



**FEhS – INSTITUT
FÜR BAUSTOFF-FORSCHUNG e.V.**

Bliersheimer Str. 62
4 7 2 2 9 D U I S B U R G
Telefon: 02065/9945 - 0
Telefax: 02065/9945 - 10
E-Mail: fehs @ fehs.de
Internet: http://www.fehs.de

Dezember 2016

ISSN 0948-4795

23. Jahrgang Nr. 2

Liebe Leserinnen und Leser,
schon wieder ist ein ereignisreiches Jahr fast vorbei.

Das FEhS-Institut hat sich auch in diesem Jahr wieder mit zahlreichen Forschungsprojekten beschäftigt. Sie können in den nachfolgenden Beiträgen Interessantes zu einigen dieser Projekte lesen. Die Mitglieder des FEhS-Instituts haben darüber hinaus im Jahresbericht 2015/2016 einen umfassenden aktuellen Sachstand zu den mehr als 20 laufenden Forschungsprojekten erhalten.

Wir haben im wissenschaftlichen Beirat des FEhS-Instituts über eine weitere Intensivierung der Zusammenarbeit mit den Mitgliedsunternehmen im Bereich Forschung diskutiert. Ziel ist, das FEhS-Institut noch stärker als Dienstleister für die Unternehmen zu etablieren und auf Basis wissenschaftlicher Ergebnisse praxisorientierte Lösungen zum Thema Schlacken und den daraus hergestellten Produkten zu erarbeiten. Dazu ist es notwendig, dass wir das Know-how und die Dienstleistungen unseres Instituts noch bekannter machen. Wir werden deshalb in den Unternehmen vor Ort unser Dienstleistungsspektrum vorstellen.

Die Kommunikation zum Thema Schlacken hat im zu Ende gehenden Jahr einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit des FEhS-Instituts gebildet. Beispielfhaft ist der Imagefilm des FEhS-Instituts zu nennen, der unter <http://www.fehs.de/fehs-institut> abrufbar ist. Dabei geht es nicht nur um die Darstellung des FEhS-Instituts, sondern auch um die Platzierung des positiven Beitrags der Baustoffe und Düngemittel aus der Stahlindustrie im Hinblick auf die Kernthemen Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz. Der Einsatz dieser Rohstoffe ist das beste Beispiel für gelebte Ressourcenschonung! Wir werden im kommenden Jahr die Arbeit zu diesem Themenbereich auf Basis eines Kommunikationskonzeptes weiter intensivieren.

Der Entwurf für eine bundesweit harmonisierte Regelung zum Einbau der „mineralischen Ersatzbaustoffe“ hat uns auch in diesem Jahr weiter beschäftigt. In einigen Punkten konnten Verbesserungen am vorliegenden 3. Arbeitsentwurf der „Ersatzbaustoffverordnung“ des Bundesumweltministeriums erzielt werden. Das Ministerium hat angekündigt, im Dezember den Referentenentwurf zu diesem Regelwerk vorzulegen, der dann in die Ressortabstimmung mit dem Bundeswirtschafts- und Bundesverkehrsministerium gehen würde. Nach der Notifizierung bei der Europäischen Union könnte dann das parlamentarische Verfahren im Bundestag sowie im Bundesrat beginnen. Unklar ist, ob das Regelwerk in der laufenden Legislaturperiode noch verabschiedet werden wird. Da am vorliegenden Entwurf aus unserer Sicht noch deutlicher Änderungsbedarf besteht, werden wir diesen Prozess weiterhin eng begleiten.

Abschließend möchte ich Sie auf die 9. Europäische Schlackenkonferenz EUROSLAG hinweisen, die vom 11.–13. Oktober 2017 in Metz, Frankreich, stattfinden wird.

Wir möchten uns bei Ihnen für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit im Jahr 2016 bedanken!

Ihren Familien und Ihnen wünschen wir ein frohes und friedvolles Weihnachtsfest sowie einen guten Start in ein gesundes und erfolgreiches neues Jahr 2017!

Thomas Reiche

Inhalt	Seite
Nachruf zum Tode von Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Blunk A. Ehrenberg, Th. Reiche	2
Innovatives Asphaltmischgut mit Stahlwerksschlacke D. Demond, Th. Merkel, T. Mielke, D. C. Lupascu	2
50 Jahre RAL Gütesicherung für Baustoffe aus der Stahlindustrie Th. Merkel	6
Identifizierung von Fluorid-Eintragsquellen in den Elektroofenprozess und Maßnahmen zur Reduzierung der F-Auslaugung von Elektroofenschlacken M. Leson, R. Bialucha, A. Sokol, B. Mieck	8
Definierte Erstarrung und Wärmerückgewinnung von Elektroofenschlacke (DEWEOS) D. Algermissen, P. Böhlke, G. Hugenschütt, U. Raßfeld, T. Zehn	12
Reaktivität von Alt-Hüttensand – ein Praxisversuch A. Ehrenberg	19

Nachruf zum Tode von Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Blunk

Dr.-Ing. A. Ehrenberg, Th. Reiche

Einleitung

Am 28. September 2016 verstarb im Alter von 93 Jahren Herr Professor Dr.-Ing. Günter Blunk, der von Juni 1969 bis September 1988 Geschäftsführer der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (heute FEhS – Institut für Baustoff-Forschung) war. In dieser Zeit vertrat er sehr engagiert die Belange der FEhS-Mitglieder, wenn es um die sachgerechte Nutzung der Eisenhüttenschlacken ging.

Darüber hinaus war Professor Blunk seit 1975 Mitglied des Vorstands des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ), dessen Goldene Ehrennadel er trug, er war Sachverständiger beim Institut für Bautechnik (heute DIBt) und er war in weiteren Organisationen, wie dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein (DBV), dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) und natürlich dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), aktiv. Letzterer verlieh ihm 1990 die Carl-Lueg-Denk Münze und stellte ihn damit in eine Reihe mit Persönlichkeiten wie z. B. Fritz W. Lürmann (1905), der zu den ersten Anwendern von Eisenhüttenschlacken zählt.

Prof. Blunk wurde am 2. April 1923 in Hamburg geboren. Nach Abitur (1942), Kriegsdienst (1942–1945) und Gefangenschaft in der Sowjetunion (1945–1948) begann er 1949 mit dem Bauingenieurstudium an der TH Braunschweig, das er im Hauptfach Straßen- und Stadtbauwesen 1953 abschloss. Zwischen 1953 und 1957 war Prof. Blunk als Assistent im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung tätig, wo er zum Thema „Frostbeständigkeit von dampfgehärteten Mauersteinen aus Kalk,

Flugasche und granulierter Schmelzkamerasche“ mit „gut“ promovierte. Danach wechselte er zur Grün & Bilfinger AG in Mannheim, deren zentrales Baustofflabor er aufbaute. An der Universität Karlsruhe wirkte er seit 1960 als Lehrbeauftragter und wurde 1968 zum Honorarprofessor ernannt. 1969 führte ihn dann der berufliche Weg nach Rheinhausen und er widmete sich hier, am Standort des 1954 eröffneten Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken und des Krupp-Stahlwerks, den Fragen der Verwendung von Eisenhüttenschlacken in Zement und Beton, in Verkehrsbaustoffen oder Düngemitteln.

Herr Prof. Blunk akzentuierte sehr deutlich, kompetent und durchaus temperamentvoll, wenn es z. B. um die Bewertung der technischen Eigenschaften hüttensandhaltiger Zemente und Betone ging. Schon in seiner Zeit bei Grün & Bilfinger provozierte er zu Beginn eines Vortrags vor Herstellern hüttensandhaltiger Zemente mit der Feststellung: „Der billigste Zement ist der geeignetste!“, nur um nachfolgend das Gegenteil herzuleiten und die technischen Vorteile hüttensandhaltiger Zemente zu betonen. Und in einem Beitrag für die Zeitschrift „Straße und Autobahn“, der als Entgegnung auf eine Publikation zum Thema Frost-Tausalz-Widerstand von Beton konzipiert war, stellte er bereits 1979 fest, was auch heute (leider) noch immer wieder in Erinnerung gerufen werden muss: „Der sorgfältige Leser, der in der vorliegenden Veröffentlichung vergeblich nach überzeugenden Fakten sucht, ist vor die Frage gestellt, ob aus einer Sammlung von vereinzelt Tastversuchen, Behauptungen und Vermutungen weitreichende Forderungen nach neuen Vorschriften abgeleitet werden dürfen.“



Denjenigen, die an den seinerzeit in den Gremien teilweise sehr kontrovers geführten Diskussionen teilgenommen haben, sind hitzige Wortdebatten in Erinnerung geblieben. Und so charakterisierte Dr. Hummel, der damalige Vorsitzende des VDZ, Prof. Blunk anlässlich der Verleihung der Goldenen Ehrennadel des VDZ auch als einen „zu keinem Zeitpunkt nur bequemen Partner“, der seine Meinung wie die Interessen der Hersteller von Hüttensand und Hüttenzementen stets mit Festigkeit und Geschick vertreten habe.

Sicherlich hat sich die Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken unter der Geschäftsführung von Prof. Blunk eine hohe Anerkennung erarbeitet und auch nach seinem Eintritt in den Ruhestand blieb Prof. Blunk dem FEhS-Institut verbunden. Sein letzter Besuch fand am 22. April 2015 anlässlich der Einführung seines mittlerweile dritten Nachfolgers statt.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des FEhS-Instituts werden Herrn Prof. Blunk ein ehrendes Andenken bewahren.

Innovatives Asphaltmischgut mit Stahlwerksschlacke

D. Demond M. Sc., Dr.-Ing. Th. Merkel (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)
T. Mielke, Prof. Dr. D. C. Lupascu (Universität Duisburg-Essen)

Einleitung

Die Optimierung von Bau und Erhaltung ausgeführter Asphaltstraßen ist von beträchtlicher volkswirtschaftlicher Bedeutung, da in Deutschland der überwiegende

Teil der Straßen mit Asphaltdecken ausgeführt wird. Für den Bau von Asphalt-schichten macht man sich das thermoviskose Verhalten von Bitumen zunutze. Während es bei tieferen Temperaturen hart und spröde ist, wird es bei steigender

Erwärmung zunächst zäh- und dann dünnflüssig. Für den Bau von Asphaltstraßen wird Asphaltmischgut heiß angeliefert, um die aus Gestein und (zäh-)flüssigem Bitumen bestehenden Asphalt-schichten einbauen zu können. Nach der Abkühlung

bildet das Bindemittel gemeinsam mit dem Gestein eine feste Schicht. Grundsätzlich ist das thermoviskose Verhalten von Bitumen jedoch nicht nur auf den Einbau beschränkt, da an heißen Sommertagen verbaute Asphaltoberflächen sehr hohe Temperaturen aufweisen können.

Im Gegensatz zu den meisten anderen industriellen Nebenprodukten oder RC-Baustoffen können Stahlwerksschlacken (SWS) bei entsprechender Erzeugung und Aufbereitung auch als Gesteinskörnung für Asphalte eingesetzt werden. Das Verhalten von Baustoffgemischen wurde u. a. im Rahmen von Temperaturmessungen in Asphalt-schichten, die mit SWS bzw. mit natürlichen Gesteinskörnungen gebaut wurden, untersucht [1]. Hier wurde festgestellt, dass die verschiedenen Ausgangsmaterialien ein unterschiedliches Aufwärm- und Abkühlverhalten zeigten. Im Rahmen der Forderungen nach Energieeinsparung, CO₂-Reduzierung und Ressourceneffizienz [2, 3] liefern diese Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass in diesem Bereich auch die wärmetechnischen Kenngrößen von Baustoffen ihren Beitrag leisten könnten.

Problemstellung und Zielsetzung

Das thermische Verhalten von Materialien wie auch Baustoffgemischen wird physikalisch mit den Kenngrößen Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ und Temperaturleitfähigkeit a beschrieben. Zwischen diesen drei Größen besteht ein linearer Zusammenhang, in den auch die Rohdichte eines Baustoffes eingeht:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Im Vergleich zu Natursteinen weisen industrielle Baustoffe wie EOS (Elektrofenschlacke) und LDS (Linz-Donawitz-Schlacke) eine höhere Rohdichte auf. Im Zusammenhang mit den o. g. Messungen [1] lässt sich vermuten, dass die Temperaturleitfähigkeiten von SWS niedriger ausfallen und das Aufwärm- und Abkühlverhalten von Asphaltschichten, die mit SWS als Gesteinskörnung hergestellt wurden, günstiger verläuft.

Darauf aufbauend war das Ziel des Forschungsvorhabens, nachzuweisen, dass Gesteinskörnungen aus SWS neben ihren guten technischen zusätzlich auch vorteilhafte thermische Eigenschaften aufweisen, die direkten Einfluss auf das Aufwärm- und

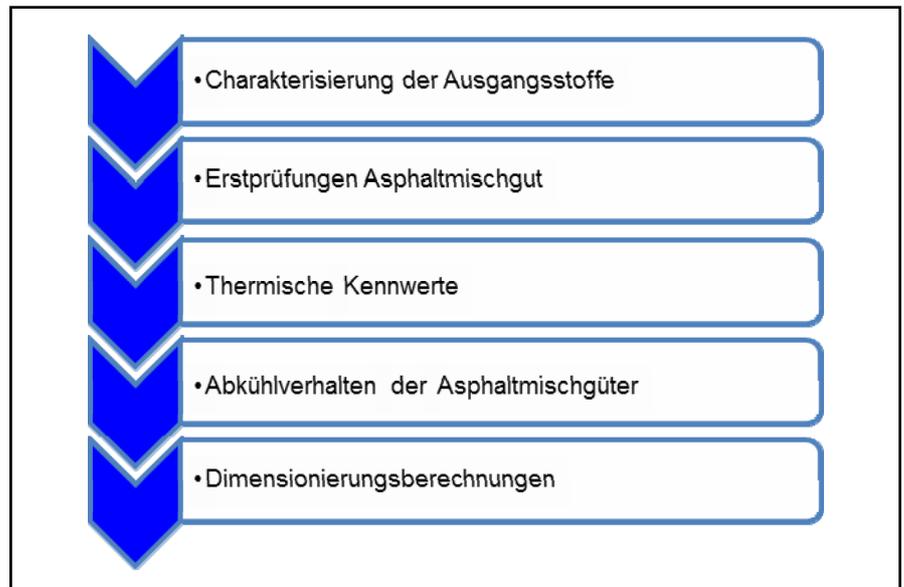


Bild 1: Projektverlaufsschema zur Untersuchung der thermischen Kennwerte von industriellen und Natursteinkörnungen

Abkühlverhalten von Asphaltschichten haben. Die daraus folgenden zu verifizierenden Vorteile würden z. B. bei einer besseren Wärmestandfestigkeit, einer verlängerten Lebensdauer bzw. der Möglichkeit zur Vergrößerung der Erhaltungintervalle oder einer Schichtdickenreduzierung liegen. Letztendlich würden all diese Aspekte zu einer Energieeinsparung, einer CO₂-Reduzierung und zu einem geringeren Baustoffverbrauch bzw. einer Ressourcenschonung führen.

Baustoffgemische und Untersuchungsprogramm

Das an den Baustoffgemischen innerhalb des Forschungsprojektes hauptsächlich durchgeführte Forschungsprogramm zur Untersuchung der thermischen Kenngrößen von industriellen und Natursteinkörnungen vermittelt **Bild 1**.

Als Ausgangsmaterial wurden neun Gesteinskörnungen (sechs SWS, drei Natursteine), ein Kalksteinfüller und ein Bitumen (Olexobit 45 [25/55-55A]) verwendet. Aus den Baustoffgemischen wurden Einzelfraktionen (0/2, 2/5, 5/8 und 8/11 mm) gesiebt, um im Projektverlauf die Einzelkomponenten zu bedarfsgerechten Sieblinien zusammensetzen zu können.

Forschungsergebnisse

Nach der Eignungscharakterisierung, die die Eignung der Gesteinskörnungen nach TL Gestein-StB [4] bestätigte, wurden Erstprüfungen an Varianten eines AC 11 DS-Mischgutes nach TL Asphalt-StB [5] durchgeführt. Die ermittelten Mischgutzusam-

mensetzungen wurden als Basis für weitere Untersuchungen berücksichtigt.

