hat innerhalb der Forschungsinitiative COURSE50 ein System entwickelt bei dem die Wärme aus Stahlwerksschlacke in einem zweistufigen Prozess im Pilotmaßstab zurückgewonnen wird (Bild 5). Der erste Schritt beinhaltet die gezielte Abkühlung der Stahlwerksschlacke auf eine Zieltemperatur von etwa 1.000 °C ohne direkten Wasserkontakt und nachfolgend ein Transport dieser erstarrten – aber noch mit einem

hohen Wärmeinhalt versehenen – Schlacke über ein Stahltransportband zu einem nachgeschalteten Wärmetauscher. Die maximal erreichten Gastemperaturen betragen etwa 450 °C. Um möglichst schnell und kontrolliert die Schlacke vom schmelzflüssigen Zustand in einen Aggregatzustand zu überführen, der auf der einen Seite das Handling der Schlacke zulässt und auf der anderen Seite genügend Wärmeinhalt beibehält, dass eine Wärmerückgewinnung möglich ist, wird die flüssige Schlacke direkt auf zwei Kupferrollen mit einem komplizierten inneren Design abgestochen. Dieses Design der Kupferrollen ist notwendig damit sie sich im Laufe der Zeit nicht verziehen und damit unbrauchbar werden. Der Transport der heißen erstarrten Schlacke erfolgt dann über ein Stahltransportband direkt zum Wärmetauscher. Bei diesem System müssen die Kupferrollen von innen indirekt gekühlt werden. Die maximal zulässige Wassertemperatur im JFE-System beträgt 30 °C bei einem Volumenstrom von 250 t/h. Wäre die Wassertemperatur höher oder würde sogar Wasserdampf entstehen, wäre die Konstruktion aus Kupfer gefährdet und es käme zu einem versagen der Kühlrollen. Die Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der japanischen Pilotanlage ist, dass die Kupferkonstruktion sich nicht auf eine Oberflächentemperatur von über 300 °C aufheizen darf, damit die Thermospannung unter 220 MPa bleibt. Dies kann nur mit *kaltem* Kühlwasser realisiert werden. Dementsprechend ist keine Wärmerückgewinnung über das Medium Dampf (250 °C, 20-30 bar) möglich. Somit muss die Wärmerückgewinnung entkoppelt werden und in einem separaten Wärmetauscher erfolgen.



Bild 5:

Betriebsversuche zur trockenen Abkühlung von Elektroofenschlacke mittels indirekt wassergekühlter Kupfertrommeln in Japan

Quelle: Shigaki, N.; Tobo, H.; Ozawa, S.; Ta, Y.; Development of a new heat recovery system from steelmaking slag, JFE Steel Corporation, CAMP-ISIJ Vol. 27 (2014) 143

2.4. Trockene Erstarrung mit Drehteller und Trommeln zur Energierückgewinnung (RIST-POSCO)

Der südkoreanische Stahlproduzent POSCO hat sich zum Ziel gesetzt weltweit der *Global Green Growth Leader* zu werden, dazu wurde das sogenannte *Green People* Programm aufgelegt. Innerhalb dieses Programms werden unter anderem Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Energierückgewinnung verfolgt. Dies ist der Grund für die Forschungsaktivitäten zur trockenen Erstarrung gekoppelt mit einer Wärmerückgewinnung in der jüngsten Vergangenheit.

Im ersten Schritt wurden an der Forschungsstelle *Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)* in Pohang Laborversuche zur alternativen Granulation mit einer

