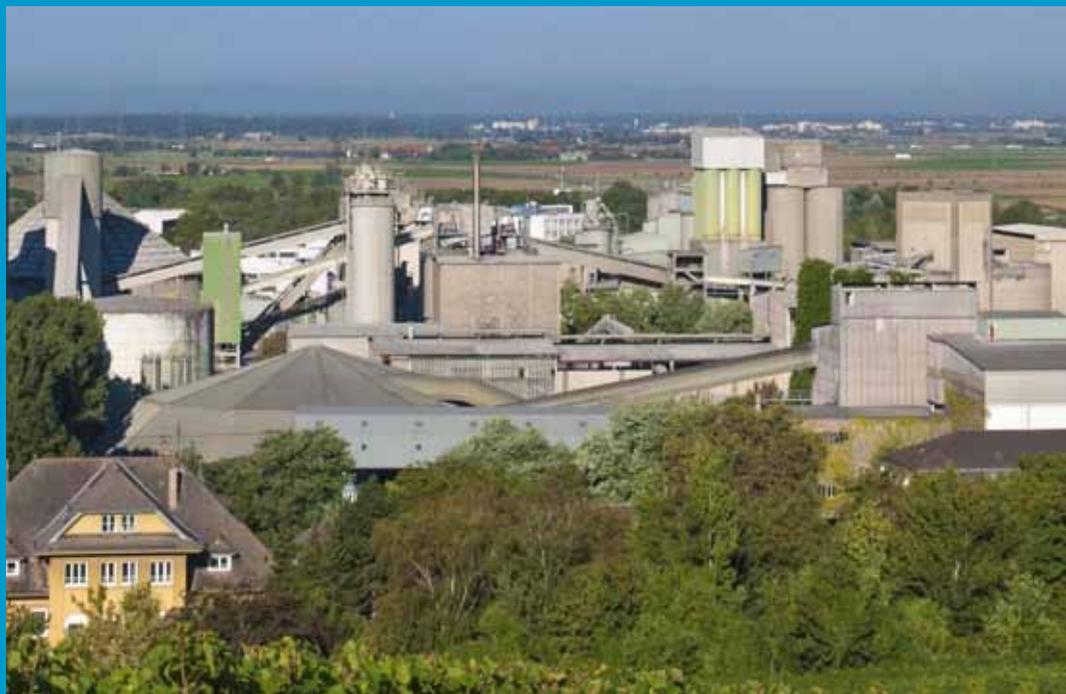


ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017

Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie



Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie

Die international führende Fachzeitschrift für die gesamte Bindemittelindustrie und deren Zulieferer aus dem Maschinen- und Anlagenbau



ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017
Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie

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

Impressum

Herausgeber:
Bauverlag BV GmbH, Gütersloh

Redaktionelle Betreuung:
Anett Fischer, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
Anke Bracht, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh

Bildnachweise:
Titelbild: HeidelbergCement AG
Rückseite: Anett Fischer, ZKG

Gestaltung, Satz und Litho:
Bauverlag BV GmbH, Gütersloh

Druck:
Bösmann Medien und Druck GmbH & Co.KG, Detmold

Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017
Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie

© 2016 Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
Geschäftsführer: Karl-Heinz Müller
Eingetragen im Amtsgericht Gütersloh HRB 4172

ISBN 978-3-7625-3678-9
1. Auflage
www.zkg.de



ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017

Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie

EDITORIAL

6 HeidelbergCement

Maria Galani, Referentin Nachwuchsmanagement,
Personal Deutschland, HeidelbergCement AG

7 ZKG International

Dipl.-Ing. Anett Fischer, ZKG International

EXCURSION

8 Was macht die Seilbahn im Zementwerk?

Dipl.-Ing. Anett Fischer, ZKG International

PRODUCTION

14 Zementvermahlung und Sortenherstellung

Dr. Joachim Harder, OneStone Consulting S.L.,

MATERIALS

28 Bewertung von Rohstoffen für die industrielle Herstellung von Kalk

Gabriele Vola, Cimprogetti S.p.A.,
Luca Sarandrea, Cimprogetti S.p.A.

ENGINEERING

38 Aumund Group equipment and solutions in the cement industry

Christian Spättmann, Aumund Fördertechnik GmbH

PROCESS

50 Smarte Feuerfestlösung für spannungsbelastete Drehöfen

Dipl.-Ing. Dr. Hans-Jürgen Klischat,
Dr. Carsten Vellmer, Dipl.-Ing. Holger Wirsing,
Refratechnik Cement GmbH

PLANT REPORT

59 Transport, loading and filling of bulk material – with significantly less dust formation

Beumer Group

PROCESS

62 Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in modernen Zementwerken

Dr. Hubert Baier, WhiteLabel-TandemProjects e.U.

72 Betriebserfahrungen mit der Pfeiffer MVR-Walzenschüsselmühle und dem MultiDrive®

Dr.-Ing. Caroline Woywadt, Bernd Henrich,
Gebr. Pfeiffer SE, Kaiserslautern



// Seite 8

Was macht die Seilbahn im Zementwerk?



// Seite 14

Zementvermahlung und Sortenherstellung



// Seite 50

Smarte Feuerfestlösung für spannungsbelastete Drehöfen



// Seite 72

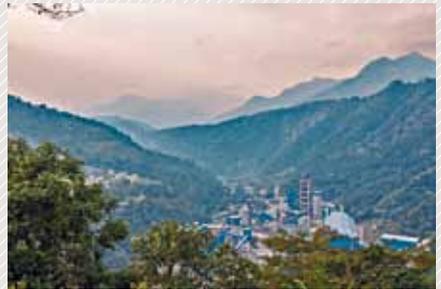
Betriebserfahrungen mit der Pfeiffer MVR-Walzenschüsselmühle und dem MultiDrive®

	PLANT REPORT
80	Coal dust dosing without compromises Gamal El-Laithy, El-Sewedy Cement Company, Hassan Jradi, FLSmidth Pfister GmbH
	MARKETS AND TRENDS
84	Impact of clinker coolers on downstream equipment Dr. Joachim Harder, OneStone Consulting S.L.
	PROCESS
96	Anforderungen an die umweltgerechte und nachhaltige Herstellung von Zementklinker Dr. Heiko Schürmann, KHD Humboldt Wedag
108	Herstellung von Weißzement nach dem neuesten Stand der Technik Claus Bech, Cementir Holding
	INTERVIEW
116	Reduzierung der Quecksilberemissionen im Zementwerk Wietersdorf Interview mit Dipl.-Ing. Florian Salzer, W&P Zement GmbH
	PROCESS
120	Breaking the mercury cycle for emission abatement with the "ExMercury – Splitted Preheater System" Dr. Stefan Kern ¹ , Dipl.-Ing. Florian Salzer ² , Dipl.-Ing. Holger Reinhold ³ ¹ A TEC Production and Services GmbH, ² W&P Zement GmbH ³ Process Technology Industrial Minerals, Scheuch GmbH
	MATERIALS
130	Limestone requirements for high-limestone cements Gerd Bolte, Maciej Zajac, HeidelbergCement Technology Center
	UNTERNEHMENS PORTRAITS/ STELLENMARKT
139	HeidelbergCement
140	Aumund
142	Gebr. Pfeiffer
144	Hoffmeier
146	Beumer
147	Loesche
148	FLSmidth Pfister
150	Refratechnik



// Seite 84

Impact of clinker coolers on downstream equipment



// Seite 96

Anforderungen an die umweltgerechte und nachhaltige Herstellung von Zementklinker



// Seite 116

Reduzierung der Quecksilberemissionen im Zementwerk Wietersdorf



// Seite 120

Breaking the mercury cycle for emission abatement with the "ExMercury – Splitted Preheater System"

Bauen Sie Ihre Zukunft mit HeidelbergCement

Seit seiner Gründung im Jahre 1873 kann der international tätige Baustoffhersteller HeidelbergCement auf erfolgreiche und dynamische 140 Jahre zurückblicken. Aus dem einstmals süddeutschen Zementhersteller ist mittlerweile ein im DAX gelisteter, geografisch breit aufgestellter „Global Player“ im Baustoffbereich geworden. Das Unternehmen durchlief seit der Grundsteinlegung eine rasante Entwicklung, die noch immer andauert – erst in diesem Jahr wurde der Konzern durch die Übernahme des italienischen Baustoffunternehmens Italcementi maßgeblich erweitert.

Mit Fokus auf den Kernbereichen Zement und Zuschlagsstoffe ist das Unternehmen auch in den Sparten Beton- und Betonprodukte sowie Baustoffe und Asphalt aktiv. In der Weltrangliste steht HeidelbergCement im Bereich Zuschlagsstoffe auf dem 1. Platz, bei Zement auf Platz 2. Im Bereich Beton trägt das Baustoffunternehmen die Bronzemedaille. Sitz der Hauptverwaltung und des zentralen Forschungslabors ist Heidelberg bzw. das in unmittelbarer Nähe liegende Leimen.

Unsere Produkte werden überall auf der Welt gebraucht. Beton ist nach Wasser einer der wichtigsten Grundstoffe für eine wachsende Gesellschaft. Er ist nicht nur eine tragende Säule für die Entwicklung der Infrastruktur, sondern steht als grundlegender Baustoff auch für das Grundrecht des Menschen auf einen festen und sicheren Wohnsitz. Als international aufgestelltes Unternehmen sind wir in vielen Zukunftsmärkten auf der Welt aktiv und erfolgreich. Mit unseren rund 62.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind wir in ca. 60 Ländern tätig und haben bereits auf fünf Kontinenten Fuß gefasst. Dabei wird das „Wir“ bei HeidelbergCement groß geschrieben: Durch den ständigen Austausch von technischem und wirtschaftlichem Know-how innerhalb des Konzerns entstehen enorme Synergien und ein starkes, interkulturelles Netzwerk. Durch unseren rasanten internationalen Wachstum und kulturell bedingten Anforderungen, sehen wir uns immer wieder vor neuen Herausforderungen. Wer einen routinierten Arbeitsalltag sucht, wird bei uns nicht fündig. Vielfältige Aufgabenstellungen, die Raum für Eigeninitiative und Innovation bieten, sind bei uns an der Tagesordnung. Flache Hierarchieebenen ermöglichen Neueinsteigern, schnell Verantwortung zu übernehmen und im internationalen Umfeld erste Erfahrungen zu sammeln. Natürlich ist auch unsere Unternehmenskultur stark durch das dynamische Wachstum geprägt.

Was Sie als Bewerber/in mitbringen sollten? Neben Schnelligkeit, Transparenz und Effizienz werden vor allem Umsetzungsstärke und eine große Nähe zum Geschäft verlangt. Das bedeutet in der Praxis aber auch kurze Entscheidungswege, viel Verantwortung und große Gestaltungsmöglichkeiten für den einzelnen. Sie können eine solide fachliche Ausbildung vorweisen und bringen ein ausgeprägtes analytisches Denken aber auch Bodenständigkeit und Pragmatismus mit? Dann würden wir Sie gerne kennenlernen! Hohe Sozialkompetenz, Mobilität sowie Offenheit für andere Kulturen und die Bereitschaft, sich in einem internationalen Umfeld zu beweisen, sind weitere wichtige Voraussetzungen, um eine Karriere bei uns zu starten.

Zusammengefasst heißt das: Wer gut ausgebildet und mobil ist, Verantwortung übernehmen und etwas bewegen will, der passt zu uns. Ergreifen Sie die Chance und bauen Sie Ihre Zukunft mit HeidelbergCement!



Maria Galani

Maria Galani, Referentin Nachwuchsmanagement, Personal Deutschland, HeidelbergCement AG

Zement und erfolgreiche Karriere – ein perfektes Duo!

Auch 2016 nutzen Studenten der Fachbereiche Maschinenbau und Wirtschaft von der Hochschule Koblenz sowie der Fachbereiche Verfahrenstechnik und Rohstoffe von der TFH Bochum die Gelegenheit, sich über das Thema Zement und die Karrierechancen in einem Zementwerk bzw. bei den Zulieferern der Branche zu informieren. Gemeinsam mit unseren teilnehmenden Industriepartnern führten wir, die ZKG INTERNATIONAL, am 14. und 15. Juni unsere traditionelle Studenten-Fachexkursion durch. Die Werksbesichtigung ging in diesem Jahr in das rund 10 km von Heidelberg entfernte Stammwerk der HeidelbergCement AG nach Leimen.

Die Zementbranche und ihre Zulieferer bieten Ingenieur-, Bachelor- und Masterabsolventen gute Chancen, in hochmodernen Anlagen Verantwortung zu übernehmen und vor allem, selbstständige Entscheidungen zu treffen. Das zeigten die Vertreter der Maschinen- und Anlagenbauer in ihren Vorträgen zum Teil an ihrer eigenen Karriereentwicklung auf. Schnell verantwortet ein Ingenieur Produktionsanlagen bzw. Projekte im Wert von mehreren Millionen Euro. Auch in diesem Jahr waren die Studierenden wieder begeistert von der Größe und Leistung der automatisierten Anlagen im Zementwerk. Die Fachexkursionsteilnehmer erfuhren in der zweistündigen Werksführung in Leimen viel Interessantes und Neues aus der Praxis eines Zementwerkes. Die informativen Vorträge der Industriepartner rundeten das Programm perfekt ab. In unserem diesjährigen Studentenhandbuch, das auch jeder Teilnehmer der Fachexkursion bekommt, haben wir eine große Bandbreite interessanter Berichte aus der Branche zusammengefasst.

Liebe Studierende, die internationale Zementsprache ist Englisch. Die Zement- und ihre Zuliefererindustrie sind global aufgestellt. Das bietet viele Möglichkeiten, auch im Ausland Erfahrungen zu sammeln. Um Sie darauf einzustimmen, werden wir zukünftig mehr und mehr Beiträge in Englisch veröffentlichen. So können Sie sich nach und nach in das Fachvokabular einarbeiten. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre, alles Gute und viel Erfolg für Ihre Zukunft und hoffe, dass wir uns in der Branche sehen.



Ihre
Anett Fischer
Editor-in-Chief ZKG International



Anett Fischer



Foto: Jens Maturus

Der spannenden Frage, „Was macht die Seilbahn im Zementwerk?“ gingen Studenten der Fachbereiche Maschinenbau und Wirtschaft von der Hochschule Koblenz sowie der Fachbereiche Verfahrenstechnik und Rohstoffe von der TFH Bochum nach. Mehr als 25 Studenten und ihre Betreuer waren der Einladung der ZKG International und der teilnehmenden Industriepartner am 14. und 15. Juni 2016 nach Heidelberg gefolgt. Die Werksbesichtigung ging in diesem Jahr in das rund 10 km von Heidelberg entfernte Stammwerk der HeidelbergCement AG nach Leimen.

TEXT Dipl.-Ing. Anett Fischer, ZKG International

ZKG-FACHEXKURSION, LEIMEN (14.06.–15.06.2016)

Was macht die Seilbahn im Zementwerk?

1 Von der Theorie in die Praxis

Die Veranstaltung eröffnete Anett Fischer, Editor-in-Chief of ZKG International, mit einer kurzen Vorstellung der Referenten der vier Industriepartner Aumund Fördertechnik GmbH, FLSmidth Pfister GmbH, Gebr. Pfeiffer Se und thyssenkrupp Industrial Solutions AG.

Am ersten Tag stand der Besuch des Zementwerkes im Mittelpunkt. Dr. Ulrich Schneider, Werkleiter HeidelbergCement AG, Werk Leimen, stellte in seinem Vortrag „Die Herstellung von Zement – vom Rohstoff zum Endprodukt“ das 1896 gegründete Stammwerk Leimen vor. Das



Fotos: Anett Fischer

1 Aufmerksam verfolgten die Studierenden die Ausführungen von Dr. Ulrich Schneider, Werkleiter HeidelbergCement AG, Werk Leimen

Werk gewinnt Kalkstein und Mergel in seinem eigenen Steinbruch. Der auf Schottergröße zerkleinerte Rohstoff wird über eine Seilbahn ins Zementwerk transportiert - eine kostenintensive Lösung. Da sich das Werk aber direkt im Ort befindet, wird so ein umfangreicher Lkw-Transport mit all seinen Nachteilen vermieden. Der so angelieferte Kalkstein wird in einem Mischbett, das ungefähr einem Wochenvorrat für die Klinkerproduktion sicherstellt, schichtweise eingelagert. Dem gebrochenen Material werden Eisenoxid und Sand zugegeben, bevor es in den Rohmühlen getrocknet und mehlfein gemahlen wird. Gebrannt wird in zwei Lepolöfen mit Kapazitäten von 1000 t/Tag bzw. 1500 t/Tag. Eines der wichtigsten Themen bei der Zementproduktion ist der Einsatz von Sekundärroh- und -brennstoffen. 2015 wurden beispielsweise rund 30 % der Primärbrennstoffe durch Tiermehl, Kunststoffe und Altöl ersetzt und damit etwa 10 % der Brennstoffkosten eingespart. Der Zementklinker wird in Klinkersilos gelagert und anschließend unter Zugabe von Zuschlagstoffen gemahlen. Wurden im Rekordjahr 1964 mehr als 1 Mio. t Zement produziert, stellen die derzeit etwa 120 Mitarbeiter und zehn Auszubildende 2015 rund 619000 t Zement in zehn Sorten her. Im Werk werden verschiedene Bindemittel eingesetzt. Schneider zeigte sich abschließend überzeugt: „Cement is sexy - oft wissen wir es einfach nicht!“

Im Anschluss an den Fachvortrag präsentierte Natalie Greineck, Leiterin Nachwuchsmangement HeidelbergCement AG, den Studierenden den Konzern. Dieser ist bisher in 42 Ländern an 3200 Standorten tätig und beschäftigt 45000 Mitarbeiter. Mit der Übernahme von Italcementi werden rund 60000 Mitarbeiter in 60 Ländern für die HeidelbergCement AG tätig sein, für die 2015 das beste Jahr nach der Finanzkrise war. Greineck zeigte den Studierenden Entwicklungsmöglichkeiten, beginnend von Praktika über Abschlussarbeiten bis hin zu Traineeprogrammen, wie auch Karrierechancen bei HeidelbergCement auf.

Die gemeinsame Mittagspause wurde zu ersten Gesprächen zwischen Studierenden und



2 Der Zementherstellungsprozess wurde vom Rohstofftransport an erläutert

Industriepartnern genutzt. Danach ging es nach Leimen und dort in zwei Gruppen geführt durch das Werk. Die Exkursion stieß bei den Studierenden auf großes Interesse. Jetzt endlich wurde auch das Geheimnis um die Seilbahn gelüftet, die über die Köpfe der Studierenden hinweg den Kalkstein ins Werk transportierte. Die jungen Menschen waren von der Herstellungstechnologie und den Prozessabläufen in Leimen, dem ältesten Werk des Konzerns, sehr beeindruckt. Viele der Anlagen haben schon eine lange Lebenszeit hinter sich und funktionieren immer noch im harten täglichen Produktionsalltag.

2 Gruppenarbeit und Speed Dating

Dass alle gut aufgepasst und mit Interesse das Werk erkundet hatten, zeigte sich nach der Rückkehr nach Heidelberg. In vier Gruppen aufgeteilt standen die Studierenden vor der Herausforderung, den Produktionsablauf im Zementwerk bildlich zu ordnen. Diese Herausforderung meisterten alle relativ schnell.

Neben einem Job-Board, an dem die Firmen ihre offenen Stellen bzw. Bachelor- oder Masterarbeiten aushängen konnten, stand am Nachmittag noch ein Speed-Dating auf dem Programm. Ein wichtiges Ziel der Veranstaltung ist es, teilnehmende Unternehmen und Studenten gut miteinander zu vernetzen. In vier Gruppen aufgeteilt, hatten die Vertreter der einzelnen Firmen Gelegenheit, sich zu präsentieren, und die



3 Nach der Werksbesichtigung ging es darum, den Herstellungsprozess anhand von Schaubildern in die richtige Reihenfolge zu bringen

Studierenden konnten Fragen stellen. Das kam bei allen sehr gut an. Beim gemeinsamen Abendessen in der Kulturbrauerei Heidelberg wurden die Kontakte weiter vertieft.

3 Anlagenbau für die Zementindustrie

Der zweite Tag war ganz den Vorträgen der vier Industriepartner gewidmet, die ihre Unternehmen, ihre Tätigkeiten und die Karrieremöglichkeiten vorstellten.

3.1 FLSmidth Pfister stellt sich vor

Den Anfang machte Markus Pfeil, FLSmidth Pfister GmbH mit seinem Vortrag „FLSmidth Pfister stellt sich vor“. Sein Anliegen war es, den Studierenden zu zeigen, dass Karrieren ganz unterschiedlich verlaufen können. Am Beispiel seiner Vita machte der Area Sales Manager deutlich, dass Auslandsaufenthalte sehr bereichernd sind.

Pfeil gab den Zuhörern drei Tipps: 1. Sammeln Sie internationale Erfahrungen, 2. Nicht jede Karriere läuft immer nur bergauf, 3. Seien Sie immer loyal zu Ihrer Firma, dann können Sie auch wiederkommen.

Im Anschluss an die Darstellung seiner persönlichen Erfahrungen präsentierte er das Unternehmen FLSmidth Pfister. Die Hauptgeschäftsfelder des 1894 gegründeten Maschinenbauers sind die Zement-, Kraftwerks-, Stahl- und Mineralienindustrie. Von den bekannten Dosier-Rotorwagen sind bisher rund 2700 erfolgreich im Einsatz. Ein Einsatzgebiet ist z.B. die Dosierung alternativer Brennstoffe im Zementwerk. Pfeil liefert Lösungen, die sowohl die Lagerung, Dosierung als auch den pneumatischen Transport umfassen und das weltweit. Das Unternehmen hat neben dem Stammsitz in Augsburg auch Produktionsstätten in China und Indien. In Indien werden



4 Beim Speed-Dating konnten die Studierenden die einzelnen Firmenvertreter in kleiner Runde befragen

inzwischen jährlich 400 bis 500 Dosierbandwagen gefertigt. Arbeiten bei FLSmidth Pfister mit seinen insgesamt 500 Mitarbeitern, 120 davon in Augsburg, heißt, in flachen Hierarchien tätig zu sein. Aber auch beim Mutterkonzern FLSmidth gibt es vielfältige Karrieremöglichkeiten.

3.2 Arbeiten im internationalen Anlagenbau – ein Einblick

Kerstin Finlay und Dr.-Ing. Rodrigo Gomez, beide thyssenkrupp Industrial Solutions AG, informierten die Studierenden gemeinsam. Zuerst stellte die Personalreferentin den Konzern mit

seinen mehr als 150000 Mitarbeitern und den Geschäftsbereich Industrial Solutions mit ihren 19000 Mitarbeitern vor. Die Schwerpunkte der Industrial Solutions, einem klassischen Maschinenbau- und Engineeringunternehmen, liegen bei Mining, Cement and Services. Der Anteil an Ingenieuren ist mit 45 % hoch. Diese entwickeln von einzelnen Anlagen bis hin zu kompletten Linien Lösungen für die Branche. Ein großes Projekt ist derzeit der Bau von zwei 10000-t-Zementlinien in Saudi-Arabien.

Als Prozessingenieur informierte Gomez die Studierenden über seine Aufgaben im Unterneh-

STATEMENT

Anne Passen, Aumund Fördertechnik GmbH



Seit mehreren Jahren beteiligt sich die Aumund Fördertechnik GmbH, Rheinberg, an der jährlich stattfindenden Fachexkursionen der Fachzeitschrift ZKG International. In diesem Sommer führte die Exkursion, an der Studierende aus Bochum und Koblenz teilnahmen, zum Werk Leimen der HeidelbergCement AG. Die Exkursion bietet stets eine interessante Kombination aus ausführlicher Werksbesichtigung, bei der Studierenden die Produktionsverfahren von der praktischen Seite kennenlernen, und Fachvorträgen, in denen sich namhafte Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau vorstellen, so auch Aumund Fördertechnik.

Die Fachexkursion ist für Aumund Fördertechnik GmbH eine Win-Win-Situation: Einerseits sponsert Aumund und andere teilnehmenden Unternehmen diese Veranstaltung, andererseits bietet sie eine rund zweitägige Plattform, um mit den Studenten fachlich und persönlich in Kontakt zu treten. Anne Passen, Gruppenleiterin in der Aumund-Konstruktion, gab den rund zwei Dutzend Studierenden in ihrem Vortrag anhand von konkreten Beispielen einen Einblick in den praxisbezogenen Projektdurchlauf. In persönlichen Gesprächen bereiteten die Vortragenden außerdem aus ihrem beruflichen Erfahrungsschatz und zeigten geeignete Tätigkeitsfelder auf. „In Zeiten von Fachkräftemangel bieten diese Veranstaltungen eine gute Gelegenheit, mit angehenden Ingenieuren schon während des Studiums Kontakt aufzunehmen“, resümierte Anne Passen.



5 Die gemeinsame Abendveranstaltung bot Gelegenheit zum besseren Kennenlernen

men. Eines seiner Themengebiete ist die Verminderung von CO₂-Emissionen in der Zementindustrie. Er präsentierte eine App, die 2016 fertig sein soll. Ziel der Entwicklung war: Compare CO₂ emissions of different configurations of a cement plant. Er legte den jungen Menschen ans Herz, möglichst viele Praxiseinsätze zu absolvieren, da man dabei sehr viel lerne. Important are teamwork, expertise and responsibility.

Kerstin Finlay erläuterte ausführlich über die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten im Unternehmen, angefangen von Bachelorarbeiten über Praktika und weitere.

3.3 Der Projektgenieur bei GPSE – Einstiegs und Entwicklungsmöglichkeiten

Auch die Vertreter der Gebr. Pfeiffer SE, Christoph Geupel, Leiter Finanzen und Personal, und Carsten Vieth, Personalreferent, informierten als Duo.

Geupel stellte das 1864 gegründete familiengeführte Unternehmen vor, das knapp 500 Mitarbeiter beschäftigt und 2015 einen Umsatz von mehr als 140 Mio. € gemacht hat. Gebr. Pfeiffer SE ist international bekannt für seine Walzenschüsselmöhlen. Bereits 1894 wurde die erste Mühle für die Zementindustrie gebaut, heute sind weltweit 2500 Mühlen im Zement- und Kraftwerksbereich im Einsatz. Die 2011 verkaufte MVR 6700 C-6 Mühle ist nach Geupels

Angaben die mit der größten Leistung weltweit. Gebr. Pfeiffer SE ist mit Tochtergesellschaften in den USA, in Brasilien und Indien international aufgestellt. Pfeiffer fertigt, z.B. mit einer eigenen Gießerei, mit hoher Präzession immer noch in Deutschland.

Carsten Vieth betonte, dass die Weiterbildung mit Unterstützung des Unternehmens ein Anliegen von Pfeiffer SE sei. Werkstudenten werden gefördert, Gebr. Pfeiffer SE vergibt Stipendien. Gesucht werden, wie bei den anderen drei Industriepartnern auch, Vertriebs-, Projekt- und Inbetriebnahmeingenieure. Flache Hierarchien, zukunftssichere Arbeitsplätze, ein aktives Gesundheitsmanagement, Gleitzeit und Arbeitszeitmodelle machen einen Einstieg bei Gebr. Pfeiffer SE attraktiv.

3.4 Inhalte, Aufgaben, Verantwortungen – Praxisbezogener Projektdurchlauf bei Aumund

Anne Passen präsentierte das 1922 gegründete Unternehmen Aumund Fördertechnik GmbH, das heute in der 3. Generation geführt wird. Die Gruppenleiterin Konstruktion Fördertechnik erläuterte das Produktportfolio des Unternehmens, das u.a. Klinkerlager, Ketten- und Gurtbecherwerke sowie Kurzzellenbänder für die Zementindustrie und deren Anwendungsbereiche umfasst. An einem Beispiel im spanischen Balboa

skizzierte sie einen typischen praxisbezogenen Projektablauf bei Aumund – von der Planung über die Montage und deren Überwachung durch Aumund bis hin zur fertigen Anlage. Anhand eines Fließbildes zeigte Passen auf, wie der Weg von der Kundenanfrage, der Angebotserstellung, Auftragsershalt, Konstruktion, Montage und Inbetriebnahme läuft. Auch das Thema Ersatz- und Verschleißteile spielt eine wichtige Rolle bei Aumund. Passen, die seit 2013 für die Franz-Walter Aumund-Stiftung tätig ist, gab den Studierenden einen Überblick über die Entwicklung der Firma und informierte über Einstiegsmöglichkeiten bei der Aumund Gruppe. Dazu gehören Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten.

Nachwuchs für die Zementindustrie und ihre Zulieferer begeistern

Unter diesem Motto veranstaltet die ZKG International nun schon seit vielen Jahren die ZKG-

Fachexkursion. Gemeinsam mit treuen Industriepartnern begeistern wir Studierende für eine Branche, die zumeist nicht auf der Wunschliste als Arbeitgeber steht

Wir danken den Firmen, Aumund Förder-technik GmbH, FLSmidth Pfister GmbH, Gebr. Pfeiffer Se und thyssenkrupp Industrial Solutions AG, die mit ihrem Beitrag diese Veranstaltung überhaupt erst möglich machen. Unser Dank gilt auch der HeidelbergCement AG und speziell dem Zementwerk Leimen für die Unterstützung und die Möglichkeit, ein Zementwerk in der Praxis kennenlernen zu dürfen.

Alle gemeinsam bieten wir zukünftigen Führungsnachwuchs die Chance, sich ein Bild über die Zement- und Zuliefererindustrie zu machen und erste Kontakte zu knüpfen. Auch 2017 planen wir eine weitere Fortsetzung der erfolgreichen Veranstaltung.

www.zkg.de

STATEMENTS

Annemarie Görner, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum

Wir als THGA freuen uns, dass wir nun schon seit vielen Jahren an der ZKG-Fachexkursion teilnehmen können. Für Studierende im 6. Semester ist es eine sehr gute Möglichkeit, und vom Studienverlauf her der richtige Zeitpunkt, um profunde Informationen zur Zementherstellung zu erhalten. Neben dem Zementwerksbesuch runden die Referenten aus den Unternehmen, die Anlagen für den Herstellungsprozess entwickeln, auslegen und liefern, das Programm ab. Durch die Programmgestaltung ergeben sich viele Möglichkeiten, mit den Vortragenden ins Gespräch zu kommen und konkrete Fragen zum Anforderungsprofil, den Einstieg in das Unternehmen und die Tätigkeitsbereiche stellen zu können.

Unser Fazit ist: Die Zementindustrie ist ein spannender Bereich, der für Absolventen aus Verfahrenstechnik und Maschinenbau sehr viele Verfahrensschritte anbietet, in denen sie ihr Wissen aus dem Studium einbringen und weiterentwickeln können. Wir bedanken uns beim Bauverlag, der HeidelbergCement AG und den unterstützenden Unternehmen für das interessante Programm.



Prof. Dr.-Ing. Detlev Borstell, Hochschule Koblenz

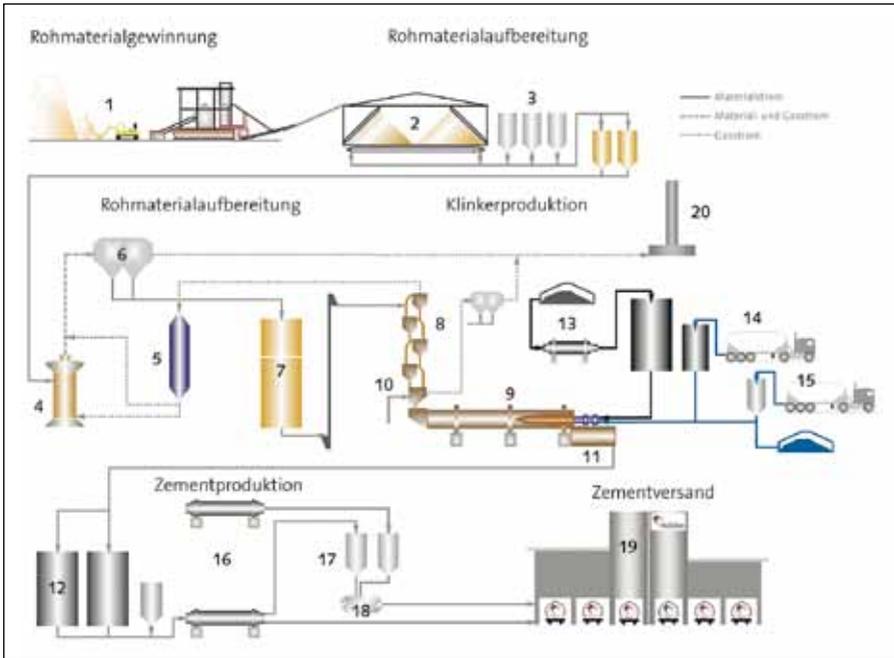
Die ZKG-Fachexkursion bietet den Studierenden eine gute Gelegenheit, eine interessante, aber oft unbekannte Branche kennenzulernen.

Zum Ende des Studiums gilt es, einen Arbeitgeber zu finden. In Rahmen der Exkursion bieten sich die Vertreter der Branche den Absolventen als zukünftige Arbeitgeber an und stellen sich vor. Persönliche Karrierebeispiele der Referenten bieten den Studierenden konkrete Antworten auf die Frage: „Wie könnte mein Einstieg in diese Branche aussehen.“

Highlights der Exkursion sind auf der einen Seite die technischen Inhalte durch die Vorträge und den Besuch des Zementwerkes und auf der anderen Seite das Kennenlernen der Berufseinstiegsmöglichkeiten.

Der Herstellungsprozess

TEXT Dr. Joachim Harder, OneStone Consulting S.L., Barcelona/Spanien



1 Fließbild eines Zementwerkes

- | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 Steinbruch, Brecher | 6 Prozessfilter | 11 Klinkerkühler | 16 Zementvermahlung |
| 2 Mischbetten | 7 Homogenisiersilos | 12 Klinkerlager | 17 Zumahlstoffe |
| 3 Zuschlagstoffe | 8 Zyklonvorwärmer | 13 Kohlevermahlung | 18 Zementmischer |
| 4 Rohmaterialvermahlung | 9 Ofensystem | 14 Kunststoffschnittzel | 19 Zementsilos |
| 5 Abgas-Konditionierung | 10 Calzinator | 15 Klärschlamm | 20 Kamin |

Übersicht

Ein modernes Zementwerk produziert 24 h am Tag an über 330 Tagen im Jahr. Lediglich für die jährliche Anlagenrevision ist ein solches Werk nicht in Betrieb. Die Überholung ist nötig, weil die Rohmaterialien, Zwischen- und Endprodukte der Zementherstellung sehr verschleißend sind und deshalb einen Austausch einzelner Anlagenkomponenten erfordern. Auf der anderen Seite möchte man Anlagenstopps möglichst vermeiden, weil die Kernkomponente eines Werkes (der

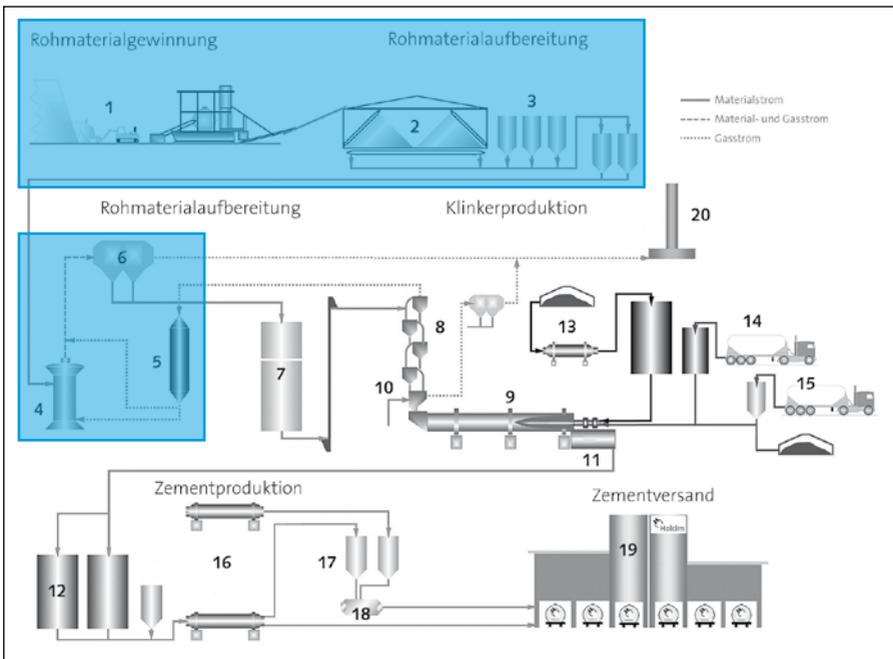
Drehrohren) auf Temperaturen von über 1000 °C aufgeheizt wird und häufige An- und Abfahrten mit erheblichen Energieverlusten verbunden sind. Außerdem führen solche Stopps generell zu einer ungleichmäßigeren Anlagenfahrweise, zu Einschränkungen in der Produktqualität und einem Anwachsen der Emissionen.

Bild 1 zeigt ein vereinfachtes Fließbild eines modernen Zementwerkes nach dem Trockenverfahren. Üblicherweise unterteilt man den Herstellungsprozess in vier Prozessschritte. Im

ersten Schritt werden die Rohmaterialien gewonnen und aufbereitet. Daran schließt sich die Calzinierung der Rohmaterialien mit der Klinkerproduktion an. Im dritten Schritt wird der Klinker mit anderen Zuschlagstoffen zu Zement vermahlen. Der letzte Prozessschritt umfasst die Zementlagerung, Verpackung und den Versand. Damit sind die einzelnen Anforderungen bei der

Zementherstellung aber nur bezüglich der Maschinen und Anlagen berücksichtigt. Wichtig ist natürlich auch die Anlagenautomation und Güteüberwachung sowie die Umwelttechnik und Emissionsbegrenzung. Auf ältere Herstellungsmethoden und Prozessalternativen wird hier nicht eingegangen. Im Folgenden werden die dargestellten Prozesse näher vorgestellt:

Die Rohmaterialgewinnung und -aufbereitung



Die wichtigsten Rohstoffe für die Zementherstellung sind Kalkstein, Ton und Mergel (ein natürliches Gemisch aus Kalkstein und Ton). Sie werden in Steinbrüchen (1) durch Sprengen oder mit schwerem Gerät (Greifbagger, Schaufelradbagger oder sog. Surface-Miner) gewonnen und mit Radladern und großen Muldenkippern oder über Förderbänder zu den Brechanlagen transportiert (Bild 2). Teilweise werden auch mobile Brechan-

lagen eingesetzt, die dem Abbau im Steinbruch folgen. Das Gestein wird mittels der Brecher auf die Größe von Straßenschotter zerkleinert. Nach dem Brecher wird der sog. Rohschotter zumeist über Förderbänder in das Zementwerk transportiert. Derartige Transporte können über mehrere Kilometer gehen.

Zementwerke sind praktisch immer in der Nähe der Rohmaterialvorkommen angesiedelt.

PRODUCTION

In manchen Ländern sind die Rohmateriallagerstätten räumlich sehr konzentriert und weit von den Verbrauchermärkten entfernt. Damit verbundene Probleme werden in einem späteren Kapitel behandelt. Der Rohschotter wird in dem Zementwerk zumeist in Mischbetten (2) eingelagert und dort vergleichmäßigt (Bild 3). Eine derartige Homogenisierung ist immer dann unumgänglich, wenn größere Schwankungen der Rohmaterialbeschaffenheit vorliegen. Heutzutage werden in solchen Fällen Online-Messungen der Eingangsmaterialien vorgenommen und die Mischbetten für die Vergleichmäßigung entsprechend dimensioniert und gesteuert. Mit Rund- und Längslagern können bereits Vergleichsmäßigungseffekte bis zu 70 % erzielt werden.

Der Rohschotter gelangt nach dem Mischbett in die Rohmaterialmühle, wo eine mehlfine Vermahlung der Ausgangsstoffe erfolgt. Über Dosiereinrichtungen werden der Mühle Zuschlagsstoffe (3) wie Quarzsand oder Eisenerz zugegeben, um die gewünschten Rohmaterialbestandteile zu erhalten. Die Aufgabefeuchten der Materialien liegen meist zwischen 3–8 %, teilweise aber auch bei über 20 %. Deshalb ist bei der Vermahlung auch eine Trocknung erforderlich, wozu heiße Abgase aus dem Prozess (5) verwendet werden können. Für die Vermahlung sind Vertikalmühlen (4) sehr gut geeignet, weil Trocknung, Vermahlung und Klassierung in der Mühle erfolgen. Rohrmühlen sind aufwändiger und benötigen auch einen höheren spezifischen Energiebedarf. Die Produktabscheidung erfolgt in Schlauchfiltern (6). Im Anschluss an die Aufbereitung erfolgt die Lagerung des Rohmehls in Homogenisiersilos.