Darauf aufbauend wurden von den neun Asphaltmischgütern Probenplatten hergestellt und daran deren Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit mittels der Transient-Hot-Bridge-Methode bestimmt (**Bild 2**). Hierbei wird über einen streifenförmigen elektrischen Leiter, der zwischen zwei Probenhälften liegt, ein konstanter Heizstrom abgegeben und über den zeitlichen Temperaturanstieg des Sensors, der durch das jeweilige Probenmaterial beeinflusst wird, die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigten, dass sich die wärmetechnischen Kenngrößen von industriellen Gesteinskörnungen deutlich von Natursteinkörnungen unterscheiden (**Tabelle 1**).

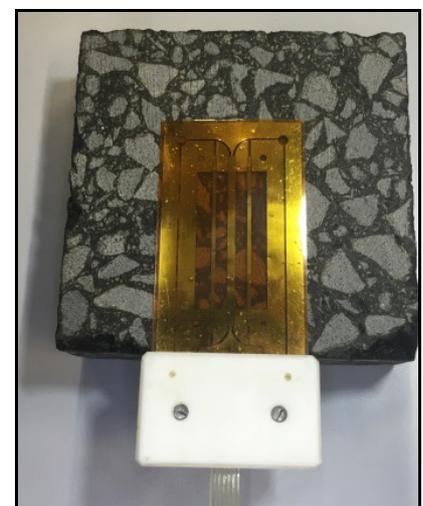


Bild 2: Sensor des Transient-Hot-Bridge-Verfahrens

Gesteinsart	Mischgutrohddichte ρ [g/cm ³]	Wärmekapazität c [J/g·K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Temperaturleitfähigkeit a [mm ² /s]
EOS I	3,069	0,448	0,909	0,662
EOS II	3,306	0,462	1,118	0,732
EOS III	3,373	0,516	1,119	0,643
LDS I	3,051	0,472	1,019	0,707
LDS II	3,043	0,489	1,112	0,747
LDS III	2,781	0,562	1,110	0,710
Basalt	2,711	0,501	1,251	0,921
Diabas	2,554	0,569	1,427	0,982
Grauwacke	2,472	0,530	1,938	1,479

Tabelle 1: Ergebnisse der messtechnischen Erfassung der Wärmekennwerte

Die labortechnische Ermittlung der Wärmekennwerte zeigte, dass die Temperaturleitfähigkeit aller Asphalte, die mit SWS hergestellt wurden, niedriger ist als die der Asphalte mit natürlichen Gesteinskörnungen, wobei sich auch aus den Messergebnissen tendenziell ein linearer Zusammenhang zwischen Temperaturleitfähigkeit und Mischgutrohddichte erkennen lässt. Aus diesem Ergebnis konnte vermutet werden, dass die Geschwindigkeit der Temperaturveränderungen von einer Systemoberkante in den Asphalt hinein bei Asphalten mit SWS langsamer verläuft. Bestätigt wird dies beispielsweise durch experimentelle Untersuchungen von Chakar [6]. Theoretisch nachvollziehbar wird das Verhalten mit der Ermittlung der Temperaturgradienten mit dem Differenzenverfahren nach Krebs und Böllinger [7]. Hierbei kann durch Zerlegung der Zeit t und der Tiefe x in kleine Intervalle sowie bei bekannter Temperaturleitfähigkeit eines Materials der Temperaturverlauf zu einem beliebigen Zeitpunkt $k+1$ und einem beliebigen Punkt in der Tiefe n berechnet werden:

$$T_{n,k+1} = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k}$$

Um das Abkühlverhalten der untersuchten Asphaltmischgüter bestimmen zu können, wurden pro Asphaltmischgut drei Marshallprüfkörper (MPK) hergestellt, in diese Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Tiefe von 5 cm mittig gebohrt und darin eine Metalltülle eingedrückt, in die wiederum ein Temperaturfühler eingesetzt wurde. Damit die Messungen möglichst realistisch im Sinne einer eingebauten Asphaltmischschicht erfolgen konnten, wurden die MPK in den Verdichtungsgefäßen belassen (Bild 4). Folgend wurden die Probenkörper auf ca. 175 °C

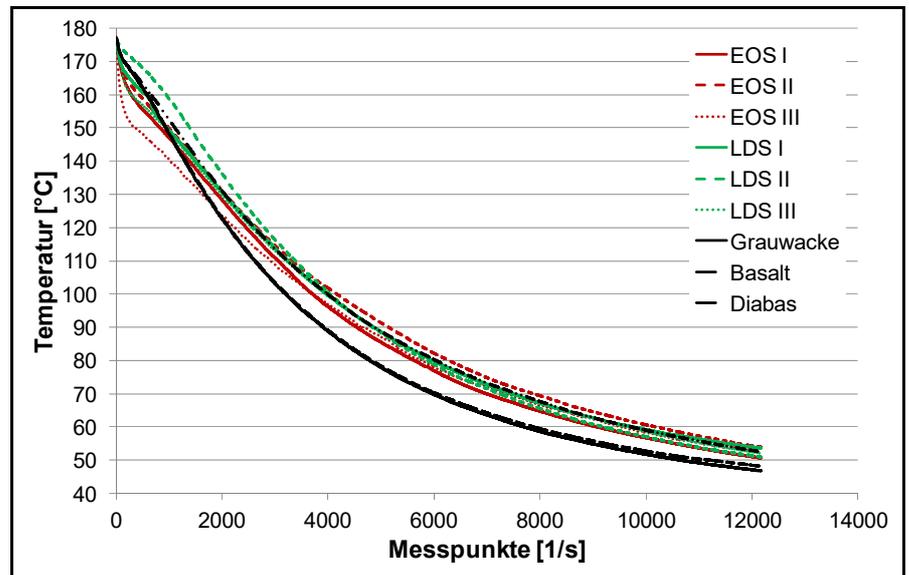


Bild 3: Darstellung der gemessenen Temperaturabkühlkurven

aufgeheizt und deren Abkühlverhalten messtechnisch mit einer Abtastungsrate von 1 Hz aufgezeichnet. Auf diese Weise konnten kontinuierliche Abkühlkurven erfasst und miteinander verglichen werden. In Bild 3 sind die aus drei Einzelkurven gemittelten Messkurven pro Material graphisch dargestellt, wobei pro Materialart (EOS, LDS, Naturstein) jeweils eine Farbgebung gewählt wurde. Auch aus diesen Messungen konnte belegt werden, dass die Abkühlkurven der Mischgutvarianten mit Gesteinskörnungen aus SWS im Vergleich zu Grauwacke und Diabas durchweg ein anderes thermisches Abkühlverhalten aufweisen. Prinzipiell lässt sich zwischen den Asphaltkörpern, die mit SWS bzw. Naturstein hergestellt wurden, ein Temperaturunterschied aus den Abkühlkurven von ca. 10 °C–1.510 °C erkennen. Ausnahme bildete die Basaltkörnung, die vom thermischen Abkühlverhalten vergleichbar mit den Gesteinskörnungen aus SWS war, was



Bild 4: Messaufbau zum Erfassen der Temperaturabkühlkurven

mit der Rohddichte des Basaltes erklärt werden kann.

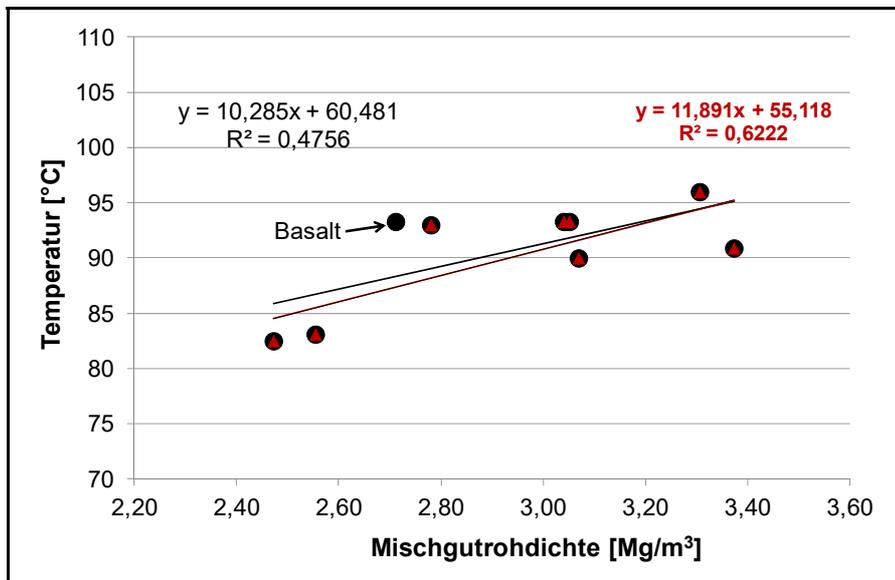


Bild 5: Erzieltes Relationsergebnis aus gemessener Temperatur und Rohdichte

Temperaturleitfähigkeit [mm ² /s]	Ermüdung [%]	Asphaltbezeichnung
0,643	99–100	EOS III
0,662	100	EOS I
0,707	100	LDS I
0,710	100	LDS III
0,732	100	EOS II
0,747	100	LDS II
0,921	101	Basalt
0,982	101	Diabas
1,479	102–103	Grauwacke

Tabelle 2: Vergleich Temperaturleitfähigkeit und Asphalt ermüdung unter Verwendung konstanter E-Module

Zur weiteren Analyse der Daten wurden alle Materialtemperaturen (Referenztemperatur = 90 °C) zu einem gleichen Messzeitpunkt abgegriffen und gegen die Mischgutröhdichten der Gesteinskörnungen dargestellt (**Bild 5**). Wird der Datenpunkt des Basaltes vernachlässigt, zeigt sich ein relativ guter linearer Zusammenhang zwischen Mischgutröhdichte und den Materialtemperaturen zu einem fixen Zeitpunkt.

Welchen Effekt die vorteilhaften wärmetechnischen Eigenschaften von SWS auf die Dimensionierung des Schichtaufbaus von Asphalt Schichten haben könnten, wurde anhand von Dimensionierungsberechnungen mit der Software PaDesTo (Pavement Design Tool) überprüft. Als Haupteingangsparameter wurde ein Nutzungszeitraum von 30 Jahren und eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke von 25.000 Kfz/d angesetzt. Beschränkte man die veränderbaren Faktoren bei der Schichtdickenberechnung auf die Wärmekennwerte und

verwendete für alle Asphaltmischgutsorten die gleichen E-Module, konnte ein Zusammenhang zwischen den Wärmekennwerten und dem Ermüdungsindex festgestellt werden (**Tabelle 2**). Je geringer die Temperaturleitfähigkeit ist, desto geringer ist der Wert des Ermüdungsindex im betrachteten Zeitraum.

Da bei den untersuchten Asphaltmischgutsorten alle Asphalte mit SWS eine geringere Temperaturleitfähigkeit haben als die Asphalte mit natürlicher Gesteinskörnung, kann zusätzlich festgestellt werden, dass diese Asphalte einen geringeren Ermüdungsindex aufweisen. Wie die Dimensionierungsberechnungen zeigen, kann durch eine geringere Temperaturleitfähigkeit eines Baustoffgemisches eine Vergrößerung der Erhaltungsintervalle erzielt werden. Weitere Berechnungen zeigten, dass dieser Effekt genutzt werden könnte, um eine Schichtdickenreduzierung um bis zu 1 cm in der Tragschicht zu erzielen.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden die thermischen Kenngrößen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von SWS und natürlichen Gesteinskörnungen, die für den Bau von Asphalt Schichten verwendet werden, untersucht. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die industriell hergestellten Gesteinskörnungen abweichende thermische Eigenschaften aufwiesen, die sich z. B. in einer geringeren Temperaturleitfähigkeit äußern. Mit den erzielten Laborergebnissen wurden Dimensionierungsberechnungen durchgeführt, die aufzeigen, dass die vorteilhaften thermischen Eigenschaften von SWS genutzt werden könnten, um Asphalt Schichtdicken zu reduzieren oder die Erhaltungsintervalle zu verlängern. Daraus könnten sich erhebliche wirtschaftliche Vorteile ergeben, aber auch die Ressourceneffizienz vorangetrieben und Einsparungspotenziale bzgl. der CO₂-Emission ausgeschöpft werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die wärmetechnischen Eigenschaften von SWS neben deren schon bekannten guten technischen Eigenschaften weitere vorteilhafte Aspekte liefern, die bisher wenig untersucht und berücksichtigt wurden.

Fazit

Mit Hilfe des Forschungsprojektes konnte das vorteilhafte Potenzial zur Nutzung von energie- und emissionsarmen industriellen Nebenprodukten aus SWS im Asphaltbereich verdeutlicht und das Forschungsziel erreicht werden. Wärmetechnische Kenngrößen wie Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit von SWS, die in Asphaltmischgut verwendet werden, haben einen bisher wenig beachteten positiven Effekt auf deren Abkühlverhalten. Die sich daraus ergebenden Vorteile liegen z. B. bei einer Schichtdickenreduzierung von Asphalt Schichten oder der Vergrößerung von Erhaltungsintervallen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die positiven Eigenschaften von SWS neben deren schon bekannten vorteilhaften technischen Eigenschaften geradezu prädestiniert sind, um auch auf dem Sektor der Ressourceneffizienz und -schonung ihren Beitrag zu leisten. Entsprechend sollten die hier vorgestellten Laborergebnisse und deren Schlussfolgerungen anhand von realen Baumaßnahmen oder Demonstrationsflächen mit einer durchgehenden Messdatenerfassung verifiziert werden.

Danksagung

Das hier vorgestellte IGF-Vorhaben Nr. 18237 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Merkel, Th.; Discher, H.-P.; Freund, H.-J.; Großmann, A.; Motz, H.: Praktische Erfahrungen mit Elektroofenschlacken im Straßenbau, Straße und Autobahn 51 (2000) 12, S. 760–765

[2] Die Bundesregierung (Hrsg.): Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie – Für ein nachhaltiges Deutschland, Berlin, 2008

[3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, März 2016

[4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB, Ausgabe 2004/Fassung 2007

[5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen – TL Asphalt-StB, Ausgabe 2007

[6] Chakar, L.: Optimierung des Verformungswiderstandes von Splittmastixasphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke. Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen, Band 58, Karlsruhe, 2009

[7] Krebs, H. G.; Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Heft 347, Bonn, 1981

50 Jahre RAL Gütesicherung für Baustoffe aus der Stahlindustrie

Dr.-Ing. Th. Merkel

Die zentrale Lage Deutschlands in Europa führt seit vielen Jahren zu stetig steigendem Verkehrsaufkommen. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Bundesautobahnen, die in besonderem Maße den Transitverkehr aufzunehmen haben. Aber auch Landstraßen und Ortsdurchfahrten werden zunehmend stärker belastet. Eine bemessungsrelevante Verlagerung des Verkehrsvolumens auf die Schiene scheint nicht möglich zu sein, während die zulässigen Achslasten der Lkw sowie die zulässigen Gesamtgewichte in Zukunft eher noch ansteigen. In Verbindung mit dem steigenden Verkehrsaufkommen wird daher in Zukunft die Beanspruchung der gesamten Straßenkonstruktionen nochmals erheblich zunehmen.

Aus diesem Grund ist es wichtiger denn je, standfeste und verformungsarme Straßen zu bauen, die hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens die immer weiter erhöhten Belastungen ohne Schäden aufnehmen können. Voraussetzung hierfür ist, dass im Straßenbau für Erdbauwerke, Tragschichten und Fahrbahndecken hochwertige Baustoffe eingesetzt werden. Die Qualitätssicherung dieser Baustoffe für den Straßenbau soll sicherstellen, dass die eingesetzten Stoffe den Anforderungen des jeweiligen Anwendungsbereichs genügen, damit sie zu optimalen Eigen-

schaften des fertiggestellten Bauwerks führen.