Wärmeauskopplung an Hochofenschlacken durchgeführt. Zusätzlich wurden aber auch schon direkt parallel Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab unternommen die schmelzflüssigen Stahlwerksschlacken mit dem sogenannten *Rotating Cup-Drum-Atomiser* trocken erstarren zu lassen [9]. Bei diesem System wird die schmelzflüssige Schlacke im ersten Schritt in den Mittelpunkt eines Drehtellers abgestochen um mittels Zentrifugalkraft in kleine Partikel zerspritzt zu werden (vergleichbar dem SIEMENS VAI-System für Hochofenschlacke). Allerdings werden dann die zerspritzten Schlackenpartikel von drehenden Trommeln *aufgefangen*. Diese Trommeln sind parallel zu dem Drehteller angeordnet. Von diesen Trommeln gelangen die Schlackenpartikel direkt in einen Wärmetauscher, der als Fließbett ausgelegt ist. Dort werden die Schlackenpartikel schlagartig durch kalte einströmende Luft abgekühlt. Die Technikumsanlage bei RIST besteht aus vier Komponenten: Zugabe von erstarrter Schlacke, Schlackenwiederaufschmelzen, *Rotating Cup-Drum-Atomiser* und Wärmetauscher. Die Technikumsversuche wurden erfolgreich mit fünf Kilogramm Schlacke pro Minute durchgeführt, allerdings waren neunzig Prozent der granulierten Stahlwerksschlacke kleiner drei Millimeter. Damit ist die maximale Partikelgröße nach Granulation der Stahlwerksschlacke sogar noch geringer als nach Granulation der Hochofenschlacke unter gleichen Randbedingungen. Dies ist in der unterschiedlichen Viskosität der beiden Schlackentypen begründet. Die Viskosität der Eisenoxid-reichen Stahlwerksschlacken ist ungefähr eine Zehnerpotenz niedriger als die der ausreduzierten Hochofenschlacken mit auch noch deutlich niedriger einfacher Basizität (CaO/SiO_2). Grundsätzlich ist der Einfluss der Viskosität und Oberflächenspannung der schmelzflüssigen Schlacke entscheidend für den Erfolg von alternativen Methoden zur Erstarrung von Eisenhüttenschlacken.

Bei der Erstarrung der Stahlwerksschlacke mit dem *Rotating Cup-Drum-Atomiser* im Technikumsmaßstab konnten Wärmerückgewinnungstemperaturen zwischen 250 und 420 °C erzielt werden, die Wärmerückgewinnungsrate lag zwischen vierzig und sechzig Prozent.

Im zweiten Schritt wurden diese guten Ergebnisse auf eine Pilotanlage bei POSCO übertragen. Es konnte ein kontinuierlicher Betrieb von einer Stunde realisiert werden, die Schlackenmenge betrug 35 kg pro Minute, dies entspricht etwa zwei Tonnen pro Stunde. Der Drehteller hatte einen Durchmesser von 300 mm und die Umdrehungsgeschwindigkeit lag bei 1.800 U/min. Die Trommeln hatten ebenfalls einen Durchmesser von 300 mm, aber die Geschwindigkeit lag nur bei 700 U/min. Der Wärmetauscher war 1,1 m x 1,1 m in der Abmessung. Mehr als fünfzig Prozent des Wärmeinhalts der schmelzflüssigen Schlacke konnte zurückgewonnen werden.

Allerdings ist eine solche Technik für Deutschland keine Lösung, da eine feinkörnige Stahlwerksschlacke mit einem Größtkorn von drei Millimeter nicht die Voraussetzungen für eine uneingeschränkte Nutzung erfüllt. Damit ergibt sich für diese Methode das gleiche Problem, wie für das BSSF-Verfahren, die alleinige Drehteller-Technik oder die Luftverdüsung. Die Systeme zur alternativen Erstarrung von Stahlwerksschlacken mit und ohne Wärmerückgewinnung müssen vielmehr auch gewährleisten, dass eine Korngröße erzeugt wird, die die Nutzung nicht einschränkt und zusätzlich auch andere technische Eigenschaften der Schlacke, wie z.B. die Festigkeit, nicht negativ beeinflussen.

2.5. Alternative Erstarrung der Elektroofenschlacke aus der Qualitätsstahlerstellung gekoppelt mit einer Wärmerückgewinnung (DEWEOS, G.A.P.)

Im Bereich der Eisen- und Metallhüttenschlacken war die Forschung in Bezug auf eine Wärmerückgewinnung während der Erstarrung in den letzten Jahrzehnten sehr stark auf die Hochofenschlacken fokussiert. Als Alternative für die konventionelle Wassergranulation zur Erzeugung des etablierten Produkts Hüttensand wurden in der Vergangenheit und auch aktuell einige Methoden zur *Trockengranulation* entwickelt. Die Trockengranulation zu einem Produkt vergleichbar dem Hüttensand ist auf der einen Seite eine Option die hohen Energiekosten für eine Trocknung vor der Mahlung einzusparen und andererseits eine Voraussetzung für eine Wärmerückgewinnung aus der entstehenden *heißen Luft*. Aktuell entwickelt die SIEMENS AG gemeinsam mit dem FEhS-Institut das Verfahren des Drehtellers in Labor- und Technikumsversuchen weiter, um ein trockenes, feines und vor allem glasiges Material mit hydraulischen Eigenschaften für die Zementherstellung aus der Hochofenschlacke herzustellen und gleichzeitig den hohen Wärmeinhalte der Schlacke während der Erstarrung nutzbar zu machen. Die Ergebnisse der Labor- und Technikumsversuche werden aktuell im Pilotmaßstab in die Betriebspraxis überführt [6]. Zeitgleich entwickelt die PAUL WURTH S.A. ein Verfahren die Hochofenschlacke direkt nach Abstich kontinuierlich mit kalten Stahlkugeln erstarren zu lassen und nachfolgend in einem Wärmetauscher ebenfalls die Wärme zurück zu gewinnen [11]. Hier sind die ersten Pilotversuche im größeren Maßstab (bis zu 6 t/min Schlacke) durchgeführt worden. Am Ende der Entwicklung dieser Methoden werden verschiedene Aspekte eine Rolle spielen, welches Verfahren sich durchsetzen wird oder sogar beide parallel Anwendung finden.