Quelle: Harder

2 Kalksteinabbau für ein Zementwerk



Quelle: Polysius

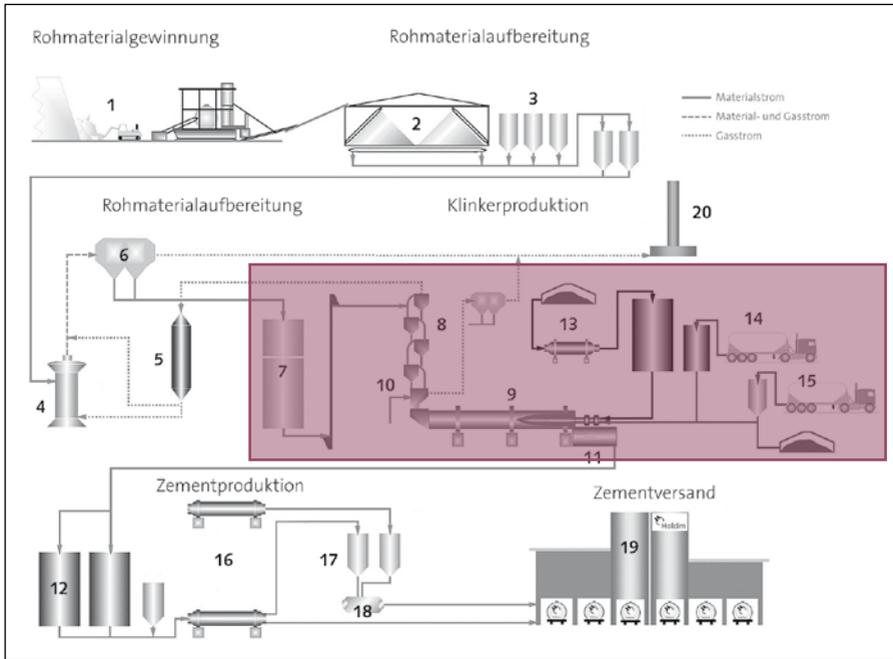
3 Rundmischbett für Rohmaterial



Quelle: Loesche

4 Vertikalmühle (Bau) zur Rohmaterialvermahlung

Die Klinkerherstellung



Aus den Homogenisiersilos (7) wird das gleichmäßige Rohmehl über Gurtbecherwerke oder sog. Airlifte einem Zyklonvorwärmer (8) aufgegeben, der Teil des Ofensystems (9) (Bild 5) ist. Ein Zyklonvorwärmer ist ein Wärmetauscher, bei dem das Rohmehl die einzelnen Zyklon- oder Wirbelkammerstufen von oben nach unten im Gegenstrom zu dem Ofenabgas durchströmt. Während sich das Rohmehl von Stufe bis zum Ofeneintritt aufheizt, kühlt sich das Ofenabgas mit jeder Stufe ab. Der Wärmetauscher erreicht je nach Anzahl der Zyklon- bzw. Wärmetauscherstufen Höhen von über 150 m. Die Zahl der Stufen richtet sich nach der Feuchte des Rohmehls. Für größere Leistungen werden Zyklonvorwärmer zweisträngig ausgeführt. Moderne Anlagen verfügen darüber hinaus über separate Calzinatoren (10), in denen eine Teilcalzinierung des Rohmehls vor dem Drehrohren erfolgt.

In den Calzinator wird Heißmehl aus einer unteren Zyklonstufe geführt und mittels einer Zusatzfeuerung bereits weitgehend calziniert, bevor es in den Drehrohren eintritt. Die Vorteile liegen in niedrigeren spezifischen Investitions- und Betriebskosten durch deutlich verkürzte Öfen bzw. höheren Produktionskapazitäten, verbesserten Möglichkeiten zur NOx-Minderung sowie einer gleichmäßigeren Prozessführung. Bis zu 60% des Brennstoffbedarfs lassen sich bereits im Calzinator aufgeben. Im Drehrohren erfolgt bei Ofengastemperaturen bis zu 2000 °C und Brennguttemperaturen von 1450 °C die vollständige Calzinierung und Sinterung des Rohmehls zu Klinker. Während die Gasverweilzeiten im Ofen nur 5–7 s betragen, liegt die Materialverweilzeit in der Größenordnung von 30 Minuten.

Der rotglühende (gebrannte) Klinker aus dem Drehrohren wird in einem Rostkühler



Quelle: Polystius

5 Ofenanlage in Saudi Arabien

(11) (Bild 6) auf Temperaturen von unter 100 °C schroff abgekühlt. Die Geschwindigkeit der Klinkerkühlung beeinflusst das Verhältnis an Kristall- und Glasphasen im Klinker und damit die späteren hydraulischen Abbindeigenschaften des Zementes. Für die Klinkerkühlung

wird Luft eingeblasen, wobei ein großer Teil der aufgeheizten Luft als Sekundärluft für den Ofen bzw. als Tertiärluft für den Calzinator genutzt wird und damit ein Großteil der Wärme aus dem Klinker in das Ofensystem rekupe-riert werden kann. Rostkühler kommen dabei



Quelle: IKN Kühlerbau Neustadt

6 Klinkerkühler (Montage) in Amerika



Quelle: Aumund

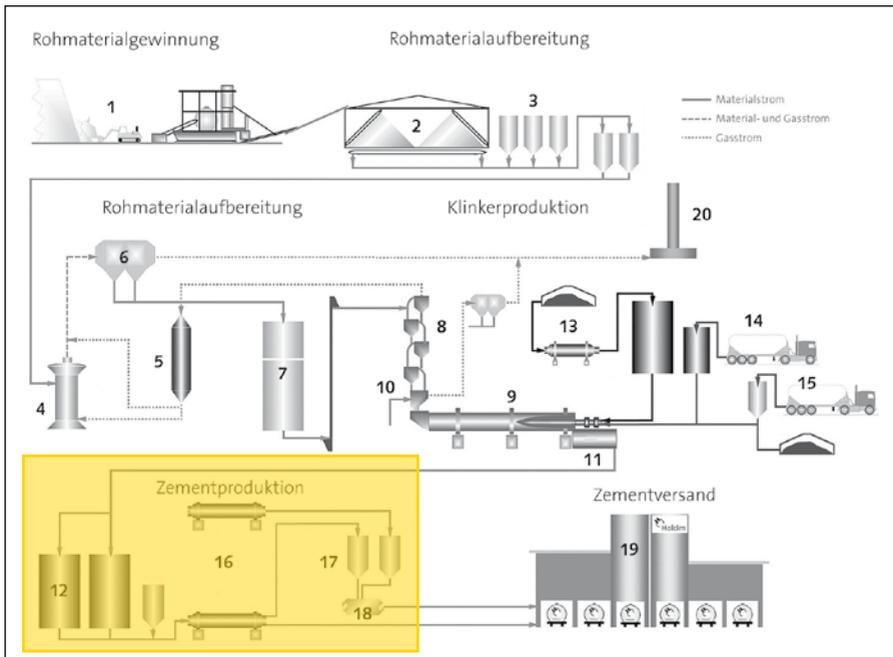
7 Klinkerlager Werk Dotternhausen

auf thermische Wirkungsgrade von über 75 %. Der abgekühlte Klinker wird anschließend über Transportanlagen dem Klinkerlager (12) (Bild 7) zugeführt.

Zur Befuerung des Calzinators und des Ofens werden heute als Primärbrennstoff in erster Linie Kohlenstaub bzw. Petrolkoks eingesetzt. In einigen Ländern verwendet man auch Öl und Gas. Der Kohlenstaub wird entweder fertig angeliefert oder in dem Zementwerk in einer Kohlemühle (13) vermahlen. Für die Vermahlung haben sich ebenfalls Vertikalmühlen

durchgesetzt. Eine wachsende weltweite Bedeutung haben inzwischen Sekundärbrennstoffe wie Altöl, Altreifen, Papierabfälle, Kunststoffschrottel (14) und organische Stoffe wie Holzabfälle und Klärschlamm (15) erlangt. In manchen Zementwerken werden schon nahezu 100 % Sekundärbrennstoffe eingesetzt. Dies spart Brennstoffkosten und kann zudem die CO₂-Bilanz des Zementwerkes verbessern. Außerdem sind die hohen Temperaturen und langen Verweilzeiten im Ofen ideal für die Verbrennung von Problemstoffen.

Die Zementvermahlung und Sortenherstellung



Der Klinker aus dem Klinkerlager wird in den Zementmühlen (16) unter Zugabe von Sulfat-trägern wie Gips zu Portlandzement vermahlen. Je nach gewünschter Zementsorte können der Mühle auch andere Zusatzstoffe (17) wie

Hüttensand, Kalkstein, Flugasche usw. zudosiert werden. Für die Vermahlung haben sich über viele Jahre Rohrmühlen bzw. Kugelmühlen (Bild 8) bewährt. Der hohe Energiebedarf solcher Mühlen wurde entscheidend durch eine Kom-



Quelle: Polystius

8 Kugelmühle zur Zementvermahlung

bivermahlung mit Hochdruck-Walzenpressen gesenkt. Inzwischen geht der Trend aber hin zu einstufigen Mahlverfahren mit Vertikalmühlen (Bild 9), Horizontalmühlen und Hochdruck-

Walzenpressen. Gegenüber Rohrmühlen können dabei mehr als 40% an Energieaufwand eingespart werden. Mit zunehmender Feinheit steigt bei den fortschrittlichen Mahlverfahren gegenüber Kugelmühlen die Einsparung beim Energieaufwand. Dennoch machen Kugelmühlen noch etwa 35% der weltweiten Mühlenpopulation bei der Zementvermahlung aus.

In vielen Fällen ist eine getrennte Vermahlung der Zementkomponenten günstiger als die gemeinsame Vermahlung. Zur Zementherstellung sind dann Mischer bzw. Mischanlagen (18) erforderlich, die die jeweiligen Komponenten gemäß den gewünschten Eigenschaften zusammenmischen. Dabei unterscheidet man Durchlaufmischer und Chargenmischer. Während sich Durchlaufmischer eher für wenige Sorten mit wenigen Hauptkomponenten eignen, werden Chargenmischer insbesondere für Spezialzemente mit mehreren Haupt- und Nebenkompontenten in Betracht gezogen. Dabei werden je nach Bedarf einzelne Rezepturen



Quelle: Gebr. Pfeiffer

9 Illustration Zementmahanlge



GEBR. PFEIFFER

OUR COAL MILLS. NO. 1 WORLDWIDE.



Patrick Heyd, Executive Director
Sales and Project Engineering

1
more than
2000
Pfeiffer
coal mills
worldwide

Pfeiffer MPS - Coal mills supplied by the global market leader

Innovative technologies and excellent quality make Gebr. Pfeiffer the market leader for coal grinding: The troughed grinding track of the Pfeiffer MPS coal mill ensures optimum processing of almost any type of coal and pet coke – even when the feed moisture is very high. Various products can be ground in one mill without having to install a frequency converter on the main drive, making Pfeiffer MPS mills particularly flexible and cost-efficient. We also developed the largest coal mill in the world with a throughput rate of 100 tph.

Pfeiffer. Passion for grinding.

Any questions?
Feel free to contact our experts at
coal@gebr-pfeiffer.com

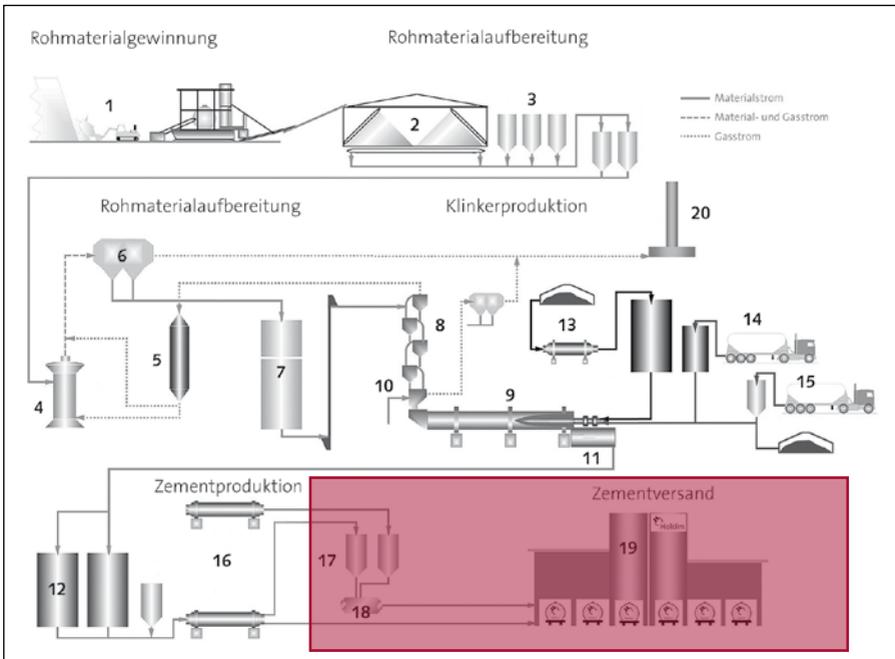
PRODUCTION

eingestellt und für solche Bedürfnisse erfolgt die Herstellung „Just-in-time“.

Üblicherweise verfügt jedes Zementwerk über eine Zementvermahlung. Teilweise ist die Kapazität für die Klinkerherstellung aber größer als die Zementherstellung, weil ein Teil des Klinkers direkt in den Versand geht. Ebenso existieren Zementwerke, wo die Klinkerherstellung eingestellt ist und nur noch eine Ze-

mentvermahlung erfolgt. In vielen Ländern haben sich inzwischen auch separate Mahlanlagen etabliert, die anders als die Zementwerke eine größere Nähe zu den Verbrauchermärkten haben. Darüber hinaus werden separate Mahlwerke beispielsweise auch in der Nähe von Hüttenwerken gebaut, um den dortigen Hüttenessand z. B. für die Herstellung von Schlackezementen zu verwenden.

Zementlagerung, Verpackung und Versand



Zementlager sollen in der Regel mindestens so groß dimensioniert sein, dass ein 3–5 tägiger Stillstand der Zementmühlen kompensiert werden kann. Bei üblichen Produktmengen von 4500 tpd sollte ein Zementsilo in einem solchen Werk also über eine Lagerkapazität von 13 500 bis 22 500 t verfügen. Derartige Großbraumsilos (19) (Bild 10) werden heute als Zentralkegelsilos

ausgeführt, wobei eine pneumatische Entleerungstechnik eingesetzt wird. Bei dieser Technik ist der nahezu flache Siloboden mit sogenannten Luftförderrinnen belegt, in die Luft zur Fluidisierung des Materials in Bodennähe eingeblasen wird. Für die Lagerung unterschiedlicher Zementarten und Komponenten können die Silos auch als Multizellensilos ausgeführt werden.



Quelle: IBAU HAMBURG

10 Großraumsilo für Zement

Während in den westlichen Ländern teilweise weniger als 10% des Zementes verpackt wird und der Großteil als lose Ware in den Versand gelangt, ist dies in vielen Ländern in Asien, Südamerika und Afrika genau umgekehrt. Entsprechend existieren leistungsfähige vollautomatische Packmaschinen (Bild 11) mit Leistungen bis zu über 5000 Sack pro Stunde. Für den Zementversand werden Säcke palettiert, eingeschweißt und gegen

Umwelteinflüsse und Beschädigungen gesichert. In Verbräuchermärkten sind inzwischen Säcke begehrt, die vollkommen sauber sind und beim Handling zu keinerlei Verschmutzungen führen. Für die lose Zementverladung in Silofahrzeuge und Bahnwaggon existieren ebenfalls ausgefeilte Lösungen. Ein Teil der Produktion gelangt in den Export, wobei für größere Entfernungen Bahntransporte oder Schiffe wirtschaftlich sind.

Dem automatisierten Versand wird eine immer größere Bedeutung beigemessen. Auf der einen Seite sollen Wartezeiten und Fehlbedienungen der Abholer an den Zementterminals vermieden werden, andererseits spielt die Produktvielfalt und -qualität eine immer größere Rolle. Bei vielen Zementfirmen haben sich inzwischen Chipkartensysteme durchgesetzt.

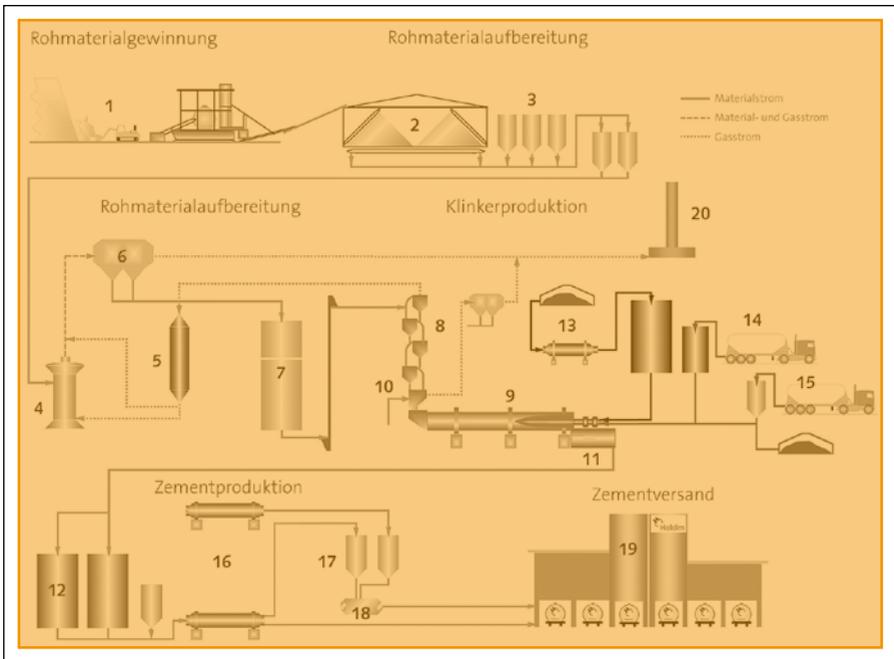
Damit lässt sich nicht nur der Abholvorgang vollständig automatisieren, auch die Rechnungserstellung und Abbuchung erfolgt vollautomatisch. Der Abholer wird von zeitraubenden Prozeduren befreit.



Quelle: Haver & Boecker

11 Rotationspacker neuester Generation

Automation und Qualitätsüberwachung



Von der Elektrotechnik wird die Automation- und Steuerungstechnik als das A&O eines Zementwerkes gesehen. Dabei darf nicht übersehen werden, dass ein einzelnes Zementwerk über zehntausende Motoren und Antriebe verfügt. Für ein optimales Zusammenspiel und einen

reibungslosen Produktionsprozess werden die wichtigsten Prozesse mit separaten Regelkreisen versehen. Die Steuerung und zumeist die automatische Regelung der Anlagen erfolgt über einen zentralen Leitstand (Bild 12) mittels modernster mikroprozessorgesteuerter Technik. An den Leitstand ist auch die Qualitätsüberwachung der eingesetzten Zwischenprodukte und des fertigen Zementes angeschlossen. Im Leitstand werden nicht nur die Produktionsdaten, sondern auch alle relevanten Emissionsdaten rund um die Uhr überwacht und lückenlos aufgezeichnet.

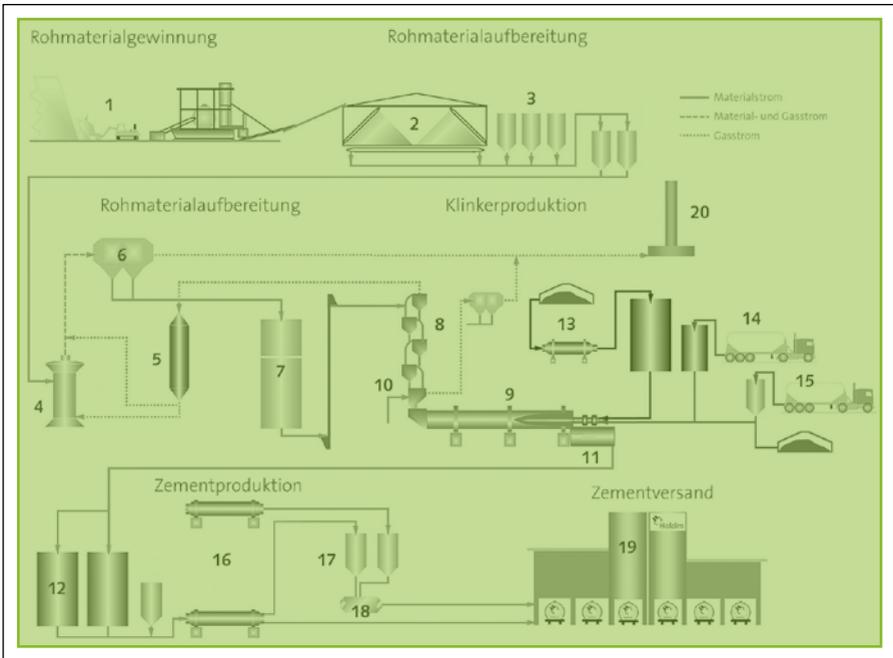
Online-Messverfahren sind für die Prozesssteuerung von Zementwerken unverzichtbar. Doch während die Messung von Motorleistungen, Temperaturen, Drücken, Füllständen, Durchflüssen und Emissionen längst etabliert sind, ist die Online-Messung von Materialparametern zur Prozessführung weniger verbreitet. Dies hängt u. a. damit zusammen, dass

Quelle: Polysius



12 Moderner Leitstand

Umwelttechnik und Emissionen



die Materialanalytik bisher hauptsächlich als wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung betrachtet wurde. Außerdem ist die Materialanalytik relativ aufwändig und die Strecke von der Materialentnahme über den Rohrposttransport zum Analyselabor, die Materialaufbereitung und Analyse bis hin zur Mischungsregelung sehr lang.

Neuerdings existieren aber zahlreiche Inline-Messverfahren für die Element- und Phasenanalyse von Rohmaterialien und Brennstoffen sowie den Zwischenprodukten Rohmehl, Heißmehl und Zementklinker, die auch für die Prozesssteuerung verwendbar sind. Ziel ist es, einen gleichmäßigeren und möglichst störungsfreien Anlagenbetrieb bei gleichzeitiger Ressourcenschonung und Qualitätseinhaltung zu erreichen. Ressourcenschonung ist aber oftmals der Qualität gegenläufig, weil schlechtere oder problematischere Rohmaterialqualitäten und komplexere Sekundärstoffe

zu verwenden sind und sich zusätzliche Anforderungen durch den Trend zu verschiedenen Zementarten ergeben.

Bei der Zementherstellung fallen systembedingt Stäube beim Materialabbau, dem Vermahlen, Brennen, Kühlen, Transportieren, Lagern und dem Versand an. Dabei entstehen riesige zu entstaubende Abgasmengen. Auf der Prozessseite gibt es drei wesentliche Entstaubungsaufgaben: das Rohmehlmühlen-/Ofensystem, den Klinkerkühler und die Zementmahlanlage. Als wichtigste Bauarten für Prozessfilter (**Bild 13**) haben sich in der Zementindustrie Elektro- und Gewebefilter (Schlauchfilter) bzw. Kombinationen der beiden Verfahren durchgesetzt. Ein deutlicher Trend geht hin zu Schlauchfiltern, die im Vergleich zu Elektrofiltern niedrigere Emissionsgrenzwerte ermöglichen und praktisch unabhängig von Betriebszuständen bzw. An- und Abfahrbedingungen der Anlage sind.



Quelle: Scheuch

13 Schlauchfilter zur Zementmühleneinstaubung

Durch die Verwendung von Ersatzbrennstoffen anstelle konventioneller fossiler Energieträger können bei einem Co-Processing der Stoffe in der Zementanlage im Vergleich zur getrennten Müllverbrennung und Zementproduktion insbesondere Klimagase wie CO_2 , SO_2 und NO_x reduziert werden. Die führenden Zementunternehmen haben sich freiwillig verpflichtet, ihre CO_2 -Emissionen drastisch zu senken. Lafarge beispielsweise hat gegenüber dem Basiswert in 1990 von 780 kg CO_2 /t Zement bis 2010 bereits eine Minderung um 19% auf 632 kg CO_2 /t Zement erreicht. Führendes Unternehmen bei Ersatzbrennstoffen ist momentan Heidelberg-Cement mit einem aktuellen Anteil von 19,5% und einem Anteil von 5,8% bei CO_2 -neutralen Biobrennstoffen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von CO_2 -Anteilen besteht in der Reduzierung des Klinkerfaktors im Zement. Dabei wird Klinker durch Zuschlagstoffe wie Kalkstein, Hütten sand und andere Puzzolane substituiert. So ist der Marktanteil von Portlandzement, der etwa zu 95% aus gemahlenem Klinker besteht, in Deutschland von 75% im Jahr 1997 auf etwa 34% gefallen. Ähnliche Entwicklungen können in anderen Ländern beobachtet werden. Niedrige Klinkeranteile helfen nicht nur die CO_2 -Netto-Bilanz zu verbessern, sondern auch die Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu erhöhen. Die weitere Entwicklung auf dem Sektor ist allerdings durch die Verfügbarkeit der Substitutionsprodukte und die Nachfrage nach solchen Kompositzementen begrenzt.



FROM THE PIONEER AND PACEMAKER IN GRINDING

The Loesche CCG plant – globally recognised technology in its most compact form

There are no construction projects without cement, and no cement without Loesche vertical roller mills (VRM). Grinding of cement clinker and granulated blast furnace slag in vertical roller mills is a technology introduced by Loesche. Since the first Loesche vertical roller mills came onto the market in 1928, countless numbers of them have been used in the cement industry across the world. Nowadays more than 2,000 Loesche mills are in operation worldwide.

The extensively proven Loesche VRM is also the core of the new Compact Cement Grinding plant (CCG). Loesche's CCG provides its technological features in a most compact form thus making them available in small but growing markets and remote areas with a demand for locally produced cement.



SHORT TIME-TO-MARKET,
**PRODUCTION START-UP
IN LESS THAN A YEAR**



MAXIMUM FLEXIBILITY
TO REACT TO MARKET
REQUIREMENTS

For further contact data and more information and support please visit us at www.loesche.com

MATERIALS

Um den veränderten Anforderungen unterschiedlicher Industrie-Bereiche gerecht zu werden, bedarf es verschiedener Qualitäten von Branntkalk und Löschkalk. Aus diesem Grund ist eine verbesserte Gütekontrolle im Kalzinierverfahren erforderlich.

TEXT Gabriele Vola, Geologe, Process & Laboratory Unit, Cimprogetti S.p.A., Dalmine/Italien
Luca Sarandrea, Technischer Leiter, Cimprogetti S.p.A., Dalmine/Italien

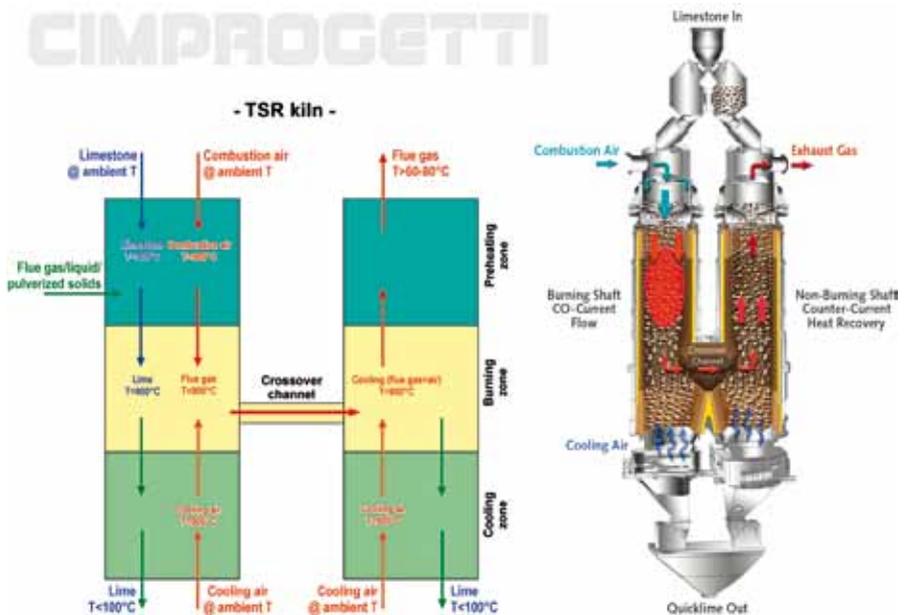


Bewertung von Rohstoffen für die industrielle Herstellung von Kalk

1 Einleitung

Die in diesem Artikel aufgeführten Fallstudien bieten einen repräsentativen Überblick über die technischen Aktivitäten, die Cimprogetti S.p.A. weltweit in den letzten zehn Jahren durchgeführt hat. Kunden aus aller Welt schicken ständig kommerzielle Proben von Karbonatgestein, d.h. Kalkstein und Dolomit, um ihre Eignung für das Kalzinierverfahren in einem Doppelschachtregenerativofen (TSR) zu bewerten, der dann von dem oberitalienischen Unternehmen konstruiert und installiert wird (Bild 1).

Wenn man berücksichtigt, dass unterschiedliche Qualitäten von Branntkalk und Löschkalk gefordert werden, um den neuen Anforderungen in unterschiedlichen Bereichen gerecht zu werden, ist es notwendig geworden, die Gütekontrolle im Kalzinierverfahren zu verbessern. Das beginnt mit einem kompletten Satz von Analysen des losen Gesteins. Das betriebliche Verfahren zur Charakterisierung der Rohmaterialien umfasst chemische und physikalisch-mechanische Analysen bezüglich des Brennverhaltens sowie technologische Tests. Vor kurzem wurden auch mineralogisch-



1 Doppelschachtregenerativofen (TSR). A: Vereinfachte Darstellung von der Europäischen Kommission (2010) ([1], geändert); B: Vereinfachte Darstellung des Doppelschachtregenerativofens von Cimprogetti (2012)



2 Weltweite Verteilung von kommerziellem Kalkstein und Dolomit, analysiert von Cimprogetti S.p.A.

petrografische Untersuchungen auf geologischer Basis durchgeführt, um die Auswirkungen der Zusammensetzung und der Mikrostruktur des Karbontagesteins auf die Qualität und den Einsatz von industriellem Branntkalk zu bewerten. Insbesondere wurde die Röntgenkristallstrukturanalyse (Röntgenbeugungsanalyse RDA) zusammen mit der Methode der Rietveld-Verfeinerung durchgeführt, um die quantitative Phasenanalyse (QPA) zu bestimmen. Für die Gefügeanalyse – auch als petrographische oder mikro-fazielle Analyse von Karbonatgestein bekannt – wurde die digitale Bildverarbeitungstechnik angewendet, um das Verhältnis Mikrit zu Sparit (M/S) und die Kristallgrößenverteilung zu bestimmen.

Schließlich wurde das Brennverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht, um das Verhalten des Rohmaterials in einem TSR-Ofen bei Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe vorherzusagen. Der Bericht über die Eignung des Rohmaterials basiert auf all diesen Tests.

Das Ziel dieser Studie besteht darin, das Verhältnis zwischen den Parametern der Zusammensetzung und Mikrostruktur, dem physikalisch-mechanischen Verhalten und der Brennbarkeit der Karbonatgesteine im Kalzinierprozess aufzu-

zeigen, um die Wirkung auf die Reaktivität des Branntkalks vorherzusagen. Schließlich können Fortschritte bei der Charakterisierung industrieller Mineralstoffe, die auf der Integration unterschiedlicher Analysemethoden basieren, erfolgreich angewendet werden, um Probleme im Kalzinierprozess zu lösen und – allgemeiner gesprochen – den gesamten Kalksektor zu modernisieren.

2 Materialien und Methoden

Gegenwärtig werden Proben von Karbonatgestein aus aller Welt (Bild 2) im Labor analysiert, um ihre Eignung für den Kalzinierprozess in TSR-Öfen nachzuweisen. Das betriebliche Verfahren für die Charakterisierung von Karbonatgestein umfasst einen kompletten Satz von Analysen der Zusammensetzung sowie physikalisch-mechanische Tests. Die visuelle Überprüfung des Gesteins ist die erste Stufe und liefert wichtige Informationen, wie z. B. Farbe, die nach der Farbtabelle für Gestein nach Munsell® bewertet wird. Es folgen die Korngrößenverteilung, Härte, Porosität, der Fossilinhalt, das Vorhandensein von Staub, die Art des Gefüges und schließlich die Homogenität der Probe. Diese ersten Informationen ermöglichen es, die folgenden Analysen richtig zu definieren.

Tab. 1 Von Cimprogetti S.p.A. analysierte repräsentative Proben von Karbonatgestein. Legende: 1–4: Kalkstein im engeren Sinn; 5: diagenetischer, rekristallisierter Dolomit; 6: granoblastischer, metamorpher Kalzit oder Marmor im engeren Sinn; N.a.: nicht anwendbar; N.d.: nicht gefunden; N.r.: nicht erreicht t_{60a}

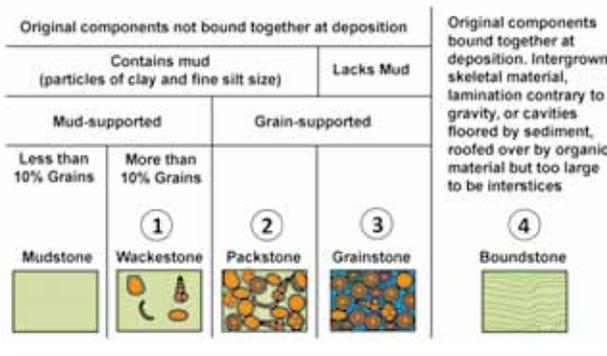
Nr.	1*	2*	3**	4*	5*	6*
Code	598	549	1265	n. c.	n. c.	1290
Herkunft	Deutschland	Südafrika	VAE	Malaysia	Mexiko	Kongo
Jahr	2010	2009	2012	2004	2000	2012
Dunham (1962)	Fossil-führende Wacke	Fossil-führender Packstone	Pisolitischer Grainstone	Riffkorallengestein	Kristalliner Dolomit	Calcitmarmor
Loi Glv. [%]	41,27	43,03	43,21	43,79	45,93	43,12
SiO₂ [%]	4,39	0,4	0,98	Traces	0,47	0,60
Al₂O₃ [%]	1,94	0,26	0,09	0,08	0,18	0,26
Fe₂O₃ [%]	0,60	0,06	0,06	Spuren	0,07	0,27
CaO [%]	51,38	54,30	54,68	55,22	36,40	54,83
MgO [%]	0,63	0,82	0,74	0,18	16,06	0,45
Quartz [%]	4,5	1,0	0,5	0	0	1
Feldspat [%]	0	0	0	0	1,0	0
Calcit [%]	94	98	99	100	17	97,7
Dolomit [%]	0	1,0	0,5	0	82	1,3
Tone [%]	1,5	0	0	0	0	0
Glimmer [%]	0	0	0	0	0	Spuren
Kristallgröße	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.	179±49µm	154±78 µm
Verhältnis M/S	23,3	12,3	3,2	5,8	N.d.	0,6
Ausdehnung (bei 700 °C)	0,98 %	2,04 %	0,37 %	0,27 %	1,06 %	1,34 %
Überbrand	16,9 %	33,7 %	22,1 %	36,0 %	43,6 %	30,2 %
Tendenz zum Kleben	keine	mittel	selten	mittel	sehr hoch	selten
Kalkabbau (bei 10 mm)	4,0 %	5,2 %	8,0 %	9,1 %	18,3 %	19,3 %
T_{max} (bei 1050 °C)	57,4 °C	73,0 °C	70,6 °C	75,4 °C	N.d.	63,0 °C
t₆₀ (bei 1050 °C)	N.r.	0,98 min.	1,4 min.	0,94 min.	N.r.	20,5 min.
Reaktivität (EN-459)	gering	hoch	hoch	hoch	N.a.	gering

* Daten von Vola et al. (eingereicht beim EMABM 2013); ** unveröffentlichte Daten

Was die chemische Analyse betrifft, so werden die Haupt- und Nebenelemente mit Hilfe der nass-chemischen Analyse und der Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) bestimmt. Es folgen interne Testmethoden. Zurzeit wird die mineralogische Analyse in einem externen Labor durchgeführt. Dabei wird das Pulververfahren (RDA) zusammen

mit der Rietveld-Verfeinerung für die quantitative Phasenanalyse (QPA) angewendet. Für die petrographische Untersuchung wird ein Polarisationsmikroskop mit einem Bildsoftwarepaket für die digitale Bildanalyse eingesetzt.

Es werden physikalisch-mechanische Analysen durchgeführt, wobei die Schüttdichte und die



3 Klassifizierung von Sedimentkarbonatgestein nach [1]. Legende der Symbole: 1: Probe aus Deutschland; 2: Probe aus Südafrika; 3: Probe aus den VAE; 4: Probe aus Malaysia

maximale Feuchtigkeit, die in etwa der kapillaren Porosität entspricht, untersucht werden. Dazu gehören auch Abbauteests an den Rohmaterialien. Das Brennverhalten des Kalks wird in einem Muffelofen bewertet, wobei der Glühverlust nach einer bestimmten Zeit bei einer bestimmten Temperatur berücksichtigt wird. Der Standard-Brennbarkeitstest ist ungefähr mit einer Thermographischen Analyse (TGA) vergleichbar, wird aber an Gesteinsproben und nicht an Pulverproben durchgeführt.

Was die technologischen Tests betrifft, so wird der Ausdehnungsversuch bis 700 °C durchgeführt, um die Tendenz des Karbonatgesteins zu Verstopfungen in der Vorwärmzone des Ofens vorherzusagen, während der Hochtemperaturtest bei 1300 °C, nämlich der Überbrandtest, durchgeführt wird, um die Klebrigkeit des Kalks bei der maximalen Temperatur im Ofen vorherzusagen. Nach dem schroffen Temperaturwechsel wird auch die Farbe des Kalks ermittelt.

Danach wird das mechanische Verhalten des Kalks mit Hilfe der Abbau- und Fallversuche bewertet. Für den Abbau wird eine Standardsiebmaschine eingesetzt. Bei diesem Test wird die Reibung innerhalb der Rohmaterialstücke als auch der Kalkstücke im Ofen simuliert. Während des Absinkens des Materials im Ofen (ein Prozess, der normalerweise 16-20 Stunden in einem TSR-Ofen dauert) reiben die Gesteinsoberflächen gegeneinander, und ein Abbau findet statt. Das Ergebnis

des internen Tests wird sowohl für das Rohmaterial als auch für den Kalk angegeben und als Prozentsatz des Materialrückstands auf den Sieben von 10 mm und 19 mm ausgedrückt. Es ist wichtig, zwischen dem produzierten Feingut (Fraktion < 10 mm) und der Menge an rissigem Kalk (Fraktion zwischen 10 und 19 mm) zu unterscheiden. Manchmal weisen die Rohmaterialien eine deutliche Tendenz auf zur Aufspaltung in kleinere Stücke während des Vorwärmens oder am Beginn

der Kalzinierung, wobei der Kalk selbst stabil sein kann. Im vorliegenden Fall liegt eine ziemlich geringe Fraktion an Feingut < 10 mm vor und die Menge an rissigem Kalk zwischen 10 und 19 mm ist im Allgemeinen hoch. Ein solches Rohmaterial kann zu einer geringeren spezifischen Produktion des Ofens führen. Die Ergebnisse der Abbauteests für das Rohmaterial und den Kalk werden direkt als Input für das mathematische Modell zur Vorhersage der spezifischen Produktion des ausgewählten Ofens verwendet. Beim Fallversuch wird das Fallen des Kalks beim Austrag aus dem Ofen und später das Fallen des Kalks in die Silos simuliert. Beide Tests ermöglichen es, die Korngrößenverteilung des Kalks zu bewerten und sie in Übereinstimmung mit den unterschiedlichen Kalkgrößen zu bringen, die vom Kunden gefordert werden.

Es ist wichtig, die Reaktivität des in einem Industrieofen erzeugten Kalks vorherzusagen zu können. Die Reaktivität hängt von den Eigenschaften des verwendeten Rohmaterials und Brennstoffs ab, aber auch von der Aufheizgeschwindigkeit in der Vorwärmzone. Das ist ein kompliziertes Problem, und praktische Experimente im Labor sind notwendig, um die Reaktivität des Industriekalks bei einem bestimmten Rohmaterial und einem bestimmten Brennstoff vorherzusagen. Die Reaktivität von Kalk für die Stahlproduktion wurde nach einer internen Methode mit der Grobkorn-titration durchgeführt. Die Reaktivität von Bau-

kalk wird nach der europäischen Norm EN 459-2 und der amerikanischen Norm ASTM C110-03 bewertet. Je höher die t_{60} -Zeit, umso geringer ist die Reaktivität. Demzufolge wird die Reaktivität von Branntkalk wie folgt bewertet:

- » hohe Reaktivität: t_{60} wird in 3 min oder weniger erreicht
- » mittlere Reaktivität: t_{60} wird in 3-6 min erreicht
- » geringe Reaktivität: t_{60} wird nach mehr als 6 min erreicht.

3 Analysen der Zusammensetzung

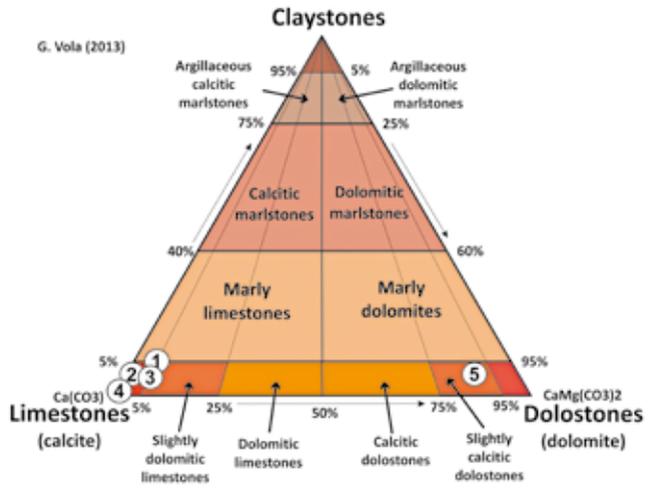
In Abhängigkeit von der endgültigen Verwendung des Produkts ist die Zusammensetzung des Rohmaterials einer der wichtigsten Parameter, die kontrolliert werden müssen. Die Anforderungen in traditionellen Anwendungsgebieten für Kalk, wie z.B. Stahl und Metallurgie, Rauchgasentschwefelung, Wasseraufbereitung sowie Umweltschutz, sind streng bezüglich der Reaktivität von Branntkalk und damit auch hinsichtlich der Materialreinheit (Glühverlust > 42%; CaCO_3 > 97%; SiO_2 < 1%). Andererseits kann Baukalk für Hoch- und Tiefbau einen höheren Gehalt an Kalziumsilikaten und Aluminaten aufweisen, wenn er aus tonigem oder kieseligem Kalkstein hergestellt ist. Dennoch muss auch seine Zusammensetzung kontrolliert werden. Speziell die chemischen Anforderungen gemäß der Norm EN 459 sehen einen maximalen Gehalt an SO_3 und einen minimalen Gehalt an freiem Kalk vor. Das hängt vom Typ des hydraulischen Kalkprodukts ab (s. Tabelle 1-2, EN 459-1). Die weiße Farbe für Baukalk ist immer erforderlich, d.h. der Gehalt an chromophoren Elementen muss ebenfalls gering sein.