Zu diesem Zweck erfolgen seit Jahren regelmäßige Prüfungen im Rahmen einer zertifizierten werkseigenen Produktionskontrolle bzw. darüber hinaus in einem System von Eignungsnachweis, Eigen- und Fremdüberwachung. Diese Systeme sind seit vielen Jahren etabliert, so dass die Auslieferung von Gesteinskörnungen und Baustoffgemischen ohne definierte regelmäßige Prüfung kaum denkbar ist. Tatsächlich gibt es in Deutschland erste „Richtlinien für Hochofenschlacke als Straßenbaustoff“ seit 1927 [1], seit 1941 sogar eine eigene Norm [2]. Diese und nachfolgend erschiene Vorschriften enthielten zwar Anforderungen an Straßenbaustoffe aus Hochofenschlacke, einen Hinweis auf eine regelmäßige Überwachung sucht man jedoch vergebens. Vergleichbares gilt auch für andere Gesteinsbaustoffe.

Erst in den 1960er Jahren wurden durch die Baustoffhersteller Güteüberwachungssysteme unter dem Dach von RAL für verschiedene künstliche und natürliche Mineralstoffe (z. B. für Hochofenstückschlacke [3] und Kalkstein [4]) eingeführt, welche auf der Basis eines Eignungsnachweises zu Beginn des Güteschutzes und

einer regelmäßigen Eigen- und Fremdüberwachung arbeiten. Die Gründung der Gütegemeinschaft Hochofenschlacken e. V. erfolgte im Jahr 1966 – vor inzwischen 50 Jahren. Die Eigenüberwachung soll dem Werk laufend einen Überblick über die hergestellte Qualität liefern, durch die Fremdüberwachung wird die Durchführung der Eigenüberwachung kontrolliert, Vergleichsprüfungen vorgenommen und zusätzliche Prüfungen durchgeführt.

Diese Systeme waren dann auch Grundlage der durch das Bundesverkehrsministerium im Jahr 1970 eingeführten ersten allgemeinen „Richtlinien für die Güteüberwachung von Straßenbaustoffen“ (RGS) [5]. Bereits mit Einführung der RGS wurden nicht nur die natürlichen Gesteine erfasst, sondern auch „künstliche Gesteine z. B. Hochofenschlacke“ ausdrücklich einbezogen.

Inzwischen wurde die 1966 begründete RAL Gütesicherung auch auf Stahlwerksschlacken ausgedehnt. Während Hochofenstückschlacke und Hüttensand seit langem im Bauwesen eingesetzt werden [6], herrschten bei Stahlwerksschlacken lange Zeit andere Nutzungsgebiete vor. Dies waren in erster Linie die Nutzung als Kalk- und Eisenträger im metallurgischen Kreislauf und die Verwendung in der Dünge-

mittelindustrie. Seit langem werden auch Düngemittel aus Eisenhüttenschlacken hergestellt, die sogar den strengen Anforderungen des ökologischen Landbaus genügen.

Etwa seit 1970 aber wird darüber hinaus vermehrt nach weiteren Einsatzmöglichkeiten für Stahlwerksschlacken gesucht. Aufgrund der guten Erfahrungen mit den Hochofenstückschlacken lag es nahe, eine Nutzung im Verkehrswegebau anzustreben, zunächst auch einfach, um die bestehenden Vertriebswege nutzen zu können. Zur Vorbereitung wurden Laborkennwerte ermittelt und anschließend das Verhalten in der Baupraxis untersucht. Zum Teil wurden in diesem Zusammenhang auch Prüfverfahren neu entwickelt. Nachdem durch die durchgeführten Untersuchungen ausreichende Erfahrungen vorlagen, erfolgte die Ausweitung der Gütesicherung auf die Stahlwerksschlacke – zunächst in der Gütegemeinschaft Stahlwerksschlacken e.V., seit 1998 gemeinsam mit der Hochofenschlacke in der Gütegemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V. Im Zusammenhang mit der Ausweitung der Gütesicherung auf die Stahlwerksschlacken erfolgte auch die Einbeziehung des Wasserbaus, da Stahlwerksschlacken wegen ihrer hohen Dichte erfolgreich als Wasserbausteine genutzt werden.

Hinter der Gütegemeinschaft Eisenhüttenschlacken steht die Institution RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., ein gemeinnütziger und interessenneutraler Spitzenverband, der unter definierten Voraussetzungen Gütezeichen an Produkthersteller aus unterschiedlichen Bereichen vergibt. Bevor eine Gütegemeinschaft durch RAL anerkannt wird, werden für die zu überwachenden Produkte Güte- und Prüfbestimmungen erarbeitet. Durch die Einbeziehung der betreffenden Fach- und Verkehrskreise entsprechend den Vorgaben von RAL (z. B. die Bundesministerien für Verkehr, für Wirtschaft und für Umwelt, das DIBt und die FGSV, Prüfstellen- und Verbraucherschutzverbände etc.) wird sichergestellt, dass die hohe Qualität der zur Auslieferung kommenden Produkte nach objektiv nachprüfbar Kriterien gesichert wird.

Wichtiger Bestandteil der RAL Gütesicherung ist neben den Güte- und Prüfbestimmungen die Kennzeichnung durch ein all-

gemein bekanntes und anerkanntes Zeichen, das Gütezeichen. Das Gütezeichen ist als Kollektivmarke beim Deutschen Patent- und Markenamt eingetragen.



Produkte aus Eisenhüttenschlacken, die den Güte- und Prüfbestimmungen entsprechen, dürfen mit dem Gütezeichen gekennzeichnet werden. Durch die Verleihung dieses Gütezeichens wird dokumentiert, dass das spezifische Produkt gegenüber allgemeinen Normen und sonstigen Regelwerken erweiterte Anforderungen erfüllt.

Zusätzliche Bedeutung bekam das System der RAL Gütegemeinschaften durch die Umstellung der Qualitätssicherungsverfahren im Zuge der Umsetzung der europäischen Normen für Gesteinskörnungen in den Jahren 2003/2004. Die europäischen Baustoffnormen weisen den Herstellern von Gesteinskörnungen erheblich mehr Eigenverantwortung zu und setzen auf ein Konformitätsnachweisverfahren, welches eine zu zertifizierende werkseigene Produktionskontrolle beinhaltet, auf Produktprüfungen durch externe Stellen aber verzichtet. Die Mitglieder der Gütegemeinschaft lassen jedoch weiterhin zusätzliche Produktkontrollen durch neutrale anerkannte Prüfstellen durchführen. Sie betrachten dies als wichtigen Baustein der Qualitätssicherung. Von diesen zusätzlichen Qualitätskontrollen profitieren ausschreibende Stellen und Bau-

firmen gleichermaßen. Beispielsweise werden Baustoffeingangsprüfungen, wie sie bei der Lieferung von Gesteinskörnungen für Asphalte vorgeschrieben sind, durch dieses zusätzliche Überwachungssystem ersetzt.

Ziel der Gütegemeinschaft Eisenhüttenschlacken ist es, die Qualität der aus Eisenhüttenschlacke gewonnenen Gesteinskörnungen und Baustoffgemische für den Straßen-, Wege-, Erd- und Wasserbau dauerhaft zu sichern. Wie schon seit 50 Jahren wird auch in Zukunft durch das Gütezeichen „Eisenhüttenschlacken“ sichergestellt, dass qualitätsgeprüfte Gesteinskörnungen den Bau qualitativ hochwertiger Verkehrswege ermöglichen, welche die immer weiter erhöhten Belastungen durch den zunehmenden Verkehr problemlos aufnehmen.

Literatur

- [1] Kommission zur Untersuchung der Verwendbarkeit von Hochofenschlacke (Hrsg.): Richtlinien für die Herstellung und Lieferung von Hochofenschlacke als Straßenbaustoff, Ausgabe 1927
- [2] DIN 4301: Vorschriften über die Beschaffenheit von Hochofenschlacke als Straßenbaustoff, Ausgabe 03/1941
- [3] RAL Ausschuß für Lieferbedingungen und Gütesicherung (Hrsg.): Güteschutzverfahren für Hochofenschlacke, Ausgabe 04/1967
- [4] Bundesverband der deutschen Kalkindustrie (Hrsg.): 25 Jahre Güteschutz RAL – Kalkstein für den Straßenbau, Köln, 1989
- [5] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (Hrsg.): Richtlinien für die Güteüberwachung von Straßenbaustoffen, Teil I: Straßenbausteine (RGS-I), Ausgabe 1970
- [6] N. N.: Ueber die Verwerthung der Hohofenschlacken zu baulichen und anderen Zwecken. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 12 (1868) 1, Sp. 31–40

Identifizierung von Fluorid-Eintragsquellen in den Elektroofenprozess und Maßnahmen zur Reduzierung der F-Auslaugung von Elektroofenschlacken

Dipl.-Geogr. M. Leson, Dr.-Ing. R. Bialucha, Dr. rer. nat. A. Sokol (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)
Dr.-Ing. B. Mieck (Eisen- u. Stein-Gesellschaft mbH Horn & Co.)

Einleitung

Bei der Stahlherstellung im Elektroofen wird Stahlschrott gemeinsam mit anderen Eisenträgern mithilfe von leistungsstarken elektrischen Lichtbögen eingeschmolzen. Neben dem Schrott werden Schlackenbildner und Kohle zugesetzt. Im Laufe des Einschmelzens bilden sich aus den Reaktionsprodukten der Rohstahl und eine schmelzflüssige Schlacke. Alle Einsatzstoffe werden entsprechend der gewünschten Stahlgüte in genau abgestimmten Mengen zugesetzt, um sowohl den Anforderungen an den Stahl als auch an die Schlacke gerecht zu werden.

Nach dem Abstich der flüssigen Elektroofenschlacke (EOS) wird diese üblicherweise in Beete gegossen und erstarrt dort an Luft (häufig unter Verwendung von Kühlwasser), wobei ein dunkelgraues, dichtes Schmelzgestein („schwarze Schlacke“) entsteht. Neben den technischen Eigenschaften hängt die Verwendbarkeit dieser Schlacke auch von der wasserwirtschaftlichen Verträglichkeit ab. Hierunter wird in erster Linie die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile und damit ihr möglicher Einfluss auf Boden und Oberflächen- bzw. Grundwasser verstanden. Untersuchungen an der EOS eines im Rahmen eines Forschungsprojekts genauer betrachteten Stahlwerks zeigten, dass diese teilweise Fluorid in relevanten Mengen auslaugte, obwohl in der gesamten Produktionslinie keine fluorhaltigen Zusätze, wie z. B. Flussspat, bewusst eingesetzt wurden. Erhöhte Fluoridkonzentrationen wurden vor allem bei Verwendung der neuen Auslaugverfahren mit einem L/S-Verhältnis von 2 : 1 festgestellt, die Basis für die geplante Ersatzbaustoffverordnung (EBV) [1] sind. Vor dem Hintergrund verschärfter Anforderungswerte gemäß EBV ist eine Herabstufung der bisher guten Umweltverträglichkeit der EOS zu befürchten, so dass ihre Nutzung stark eingeschränkt sowie eine teilweise Deponierung mit entsprechenden Kosten und negativen Folgen für die Umwelt notwendig werden könnte.

Im Fokus eines von der DBU geförderten Forschungsprojekts [1] stand daher in erster

Linie die Suche nach der bzw. den Quellen, über die Fluorid in den Elektroofenprozess eingebracht wird. Als eine mögliche Ursache wurde zunächst vermutet, dass Fluorid über Schlackenbildner in den Ofenprozess eingetragen werden kann. Als Schlackenbildner werden neben CaO-reichen Materialien wie Kalkstein oder Branntkalk auch gebrannter Dolomit und/oder Kalk-Magnesium- und Dolomitgemische sowie Schlackenbildner aus aufbereiteten Feuerfestmaterialien eingesetzt. Einerseits erfüllt die Schlackenbildung durch CaO die metallurgische Funktion der Entphosphorung, andererseits dienen CaO und MgO der Schaum- und Schlackenbildung und somit auch dem Schutz vor Wärmestrahlung der Lichtbögen sowie vor dem chemischen Angriff auf die feuerfeste Ausmauerung. Die Verwendung regenerativer Materialien, die auf feuerfesten Reststoffen basieren, anstelle natürlicher Einsatzstoffe schon die Umwelt und natürliche Ressourcen.

Da sich bei der Stahlerzeugung eine zu hohe Viskosität ungünstig auf die Reaktivität der Schlacke auswirkt, wird in allen Verfahrensschritten ein definierter Flüssigkeitsgrad der Schlacke benötigt. Dieser wird durch Zugabe von Flussmittel eingestellt. Aufgrund verschiedener Nachteile wird heutzutage beim Einschmelzvorgang im Elektroofen kaum noch Flussspat als Flussmittel verwendet. Entgegen der Verfahrensweise des hier betrachteten Stahlwerks kann allerdings in vielen Werken in der Sekundärmetallurgie (Nachbehandlung von Rohstahl) auf den Einsatz von Flussspat derzeit noch nicht verzichtet werden. Fluorid könnte so über die Feuerfestmassen der Aggregate, die mit Flussspat-haltigen Schmelzen in Kontakt gekommen sind, in feuerfeste Reststoffe gelangen.

Die wesentlichen Ziele des Forschungsvorhabens waren somit die Suche nach Fluorideintragsquellen und eventuell deren Eliminierung, um die F-Auslaugung von EOS positiv beeinflussen und somit die umweltgerechte Verwendung von Elektroofenschlacken weiterhin erhalten zu können.

Erarbeitung eines geeigneten Analyseverfahrens für Fluorid

Da Fluorid bereits in relevanten Konzentrationen auslaugen kann, wenn die Feststoffgehalte im Bereich der Bestimmungsgrenze der bisher verwendeten Analyseverfahren (200 bzw. 400 mg/kg) liegen, wurde von der Firma HuK Umweltlabor GmbH ein für die Produktionssteuerung geeignetes Analyseverfahren mit ausreichender Genauigkeit entwickelt. Als Basis für diese Entwicklung wurde ein etabliertes Verfahren genutzt, mit dem Halogengehalte organischer bzw. leicht verbrennbarer Materialien durch Verbrennung und anschließende ionenchromatographische Messung bestimmt werden können. Die Optimierung erfolgte an einem Combustion-Ionenchromatographen, der eine automatisierte Variante des pyrohydrolytischen Aufschlusses mit der Bestimmungsmethode Ionenchromatographie kombiniert. Mit dem neuen Verfahren können nun Fluoridgehalte von 10–5.000 mg/kg Fluorid zuverlässig bestimmt werden. Das Verfahren wurde für alle im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen angewandt.

Untersuchung der Einsatzstoffe im Elektroofenprozess auf Fluorid-Eintrag

Zunächst wurden alle potenziellen Fluoridquellen bei der Erzeugung des Rohstahls und der EOS im Elektrolichtbogenofen des hier untersuchten Stahlwerks ermittelt und bilanziert. Dazu wurden vom FEhS-Institut alle verwendeten Einsatzstoffe (Schlackenbildner, Regenerate, Konditionierungs- und Hilfsstoffe, Feuerfestmaterialien, Recyclingmaterialien) ermittelt und chemisch auf Feststoffgehalte untersucht. Eine Untersuchung der stark variierenden Schrottsorten konnte aufgrund der Heterogenität nicht durchgeführt werden. Anhand dieser Ergebnisse wurden Bilanzen aufgestellt, die Aufschluss über die Fluorideinträge geben.