Im Gegensatz zu diesen beiden sogenannten DSG (Dry Slag Granulation) Projekten für die Wärmerückgewinnung aus der Hochofenschlacke ist in dem BMWi-Forschungsvorhaben DEWEOS – Definierte Erstarrung mit Wärmerückgewinnung von ElektroOfenSchlacke – die glasige Erstarrung des Produktes keine Voraussetzung für das Gelingen der Methode. Die Stahlwerksschlacken können aufgrund ihrer hohen Basizität betrieblich nicht glasig erstarren. Deswegen soll innerhalb des Projektes DEWEOS kristallines Material in den verschiedenen heute Anwendung findenden Korngrößenklassen hergestellt werden, welche anschließend als aufbereitete Gesteinskörnungen vermarktet werden können. Anders als bei z.B. der Luftverdüsung oder beim BSSF-Verfahren sollen also Körnungen deutlich größer fünf Millimeter erzeugt werden.

Das vorgeschlagene Prozesskonzept für DEWEOS basiert auf vier unterschiedlichen Anforderungen:

1. Auf eine indirekt gekühlte Vibrations-Kupferrutsche – angestrebte Kühlwassertemperatur $< 100\text{ °C}$ – müssen dünne Schichten der Schlacke abgegossen werden, um eine möglichst große Fläche für einen idealen Wärmeübergang zur Verfügung zu haben.
2. Die abzugießende Schlacke muss eine genügend niedrige Viskosität aufweisen, damit erstens diese dünnen Schichten auf der Rutsche realisiert werden können

und zweitens die Schlacke mit einer geeigneten Geschwindigkeit – nicht zu schnell, um einen genügenden Wärmeübergang zu gewährleisten, nicht zu langsam, um den Schlackenfluß nicht einzuschränken – von der Vibrationsrinne abtransportiert wird, um nachgeschaltet auch noch eine abschließende Wärmerückgewinnung zu ermöglichen.

3. Die von der Erstarrung entkoppelte Wärmerückgewinnung aus der zu mindestens größtenteils erstarrten Schlacke muss auf dem höchstmöglichen Temperaturniveau geschehen – angestrebte Schlackentemperatur am Abwurf der Vibrations-Kupferrutsche $> 1.000\text{ °C}$ – um eine effiziente Energierückgewinnung (angestrebte Lufttemperatur $> 600\text{ °C}$) zu realisieren.
4. Die so erhaltenen Produkte müssen eine Produktqualität aufweisen, die mindestens dem heutigen Niveau entspricht und dies bei einer höchst möglichen Wärmerückgewinnung.