Chemische, mineralogische und petrographische Analysen reprä-

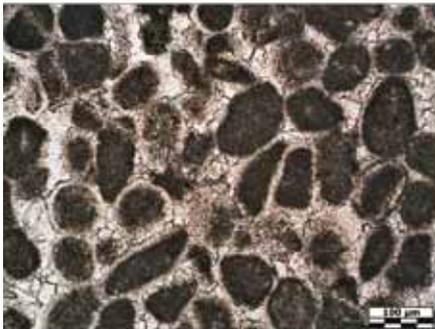
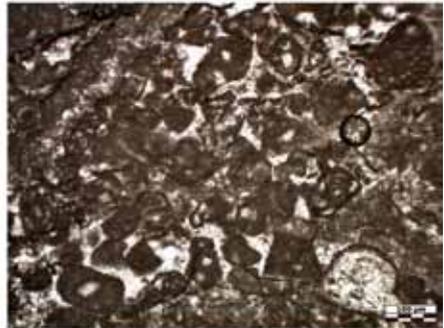
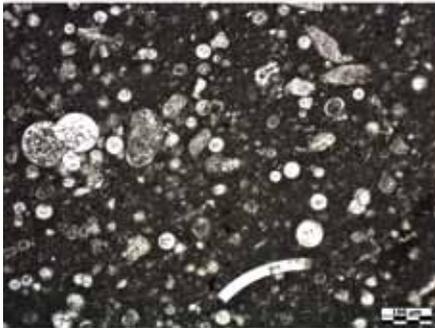
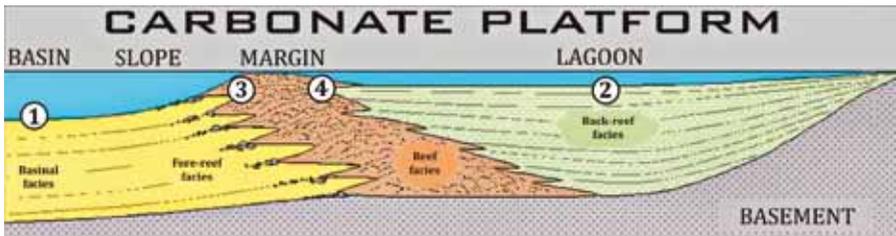
sentativer Proben von Karbonatgestein sind in **Tabelle 1** enthalten. Entsprechend der petrographischen Klassifizierung von sedimentären Karbonaten nach Dunham [2] sind sowohl schlammige Mikrofazies, d.h. Tonstein und Wacke, als auch körnige Mikrofazies – Packstone und Grainstone – enthalten. Sporadisch ist auch Riff-koralliner Boundstone anzutreffen. Außerdem findet man auch diagenetisch modifizierte Karbonatgesteine, einschließlich Sparit, Dolomit mit einer zucker körnigen Struktur sowie granoblastische, metamorphe Gesteine (z.B. Marmor) (**Bild 3**).

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung von Karbonatgestein besteht darin, seine mineralogische Zusammensetzung bezüglich Calcit, Dolomit und Tonverunreinigungen zu berücksichtigen (**Bild 4**).

Mineralogisch-petrographische Analysen zeigen, dass nichtkarbonatische Verunreinigungen hauptsächlich auf das Vorhandensein von detritischen Quarzkörnern, Feldspat, tonhaltigen und opaken Mineralen sowie schließlich auf organische Substanzen zurückzuführen sind. Unterschiedliche Bestandteile und Gefüge spiegeln den weiten Bereich geologischer Ursprünge



4 Klassifizierung von Karbonatgestein auf der Basis von Calcit, Dolomit und Tonmineralen. Legende der Symbole: 1-4: reiner Kalkstein; 5: kristalliner, leicht calcitischer Dolomit



5 Mikrofaziesanalyse von Karbonatgesteinsproben. Legende der Symbole: PPL: linear polarisiertes Licht; XPL: kreuzpolarisiertes Licht. a) schematisches Profil einer Karbonatplattform. Angenommene Probenorte auf der Grundlage von typischen Ablagerungstexturen und Fossilinhalt, wie folgt angegeben: 1: marine Fazies von Ablagerungen am äußeren Hang des Riffs; 2: Fazies von Lagunen hinter dem Riff; 3: Fazies von Oolith-Unterwasserriffen vom Kontinentalrand; 4: Rifffazies. b) fossile Wacke, Probe 1 aus Deutschland (PPL, 10X); c) fossiler Packstone, Probe 2 aus Südafrika (PPL, 10X); d) pisolitischer Grainstone, Probe 3 aus den VAE (PPL, 10X); e) korallenreiches Riffgestein, Probe 4 aus Malaysia (PPL, 10X); f) diagenetischer zuckerkörniger Dolomit, Probe aus Mexiko (XPL, 3,5X); g) Calcitmarmor mit Spuren von Dolomit, Quarz und Biotit, Probe 6 aus dem Kongo (XPL, 3,5X)

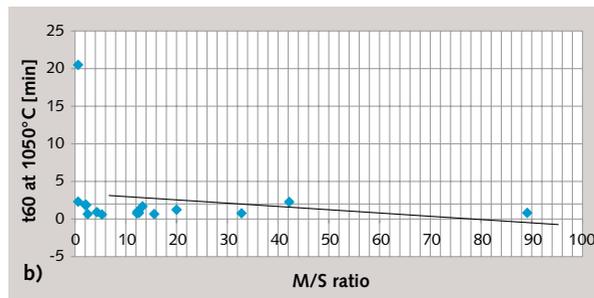
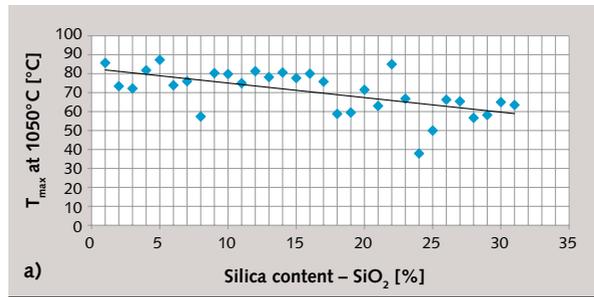
wider, einschließlich der unterschiedlichen Ablagerungs- und diagenetischen Umgebungen von Sedimentgestein, z.B. Mikrofazies, sowie der Druck- und Temperaturbedingungen von metamorphem Gestein. Bild 5 a zeigt ein schematisches Profil einer Karbonatplattform mit der Herkunft der Proben auf der Grundlage ihres Ablagerungsgefüges und ihres Fossilinhalts. Die Bilder 5 b–g zeigen repräsentative Mikroaufnahmen der wichtigsten Mikrofazies der Karbonatgesteinsproben.

Unter Berücksichtigung der Auswirkung der Zusammensetzung und der Mikrostruktur auf die Reaktivität von Branntkalk wurden einige wichtige Parameter wie z. B. der Gehalt an Siliziumdioxid ($\% \text{SiO}_2$) und das Verhältnis von Mikrit zu Sparit (M/S) der calcitischen und dolomitischen Kalksteine als Funktion der Reaktivität des Branntkalks bei 1050°C aufgetragen. Vorläufige Daten zeigen, dass je höher die Verunreinigung in Form von Siliziumdioxid ($\% \text{SiO}_2$) ist, umso geringer ist die Reaktivität in Form der maximalen Löschtemperatur (T_{max}). Außerdem verringert sich die Branntkalkreaktivität in Form des Temperaturanstiegs (t_{60}) bei einem höheren Verhältnis von Mikrit zu Sparit (Bild 6).

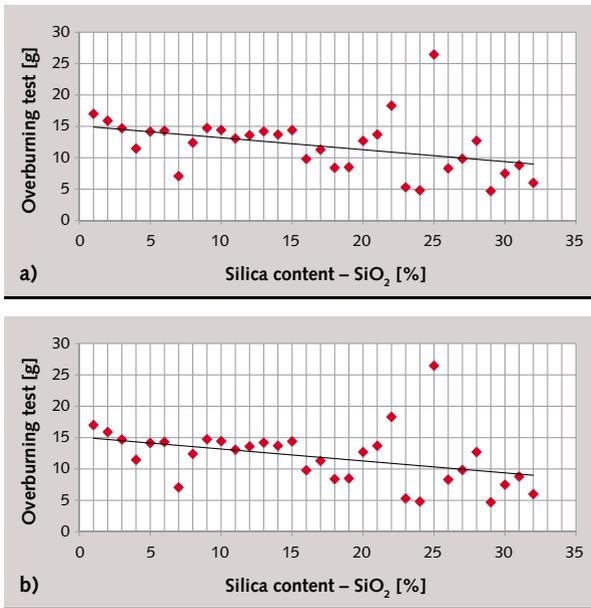
Nach früheren Autoren [3, 4] geht der allgemeine Trend dahin, dass schlammige Mikrofazies mit feineren Texturen weniger reaktiv sind als körnige, wenn identische Bedingungen der Kalzinierung und Sinterung bis 1050°C herrschen. Weitere Analysen von diagenetischen und granoblastischen Proben von Karbonatgestein werden die Wirkung der Kristallgrößenverteilung auf die Reaktivität klären. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Leistungsfähigkeit des Kalks und auch die Bedingungen der Kalzinierung stark von physikalisch-mechanischen Parametern gesteuert werden [5, 6].

4 Physikalisch-mechanische und technologische Tests sowie Versuche zum Brennverhalten

Was die physikalischen Eigenschaften betrifft, werden sowohl die Schüttdichte und die maximale Feuchte, die etwa der kapillaren Porosität entspricht, bewertet. Der letzte Parameter zeigt die Tendenz des Gesteins zum Absorbieren von Wasser auf, die als kritisch angesehen wird, wenn sie 5% überschreitet. Bezüglich der mechanischen Eigenschaften muss schwacher Kalk vermieden werden. Die Staubentwicklung wird zuerst im Labor mit dem Kalkabbautest bewertet. Dazu wird eine Standardsiebmaschine verwendet. Die Ergebnisse werden im mathematischen Modell für die Berechnung der maximalen Produktion des Ofens verwendet. Die Erfahrung zeigt, dass der Gewichtsverlust von Kalk 35% nicht überschreiten darf. Fallstudien zeigen keine Verbindung zwischen schwachem Karbonatgestein und schwachem Kalk, so dass sogar schwacher Kalk häufig aus kompakten und grobkristalli-



6 Reaktivität des Branntkalks in Abhängigkeit von den Parametern der Zusammensetzung (a) und des Gefüges (b) [8]



7 Tendenz zur Klebrigkeit, d. h. Überbrandtest, als Funktion der Zusammensetzung (a) und textueller Parameter (b) [8]

nen Karbonaten, wie z. B. Sparit und Marmor, hervorgehen kann. Wenn der Abbau von Kalk zwischen 15 und 35% liegt, wird eine Probe als akzeptabel betrachtet. In Abhängigkeit von anderen Parametern kann jedoch eine grobe Fraktion als Aufgabegut für den Ofen empfohlen werden. Schließlich simuliert der Fallversuch den Kalk, der aus dem Ofenauslauf fällt, und gestattet eine Bewertung der Staubtendenz aus den Entnahmen am Boden des Kalkbunkers.

Hinsichtlich des Brennverhaltens werden folgende technologischen Versuche durchgeführt:

- » Standard-Brennbarkeit bei unterschiedlichen Temperaturen
- » Ausdehnungsversuch bei 700 °C
- » Hochtemperaturtest bei 1300 °C, d. h. Überbrandtest

Der Ausdehnungsversuch bei 700 °C wurde erst vor kurzem eingeführt, um die Tendenz zum Verstopfen in der Vorwärmszone vorherzusagen. Normalerweise findet die Ausdehnung am Beginn

des Kalzinierungsprozesses statt und ist auf die Änderung des Volumens auf der Oberfläche des Gesteins zurückzuführen [7]. Die Erfahrung zeigt, dass die kritische Ausdehnung bei mehr als 3% beginnt. Der Überbrandtest wird durchgeführt, um die Tendenz zur Klebrigkeit des Kalks bei maximaler Temperatur vorherzusagen. Ein Rohmaterial ist nicht geeignet, wenn der zusammengeballte Kalk mehr als 47,6% wiegt. Wenn die Werte 40% übersteigen, müssen generell Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden, um ein Verstopfen des Ofens zu vermeiden. In einem solchen Fall wird im Allgemeinen eine grobe Fraktion für die Ofenaufgabe empfohlen.

Die Tendenz zur Klebrigkeit kann als eine Funktion unterschiedlicher physikalisch-

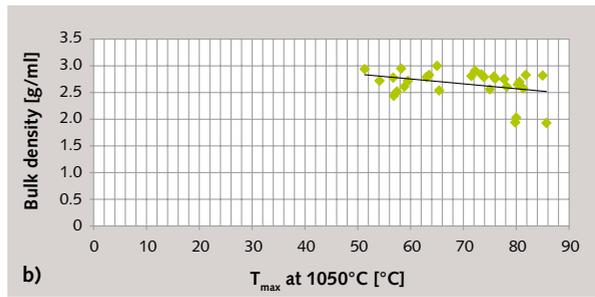
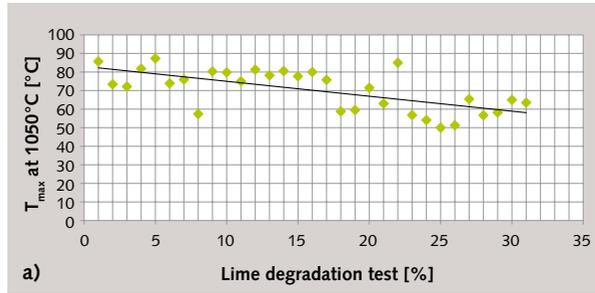
mechanischer und Zusammensetzungsparameter interpretiert werden. Fallstudien zeigen, dass ein höherer SiO₂-Gehalt zu einer geringeren Tendenz zur Klebrigkeit führen. Im Gegensatz dazu führt ein höheres M/S-Verhältnis zu einer höheren Klebrigkeitstendenz (Bild 7).

Schließlich wurde die Reaktivität auch in Abhängigkeit von den unterschiedlichen physikalisch-mechanischen Parametern untersucht (Bild 8). Eine deutliche inverse Korrelation zwischen der maximalen Löschttemperatur (T_{max}) und dem mechanischen Abbau des Kalks wurde ebenfalls beobachtet.

5 Schlussfolgerungen

Fallstudien zeigen, dass die Zusammensetzung und die Mikrostruktur von sedimentären Karbonatrohmaterialien einen Einfluss auf die Reaktivität von Branntkalk haben. Speziell graphische Darstellungen zeigen, dass ein höherer SiO₂-Gehalt zu einer geringeren maximalen Löschttemperatur (T_{max}) führt, und dass ein höheres Ver-

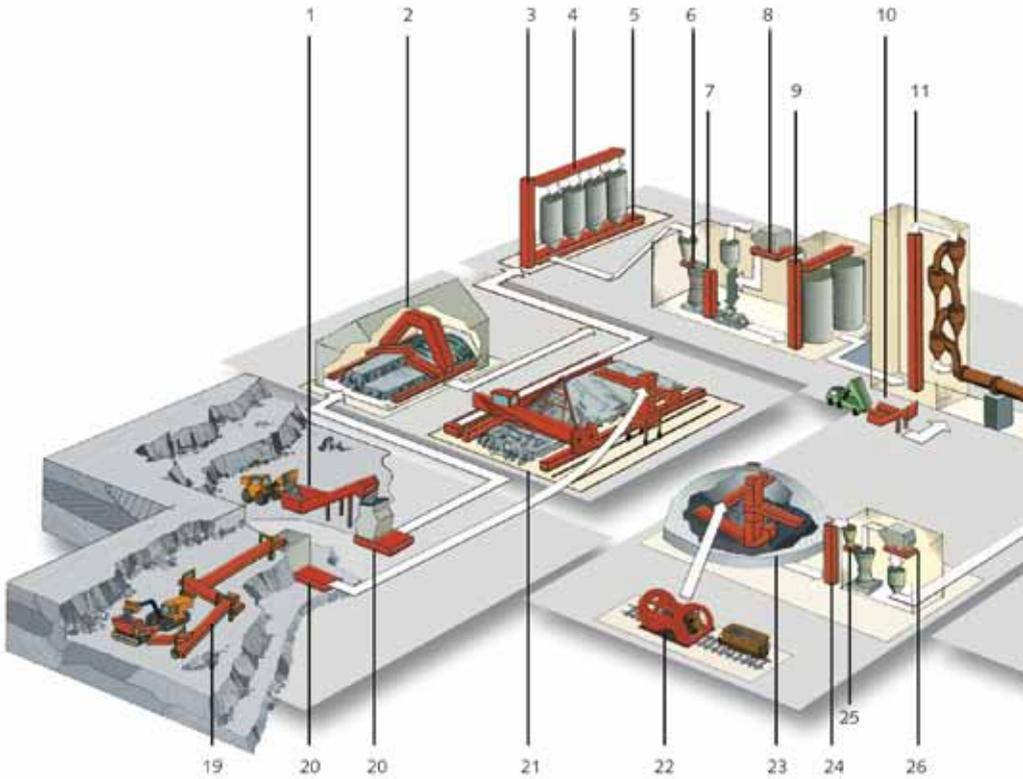
hältnis von Mikrit zu Sparit (M/S) zu einem geringeren Temperaturanstieg (t_{60}) führt). Im Ausdehnungsversuch bis 700 °C wird die Tendenz des Rohmaterials zu Verstopfungen in der Vorwärmzone des Ofens vorhergesagt, während der Überbrandtest es erlaubt, die Tendenz zur Klebrigkeit des Kalks bei einer hohen Temperatur (1300 °C) zu ermitteln. Die Erfahrung zeigt, dass je höher der SiO₂-Gehalt im Rohmaterial ist, die Tendenz zur Klebrigkeit umso niedriger ausfällt. Weitere Analysen werden die Auswirkungen der Kristallgrößenverteilung und der physikalisch-mechanischen Parameter auf die Reaktivität klären. Das erfordert jedoch technische Lösungen zur Optimierung des Ofenbetriebs.



8 Maximale Löschttemperatur als Funktion des Kalkabbau-Testes (a) und Schüttdichte als Funktion der maximalen Löschttemperatur (b) [8]

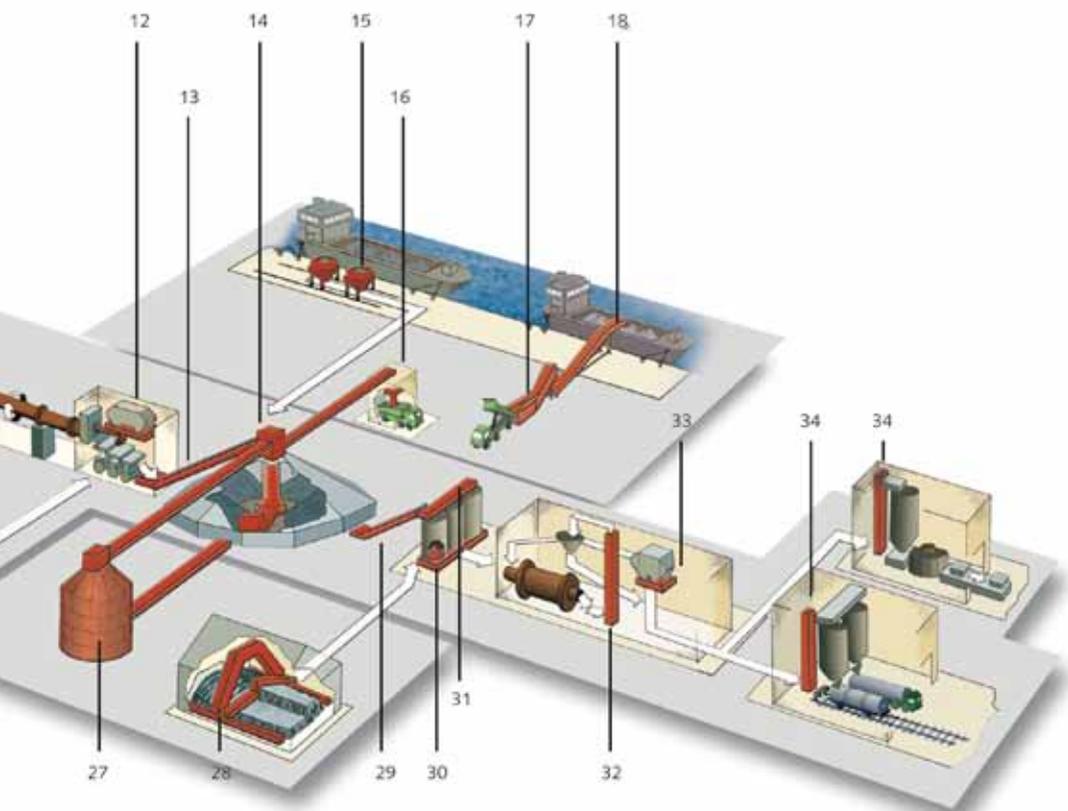
LITERATUR

- [1] European Commission (2010): "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries", 461 pp. (esp. 224–225)
- [2] Dunham, R.J. (1962): "Classification on carbonate rocks according to depositional texture". Classification of carbonate rocks. A symposium. (eds): W.E. Ham., American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1, pp 108–171
- [3] Moropoulou, A., Bakolas, A., and Aggelakopoulou, E. (2000): "The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime". Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 4, pp 633–639
- [4] Kiliç, Ö., and Mesut, A. (2006): "Effects of limestone characteristics properties and calcination temperature on lime quality". Asian Journal of Chemistry, Vol. 18, No. 1, pp 655–606
- [5] Boynton, R.S. (1980): "Chemistry and Technology of Lime and Limestone". 2nd Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 578 pp.
- [6] Hughes, J.J. and, Corrigan, M. (2009): "Microstructural expression of temperature and residence time in laboratory calcinated limestone", 12th EMABM, Dortmund, Germany, September 15–19th, 328–334
- [7] Schiele, E., and Berens, L. W. (1976): "La calce. Calcare. Calce viva. Idrato di calcio. Fabricazione. Caratteristiche. Impieghi", Edizioni Tecniche, Milano, 588 pp., (esp. 108–109)
- [8] Vola, G., Christiansen, T., Sarandrea, L., and Ferri, V. (2013): "Carbonate rocks characterization for industrial lime manufacturing: worldwide case-studies". Proc. 14th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMABM 2013), 14–16th June 2013, Denmark



Since the first pan conveyor for clinker handling was commissioned more than 60 years ago, Aumund Fördertechnik GmbH has become a recognized specialist for the conveying and storage of bulk materials, especially for hot and abrasive materials. The comprehensive product portfolio of Aumund and the Aumund Group of companies covers all aspects of bulk material handling and storage from the quarry to the dispatch of the finished product, including ship loading.

TEXT Christian Spätmann, Sales Director Cement/EMEA, Aumund Fördertechnik GmbH, Rheinberg/Germany



Aumund Group Equipment in the Cement Industry

1. Limestone intake and transfer to stationary crusher (Samson® Feeder)
2. Storage and reclaim of shale/clay (Portal Reclaimer)
3. Feeding pre-blending silos (Bucket Elevator)
4. Distribution of limestone and aggregates (En Masse Chain Conveyor)
5. Discharge and reclaim of limestone and aggregates (CENTREX®/Rotary Discharge Machine)
6. Proportional feeding of raw mill (Weigh Feeder)
7. Raw mill circulation (Bucket Elevator)
8. Filter dust reclaim (En Masse Chain Conveyor)
9. Raw meal silo feeding (Bucket Elevator)
10. Reception and transfer of alternative fuels (Samson®)
11. Raw meal feeding to pre-heater (Bucket Elevator)
12. Clinker dust reclaim (En Masse Chain Conveyor)
13. Clinker transport from cooler to storage (Pan Conveyor)
14. Automatic clinker discharge (MOLEX®)
15. Grab unloading (Eco Hepper)
16. Truck loading of clinker (Telescopic Spout)
17. Clinker intake and transfer to shiploader (Samson Feeder)
18. Clinker loading with Mobile Shiploader
19. Link Conveyor with mobile face crusher
20. Limestone crusher reclaim (Arched Plate Conveyor)
21. Limestone blending bed (Stacker/Reclaimer)
22. Coal/petcoke unloading and reclaim (Rotary Wagon Tipper)
23. Storage and reclaim of coal/
24. Bucket elevator to coal mill
25. Proportional feeding of coal mill (En Masse Chain Conveyor)
26. Coal dust reclaim (En Masse Chain Conveyor)
27. Clinker storage in steel plate silo
28. Gypsum storage and reclaim (CENTREX®/Rotary Discharge Machine)
29. Clinker transfer to mill hoppers (Pan Conveyor)
30. Discharge and reclaim of clinker and additives (Silo Discharge Gate/CENTREX®/Rotary Discharge Machine)
31. Distribution of clinker and additives (Pivoting Pan Conveyor)
32. Cement mill feeding (Bucket Elevator)
33. Filter dust reclaim (En Masse Chain Conveyor)
34. Cement silo feeding

Aumund Group equipment and solutions in the cement industry

1 Introduction

Identifying technological trends, research, development, and innovation to suit the specific demands of plant operation, new process requirements and bulk materials are playing an important role in developing the Aumund Group's reputation as a leading supplier of quality equipment with the highest technological standards coupled with a worldwide network of companies and agents, warehouses and an after-sales service around the globe.

2 Bucket elevators

The continuous and reliable transport of the raw meal to the cement kiln and the cement clinker from the kiln cooler to the silo and onward from the silo to the mill is fundamental to the efficiency of cement production in every plant regardless of size or production capacity.



1 Aumund belt-bucket elevator type BWG

The Aumund type BWG vertical belt-bucket elevator raises the raw meal from blending silos below to the pre-heater tower where the material is pre-calcined before being passed into the rotary kiln for final calcination and formation of the cement clinker (Figure 1). For larger plants, these elevators are installed with a single vertical lift in excess of 150 m.

Like all other Aumund products the type BWG vertical belt-bucket elevator has been subjected to continuous detailed development over the years and now represents the state of the art in this field of application. Unique to the Aumund system the type BWG elevator uses a single or double rope strand cross stabilised steel cord conveyor belt with close pitch cords to maximise the belt strength with a reduced belt thickness allowing selection of smaller pulley diameters to minimise gearing size.

In addition, compact close pitch buckets are employed to reduce the fixing stress and, combined with the special fixing design and close cord pitch, bucket detachment in service is virtually eliminated. To accommodate the high puncture strength of the cross stabilised close pitch steel cord belts Aumund have developed a special punching machine allowing the belts to be easily and reliably prepared before shipment (Figure 2).

3 Pan conveyors

Aumund offer a wide range of clinker transport designs all based on a common set of conveyor chains and supporting wheels but with various pan arrangements depending upon the installed angle (Figure 3).

Handling for example hot material, the standard Aumund type KZB design without internal baffles is suitable for a working angle to 30 degrees. For steep inclines to 40 degrees the



2 Automated belt punch at Aumund works, Rheinberg/Germany, and Aumund clamping device on site

KZB-Q design with baffles provides a simple and effective solution and for even steeper angles the Aumund bucket conveyor type BZB is available (Figure 4).

Invariably the pan conveyors are usually installed in enclosed galleries for weather protection and environmental pollution control. Aumund offer a complete service from a full package including the conveyors, gantries, transfer towers and cladding or a simple engineering only package where key components are supplied but the client is free to arrange local fabrication for the heavy structures.

The classical KZB pan is designed with overlapping base plate and jogged side plates designed to ensure the material is effectively contained whilst allowing the conveyor strand to articulate around the terminal sprockets with minimum leakage. The unique side plate design ensures material does not become trapped between the adjacent pans causing premature wear.

For the steep angle BZB “bucket conveyor” design the material is conveyed in fabricated buckets with overlapping front and back plates to prevent spillage, as illustrated below.

Aumund has a wide range of conveyor chains formed in precision laser cut fine grain steels with an extended range and increased rupture strength allowing longer single flight conveyors. Often the traditional intermediate transfer tower may be completely eliminated and the clinker transferred direct from cooler to silo if the plant geometry permits.



Where vertical elevation is required then for handling hot materials such as cement clinker and other raw materials or additions the central chain bucket elevator type BWZ is the favoured solution in any critical application.

Suitable for handling materials up to 400 °C and with vertical lift height to over 70 m these machines are extremely robust and reliable, proven in continuous duty applications running 24/7.

Available with either a single bucket strand and suitable for handling rates to 800 t/h or with a double strand to 1600 t/h the range of options covers most applications including raw material intake to storage and mill recirculation.



3 Aumund pan conveyor type KZB for handling of hot material



4 Clinker export – transport and silo and Aumund pan conveyor type KZB

The central chain system is based on a forged chain design with extended pins which carry loose bucket brackets mounted back to back and thus effectively retaining the bucket to the chain without a rigid bolted fixing. This loose bucket fixing is an Aumund patent and eliminates transmission of vibration and thus stress cracking of the bucket mounting is almost eliminated with a corresponding increase in bucket life.

The forged chains have an integral labyrinth seal and the bolt and bush are pre-lubricated on assembly. The seal substantially prevents ingress of material to the chain bush/bolt interface and the pre-lubrication promotes the deve-

lopment of a high quality surface finish to the bearing areas in service reducing the wear rate and consequently extending the chain life. The equipment described here covers the key areas in the transfer of material between the core processes in the cement plant and is therefore critical to the plant performance and profitability. Clearly an unscheduled kiln stoppage is disastrous with the attendant loss of production and re-commissioning costs but it is exactly the same story if the raw meal elevator or the clinker transport fails since the kiln is stopped just the same.

With a new plant or plant extension the operator is free to choose the equipment best suited to the application but for existing plants with life expired conveyors choices are more limited.

4 The Aumund three steps solution for retrofit & conversion

With the Aumund Retrofit & Conversion solution new chains, pans or buckets, drive wheels and shafts may be applied to existing structures upgrading the equipment to the legendary Aumund standard of performance and reliability, for minimum investment (Figure 5).

As an example the plant illustrated above at HeidelbergCement Ennigerloh/Germany, an existing steel plate conveyor installed by another company was replaced with an Aumund BZB bucket conveyor within the same gallery and general operating envelope.

5 Heavy duty feeders

The Aumund BPB-SF heavy duty feeders receives mined limestone direct from off-highway trucks providing a controlled feed rate to the primary crusher generally located at the quarry; one of the toughest jobs in the conveying process (Figure 6).

Feeders are really the unsung heroes of the cement plant often working away year after year with little attention handling the full range of process materials and fuels and in primary feed applications sustaining huge impact loads from boulders of several tons in weight falling up to 10 m from the off highway type truck. In these



5 Upgrade to an Aumund BZB bucket conveyor

ultra-high impact situations the plate feeder is really the only option, generally using tracked vehicle type chains up to 3600 kN rating with track rollers at short pitch to support the load and absorb the impact from falling rocks.

Available with plate width to 3000 mm and plates to 80 mm thick these Aumund type BPB-SF really are designed for arduous applications for long term reliability. Plates have milled edges for close fitting controlled overlap and cranked side boards to minimise risk of spillage. The close pitch supporting rollers are the key to long and reliable operation providing proper support for the chains and apron plates and distributing the load through to the feeder chassis.

These feeders are installed under steel or concrete hoppers often of several hundred tons

capacity and will take material from the largest dump trucks (Figure 7).

Generally the apron feeder will discharge direct to the primary crusher inlet and must be speed controlled to allow critical optimisation of the crusher performance.

Hydraulic speed drives may be supplied with a remote power unit including variable flow axial piston type pump and motor combination providing adjustable speed control allowing fine-tuning of the feeder discharge rate.

As an alternative the modern design of electronic inverter speed system provides excellent control using a simple direct coupled electric motor drive with combination of helical and planetary reduction gear as illustrated below (Figure 8).



6 Aumund heavy duty feeder type BPB-SF



7 Off highway truck delivers mined minerals



8 Planetary and helical reduction gear (photo Aumund)



9 Samson material feeder – the mobile feed point to field conveyor



10 Samson material feeder – imported clinker intake



11 Aumund under rail feeder/conveyor type KZB

Both hydraulic and electronic variable speed systems may be supplied with a digital interface allowing the speed to be set remotely. Generally the crusher drive will have a current monitoring system linked via the main plant PLC to the feeder drive to ensure that the crusher is always operating at optimum efficiency.

Most primary crushers are very large installations weighing in at perhaps over 1000 t and requiring a substantial height differential between intake and discharge and as such are generally fixed at a central point within the quarry to minimise haulage distance.

Whilst off highway trucks have improved their fuel efficiency they remain very expensive both to buy and operate in today's high fuel cost environment. Nevertheless the flexibility offered by truck haulage, particularly over short distances, is very attractive and generally this is the only viable solution to move material from the working face to the primary crusher. However, the economics of conveyor haulage are also very attractive but there are limitations on the use of belt conveyors and obviously it is not practical to convey the as mined material direct from the face. Clearly combining the low operating cost of overland belt conveyors with the flexibility of short haul truck operations would be the ideal solution.

6 Samson material feeder

Aumund have solved this problem by combining a Samson type mobile surface feeder with a twin shaft rotary sizer. In this manner as mined material may be reduced to a size that may be efficiently handled by overland belts.

The sizer is mounted directly over the field conveyor using a sub-chassis carried on rails allowing the sizer to be easily moved along the conveyor to the closest point to the working face (Figure 9).

The mobility of the Samson Surface Feeder is the key to this operation by providing a low level tipping point for the dump trucks and eliminating the traditional high level access ramp. Whilst the Samson will handle as mined material to a lump size of around 600 to even 800 mm

there are limitations in truck size and material type but within reasonable bounds this is an excellent solution.

By introducing a simple belt weigher on the following conveyor the input rate to the plant may be closely regulated by adjusting the conveying speed of the Samson to achieve the required rate. The load within the Samson is monitored by load cells and the output signal used to control the main intake plate feeder to ensure the system is not overloaded regardless of the material characteristics.

Within the cement plant there are many applications for feeders and the Aumund Group have appropriate solutions for each and every section of the plant. For material additions and imported clinker again the Samson is an attractive solution as illustrated below at the TDCIM grinding plant near Sines/Portugal. Being surface mounted this is an economical and flexible solution minimising foundation costs (Figure 10).

7 Pan conveyors

In addition to conventional conveying the construction of the KZB pan conveyor can be applied to feeders particularly for the extraction of materials such as clinker from long hoppers below railcar intake (Figure 11).

In this application clinker is extracted from the under rail hopper and inclined up for transfer to an Aumund BWZ vertical bucket elevator for subsequent storage. Whilst the KZB design is ideal for handling dry materials such as clinker it is not the best solution for wet and sticky clays and marls which would adhere to the pans.

For these highly cohesive materials the type BPB arched plate design was developed with a smooth conveying surface which may be cleaned by suitable scrapers at the point of discharge (Figure 12).

Typically used for the extraction of raw materials and material additions from blending silos the Aumund BPB and BPB-S are proven and robust solutions (Figure 13).

In this case the silo outlet is formed into a rectangular slot taking the circular silo to the



12 Aumund plate feeder type BPB



13 Silo with rectangular discharge



14 Aumund type DPB-B plate weigh feeder

rectangular inlet of the feeder. As with the primary crusher feeders these silo discharge feeders are generally linked to an inverter speed controller to allow remote and automated discharge rate integration to the plant process demands.

Typically the feeder is supplied as a fully or at least partially pre-assembled package that may be simply connected to the prepared silo flanged outlet (Figure 14).



15 Weigh rail load cell mounted and Aumund weigh feeders at TXI Oro Grande

Both the pan and plate feeder designs may be supplied with integral weigh rails providing a mass measurement of output rate particularly for proportioning feeds and blends from multiple silos (Figure 15).

As illustrated above, an integral weigh rail supported on load cells carries the external pan or plate rollers allowing the material mass within the conveying element to be accurately measured dynamically. By computing the load on the weigh rail, the length of the rail and the speed of the conveyor, the discharge rate from the silo can be accurately determined.

In the project for TXI Oro Grande Cement four silos provide storage for additives which must be metered at the required tonnages to blend into the main mill feed system. Similar equipment is also presently in operation at the St. Genevieve plant in Missouri by Holcim.

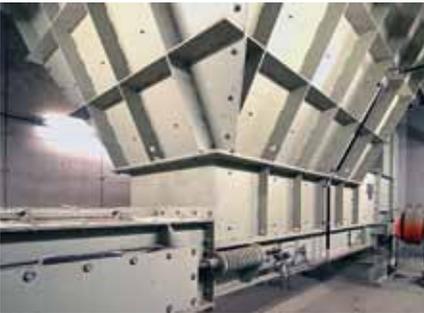
This state-of-the art, environmentally-responsible cement plant will produce approximately 4 million t of cement per year to meet the demand of the internal US market. In addition to the weigh feeders Aumund supplied clinker transports, vertical elevators, silo dischargers and chain conveyors for this most important project.



16 Aumund BPB-S plate feeder for shovel loading



17 CBR Ghent silo storage system and silo with type Louise BEW-K extractor (Aumund)



18 Underground hopper with Aumund PKF feeder and armoured chain feeder type PKF

In addition to the intake of as mined raw material and the discharge of silos the Aumund range of plate and pan feeders are equally suitable for forming an intermediate feed point for use with loading shovels discharging to existing overland or transfer belt conveyors (Figure 16).

As illustrated above an Aumund type BPB-S Apron Feeder receives clay from large shovels incorporating a buffer hopper and a controlled discharge rate using a rotary picker to regulate the discharge.

For the fine control of silo discharge rates cohesive materials such as wet clays are a real problem since the material tends to move as a block and shear off at the feeder discharge in large slugs creating peaks and troughs in the instantaneous output rate with the potential of bridging and blockage in the transfer chutes plus likely spillage from the ongoing belt conveyors.

Obviously the problem of highly cohesive materials is also very important in the design and construction of larger silos.

This is particularly true of materials such as F.G.D. gypsum (synthetic gypsum) as a replacement for natural gypsum but any fine and potentially wet material can be a real problem to extract reliably from large diameter storage silos.

In this situation the conventional cone or slot shaped silo outlet may not give reliable flow and with the risk of bridging and blockage or “Ratholing” causing an effective reduction of the silo usable working capacity.

A typical silo storage facility is illustrated above at the CBR cement plant in Ghent, part of the HeidelbergCement Group. In this installation the silos are fitted with the Louise BEW-K extractor system as illustrated below (Figure 17).

The Louise BEW-K is based in principle on the Aumund/Louise Centrex concept comprising a number of logarithmically shaped arms mounted to a rotating carrier which itself is mounted to a slewing ring allowing the carrier to rotate beneath the silo using a hydraulically operated circular rack system with twin actuators. In this manner the



19 Aumund drag chain conveyor type TKF

rotating arms excavate material from an undercut around the silo periphery working their way continuously around the silo circumference ensuring the contents are evenly discharged without risk of bridging or blockage.

Since the material is recovered from the outside of the silo reliable mass flow is ensured and the contents are discharged on the basis of first in first out always. In addition to the Samson plus the plate and pan feeders described here where the material load is effectively carried on rollers there is also the chain scraper conveyor type feeder known as the Aumund PKF armoured chain conveyor and the Aumund TKF drag chain conveyor.

The type PKF is generally used for handling difficult material beneath truck dump hoppers or more often under rail intake hoppers and has particular advantages in this situation. The PKF is very compact and fully sealed eliminating any risk of spillage or dust escape.



20 Aumund weigh feeder with spillage returns

Since these feeders are generally installed in deep pits housekeeping issues are important since clearing away spillage is difficult, expensive and time consuming (Figure 18).

Illustrated above a typical PKF installation under an intake hopper providing a controlled discharge rate to an ongoing conveyor system.

With its low construction height the armoured chain conveyor is primarily used for hopper discharge of crushed limestone or sticky raw materials such as chalk, gypsum, marl, clay or coal. Illustrated above during assembly and including a rotary picker at the discharge.

Available with a conveying width of up to 2600 mm the PKF can handle up to 1800 t/h depending upon the material type.

In addition to the PKF Armoured Chain Conveyor the type TKF Drag Chain Conveyors may also be used as feeders beneath silos and rail hoppers where the material specification permits.

The TKF is a long-standing Aumund Group product with over 650 units installed worldwide handling raw materials, additions and fuels, both for feeding and transfer (Figure 19).

The TKF is also a fully enclosed design and as such spillage and dust generation are eliminated making this a clean solution ideal in confined spaces. Naturally cleanliness in operation is important in any situation and whilst the PKF and TKF designs have particular attributes in this respect it is not the only solution. There are many applications where the apron feeder is the only viable option but by definition the apron design

has issues with cleanliness and material carry-back adhering to the apron plates is very difficult to completely eliminate.

In this situation a spillage returns conveyor prevents any spilt material falling outside the confines of the conveyor system by collecting material falling from the pans on the return side; as illustrated on this weigh pan feeder shown below (Figure 20).

As referred previously in many of the applications described here the rotary picker device is employed to loosen the bulk material as it passes over the discharge point of the feeder and thus smoothing the discharge rate. This is a key feature for handling difficult materials without which the equipment would not function properly particularly when handling low volume rates.

In all applications feeders have to sustain heavy material static and impact loads and as such are exposed to far higher stresses compared to general transfer conveying within the cement plant process.

Not only are feeders expected to operate in these extreme conditions handling the regular materials used in the cement industry. A whole new raft of special alternative fuels and substi-

tute raw materials with handling characteristics far away from the general experience can be found.

Aumund continue to develop the range of feeders and with the addition of the Samson type from Samson Materials Handling (Aumund Group) are now able to offer solutions suitable for these exotic fuels and raw materials.

Naturally all machines eventually require some attention and Aumund offer a fully comprehensive after-sales and refurbishment service (Figure 21).

As illustrated above an existing plate feeder is in the process of upgrading to the Aumund BPB-SF specification with new conveyor chains and apron plates.

Generally most existing machines may be upgraded to the Aumund specification by our experienced team of site engineers enabling the user to enjoy the legendary Aumund reliability and service without the cost and downtime of a full feeder replacement. Experience is the key to reliability and performance and in this Aumund have the products and the know-how to deliver the appropriate design for all applications.

www.aumund.com



21 Aumund plate feeder re-build

In einer Vielzahl von Einsätzen hat sich das Konzept eines chromerzfreien

PERILEX® bestätigt, so dass ein neues, innovatives und zukunftssicheres

basisches Produkt für die Zustellung von Zementdrehöfen zur Verfügung steht.