Eisenträger und Schlackenbildner werden über Schrottkörbe in zwei Portionen in den Elektroofen chargiert. Zu jeder Stahlgüte gibt es ein Schrottmenü, in dem die Menge und Art der einzelnen Schrottsorten sowie die Reihenfolge der Beladungen mit den

einzelnen Sorten festgelegt ist. Zu den Eisenträgern zählen u. a. Bären aus der Roheisenentschwefelung von integrierten Hütten (RE-Bären), die im Durchschnitt ca. 40 % bis 60 % Schlackenanhaftungen beinhalten, wobei die Einsatzmenge variieren kann. Zunder gelangt in den Elektroofen durch Anhaftungen am internen Rücklaufschrott. Er wurde daher beprobt und hinsichtlich Fluorid untersucht; eine genaue Angabe der Einsatzmenge ist jedoch nicht möglich. Der Branntkalk wird zur Bildung einer reaktionsfähigen Schlacke eingesetzt. Daneben wird Dolo-Regenerat, ein auf recycelten Feuerfestreststoffen basierender Schlackenbildner, als MgO-Träger hinzugefügt, um den Verschleiß des feuerfesten Mauerwerkes durch den chemischen Angriff der Schlacke zu reduzieren. Durch Verschleiß der feuerfesten Zustellung geht ein Teil des feuerfesten Materials in die Schlacke über. Schlackenbildner A wird gelegentlich eingesetzt. Durch Kontakt der ablaufenden Schlacke mit der Vorwärmermasse wird die abgeführte Schlacke beeinflusst. Als Kohlenstoffträger und Energielieferant wird zu Beginn des Chargierens gemeinsam mit dem Stahlschrott Satzkohle eingesetzt. Durch Einblasen von Feinkohle wird eine Schaumslagge gebildet. Filterstäube, die bei der Stahlproduktion entstehen, werden im Sinne der Kreislaufwirtschaft teilweise in den E-Ofen eingeblasen. In [Bild 1](#) sind die Feststoffgehalte der untersuchten Einsatzstoffe graphisch dargestellt, wobei die Mittelwerte aus drei einzelnen Probenahmeterminen eingetragen wurden (Ausnahme: Vorwärmermasse, Spritzmasse, Feuerfeststeine sind Einzelmesswerte). Zu erkennen ist, dass der Schlackenbildner A die höchsten Fluoridgehalte aufweist, gefolgt vom Filterstaub und den Schlackenanhaftungen an Roheisenentschwefelungsbären. Die durchschnittlichen Fluoridgehalte des Schrotts sind nicht bekannt.

Um jedoch den tatsächlichen Eintrag bzw. Einfluss der einzelnen Einsatzstoffe auf die Gesamtzusammensetzung zu ermitteln, müssen die F-Gehalte in Relation zu den Einsatzmengen betrachtet werden. Dem Schrott kommt hier die größte Bedeutung zu, da er den mit Abstand größten Anteil (ca. 90 %) einer Charge ausmacht. Wie bereits erwähnt, war eine Untersuchung des Schrotts im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Daher sind in [Bild 2](#) nur die prozentualen Anteile der aufgeführten Einsatzstoffe (in Summe ca. 10 %) ohne Schrott dargestellt. Da der Anteil von RE-Bären variiert, wurde für die Berechnung ein geschätzter mittlerer Wert verwendet und

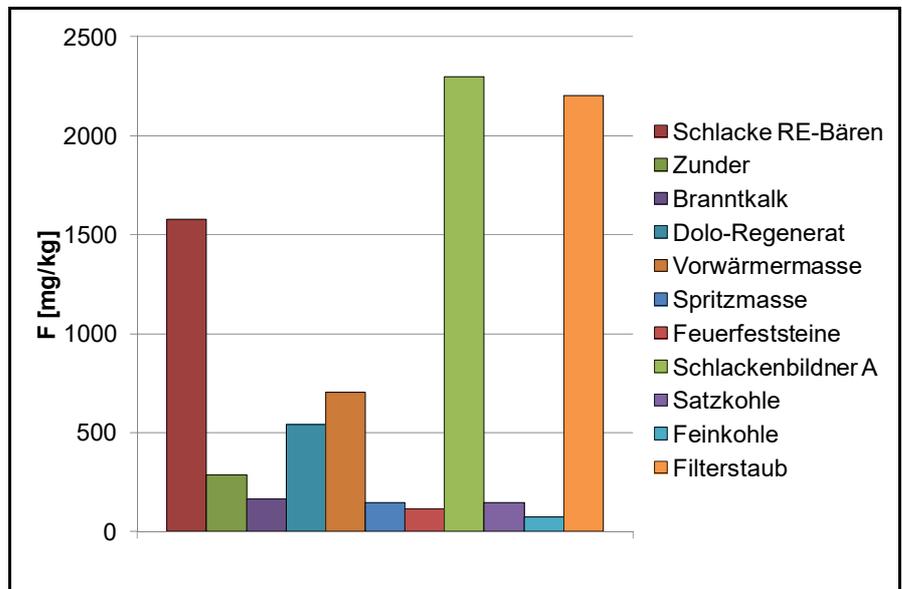


Bild 1: Fluoridgehalte (mg/kg) der Einsatzstoffe (ohne Schrott) im Elektrolichtbogenofen des am Projekt beteiligten Elektrostahlwerks

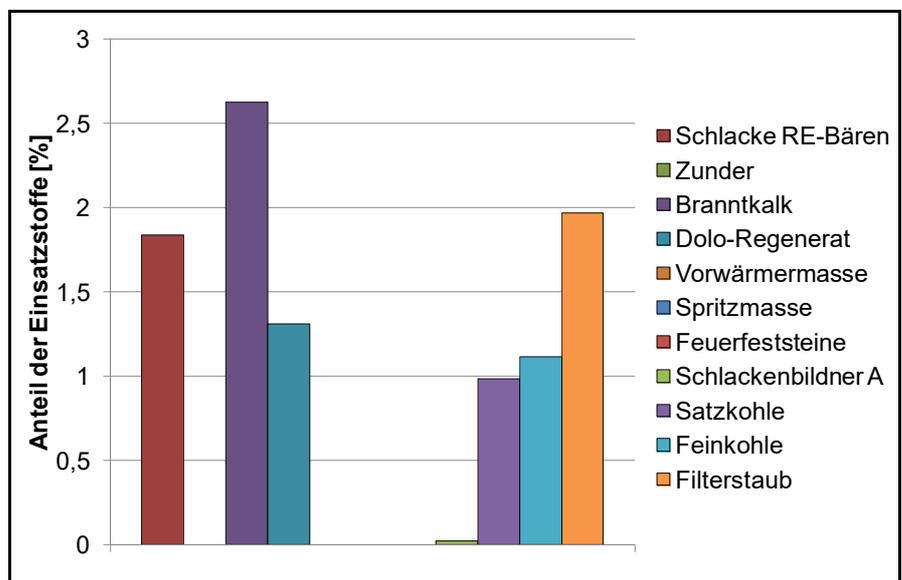


Bild 2: Anteil der Einsatzstoffe an der gesamten Einsatzmenge in den Elektroöfen (ohne Schrott)

eine Schlackenanhaftung von 40 % angenommen. Von den weiteren Einsatzstoffen werden Branntkalk, Filterstaub, Dolo-Regenerat sowie Kohle in größeren Mengen in den Elektroöfen gegeben. Bei dem Filterstaub ist zu berücksichtigen, dass nicht die gesamte eingesetzte Menge mit der Schmelze reagiert. Der genaue Anteil kann nicht bestimmt werden. Für die weiteren Berechnungen wurde daher der gesamte eingeblasene Filterstaub verwendet.

Für die Bilanzierung wurde die eingetragene Fluoridmenge je Charge kalkuliert und in [Bild 3](#) dargestellt. Die Ergebnisse dieser Bilanzrechnung zeigen, dass die Hauptschlackenbildner Branntkalk und Dolo-Regenerat nur in geringem Maße für den

Fluorideintrag verantwortlich sind. Die größten Fluorideinträge in den Elektroöfen stammen von den Schlackenanhaftungen der RE-Bären und dem Filterstaub. Der Fluorideintrag durch die nicht bestimmte Komponente Schrott wurde anschließend aus dem Bilanzausgleich abgeschätzt. Dieser ergibt sich aus der Differenz der Einsatzstoffe und der Stoffe im Ausgang (EOS + Filterstaub), wobei die Menge des Filterstaubs im Ausgang nur abgeschätzt werden kann. Der sich ergebende Unterschied von 2,7 kg F/Charge verdeutlicht, dass eine maßgebliche Menge von Fluorid über andere, in der Bilanz nicht erfasste, Materialien eingetragen wird. Da Vorwärmermasse, Spritzmasse und Feuerfeststeine nur in ganz geringen Mengen in den

Ofen eingetragen werden, sind diese Stoffe vermutlich nicht für die Differenz verantwortlich. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass der Stahlschrott bzw. Anhaftungen/Beschichtungen an Schrott einen wesentlichen Beitrag für die Fluoridbilanz ausmachen. Da nicht bekannt ist, wie viel des auf die Schmelze geblasenen Filterstaubs mit dieser reagieren, kann die Bedeutung des Filterstaubs für den Fluoridgehalt in der EOS auch deutlich geringer sein, als es bei der Betrachtung der Bilanz erscheint. Der hier dargestellte Wert beschreibt die Situation, dass die gesamte Filterstaubmenge mit der Schmelze reagiert und stellt daher einen Maximalwert dar. Der reale Wert wird deutlich unter diesem Maximalwert liegen, so dass die Anteile aller anderen Einsatzstoffe an dem resultierenden Fluoridgehalt in der EOS dementsprechend größer wären.

Untersuchung der Elektroofenschlacken

Parallel zur Untersuchung der Einsatzstoffe wurden Elektroofenschlacken verschiedener Chargen untersucht. An dem ersten Probenahmetermin wurden 8 Chargen EOS im Laufe eines Tages beprobt. Aufgrund der Erkenntnis, dass die Schlackenanhäufungen an den RE-Bären einen wesentlichen Beitrag zum Fluorideintrag leisten, wurden eine Zeitlang versuchsweise keine RE-Bären eingesetzt. Danach erfolgte der zweite Probenahmetermin, an dem wiederum 8 Chargen EOS im Laufe des Tages beprobt wurden. Alle 16 Schlacken wurden einer Feststoffanalyse unterzogen und das Auslaugverhalten in der Körnung 0/32 mm mittels des Schüttelverfahrens 2 : 1 [3] untersucht. In **Bild 4** sind die Fluoridgehalte im Feststoff der 16 EOS dargestellt. Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen an den EOS zeigen, dass durch den Verzicht auf RE-Bären (Probenahme 2) die Fluoridgehalte von durchschnittlich 0,031 M.-% auf 0,023 M.-% gefallen sind und damit um 26 % niedriger liegen. Parallel dazu wurden die Fluoridgehalte in den Einsatzstoffen untersucht. Veränderungen konnten hier vor allem bei dem Filterstaub gemessen werden, der, wie beschrieben, im Kreislauf geführt wird. Hier nehmen die Fluoridgehalte von durchschnittlich 0,23 M.-% auf 0,14 M.-% und damit um 39 % ab.

Die Fluoridkonzentrationen (**Bild 5**) in den Eluaten beider Probenahmeterminen liegen im Bereich zwischen der Bestimmungsgrenze ($< 0,4 \text{ mg/l}$) und $3,3 \text{ mg/l}$ und damit oftmals schlechter als SWS-1 gemäß geplanter EBV [1]. Eine eindeutige Abnahme der Konzentrationen durch den Verzicht der RE-Bären konnte zunächst nicht beobachtet

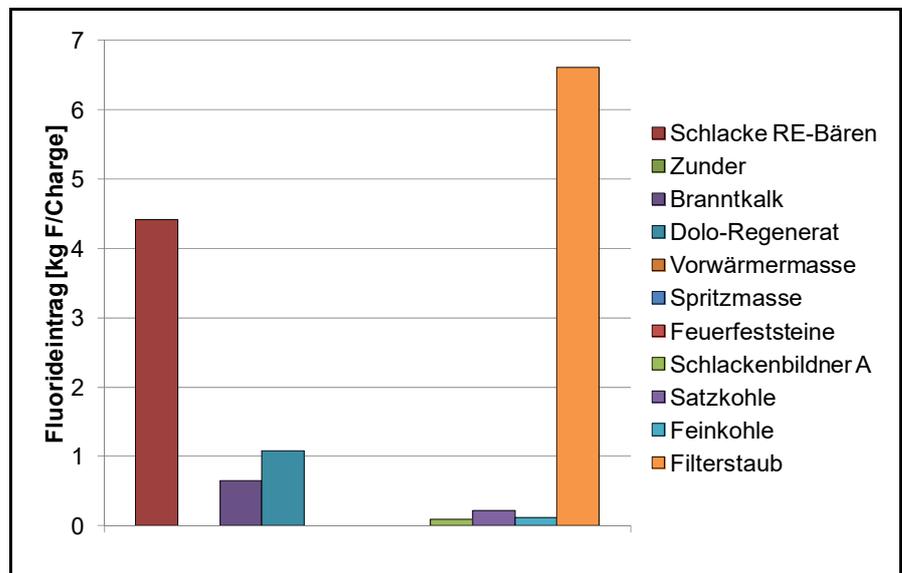


Bild 3: Fluorideintrag in den Elektrolichtbogenofen (ohne Schrott)

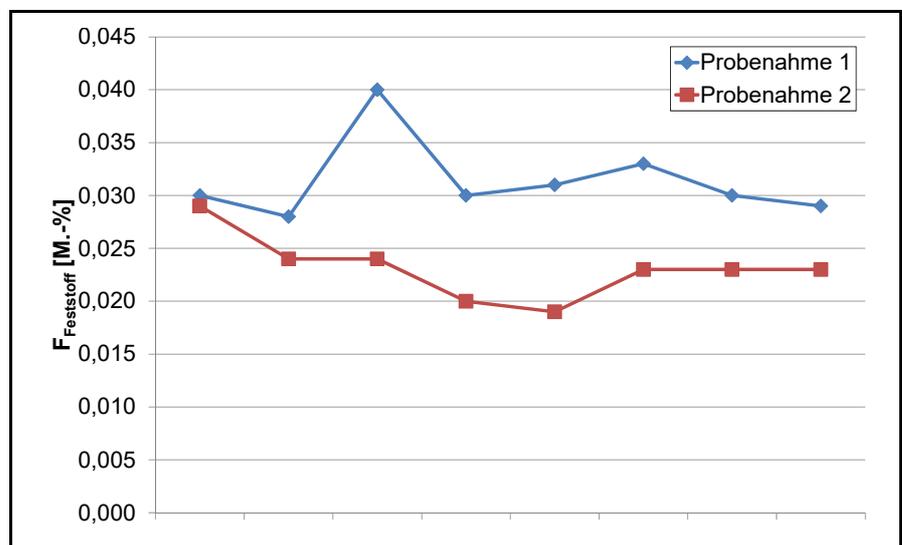


Bild 4: Fluoridgehalt im Feststoff von jeweils 8 Chargen EOS mit (blau) bzw. ohne (rot) RE-Bären

werden. Daher wurden in den folgenden Monaten, in denen weiterhin versuchsweise keine RE-Bären eingesetzt wurden, Monatsdurchschnittsproben entnommen und ausgelaut. Durch die Beprobung der EOS über einen längeren Zeitraum wird eine eventuelle Trägheit des Prozesses durch Verwendung von Kreislaufstoffen berücksichtigt. Diese Proben zeigten im Schnitt niedrigere Konzentrationen, allerdings lagen auch hier die Werte z. T. noch über dem SWS-1-Wert von $1,1 \text{ mg/l}$. Insgesamt konnten durch den Verzicht auf den Einsatz von RE-Bären sowohl der Fluoridgehalt in der EOS als auch die Fluoridkonzentration in den Eluaten gesenkt werden.

Neben dem Feststoffgehalt ist die mineralische Bindungsform des Fluorids in der EOS von Bedeutung, um die Löslichkeit

des Fluorids abschätzen und eventuell verändern zu können. Für die Bestimmung der mineralischen Bindungsform wurden für alle 16 Proben der ersten beiden Probenahmeterminen Röntgenphasendiagramme (XRD) erstellt sowie für ausgewählte Proben Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Eine mögliche Mineralphase, in der Fluorid gebunden sein könnte und die zugleich leicht löslich ist, ist der Mayenit bzw. Fluormayenit [4]. Mayenit konnte für die meisten EOS sowohl mit XRD als auch in den REM-Aufnahmen ermittelt werden (**Bild 6**). Aufgrund der sehr geringen Fluorid-Gesamtgehalte in den Elektroofenschlacken von max. $0,04 \%$ konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, dass das Fluorid tatsächlich in der Kristallstruktur dieses oder eines anderen Minerals (z. B. Cuspidin) gebunden ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war die Ermittlung von Quellen, durch die Fluorid während des Elektroofenprozesses in die Ofenschlacke eingetragen wird. Eine Beeinflussung dieser Fluoridquellen sollte es ermöglichen, auch zukünftig eine umweltgerechte Verwendung von Elektroofenschlacken zu sichern.