Inzwischen sind die Labor- und auch erste Betriebsversuche mit der sogenannten *kleinen Kupferrüttelrinne* (KKRR) erfolgreich abgeschlossen worden. Die Abkühlfläche der KKRR der ersten Versuchskampagne war noch ohne Profilierung und nur begrenzt in der Neigung einstellbar, so wurde für die nächsten beiden Betriebskampagnen ein neues Design für die Oberfläche der Vibrationsrinne gewählt. Das Ergebnis der ersten Betriebsversuchskampagne war, dass die Kontaktfläche, aber auch die Kontaktzeit, maximal sein muss, damit eine effektive Wärmeübertragung möglich ist. Schon die Laborversuche am FEhS-Institut hatten gezeigt, dass eine profilierte Oberfläche der Abkühlfläche (Wellenform entgegen der Schlackelaufrichtung) Vorteile bezüglich des Wärmeübergangs hat – größere Oberfläche und *Zurückhalten* der Schlacke bei Erstarrung. Dies wurde dann in der zweiten und in der dritten Versuchskampagne auch betrieblich bei der KKRR durch eine Profilierung der Abkühlfläche, Minimierung der Neigung und Optimierung der Rüttelfrequenz erreicht. Bei den Laborversuchen am FEhS-Institut wird die wiederaufgeschmolzene Schlacke über Tiegel bis zu drei Kilogramm Fassungsvermögen einmalig auf die Abkühlvorrichtung gebracht, bei den Betriebsversuchen im kleinen Maßstab können mehrfach etwa fünf Kilogramm mittels Probenahmelöffel direkt aus dem Elektrolichtbogenofen entnommen werden und unverzüglich mit beliebiger Zugaberate auf die Abkühlvorrichtung abgegossen werden (Bild 6).

Neben der Variation der Zugabefrequenz, -menge und dem Punkt des Auftreffens auf die Kupferrinne wurde auch die Vibration und Neigung variiert. Zusätzlich wurde in drei verschiedenen Tiefen innerhalb der Kupferrinne die Temperatur online gemessen. Diese Temperaturmessungen zeigten u.a., dass die Oberflächentemperatur der Kupferrinne ohne eine indirekte Wasserkühlung *linear* nach kürzester Zeit auf Temperaturen von über 300 °C ansteigt. Die Konsequenz ist damit die Notwendigkeit einer effektiven Kühlung, damit die kritische Oberflächentemperatur von 300 °C nicht überschritten wird und damit die Thermospannung im Kupfer nicht zu hoch wird. Dies kann nur mit Kühlwasser unter 100 °C erreicht werden, deswegen kann mit der vorgesehenen Vorrichtung kein übersättigter Wasserdampf erzeugt werden. Vielmehr muss die eigent-

liche Wärmerückgewinnung von der vorgeschalteten Erstarrung entkoppelt werden. Das DEWEOS-Konzept ist damit vergleichbar der Anlage des japanischen Stahlwerks JFE (Kapitel 3.3), nur mit dem Unterschied, dass beim DEWEOS-System die wesentlich kostengünstigere und robustere Kupfervibrationsrinne die Aufgabe der *Vorerstarrung* der schmelzflüssigen Schlacke von der kostspieligeren und komplizierten Kupfertrommeln mit ihrem aufwendigen inneren Design übernimmt. Inzwischen konnte mit den Ergebnissen der Labor- und der ersten Betriebsversuche ein Demonstrator konstruiert werden, der sich zur Zeit im Bau befindet, es handelt sich dabei um eine große indirekt gekühlte Vibrationskupferplatte, die mittels Schlackentopf beschickt wird.



Bild 6: Betriebsversuche zur Wärmerückgewinnung aus Elektroofenschlacke mittels KKRR

Weiterhin kann in diesem Zusammenhang eine Konditionierung der schmelzflüssigen Schlacke vor der Erstarrung vorteilhaft sein. Erstens kann dadurch eine Verringerung der Viskosität und damit Erhöhung der Fließfähigkeit erreicht werden, zweitens können damit die Randbedingungen für eine definierte Erstarrung verbessert werden und drittens können die Eigenschaften der erstarrten Schlackenprodukte für eine hochwertige Anwendung optimiert werden, z.B. die Porosität und damit die Festigkeit, aber auch die Raumbeständigkeit. Die Versuche zu dieser Art der Konditionierung werden zur Zeit im schmelzmetallurgischen Labor des FEHS-Institut durchgeführt.

Grundsätzlich muss ein System zur definierten Erstarrung mit oder ohne gekoppelte Wärmerückgewinnung die entstehenden Schlacken zeitnah ohne Verlängerung der Tap-to-Tap-Zeit aufnehmen und mit hoher Verfügbarkeit störungsfrei arbeiten. Je komplizierter eine Anlage für schmelzflüssige Schlacken ist, desto höher sind die Ausfallzeiten und die Wartungskosten. Deshalb wird innerhalb des DEWEOS Projektes das einfache Vibrationsrutschensystem ohne Flüssigschlakenspeicherung favorisiert. Eine eventuell notwendige Konditionierung muss dementsprechend im Elektrolichtbogenofen selbst stattfinden oder es werden exotherme Reaktionen genutzt, dann kann auch im Schlackenkübel nachbehandelt werden.