TEXT Dipl.-Ing. Dr. Hans-Jürgen Klischat, Leiter Forschung & Entwicklung, Qualitätsmanagement,
Dr. Carsten Vellmer, Produktentwicklung geformte Feuerfestprodukte,
Dipl.-Ing. Holger Wirsing, Leiter Produktentwicklung geformte Feuerfestprodukte,
Refratechnik Cement GmbH, Göttingen



Einbau von PERILEX®

REFRATECHNIK CEMENT GMBH

Smarte Feuerfestlösung für spannungsbelastete Drehöfen

1 Einleitung

Die Verlängerung der Laufzeit eines feuerfesten Steines trägt wesentlich zur Effektivität von Ze-

mentofenanlagen und zum Schutz der Umwelt bei, da weniger feuerfestes Material produziert werden muss und zusätzlich Ofenstillstände im



Zementwerk vermieden oder zumindest reduziert werden können mit entsprechender Senkung der spezifischen Energieverbräuche und auch der Emissionen [1].

So sank der spezifische basische Feuerfestverbrauch von 1,2 kg/t Klinker im Jahr 1970 auf einen Wert von derzeit 0,72 kg/t Klinker (Bild 1). Zu diesem sehr positiven Wert, selbst mit zunehmender Verwendung alternativer Brenn- und Rohstoffe, hat sicherlich in neuerer Zeit auch die Entwicklung der AF-Technologie durch die Refratechnik Cement GmbH beigetragen.

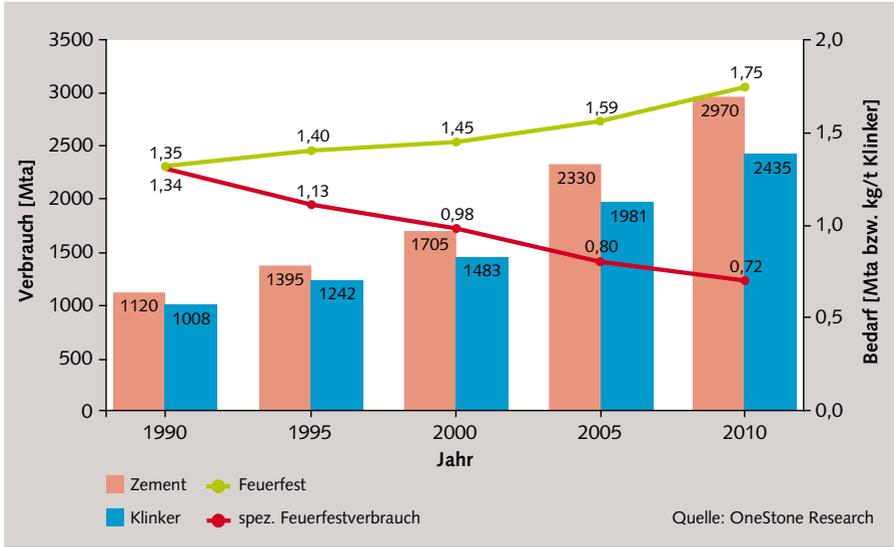
2 Einsatz thermomechanisch unempfindlicher Magnesiachromitsteine

Einen bereits in der Vergangenheit nicht unwesentlichen Anteil an diesem Trend hatte die Einführung der Steinsorte PERILEX® 80 im Jahr 1967. Schon zu dieser Zeit war der Grundgedanke des Umweltschutzes derart verankert, dass man den bis dahin festgeschriebenen Gehalt an Chromoxid im Stein auf ca. 4% halbierte. Die bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten, sogenannten direktgebundenen Steine, deren Einsatzgebiet vornehmlich in der Stahlindustrie liegt, erwiesen sich für die dynamischen, durch die Ofendrehung hervorgerufenen mechanischen Spannungen als zu spröde. Dies äußerte sich in kürzeren Laufzeiten und einem vorzeitigen Abplatzen.

Der damals neu entwickelte PERILEX® 80 baut dagegen auf einem europäischen Magnesia-sinter auf, dem durch ausgefeilte Brenntechnik und Einsatz speziell ausgesuchter Chromerze eine besonders elastische Art der direkten Brückenbindung zwischen Chromerz und Magnesiamatrix verliehen wurde (Bild 2).

Zusätzlich besitzt die verwendete Sintermagnesia eine effektive Kristallplastizität, so dass auftretende thermomechanische Spannungen durch das Drehofenmauerwerk nicht nur elastisch, sondern auch plastisch rissfrei abgebaut werden können. Die Einbindung grobkristalliner Periklase in eine Periklas-Magnesioferrit-Spinellmatrix zusammen mit der minimierten Menge an elastifizierendem Chromerz verleiht dem Stein ein ausgewogenes Gebrauchsverhältnis zwischen Temperaturwechselbeständigkeit, spannungsabbauendem Kriechverhalten und chemischer Resistenz. Diese herausragenden Eigenschaften [2] sorgten dafür, dass PERILEX® 80 häufig unter mechanischer und/oder thermomechanischer Belastung ein besseres Ergebnis als Magnesiaspinnellsteinsorten erzielte.

Aufgrund seiner hervorragenden Eigenschaften wurden von PERILEX® 80 seit dem Jahr 1967 weit mehr als 2 Mio. t hergestellt (> 200 Millionen Steine). In den Dimensionen der Zementindustrie ist das eine Ausmauerungsstrecke von 208 km in einem Ofen mit 4,50 m Durchmesser.

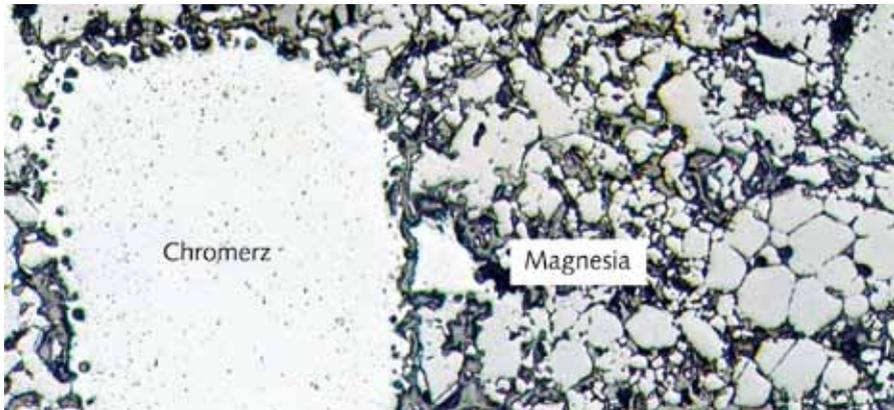


1 Trends im spezifischen basischen Feuerfestverbrauch für die Herstellung von Zement

3 Grundlagen des thermomechanischen Spannungsabbaus

Technisch ist ein Maß für den thermomechanischen Spannungsabbau der sogenannte Spannungsempfindlichkeitsindex SEI (stress sensitivity index SSI), der den Einfluss des Elastizitätsmoduls, der Wärmedehnung, der Zementofenvalütätsspannungen und der me-

chanischen Steifigkeit beschreibt (Bild 3) [3]. Je kleiner dieser Wert, desto höher ist das Spannungsaufnahmevermögen des Steines und damit der feuerfesten Ausmauerung. Bild 4 zeigt, dass die Steinsorte PERILEX® 80 aufgrund der speziellen Zusammensetzung und Herstellungstechnologie bereits einen ausgezeichneten Wert aufweist, der ansonsten nur



2 Mikrogefüge des PERILEX® 80

von hochgezüchteten Magnesiaspinellsteinen erreicht werden kann.

Ein weiterer Faktor des zerstörungsfreien, thermomechanischen Spannungsabbaus ist das Fließen, im Labor simuliert durch die Methode des Druckfließens nach [4] (Bild 5). Dieses Verfahren dient zur Beurteilung der zeitlichen Verformung bei konstantem Druck und konstanter Temperatur über einen definierten Zeitraum, meist 25 Stunden. Generell ist ein ausgewogenes Verhalten anzustreben, da ein zu geringes Druckfließen die thermomechanischen Spannungen nicht mindert und zu Abplatzungen führen kann, wenn die Steinelastizität nicht ausreichend ist. Ein zu hohes Druckfließen bei gleichzeitig niedriger Druckfeuerbeständigkeit (Druckerweichen) hält höheren thermischen Beanspruchungen nicht ausreißend stand. Generell ist ein hoher ta-Wert von $\geq 1550\text{ }^\circ\text{C}$ der Druckfeuerbeständigkeit für den Einsatz basischer Steine in Zementdrehöfen notwendig.

Bild 5 zeigt typische Kurven von Steinen mit niedrigem und mit erhöhtem Druckfließen. Für den thermomechanischen Spannungsabbau kennzeichnende Größen sind D_{max} als maximale Dehnung des Steines und verantwortlich für die Höhe der sich ausbildenden Spannung, und $D_{\text{max}}-Z_{25\text{h}}$ als Maß für den thermomechanischen Spannungsabbau.

4 Entwicklung und Eigenschaften spannungsminimierender, chromerzfreier Steine

Die Gesamtheit der Eigenschaften zeigt das hervorragende Einsatzverhalten von PERILEX® 80. Obwohl dieser Stein bereits auch unter um-

$SEI = \sigma_{\text{WID}} + \sigma_{\omega} - KDF$

σ_{WID} Wärmedehnungsspannung
 σ_{ω} Ovalitätsspannung
 KDF Kaltdruckfestigkeit

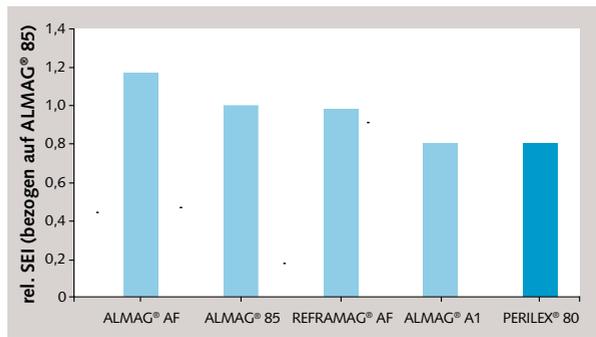
$SEI = \frac{D_{\text{max}}}{100\%} \cdot \frac{T_0}{1450\text{ }^\circ\text{C}} \cdot E_d + K_{\text{zul}} \cdot E_d - KDF$

D_{max} maximale Dehnung im DE-Versuch in %
 T_0 Temperatur der maximalen Dehnung in $^\circ\text{C}$
 E_d dynamischer Elastizitätsmodul
 K_{zul} Zulässigkeitsfaktor Ovalität ($0,67 \cdot 10^{-3}$)

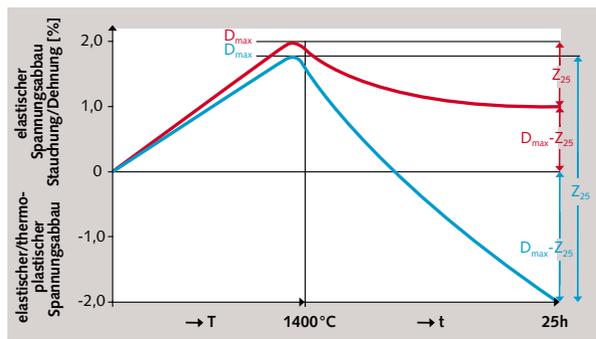
Ziel: $SEI < 550\text{ N/mm}^2$

3 Definition des Spannungsempfindlichkeitsindex (SEI) für basische Drehofensteine

welttechnischen Gesichtspunkten durch Minimierung des Chromerzgehaltes entwickelt wor-



4 Spannungsempfindlichkeitsindex (SEI) für verschiedene basische Feuerfeststeinsorten



5 Typische Druckfließkurven für basische Feuerfeststeine mit unterschiedlichem Spannungsrelaxationsverhalten

Tab. 1 Chemische Zusammensetzungen von Chromerz, Spinell und pleonastischem Spinell

	Chromerz	Spinell	pleonastischer Spinell
SiO ₂	0,5–2	< 0,5	< 2,0
Al ₂ O ₃	10–25	67	35–60
Fe ₂ O ₃	14–28	< 0,5	20–30
Cr ₂ O ₃	30–48	–	–
MgO	12–20	32	20–50
CaO	< 0,8	< 0,5	< 0,5

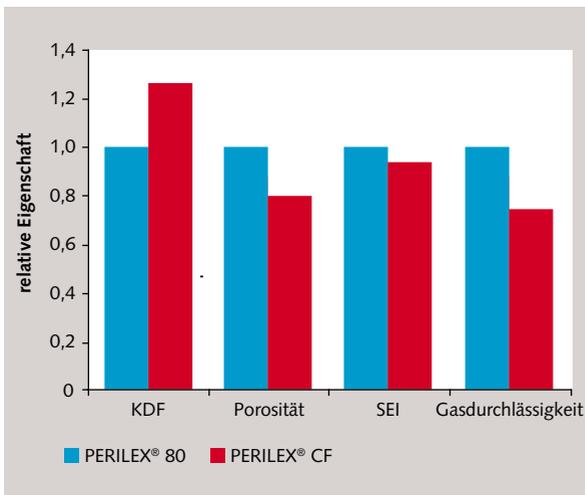
den war, konnte ein chromerzfreier Stein auf derselben europäischen Rohstoffbasis wegen nicht ausreichender Feuerfestigkeit bis jetzt nicht umgesetzt werden.

Aufgrund neuer Rohstoffentwicklungen [5] [6] konnte das Konzept eines pleonastischen Spinells als Elastifizierer auch auf ein Produkt auf Basis eines eisenreichen Rohstoffes übertragen werden. Pleonastischer Spinell, also ein Spinell aus dem System MgO-Al₂O₃-FeO_x, ist in seiner Zusammensetzung einem Chromerz verwandter als beispielsweise Magnesiumaluminiumspinell (Tab. 1). Das Chromoxid des Chromerzes wird durch die Oxide Al₂O₃, MgO und im geringeren Umfang auch durch Fe₂O₃ ersetzt.

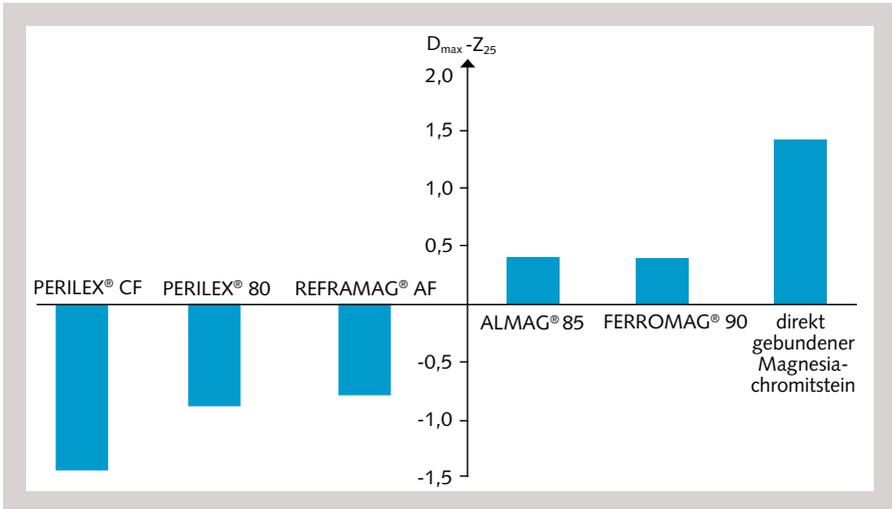
Unter Anwendung der bewährten AF-Technologie konnte aus dem vom PERILEX® 80 bekannten verfügbaren eisenoxidhaltigen Magnesiasinter und dem synthetischen Rohstoff pleonastischer Schmelzspinell der thermomechanisch unempfindliche Stein PERILEX® CF entwickelt werden, der außergewöhnliche physikalische Eigenschaften und eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit aufweist. Gegenüber einem PERILEX® 80, mit seinen besonderen Einsatzigenschaften, konnte die mechanische Festigkeit unter Beibehaltung der bewährten Feuerfestigkeit um mehr als 20% erhöht werden (Bild 6).

Aufgrund einer signifikant niedrigeren Porosität von ca. 13–15% gegenüber einem Wert von 17–19% bei Magnesia-chromitsteinen wird, in Verbindung mit einer Senkung der Gasdurchlässigkeit von ca. 4 nPm auf 3 nPm, sogar eine deutliche Erhöhung des Infiltrationswiderstandes um 25% erreicht, ohne dass andere Eigenschaften beeinflusst werden.

Der Spannungsempfindlichkeitsindex und die Elastizität entsprechen denen des PERILEX® 80. Die für den thermomechanischen Spannungsabbau entscheidende Größe des Druckfließens bleibt erhalten, daher ist auch PERILEX® CF spannungsreduzierend und thermoplastisch (Bild 7). Die



6 Vergleich der Eigenschaften von PERILEX® 80 und PERILEX® CF



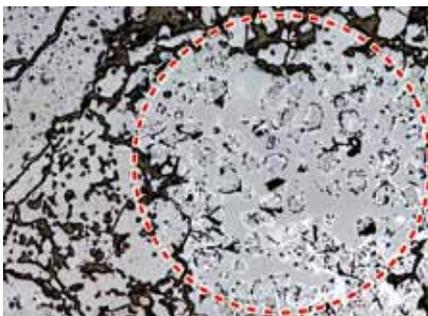
7 Thermoplastische Spannungsrelaxation verschiedener basischer Steinsorten durch kontrolliertes Druckfließen

thermochemischen Vorteile des pleonastischen Spinells resultieren auch aus dem Gefügedesign (Bild 8).

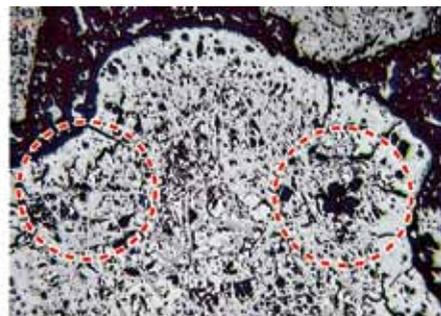
Ein (MgO-freier) Hercynit kann mit der ihn umgebenden Matrix durch Diffusion von MgO und Eisenoxid interagieren [7], woraus lokale Porositäten und Gefügeinhomogenitäten resultieren, die einem Angriff durch Zementklinkerschmelze weniger Widerstand entgegensetzen. Im Gegensatz dazu werden derartige aktive Re-

aktionen mit dem MgO-haltigen, pleonastischen Spinell nicht beobachtet, so dass eine Korrosionsbeständigkeit auf hohem Niveau gegeben ist. Der pleonastische Spinell verhält sich dabei ähnlich wie der Magnesiumaluminiumspinell, der ebenfalls nicht signifikant mit seiner Umgebung interagiert.

Obwohl Magnesiachromitsteine technisch unbestritten nach wie vor Standarderzeugnisse für Zementöfen sind, hat ihre Bedeutung ge-



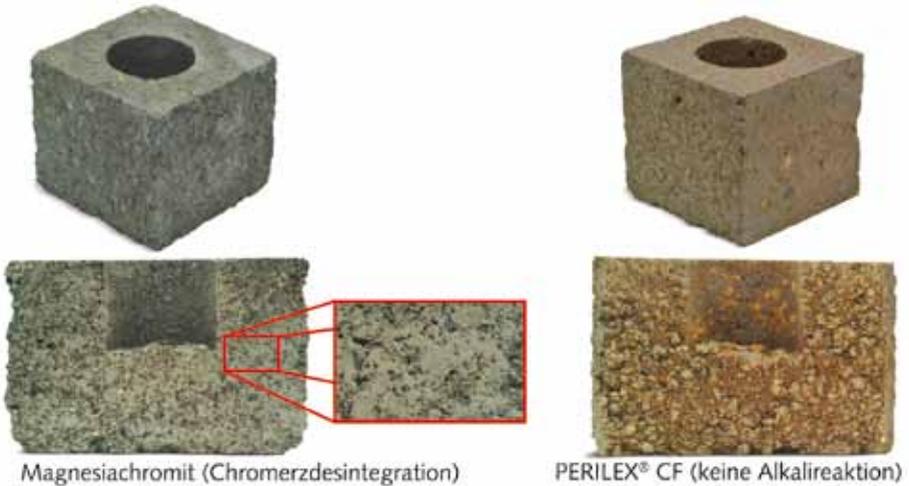
Pleonastischer Schmelzspinell



Schmelzhercynit

8 Vergleich des Gefüges basischer Steine mit pleonastischem Schmelzspinell (links) und mit Schmelzhercynit (rechts, gekennzeichnet durch Gefügeinhomogenitäten)

PROCESS



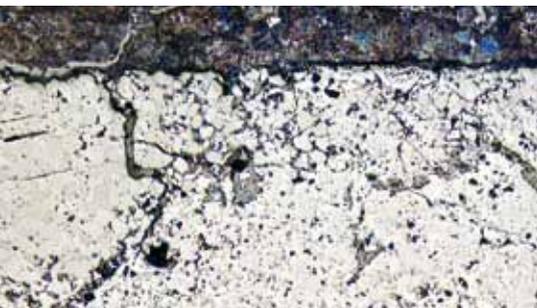
9 Vergleich der Alkalibeständigkeit eines Magnesiochromitsteins und des PERILEX® CF mittels Alkalitiegeltest bei 1350 °C

genüber spinellhaltigen Magnesiateinen aus Umweltgründen signifikant abgenommen. In oxidierender Atmosphäre und in Gegenwart von Alkalioxiden, also Bedingungen, wie sie in Zementöfen vorherrschen können, kann es zu einer Zersetzung des Chromerzes unter Bildung von toxischem Alkalichromat kommen [8]. Neben der Umweltbelastung wird auch der Elastifizierer korrodiert, so dass die Steine zusätzlich verspröden können. Dieses Verhalten lässt sich gut im sogenannten Alkalitiegeltest nach [9] bei einer Temperatur von 1350 °C mit

Kaliumcarbonat als Reagenz simulieren (Bild 9). Der Tiegel eines Magnesiochromitsteines zeigt an den Stellen, an denen das Chromerz vorlag, deutliche Löcher, bedingt durch den Abbau dieses Mineralen. Die Folgen sind der Verlust der Steinelastizität und die Bildung von Chromat. Bei einem Tiegel aus dem chromerzfreien PERILEX® CF ist eine derartige Reaktion naturgemäß nicht zu beobachten, da er keine durch Alkalien korrodierbaren Minerale enthält.

Neben dem Vorteil des thermochemisch beständigen Pleonastes, der gegenüber Zementklinkerangriff stabiler als ein Hercynit ist [10], kommt zusätzlich der Nutzen eines eisenreichen Magnesiasinters zum Tragen, der eine größere Ansatzfreudigkeit als ein eisenarmer natürlicher oder synthetischer Magnesiasinter zeigt (Bild 10).

Das Ansatzverhalten von Magnesiapleonaststeinen auf Basis dieser Rohstoffe ist aufgrund der Gegenwart von pleonastischem Spinell, Magnesioferrit und auch Belit demjenigen von Magnesiahercynitsteinen oder sogar Magnesiochromitsteinen überlegen. Die Gegenwart hochviskoser Calciumferrit- und Calciumaluminatverbindungen aus Reaktionen zwischen

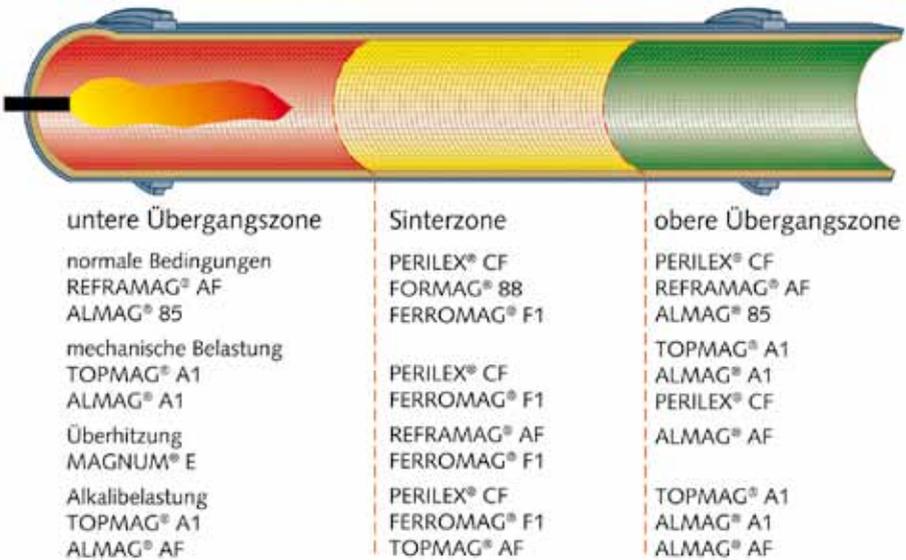


10 Ansatzhaftung auf PERILEX® CF

Rohstoffbasis: Magnesia-Spinell (fMA-Spinell)		
physikalische Eigenschaften		
Rohdichte		2,95–3,15 g/cm ³
Offene Porosität		13–15 %
Kaltdruckfestigkeit		70 N/mm ²
Druckfeuerbeständigkeit	ta	1600 °C
	te	1700 °C
Segerkegel		42
Wärmedehnung	bei 400°C	0,4 lin.-%
	bei 800°C	1,0
	bei 1200°C	1,6
Temperaturwechselbeständigkeit	(950 °C/Luft)	100
Wärmedurchgang	bei 1000°C	2,8 W/m·K
Chemische Analyse (Gew. %)		
MgO		78–82
Al ₂ O ₃		5–7
Fe ₂ O ₃		8–10
CaO	ca.	2,3
SiO ₂	ca.	1,1



11 PERILEX® CF – Datenblatt



12 Zustellungskonzepte der Refratechnik Cement GmbH für verschiedene Anforderungen

Brenngut und Steinkomponenten fördert die Bildung von Zementklinkeransatz auf der Feuerfestzustellung [6].

5 Zustellungsempfehlungen

Mit der Entwicklung von PERILEX® CF ist es gelungen, einen chromerzfreien Magnesiastein auf Basis europäischer Rohstoffe herzustellen, der den Eigenschaften hochwertiger Magnesiachromit- und auch Magnesiaspinnellsteinen nicht nur entspricht, sondern in thermomechanischer Sicht sogar überlegen ist (Bild 7, 11).

PERILEX® CF zeigt eine hohe Beständigkeit gegenüber Alkalisplating, einen hohen Infiltrationswiderstand, eine niedrige Porosität, reduzierte Gasdurchlässigkeit, eine ausgezeichnete Gefügeelastizität und eine ausgeprägte Thermoplastizität, aus der eine niedrige mechanische Spannungsempfindlichkeit resultiert. PERILEX® CF eignet sich aufgrund dieser Eigenschaftskombination vornehmlich für die Zustellung der zentralen Brennzone und thermisch normal sowie thermomechanisch hoch belasteter oberer Übergangszonen (Bild 12).

6 Zusammenfassung

Magnesiachromitsteine des PERILEX® 80-Typs haben neue Maßstäbe hinsichtlich des Einsatzverhaltens – speziell unter thermomechanischer Belastung – in Zementdrehöfen gesetzt. Obwohl diese Steinsorte bereits chromerzreduziert ist, ist die Bildung von Chromaten unter entsprechenden Bedingungen nicht auszuschließen. Mit PERILEX® CF steht nun ein Produkt zur Verfügung, das dieselben positiven thermomechanischen Eigenschaften wie PERILEX® 80 aufweist, jedoch ohne Einsatz von Chromerz. Zusätzliche Verbesserungen konnten durch die Erhöhung des Infiltrationswiderstandes, der Ansatzbildung und sogar des thermoplastischen Spannungsabbaus erzielt werden.

In einer Vielzahl von Einsätzen hat sich das Konzept des chromerzfreien PERILEX® bestätigt, so dass ein neues, innovatives und zukunftssicheres basisches Produkt für die Zustellung von Zementdrehöfen zur Verfügung steht.

www.refra.com

LITERATUR

- [1] Harder, J. (2008): Trends in refractory materials for the cement industry ZKG International 61, Nr. 5, pp. 36–45
- [2] Bartha, P.: PERILEX® 80 – Standardstein für die Brennzone von Zementdrehöfen. Refratechnik Bericht Nr. 34, Refratechnik GmbH 1989
- [3] Klischat, H.-J.; Weibel, G.: Entwicklungsstand chromerzfreier Magnesiasteinsorten für die Zementindustrie. REFRA-Kolloquium 1997, Kolloquiumsband 1997
- [4] DIN EN 993-9:1997: Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse, Teil 9: Bestimmung des Druckfließverhaltens
- [5] Deutsches Patent DE 101 17 029 B4: Material für feuerfeste Formkörper oder Massen, feuerfestes Produkt hieraus sowie Verfahren zur Herstellung eines feuerfesten Produkts
- [6] Klischat, H.-J.; Wirsing, H.: Practical application of mineralogical variations for cement kiln refractories, UNITECR 2009, Salvador, Brasilien, 13.–19. Oktober 2009, Vortrag auf Konferenz CD
- [7] Geith, M.; Majcenovic, C.; Buchebner, G.: Active Spinel – An innovative additive to basic cement rotary kiln bricks. Proc. 46th Int. Coll. on Refractories, Aachen 2003, S. 57–60
- [8] Weibel, G. (1990): Chromerzfreie Feuerfestausmauerung für die Übergangs- und Sinterzonen von Zementdrehrohröfen Zement-Kalk Gips 43, Nr. 9, pp. 436–439
- [9] DIN CEN/TS 15418:2006-9: Prüfverfahren für dichte feuerfeste Erzeugnisse – Leitlinien zur Prüfung von durch Flüssigkeiten hervorgerufene Korrosion an feuerfesten Erzeugnissen
- [10] Klischat, H.-J.: Basische Feuerfestlösungen für spezielle Anforderungen im Zementofen REFRA-Kolloquium 2008, Berlin, Kolloquiumsband 2008

Bulk material like building materials, coal, cereals, fodder or mineral compounds are often transported via motorways, railways, waterways or through nature reserves. The large quantities of dust generated during this process can pollute the environment considerably. Dust clouds can also occur during loading, filling and palletising. This creates considerable clean-up for the employees. With its conveying, loading, filling and palletising systems, the Beumer Group ensures minimal dust emission.

TEXT Beumer Group, Beckum/Germany

All Beumer Group GmbH & Co. KG

Belt conveying systems enable rapid and efficient transport of bulk material from the quarry to the destination as well as through rough terrain while simultaneously protecting the environment from falling material

BEUMER GROUP

Transport, loading and filling of bulk material – with significantly less dust formation

The Beumer Group is a world-leading systems provider for transporting, loading, filling and packaging bulk material. The portfolio includes curved belt conveyors for fast and cost-efficient transport of large quantities of bulk material from the quarry or mine to the factory or port. The belt conveyors are able to navigate long distances, high angles of inclination and tight curve radii, and can be adapted individually to the belt or pipe conveyor bulk handling solutions. Depending on the customer's requirements, Beumer provides either troughed belt or pipe conveyor bulk handling solutions. Open troughed belt conveyors are recommended for larger throughputs, higher mass flows and wider curved radii. Closed

pipe conveyors protect both transported items from environmental influences and the environment from falling items. Troughed belt conveyors can also be covered or encased to minimise dust formation during transport. This seal guarantees dust-free transport.

Beumer's portfolio also includes mechanical vertical conveyors such as belt bucket elevators. They are an essential production link in the cement industry. Beumer reliably seals the shaft casings of these bucket elevators, which stops dust from escaping. Instead, the dust trickles into the bucket elevator boot that is equipped with a dynamic bottom. Wet and sticky material cannot accumulate but is fed back into the transport process.

Loading without spilling

The Beumer Group has developed bulk loading heads for the quick and dust-free loading of bulk transporter vehicles. They are designed according to the double-wall system, where the material inlet and the dedusting unit are separated from each other. When the bulk loading head is placed on a filler neck, its sealing cone is lowered and the outlet spout opens simultaneously. The lowering level of the sealing cone is variable. It is possible to adjust the fill level in the vehicle using the fill level meter. In order to balance out any minor positional deviations of the vehicle, the operator can move the bulk loading head laterally during placement.

The bulk loading head is also available with an integrated compressed air filter. This allows operation of the centralised dedusting units independently of the dust transporting devices. The dust removed from the bulk transporter ve-

hicle is fed again to the material flow during loading. The compressed air filter consists of filter hoses which are positioned between the inner telescopic tube and the outer bellows. The suction is carried out by a fan fastened on the outside. The cleaning is carried out by timed compressed air shocks.

Dust-free loading of open vehicles

Beumer offers various types of telescopic loading systems for dust-free loading of open vehicles. With these systems, the bulk loading head is lowered to the floor of the vehicle and the material feed is switched on. A fill level switch in the lower dedusting hood is activated by the rising material. This causes the bulk loading head to be raised automatically. The edge of the dedusting hood always rests on the material cone while it rises, so that no dust can escape. The bellows, or the telescopic tubes for the dust extraction, are connected to a central dedusting air system. Corresponding devices or flow control gates transport the material to the system. The bulk loading heads can also be equipped with fill level indicators. Once the vehicle is loaded, they reliably turn off the material feed. Different types of fill level indicators are used depending on the properties of the material. Some of the criteria used to select the correct switch are bulk density, flow behaviour as well as product temperature.

Mobile loaders for bulk transporter vehicles

In the cement industry, high loading capacities are required. Stationary bulk loading heads are often not sufficient, especially if the bulk transporter vehicle is standing on a weighbridge and may not be moved during the loading process. It should be possible for the operator to move the bulk loading head to each filler neck of the vehicle. Depending on the properties of the materials to be loaded and the length of the vehicle, different sliding or swivelling loading system options are available. These mobile loading systems can be fitted with either one or two loading heads, depending on the space available.

First, the bulk material needs to be filled in bags so that it can be palletised, packaged and



1 The Beumer Group has added to its product portfolio the rotating filling machine, the Beumer fillpac, which is equipped with extensive new features



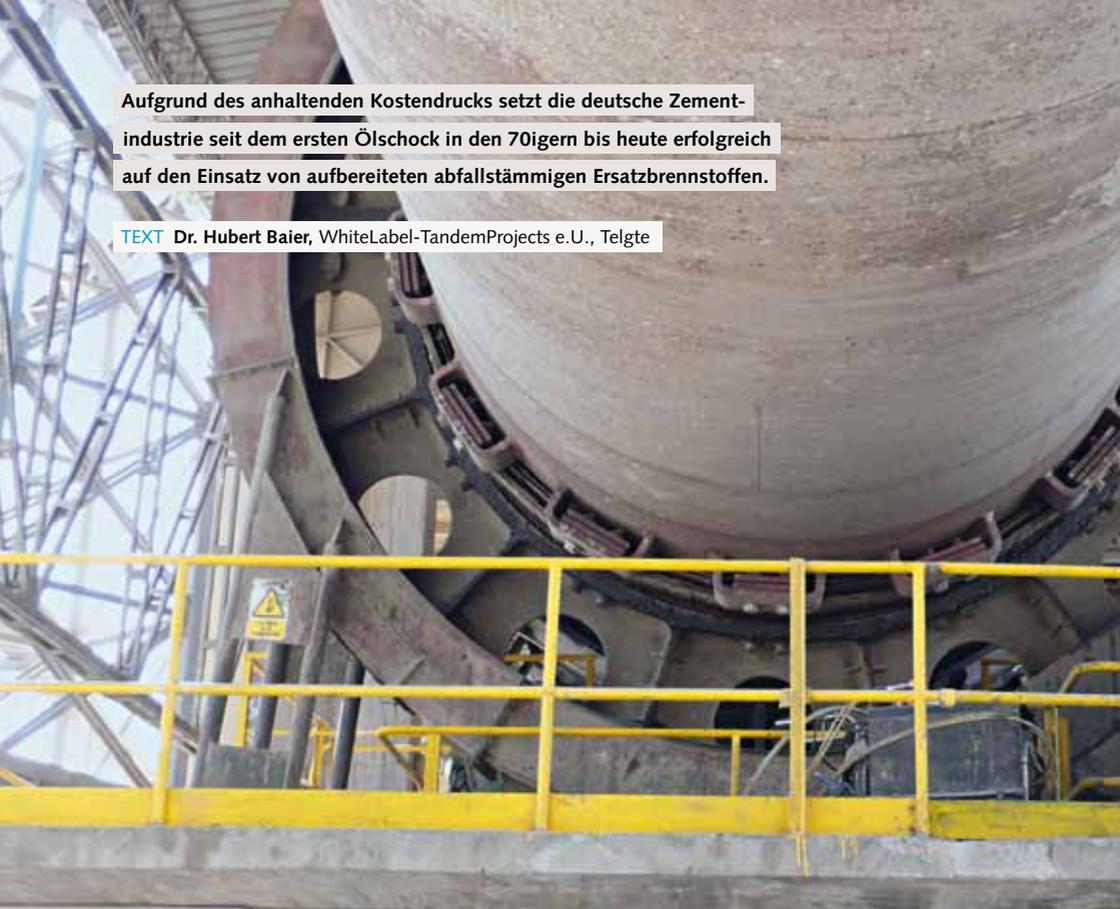
2 The twin-belt turning device: Two parallel belt conveyors, driven with different speeds during the turning process, bring the bags gently into the required position

sent to the customer. As a single-source provider, Beumer Group offers an innovative solution with the fillpac filling machine and provides equipment and systems for packaging lines. The new machine can be flexibly integrated with existing packaging lines and can be optimally adapted to the customer's situation. What makes the Beumer fillpac unique are the specific weighing electronics which ensure the weight accuracy of the bags. Rejects caused by too high or too low filling weights can almost be eliminated. The weighing unit communicates permanently with the filler neck via a specific software. The automatic bag weight adjustment determines the exact filling weight of the bags, thus enabling the exact degrees of filling during the filling process. The filling spout is equipped with a special hood that reduces dust emission to a minimum. There are also suction points on both sides in the area of the filling spout. The dust is sucked off directly where it builds up and fed back into the

process. This allows for a practically dust-free filling of the bags. The three-position cylinder that regulates the coarse and fine flow is protected from dust, because it is positioned vertically and outside of the dirty area. The cylinder for bag discharging is also located in the dust-free zone above the filling spout.

The paper, PE or PP bags are then stacked on pallets of different sizes in a flexible, precise and stable way. For this, Beumer has developed the Beumer paletpac, a high capacity layer palletiser. In order to avoid dust formation, the bags have to be handled very carefully. This is why Beumer offers the palletiser with a clamp-type turning device or the newly developed twin-belt turning device. They position the filled bags quickly, ensuring their dimensional stability without any deformations. If required, the Beumer Group customer support can simply upgrade existing palletisers with the twin-belt turning device.

www.beumergroup.com



Aufgrund des anhaltenden Kostendrucks setzt die deutsche Zementindustrie seit dem ersten Ölschock in den 70igern bis heute erfolgreich auf den Einsatz von aufbereiteten abfallstämmigen Ersatzbrennstoffen.

TEXT Dr. Hubert Baier, WhiteLabel-TandemProjects e.U., Telgte

AFR

Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in modernen Zementwerken

1 Aktuelle Ausgangsposition

Aufgrund der anhaltenden, globalen Schwankungen bei den Energiekosten und der lokalen Diskussion über einen nachhaltigen Ressourcenschutz sieht sich die deutsche Zementindustrie gezwungen, ihren gesamten Strom- und Energiebedarf ständig nachzubessern.

Seit der Öl-Krise in den frühen 1970er Jahren wird nach brauchbaren Brennstoffalternativen gesucht. Ihren Höhepunkt fand diese Suche mit der Umsetzung der TASI. Dabei war

die Zementindustrie mit ihrem 2000 °C heißen Brennprozess und dem überstöchiometrischen Kalksteinüberschuss sogar ein willkommener Partner der privaten Entsorgungswirtschaft [1], die sich auf gewerbliche Abfälle spezialisierte, und Altöl, Altreifen oder später kunststoffhaltige Produktionsabfälle etc. aufbereiteten (Abb. 1). Sogar die Umweltministerien riefen die Zementindustrie an, als sie zur schnellen Umsetzung des Verfüterungsverbot von Tiermehl Hilfe benötigten.



Damals wie heute, bei einer thermischer Substitutionsrate (TSR) von durchschnittlich 62 % (im Einzelfall nahezu 100 %), wurde gern verkannt, dass es sich um einen Produktionsprozess handelt, dessen Endprodukt ein normgerechtes Bindemittel ist, das sogar im Trinkwasserbereich eingesetzt wird, und die Nutzung alternativer Brennstoffe weder die Umwelt, Mitarbeiter oder gar das Produkt in Mitleidenschaft ziehen darf.

Inzwischen stehen so viele Daten über Abfallquellen und deren gewonnener Ersatzbrennstoffe zur Verfügung [2, 3], dass das integrative Konzept von stofflicher und energetischer Verwertung, sicherer Deponierung und thermischer Beseitigung weltweit kopiert wird.

Während man sich im Ausland an die Anfänge unserer Abfallwirtschaft erinnert fühlt,

kam hierzulande das Thema CO₂, Nachhaltigkeit und Preiskrieg zusätzlich auf die Tagesordnung der Anlagenbetreiber. Um die Herstellkosten wettbewerbsfähig zu halten, musste nun an mehreren Stellschrauben gleichzeitig gedreht werden.

2012 wurden nun an 54 Standorten (Abb. 2) von 7371 direkt Beschäftigten 25,245 Mio. t Zement in 22 Unternehmen produziert. Der thermische Energiebedarf lag bei ca. 2,867 GJ/t Zement und der elektrische Bedarf ist, aufgrund des Betriebs von vielerlei umwelttechnischen Zusatzanlagen, über 10 %, auf 110,8 kWh/t Zement angestiegen [4]. Diese Investitionen sind noch wirtschaftlich – allerdings ist der Trend nicht mehr aufzuhalten, sich im globalen Wettbewerb auch nach günstigeren Produktionsstandorten umzuschauen.

Einem nicht-konzerngebundenen/privaten Anlagenbetreiber bleibt keine Wahl, als seine Anlage auf den neuesten und effizientesten Technologiestand zu bringen. Hat er einen belastbaren Absatzmarkt und eine langfristige Laufzeit seiner Abgrabungsgenehmigung, kann er seine Anlage z.B. mit einer Abwärmenutzung nachrüsten, mit der er Strom produzieren oder Klärschlamm trocknen kann. Hinzu kommen Zusatzinvestitionen in modernste Filter, größere Ventilatoren oder die verfahrenstechnisch passende Entstickungstechnologie, von denen inzwischen High- bzw. Low-dust SNCR oder SCR erprobt werden. Chlorbypass, Low-NO_x-Brenner, automatische Labor- und Expertensysteme



Quelle: H. Baier

1 Fein aufbereiteter fester Ersatzbrennstoff für den Einsatz im Sinterzonenbrenner



2 Werksstandorte der deutschen Zementindustrie (VDZ)

und der langfristige Zugriff auf geeignete Abfallströme sowie fachkundige Aufbereitung sind daher Grundvoraussetzung.