Die Bilanzierung der Einsatzstoffe in den Elektroofen zeigte, dass die Schlackenanhaltungen an RE-Bären, Filterstaub sowie der eingesetzte Schrott den weitaus größten Anteil an der Fluoridbilanz ausmachen. Als weitere F-Eintragsquellen sind darüber hinaus die Schlackenbildner zu nennen. Dabei wurde vom Dolo-Regenerat im Vergleich zu anderen Schlackenbildnern eine etwas höhere Fluoridmenge eingebracht.

Untersuchungen des Herstellungsprozesses von Schlackenbildnern aus gebrauchten Feuerfestreststoffen zeigten, dass ungebrauchte Feuerfestmaterialien deutlich geringere Fluoridgehalte aufweisen als die gebrauchten. Da die verwendeten Feuerfestmaterialien hauptsächlich aus metallurgischen Aggregaten der Eisen- und Stahlindustrie stammen, konzentrierten sich die Untersuchungen auf diese Materialien. Die im Dolo-Regenerat gefundenen erhöhten Fluoridgehalte sind demnach durch ihren Gebrauch und die damit verbundenen Begleitstoffe verursacht, die im Falle von Schlackenanhaltungen nicht von den gebrauchten Feuerfestmaterialien separiert werden können. Umfangreiche Untersuchungen von gebrauchten Feuerfestmaterialien zeigten, dass es Unterschiede bei den Fluoridgehalten der Feuerfestmaterialien unter Betrachtung der Grundtechnologie der Stahlerzeugung sowie ihres Stahlmarkenprogrammes gibt. Dadurch kann nun eine Materialstromlenkung bei der Herstellung des Dolo-Regenerats aufgebaut werden, die es erlaubt, Feuerfestreststoffe mit erhöhten Fluoridgehalten auszuschleusen und den Fluoridgehalt des Dolo-Regenerats deutlich zu senken.

Der Verzicht auf den Einsatz von RE-Bären als Schrottkomponente bewirkt eine deutliche Reduzierung der Fluoridgehalte in der EOS und im Filterstaub. Die Verringerung der Fluoridgehalte im Feststoff der EOS führte zwar zu einer niedrigeren F-Auslaugung, eine sichere Einstufung in SWS-1 gemäß EBV ist bisher jedoch noch nicht gewährleistet.

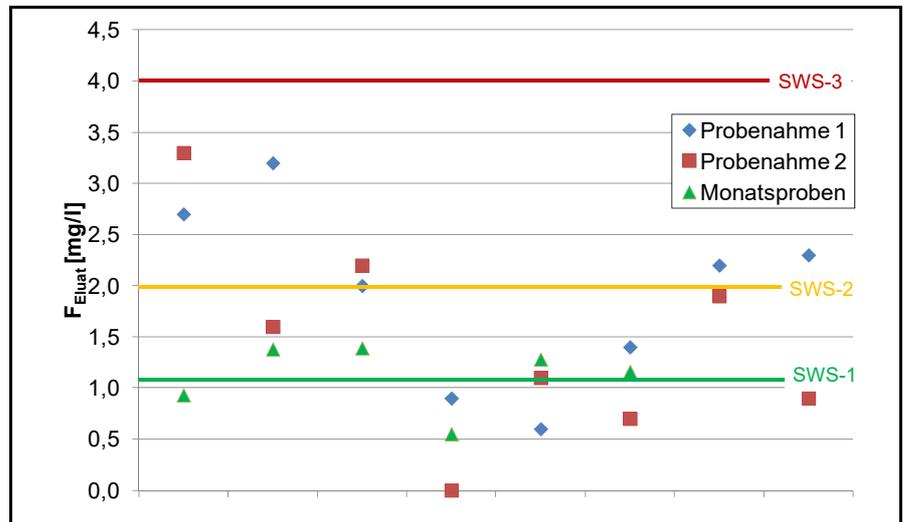


Bild 5: Fluoridkonzentrationen im 2:1-Schüttelverfahren (Körnung 0/32 mm) von 8 Chargs EOS mit (blau) bzw. 8 Chargs ohne (rot) RE-Bären sowie 6 weitere Monatsproben ohne RE-Bären (grün)

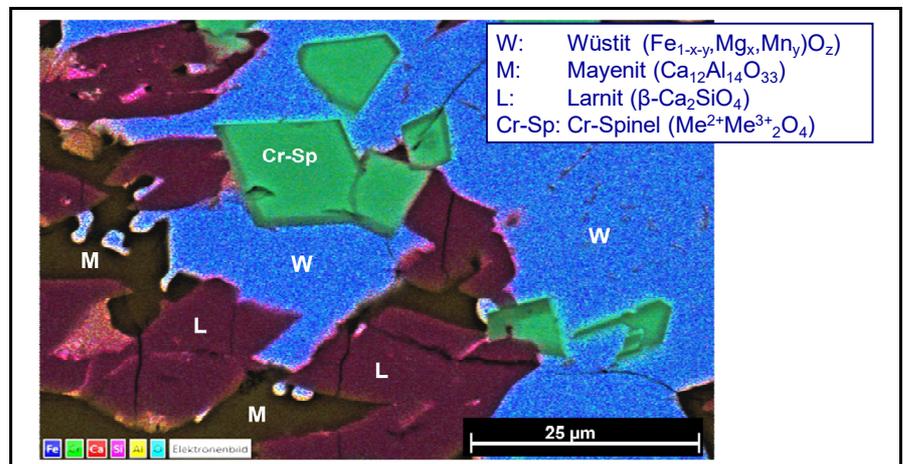


Bild 6: Elementverteilungsbild (REM) eines Bereichs einer EOS-Probe

Es wird angenommen, dass es einen Zusammenhang zwischen der mineralischen Bindungsform des Fluorids und der Löslichkeit gibt. Aufgrund der geringen Fluoridgehalte konnten diese Bindungsformen in bisherigen Untersuchungen allerdings noch nicht bestimmt werden. Weitere Schmelzversuche sind geplant, mit denen versucht wird, die Mineralphasenbildung mittels veränderter Randbedingungen bezüglich Abkühlung oder Zusammensetzung der Schlacken zu beeinflussen und damit das Auslaugverhalten zu verändern.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.



Literatur

[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Festlegung

von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material – Entwurf Juli 2015

[2] Sokol, A.; Mieck, B.; Leson, M.: Maßnahmen zur Erhaltung des umweltgerechten Recyclings von Feuerfestreststoffen und der nachhaltigen Nutzung von Elektrolichtbogenofenschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Herkunft und des Verhaltens von Fluorid. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Aktenz. 32127/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Dezember 2016 (Veröffentlichung demnächst)

[3] DIN 19529 (2009): Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von

anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg

[4] Lee, H., Kwon, S., Jang, S.: Effects of P_{O_2} at Flux State on the Fluorine Dissolution from Synthetic Steel-

making Slag in Aqueous Solution, ISIJ International 50 (2010) No. 1, pp. 174–180

Definierte Erstarrung und Wärmerückgewinnung von Elektroofenschlacke (DEWEOS)

D. Algermissen M. Sc. (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)
Dr.-Ing. P. Böhlke, Dipl.-Ing. G. Hugenschütt (KME Germany GmbH & Co. KG)
U. Raßfeld, Dipl.-Ing. T. Zehn (Georgsmarienhütte GmbH)

Einleitung

In Deutschland besaß die Industrie im Jahr 2014 einen Anteil von etwa 29 % am Endenergieverbrauch. Im Vergleich zum Jahr 1990 konnte der Industriesektor seine Gesamtenergie um über 15 % verringern [1]. Die Ursachen für diese rückläufige Entwicklung sind nicht allein in der Umstrukturierung der Industrie in den neuen Bundesländern und einer Verlagerung von energieintensiver Produktion ins Ausland begründet. Vielmehr waren große Anstrengungen im Bereich der industriellen Forschung und Entwicklung ausschlaggebend, welche u. a. dank der Impulsgebung der Bundesregierung durch diverse Förderprogramme die Energieeffizienz voranbringen konnten.

Neben Optimierung bestehender Prozesse war auch die Entwicklung und Realisierung neuer Verfahren in der Industrie maßgeblich an diesem Trend beteiligt. Am Beispiel der Stahlindustrie konnte der Primärenergiebedarf in den letzten 20 Jahren so sogar um 20 % verringert werden [2]. Dort hat beispielsweise die interne Nutzung sogenannter Kuppelgase eine jahrzehntelange Tradition und auch die Nutzung diverser Abwärmequellen wurde an vielen Prozessstellen stetig optimiert. Mittels Regeneratoren und Rekuperatoren, die intern benötigte Brennstoffe vorheizen, kann darüber hinausgehende Energie in Form von Fernwärmeleitungen eine ressourcenschonende Lösung darstellen, um beispielsweise Wohngebäude zu beheizen.

Die Abwärme der Schlacke in der Stahlindustrie wird derzeit betrieblich noch nicht genutzt, da jedes Verfahren zur Wärmenutzung diverse Nachteile mit sich bringt, welche die Vorteile der Wärmerückgewinnung nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch überwiegen.

Status quo

Im Bereich der Eisenhüttenschlacken wird allgemein zwischen Hochofenschlacken und Stahlwerksschlacken, wozu maßgeblich

Schlacken aus dem LD-Konverter und dem Elektrolichtbogenofen zählen, unterschieden.

Hochofenschlacken werden in Deutschland, aber auch weltweit, hauptsächlich zu Hütensand wassergranuliert, welcher in der Zementindustrie Anwendung findet. Eine Entwicklung zur Wärmerückgewinnung dieser Schlacken ist die trockene Granulation mittels Drehtellertechnik [3, 4]. Die Hochofenschlacke stellt an die Anlagentechnik besondere Anforderungen, da insbesondere in kurzer Zeit große Mengen (mehrere Tonnen je Minute) behandelt werden müssen, welche während des Abstichs stark schwanken können. Dabei muss die Abkühlgeschwindigkeit fortwährend hoch genug sein, so dass die Schlacke glasig erstarrt.

Stahlwerksschlacken, hier am Beispiel der Elektroofenschlacken (EOS) dargestellt, stellen ganz andere Anforderungen an die Anlagentechnik, so dass die Verfahren nicht adaptierbar sind. Es ist heute weltweit Stand der Technik, die schmelzflüssige EOS nach dem Abstich entweder direkt im Beet unter dem Elektrolichtbogenofen oder nach dem Transport mittels Schlackenkübel im Beet außerhalb des Stahlwerks, unter Verwendung von bestimmten Wassermengen, abzukühlen. Dabei entsteht eine kristalline Stückschlacke, die aufgrund ihrer guten Eigenschaften überwiegend im Verkehrswegebau genutzt wird.

Aktuell gibt es weltweit kein betrieblich umgesetztes Verfahren, das auf der einen Seite die Herstellung einer Elektroofenschlacke für eine hochwertige Anwendung als Baustoff ermöglicht und auf der anderen Seite gleichzeitig eine Wärmerückgewinnung bei der Erstarrung der Schlacken aus dem schmelzflüssigen Zustand zulässt. Meist ist das Resultat der Wärmerückgewinnung ein Material mit einer Korngröße < 10 mm, welches im Verkehrswegebau nur im geringwertigen Preissegment nutzbar ist, falls überhaupt lokal ein Markt existiert.

Die Nutzung des Nebenproduktes Elektroofenschlacke hat sowohl umwelttechnische als auch marktwirtschaftliche Vorteile: Bei der Produktion von hochwertigen Bauprodukten aus gezielt erstarrten Schlacken können andere natürliche Ressourcen geschont werden und durch die Wärmerückgewinnung steht Energie für die interne Nutzung im Stahlwerk oder extern zur Verfügung.

Das DEWEOS-Verfahren

Elektroofenschlacke besitzt eine hohe Wärmekapazität bei gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit. Für eine Nutzung des Wärmeinhalts durch ein Übertragungsmedium wie beispielsweise Luft bedarf es deshalb einer großen Oberfläche, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Demgegenüber steht jedoch die Vermarktbarkeit der Schlacke. Ein Material mit einer großen Korngröße ist deutlich besser und hochpreisiger zu vermarkten als beispielsweise ein feinkörniger Splitt, so dass zwischen diesen beiden Kontroversen ein Mittelweg gefunden werden muss.

Dies unterscheidet das DEWEOS-Verfahren von den meisten anderen Prozessideen zur Wärmerückgewinnung. Als Ziel wurde deshalb die Erzeugung einer Elektroofenschlacke mit einer Korngröße von mindestens 32 mm definiert, bei mindestens der Beibehaltung ihrer guten bauphysikalischen und umwelttechnischen Eigenschaften.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb die Idee entwickelt, die zwei Prozessschritte „Abkühlung und Erzeugung einer großen Korngröße“ sowie „Wärmerückgewinnung“ zu trennen, da das Handhaben schmelzflüssiger EOS durch ihre schnelle Isolations-schichtbildung eine besondere Herausforderung darstellt. Die Rückgewinnung der Wärme einer heißen, erstarrten Schlacke mittels des Übertragungsmediums Luft im Gegenstrom konnte als Stand der Technik angesehen werden. Die gezielte Erstarrung der Schlacke, bei Beibehaltung eines hohen Wärmepotenzials, war die maßgebliche Aufgabe im Projekt.

Als Abkühlvorrichtung wurde ein Bauteil benötigt, welches eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt und gegenüber der EOS robust ist. In idealer Weise erfüllten Kupfer bzw. Kupferlegierungen diese Kriterien, weshalb sich das Konsortium im Forschungsprojekt folgendermaßen zusammensetzte:

- ◆ Das Elektrostahlwerk Georgsmarienhütte GmbH als Produzent von Elektroofenschlacke
- ◆ Der Kupferverarbeiter und Hersteller von Anlagenkomponenten aus Kupfer KME
- ◆ Die Forschungsstelle FEhS mit Laborkapazitäten und einer Expertise zum Thema Schlacken

Ein weiterer wichtiger Bestandteil war eine Schwingfördereinrichtung, auf welche die Kupferrutsche gesetzt wurde. Ohne diese Schwingung würde die aufgegebene Schlacke am kalten Kupfer eine Isolationsschicht bilden und die nachfolgende Schlacke würde ungekühlt darüber fließen. Mit Schwingung wird die Schlacke aufgebrochen, von der Platte befördert und die Kupferfläche steht für die Abkühlung der nachfließenden Schlacke wieder zur Verfügung.

Betriebsversuche am Elektrolichtbogenofen

Für die Betriebsversuche bei der GMH wurde eine kleine Schwingfördererin mit einer variablen Rüttelfrequenz bei KME mit einer Kupferrinne (KKRR) ausgestattet. Die Abkühlfläche hatte zunächst keine Profilierung, war jedoch in der Neigung verstellbar. Bei den Betriebsversuchen wurde von geschultem Personal des FEhS-Instituts mit einem „Löffel“ (Fassungsvermögen ca. 3 kg) die schmelzflüssige Elektroofenschlacke durch die Ofentür direkt aus der Schmelze des Elektrolichtbogenofens entnommen und, um Temperaturverluste zu minimieren, sofort auf die KKRR vergossen. Dieser Vorgang wurde im Bedarfsfall mehrmals hintereinander wiederholt, um einen quasi kontinuierlichen Prozess zu simulieren.

Bild 1 zeigt die beladene KKRR nach einmaliger Befüllung ohne Förderung der abkühlenden Schlacke an das untere Ende der Abkühlrutsche (rechts).