Die Firma G.A.P. in Italien verfolgt eine ähnlich robuste Lösung, wie das DEWEOS-System, für die Wärmerückgewinnung aus Elektroofenschlacken, jedoch soll hierbei

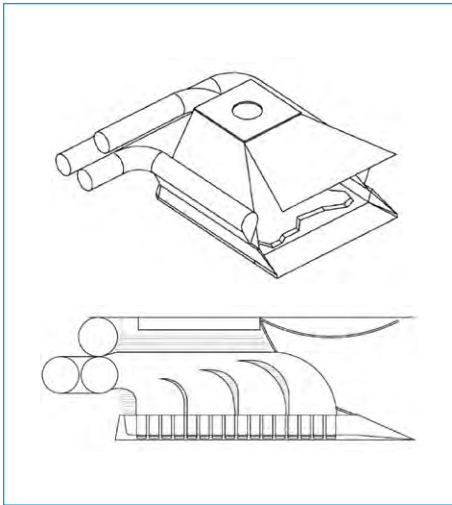


Bild 7: Anlage zur Verringerung von Staubemissionen beim Abstich und zur Wärmerückgewinnung aus Elektroofenschlacke

Quelle: Patent WO 2013/186664 A1, Device for recovering heat and fumes from slag resulting from the steel production cycle, G.A.P. S.P.A., Veröffentlichungstag der Anmeldung 03.06.2013

direkt bei der Erstarrung heiße Luft erzeugt werden (Bild 7) [12]. Auch bei dieser Methode soll die schmelzflüssige Schlacke auf eine *einfache* Platte abgestochen werden, die zwangsläufig beim Abkippen einer Schlacke entstehenden Emissionen sollen direkt abgesaugt werden und auch schon dabei die kalte einströmende Luft aufgeheizt werden, zusätzlich wird die Platte selbst auch mit Luft gekühlt und damit ebenfalls heiße Luft erzeugt. Die Anlage soll für Schlackenabstichgewichte von bis zu vierzig Tonnen (Elektrolichtbogenofen mit bis zu 250 Tonnen Kapazität) ausgelegt sein, obwohl die Erfinder auch die Notwendigkeit einer dünnen Schlackenschicht für einen guten Wärmeübergang beschreiben. Dementsprechend soll die Platte 12,5 x 10,5 Meter groß sein. Den Autoren sind zu dieser Technik keine Technikums- oder Betriebsversuche bekannt.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Heutzutage ist die Elektroofenschlacke ein in Deutschland und in Europa im Markt etablierter Baustoff. Inzwischen kann die Stahlindustrie auf eine jahrzehntelange Erfahrung der erfolgreichen Nutzung von Elektroofenschlacken zurückblicken. Beispielhaft ist hier nur die Verwendung als Gesteinskörnung im Straßenbau, als Wasserbaustein oder in Europa auch als Gesteinskörnung für den Beton genannt. So konnte bis heute in Deutschland eine Nutzungsrate der Elektroofenschlacke von etwa neunzig Prozent erreicht werden.

Nach Abstich aus dem Elektrolichtbogenofen erstarrt die schmelzflüssige Schlacke heute entweder direkt unter dem metallurgischen Aggregat (*Clean-Pit-Verfahren*) oder nach dem Transport in Schlackentöpfen in sogenannten großen Schlackenbeeten außerhalb des Stahlwerksgebäudes und wird nachfolgend, wie ein Naturstein, in speziellen Aufbereitungsanlagen gebrochen und zu regelkonformen Gesteinskörnungen abgeseibt. Die nachfolgenden regelmäßigen Untersuchungen der technischen und umweltrelevanten Parameter zeigen, dass die Schlacken teilweise bessere Eigenschaften aufweisen, wie vergleichbare natürliche Gesteinskörnungen aus z.B. Basalt oder Diabas.