Neben der Änderung der Klinkermineralogie (Belitreich) mit geringerem Brennstoffbedarf und CO₂-Emissionen oder der Umstellung auf Mühlensysteme mit geringerem Strombedarf (VRM) bleibt bei wechselndem und unstetem EBS-Angebot nur die Installation von flexiblen thermischen Systemen.

Zur Erinnerung: Der thermische Klinkerprozess im Drehrohrföfen wird im Vorwärmer (sog. Calcination) meist zu 60% und zu 40% über den Hauptbrenner mit Brennstoff gespeist, während der mehlfine Kalkstein 90% und sämtliche Brennstoffe 10% des gesamten Massestroms ausmachen (Abb. 3).

Vereinfacht stellt jede Verbrennung einen diffusionsgesteuerten Oxidationsprozess dar, bei dem zunächst der Brennstoff unter Energieverlust abtrocknet, pyrolysiert, das Pyrolysegas bei entsprechender Umgebungstemperatur zündet

und mit dem Restkoks exotherm verbrennt, bis der umgebende Sauerstoff oder der Kohlenstoff verbraucht ist [5].

Diese Sequenz gilt sogar für flüssige Brennstoffe, wobei auch hier Wasser endotherm verdunstet, das Pyrolysegasvolumen größer und der Koksanteil geringer ausfallen und damit die Flammenform buschiger wird als bei einem langsameren Feststoffausbrand.

Um dennoch den Hochtemperaturprozess zu gewährleisten, sollte sich der Ersatzbrennstoff an den Eigenschaften von Braunkohle orientieren.

Bis zu einer thermischen Substitutionsrate (TSR) von 50% könnte man technisch wie auch abfallrechtlich tatsächlich von „Mitverbrennung“ sprechen, während mit weiter steigender TSR das Verhalten und die Qualität der Ersatzbrennstoffe den gesamten Verbrennungs- und damit den Herstellungsprozess dominiert. D.h., je höher die TSR, umso präziser müssen die jeweiligen Ersatzbrennstoffe bedarfsgerecht aufbereitet werden.

2 Optimierte Brennersysteme und Aufbereitungsaufwand

Die Herkunft der ursprünglichen Rohabfälle spielt heute keine Rolle mehr. Der moderne Aufbereiter und Ersatzbrennstofflieferant ist heute über Eignungsprüfungen, Stoffstrommanagement und Qualitätssicherung in der Lage, bedarfsgerechte Qualitäten herzustellen. Allerdings richtet sich die Verfügbarkeit nach dem günstigsten Entsorgungsentgelt, über das die Aufbereitungs- und Entsorgungskosten sowie mögliche Be- und Zuzahlungen gedeckt werden. D.h. die Abfallströme werden hoch volatil, da der Abfall sich den Weg mit dem günstigsten Entsorgungsentgelt sucht, was wiederum im Sinne des Abfallerzeugers (Verursacherprinzip) ist, der rechtlich wie auch finanziell für die gesamte Kausalkette zur schadlosen Verwertung und Beseitigung verantwortlich ist.

Ein geringer Teil des Entsorgungsentgeltes wird für die Aufbereitung der Brennstoffe verwendet. Dennoch müssen die Ersatzbrennstoffe verfahrensbedingt Anforderungen einhalten, so dass sich inzwischen neben dem Heizwert,



Quelle: H. Baier

3 Blick auf einen Vorwärmerturm mit Tertiärluftleitung und Drehrohren



4 Frontalansicht auf einen Sinterzonenbrenner, der für feste und flüssige Brennstoffe ausgelegt wurde (POLFLAME® der ThyssenKrupp Resource Technologie GmbH)

Chlor- und Spurenelementgehalt auch die Partikelgröße als Kriterium festgesetzt hat (Abb. 4).

So werden die Qualitäten für den sog. Haupt- oder Sinterzonenbrenner meist mit einer Korngröße um 10 bis < 30 mm angeboten. Wobei aus oben beschriebener Sequenz ersichtlich, die Korngröße nicht der bestimmende Faktor ist. Dreidimensionale Partikel z.B. aus Vollkunststoff, Holz oder Gummigranulat landen bei horizontaler Beschleunigung vorzeitig im Klinkerbett und führen zu den bekannten reduktiven Brennbedingungen mit negativen



5 Klinker ist das Zwischenprodukt in der Herstellung von Zement. Rechts oben: unter Normalbedingungen gebrannt; links oben: unter reduzierenden Bedingungen gebrannt; mittig unten: reduzierend gebrannter Klinker mit sog. „braunem Kern“

Quelle: H. Baier

Folgen (Abb. 5). Zweidimensionale Folien verweilen länger in der Schwebe und dürfen daher größer ausfallen. Somit ist eine Windsichtung eher für die Qualitätsverbesserung der Hauptbrennerbrennstoffe geeignet als Schredder mit feineren Siebkörben und verringerter Durchsatzleistung [6].

Eine weitere Forderung an die Verbrennung abfallstämmiger Ersatzbrennstoffe wird an die Senkung der Stickoxidemissionen gestellt.

Verschiedenste Brennerhersteller bieten inzwischen sog. Low-NOx- oder auch Vielstoffbrenner für den Drehrohrofenbetrieb von 10 MW bis 300 MW an. Separate Kanäle erlauben getrennte Geschwindigkeiten der Transportluft und flexible Düsen ermöglichen unterschiedliche Anstellwinkel zur Verlängerung oder Verkürzung der Flugbahnen bis zum Ausbrand [6]. Dabei soll eine angepasste Partikelgröße und intensive Vermischung von Brennstoff und Luft für eine schnelle und vollständige Verbrennung sorgen und die Verweilzeit in der Reaktionszone des Drehrohrofens verkürzen. Dieses Verhalten ist besonders wichtig für Mischungen aus verschiedenen Brennstoffen [5]. Da das nicht immer der Fall ist, wird zur Unterstützung der Umwandlungssequenz bei einigen Drehrohrofenbetreibern zusätzlich Sauerstoff aufgegeben, was wiederum zu einer heißeren Flamme führt.

Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes in der Verbrennungsluft bildet sich thermisches NOx. Abfallstämmige Ersatzbrennstoffe enthalten in der Regel Restmengen von Wasser, das zur Flammenkühlung und damit zur NOx-Minderung beiträgt, ebenso, wie stellenweise auftretendes CO in komplexen Reaktionen mit NOx reagiert und es denaturiert. Der verbleibende NOx-Rest wird in entsprechenden DeNOx-Systemen mittels Ammoniak direkt oder in Katalysatoren reduziert. Aufgrund der verfahrenstechnischen Betriebstemperatur von 2000 °C sind Grenzwerte von < 0,2 mg/°C NOx einzuhalten (Abb. 6).

Das Wechselspiel aus Bildung und Zersetzung von NOx und CO zeigt sich besonders im Einsatz von festen Ersatzbrennstoffen in sogenannten Kalzinatoren.



6 Leitungen zur Beschickung einer Rauchgasenstückerung mit ammoniakhaltiger Lösung (hier SNCR-Anlage)

Quelle: H. Baier

3 Nutzung alternativer Brennstoffe im Kalzinator

In modernen Drehrohröfen mit Kalzinatoren werden nur 40% der Feuerungswärmeleistung über den Sinterzonenbrenner gedeckt, während 60% des thermischen Bedarfs von einem oder mehreren Punkten im Kalzinator befeuert wer-

den. Dabei wird die notwendige Verbrennungsluft über eine Tertiärluftleitung aus dem Klinkerkühler geleitet und dem Kalzinator zugeführt. Im Hinblick auf die Reaktion erfordert die Entsäuerung des Kalksteins nur Temperaturen von 850 bis 900 °C. Innerhalb des Kalzinators mischen sich die 1000–1200 °C heißen Rauchgase aus dem Ofeneinlauf mit der 800–1000 °C Heißluft aus dem Klinkerkühler des Drehrohrföfens, wobei eine sichere Zündung und Verbrennung der langsam reagierenden, grobstückigen Brennstoffe sichergestellt wird. Das Trocknen, Pyrolysieren, Zünden und Verbrennen des Brennstoffs dauert wesentlich länger als das Kalzinieren des Rohmehls, was somit der entscheidende Faktor für die Dimensionierung der Kalzinatoren ist.

In der Regel werden dort Stückgrößen um 50–80 mm bzw. Folien bis zu 100 mm eingebracht, so dass die Brennstoffpartikel innerhalb von 5–8 s ausbrennen können, ehe deren Asche im Ofeneinlauf und im Feststoff landet (Abb. 7).



Quelle: H. Baier

7 Grobstückiger Ersatzbrennstoff für den Einsatz im Kalzinator

Tab. 1 Parameter deutscher Braunkohlen [2]

Parameter	[%]
Heizwert	21 800 kJ/kg
C ¹	25,2–28,8
H	2
O	10–11,5
N	0,2
S	0,1–0,5
flüchtige Anteile	46–48
Asche	2–20
CaO	1,6–2
SiO ₂	0,3–0,4
Al ₂ O ₃	0,5–0,6
Fe ₂ O ₃	1–1,4

Spurenelementgehalte	[Ppm]
As	0,2–2,5
Be	0,04–0,4
Pb	< 0,01–2,2
Cd	0,01–1,5
Cr	0,01–15
Ni	1–9,3
Hg	0,11–0,9
Tl	0,027–0,2
V	1–13
Zn	3,9–22

Daher gibt es nun verschiedene Möglichkeiten, Kalzinatoren nach den Brennstoffeigenschaften auszulegen und erlaubt die Regelung über die Verbrennungstemperatur bzw. die Verbrennungsluft, um so auch die NO_x-Emissionen zu reduzieren.

4 Nutzung grobstückiger Brennstoffe im Kalzinator

Aus bestimmten Gründen kann eine Aufbereitung zu teuer werden oder der Ausbrand der Kalzinatorbrennstoffe nicht vollständig ablaufen, so dass es die Möglichkeit einer zusätzlichen Vor-

brennkammer gibt. Zwei Kammer Systeme sind aktuell auf dem Markt, die den Einsatz schwieriger Ersatzbrennstoffe wie Teerpappe, Rotorstücke von Windkraftanlagen, grobgehackte Reifenteile oder Biomasse erlauben. Die Stückgröße kann bis 300 mm betragen (Abb. 8).

Ein System ist die sog. Hot Disc von FLSmidth, über deren langsam rotierendem Drehteller die grobstückigen Ersatzbrennstoffe in den heißen Gasstrom des Kalzinators gelangen. Die grobstückigen Materialien werden getrocknet, pyrolysiert und werden nach ca. 10 Minuten Verweilzeit durch einen Krählarms in den aufsteigenden Gasstrom abgeworfen. Der weitere Ausbrand erfolgt in der üblichen Kalzinatorschleife. Das System arbeitet am besten mit Fraktionen, die alle ein sehr ähnliches thermisches Verhalten aufweisen müssen [8].

Der sog. Step-Combustor der ThyssenKrupp Resource Technologies bringt ebenfalls grobstückige Brennstoffe mit niedrigem Heizwert (hohem Wassergehalt) in den Kalzinator ein. Dabei wird der Brennstoff nicht zwangsweise abgeräumt, sondern wird nur dann weiter in Richtung Kalzinatorschleife gefördert, wenn er vollständig verascht ist und sich pneumatisch befördern lässt. Somit ist dies System auch für inhomogene Brennstoffe mit unterschiedlichem Verbrennungsverhalten geeignet. Die Retentionszeit kann daher untereinander extrem variieren [9].



Quelle: H. Bäter

8 Abfälle aus der Industrie und dem Gewerbe dienen als Ausgangsprodukt für die Herstellung von ofenfesten festen Ersatzbrennstoffen

5 Modernisierung

Um in Deutschland wettbewerbsfähig zu bleiben, werden die Anlagen ständig modernisiert. So werden Klinkerkühler auf thermisch effizientere Rostkühler umgebaut, die teilweise auch noch mit einer Abwärmerückgewinnungsanlage kombiniert werden. Die Hauptbrenner werden auf moderne Vielstoffbrenner umgerüstet, um neben Stein- und Braunkohle, Petrolkoks auch alternative feste und flüssige Brennstoffe einsetzen zu können [10].

Bei der Abwärmerückgewinnung werden ca. 430 °C heiße Ofenabgase über eine Kesselanlage geleitet und der darin erzeugte Dampf einer Turbine zugeführt. Der Generator erzeugt ca. 1/3 des Strombedarfes. Der Wirkungsgrad im Abhitze-Kraftwerk liegt zwischen 22–25%, wobei die Dampfdruckkühlung sowohl über Luft- wie auch Wasserkühlung erfolgen kann.

Die gesamten Ofenabgase können, je nach gewachsener Rohgas- oder Reingasschaltung der Anlagen und Nutzungsgrad der Restwärme

Tab. 2 Durchschnittliche Ersatzbrennstoffqualitäten für Hauptbrenner (vorselektierter Industrie und Gewerbeabfall) [2]

Parameter	[%]
Heizwert	21 800–32 200 kJ/kg
C ¹	n.d.
H	n.d.
O	n.d.
N	n.d.
S	0,1–0,8
flüchtige Anteile	n.b.
Asche	9–39
CaO	n.b.
SiO ₂	n.b.
Al ₂ O ₃	n.b.
Fe ₂ O ₃	n.b.
Cl	0,39–2,2
F	0,1–1,7

Spurenelementgehalte	[Ppm]
As	0,68–15,32
Pb	27–4.406
Cd	0,75–162
Cr	19,10–187
Ni	5,41–1.622
Hg	0,09–1,62
Tl	0,23–1,96
V	2,17–164

Tab. 3 Durchschnittliche Ersatzbrennstoffqualitäten für Hauptbrenner (weiter aufbereitete Hochkalorische Fraktion aus Siedlungsabfall) [2]

Parameter	[%]
Heizwert	16 700–25 700 kJ/kg
C ¹	48,2–54,1
H	7,3–8,5
O	32,5–34,1
N	0,76–1,35
S	0,1–1
flüchtige Anteile	n.b.
Asche	13,6–46,7
CaO	26–32,1
SiO ₂	22,6–30,5
Al ₂ O ₃	7,82–60
Fe ₂ O ₃	4,26–6,75
Cl	0,8–4,3
F	0,02–0,09

Spurenelementgehalte	[Ppm]
As	0,48–7,33
Pb	131–30.176
Cd	2,1–55
Cr	82,73–3.029
Ni	14,19–3.658
Hg	0,28–3,39
Tl	0,18–5,90
V	5,19–135

PROCESS

in der Mahltrocknung, mittels selektiver nicht-katalytischer Reduktion (SNCR) oder selektiver katalytischer Reduktion (SCR) entsteht werden. Teilweise kann es bei der SCR-Anlage sogar wieder notwendig werden, das bereits thermisch ausgebeutete und daher abgekühlte Abgas erneut zu erhitzen, um auf die für den Katalysatorbetrieb notwendigen 250 °C zu kommen.

Anschließend wird Ammoniakwasser in den Rauchgaskanal eingedüst, das für die Umwandlungsreaktion der Stickoxyde im Katalysator notwendig ist. Nach Durchströmen des Katalysators wird das Rauchgas über einen Prozessventilator mit unter 0,1 mg/°C NO_x und nahezu Ammoniakschlupf-frei zum Kamin geleitet.

Tab. 4 Eintragskriterien für Ersatzbrennstoffe zur Nutzung in einem Drehrohrofen nach dem Trockenverfahren mit Vorwärmer und Kalzinator ohne die Grenzwerte der 17. BImSchV zu tangieren (Die Berechnungen basieren auf der sog. Stoffflussanalyse/NRW) [1].

Element (glühverlustfrei)	Konzentration
CaO	Einzel oder gesamt ≥ 50 Gew.-%
SiO ₂	
Al ₂ O ₃	
Fe ₂ O ₃	
Quecksilber (Hg)	≤ 2 ppm TS
Cadmium (Cd)	≤ 50 ppm TS
Thallium (Tl)	≤ 45 ppm TS
andere Spurenelemente	≤ 20000 ppm TS

LITERATUR

- [1] Baier, H. (2006): Ersatzbrennstoffe für den Einsatz in Mitverbrennungsanlagen. ZKG INTERNATIONAL, 03/2006, S. 78–85
- [2] Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, September 2003
- [3] Zerkowski, J. et al. (1992): Kohlecharakterisierung im Hinblick auf die Verbrennungsmahlbarkeit, Zündwilligkeit, Reaktivität, Verschlackung, VGB, TB 240, Essen (1992)
- [4] <http://www.vdz-online.de/publikationen-branchendaten/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/>
- [5] Brandt, F. (1999): Brennstoffe und Verbrennungsrechnung, FDBR, Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V., 3rd Edition – Essen: Vulkan Publishing House, 1999
- [6] Baier, H. (2010): Disruptive substances and the burning behaviour of solid alternative fuels. ZKG INTERNATIONAL 06/2010, S. 58–67
- [7] Reznichenko, A. (2009): Welcome to a new dimension, Burner Technology, International Cement Review, Tradeship Publications Ltd. Dorking, June 2009, 96–98
- [8] Baier, H. (2009): Erzeugung von Ersatzbrennstoffen für die deutsche Zementindustrie – Rahmenbedingungen, Herkunft, Aufwand und Realisierung. Berliner Energiekonferenz Erneuerbare Energien, 10. und 11. November 2009 in Berlin, TK Publishing House Neuruppin 2009, S. 75–88
- [9] Larsen, Morten Boberg (2007): Alternative Fuels in Cement Production, Technical University of Denmark, Department of Chemical Engineering, Ph.D. Thesis, DTU
- [10] Menzel, K., Maas, U., Lampe, K. (2009): Technologies for Alternative Fuel Enhancement in Clinker Production Lines, 2009 IEEE Cement Industry Technical Conference Record.
- [11] Rohrdorfer Zement (2013): Werksreportage – Innovation aus Tradition. ZKG INTERNATIONAL 07-08/2013, S. 24–31



Your project, our solution

We deliver customised solutions for operators and investors of cement plants throughout the world. Intercem is the competent and experienced partner for planning, detail engineering, project handling of greenfield projects and the conversion/modernisation of production systems. Our 3-level system makes it possible for us to offer both used and modernised products, to compile new solutions made from used and new components or to create completely new systems.



And all that: **Fast.Fair.Flexible.**

Intercem Engineering GmbH ■ Intercem Installation GmbH

Carl-Zeiss-Straße 10 | 59302 Oelde | Germany

Tel.: +49 2522 92058-0 | E-Mail: info@intercem.de | www.intercem.de



Die Gebr. Pfeiffer SE bietet mit der MVR-Walzenschüsselmühle und dem MultiDrive® Lösungen für die Zementindustrie, die den Anforderungen an immer größere Produktionsleistungen und Verfügbarkeiten in speziellem Maße gerecht werden. Mittlerweile liegen Betriebserfahrungen von über 35 000 Stunden für die MVR-Walzenschüsselmühle und den MultiDrive® vor.

TEXT Dr.-Ing. Caroline Woywadt, Head of Process Engineering Department,
Bernd Henrich, Area Manager, Gebr. Pfeiffer SE, Kaiserslautern

GEBR. PFEIFFER SE

Betriebserfahrungen mit der Pfeiffer MVR-Walzenschüsselmühle und dem MultiDrive®

Seit vielen Jahrzehnten liefert die Firma Gebr. Pfeiffer SE Maschinen für die moderne Aufbereitungstechnik in den Bereichen Mahlen, Sichten, Trocknen und Löschen. Die Walzenschüsselmühlen für die Zementindustrie bilden dabei einen wichtigen Bereich im Produktportfolio. Die MPS-Walzenschüsselmühle ist seit den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts im Einsatz in der Rohmaterial- und Kohlevermahlung, die erste MPS-Mühle zur Zementvermahlung wurde 1979 installiert und produziert heute nach über 30 Jahren Betrieb Hochofenzemente mit einer Feinheit nach Blaine von über $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Die MPS-Mühle wurde im Laufe der Zeit kontinuierlich weiterentwickelt. Als Antwort auf Marktanforderungen und Trends zu Mahlsystemen mit immer höheren Durchsatzleistungen hat die Gebr. Pfeiffer SE ein richtungweisendes Konzept für eine neue Mühle und einen neuen Antrieb entwickelt. Die neue MVR-Walzenschüsselmühle für die Vermahlung von Zementrohmaterial, Zement und Hüttensand ermöglicht durch ihren modularen Aufbau, den Betrieb auch bei Ausfall eines Walzenmoduls aufrecht zu erhalten. Der neue Antrieb MultiDrive®, der aus bis zu sechs gleich großen Antriebseinheiten besteht, bietet ebenfalls die aktiv redundante Ausführung wie die Walzenmodule. Damit werden ungeplante Stillstandzeiten selbst bei Ausfall von Hauptkomponenten deutlich reduziert.

1 Konstruktive Merkmale der MVR-Mühle

Hauptkomponenten der MVR-Walzenschüsselmühle sind die vier oder sechs Mahlwalzen mit einer zylindrischen Schleißteilgeometrie, der flache Mahleller, das gasführende Gehäuse mit Düsenring und Sichter sowie der Antrieb, der

alternativ als MultiDrive® oder als konventioneller Antrieb mit Planetengetriebe ausgeführt sein kann. Alle strömungstechnisch relevanten Maschinenteile wie Heißgaskanal, Düsenring und Hochleistungssichter SLS mit dem Materialeintrag entsprechen dem bewährten MPS-Design. Bild 1 zeigt den 3D-Schnitt einer MVR-Walzenschüsselmühle. Ihre Bezeichnung hat die Mühle nach dem Schüsselaußendurchmesser, der

1 MVR-Walzenschüsselmühle





2 Blick auf die Mahlwalze einer MVR

Art des zu vermahlenden Materials und der Anzahl der Mahlwalzen.

Ein Walzenmodul besteht aus der Walze mit zylindrischem Walzenmantel, der Walzenachse, der Schwinge, dem Lagerbock und der hydraulischen Krafteinleitung. Durch diese spezielle Aufhängung wird in Verbindung mit der ebenen Mahltellergeometrie ein paralleler Mahlspace zwischen Walze und Mahlteller erreicht, was eine gleichmäßige Verdichtung des Mahlbettes und somit Laufruhe gewährleistet (siehe Mahlwalze auf [Bild 2](#)). Je zwei benachbarte Walzenmodule sind über Zwillingstützen mit dem Fundament verbunden. Dadurch steht zwischen den Stützen mehr Platz zur Verfügung, was sich

positiv auf die Zugänglichkeit und die Anlagenplanung in Bezug auf Heißgasführung, externen Materialumlauf und Hilfsaggregate auswirkt.

Die Walzenmodule können mit dem gleichen Hydrauliksystem, das die Mahlkraft während des Betriebs aufbringt, einzeln ausgeschwenkt werden. Bei Einsatz eines Planetenradgetriebes kann die Produktion mit reduziertem Durchsatz nur aufrechterhalten werden, wenn zwei gegenüberliegende Walzen ausgeschwenkt oder angehoben worden sind. Der MultiDrive® mit mehreren Antriebsmodulen ermöglicht die Fortführung der Produktion mit sogar nur einem ausgeschwenkten oder angehobenen Walzenmodul [1].

Mit dem Trend zu größeren Durchsätzen, also größeren Mühlen, verbindet sich die Forderung nach größeren Getrieben mit gleichzeitig sinkenden Mühlen-Drehzahlen. Die Mühlenleistung wird damit mehr durch die Größe des Drehmomentes bestimmt. Um die Probleme durch immer größere Planetenradgetriebe zu umgehen, hat die Firma Pfeiffer zusammen mit Flender/Siemens das sogenannte MultiDrive®-Konzept entwickelt. Beim MultiDrive® treiben zwei bis sechs gleiche Antriebsmodule mit installierten Antriebsleistungen von jeweils bis zu ca. 2000 kW den Mahlteller über einen Zahnkranz an, der sich unterhalb des Tellers befindet. Jedes Antriebsmodul



3 Stützen der MVR 1800 C-4 bei Hauri in Bötzingen/Deutschland



4 Mühlengehäuse der MVR 1800 C-4 mit eingeschwenkten Mahlwalzen

besteht aus einem Elektromotor, einer Kupplung und einem Kegelstirnradgetriebe, angeordnet auf einem Grundrahmen als Transporteinheit. Je Antriebsmodul kommen ein Frequenzumrichter, ein Trafo und eine Ölversorgungsstation hinzu.

Die Lastverteilung auf die einzelnen Elektromotoren erfolgt über eine übergeordnete Regelung durch den zu jedem Antriebsmodul gehörenden Frequenzumrichter. Dadurch bedingt ist die Anpassung der Mahltellerdrehzahl zur verfahrenstechnischen Optimierung grundsätzlich möglich. Die Mahlkräfte aus dem Mahlbett werden über eine konventionelle Gleitlagerung ins Fundament abgeleitet. Die Kegelstirnradgetriebe, die am Umfang des Zahnkranzes positioniert sind, werden durch die Mahlkräfte nicht belastet. Bei Ausfall eines Kegelstirnradgetriebes kann dieses aus dem Zahneingriff genommen werden und ein Betrieb der MVR-Mühle mit reduziertem Durchsatz ist möglich.

Nach dem Prinzip der aktiven Redundanz ist die mit einem MultiDrive® ausgerüstete MVR/MPS-Mühle in der Lage, den Betrieb bei Problemen sowohl an den Mahlwalzen als auch im Antriebsbereich aufrecht zu erhalten. Bei Antriebsleistungen von rd. 2000 kW bis zu 12000 kW kommen in der gesamten Mühlenbaureihe nur fünf Walzenmodule und drei verschiedene Antriebsseinheiten zum Einsatz [2].

2 Betriebserfahrungen

2.1 Testmühle im GPSE Technikum

Im Technikum der Gebr. Pfeiffer SE steht neben zwei MPS-Mühlen im Technikumsmaßstab eine MVR 400 für Testmahlungen zur Verfügung. Mit dieser Mühle wurden umfangreiche Testreihen durchgeführt, um grundsätzliche Auslegungsdaten für Zementrohmaterial, Klinker und Hüttensand zu erhalten. Durch diese praxisnahe Pilotanlage werden rohstoffabhängige und projektrelevante Daten wie spezifischer Arbeitsbedarf, notwendige Gasmenge und spezifische Verschleißraten ermittelt.

2.2 Hauri, Deutschland

Die Firma Hauri KG, ein Mineralstoffwerk in Südwestdeutschland, betreibt seit Ende der 1960er



5 Die MVR 3750 R-3 im Werk Lukavac (Bosnien-Herzegowina) nach der Inbetriebnahme



6 Die montierten Stützen der MVR im Werk Balaji (Indien)



7 Montage des Mühlengehäuses (Balaji, Indien)

Jahre MPS-Mühlen für die Mahlung von Phonolithgestein (vulkanischen Ursprungs) und zur Herstellung von z.B. zementhaltigen Bindemitteln. Die drei bereits installierten Mühlen des Typs

MPS 125 A (zwei Anlagen) und MPS 200 BC wurden im Jahr 2007 ergänzt durch eine MVR 1800 C-4. Die neue MVR wird zur Herstellung derselben Produkte wie die vorhandenen MPS-Mühlen eingesetzt und zeigt dabei die gleichen, sehr guten Betriebseigenschaften. Mahlprodukte sind beispielsweise ein Binder HT 35 mit 60% Klinker bei 5300 cm²/g nach Blaine und getemperter Phonolith mit Durchsatzleistungen von 22,5 t/h bei einem spezifischen Energiebedarf von 15,3 kWh/t bei massebezogenen Oberflächen von 6000 cm²/g nach Blaine und höher. **Bild 3** und **Bild 4** zeigen die Mühle während der Montage.

2.3 Lukavac, Bosnien-Herzegowina

In Bosnien-Herzegowina ist seit Ende 2008 eine MVR 3750 R-3 für Zementrohmaterialvermahlung in Betrieb (**Bild 5**). Mit einer installierten Leistung von 1600 kW für den Mühlenhauptantrieb beträgt der Durchsatz 160 t/h bei einem Siebrückstand von 12% auf 0,090 mm. Der



8 Montierte Walzenmodule (Balaji, Indien)

spezifische Energiebedarf der Mühle liegt bei 8,7 kWh/t, für das Gesamtsystem (Mühle, Siehter, Gebläse) bei nur 16,4 kWh/t. Nach mittlerweile über 15 000 Betriebsstunden liegt der spezifische Verschleiß bei ca. 1,3 g/t. Die MVR-Mühle wurde innerhalb von lediglich 75 Tagen montiert.

2.4 Holcim France

Seit 2009 ist eine MPS 4750 BC mit einem MultiDrive® in einer Holcim Mahlanlage in Frankreich für die Produktion von CEM I und Hüttensandmehl in Betrieb. Der Multi-Drive® ist mit drei Modulen von je 1450 kW ausgerüstet. In dieser Anlage werden 120 t/h CEM I 52,5 bzw. 130 t/h Hüttensand mit einer massebezogenen Oberfläche von 5000 cm²/g nach Blaine produziert.

2.5 Balaji, Indien

Die Jaypee Gruppe (Jaiprakash Associates Ltd) ist der drittgrößte Zementhersteller Indiens. In



9 Montage des Siehteroberteils (Balaji, Indien)

den verschiedenen Werken sind bereits sechs Rohmehlmühlen der Typen MPS 4000 B, MPS 4750 B und MPS 5000 B installiert, sechs Kohlemühlen des Typs MPS 3070 BK sowie zwei MPS-Mühlen für Zementvermahlung (MPS 4750 BC). Für das Werk Balaji hat der Kunde sich für die neue Mühlenlösung MVR mit Multi-



10 Die MVR 5600 C-4 im Werk Balaji (Indien) im Juni 2012 nach Inbetriebnahme

Tab. 1 CEM I-Qualitäten in verschiedenen Anlagen

	Balaji	Plant A	Plant B	Plant C
Type	MVR 5600 C-4	MPS 4250 BC	MPS 4750 BC	MPS 5600 BC
Blaine	2970 cm ² /g	3020 cm ² /g	3250 cm ² /g	3300 cm ² /g
Compressive strength acc. to EN 196-6 [MPa]				
After 2 days	17.1	14.5	14.1	12.2
After 7 days	27.9	26.6	21.8	24.0
After 28 days	41.7	40.5	39.4	38.4

Drive® zur Zementmahlung entschieden, für die Rohmaterialmahlung sind zwei MPS 5000 B sowie zur Kohlemahlung zwei Mühlen der Größe MPS 3070 BK installiert.

Die Walzenschüsselmühle MVR 5600 C-4 mit einem Schüsseldurchmesser von 5,6 m und Walzendurchmessern von 2,83 m wird angetrieben über einen MultiDrive® mit vier Modulen von jeweils 1650 kW. Die garantierte Durchsatzrate für Portland-Flugaschezement PPC mit 30% Flugascheanteil (entsprechend einem CEM II/B-V nach EN 197-1) liegt bei 320 t/h bei einer Feinheit von 3500 cm²/g nach Blaine. Der spezifische Energiebedarf ist vertraglich auf 18,7 kWh/t für die Mühle festgelegt. Ein zweites Produkt, welches auf der MVR hergestellt wird, ist Portlandzement OPC (CEM I nach EN 197-1) bei 3000 cm²/g nach Blaine.

Bild 6 und Bild 7 zeigen die Montage des Mühlengehäuses zwischen die vormontierten Stützen. Die eingeschwenkten Walzen sind in der Draufsicht in Bild 8 zu sehen. Das Mühlenunterteil wird danach komplettiert mit Sichterunterteil und -oberteil (Bild 9).

Im Mai 2012 wurde die MVR in Betrieb genommen (Bild 10). Mittlerweile ist die Mühle mehr als 3500 Stunden in Betrieb, wobei für PPC Durchsatzraten von 350 t/h bei einer mas-sespezifischen Oberfläche von 4300 cm²/g (Blaine) erreicht wurden. Der spezifische Energieverbrauch am Mühlenhauptantrieb unterschreitet die vertraglichen Garantien. Für die Sorte OPC wurden 380 t/h erreicht bei 2800 cm²/g (Blaine) und einem spezifischen Energiebedarf von ca. 20,2 kWh/t.

Tabelle 1 zeigt die Festigkeitsentwicklung des in der MVR erzeugten CEM I im Vergleich zu anderen Anlagen, die ebenfalls CEM I bei niedrigen Blainewerten produzieren.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der MVR-Mühle und dem MultiDrive® Konzept lassen sich Durchsatzraten bis zu 12000 t pro Tag mit einer Einmühlenlösung realisieren, wobei sich durch die aktive Redundanz für die Walzenmodule als auch der Antriebsmodule eine hervorragende Verfügbarkeit der Mühle erwarten lässt. Die aufgezeigten Betriebsanlagen mit MVR-Walzenschüsselmühlen und MultiDrive®, die mittlerweile in Summe über 35000 Betriebsstunden aufweisen, zeigen ein hervorragendes Betriebsverhalten und haben alle Auslegungsannahmen und Wartungskonzepte bestätigt.

www.gpse.de

LITERATUR

- [1] Reichardt, Y. (2010): The new Pfeiffer roller mill MVR: reliable grinding technology for high throughput rates. ZKG INTERNATIONAL, No. 11, pp. 40–45
- [2] Hoffmann, D., Reichardt, Y., Schütte, K.-H.: The MVR vertical roller mill plus MultiDrive® – a successful combination, CEMENT INTERNATIONAL 9 (2011) No. 2, pp. 44–49

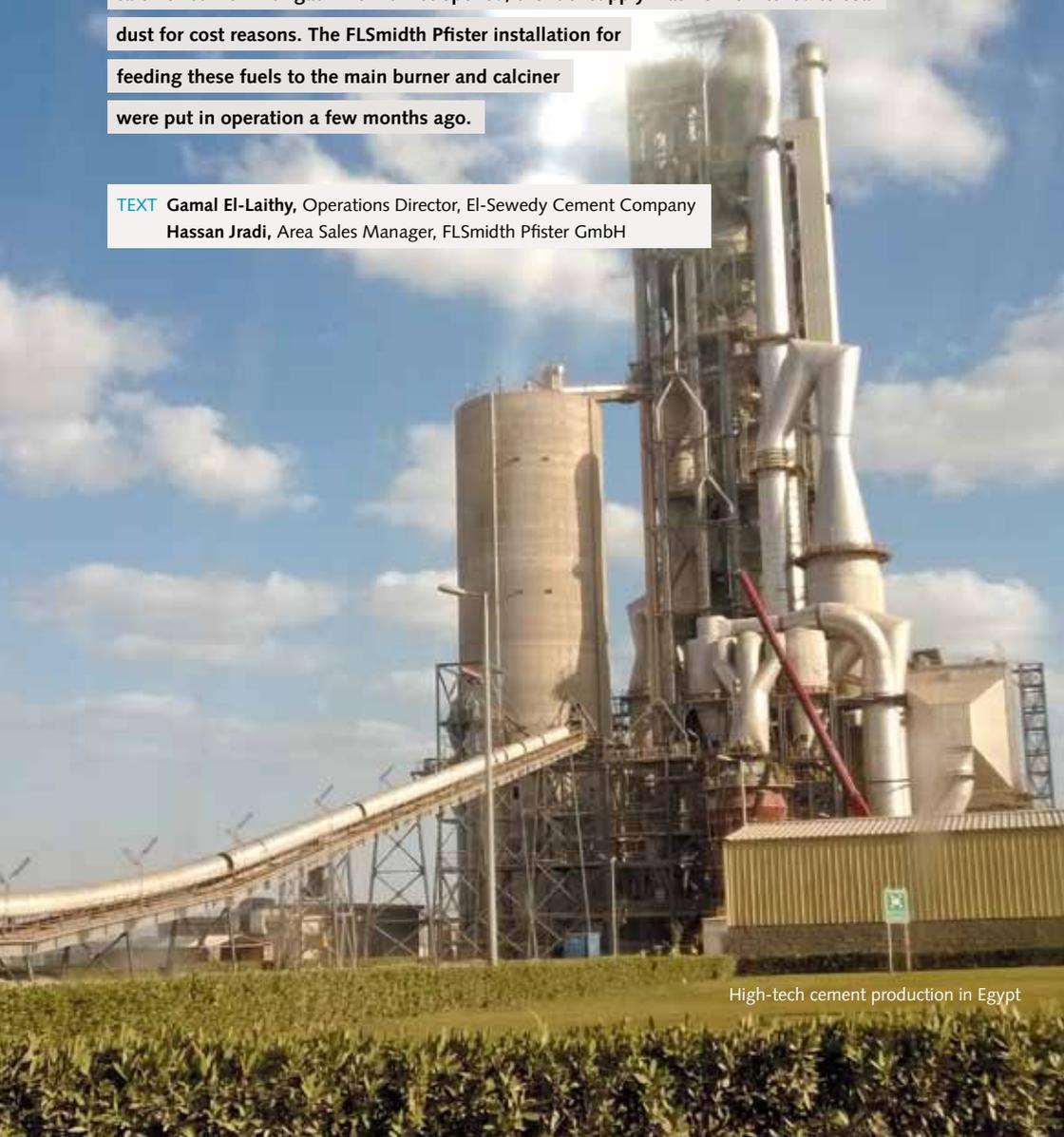
SOME THINK A MARGIN OF ERROR IS ACCEPTABLE. WE THINK DIFFERENT.

The BEUMER fillpac® R is a filling system with a difference. Using revolutionary microprocessor-based weighing electronics with vertical filling impellers and the bag discharge system including a check weigher, it delivers entirely new standards of precision and performance: automatic optimisation; 300-6,000 bags per hour; individual bag tracking and latest PMS generation; we know what it takes to streamline your end-of-line productivity. For next generation packaging solutions that make a difference, visit www.beumergroup.com

PLANT REPORT

In 2008, the FLSmidth Group was awarded a contract worth 60 million € covering machinery and engineering services for the plant that is located 110 km east of Cairo. Sophisticated equipment and in-depth expertise in dosing and feeding fuels to the burners of cement plants came from the German FLSmidth Pfister engineers, working hand in hand with their parent company FLSmidth A/S in Denmark. While the Ain Sokhna plant fired the main and calciner burner with gas when it first opened, the fuel supply was now switched to coal dust for cost reasons. The FLSmidth Pfister installation for feeding these fuels to the main burner and calciner were put in operation a few months ago.

TEXT Gamal El-Laithy, Operations Director, El-Sewedy Cement Company
Hassan Jradi, Area Sales Manager, FLSmidth Pfister GmbH



High-tech cement production in Egypt

FLSMIDTH PFISTER GMBH

Coal dust dosing without compromises

Introduction

An output of more than 6000 t/d of grey Portland Cement makes the Ain Sokhna plant one of the main players in the region. The complete package of FLSmidth machinery included an EV limestone/clay crusher, raw material stores, an ATOX raw mill, CF silo, the complete ILC 3-support kiln including a 5-stage preheater and an SF cross-bar cooler, clinker storage, an OK 42 cement mill and cement silos. The mill is one of the largest cement mills in Egypt. FLSmidth has had an excellent reputation in Egypt for a long time as well as many local reference installations. In this connection the FLSmidth Pfister dosing equipment has gained the reputation of being extremely reliable.

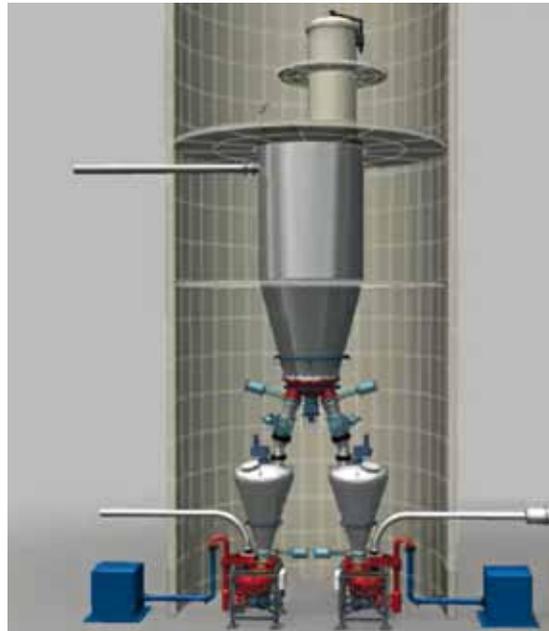
A concept without compromises

Two rotor weighfeeders Pfister DRW carry out the coal dosing to the pre-calciner and the main burner at the El-Sewedy Ain Sokhna plant. Strengthened with a sufficient capacity margin, the rotor weighfeeder Pfister DRW 4.14 installed at the pre-calciner offers at least an additional 5 t/h. In total it is planned to take into account a dosing capacity of up to 30 t/h. The rotor weighfeeder Pfister DRW 4.12 feeds the main burner at a rate of 16 t/h. Despite the difficulties normally accompanying the coal dust dosing process, the perfect dosing concept of FLSmidth Pfister is running impeccably at the new El-Sewedy plant. It is a "concept without compromises", based on a combination of a smart progressive design of the dosing equipment and high-quality components and materials.

This smart design includes coal dust silos with a cone made of premium stainless steel. Stainless steel silos do not corrode, their inside surface stays smooth for easy material flow. Coal dust will not stick to the walls, which is a must for unobstructed feeding. Proper aeration of the

silos with an optional choice of ambient air or inert CO₂ gas is an additional important means to ensure the necessary material flow.

As a distinct characteristic of high accuracy and low maintenance, the pneumatic transport of coal dust is integrated inside the rotor weighfeeder Pfister DRW. With dosing chambers being blown through continuously, the rotor as the heart of the feeding system stays clean and will not be blocked by residue. Clogging and the possibility of a "heart attack" inside that highly important processing component is therefore practically unlikely. The result: no costly shut-downs due to malfunctioning equipment.