Die diversen Einstellmöglichkeiten an der KKRR, insbesondere Neigung und Rüttel-



Bild 1: Probeabguss für 1. Betriebsversuchskampagne (ohne Förderung/Auffanggefäß)



Bild 2: KKRR mit eingefräster Profilierung

frequenz, wurden in der ersten Kampagne so optimal wie möglich eingestellt. Jedoch zeigte sich, dass die glatte Oberfläche ein schnelles Rutschen der EOS verursachte, so dass für die nächste Kampagne die KKRR mit einer Profilierung (Bild 2) versehen wurde. Diese hat außerdem zur Folge, dass sich die Kontaktfläche und damit der Wärmeübergang vergrößert.

Weiterhin wurde die KKRR an verschiedenen Stellen mit Thermoelementen ausgestattet, so dass drei kontinuierliche Tempe-

raturmessungen direkt an der Kontaktfläche zur schmelzflüssigen Schlacke, in der Mitte der noch nicht gekühlten Kupferplatte und an der unteren Oberfläche im Kontakt zur Umgebungsluft möglich waren.

Die Menge an aufgebrachtener schmelzflüssiger Schlacke wurde stetig erhöht. Dies wurde durch häufigeres Aufbringen möglich bzw. durch Aufbringen in sehr kurzer Folge ohne größere Unterbrechungen. So wurde die KKRR im Rahmen von drei Versuchskampagnen stetig optimiert.

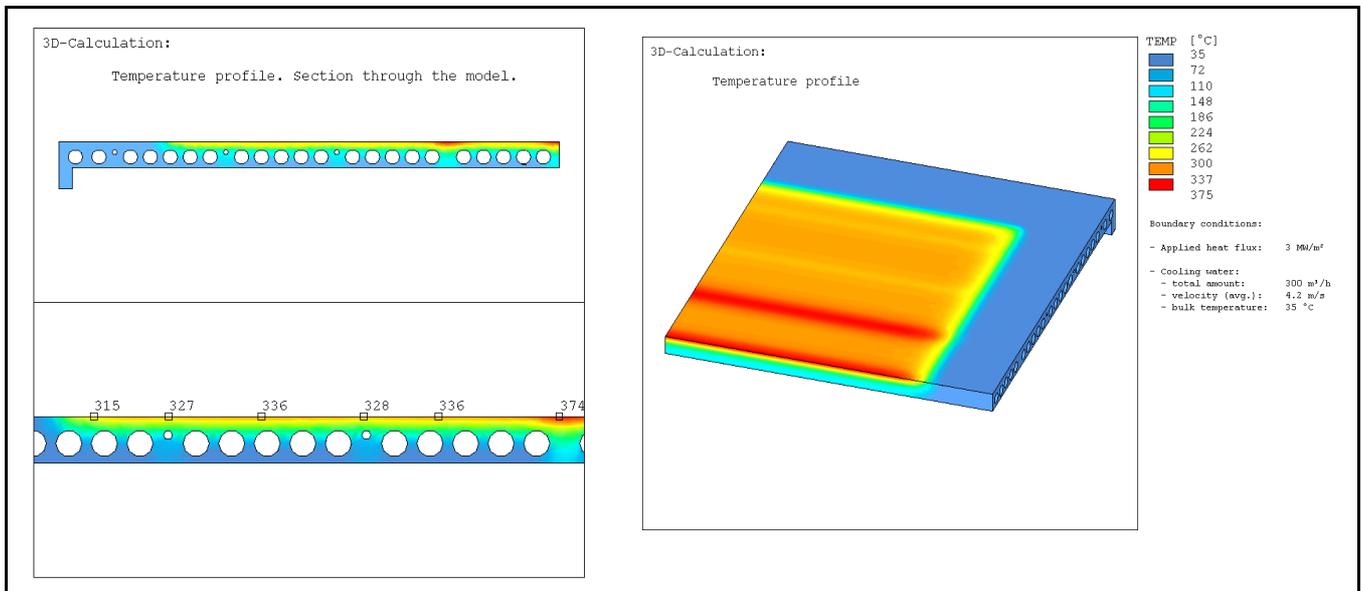


Bild 3: Simulation des Temperaturprofils der Abkühlfläche (Querschnitt links, Aufsicht rechts)



Bild 4: Kupferplatte des Versuchsträgers (1,5 m x 2,0 m)



Bild 5: Schwingfördereinheit des Versuchsträgers

Bau des Versuchsträgers

Auf Basis dieser Ergebnisse konnten von KME u. a. Simulationen der Temperaturprofile innerhalb der Abkühlfläche nach Abkippen der schmelzflüssigen Elektroofenschlacke durchgeführt werden. **Bild 3** zeigt für eine Hälfte der Abkühlfläche, wie gering der Wärmeeintrag in die Tiefe der indirekt gekühlten (Bohrungen in **Bild 3**, links) Kupferrutsche ist. Ziel war ein Up-Scaling der Apparatur und die Simulation der Temperaturen innerhalb des Versuchsträgers für einen kontinuierlichen Betrieb.

Nach der Modellierung und den konstruktiven Arbeiten wurde ein Versuchsträger mit einer Kupferplattengröße von 1.500 mm x 2.000 mm gebaut (**Bild 4**), ein Mechanismus zur Vibration (**Bild 5**) und eine indirekte Wasserkühlung.

Diese Platte diente zur definierten Erstarrung der EOS, um sie in ihren Eigenschaften für einen Wärmetauscher handhabbar zu machen und um gleichzeitig ein noch hohes homogenes Temperaturniveau (ca. 1.200 °C) beizubehalten. Dadurch war im gesamten Abkühlprozess kein Wasser notwendig, welches mit der Schlacke in direkten Kontakt kommt.

Neben der stahlwerksgerechten Modifikation durch die GMH wurde weiterhin ein Spritzschutz für den Versuchsträger gebaut (**Bild 6**). Als Erstkontakt-Aufprallfläche wurde die hintere Spritzschutzwand mit Feuerfestmaterial versehen, um die Kupferplatte nicht der starken mechanischen Belastung durch auftreffende, bereits erstarrte Schlacke aussetzen zu müssen.

Betriebsversuche am Schlackenbeet

Der erste Betriebsversuch zur Erstarrung der Schlacke wurde unter Beachtung des durch die GMH erstellten Sicherheitskonzeptes durchgeführt. Dazu wurde das

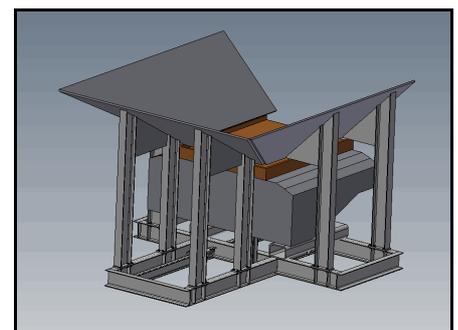


Bild 6: ISO-Ansicht Versuchsträger mit Spritzschutz



Bild 7: Erste Schlackenberührung mit dem Versuchsträger



Bild 8: Erste erstarrte, noch heiße Schlacke verlässt den Versuchsträger



Bild 9: Nach längerer Kippzeit bildet sich ein Rückstau auf der Stufe



Bild 10: Rückstau vermehrt sich, Schlacke wird nicht mehr ausreichend erstarrt



Bild 11: Flüssige Schlacke fließt über die erstarrte Schlacke auf der Stufe herüber



Bild 12: Versuchsende

Schlackentransportfahrzeug mit dem Schlackenkübel vor den Versuchsträger positioniert und die EOS aus dem Kübel langsam abgegossen (Bild 7–12).

Auf Basis der erlangten Erkenntnisse des Versuchs, ergaben sich diverse Optimierungsmaßnahmen, welche für einen zweiten Versuch umgesetzt werden sollten. Dazu zählten geometrische Änderungen an der

Versuchsapparatur sowie auch der Einbau diverser Sensoren, u. a. zur Ermittlung der Wasserdurchflussmenge für die indirekte Kühlung, um die abtransportierte Wärmemenge quantifizieren zu können.

Zur besseren Einschätzung der möglichen Wärmerückgewinnung wurde eine Auffangbox konstruiert, gefertigt und am Ende der Kupferplatte ins Schlackenbeet gestellt, um

sowohl das Gewicht der behandelten Schlacke wiegen zu können, als auch mittels Thermographiekamera die Temperatur am Plattenende und in der Box zu bestimmen. Diese verbleibende Energie stünde dem nachgeschalteten Wärmetauscher für eine Rückgewinnung zur Verfügung, womit es möglich wäre, eine Energieabschätzung für das *Produkt Elektroofenschlacke* mit vermarktbarer Korngröße > 32 mm zu treffen.

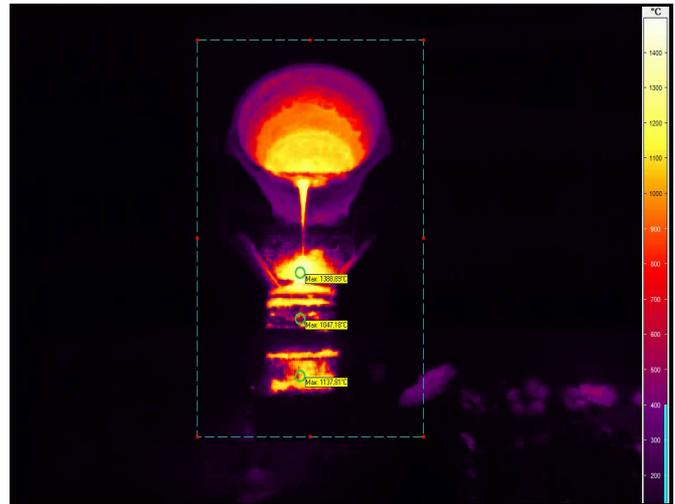
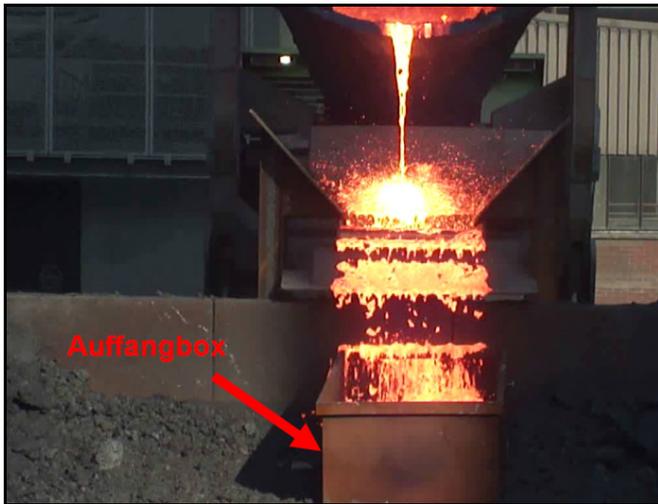


Bild 13: Erstarren der schmelzflüssigen Schlacke auf dem Versuchsträger (links: Realbild, rechts: Thermographiebild)

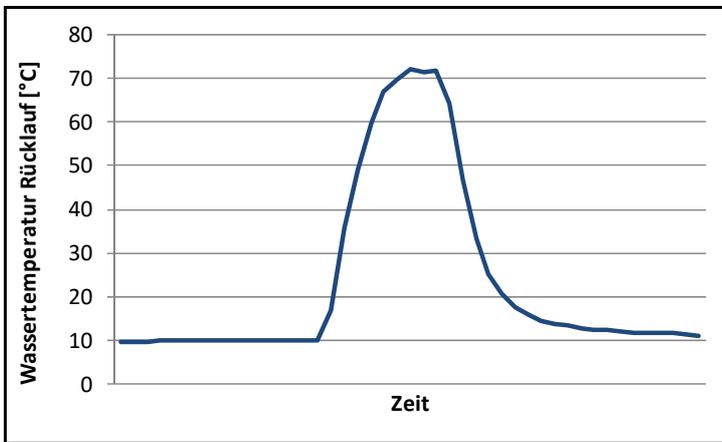


Bild 14: Rücklauf der Temperatur des Kühlwassers (2. Betriebsversuch)

Bild 15: Oberfläche der Kupferplatte nach Betriebsversuch

Im zweiten Betriebsversuch zeigte sich, dass die geometrischen Änderungen das Aufstauen der Schlacke am Plattenende verhinderten und so ein Großteil der Schlacke in erstarrter Form in die Auffangbox fiel. Die Aufnahmen der Thermographiekamera (Bild 13) erbrachten zudem gemessene Temperaturen der erstarrten Schlacke in der Auffangbox, welche nun für einen konventionellen Wärmetauscher verwendbar wäre.

Im Anschluss wurden sowohl Schlackenproben aus der Auffangbox genommen als auch von der konventionell im Beet abgekühlten Schlacke, welche nach dem Versuch noch im Schlackenkübel verblieb. Diese wurden in den Laboratorien des FEhS-Instituts analysiert, um mögliche negative Einflussnahmen auf umwelttechnische oder bauphysikalische Eigenschaften zu identifizieren.

Auswertung der Betriebsversuche

Der zunächst wichtigste Aspekt war die Arbeitssicherheit, weshalb für die Betriebsversuche großer logistischer Aufwand durch die GMH betrieben wurde. Bei unzureichender Kühlung der Kupferplatte hätte es zu einem Materialversagen kommen können, welches eine Verpuffung zur Folge hätte. Auch wenn es an anderer Stelle betriebliche Praxis ist, indirekt gekühltes Kupfer in Form von Kokillen zu nutzen, welche beim Strangguss mit flüssigem Stahl in Berührung kommen, ist das Verhalten von Elektroofenschlacke mit hoher Wärmekapazität und geringer Wärmeleitfähigkeit ein deutlich anderes.

– Wassertemperatur

Während der Betriebsversuche war deshalb die aufgenommene Wärme des Wassers für

die indirekte Kühlung eine wichtige Aussage.

Die erreichte Temperaturdifferenz des Kühlwassers im 2. Betriebsversuch lag bei maximal 62 °C (Bild 14), so dass gemeinsam mit dem Wasserdurchfluss (etwa 17,6 m³/h) die abgeführte Wärmemenge integriert werden konnte. Diese betrug etwa 103 kWh für eine Schlackenmenge von etwa 1,9 t, welche mittels Waage am Radlader quantifiziert wurde. Bei einem vollständigen Abkippen des Kübels von für die GMH typischerweise 17 t Schlacke, müsste zur Erstarrung etwa 920 kWh Wärme abgeführt werden.

Der Abkippvorgang dauerte jedoch 4,5 Minuten, was einer Schlackenrate von 420 kg/min entspricht. Dadurch müsste ein vollständiger Kübel etwa 40 Minuten gekippt werden, was zum einen aus logis-

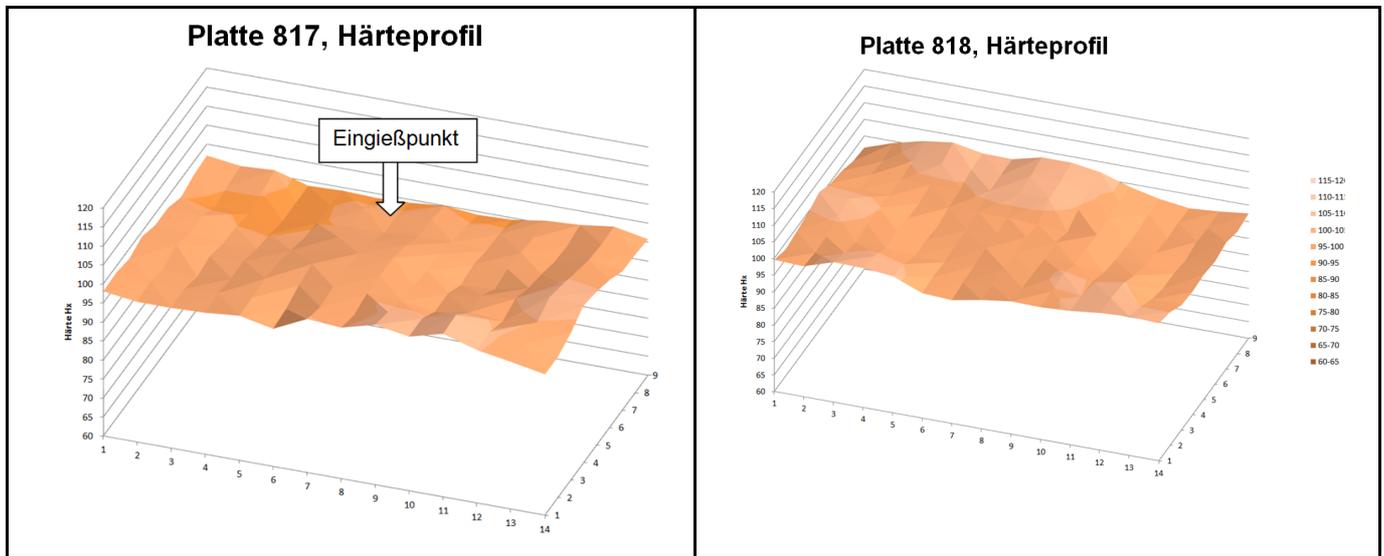


Bild 16: Härteprofil der oberen (links) und unteren (rechts) Kupferplatte des Versuchsträgers

tischen Gründen im Stahlwerk nicht realisierbar wäre, zum anderen die Schlacke in dieser Zeit Anfringerungen bilden würde. Folglich müsste die Kupferplatte für eine betriebliche Anlage deutlich länger sein bzw. mehrere Versuchsträger hintereinander gebaut werden.