Allerdings können bei den heutigen konventionellen Anlagen zur Erstarrung der Stahlwerksschlacken keine Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung ergänzt werden und auch sich neu auf dem Markt etablierende Systeme, wie das BSSF-Verfahren, bieten keine Möglichkeit das hohe Energiepotenzial der schmelzflüssigen Schlacken zu nutzen. Deshalb werden weltweit verschiedene Methoden entwickelt zukünftig auch diese Wärme zurückzugewinnen. Viele Ansätze scheitern aber schon am Schlackenhandling, der Gefahr des Austrags an flüssigem Rohstahl oder an der fehlenden Produktqualität der Schlacke. Nur das System, welches auch für große aber diskontinuierliche Schlackenmengen und Ereignisse des Mitlaufens von Stahl ausgelegt ist, geringe Umwelt- und Emissionsbelastungen und geringe Investitions- und Wartungskosten besitzt, wird sich letztendlich durchsetzen. In Ländern, wie Deutschland, mit einer hohen Nutzungsrate für die Stahlwerksschlacken, werden sich darüber hinaus auch nur solche Verfahren realisieren lassen, die sowohl eine effiziente Wärmerückgewinnung ermöglichen, als auch ein hochwertiges Schlackenprodukt erzeugen.

Neben verschiedenen Konditionierungs- und Behandlungsmethoden in der Prozesskette, die es ermöglichen noch höherwertige Produkte aus der Elektroofenschlacke zu generieren entwickelt das FEhS-Institut gemeinsam mit den Stahlwerken und Anlagenbauern Methoden zur Wärmerückgewinnung während der Abkühlung der Eisenhüttenschlacken und der Steigerung der Nutzungsrate als Baustoff. Zu dem Aspekt der Wärmeauskopplung bei der Erstarrung der Stahlwerksschlacken erforscht das FEhS-Institut aktuell in einem national geförderten Projekt Lösungswege, die nachfolgend innerhalb von Pilotversuchen in die Betriebspraxis überführt werden sollen.

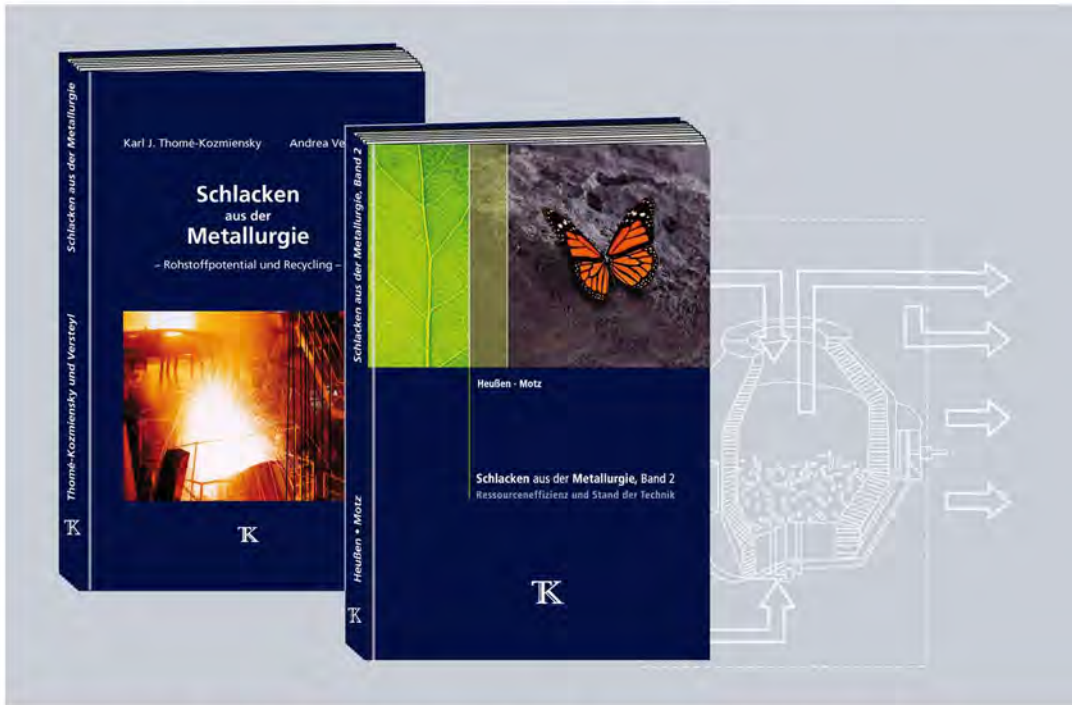
Danksagung

Das BMBF-Vorhaben mit dem Förderkennzeichen 03ET1141 A-C *Erforschung eines Verfahrens zur gezielten Erstarrung von schmelzflüssiger Elektroofenschlacke kombiniert mit einer Wärmerückgewinnung* mit dem Akronym DEWEOS wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Laufzeit des Forschungsvorhabens geht vom 01.05.2013 bis zum 30.04.2016. Für die Förderung sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