1 The ideal design setup of the rotor weighfeeder Pfister DRW installation with silo, silo extraction and aeration device and pre-hopper above each rotor weighfeeder

Faster is not always better

While other rotor weighfeeders swirl at a rate of several hundreds and more rounds per minute, wearing out bearings, hosing and consuming loads of energy, the rotor of Pfister rotor weighfeeders turns at less than 10 times per minute. Combined with its well-designed and integrated pneumatic transport, the rotor is able to convey the required amount of pulverized material into the burning area. At the same time it is slow enough to keep wear and energy consumption at a minimum.

El-Sewedy chose the so-called block systems for pulverized fuels with integrated pre-hoppers.

A unique and cost wise always discussed design feature is the highly recommended pre-hopper from FLSmidth Pfister. It offers to operators four indispensable advantageous characteristics:

- » More independence of possible flow problems inside the coal dust silo. The pre-hopper ensures that there is always material above the inlet of the rotor weighfeeder which acts like a cache between the rotor weighfeeder and the main silo.
- » To improve the material flow, the pre-hopper can be equipped with a stirrer to ensure that material will not stick to the wall of the pre-hopper. This can occur when using coal with higher moisture or when using fine petcoke.

Because the pre-hopper is located above the rotary feeder, the system works with overpressure in the pre-hopper. That allows operating with a higher pressure difference. This advantage can be used for longer conveying distances or higher loads (coal-air-ratio).

The block system can also be used for online calibration. With online calibration, the accuracy of the rotor weighfeeder can be checked at any time during normal operation and any deviation can be corrected automatically.

Smart dosing principle

FLSmidth Pfister's patented prospective control ProsCon guarantees constant control of the complete material feeding and dosing line and is an important part of the orchestration:

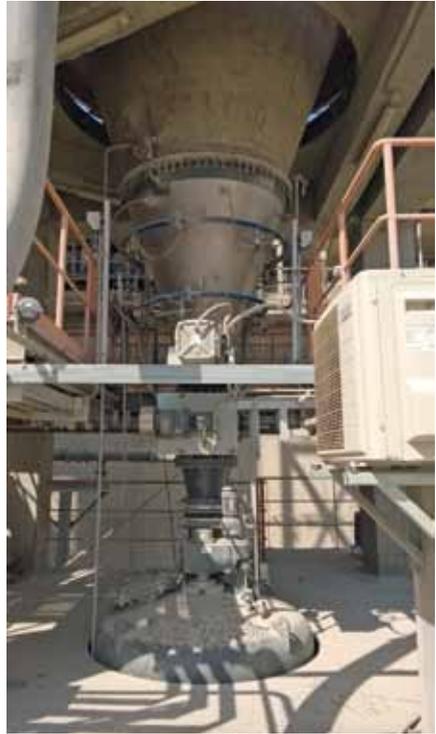


2 The calciner tower in Ain Sokhna

Prospective control ProsCon uses a set feed rate and measured bulk mass to calculate the angular speed of the rotor. Less material in the rotor results in a higher angular speed, more material results in a lower speed. ProsCon-regulated rotor weighfeeders accurately compensate variations in rotor loading and material density. Extremely accurate short- and long-term feed rates, which can be altered quickly without loss of precision, are the result of smart design and engineering know-how developed over many years of intensive testing and research. While other feeders only react on requirements, ProsCon pro-actively regulates feeding in a real-time answer to measured deviations. Perfectly attuned pre-feeding devices complete the smart package.



3 Perfect dosing with rotor weighfeeder Pfister DRW

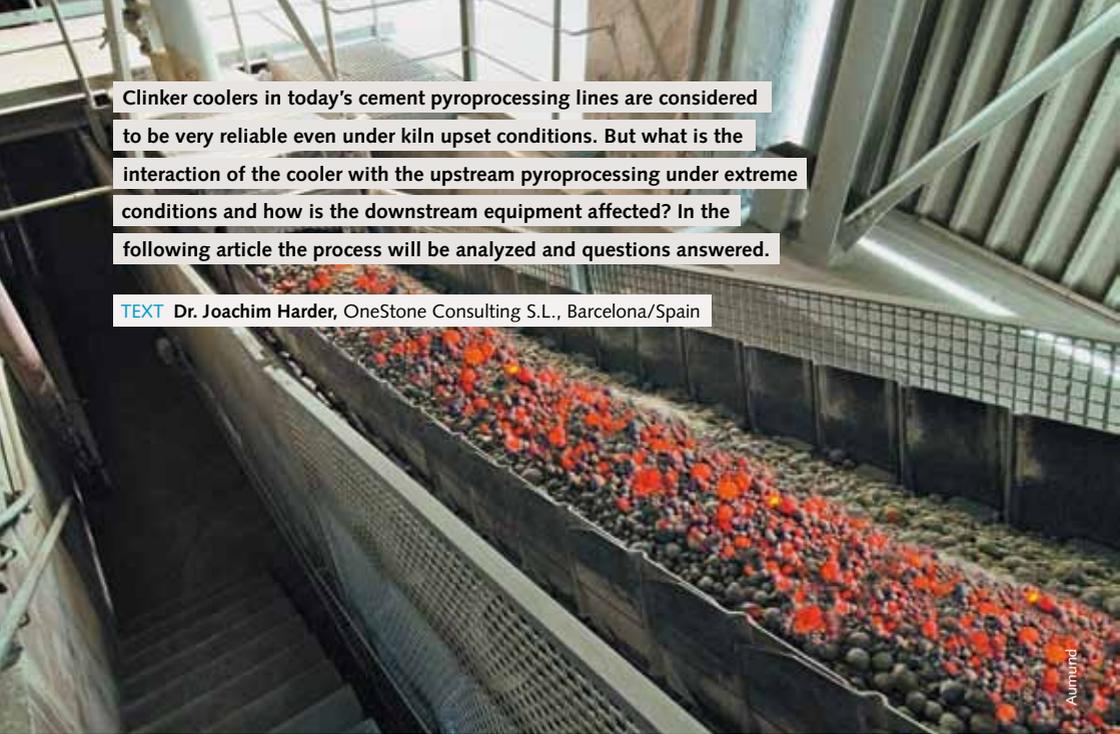


4 A closer look at the silo cone and pre-feeding devices

Increase of dosing capacity to 30 t/h at no additional costs

The cooperation with the dosing specialists from FLSmidth Pfister GmbH was a winning combination in the project. Gamal El-Laithy of El-Sewedy Industries was particularly pleased by the flexibility of the setup: "We not only had a successful installation of Pfister dosing equipment, we are also able to increase the capacity of the pre-calciner from the originally planned 25 to 30 t/h without any additional costs". In the El-Sewedy project, the main source of energy is currently coal dust. An originally planned backup fuel supply with natural gas often proved to be superfluous, since coal dosing with Pfister rotor weighfeeders works like the proverbial clockwork.

www.flsmidthpfister.com



Clinker coolers in today's cement pyroprocessing lines are considered to be very reliable even under kiln upset conditions. But what is the interaction of the cooler with the upstream pyroprocessing under extreme conditions and how is the downstream equipment affected? In the following article the process will be analyzed and questions answered.

TEXT Dr. Joachim Harder, OneStone Consulting S.L., Barcelona/Spain

Hot clinker on a pan conveyor behind the cooler

ONESTONE CONSULTING S.L.

Impact of clinker coolers on downstream equipment

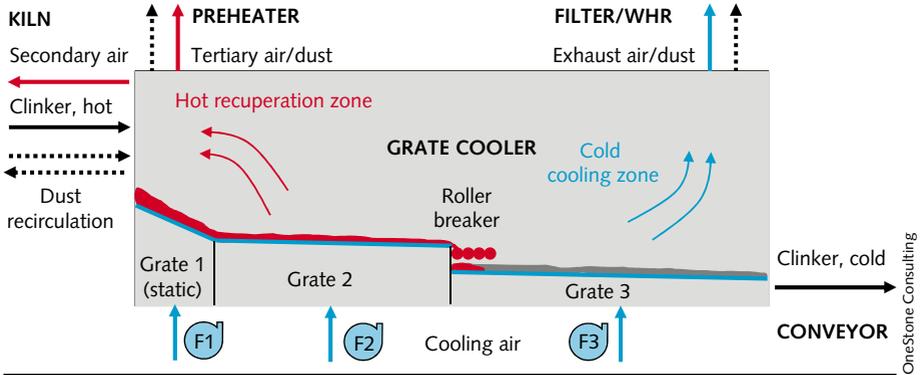
1 Introduction

Modern clinker coolers require 1.7 to 2.0 Nm³/kg_{cl.} of fresh air to cool clinker with temperatures of more than 1400 °C from the rotary kiln to outlet temperatures below 100 °C. Such clinker coolers recuperate most of the thermal energy in the clinker to provide secondary air for the burning process and tertiary air for pre-calcination achieving thermal efficiencies of about 75 % and more. Clinker coolers are also required to buffer kiln fluctuations and have no or only a minor effect on the upstream pyroprocessing system which comprises pre-heater, pre-calciner, kiln and fuel burner. Some people believe this is possible, but the fact is it is not.

Kiln fluctuations cannot be buffered completely, interactions with the kiln system arise and cooler performance and efficiency is constantly changing with the result that clinker end temperatures from the cooler cannot be kept constant.

2 Cooler design and process technology

Today, almost all new coolers are grate coolers, because they can provide the secondary and tertiary air for modern pyroprocessing systems with a high recuperation of the energy from the clinker. Modern clinker coolers of the latest generation are absolutely reliable. The wear of the grate plates is significantly reduced, when compared to former technology. Grate plate life-



1 Scheme of a grate cooler

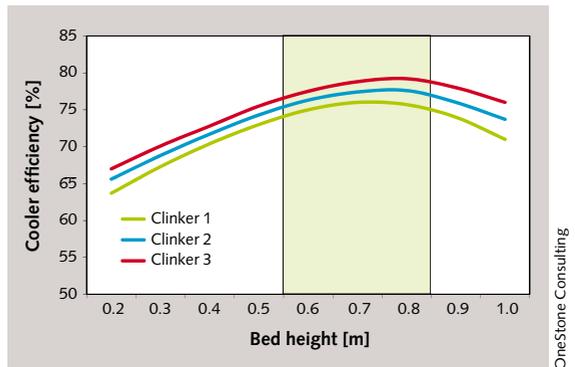
times of more than three years are achieved. The coolers have no or a minimum of grate riddlings. The coolers are built in modular design with throughputs of 1000 to more than 12000 t/d [1].

Figure 1 shows a schematic view of a modern grate cooler with three separate grates and an intermediate roller breaker as well as the major boundary conditions. Input mass flows are the clinker and clinker dust recirculating from the kiln and the cooling air, which is provided via sectional aeration chambers with separate fans. The output consists of the cold clinker, dust containing secondary, tertiary and exhaust air and dust recirculating to the kiln. The cooling air is supplied in a cross-stream to the clinker. The residence time for the clinker in the cooler under normal conditions is between 20–40 min depending on the design, clinker bed height and transport velocity of the clinker.

The cooling effect of the clinker is mainly affected by the clinker bed height in the cooler and the air distribution into the clinker. For each clinker quality there is an optimum average bed height, where the cooler efficiency is maximized (Fig. 2). The operating range of modern clinker coolers is with bed heights of 0.6 to 0.8 (0.9) m. If the bed heights are lower, than the residence time of

the clinker in the cooler is too short to achieve sufficient heat exchange from the clinker to the cooling air. If the bed height is too high, then air blows through the clinker with insufficient distribution being achieved. Clinker bed heights vary from the cooler inlet to the outlet. On grate 1 the height mainly depends on the inclination of the grate, while on grate 2 and 3 it depends on the grate speed (stroke length and frequency of the clinker transport mechanism).

Principally, there are three different versions for modern cooler design. All versions have in common, a static first grate with no movable grates or clinker transport devices. The static grate was first introduced by IKN in 1984 as KIDS-System (Fig. 3), using a new type of grate



2 Cooler efficiency as a function of bed height



3 Static cooler grate

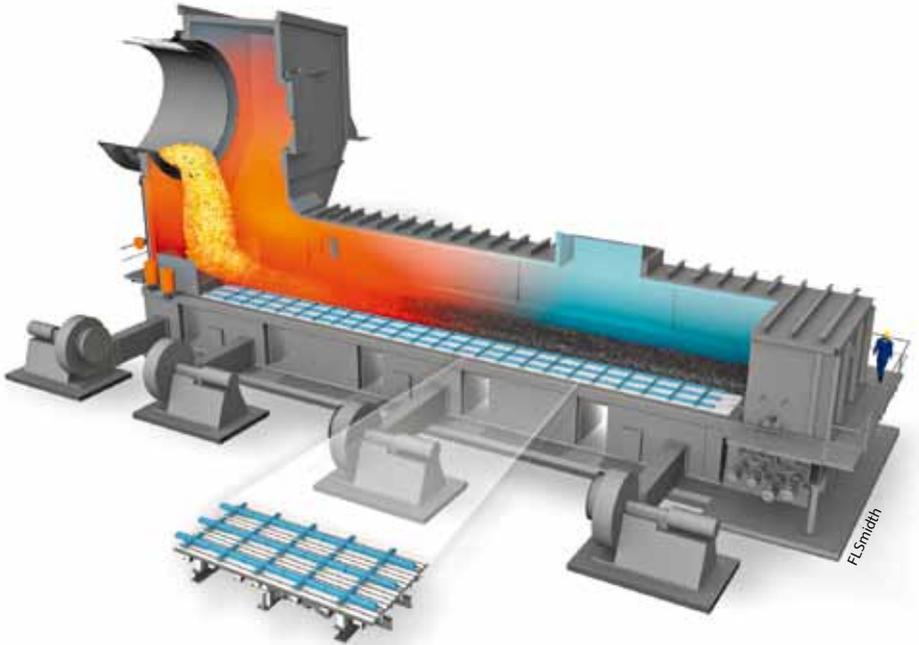
plate (IKN Coanda effect lamellar grate plate), which ensured improved cooling of the upper surface of the grate plate and improved transport of the fines to the bed surface in combination with grate rows connected to separately aerated air-beams. The systems have been modified by

other suppliers to improve clinker distribution and to eliminate “so-called” snowmen by air pulses. The fixed grate stabilizes cooler operations and results in heat savings of 20–100 kcal/kg_{cl}. Favorable grate plate arrangements of the static grate are according to the horse show or V-shaped design to narrow fine and coarse clinker from the kiln at the landing area on the grate and to allow a uniform clinker distribution at the cooler inlet.

The most common modern cooler design is the one with movable grate plates. While conventional designs with reciprocating grates have almost disappeared from the market, pendulum suspension designs are also well accepted. Such designs are provided by IKN and CemProTec. “Pendulum” coolers are designed as single grate with a roller crusher at the end or double grates with intermediate crushing. The movable frame is suspended on a wear-free pendulum suspension consisting of spring steel strands vertically supported on steel or concrete pillars (Fig. 4).



4 Erection of a Pendulum cooler



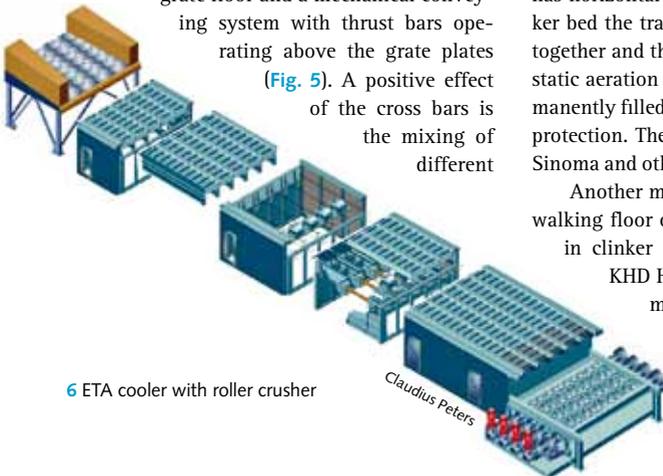
5 Cross-bar cooler with roller crusher

The movable frame is guided in longitudinal direction so that the system does not require any lubrication and is completely wear and maintenance free. For the grate riddlings hoppers with extraction conveyors are provided.

In 1997, FLSmidth introduced the Cross-Bar cooler, which is characterized by a static grate floor and a mechanical conveying system with thrust bars operating above the grate plates (Fig. 5). A positive effect of the cross bars is the mixing of different

clinker sections. However, because the cross-bars move in the clinker they have a limited lifetime. The grate plates are horizontal to save height and no grate riddlings can occur. A similar system with transport tracks instead of cross-bars has been introduced by ThyssenKrupp Industrial Solutions with the Polytrack cooler, which also has horizontal grate plates. To convey the clinker bed the transport tracks are moved forward together and then individually moved back. The static aeration units build an aeration floor permanently filled with clinker for autogenous wear protection. The design principle is also used by Sinoma and other Chinese grate cooler suppliers.

Another mechanical transport system is the walking floor or shuttle principle which is used in clinker coolers by Claudius Peters (CP), KHD Humboldt Wedag, Fons and Sinoma (TCDRI), who licensed the Fons Technology. CP introduced the system under the synonym ETA-cooler in 2004 in a



6 ETA cooler with roller crusher



ThyssenKrupp Industrial Solutions

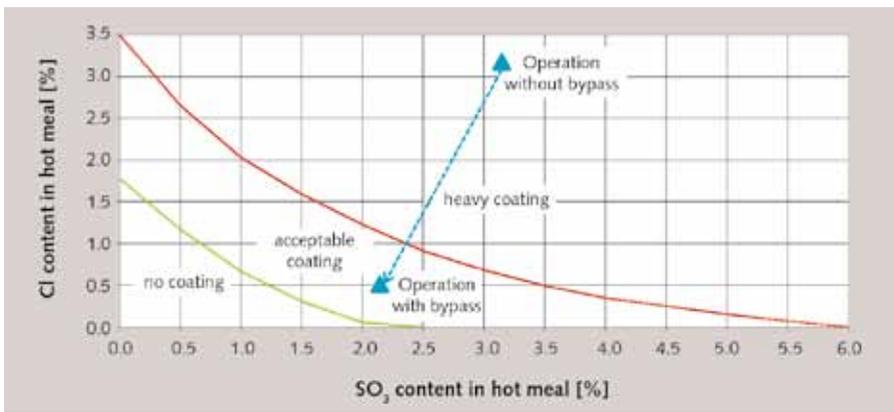
7 Intermediate roller crusher

Roller crushers have become standard technology for reducing oversized clinker due to a high crushing performance, minimum dust generation and wear and no refractory damage when compared to conventional hammer crushers. The roller crusher (Fig. 7) consists of air-cooled, hydraulically or mechanically driven rollers, whose operating width completely matches the width of the cooler grate. Roller crushers offer the most benefit, when they are arranged at the end of the recuperation zone after the second grate. Due to the roller design, large lumps of up to two meters can be crushed and the crushed clinker can be effectively cooled on the final grate. If roller crushers are installed at the end of the cooler, then un-cooled hot spots of crushed clinker have to be conveyed by the downstream equipment.

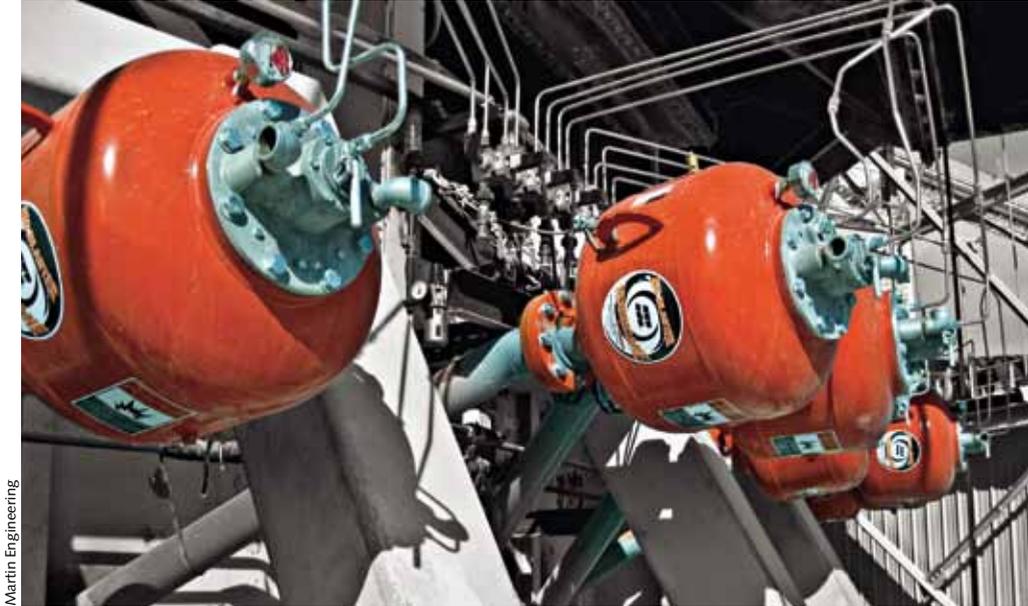
cement plant in Switzerland [2]. The ETA-cooler is completely modularized (Fig. 6), in which two different modules for the lower section of the cooler can be combined to achieve cooler capacities of 1000 to 10000 t/d. The walking floor system achieves a longer stroke length and lower stroke frequency which has a positive effect on clinker bed height formation and mechanical wear. Furthermore the grate plate design provides autogenous surface protection. With ETA-coolers only about 7% of the grate area has a steel/clinker contact.

3 Fluctuations in clinker input and the cooler interaction

Kiln upset conditions have always been an important topic in the cement industry even with conventional fuels such as oil, gas and coal. With the increased usage of alternative fuels and the related problems of build-ups of chlorine, sulfur and alkali contents in the pre-heater/kiln system, material accumulation, clogging and unstable kiln operation is more frequent and more severe than ever before. On the other hand



8 Coating conditions and reduction measure



Martin Engineering

9 Air cannons at a preheater

it cannot be denied that with advanced process control, kiln monitoring and inlet gas analysis kiln cycling problems have been improved. But the problems still exist and even with modern control systems stable kiln operation can not be guaranteed.

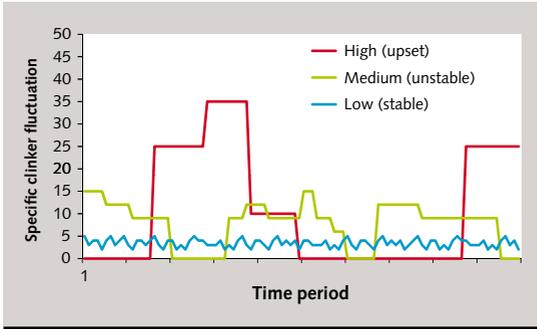
Problems start with the hot meal in the pre-heater. Chlorine and sulfur containing compounds mainly coming from the fuels are converted to HCl and SO_x upon combustion. Both compounds are very reactive with a strong affinity to alkali elements. The compounds mainly condense on the incoming raw meal and are circulated back to the kiln zone where the volatile compounds re-evaporate and are transported back to the pre-heater. This is an equilibrium process which causes the condensation and accumulation of chloride and sulfate salts on the colder walls of the pre-heater cyclones, riser duct and dip tubes. If no measures are taken, the buildups eventually cause cyclone or duct blockages, which can lead to sudden incidents of hot meal flushes in the kiln and clinker cooler.

Figure 8 shows tolerable concentrations of the two major compounds chlorine and sulfur and how they can be reduced with bypass systems. There is only a small zone of relatively low chlorine and sulfur content where no coating or encrustation occurs. But with higher volumes the risk of coating increases. If the equilibrium concentrations are too high then a chlorine bypass becomes necessary to reduce the chlorine con-

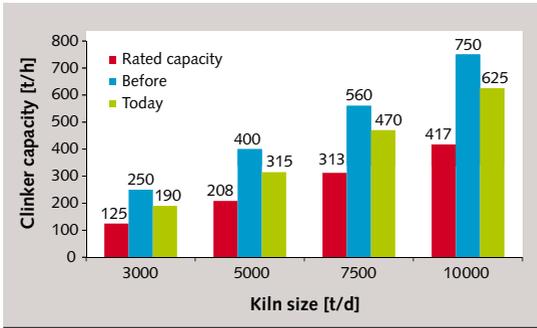


Brokk

10 Ring formations within a kiln



11 Clinker fluctuations



12 Dimensioning of clinker conveyors [4]

tent to an acceptable level. If there are restrictions with the chorine bypass, than pre-heater cleaning measures are necessary. It is customary to clean build-up material during operation by using air cannons (Fig. 9), air or water lances, jack hammers etc. Although some plants still use manual techniques to remove buildups in the pre-heater, automated systems with air cannons have become more common.

Coatings on the refractory linings in the kiln itself are considered acceptable, because coatings are needed to safeguard the linings from thermal shocks and the high burning temperatures in the kiln. The formation of stable and desirable coating is dependent on the uniformity of the kiln feed and clinker properties, the refractory lining material and the operating regime in the kiln [3], which is largely affected by the uniformity of the fuel and burning conditions. Any changes in

the kiln feed and fuel delivery rates, burnability of the kiln feed, the combustion of the fuel in the main burner or changes in secondary air for the combustion from the cooler will affect the temperature profile in the kiln and the formation of coatings.

The problem of unstable kiln operations are excessive coating and ring formations within the kiln (Fig. 10), depending on the amount and properties of flux or liquid phases at different points in the kiln. Kiln rings can form in the sintering, calcining and transition zones of the kiln. Depending on their sulfur, carbonate, spurrite or alkali induced origin they may be dense or porous and may develop slowly or in a few hours. If the ring formation is excessive the rings can collapse and can cause a flush of unburnt material into the cooler. Other phenomena are so-called snowballs, which are mostly formed with long and lazy flames that increase the temperature in the kiln and reduce the calcining zone length. Snow balls form in transition zones at temperatures around 1100 °C from low melting sulfites and get agglomerated with raw meal. As the balls reach the burning zone they get balled up with more liquid phases and can even block the kiln.



13 Clinker pan conveyor

The result of unstable pre-heater and kiln conditions are fluctuating clinker inputs into the cooler (Fig. 11). Principally three different fluctuations from low to high can be observed. The low fluctuations are with stable pre-heater and kiln conditions and are easily buffered by the cooler. Coolers with higher clinker retention time might also be able to buffer medium fluctuations resulting from an unstable kiln operation, and which are about three times larger in magnitude than the stable fluctuations. High fluctuations because of kiln upset conditions and the sudden release of blockages in the pre-heater, release of kiln rings and snow balls can be about five to seven times higher in magnitude or more than in stable conditions and cannot be buffered by the cooler.

Clinker fluctuations which are much higher than the rated capacities result in interactions from the clinker cooler to the upstream kiln system and to larger clinker flows and higher clinker end temperatures for the downstream equipment. Pre-heater and kiln upset conditions increase the dust recirculation from the cooler to the kiln, generally increase secondary and tertiary air temperatures and mostly increase the secondary air flow due to increased grate speeds or cooling air volumes from the clinker cooler control. It goes without saying that this will influence the flame formation in the kiln and probably lead to another kiln operation instability necessitating the adjustment of fuel rates, kiln feed, and ID fan speed. It can take hours before new stable conditions are achieved.

For the downstream equipment the rated parameters cannot be met. Under kiln upset conditions clinker conveyors behind the cooler are subjected to much higher clinker temperatures and higher loads. First it is important to understand that rated clinker end temperatures are average clinker temperatures, which are measured for guarantee reasons in a Dewar vessel. While clinker material is colder at the surface, in the core it is still much hotter. If the clinker from a roller crusher or hammer crusher at the end of the cooler is taken then the average temperature of the clinker with so-called hot spots will



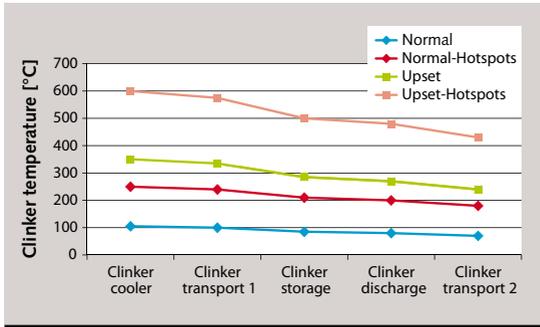
14 Clinker storage discharge

rise from the rated 100 °C to about 250 °C. Under upset conditions the rated average clinker end temperature can increase to about 350 °C, while the hot spot clinker will increase to 600 °C.

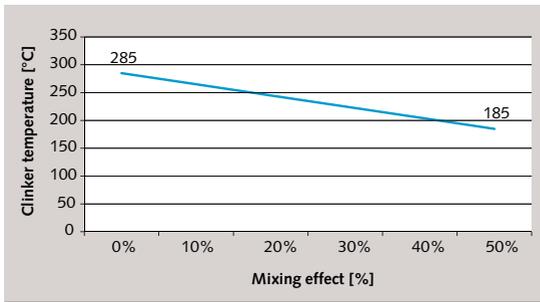
4 Downstream transports and storage

For covering kiln upset conditions, the clinker conveyors behind the cooler have to be designed for higher capacities than the rated kiln capacity. However, modern cooler designs have changed the conveyor dimensions, due to higher buffer capacities in the cooler. Fig. 12 shows the dimensions of clinker conveyors for four different plant sizes from 3000 t/d to 10000 t/d in the past and how they are different today [4]. So, before modern coolers were developed, the dimensions of the clinker conveyors was about 1.8 to 2.0 times the rated kiln capacity, with 250 t/h for 3000 t/d kilns and 750 t/h for 10000 t/d kilns. Modern coolers changed the capacities to 190 t/h for 3000 t/d kilns and 625 t/h for 10000 t/d kilns which is 1.5 times the rated capacity.

Principally, there are three different types of conveyors used for the transport of the clinker from the clinker cooler to the clinker storage facilities. The most used technology is the deep-drawn pan conveyor. Such conveyors (Fig. 13) are available up to 1000 t/h capacity and are safe for temperatures up to 700 °C. These conveyors can be used for conveying up to heights of about 75 m and inclinations of up to 30°. For



15 Downstream clinker temperatures



16 Temperature mixing effect

larger heights of up to 100 m and inclinations of 60° and above pan conveyors with buckets are used. Hybrid pan conveyors of the belt apron type with a temperature resistance of 600 °C design are another option, but they have not achieved a high market penetration yet. High temperature belt conveyors are tested from time to time for the clinker transport behind the cooler, but up to now have not met with any commercial success.

Today, adequate clinker storage capacities are designed to accept a clinker production of two to three weeks to provide enough buffer for unscheduled kiln shutdowns or for annual shutdowns. Safety provisions have been reduced in the last few years due to optimized annual shutdown management and the combination of clinker and cement storage capacities to overcome lengthy periods without clinker production. However, with limited clinker capacities such cases increase, where clinker from the clinker

cooler is conveyed without any buffer time to the cement mills. Consequently the clinker conveyors from the clinker storage silos (Fig. 14) to the cement mills can be subjected to high clinker end temperatures from the cooler.

Figure 15 gives an approximation of typical clinker temperatures from the clinker cooler to the downstream equipment, including the pan conveyor behind the cooler, the clinker storage, clinker discharge from the storage and clinker transport to the mills.

Under normal conditions and clinker end temperatures of 105 °C (85 °C + 20 °C ambient temperature) behind the cooler, the clinker will cool down to about 70 °C. This temperature is not high enough for slag grinding applications, and for such applications, which are in the trend, clinker end temperatures of about 180 to 200 °C behind the cooler are specified. Such temperatures can be achieved when a roller breaker is located at the end of the cooler and hot-spots are taken into account. Problems occur in upset conditions, when clinker temperatures over 350 °C are not decreased by much more than 100 °C during storage and conveying.

One very important aspect is the temperature mixing effect of the clinker storage (Fig. 16). The mixing effect depends on the clinker storage design and how many discharge tunnels are located below the storage and operated simultaneously.

So for example if there is clinker stored with 85 °C temperature in normal conditions and with 285 °C in upset conditions, then with a 50% mixing effect an average clinker temperature of 185 °C will result. Under practical conditions mixing effects of 20-30% are more realistic. Realistic average temperatures from the clinker storage depend on the number of upsets, the frequency of higher clinker end temperatures and

the time period that they are stored. The more upsets recorded the higher the average clinker temperature.

With an, assumed, better performance of modern clinker coolers, belt conveyors are increasingly used to transport the clinker from the clinker storage facilities to the cement mills (Fig. 17), and intermediate silos for the mills. The belt conveyors offer lower installation costs when compared to steel pan conveyors, but the maintenance costs are usually significantly higher, so that life cycle costs mostly favor pan conveyors, especially when the costs for filters in belt conveyor installations are included in the cost comparison. High temperature resistant belt conveyors are constantly improving but cost advantages might come down to zero. There are enough cases where belt conveyors are doing an excellent job, but there are also cases where belt conveyors had to be replaced by conventional pan conveyors.

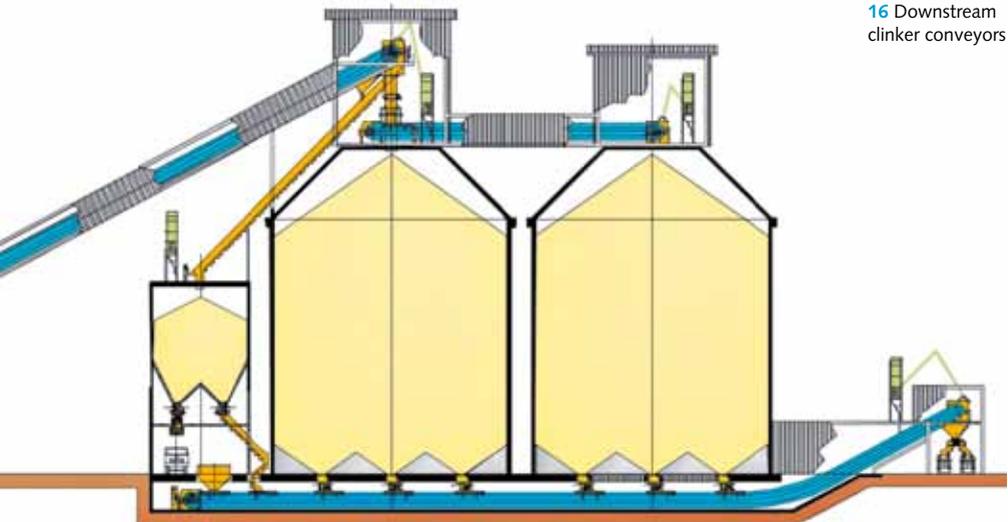
5 Exhaust air and WHR systems

In modern grate coolers with efficiencies of 75% about 45% to 50% of the cooling air is used for combustion (secondary and tertiary air), while

50–55% is exhaust air. So with specific cooling air quantities of 1.7 to 2.0Nm³/kg_{cl.} about 0.85 to 1.1 Nm³/kg_{cl.} is exhaust air. Under normal conditions the exhaust air has temperatures of 250 ° to 350 °C, which can increase during kiln upset conditions to 400 ° to 500 °C. Normal dust concentrations in the cooler exhaust air are in a range of 30 to 90 g/Nm³, under upset conditions dust concentrations can increase to more than 200 g/Nm³.

Due to higher emission standards, clinker cooler de-dusting systems have changed significantly in the last few years [5]. Instead of electrostatic precipitators bag filters are used nowadays in spite of difficulties with the variable flow rates in normal and upset conditions and the high abrasiveness and loads of the clinker dust. To cope with the clinker cooler exhaust gas conditions, cyclones and air/air heat exchangers are installed upstream of the filters (Fig 18). The cyclones reduce the dust concentrations of up to 75 g/Nm³ by around 70% for the heat exchanger. The heat exchanger cools down the exhaust air to temperatures of below 150 ° and 180 °C, which are acceptable for polyester or Nomex filter bags. To reduce temperature peaks, water spraying

16 Downstream clinker conveyors



Beumer



Scheuch

15 Clinker cooler bag filter

devices or controllable fresh air dampers are frequently installed.

With higher cooler efficiencies the potential for waste heat recovery (WHR) from the clinker cooler decreases. However this offers potential for ORC (Organic Rankine Cycle) and Kalina cycles, where organic working mediums or binary water-ammonia mixtures are used as the working medium instead of water which is used in conventional steam cycles [6]. These working medias have a significantly lower evaporation

point than water, which corresponds to higher vapour pressures and enables a higher degree of efficiency in the lower temperature range of clinker cooler exhaust temperatures below 300 °C, than is possible with water-steam circuits. Consequently the technology is offered by an increasing number of suppliers. With standard containerized WHR plants there is an opportunity to generate about 0.65 to 0.7MW of electricity from 4.5MW of waste heat from the cooler.

6 Outlook

In the last few years rated clinker end temperatures have decreased from 105 °C, to 85 °C and 65 °C (plus ambient temperature). But with an increasing demand for mixed cements and the grinding of slag cements the trend has changed and clinker end temperatures in cooler specifications significantly increased. Cement producers asked the cooler suppliers how the clinker end temperatures could be increased. In some specifications, now clinker end temperatures of 180 ° to 200 °C are required.

With modern clinker coolers there has also been a trend to so-called stripped down equipment solutions. Stripped down means that design capacities of clinker conveyors are reduced to 125% instead of 150% or 200%. Such solutions are usually selected when clinker coolers are upgraded and bottlenecks in the operation of clinker coolers are removed. There is no need for new clinker conveyors to be installed as long as there is a 125% safety margin in the conveyor capacity. Furthermore standby conveyors behind the clinker cooler are no longer foreseen in plant layouts to the extent it was some years before.

REFERENCES

- [1] Harder, J.: Latest Trends in Clinker Cooling. ZKG International 3/2011, pp. 32–42
- [2] Vos, A.: Five Years' Experience with the ETA Cooler. Cement International 2/2009, pp. 62–65
- [3] Clark, M.: More Clinker Ring Issues. ICR 5/2015, pp. 52–54
- [4] Aumund: Clinker Handling, ICR 03/2003, pp. 41–44
- [5] Harder, J.: Process Filter Trends in the Cement Industry. ZKG International 9/2009, pp. 59–72
- [6] Harder, J.: Latest Waste Heat Utilisation Trends in Cement Plants. ZKG International 6/2013, pp. 26–39

Your competent partner for intelligent building materials testing

- Intelligent instruments for sample preparation and testing of physical properties (e.g. mortar mixer, Vicat, Blaine, Le Chatelier, heat of hydration)
- Universal servo-hydraulic testing machines with a capacity from 10 to 10,000 kN for production control and research
- Testing machines in tailored design for special applications e.g. fiber reinforced concrete and railway sleeper testing
- Sensitive automated control of the machines and evaluation of results with intuitive testing software **testXpert®**
- Planning and delivery of complete turn key laboratories using ToniLAB functional furniture
- World-wide operating service organisation including maintenance, calibration and modernisation

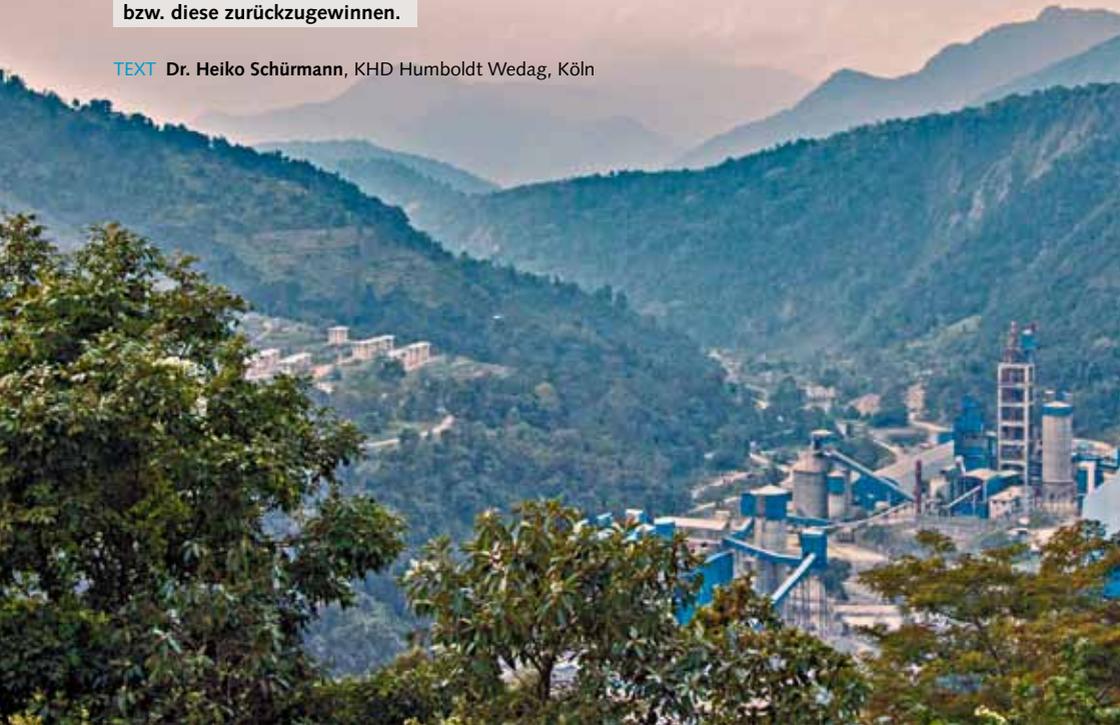
Toni Technik Baustoffprüfsysteme GmbH

Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin / Germany
Phone +49 - 30 - 46403921
Fax +49 - 30 - 46403922
www.tonitechnik.com
info@tonitechnik.com



Nachhaltiges und umweltgerechtes Wirtschaften in der Zementproduktion bedeutet, bei gleichbleibender Qualität und Quantität, den natürlichen Rohstoffverbrauch durch sekundäre Rohstoffressourcen, wie beispielsweise industrielle und kommunale Reststoffe, zu ersetzen, sowie Emissionen zu senken und Energie einzusparen, bzw. diese zurückzugewinnen.

TEXT Dr. Heiko Schürmann, KHD Humboldt Wedag, Köln



KHD HUMBOLDT WEDAG

Anforderungen an die umweltgerechte und nachhaltige Herstellung von Zementklinker

1 Einleitung

Nach Wasser ist Beton und damit Zement eines der meistgehandelten Güter weltweit und es ist bislang nicht abzusehen, dass der Verbrauch von Zement in Zukunft abnehmen wird. Getrieben wird der weltweite Verbrauch von Zement durch den zunehmenden Neubau, Ausbau und der Modernisierung von Gebäuden und der Infrastruk-

tur. Diese Nachfrage wird verursacht durch die stetig wachsende Weltbevölkerung, den Anstieg des Lebensstandards und der zunehmenden Urbanisierung.