– Wärmepotenzial

Durch die thermographischen Aufnahmen der erstarrten Schlacke in der Auffangbox konnte die Wärmemenge berechnet werden, welche in einem nachgeschalteten Wärmetauscher zur Verfügung stehen würde.

Die Temperaturen lagen im Bereich zwischen 1.110 °C und 1.270 °C, im Mittel also 1.180 °C. Bei Zugrundelegung einer typischen chemischen Zusammensetzung konnte die Wärmekapazität der EOS berechnet werden, wodurch sich ein Wärmepotenzial von etwa 6 MWh je Charge ergab.

– Verschleißverhalten der Kupferplatte

Nach dem zweiten und den abschließenden Betriebsversuchen wurde die Cu-Adapterplatteneinheit bei KME demontiert. Die beiden Cu-Platten, die mit der flüssigen Schlacke in Verbindung kamen, wurden visuell geprüft (Beschädigungen, Diffusionen etc.) und ein Härteprofil erstellt. Bei beiden Platten waren visuell keine nennenswerten Beschädigungen, Hot Spots oder Hinweise auf eine Diffusion zu erkennen (Bild 15). Da die Platten keine optischen Beschädigungen aufwiesen, wurde auf eine zerstörende Untersuchung verzichtet.

Abkühlung		1. Betriebsversuch		2. Betriebsversuch	
		Beet (Original)	Kupfer (Schnell)	Beet (Original)	Kupfer (Schnell)
pH-Wert		11,5	11,5	11,6	11,5
Leitfähigkeit	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	391	405	748	687
Chrom	[mg/l]	< 0,002	< 0,002	0,010	0,008
Vanadium	[mg/l]	0,015	0,018	0,008	0,011
Fluorid	[mg/l]	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4

Tabelle 1: Eluatanalytik von Versuchs-EOS aus dem S4-Schüttelverfahren (8/11 mm)

Für das Härteprofil wurde auf jede Platte ein Raster von 100 x 100 mm² gelegt und mittels eines Handhärteprüfgerätes die Härten gemessen. Die Werte wurden graphisch aufgearbeitet, siehe Bild 16. Die Platte 817, die direkt angeströmt wurde, zeigte eine leichte Tendenz zu niedrigeren Werten. Eine Erweichung im klassischen Sinne konnte jedoch an keiner Stelle nachgewiesen werden, es lag nur eine gewisse Erholung des Materials vor. Die Temperaturbeanspruchung musste an der Oberfläche somit ≤ 300 °C betragen haben. Die Platte 818 zeigte keine Änderungen im Härteprofil.

– Schlackenanalytik

Die erstarrte Schlacke vom Versuchsträger sowie die aus dem Beet, in welches die im Kübel verbliebene Menge abgekippt wurde, wurden chemisch, mineralogisch und bauphysikalisch untersucht, um Nachteile in anderen Bereichen, wie z. B. der Umweltverträglichkeit, ausschließen zu können.

Die Auslaugung gemäß gültigem Elutionsverfahren [5] für den Einsatz im Straßen- und Wegebau zeigte für die reglementierten Parameter keine nennenswerten Unterschiede (Tabelle 1).

Zudem hatten die veränderten Abkühlbedingungen keinen erkennbaren Einfluss auf die Mineralogie (Bild 17).

Die physikalischen Eigenschaften der auf dem Versuchsträger schnell erstarrten Schlacke wurden anhand der erzeugten Korngröße und des Widerstands gegen Zertrümmerung [6] bestimmt.

Wie grundsätzlich für dieses Forschungsvorhaben postuliert, konnte die Anforderung an eine Korngröße > 32 mm eingehalten werden, so dass die EOS als höherwertiges Schottermaterial Einsatz finden könnte. Der Widerstand gegen Zertrümmerung (Schotterschlag) ergab einen sehr guten Wert von 8,5 M.-%. Gemäß

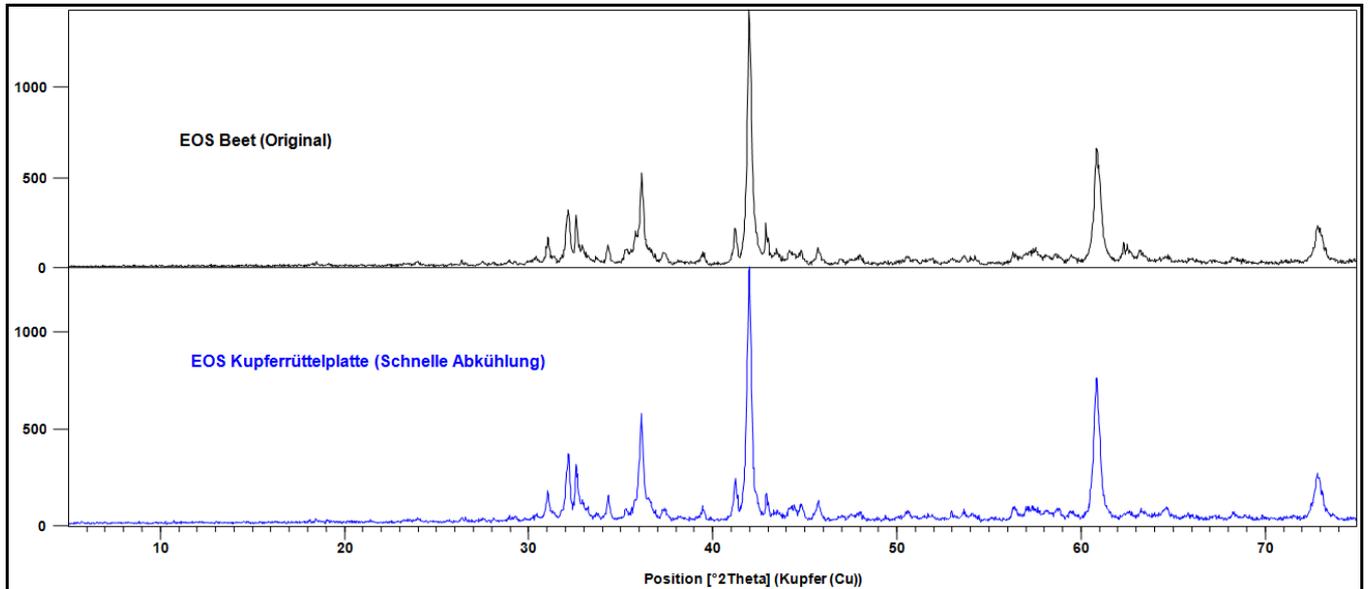


Bild 17: Röntgenbeugungsanalytik der regulär (oben) und schnell (unten) abgekühlten EOS

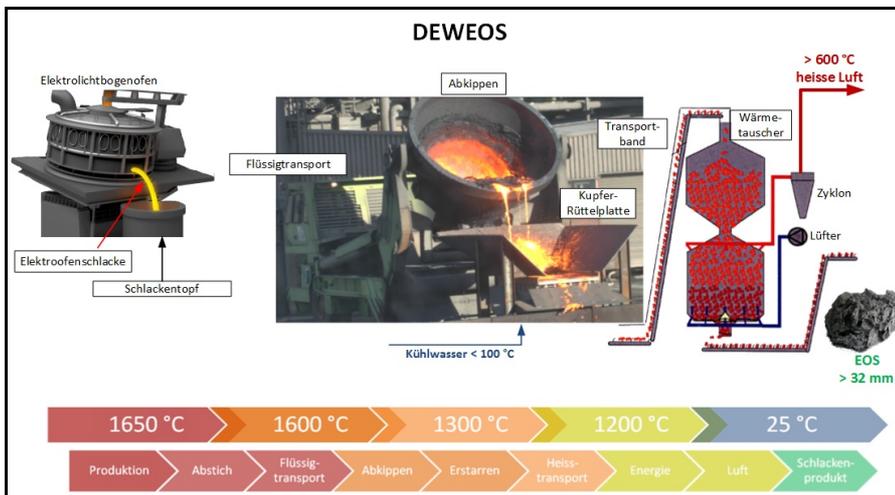


Bild 18: Verfahrenskonzept „DEWEOS“

den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau [7] gilt für Stahlwerksschlacken die Maßgabe von ≤ 29 M.-%.

Fazit

Die wichtigste Erkenntnis im Forschungsvorhaben war die Trennung der Prozessschritte „Transportfähigkeit der Schlacke herstellen“ und „Wärmerückgewinnung“. Die Elektroofenschlacke kommt wie bisher üblich am Schlackenbeet an und wird dort auf eine vibrierende Kupferplatte abgekippt. Die Kupferplatte entzieht der Schlackeoberfläche schnell die Wärme, damit sich eine Schale bildet; eine ähnliche Methodik ist aus dem Strangguss mit Stahl anstatt Schlacke bekannt. Da Schlacke beim Treffen auf eine kalte Oberfläche zu Anfrieren-

gen führt, muss stetig die Kupferoberfläche befreit werden. Dies konnte mittels Vibration realisiert werden, wodurch die angefrorene Schlacke aufgebrochen wird, sodass nachkommende, schmelzflüssige Schlacke nicht ungekühlt über die erstarrte Schlacke herüberläuft. Dabei ist gezielt einzustellen, dass die Schlacke noch ein möglichst hohes Wärmepotenzial beinhaltet, aber dennoch transportfähig ist und eine große Korngröße > 32 mm besitzt, um auch später in höherwertigen Anwendungen genutzt werden zu können.

Die so erstarrte Schlacke mit hohem Wärmepotenzial kann dann in einen Wärmetauscher transportiert werden, welcher als Übertragungsmedium Luft bzw. Gas nutzt, welches die Wärme der Schlacke aufnimmt. Je nach örtlicher Gegebenheit findet sich ein

direkter Einsatz dieses Mediums im Stahlwerk oder es kann elektrische Energie erzeugt werden, wodurch Ressourcen und CO_2 eingespart werden können.

Nach Nutzung des Wärmeinhalts kann die Schlacke, wie heute üblich, mechanisch aufbereitet und beispielsweise als hochwertiger Baustoff im Verkehrswegebau eingesetzt werden. Der Wärmetauscher muss dabei nicht batchweise betrieben werden, sondern kann kontinuierlich Schlacke und Übertragungsmedium im Gegenstrom fördern (Bild 18).

Die umwelttechnischen sowie bauphysikalischen Eigenschaften der Elektroofenschlacke werden nicht negativ beeinflusst und es wird die Möglichkeit geschaffen, die EOS ohne direkten Wasserkontakt abzukühlen. Durch eine Kreislaufaufführung kann als Nebeneffekt so noch Wasser eingespart werden.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Verwaltung sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts, welches unter dem Kennzeichen 03ET1141 gefördert wurde. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2014, Stand: 08/2015
- [2] „Stahl und Nachhaltigkeit, Eine Bestandsaufnahme in Deutschland“, Stahlinstitut VDEh, 13. Auflage, Nov. 2015
- [3] Abschlussbericht zum „Verbundvorhaben: Erforschung eines Verfahrens zur trockenen, glasigen Erstarrung von schmelzflüssiger Hochofenschlacke kombiniert mit einer Wärmerückgewinnung – DSG“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 03ET1052, 2014
- [4] Abschlussbericht zum „Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation – FORWÄRTS“, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, Projektnummer 838725, 2016
- [5] DIN 12457-4: Auslaugung – Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen, Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit hohem Feststoffgehalt und mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung), Januar 2003
- [6] DIN EN 52115-2: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen, Teil 2: Schlagversuch an gebrochenen Gesteinskörnungen größer 32 mm, Februar 2014
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB, Ausgabe 2004/2007

Reaktivität von Alt-Hüttensand – ein Praxisversuch

Dr.-Ing. A. Ehrenberg

Einleitung

Hüttensand muss immer wieder auch für längere Zeit im Freien zwischengelagert werden, da aus saisonalen oder konjunkturellen Gründen eine zeitnahe Verwendung in der Zement- oder Betonindustrie nicht immer möglich ist. Häufiger wurde gelagerter Hüttensand sowohl eine geringere Reaktivität als auch eine leichtere Mahlbarkeit nachgesagt. Dass beides nicht zutrifft, wurde auf Basis von im FEhS-Institut durchgeführten Laboruntersuchungen bereits 2012 nachgewiesen [1]. Um eine Übertragung der Ergebnisse in die Praxis zu dokumentieren, wurde auf dem Gelände der AG der Dillinger Hüttenwerke ein Hüttensand-Versuchslager angelegt, das über einen Zeitraum von 55 Monaten mehrfach beprobt wurde. Über die Ergebnisse der an diesen Hüttensandproben durchgeführten Untersuchungen wird nachstehend berichtet.

Aufbau des Hüttensand-Versuchslagers

Um mögliche Qualitätsveränderungen während einer Zwischenlagerung im Freien unter Praxisbedingungen (Auflast, Verdichtung, Beregnung etc.) beurteilen zu können, wurden 3.000 t frisch erzeugter und restfeuchter Hüttensand in ein Freilager eingebracht, das lagenweise aufgebaut und dabei verdichtet wurde (Bild 1). Die Verdichtung diente der Simulierung von Bedingungen, die im Inneren von durchaus üblichen, größeren Lagerbeständen an Hüttensand vorliegen.



Bild 1: Aufbau des 3.000 t fassenden Hüttensand-Versuchslagers 2011

Probenahmen und Untersuchungsprogramm

Beginnend nach einer Lagerungszeit von 3 Monaten und über einen Zeitraum von 55 Monaten fanden insgesamt 6 Probenahmen statt. Bei diesen wurden sowohl oberflächennahe Proben als auch Proben aus dem Kernbereich des Versuchslagers entnommen. An allen Proben wurde der Gehalt an chemisch gebundenem H₂O und CO₂ ermittelt. Die Proben aus dem Kernbereich wurden lichtmikroskopisch hin-

sichtlich des Glasgehalts, mittels Zeiseltest bezüglich der Mahlbarkeit und auch zementtechnisch entsprechend der Vorgaben der „Hüttensand-Datei“ des FEhS-Instituts charakterisiert. Einige Proben wurden auch rasterelektronenmikroskopisch sowie röntgenographisch untersucht.

Bild 2 zeigt die Probenahmen nach 3 und 27 Monaten Lagerungszeit. Es stellte sich sehr schnell eine Verfestigung des Hüttensands ein, die eine manuelle Probenahme unmöglich machte. Dieses Verhalten ist aus

der Praxis durchaus bekannt. Schon Guttman schrieb 1934 [2], „dass Schlackensand von kalkreichen Schlacken schon bei bloßer Lagerung an der Luft auf den Halden (Haldenschlacke) allmählich zu sehr festen Massen zusammenkittet, die zwecks weiterer Verarbeitung häufig erst gesprengt werden müssen“. Soll verfestigter Hüttensand heutzutage für die Herstellung von Zement oder von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff genutzt werden, wird er üblicherweise von einem Bagger aufgenommen und in einem mobilen Brecher vorzerkleinert.