4. Literatur

- [1] Anko, J. et al.: Development of Slag Blast Granulating Plant Characterized by Innovation of the Slag Treatment Method, Technical Review-Mitsubishi Heavy Industries, 22(1985) S. 287-309
- [2] Drissen, P.; Ehrenberg, A.; Kühn, M.; Mudersbach, D.: Recent Development in Slag Treatment and Dust Recycling, steel research int. 80 (2009) No. 10, S. 737-745
- [3] ecomaister.en.ecplaza.net/ps-ball-precious-slag-ball--291492-2200701.html
- [4] Esfahani, Sh.; Barati, M.: Current Status of Heat Recovery from granulated Slag, Proceedings of 3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, TMS 2012, S. 339-348
- [5] Li, G.; Ni, H.: Recent progress of hot stage processing for steelmaking slags in China considering stability and heat recovery, Proceedings of the 2nd International Slag Valorisation Symposium, Leuven 2011, S. 253-261
- [6] McDonald, I.: Reuse of waste energy, Metals Magazine 1/2012, S. 25-27
- [7] Merkel, Th.: Erhebung zu Produktion und Einsatz von Hochofen- und Stahlwerksschlacke 2013, Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung, 21(2014)1, S. 18
- [8] Merkel, Th.: Luftgranulation von LD-Schlacke, Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung, 13(2006)2, S. 1-3
- [9] Motz, H.; Ehrenberg, A.; Mudersbach, D.: Dry solidification with heat recovery of ferrous slag, Proceedings of the 3rd International Slag Valorisation Symposium, Leuven 2013, S. 37-55
- [10] Motz, H.; Geiseler, J.: The Steel Slags – Characteristics, Properties and Quality Assurance, Schriftenreihe der FEhS, Heft 8, Iron and Steel Slags – Properties and Utilisation, Duisburg, 2000, S. 149-168
- [11] Patent WO 12-034897 A2, Dry Granulation of Metallurgical Slag, Paul Wurth S.A., Veröffentlichungstag der Anmeldung 22.03.2012
- [12] Patent WO 2013/186664 A1, Device for recovering heat and fumes from slag resulting from the steel production cycle, G.A.P. S.P.A., Veröffentlichungstag der Anmeldung 03.06.2013
- [13] Roberti, R.; Svanera, M.: SLAG-REC The innovative system for dry granulation of EAF slag, Poster Presentation Proceedings of 6th European Slag Conference, Ferrous Slag – Resource Development for an Environmentally Sustainable World, Madrid, Spain, 2010
- [14] Schüler, S. et al.: Einfluss der Metallurgie auf die Umweltverträglichkeit von Elektroofenschlacke, Schlacken aus der Metallurgie, Band 3 (2014)
- [15] Shigaki, N.; Tobo, H.; Ozawa, S.; Ta, Y.: Development of a new heat recovery system from steel-making slag, JFE Steel Corporation, CAMP-ISIJ Vol. 27 (2014) 143

Schlacken aus der Metallurgie



Schlacken aus der Metallurgie, Band 1 – Rohstoffpotential und Recycling –

Karl J. Thomé-Kozmiensky • Andrea Versteyl

ISBN: 978-3-935317-71-9

Erscheinung: 2011

Seiten: 175

Preis: 30.00 EUR

Schlacken aus der Metallurgie, Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik –

Michael Heußen • Heribert Motz

ISBN: 978-3-935317-86-3

Erscheinung: Oktober 2012

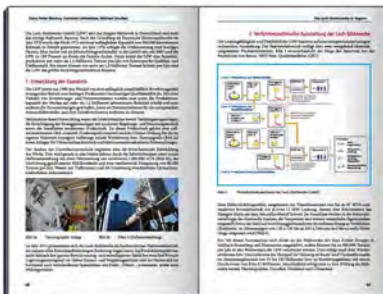
Seiten: 200 Seiten

Preis: 30.00 EUR

50.00 EUR
statt 60.00 EUR

Paketpreis

Schlacken aus der Metallurgie – Rohstoffpotential und Recycling –
Schlacken aus der Metallurgie – Ressourceneffizienz und Stand der Technik –



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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Michael Heußén, Heribert Motz (Hrsg.): **Schlacken aus der Metallurgie, Band 3**
– Chancen für Wirtschaft und Umwelt –

ISBN 978-3-944310-17-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Berenice Gellhorn, Ginette Teske, Cordula Müller

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.