Bedingt durch den hohen Einsatz von natürlichen Ressourcen und der Freisetzung von Emissionen verschiedenster Art werden jetzt und in Zukunft hohe Anforderungen an die Industrie



schrieben. Dazu wird im Folgenden mit der Theorie zur Bildung des Zementklinkers begonnen und abschließend das klassische Feld der Zementverfahrenstechnik um die immer wichtiger werdende Umweltverfahrenstechnik erweitert.

2 Vom Rohmehl zum Zementklinker – Chemisch/Physikalische Vorgänge

Die Hauptelemente, die zur Herstellung von Zementklinker benötigt werden, sind im wesentlichen Calcium (Ca), Silizium (Si), Aluminium (Al) und Eisen (Fe). In natürlicher Form werden diese Elemente in Form von Kalkstein und Ton im Steinbruch abgebaut und im Zementwerk eingesetzt. Um die gewünschte Rohmehlzusammensetzung einzustellen, können darüber hinaus noch Silizium, Aluminium und Eisen über die Korrekturstoffe Sand, Bauxit oder Eisenerz der Rohmischung vor Rohmühle beigemischt werden.

Das staubfein gemahlene Gemisch wird anschließend thermisch behandelt, wobei das Ziel der thermischen Prozessführung die Bildung der in **Tabelle 1** genannten Hauptminerale (Klinkerphasen) ist, die dem späteren Produkt Zement seine hydraulischen Eigenschaften, die Fähigkeit zur Abbindung und Verfestigung, gibt.

Der thermische Prozess der Klinkerherstellung ist weitestgehend ein klassischer Gegenstromprozess. Der Materialstrom durchläuft den thermischen Prozess in entgegengesetzter Richtung zum Gasstrom. Dabei wird die Energie des heißen Gases in verschiedenen Prozessschritten auf das Rohmaterial bis hin zum Sinterprozess übertragen. In Abhängigkeit von der Temperatur

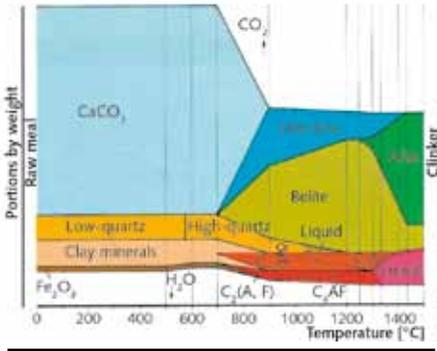
(Lieferanten und Hersteller) gestellt werden, um Zement in noch umweltverträglicherer und nachhaltigerer Art und Weise herstellen zu können.

Die modernen Anforderungen an die Herstellung des Zementklinkers werden am Beispiel von Produkten der KHD Humboldt Wedag be-

Tab. 1 Hauptminerale im Zementklinker [1]

Klinkerphase	Chemische Formel	Kurzbezeichnung	Durchschnittl. Anteil	Eigenschaften im Beton
Tricalciumsilikat „Alit“	3CaO*SiO ₂	C ₃ S	65 %	Festigkeitsentwicklung im frühen Stadium der Erhärtung
Dicalciumsilicat „Belit“	2CaO*SiO ₂	C ₂ S	13 %	Festigkeitsentwicklung im späteren Stadium der Erhärtung
Tricalciumaluminat „Aluminat“	3CaO*Al ₂ O ₃	C ₃ A	11 %	Beeinflusst die Zeit der Entwicklung der Anfangshärte
Calciumaluminatferrit „Aluminatferrit“	2CaO*(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	C ₄ AF	8 %	Einfluss auf die Sulphatbeständigkeit

PROCESS



1 Bildung der Klinkerphasen

laufen folgende Umwandlungsschritte vom Rohmehl bis zum Zementklinker ab:

- » Bis 100 °C: Verdampfung der oberflächlichen Restfeuchte. Anlagenteil: Zyklonvorwärmer, oberste Stufe.
- » Bis 300 °C: Verdampfung der adsorptiv gebundenen Feuchtigkeit und des in der Kristallschicht eingelagerten Wassers der Tonminerale. Anlagenteil: Zyklonvorwärmer
- » Bis 700 °C: Hydroxylionen (OH-) werden aus den Tonmineralen ausgetrieben. Dadurch wird das Tonmineralgitter zerstört und der Rest des Tonminerals in seiner Reaktionsfähigkeit intensiviert. Anlagenteil: Zyklonvorwärmer
- » Bis 900 °C: Der Hauptbestandteil des Rohmehls, Calciumcarbonat (CaCO₃) wird dissoziiert. CO₂ geht in die Gasphase über und CaO bleibt als Reaktionspartner zur Bildung der Klinkerphasen übrig. Dieser Reaktionsschritt ist mit seiner hohen Reaktionsenthalpie der

- energieintensivste Schritt im thermischen Prozess. Anlagenteil: Kalzinator
- » Bis 1280 °C: Das nun entsäuerte Calcium kann mit Silizium, Aluminium und Eisen die Klinkerphasen Belit, Aluminat und Aluminatferrit bilden. Anlagenteil: Drehrohrofen, Eintritt bis Übergangzone
- » Ab 1280 °C: Der Prozess der Sinterung startet. Es bildet sich im Ofenmehlgemisch eine Teilschmelze aus. Für normalen Portlandzementklinker wird die Rohmehlmischung so eingestellt dass ca. 25% des Gemischs als Schmelzphase vorliegen. Aus dem vorher entstandenen Belit und dem noch frei verfügbaren CaO bildet sich die Klinkerphase Alit. Der Stofftransport zur Alitmineralbildung wird durch die flüssige Phase der Teilschmelze gefördert. Zusätzlich werden aufgrund der hohen Temperaturen größere Kalkstein- und Quarzkörner aufgeschlossen. Anlagenteil: Drehrohrofen, Übergangzone bis Sinterzone
- » Bis 1500 °C: Diese Materialtemperaturen werden im Drehrohrofen in der Sinterzone, in Flammennähe erreicht. Im Materialgemisch aus fester und flüssiger Phase stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht der Klinkerhauptphasen ein. Anlagenteil: Drehrohrofen, Sinterzone
- » Vorkühlung: Eine schnelle Abkühlung unterhalb von 1200 °C ist erforderlich. Die schnelle Abkühlung verhindert die thermodynamische Gleichgewichtseinstellung zugunsten der Bildung von Aluminaten und Aluminatferriten, welche ansonsten Ca aus dem Alitmineral resorbieren würde. Dadurch wird die Rückbil-

Tab. 2 Thermische Verfahren zur Herstellung von Zementklinker

	Feuchtegehalt, Rohmehl [%]	Rohmaterialaufgabe [-]	Maximale Klinkerproduktion [tcl./d]	Typischer Brennstoffenergiebedarf [kJ/kg cl.]
Nassverfahren	32–40	pumpfähiger Schlamm	3000	6000
Halbnassverfahren	18–22	mech. entwässerter Schlamm, stichfest	4500	3800
Halbtrockenverfahren	10–14	Pellets (Granalien)	1800	3400
Trockenverfahren (Wärmetauscher/ Kalzinator)	< 2	staubförmig	12000	3100

dung von Alit in Belit verhindert. Anlagenteil: Drehrohfen, Vorkühlzone und Klinkerkühler.

- » Abkühlung: Die nun stabilisierten Klinkerphasen werden mit Umgebungsluft abgekühlt, so dass der Klinker sicher transportiert, gelagert und zu Zement vermahlen werden kann. Die bei der Klinkerkühlung aufgewärmte Luft wird im Drehrohfen und Kalzinator als Verbrennungsluft verwendet. Anlagenteil: Klinkerkühler

Die komplexen Vorgänge um die Entstehung der Klinkerminerale sind in anschaulicher Weise in **Bild 1** dargestellt.

3 Anlagenteile und deren Funktion

Der thermische Prozess zur Herstellung des Zementklinkers hat sich im Laufe der Jahre stetig weiterentwickelt. Schachtofen, lange Nass- und Trockenöfen sowie die Herstellung im Halbtrockenverfahren werden heutzutage nicht mehr als Neuanlage gebaut. Eine Sonderlösung, die oft in Gebieten eingesetzt wird in denen die Kalkkomponente als Kreide vorliegt, ist noch das Halb Nassverfahren.

In **Tabelle 2** sind die unterschiedlichen thermischen Verfahren mit ihren wesentlichen Parametern dargestellt. Der Stand der Technik, welcher in fast allen Neubauprojekten umgesetzt wird, ist das Trockenverfahren bestehend aus Drehrohfen mit Kalzinator, Zyklonwärmetauscher und Rostkühler, das im Folgenden näher beschrieben wird.

3.1 Zyklonwärmetauscher

Der Zyklonwärmetauscher wurde 1952 erstmalig in der Zementindustrie von der KHD Humboldt Wedag gebaut. In Richtung des Materialstroms gesehen, wird das gemahlene Rohmaterial im ersten Prozessschritt auf den Zyklonwärmetauscher, siehe **Bild 2**, aufgegeben. Im Zyklonwärmetauscher wird die Energie des heißen Verbrennungsabgases in mehreren Zyklonstufen auf das

Rohmehl übertragen, so dass das Rohmehl im Austritt eine Temperatur von etwa 800–850 °C erreicht. Das Verbrennungsabgas wird dabei auf ein Temperaturbereich von etwa 260 °C bis

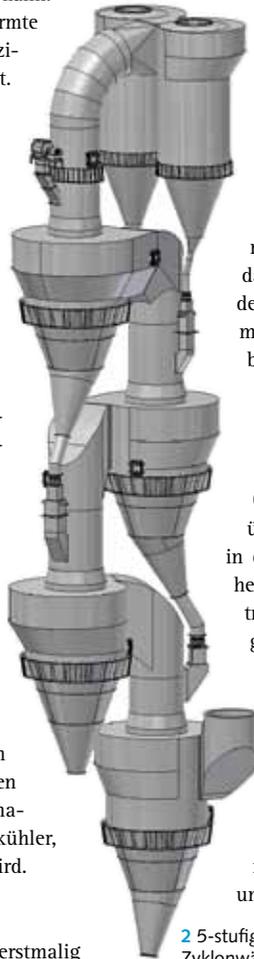
340 °C abgekühlt. Die Gasaustrittstemperatur steht im engen Zusammenhang mit der Anzahl der Zyklonstufen des Zyklonwärmetauschers und ist daher eine der bestimmenden Auslegungsgrößen für den Zyklonwärmetauscher. Die Abgastemperatur, bzw. die Stufenanzahl richtet sich nach der Rohmaterialfeuchte, da das Abgas des Wärmetauschers in der vorgeschalteten Rohmaterialmahlung die Trocknungsenergie bereitstellt.

Der Transport- und Wärmeübertragungsprozess beginnt im Steigschacht zum Zykloneintritt. Hier wird die Wärme des heißen Gases auf das kältere Rohmehl übertragen. Das Gemisch gelangt in den Zyklon und wird weitestgehend dort wieder voneinander getrennt, so dass das abgekühlte Abgas in den nächsthöheren Zyklon gelangt und das aufgewärmte Rohmehl in den Steigschacht zum darunter angeordneten Zyklon fällt.

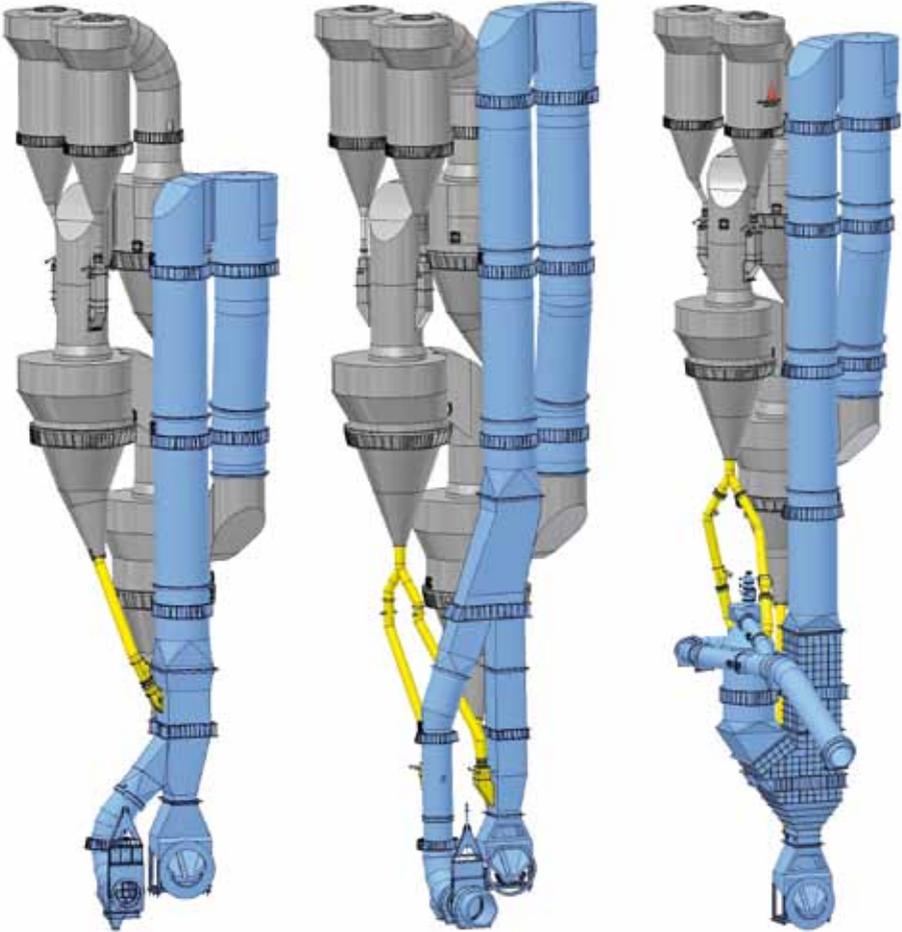
Ein weiteres wichtiges Auslegungskriterium ist der Druckverlust des Zyklonwärmetauschers und damit die Gas- und Materialgeschwindigkeiten

innerhalb dieses 2 5-stufiger KHD Zyklonwärmetauscher Systems. Die Stoff- und Ener-

giebilanz um den kompletten thermischen Anlagenteil ergibt die Abgasmenge, aus der sich dann die Dimensionierung der Zyklongrößen ableitet. Eng mit dem Druckverlust ist auch die Abscheideeffizienz der Zyklonstufen, insbesondere der obersten, verbunden. Grundsätzlich



2 5-stufiger KHD Zyklonwärmetauscher



3 KHD PYROCLON® Kalzinator Baureihe. Von links nach rechts: PYROCLON® R, PYROCLON® R Low-NOx, PYROCLON® R mit Brennkammer

gilt, dass die Effizienz der Abscheidung, höhere Gasgeschwindigkeiten in den Zyklonen, längere Tauchrohre, mit einer Zunahme im Druckverlust verbunden ist. Hier muss das optimale Gleichgewicht zwischen Druckverlust und Abscheidung gefunden werden, da nicht nur der Druckverlust ausschlaggebend für den Verbrauch elektrischer Energie am Systemventilator verantwortlich ist, sondern auch die Materialmenge die nicht im Zyklonwärmetauscher zurückgehalten werden kann und mit dem Abgas in den Ventilator gelangt.

Neben dieser zusätzlichen Arbeit am Ventilator und dem damit verbundenen höheren elektrischen Energieeinsatz wird durch den Verlust von zu hohen Staubmengen über den Zyklonwärmetauscher auch Wärmeenergie verschleppt, die sich in einen höheren Brennstoffbedarf der gesamten thermischen Anlage widerspiegelt.

Im Zyklonwärmetauscher findet die Verdampfung der restlichen Oberflächenfeuchte sowie der adsorptiv und im Kristallgitter gebundenen Wassermoleküle statt. Mit weiter

ansteigender Temperatur während der Aufwärmung im Zyklonwärmetauscher werden die organischen Bestandteile des Tons oxidiert und das Tonmineralegefüge durch den Verlust von Hydroxylionen zersetzt.

3.2 Kalzinator

Der energieintensivste Schritt der Zementklinkerherstellung, die Entsäuerung des Kalksteins, findet im Kalzinator statt. Dieser ist zwischen Zyklonwärmetauscher und Drehrohrofen angeordnet und wurde im Jahre 1965 von der KHD Humboldt Wedag weltweit erstmalig gebaut. Das im Zyklonwärmetauscher vorgewärmte Rohmehl wird in den Kalzinator geleitet. Um die notwendige Energie zur weiteren Aufheizung und vor allem zur Entsäuerung aufzubringen, wird der Kalzinator mit Brennstoff beschickt. Der zur Verbrennung notwendige Sauerstoff kommt in geringer Menge aus dem Abgas des Drehrohrofens und hauptsächlich aus der vorgewärmten Luft vom Klinkerkühlprozess. Die vorgewärmte Luft wird dazu mittels der Tertiärluftleitung am Ofen vorbeigeführt und direkt in den Kalzinator geleitet.

Kalzinatoren gibt es in verschiedenen Bauformen. Anhand der KHD Humboldt Wedag Kalzinator Baureihe, genannt PYROCLON®, siehe Bild 3, sollen die Funktionsweise und die Vorteile erläutert werden:

Entlastung des Drehrohrofens:

Die Entsäuerungsarbeit wird im PYROCLON® Kalzinator geleistet. Dadurch wird der Drehrohrofen thermisch und strömungstechnisch entlastet. Das ermöglicht die Nutzung von kleineren Drehrohrofen bei hoher Klinkerproduktionsleistung. Zusätzlich sorgt der hohe Entsäuerungsgrad für einen stabileren Ofenbetrieb, da das nun entsäuerte Rohmehl schnell höhere Temperaturen annimmt, partiell zu schmelzen beginnt und dadurch der Effekt des ungewollten, raschen Fließens durch den Ofen verhindert wird.

Flexible Brennstoffauswahl:

Der Prozess der Entsäuerung findet im Gegensatz zum Sinterprozess im Drehrohrofen auf einem niedrigeren Temperaturniveau von 850–880 °C

statt. Da hier eine gleichmäßige Verteilung der Wärme und keine hohen Verbrennungstemperaturen benötigt werden, sind die Anforderungen an die Qualität des Brennstoffs, wie z.B. Heizwert oder Partikelgröße nicht so hoch. Daher ist der PYROCLON® Kalzinator der ideale Ort um alternative Brennstoffe, wie z.B. sortierte Abfallreste, als Energieträger einsetzen zu können.

NOx Emissionen:

Neben dem vorher beschriebenen niedrigen Temperaturniveau und damit den Ausschluss der Bildung von weiterem thermischen NOx kann der Kalzinator als gestufte Feuerung betrieben werden. Hier ist als Beispiel der KHD Humboldt Wedag PYROCLON® Low-NOx zu nennen, der in der ersten Zone den Brennstoff unterstöchiometrisch umsetzt. Der unterstöchiometrische Brennstoffumsatz sorgt für die Bildung von unvollständigen Verbrennungsprodukten wie z. B. Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid, die das Potential zur Reduktion von NOx aus der Drehrohrofenfeuerung haben. Damit können auf primäre Weise NOx Verbindungen durch die Prozessführung abgebaut werden. Der vollständige Umsatz des Brennstoffs findet nach der Reduktionszone des Kalzinators durch die Zugabe der Tertiärluft statt. Für höhere NOx Reduktionsanforderungen kann



4 KHD Drehrohrofen. 3 Lagerstationen, mit Zahnkranzantrieb und Sinterzonenkühlung



5 Sinterzone und Ofenflamme

der PYROCLON® Kalzinator mit einem SNCR System (Selective Non Catalytic Reduction) zur sekundären NOx Reduktion ausgestattet werden.

Die Hauptreaktionen die im PYROCLON® Kalzinator stattfinden ist die Oxidation der Brennstoffbestandteile als Wärmequelle sowie die Entsäuerung des Kalksteins als Wärmesenke.

Kalksteinentsäuerung: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

$\Delta H_R = + 1780 \text{ kJ/kg}$ (endotherm)

Im Anschluss an den PYROCLON® Kalzinator wird das zu etwa 90 bis 95% vorentsäuerte Rohmehl in der untersten Zyklonstufe des Zyklonwärmetauschers abgeschieden und in den Drehrohfen geleitet.

3. 3 Drehrohfen

Die Bildung der Klinkermineralphasen findet im Drehrohfen bei Temperaturen um etwa 2000 °C in Flammennähe statt. Der Drehrohfen ist zum Austritt hin mit 3,5% leicht geneigt. Durch die Drehung wird das vorentsäuerte Rohmehl langsam durch den Ofen, in die Sinterzone bis zum Austritt transportiert. Neben der Materialförderung resultiert aus der Drehbewegung auch die Bildung der sogenannten Klinkergranalien, die üblicherweise im Größenbereich von 5 bis 30 mm im Durchmesser liegen. Der typische Materialfüllungsgrad bezogen auf den Rohrquerschnitt liegt bei etwa 15%. Der Ofen selbst ist auf 3 oder 2 Lagerstationen gelagert. Bei 2 Lagerstationen spricht man von einem Pyrorapid® oder auch Kurzofen. Der von KHD Humboldt Wedag auf

den Markt gebrachte Pyrorapid® hängt eng mit der Entwicklung der vorher beschriebenen Kalzinatortechnik zusammen, da in diesem Ofentyp hauptsächlich nur noch die Sinterung stattfindet und dementsprechend ein weitestgehend vorkalziniertes Material benötigt wird.

Die chemischen Vorgänge im Eintrittsbereich des Ofens liegen in der restlichen Entsäuerung des Materials. In der sogenannten Übergangszone des Ofens findet die Bildung der Zwischenprodukte nach folgenden Hauptreaktionen statt.

Calciumaluminat, CA: $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CA}$

$\Delta H_R = - 100 \text{ kJ/kg}$ (exotherm)

Calciumferrit, C₂F: $2 \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{F}$

$\Delta H_R = - 114 \text{ kJ/kg}$

Belit, β-C₂S: $2 \text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \beta\text{-C}_2\text{S}$

$\Delta H_R = - 732 \text{ kJ/kg}$

Im Bereich der Flamme, der sogenannten Sinterzone, **Bild 5**, fängt, unterstützt durch die Bildung der Teilschmelze, die Reaktion zu den weiteren gewünschten Klinkermineralphasen statt (siehe **Tabelle 1**).

Calciumaluminatferrit, C₄AF:

$\text{CA} + \text{C}_2\text{F} + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$

$\Delta H_R = + 25 \text{ kJ/kg}$

Tricalciumaluminat; C₃A: $\text{CA} + 2 \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{A}$

$\Delta H_R = + 25 \text{ kJ/kg}$

Alit, C₃S: $\beta\text{-C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$

$\Delta H_R = + 59 \text{ kJ/kg}$

Die Addition der endo- und exothermen Teilreaktionen zur Bildung des Zementklinkers im thermischen Prozess ergibt je nach Rohmischungszusammensetzung eine theoretische Reaktionsenthalpie im Bereich von 1715 bis 1780 kJ/kg bezogen auf das Endprodukt Klinker.

Das Abgas des Drehrohrofens wird über den Ofensteigschacht in den Kalzinator geleitet. Die Klinkergranalien fallen am Austritt des Ofens in den Klinkerkühler.

3.4 Drehofenbrenner

Bedingt durch die Vielzahl von primären als auch sekundären Brennstoffen mit den unterschiedlichsten Verbrennungseigenschaften muss ein moderner Drehrohrofenbrenner in der Lage sein, die Flamme so zu beeinflussen, dass die Brennstoffenergie möglichst im Bereich der Sinterzone freigesetzt wird. Aufgrund der aus Klinkerqualitäts-

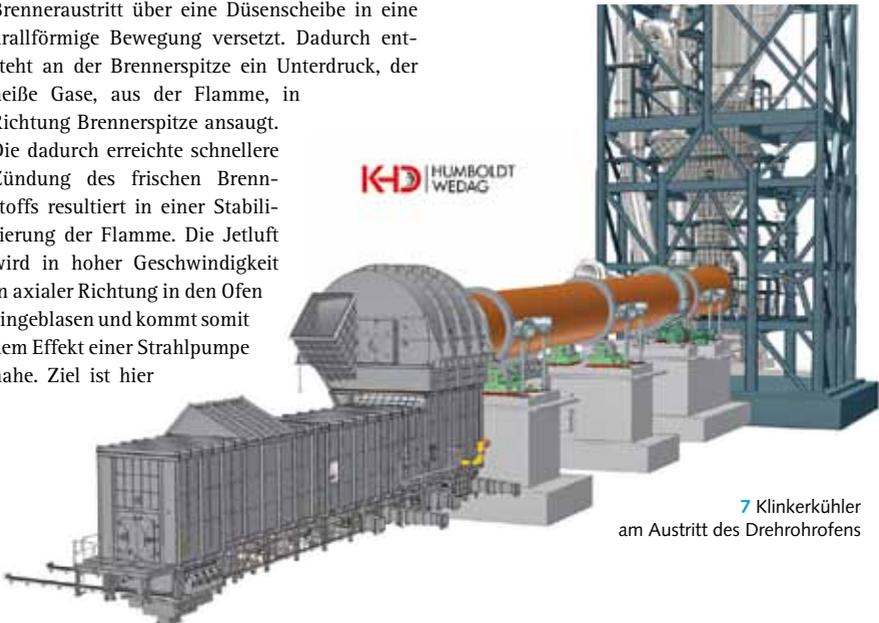
gründen hohen Flammentemperatur muss ein moderner Brenner auch den Anforderungen genügen, die thermische NO_x Bildung zu begrenzen. Diese beiden wesentlichen Ziele werden durch die Zugabe der sogenannten Primärluft erreicht. Dazu steht am Beispiel des KHD PYROJET® Brenners, siehe Bild 6, die Primärluft, bestehend aus Drallluft und Jetluft, zur Verfügung. Die Drallluft wird dem Pyrojetbrenner über einen Ventilator zugeführt und am Brenneraustritt über eine Düsenscheibe in eine drallförmige Bewegung versetzt. Dadurch entsteht an der Brennerspitze ein Unterdruck, der heiße Gase, aus der Flamme, in Richtung Brennerspitze ansaugt. Die dadurch erreichte schnellere Zündung des frischen Brennstoffs resultiert in einer Stabilisierung der Flamme. Die Jetluft wird in hoher Geschwindigkeit in axialer Richtung in den Ofen eingeblasen und kommt somit dem Effekt einer Strahlpumpe nahe. Ziel ist hier

6 KHD PYROJET®
Drehrohrofenbrenner



das Ansaugen der heißen Sekundärluft aus dem Klinkerkühler in die Flamme hinein um genügend Sauerstoff für einen schnellen Brennstoffumsatz und entsprechend hohen Temperaturen zu erreichen. Die bei diesen hohen Temperaturen sich zwangsläufig einstellende Bildung von thermischen NO_x, aus dem Sauerstoff und Stickstoff der Verbrennungsluft, kann entgegengewirkt werden, indem man das Luftangebot im Flammennahbereich reduziert. Das wird erreicht, indem man die Menge der Primärluft verringert. Um trotzdem ein hohes Brenneraustrittsmoment zu erlangen, arbeitet der KHD PYROJET® Brenner mit hohen Primärluftdrücken und entsprechenden Geschwindigkeiten um den für die Beeinflussung der Flammenform notwendigen Impuls bei geringer Primärluftmenge und damit geringen NO_x Emissionen zu

KHD HUMBOLDT WEDAG



7 Klinkerkühler
am Austritt des Drehrohrofens

erreichen. Neben dem positiven Effekt der geringen Primärluftmenge auf die NO_x Bildung erreicht man auch eine Verbesserung in der Energiebilanz, da statt kalter Primärluft (Umgebungs-luft) mehr vorgewärmte Sekundärluft aus dem Klinkerkühler genutzt werden kann.

3. 5 Klinkerkühler

Die letzte Baueinheit in Richtung des Materialflusses im thermischen System ist der Klinkerkühler. Dort findet die Abkühlung der bis zu 1400 °C heißen Klinkergranalien und die Rückgewinnung von thermischer Energie für den Brennprozess im Drehrohrofen und Pyroclon Kalzinator statt.

Die Abkühlung des Klinkers bezweckt auch die Stabilisierung des Klinkerminerals Alit, welches wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit und damit auf die Qualität des Zements hat, sowie die Möglichkeit der problemlosen Weiterverarbeitung des Klinkers zu Zement in der Zementmühle.

Der heiße Klinker fällt aus dem Drehrohrofen auf einen Kühlrost, auf dem er transportiert und gleichzeitig abgekühlt wird. Moderne Rostkühler, wie z.B. der KHD PYROFLOOR®-Kühler, siehe **Bild 7**, arbeiten nach dem Prinzip des Schubbodentransports. In Längsrichtung und damit in Transportrichtung sind mehrere Rostbahnen nebeneinander angeordnet, die über eine Hydraulik gemeinsam in Richtung Klinker-austrag geschoben und dann einzeln zurückgezogen werden. Das Intervall aus gemeinsamer und einzelner Bahnbewegung sorgt für den Transport des heißen Klinkerbetts vom Ofenaus-trag bis zum Kühleraustrag.

Kühlluftventilatoren saugen kalte Umgebungsluft an und drücken diese durch den Rost in die heiße Klinkerschicht. Dabei wird der Klinker abgekühlt und die Luft aufgewärmt. Ein Teil der aufgewärmten Luft, die sogenannte Rekupe-rationsluft, wird als Sekundärluft mit Tempera-turen von mehr als 1000 °C als Verbrennungsluft im Drehrohrofen verwertet. Der andere Teil der Rekupe-rationsluft wird als Tertiärluft über die parallel zum Ofen verlaufende Tertiärluftleitung zum Kalzinator geleitet und dient dort als Ver-brennungsluft. Die Wärmerückgewinnung aus



8 Sekundärbrennstoff; Brennstoffmix aus unterschiedlichen aufbereiteten Abfällen für den PYROCLON® Kalzinator

dem Klinker an die Verbrennungsluft führt zu immensen Einsparungen im Brennstoffbedarf. Am Austrag des Klinkerkühlers befindet sich noch ein Klinkerbrecher, der größere Klinkerstücke oder Ansatzstücke (abgebrochene Materialansätze von der Ofenwand) zerkleinert. Am Austritt des Klinkerkühlers ist der thermische Prozess abgeschlossen und der Klinker verlässt den Prozess mit Temperaturen im Bereich von ca. 100 °C. Nach Zwischenlagerung im Klinkersilo kann er im nächsten Prozessschritt mit den verschiedensten Zuschlagstoffen (Gips, Hüttensand, Flugasche, Kalkstein, natürlicher Puzzolan ...) zu Zement vermahlen werden.

4 Umwelttechnik der modernen Klinkerherstellung

Der hier beschriebene Prozess der Klinkerherstellung ist verbunden mit einem intensiven Einsatz von Brennstoffenergie und elektrischer Energie, mit dem daraus resultierenden Ausstoß von CO₂ und weiteren Schadgasen, wie z. B. NO_x. Um die klimapolitischen Ziele zu erreichen und den negativen Einfluss auf die Umwelt weitestgehend zu reduzieren, hat sich der Bereich um den klassischen Herstellungsprozess um neue Prozesse und zusätzliche Maschinen und Technologien stark erweitert.

4.1 Einsatz von sekundären Brennstoffen

Die Gruppe der sekundären Brennstoffe besteht aus brennbaren Reststoffen aus Industrie, Gewerbe, Haushalten und Agrarwirtschaft. Je nach Qualität der sekundären Brennstoffe können hohe Anteile an primären Brennstoffen (fossile Brennstoffe) ersetzt und somit eingespart werden. Die Zementklinkerherstellung bietet hervorragende Eigenschaften, um diese Reststoffe energetisch und stofflich nutzen zu können. Bedingt durch die aus Klinkerqualitätsgründen hohen Prozess-temperaturen und Sauerstoffgehalte wird die organische Substanz der sekundären Brennstoffe annähernd rückstandsfrei verbrannt. Die mineralische Substanz der sekundären Brennstoffe ersetzt einen Teil des Rohmaterials und wird sicher in das Klinkermineral mit eingebunden.

Für die Feuerung sekundärer Brennstoffe im Drehrohröfen bestehen hohe Anforderungen an die Qualität des sekundären Brennstoffs hinsichtlich einer möglichst homogenen Brennstoffzusammensetzung, hohem Heizwert und geringer Partikelgröße. Der sekundäre Brennstoff muss im Flugstrom ausgebrannt werden, um ein Ausregen auf das Klinkerbett zu verhindern, damit es nicht zu Qualitätseinbußen durch reduzierende Brennatmosfera direkt am Klinkerkorn kommen kann. Die Freisetzung der Brennstoffenergie muss im Bereich der Sinterzone erfolgen. Eine Verschleppung der Brennstoffwärme in Richtung der Ofeneinlaufkammer darf nicht erfolgen.

Eine gute Vermischung der sekundären Brennstoffe innerhalb der Flamme ist daher eine wichtige Voraussetzung um hohe Anteile sekun-

därer Brennstoffe im Ofen verwerten zu können. Dafür gibt es für den KHD PYROJET® Brenner ein in Längsrichtung bewegliches Dralllufterelement, welches den Förderkanal für sekundäre Brennstoffe am Austrittspunkt umschließt und innerhalb des Brenners, vor Eintritt in den Ofen, liegt. Auf diese Weise wird der kompakte Förderstrahl der sekundären Brennstoffe noch im Brenner selbst aufgerissen und somit am Brenneraustritt besser in der Flamme verteilt.

Die Anforderungen hinsichtlich der Qualität der sekundären Brennstoffe für den Einsatz im Kalzinator sind geringer als im Vergleich zu denen für den Einsatz im Drehrohröfen. Das resultiert aus der längeren Ausbrandstrecke im Flugstrom und der für den Kalzinationsprozess nicht notwendigen hohen Temperaturen und damit der Energiefreisetzung auf kompakten Raum. Damit ein möglichst hoher Anteil dieser Brennstoffe im Kalzinator umgesetzt werden kann, sind neben der klassischen Verlängerung des Kalzinators zur Erreichung höherer Verweilzeiten auch Zusatzbauteile wie beispielsweise eine Brennkammer mittlerweile Stand der Technik [2]. Die Brennkammer bietet den Vorteil, dass der Start der Verbrennung in reiner, heißer Tertiärluft erfolgt und das aufgrund der konstruktionsweise der Brennkammer der Flammenbereich weitestgehend frei von Rohmehl gehalten wird. Die freigesetzte Brennstoffwärme wird in diesem Bereich nicht für die Entsäuerungsreaktion des Rohmehls sondern für den Anstieg der Flammentemperatur genutzt.

Der Einsatz sekundärer Brennstoffe ist in den Ländern Europas und Nordamerikas mittlerweile auf einem hohen Niveau angekommen. So liegt beispielsweise die thermische Substitutionsrate in Deutschland bei über 62% [3]. Die Feuerung sekundärer Brennstoffe ist eine der anerkannten Methoden, um CO₂ Emissionen der Zementwerke aus fossilen Brennstoffen zu senken [4].



9 KHD-Zyklonwärmetauscher; SCR Reaktor in der Abgasleitung (rechts, oben)

4.2 Primäre und sekundäre Abgasreinigung

Die Herstellung von Zement führt aufgrund der unterschiedlichsten Zusammensetzungen der Rohstoffe im Spurenstoffbereich sowie durch die Verbrennungsprozesse zu den verschiedensten Emissionen. Hier sind beispielsweise Stickoxide NO_x, Schwefeldioxid SO₂, Quecksilber, Kohlenwasserstoffverbindungen, Kohlenmonoxid, Staub und andere zu nennen.

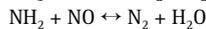
Die Vermeidung und Reduzierung von Schadgasen lassen sich in primäre und sekundäre Maßnahmen unterscheiden. Primäre Maßnahmen werden innerhalb des Prozesses durch die Anpassung der Prozessführung getroffen, mit dem Ziel, die Menge der Schadstoffe im Abgas zu reduzieren. Reichen diese Maßnahmen nicht aus, werden sekundäre Maßnahmen eingesetzt. Das sind überwiegend zusätzliche Anlagenteile die für die weitere Reduktion der Schadstoffe notwendig sind und neben den Investitionskosten noch Betriebskosten verursachen.

Am Beispiel von NO_x werden hier die modernen Anforderungen an den Umweltschutz bezüglich der Emissionen dargestellt. Aktuell

werden in den Ländern Europas und den USA die bestehenden NO_x Grenzwerte verschärft und in vielen anderen Ländern der Welt werden derzeit Grenzwerte etabliert.

Primäre Maßnahmen zur NO_x Reduzierung sind sogenannte Low NO_x Brenner im Drehrohr-Ofen und besondere Kalzinatortypen, wie z.B. der PYROCLON® Low NO_x, der nach dem System der gestuften Verbrennung NO_x Verbindungen aus dem Ofen kommend reduziert. Dabei wird der Kalzinatorbrennstoff in einer Zone eingebracht in der er unterstöchiometrisch umgesetzt wird. Es entstehen brennbare Gasbestandteile die in der Lage sind NO_x zu reduzieren. In einem späteren Schritt wird der zur vollständigen Verbrennung notwendige Sauerstoff über die Tertiärluftleitung zugeführt.

Je nach NO_x Eingangskonzentration, Brennstoffeigenschaften und letztendlich erforderlichen NO_x Grenzwert können diese primären Maßnahmen nicht ausreichend sein, so dass sekundäre Maßnahmen eingesetzt werden müssen. Stand der Technik ist heutzutage die Reduktion von NO_x nach dem SNCR Verfahren (Selective Non-Catalytic Reduction). Hier wird eine ammoniakhaltige (NH₃) Verbindung in den Kalzinator eingedüst. Der Reaktionsmechanismus ist in den folgenden Reaktionsgleichungen dargestellt:



Im ersten Schritt wird aus dem Ammoniak ein reaktiveres NH₂ Molekül gebildet welches dann im darauffolgenden Schritt die NO_x Verbindung reduzieren kann. Die Bildung der dazu notwendigen NH₂ Moleküle ist stark temperaturabhängig und definiert damit den Schritt der die Effizienz des NO_x Abbaus bestimmt. Je nach Eingangskonzentration werden mit diesem Verfahren Grenzwerte von 300 bis 500 mg_{NO₂}/Nm³dry @ 10 Vol.-% O₂ erreicht.

Äußerst anspruchsvoll sind die für Deutschland geplanten Grenzwerte von 200 mg_{NO₂}/Nm³dry @ 10 Vol.-% O₂. Derzeit wird dazu das SNCR Verfahren optimiert und ein weiteres Verfahren, die Reduktion von NO_x am Katalysator (SCR = Selective Catalytic Reduction) in den Zemen-



10 Abwärmekessel während der Montage. Rohrbündel und Dampftrömmel

herstellungsprozess eingeführt. In **Bild 9** ist im oberen Teil der Abgasleitung der sogenannte SCR Reaktor zu erkennen, der aktuell in einem Auftrag für ein neues Zementwerk gebaut wird. Die chemischen Reaktionen sind ähnlich, laufen aber bedingt durch den Katalysator bei geringerer Temperatur und höherer Effizienz ab. Erste Installationen des SCR Verfahrens im Zementwerk haben schon gezeigt, dass der neue, verschärfte NOx Grenzwert erreicht werden konnte.

4.3 Abwärmenutzung

Ein weiterer Schritt die klimapolitischen Zielvorgaben zur Senkung der CO₂ Emissionen zu erreichen, ist die Installation von Systemen zur Nutzung von Abwärme im Zementwerk. Am verbreitetsten ist die Erzeugung von überhitztem Wasserdampf und daraus die Umwandlung in elektrische Energie.

Dazu wird in der Abgasleitung nach Zyklonwärmetauscher und in der Abluftleitung vom Klinkerkühler jeweils ein Abhitzekeessel (**Bild 10**) installiert der aus den Kesseleinheiten, vom heißen Abgas zum abgekühlten Abgas, Dampf-Überhitzer, Wasser-Verdampfer und Wasser-Vorwärmer besteht. Die Grenzen des Systems zur Nutzung der Abwärme liegen dabei in der Feuchtigkeit der im Zementwerk eingesetzten Rohmaterialien und Zuschlagstoffe für die Zementmühle. Hierfür muss nach der Abwärmenutzung zur Verstromung noch genügend Wärme zur Trocknung dieser Materialien vorhanden sein.

Der überhitzte Wasserdampf wird anschließend in einer Dampfturbine entspannt. Die mechanische Arbeit wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Das Potential liegt dabei bei ca. 30 kWh elektrischer Energie pro

Tonne Klinker. Das entspricht in etwa 1/3 der im Zementwerk benötigten elektrischen Energie, die aus der Abwärme erzeugt werden kann.