Ergebnisse

An dieser Stelle soll im Wesentlichen nur auf die Gehalte an chemisch gebundenem H_2O und CO_2 sowie die zementtechnischen Untersuchungen eingegangen werden. Eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse in einem Fachjournal ist für 2017 geplant. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Daten zusammengestellt.

Hüttensand bildet auch ohne zusätzlichen Anreger in Kontakt mit Wasser zwar sehr schnell Reaktionsprodukte aus. Jedoch liefern diese zeitnah nur eine geringe Festigkeit, weshalb im Regelfall für Hüttensand ein alkalischer oder sulfatischer Anreger benötigt wird und daher von einer „latent hydraulischen“ Eigenschaft des Hüttensandglases die Rede ist. In Bild 3 ist deutlich erkennbar, dass während der Lagerungsdauer der Gehalt an chemisch gebundenem Wasser bei den Kernproben signifikant ansteigt, wohingegen er bei den oberflächennah entnommenen Proben nahezu konstant niedrig bleibt. Die Ursache hierfür ist in den stabil guten Hydratationsbedingungen zu sehen, die im Inneren des verdichteten Versuchslagers für den restfeucht (8,2 M.-%) eingelagerten Hüttensand herrschten, wohingegen im Außenbereich je nach Witterung eine temporäre Austrocknung des Hüttensands erfolgen konnte. Auch der Gehalt an chemisch gebundenem CO_2 steigt bei den Kernproben an, jedoch ist der Zuwachs deutlich niedriger. Er dürfte auf eine Carbonatisierung in Folge der langsamen Umwandlung der ersten Hydrationsphasen zurückzuführen sein. Röntgenographisch lassen sich jedoch auch nach 55 Monaten Lagerungsdauer keine Mineralphasen detektieren. Der für Hüttensand bekannte „Glasbuckel“ erfährt de facto keine Veränderung. Dementsprechend lässt sich auch lichtmikroskopisch keine systematische Verringerung des Glasgehalts erkennen (Basiswert: 100 Vol.-%, Endwert nach 55 Monaten: 99 Vol.-%). Damit ist auch nach langer Lagerungszeit die



Bild 2: Probenahme nach 3 (oben) und nach 27 Monaten (unten)

grundsätzliche Voraussetzung für die latent hydraulische Reaktivität des Hüttensands gegeben.

REM-Aufnahmen machen deutlich, dass mit zunehmender Lagerungsdauer die ursprünglich sehr glatten Hüttensandkörner von einer zunehmend dichteren Schicht aus Reaktionsprodukten umhüllt sind (Bild 4). Diese Schicht aus nanoskaligen CSH-Phasen (Bild 5), die auch nach 55 Monaten weniger als $1 \mu m$ dick ist, reicht aus, die einzelnen Körner so weit miteinander zu verbinden, dass die bekannten Verfestigungseffekte auftreten. Länger gelagerter Hüttensand kann unter Luftabschluss eine Blaufärbung aufweisen (Bild 6), die der von mit Hochofenzement hergestelltem Beton entspricht und bei diesem einen Hinweis auf

ein dichtes und damit dauerhaftes Zementsteingefüge darstellt. Wie beim Beton verschwindet die Färbung nach und nach bei Zutritt von Luftsauerstoff.

Für die zementtechnischen Untersuchungen gemäß DIN EN 196 wurden die Hüttensande auf eine weitgehend vergleichbare Korngrößenverteilung und damit Feinheit gemahlen. Der Lageparameter d' der RRSB-Verteilung betrug konstant $17-18 \mu m$. Allerdings sank das Steigungsmaß n von 1,00 auf 0,94 ab, was aus verarbeitungstechnischer Sicht im Regelfall einen Vorteil darstellt. Erwartungsgemäß stiegen die Blainewerte des Hüttensandmehls trotz vergleichbarer Korngrößenverteilung von $4.120 \text{ cm}^2/\text{g}$ stetig auf $6.040 \text{ cm}^2/\text{g}$ an! Die Erklärung hierfür dürfte in der Tatsache

Lagerungszeit	0	3	9	15	21	27	55	Monate
Glasegehalt	100	99	100	100	100	100	99	Vol.-%
CO ₂ + H ₂ O	0,40	0,64	0,59	2,15	2,46	2,14	2,87	M.-%
Reindichte	2,923	2,918	2,924	2,891	2,843	2,863	2,852	g/cm ³
Blainewert	4.120	4.480	4.600	5.460	5.190	5.460	6.040	cm ² /g
d' _{RRSB}	18	17	17	18	18	17	17	µm
n _{RRSB}	1,00	1,01	1,00	0,98	0,97	0,93	0,94	–
Energiebedarf für 4.000 cm ² /g nach Zeisel	83	62	57	47	52	46	44	kWh/t
Ausbreitmaß a ₀	215	212	213	209	202	210	210	mm
Wasseranspruch	26,5	27,5	27,5	28,0	27,5	27,0	26,5	M.-%
R _c 2 d	8,8	9,8	8,4	11,3	13,1	12,8	12,0	MPa
R _c 7 d	28,9	29,9	31,1	31,9	31,7	31,9	30,7	
R _c 28 d	42,3	42,7	41,3	45,8	46,0	45,4	44,1	
R _c 91 d	50,6	50,6	50,8	54,1	52,5	53,1	55,4	

Tabelle 1: Chemische, physikalische und zementtechnische Kennwerte der Hüttensande

liegen, dass die feinstteiligen Reaktionsprodukte gegenüber dem unreaktierten Hüttensandglas nur einen geringen Mahlwiderstand bieten und daher im Feinstanteil des Hüttensandmehls angereichert werden. Frühere Messungen hatten gezeigt, dass die feineren Fraktionen einen deutlich höheren Gehalt an chemisch gebundenem H₂O und CO₂ aufwiesen als die größeren Fraktionen. Die Feinstpartikel – mit im Gegensatz zum zerkleinerten Hüttensandglas sehr rauher Oberfläche – führen, obwohl massenmäßig deutlich untergeordnet, bei der in einem Luftdurchströmbarkeitstest erfolgenden Messung des Blainewerts zu einem hohen Strömungswiderstand, was wiederum zu einem rechnerisch hohen Blainewert führt, der jedoch nicht mehr mit der Korngrößenverteilung des Hüttensandmehls korreliert. Das vorstehend beschriebene Verhalten ist auch der Grund dafür, dass gemäß des auf der Blainewertmessung beruhenden Mahlbarkeitstests nach Zeisel länger gelagerte Hüttensande eine leichtere Mahlbarkeit zu haben scheinen.

Die Festigkeitsentwicklung der Normmörtel, die mit Labor-Hochfenzementen mit einem Hüttensand/Klinker-Verhältnis von 75/25 hergestellt worden waren, zeigt Bild 7. Neben den Einzelwerten sind auch die mittleren Festigkeiten für die jeweils 4 Prüftermine zwischen 2 und 91 Tagen dargestellt. Man erkennt, dass im Verlauf der Lagerungsdauer bei vergleichbarer Hüttensandfeinheit kein Festigkeitsabfall auftritt. Darüber hinaus lässt sich erkennen,

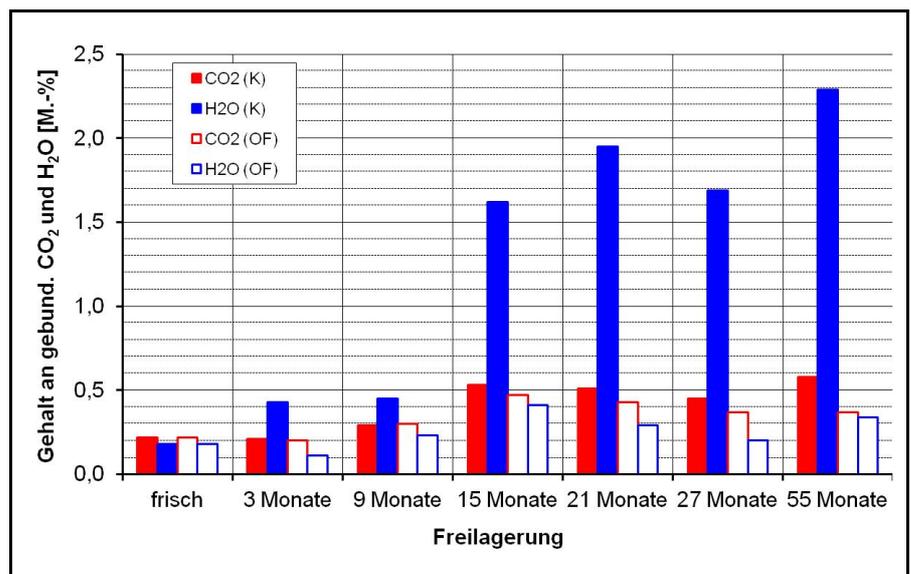


Bild 3: Gehalt an chemisch gebundenem CO₂ und H₂O der Hüttensande aus dem Kernbereich (K) und dem oberflächennahen Bereich (OF) des Versuchslagers

dass es sogar Festigkeitszunahmen gibt, die insbesondere nach 2 Tagen signifikant ausfallen. Die Ursache hierfür kann darin liegen, dass die im Feinstanteil angereicherten inerten Vorhydratationsprodukte als Keimbildner für die Klinkerkomponente der Hochfenzemente dienen und somit dessen Reaktion und Festigkeitsbeitrag beschleunigen.

Die Verarbeitungseigenschaften der Zemente (Wasseranspruch) bzw. Mörtel (Ausbreitmaß) zeigten erwartungsgemäß keine Veränderungen, da der hierbei ent-

scheidende Parameter Korngrößenverteilung nahezu konstant blieb.

Schlussfolgerungen

Die für eine Hüttensandlagerung im Freien über einen Zeitraum von 55 Monaten ermittelten Ergebnisse des Praxisversuchs bestätigen vollumfänglich die 2012 vorgestellten und auf Laborlagerungen beruhenden Ergebnisse. Auch wenn keine beton-technischen Untersuchungen durchgeführt wurden, so lassen die Ergebnisse der mörteltechnischen Untersuchungen keine

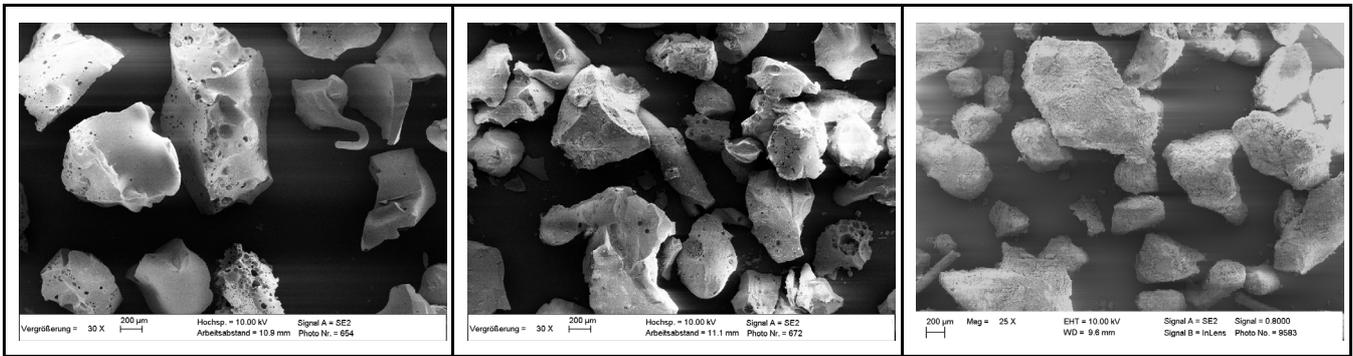


Bild 4: REM-Aufnahmen von Hüttensandkörnern nach einer Lagerungszeit von 0, 9 und 55 Monaten (v. l. n. r.)

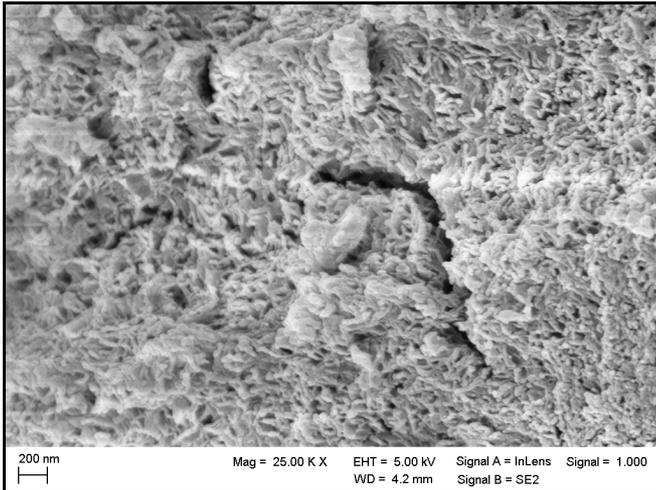


Bild 5: CSH-Phasen auf Hüttensandkörnern nach 55 Monaten Lagerungszeit



Bild 6: Typische Blaufärbung von verfestigtem Hüttensand nach 55 Monaten Lagerungszeit

Beeinträchtigung der Hüttensandreaktivität erkennen, sofern bei der Mahlung des Hüttensands auf eine konstante Korngrößenverteilung geachtet wurde. Der Blainwert hingegen besitzt für gemahlene Alt-Hüttensand hinsichtlich dessen Feinheit

keinerlei Aussagekraft. Daher ist (leider) auch keine leichtere Mahlbarkeit länger gelagerten Hüttensands zu beobachten, denn das größte Volumen des Hüttensandglases erfährt während der Lagerungszeit keine Veränderung. Ein guter und leicht zu

ermittelnder Indikator für den „Frischezustand“ eines Hüttensands ist dessen Gehalt an chemisch gebundenem H₂O und auch CO₂, wie schon frühere Arbeiten des FEhS-Instituts zeigen konnten [3].

Dank

Das FEhS-Institut dankt der AG der Dillinger Hüttenwerke, ohne deren Unterstützung die vorstehend diskutierten Arbeiten nicht möglich gewesen wären.

Literatur

- [1] Ehrenberg, A.: Verliert gelagerter Hüttensand seine Reaktivität? Cement International 10 (2012) Nr. 4, S. 64-79
- [2] Guttmann, A.: Die Verwendung der Hochofenschlacke. Düsseldorf. 2. Auflage, 1934
- [3] Lang, E.: Prüfverfahren zur Beurteilung des Frischzustands von Hüttensand. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 8224, 1992

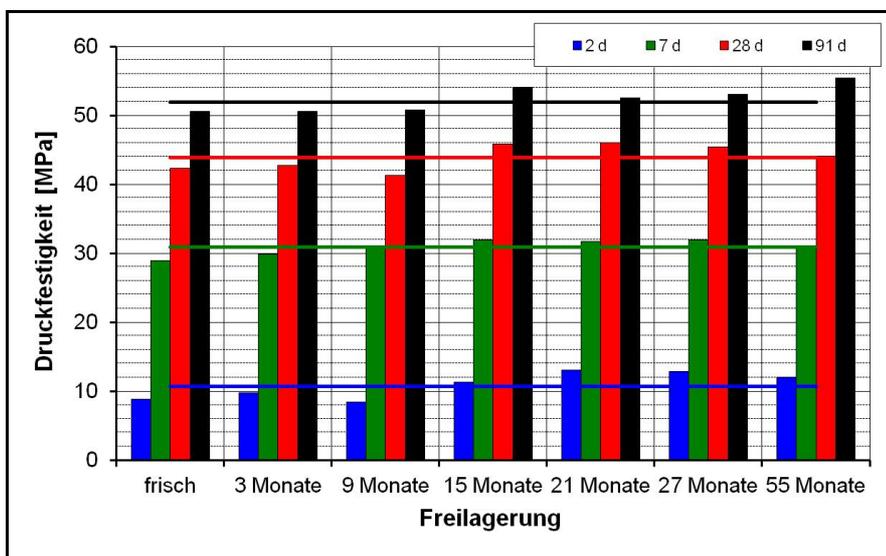


Bild 7: Festigkeitsentwicklung der Normmörtel mit Hochofenzement (HS/KL = 75/25)