5 Zusammenfassung

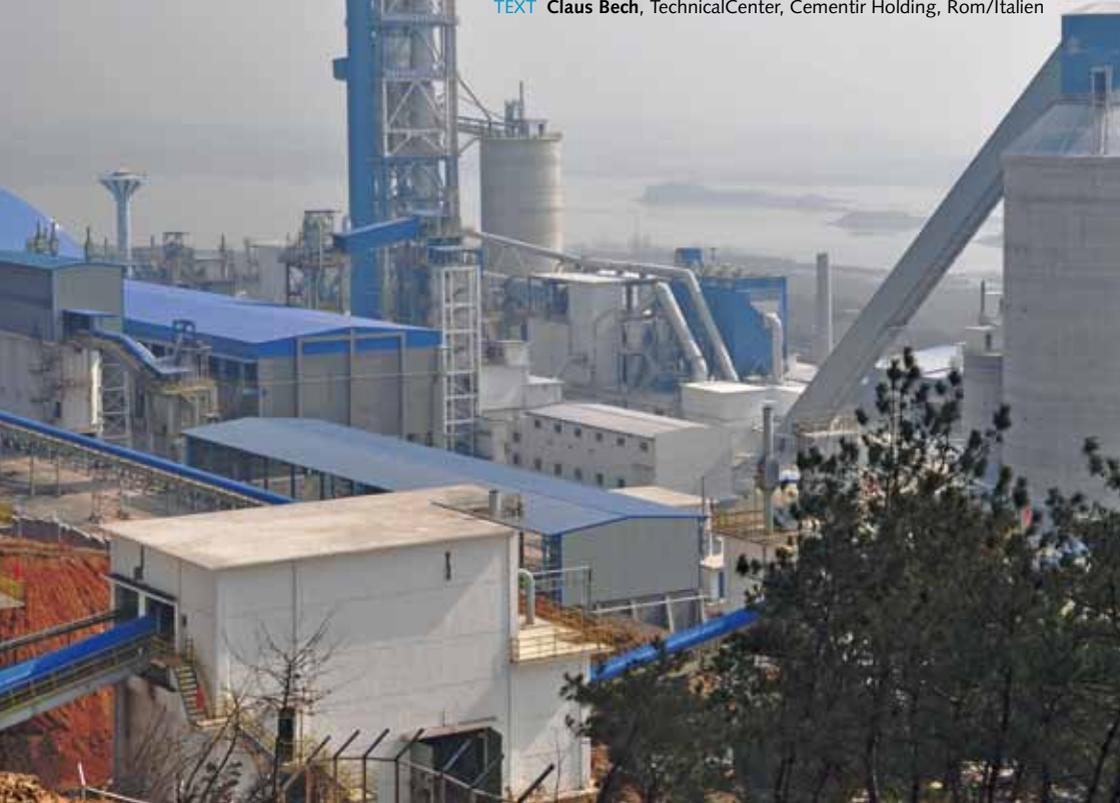
Die Herstellung von Zementklinker erfolgt heutzutage in den meisten Fällen in modernen Ofensystemen ausgestattet mit Zyklonwärmetauscher, Kalzinator, Drehrohrofen und Rostkühler. Die bislang maximal erreichten Produktionsmengen pro Anlage liegen mittlerweile um die 12000 t Klinker pro Tag. Bedingt durch den hohen Einsatz von Brennstoff und elektrischer Energie ist die Zementindustrie weltweit in den Fokus gerückt mit den Anforderungen ihre CO₂ Emissionen und damit den Energieverbrauch sowie die Emissionen von Schadgasen zu minimieren. Neben der klassischen Auslegung und Optimierung von thermischen Systemen zur Erzeugung von Zementklinker kommen immer mehr Sekundär-Technologien hinzu um die umweltrelevanten Ziele zu erreichen. Hier ist beispielsweise die Ausrüstung des Zementwerks mit Lager-, Transport-, Dosier- und Brenntechnik zu nennen, um alternative Brennstoffe umsetzen zu können oder zur weiteren Einsparung von elektrischer Energie die Implementierung von Anlagen zur Nutzung und Wandlung von Abwärme in elektrische Energie. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der primären und sekundären Vermeidung von schädlichen Emissionen. Hier gibt es Sonderlösungen für die Zementindustrie sowie die Übertragung von Technologien aus anderen Industriezweigen. Damit erweitert sich das klassische Feld der Zementverfahrenstechnik um den Bereich der Umweltverfahrenstechnik der in immer mehr Ländern die Grundvoraussetzung für den Neubau oder der Modernisierung von Zementwerken geworden ist.

LITERATUR

- [1] Locher, F.W.: Zement. ISBN 978-3-7640-0400-2, Verlag Bau + Technik, 2000
- [2] Schürmann, H.: KHD combustion chamber – flexible use of alternative fuels in the cement plant
In: ZKG International (2012) No. 11, pp.52-62
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V., VDZ: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf, 2013
- [4] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) & International Energy Agency (IEA): Cement Technology Roadmap 2009, Carbon emissions reduction up to 2050. ISBN 978-3-940388-47-6, 2009

Mit einer neue Weißzement-Anlage in China können auf einem großen und sehr wettbewerbsintensiven Markt neue Maßstäbe für die Weiße und stetige Qualität gesetzt werden.

TEXT Claus Bech, TechnicalCenter, Cementir Holding, Rom/Italien



Modernes Weißzementwerk in China

CEMENTIR

Herstellung von Weißzement nach dem neuesten Stand der Technik

Da Weißzement nur etwa 1% des gesamten, weltweit produzierten Zements ausmacht, wurde bisher der Verbesserung und Leistungssteigerung der Produktion von Weißzement keine allzu große Aufmerksamkeit gewidmet. Es gibt nur wenige Erstausrüster, die das entsprechende

Wissen bezüglich der Anlagen für die Herstellung von Weißzement haben und diese anbieten. Daher kamen einige Initiativen aus der Industrie selbst. Einige der in diesem Artikel beschriebenen Technologien sind auch auf die Produktion von Grauzement anwendbar, da der Haupt-



unterschied immer noch die Farbe ist und nicht so sehr die Leistungsfähigkeit des Produkts im Allgemeinen (Festigkeit, Abbindezeit und Wasserbedarf). Weißzement wird jedoch nur für besondere und einmalige Anwendungen benötigt, wo die Weiße bzw. die Farbe die wesentlichen Faktoren sind.

1 Hintergrund

Die Cementir Holding, die im Wesentlichen durch die frühere Aalborg Portland Gruppe repräsentiert wird, besitzt sechs Anlagen ganz oder teilweise (Tabelle 1), die hochwertigen Weißzement herstellen, und ist damit einer der führenden Produzenten von Weißzement in der Welt. Auch

nach dem Erwerb von Aalborg Portland im Jahr 2004 hat sich die Cementir Gruppe weiterhin auf Weißzement konzentriert, indem spezielles und firmeneigenes Wissen geschützt und die weltweite Vermarktung von entsprechenden Produkten vorangetrieben wird.

Besonderes Kennzeichen der Anlage in Dänemark ist der Einsatz von vergleichsweise feuchtem Mergel (30% Feuchtigkeit). Das ist der Hauptgrund, warum dort weiterhin das Nassverfahren angewendet wird. Der höhere Brennstoffverbrauch wird dadurch ausgeglichen, dass der größte Teil der Wärme in den Rauchgasen zurückgewonnen und dann in einem Wärmeverteilersystem für die Stadt Aalborg verwendet wird. Die Gase vom Ofen werden zuerst hinsichtlich SO_2 abgereinigt, und der erzeugte Gips wird in den Zementmühlen eingesetzt. Nach dem Abgasreinigungssystem ist ein Wärmetauscher installiert, aus dem das Umlaufwasser vom Wärmeverteilungssystem der Stadt 80 000 Haushalte mit warmem Wasser für Heizungszwecke beliefert.

Die anderen drei Anlagen der Gruppe befinden sich in Ägypten, Malaysia und China. Die Anlagen in Ägypten und Malaysia arbeiten mit der konventionellen Technologie für Weißzement, wobei ein Ofen mit vierstufigem Vorwärmer/Vorkalzinator die Wärme für die Trocknung der Rohmaterialien über einen Wärmetauscher im Fallrohr liefert. Die saubere und jetzt vorgewärmte Luft vom Wärmetauscher wird als Verbrennungsluft im Ofen und Kalzinator verwendet.

Die Anlage in China (Bild 1) ist etwas anders und kommt dem neuesten Stand der Technik näher, weil sie verfahrenstechnisch intern vom Technikzentrum der Gruppe ausgelegt wurde und von einem chinesischen Erstausrüster und Generalauftragnehmer auf EPC-Basis (Bild 2) gebaut wurde. Diese Vertragskonfiguration ermöglicht ein freieres Denken, als es oft mit einem Erstausrüster möglich ist. Die nachstehende Beschreibung des Verfahrens kombiniert die Hauptmerkmale der neu errichteten chinesischen Anlage und andere Inputs für ein zukünftiges Projekt, um die Anlagenleistung weiter zu verbessern.

Tab. 1 Weißzementanlagen von Cementir Holding

Name der Anlage	Klinkerkapazität [t/a]	Eigentümerstruktur
Aalborg Portland A/S, Dänemark	600 000	Cementir España SL (75.0 %) Clobocem SL (25.0 %)
Aalborg Portland (Anqing) Co, Ltd, China	530 000	Aalborg Portland A/S (100 %)
Sinai White Portland Cement Company CO. S.A.E.	790 000	Aalborg Portland A/S (57.14 %) Sinai Cement Company (25.40 %) Dr. Hassan Rateb (1.27 %) Sama Sinai (2.22 %) IFU (13.97 %)
Aalborg Portland Malaysia Sdn Bhd, Ipoh Malaysia	182 000 (330 000)*	Aalborg Portland A/S (70.0 %) Cement Resources Consolidated Pty Ltd (30.0 %)
Lehigh White Cement Company, York PA, USA	128 000	Aalborg Cement Company Inc. (24.5 %) Cemex (24.5 %) Lehigh Cement (51.0 %)
Lehigh White Cement Company, Waco TX, USA	108 000	Aalborg Cement Company Inc. (24.5 %) Cemex (24.5 %) Lehigh Cement (51.0 %)

*APM wird zur Zeit modernisiert, um die Kapazität zu erhöhen

Der Unterschied zwischen grauem und weißem Zement, abgesehen von der Farbe, ist in den meisten Fällen der Anwendungsbereich. Vor allem aus Gründen der Produktionskosten und damit des Preises verbietet sich ein Einsatz beim Vergießen großer Massen, denn vom Standpunkt der Festigkeit und der Sulfatbeständigkeit würde sich Weißzement sehr gut dafür eignen und ist in einigen Fällen sogar besser als grauer Zement. Die erhöhte Lichtreflexion macht Weißzement in klimatisch wärmeren Gebieten besonders nützlich, ganz abgesehen von seinem dekorativen Wert. Der Mehrwert von weißem Beton ist darauf zurückzuführen, dass ein Neuanstrich nicht erforderlich ist, um weiß zu bleiben. Einfaches Reinigen reicht.

Die weiße Farbe des Zements ist im Wesentlichen auf das Fehlen von Eisen, Mangan, Chrom, Titan und Phosphor zurückzuführen. Diese farbgebenden Elemente sind normalerweise in den meisten Rohmaterialien für die Zementherstellung vorhanden. Daher verfügen tatsächlich nur wenige Zementanlagen über einen geeigneten Kalkstein, und nahezu kein Werk verfügt gleichzeitig über den Sand und Kaolin, die auch benötigt werden als Siliziumdioxid- und Tonerdequellen. Daher müssen diese von anderen

Orten beschafft werden. Schließlich benötigt der Prozess für das Brennen von Weißklinker wegen des Mangels an Schmelze in der flüssigen Phase eine höhere Temperatur, was teilweise den spezifischen Brennstoffverbrauch erhöht. Um das zu kompensieren, setzen die Anlagen das mineralisierte Verfahren ein, wobei eine fluorhaltige Verbindung verwendet wird.

2 Das ideale Verfahren zur Produktion von Weißzement

Die nachstehende Beschreibung soll als Richtlinie dienen, wenn eine neue Anlage für Weißzement errichtet werden soll.

2.1 Rohmaterialaufbereitung

Wie immer bei der Zementherstellung ist Kalkstein (**Bild 3**) der größte Bestandteil. Für die Herstellung von Weißzement ist jedoch dessen Qualität besonders wichtig. Auch wenn der Stein selbst eine gute Qualität hat (Mangel an den o.a. farbgebenden Oxiden), kann ein Waschen des Steins durch den Abraum und Toneinschlüsse erforderlich werden. Das ist ein wasserintensiver Prozess, der beachtliche Mengen an Abfall (Schlick) produziert, die gesondert behandelt werden müssen. Das Wasser wird zu seinem

Erhalt zurückgeführt, aber Abrieb und Schlick müssen ständig entfernt werden. Das geschieht normalerweise in Klärteichen. Nach der Entwässerung können Erde und Abrieb für landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden. Der gewaschene und gebrochene Kalkstein wird dann in einer Mischbett-Lagerhalle gelagert und von dort zur Wälzmühle transportiert.

2.2 Rohmaterialvermahlung

In Abhängigkeit vom Standort und den verfügbaren Rohmaterialien werden entweder Kaolin oder Pyrophyllit zusammen mit Sand eingesetzt. Pyrophyllit muss gebrochen werden, da es sich dabei normalerweise um einen harten Stein handelt. Eine Nassrohmühle ist erforderlich, weil die Silikatfraktion ausreichend fein gemahlen werden muss, um den säureunlöslichen Rückstand (< 3% Rückstand auf 45 µm) zu kontrollieren. Wenn Sand als Rohmaterial gewählt wird, kann er direkt der Rohmühle aufgegeben werden. Wenn jedoch Pyrophyllit verwendet wird, wie oben aufgeführt, wird empfohlen, dieses Material in einem Backenbrecher vorzubereiten und danach einer Hochdruckrollenpresse aufzugeben, damit das Mahlgut für eine Nassmühle genügend fein ist (< 2 mm). Die Nassmühle sollte ein L/D-Verhältnis von 5–6 haben, mit Gummi ausgekleidet sein und Flintsteine als Mahlkörper verwenden.

Es kann schon verlockend sein, eine Vertikalmühle oder sogar eine Kugelmühle zwecks einer besseren Wirtschaftlichkeit des Mahlens

und eines geringeren Wärmebedarfs für Sand und/oder Pyrophyllit einzusetzen. Jedoch wegen des potenziellen gesundheitlichen Risikos von silikathaltigen Feinstäuben wird das nicht empfohlen und sollte vermieden werden.

Wenn für das Mahlen und Trocknen von Kalkstein eine Vertikalmühle eingesetzt wird, erreicht man eine bessere Wirtschaftlichkeit des Mahlens. Es hat sich auch gezeigt, dass diese Konfiguration nur eine geringe oder gar keine Auswirkung auf die Weiße hat, weil die Verschleißrate der eisenhaltigen Mahlwerkzeuge gering ist.

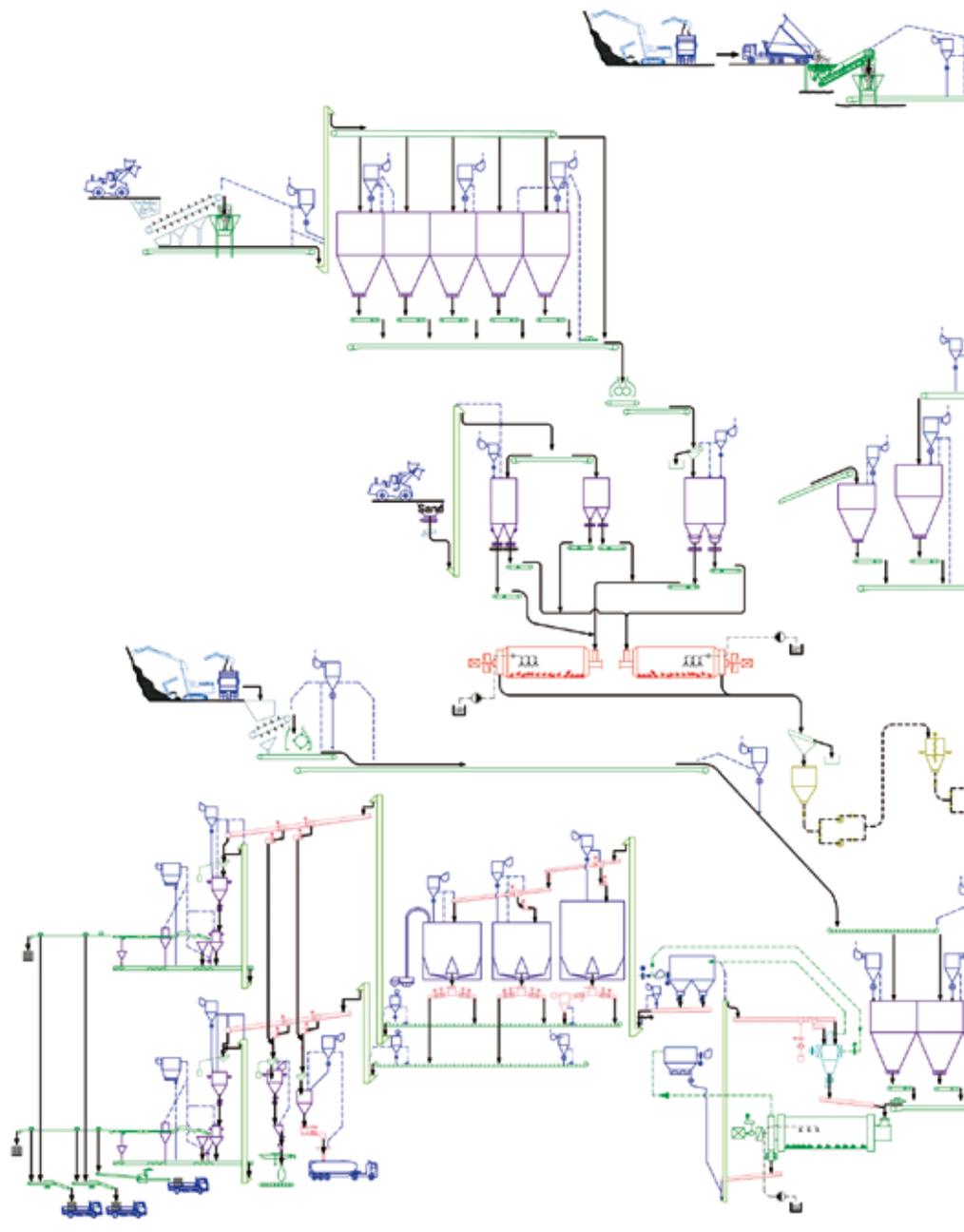
Der in der Rohmühle produzierte Schlamm wird dann direkt in die Vertikalmühle gepumpt, wo das Wasser verdunstet und das Material mit Kalkstein und Kaolin/Sand/Pyrophyllit gemischt wird. In einigen Fällen, wenn eine ausreichende Nassmahlkapazität vorhanden ist, kann ein Teil des Kaolins oder der gesamte Kaolin mit dem Sand/Pyrophyllit zwecks einer besseren Kontrolle des säureunlöslichen Rückstands gemahlen werden. Der säureunlösliche Rückstand auf 45 µm ist von großer Bedeutung für die Brennbarkeit und Produktqualität bei der Produktion von sowohl weißem als auch grauem Klinker.

2.3 Rohmehlmischanlage

Das Rohmehl wird in einem Mischsilo gelagert. Da jedoch die Mischung aus reinen, autonomen Materialien besteht, ist eine Mehrkammer-Siloanlage mit Massenfluss einem konventionellen Mischsilo vorzuziehen, weil die Materialien dazu



1 5-stufiger Vorwärmer/Vorkalzinerierofen

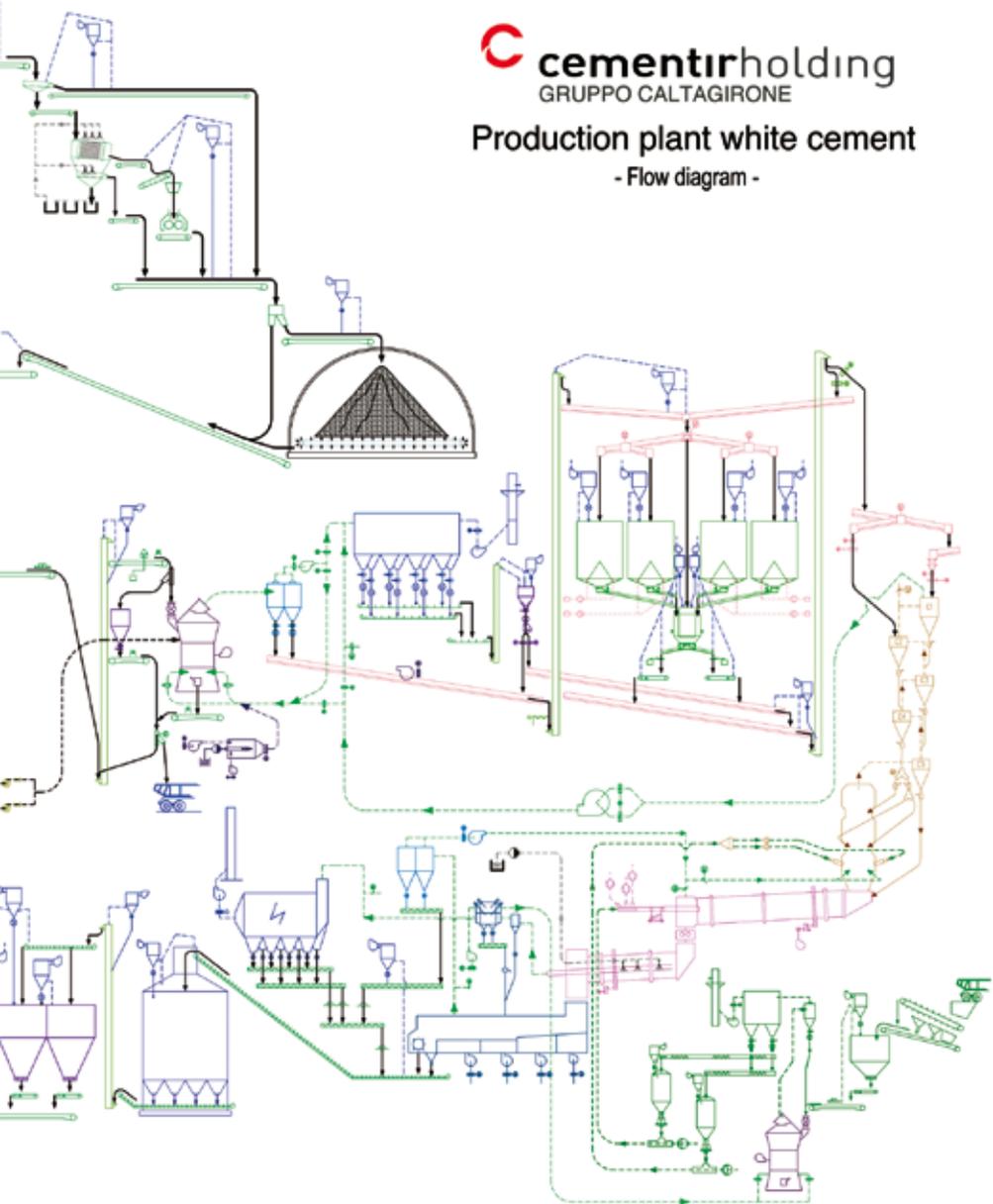


2 Flußdiagramm des Werkes

 **cementirholding**
GRUPPO CALTAGIRONE

Production plant white cement

- Flow diagram -



neigen, sich zu entmischen, wenn sie für das Mischen und den Abzug aufgelockert werden.

2.4 Pyro-Linie

Die Pyro-Linie ist wahrscheinlich der Bereich, wo durch die Einführung der zweistufigen Kühlung und eines Ofens mit fünfstufigem Vorwärmer/Vorkalzinator die größten Verbesserungen zu verzeichnen sind. So konnten langfristig geringe Verbrauchswerte wie 1050 kcal/kg Klinker erreicht werden. Das Potenzial ist da, nur 1000 kcal/kg Klinker zu erreichen. Dafür müssen allerdings die einzelnen Ausrüstungsteile im brenntechnischen Verfahren noch weiter optimiert werden.

Die Heißluft, die als Verbrennungsluft im Kalzinator und im Ofen genutzt wird, kommt von einem Rostkühler, der einer Kühltrommel nachgeschaltet ist. Die Abschreckung mit Wasser in der Kühltrommel garantiert die Farbe und die Qualität. Die Luftkühlung im nachgeschalteten Rostkühler, wo der Klinker von ca. 600 °C auf 100 °C gekühlt wird, dient vor allem dazu, Verbrennungsluft zu liefern und zweitens um zu sichern, dass ein Klinker entsteht, der mit konventionellen Klinkertransportausrüstungen gefördert werden kann, wie z. B. Zellenförderer und Bandförderer. Diese Konfiguration begrenzt auch die erforderliche Menge an Sprühwasser sowohl für die Kühltrommel als auch später für die Zementmühle.

Der konventionelle Standort der Klinkerbrechanlage am Ende des Rostkühlers ist nicht

wirklich optimal. Tests haben gezeigt, dass Klinkerstücke, die größer als 25 mm sind, nicht schnell genug abgeschreckt werden, so dass kleine Mengen von FeO zu Fe₂O₃ oxidieren können, was eine negative Auswirkung auf die Weiße hat. Um das zu verhindern, sollte ein wassergekühlter Walzenbrecher zwischen Ofen und Kühltrommel installiert werden. Ein Brecher an dieser Stelle wirkt auch als physikalische Sperre, die die Menge an Dampf begrenzt, die in den Ofen eintritt. Für unsere chinesische Anlage ist ein entsprechender Platz vorgesehen, aber es sind keine Brecher für Ofenkapazitäten im Bereich von 1500–2000 t/d auf dem Markt verfügbar. Die dortigen Öfen arbeiten in diesem Bereich.

2.5 Brennstoff (Aufbereitung)

Die Wärme in den Gasen vom Dampfabzug wird zum Vorwärmen der Trocknungsluft in der vertikalen Kohle- bzw. Koxmühle mit Hilfe eines Wärmetauschers verwendet. Um eine gute Qualität zu sichern, ist es auch wichtig, dass wenig bis kein Eisen vorhanden ist, das Asche vom Brennstoff enthält. Daher sind Erdgas und Öl die bevorzugten Brennstoffquellen für Weißzement. Petrolkoks ist jedoch zweifellos der kostengünstigste Brennstoff. Beim Einsatz des mineralisierten Klinkerverfahrens und einer ordnungsgemäßen Steuerung von Alkalien/Schwefel kann sogar Petrolkoks mit einem hohen Schwefelgehalt ohne negative Auswirkungen auf die Qualität und den Betrieb eingesetzt werden.

Die Zukunft gehört sicherlich der Einführung von alternativen Brennstoffquellen. Wegen des negativen Einflusses einiger Aschen konzentriert man sich zurzeit auf Reisschalen, Lösungsmittel, Plastik und Altöl. Der Einsatz dieser alternativen Brennstoffe wird den Brennstoffverbrauch nicht reduzieren, sondern das Gegenteil ist der Fall. Mit Sicherheit wird dadurch jedoch die CO₂-Bilanz verbessert.

2.6 Zementmahlung

Schließlich ist im Bereich der Zementmahlung die konventionelle Kugelmühle am gebräuchlichsten. In dem Bemühen, Energie einzusparen, könnte jedoch der Einsatz einer Vertikalmühle in Betracht



3 Rohmaterial-Förderanlage

gezogen werden. Es ist jedoch fraglich, ob ein stabiler Betrieb erreicht werden kann, denn man weiß, dass der Klinker von Öfen mit Kalzinator, speziell im mineralisierten Verfahren, in der Regel sehr fein ist (< 2 mm).

Eine Rollenpresse ist wahrscheinlich die bessere Lösung, und wir haben gute Erfahrungen mit dieser Technologie in einer unserer Anlagen gemacht. Wir können dort eine Mahlleistung mit dem

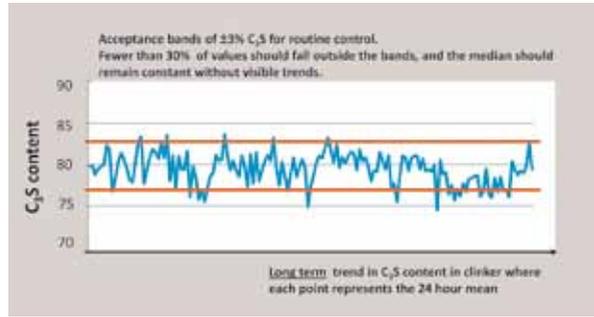
geringen Wert von 23,0 kWh/t bei 4000 cm²/g nach Blaine erreichen. Der Grund für die ausgezeichnete Leistungsaufnahme in der Rollenpresse liegt in der Tatsache, dass Nassöfen schön runde Granalien und sehr wenig Staub produzieren. Wenn die Rollenpresse mit staubigem Klinker beschickt wird, sinkt die Leistungsaufnahme beachtlich. Diese Erkenntnisse lassen es fragwürdig erscheinen, ob es eine echte Alternative zur guten alten Kugelmühle gibt, was sich mit der Zeit allerdings zeigen wird. Die neueste Entwicklung mit Vertikalmühlen für das Mahlen von Flugasche gibt uns die Hoffnung, dass eines Tages eine Technologie verfügbar sein wird.

3 Schlussfolgerung

Auch wenn Weißzement ein Nischenprodukt ist, ist es wichtig, die Betriebskosten bei gleichbleibender Qualität nicht aus den Augen zu verlieren (Bild 4 und 5). Um eine gute, gleichbleibende Qualität zu sichern, ist es wichtig, gute Rohmaterialien zu verwenden. Wenn Verunreinigungen auftreten, sind diese zu entfernen. Außerdem muss ein strenges Programm zur Qualitätskontrolle vorhanden sein.

Die neue Anlage in China ist ein großer Erfolg. Sie hat es dem Unternehmen erlaubt, auf einem großen und sehr wettbewerbsintensiven Markt neue Maßstäbe für die Weiße und stetige Qualität zu setzen.

Die Auswahl und Konfiguration der Ausrüstungen zusammen mit dem mineralisierten Verfahren machen es möglich, einen Brennstoffverbrauch



4 Grenzwerte der Zusammensetzung

von nur 1000 kcal/kg Klinker zu erreichen. Indem man versucht, so viel überschüssige Wärme wie möglich rückzugewinnen, kann der Energieverbrauch weiter reduziert werden, und in der Zukunft könnte eine Kondensationsanlage zur Rückgewinnung von Abwärme für die Energieerzeugung zur Realität werden. Eine Kondensationsanlage könnte besonders dort interessant sein, wo Wasser nur in geringem Maße zur Verfügung steht.

Abgesehen von den richtigen Rohmaterialien, liegt schließlich der Schlüssel zu einem erfolgreichen Hersteller von Weißzement nicht allein in der Auswahl der richtigen Ausrüstungen, sondern auch im Wissen und Know-how. Der Fokus auf Forschung und Entwicklung, eine engagierte Strategie und der richtige Umgang mit dem Humankapital sind in diesem Zusammenhang von immenser Bedeutung.



5 Ausbreitmaß-Test zur Qualitätskontrolle

Reduzierung der Quecksilberemissionen im Zementwerk Wietersdorf



Annett Fischer, ZKG

1 Dipl.-Ing. Florian Salzer vor dem Schlauchfilter für die Sorptionsmitteltrennung

Gemeinsam mit den Anlagenbauern Scheuch GmbH und A TEC hat das Zementwerk W&P in Wietersdorf die ExMercury entwickelt, eine Anlage zur Reduktion von Quecksilberemissionen. Wir sprachen mit Dipl.-Ing. Florian Salzer (30), Head of Technology, W&P Zement GmbH, Wietersdorf/Austria, über die Entwicklung, Ergebnisse und die Zusammenarbeit bei diesem Pilotprojekt.

ZKG: Warum haben Sie überhaupt in eine Anlage zur Reduzierung der Quecksilberemissionen investiert?

SALZER: Den bisher gültigen Grenzwert für Quecksilberemissionen von $50 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ haben wir sicher erreicht. Aber, ab 2016 gilt ein verschärfter Wert von $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ in Österreich. Uns war schon frühzeitig wichtig, dass wir die

geforderten Quecksilberemissionen auch in der Zukunft einhalten. Wir setzen Klärschlamm als einen alternativen Brennstoff ein, der als eine der Hauptquellen für Quecksilber gilt. Da wir den Zusatz dieses CO_2 -neutralen Brennstoffs eher noch verstärken wollen, haben wir bereits vor vier bis fünf Jahren angefangen, nach einer Lösung zu suchen, mit der wir die geforderten $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ sicher erreichen.

ZKG: Welche Alternativen zum nun eingesetzten ExMercury-System gab es?

SALZER: Wir wussten natürlich, dass es Möglichkeiten gibt, den anfallenden Staub auszuschleusen und den Quecksilberkreislauf damit zu entlasten. Als Erstes haben wir deshalb erst einmal unseren eigenen Quecksilberkreislauf beobachtet. Dazu haben wir sehr viele Messungen gemacht und sogar in ein eigenes Messgerät zur Quecksilberanalyse investiert, um schnell Ergebnisse zu haben. Wir haben erst einmal alle Bilanzen erstellt und uns klar gemacht, wo das Quecksilber eigentlich herkommt. Mit diesen Analysen konnten wir abklären, welche Mengen aus den Rohstoffen, in der Kohle und in den Ersatzbrennstoffen kommen. Nach der Auswertung aller Bilanzen haben wir gesehen, dass wir eine relativ große Menge an Filterstaub hätten ausschleusen müssen. Aber, man muss auch schauen, was man mit diesen Staubmengen macht. Bei uns wären diese anfallenden Staubmengen, die man kostspielig und kompliziert hätte entsorgen müssen, einfach zu groß gewesen. Also haben wir geschaut, welche Systeme es noch gibt.

Wir haben uns in dieser Sache mit Aktivkohlefestbettfiltern, die hauptsächlich in Müllverbrennungsanlagen installiert sind, beschäftigt. Eine Installation dieser Art ist sogar in einem Zementwerk in der Schweiz installiert.

Der Nachteil einer solchen Anlage ist aber, dass man außerordentlich hohe Investitions- und Betriebskosten hat, welche für uns nicht tragbar gewesen wären.

ZKG: *Warum haben Sie sich letztendlich für das ExMercury-System entschieden?*

SALZER: Wir haben in der Vergangenheit schon erfolgreich mit den Firmen Scheuch und A TEC zusammengearbeitet. Deshalb haben wir uns dann vor vier, fünf Jahren gemeinsam überlegt, wie wir die Quecksilberemission vermindern können. Daraus ist die Idee für die ExMercury-Anlage entstanden und seitdem wurde die Idee weiterentwickelt. Nachdem das Grundkonzept stand, haben wir Versuche im Werk gemacht, ob das Ganze auch so funktionieren würde. Dabei wurde abgeklärt, ob die Auswirkungen auf die Emissionen so sind, wie wir uns das vorgestellt haben und ob das langfristige Ausschleusen von Staub so möglich ist. Nach diesen ganzen Versuchen, bei denen wir das Material eine ganze Woche lang ausgeschleust haben, zeigte sich, dass wir eine starke Verminderung der Quecksilberkonzentrationen haben. Uns war nun klar, dass uns das längerfristige Ausschleusen von Material sehr viel bringt. Unsere Erwartungen, dass wir einen Wert kleiner $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ unterschreiten, wurden im Rahmen dieses Versuchs sogar übertroffen.

Der nächste Schritt war es, zu überlegen, wie wir den Quecksilberkreislauf entlasten können. Dazu haben wir umfangreiche Untersuchungen in unserem Labor gemacht. Wir haben den Staub bei verschiedenen Temperaturen im Muffelofen behandelt und immer wieder gemessen und so festgestellt, wie hoch der Staub erhitzt werden muss, um eine sichere Abscheidung zu gewährleisten. In einem Temperaturintervall zwischen 300 und 400 Grad konnte das im Staub enthaltene Quecksilber vollständig abdampfen.

Nach all diesen Untersuchungen haben wir die Anlage ausgelegt. Das große Problem war es, dass wir den Staub von den quecksilberhaltigen Abgasen abscheiden wollten. Dafür war in der benötigten Größenordnung einfach noch keine Technologie vorhanden, was den Heißgasfilter

betrifft. Natürlich gibt es die Elektrofilter, da wir aber in diesem Bereich auch ziemlich hohe CO-Konzentrationen haben, hätte das nicht funktioniert. Da der Schlauchfilter nur bis 250°C einsetzbar ist, hat sich Scheuch entschlossen, einen neuen Keramikkerzenfilter zu entwickeln, den sie vorher noch nicht gebaut haben. Ein sehr wichtiger Punkt für die Umsetzung war, dass wir durch die Förderstellen Kommunalkredit in Verbindung mit dem Umweltbundesamt und dem Umweltministerium unterstützt wurden, die das Projekt als Pilotprojekt gefördert haben. Nachdem wir den positiven Förderbescheid in der Hand hatten, haben wir uns im Sommer 2014 kurzfristig entschlossen, die Anlage so zu bauen. Der Baubeginn war dann im Oktober 2014, in Betrieb genommen haben wir die Anlage im April 2015.

ZKG: *Die Anlage läuft nun seit rund drei Monaten. Wie zufrieden sind Sie bisher damit und werden die geplanten Ziele erreicht?*

SALZER: Ich bin immer noch ganz begeistert von der Anlage. Das war wirklich ein Start-Ziel-Sieg bei diesem Projekt! Wir haben uns das ehrgeizige Ziel gesetzt, das wir bis 2017 einen Abscheidegrad von 80 % erreichen. Der Abscheidegrad ist dabei so definiert, dass wir 80 % des Quecksilbers, welches über die Roh-, Brenn-, und Einsatzbrennstoffe eingebracht werden, mit Hilfe der Anlage gezielt entfernen, d.h. auf der Aktivkohle adsorbieren. Diese 80 % haben wir aber im Durchschnitt schon innerhalb der ersten drei Monate, von Beginn an, mit den Grundeinstellungen erreicht. Natürlich gibt es auch Situationen, wo zwischendurch höhere Quecksilberkonzentrationen auftreten. Aber, es ist ja auch ein Pilot-Projekt. Hier müssen wir weiter forschen, woher das kommt und wie man Abweichungen sicher in den Griff bekommt.

ZKG: *Wie war die Zusammenarbeit mit A TEC und Scheuch bei diesem Pilotprojekt?*

SALZER: Die Zusammenarbeit mit A TEC und Scheuch war sehr gut, wir waren ein tolles Team und es haben auch die richtigen Mitarbeiter zusammen gearbeitet. Wir hatten immer sehr offene Gespräche und Diskussionen, in denen jeder sei-



W&P Zement

2 Das Werk der W&P Zement GmbH in Wietersdorf/Österreich

nen Teil beigetragen hat. Wir vom Zementwerk haben unseren bestehenden Prozess gekannt und gewusst, wo wir angreifen müssen. Scheuch war der Experte für die Filtertechnik, d. h., die haben den ganzen Teil ausgearbeitet, bei dem es um den Heißgasfilter, den Sorptionsreaktor und den Sorptionsfilter ging. A TEC ist schon seit langem unser Partner beim Pyroprozess. Gemeinsam mit A TEC haben schon andere Projekte durchgeführt, bei denen Heißgas oder Gasteilströme aus dem System abgezogen werden mussten. Die haben also schon gewusst, wie das funktioniert.

So haben wir alle zusammen das Konzept ausgearbeitet und dann auch ohne Verzögerungen durchgezogen und den Zeitplan eingehalten. Es hat keine Probleme gegeben, nicht beim Equipment und auch nicht bei dessen Lieferung. Wir mussten keine nennenswerten Nachbesserungen an der Anlage machen, was sonst ja oft normal ist. Unser großer Vorteil war sicher, dass wir die letzten vier, fünf Jahre Zeit gehabt hatten, das Projekt zu verfeinern. Es war schon ein bisschen ein Abenteuer, weil es keiner vorher gemacht hat. Wir haben uns vorher so intensiv damit befasst, dass wir unsere Gesellschafter davon überzeugen konnten, die Investition freizugeben – und, es hat ja auch geklappt. Jetzt, im Dauerbetrieb läuft die Anlage ohne größere Probleme. Natürlich können auch Probleme auftreten, die wir heute noch nicht kennen. Dafür betreiben wir ja das Forschungsprojekt, in dem

wir in den nächsten 1,5 Jahren noch weitere Erkenntnisse sammeln und das System auch weiter optimieren wollen.

ZKG: Welche weiteren Optimierungsmöglichkeiten im Werk Wietersdorf stehen nun auf Ihrer Agenda?

SALZER: Es kommen immer wieder neue Herausforderungen auf uns zu. Wir verfolgen das ehrgeizige Ziel, den Anteil alternativer Brennstoffe auf 100 % zu erhöhen. Die gemeinsam mit A TEC entwickelte Rocket Mill zum Zerkleinern von hochwertigen Kunststoffen ist inzwischen schon wieder zu klein geworden, hier müssen wir in eine größere Anlage investieren. Außerdem müssen wir den Chlorbypass erweitern.

Mit der Quecksilberabscheidung haben wir nun eine Aufgabe gelöst, die uns hier Sicherheit für die Zukunft gibt. Wir fahren heute bereits Werte, die unter den ab 2016 geforderten 30 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ liegen. Nun versuchen wir, das Maximale aus der Anlage heraus zu holen. Inzwischen liegen uns Daten zum Betriebsmittelverbrauch vor und damit sind wir auch sehr zufrieden. Wir werden ungefähr 20 t Herdofenkoks pro Jahr verbrauchen. Das sind nicht nur geringe Einsatz-, sondern auch Entsorgungsmengen, da die verbrauchte Kohle entsorgt werden muss.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit sehen wir darin, den Herdofenkoks zu recyceln. Hier wollen wir mit Firmen zusammenarbeiten,

die den Koks aufbereiten und das Quecksilber als Wertstoff gewinnen. Solche Unternehmen gibt es sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz und mit denen sind wir derzeit in Kontakt. Unser Ziel ist es, die Aktivkohle wieder zurückzugewinnen zu können und nichts deponieren zu müssen. Aber wir wollen auch die Anlage weiter optimieren. Sie läuft zwar derzeit mit dem Herdofenkoks mit relativ geringen Betriebskosten. Zukünftig möchten wir aber lieber ein anorganisches Adsorptionsmittel verwenden. Die Anlage soll für zukünftige Anwendungen auch kleiner und günstiger in den Baukosten werden, um sie weltweit einsetzen zu können. Wenn man keinen Herdofenkoks mehr verwenden muss, fällt natürlich auch der ganze Explosionsschutz weg. Das würde das System nicht nur kostengünstiger, sondern auch sicherer machen.

In einem weiteren Forschungsvorhaben, welches wir gemeinsam mit der Montanuniversität Leoben und den anderen Projektpartnern betreiben und das zusätzlich von der FFG unterstützt wird, fahren wir Versuchsreihen und testen anorganische Adsorptionsmittel.

ZKG: Welche zusätzliche Manpower wird für den Betrieb der ExMercury-Anlage benötigt?

SALZER: Die Anlage läuft vollautomatisch und fährt komplett selbstständig hoch und runter, es ist fast kein Eingriff durch Bedienpersonal nötig. Das heißt, dass unsere Mitarbeiter fast keine zusätzliche Belastung haben. Ein Arbeitsaufwand stellt lediglich das Nachfüllen der Aktivkohle und das Abfüllen der gebrauchten Kohle dar. Das ist ein Zusatzaufwand von ca. 2 bis 3 h/Woche.

Wichtig bei der Umsetzung war es auch, dass W&P ein sehr gut ausgerüstetes Labor mit qualifizierten Mitarbeitern hat. Das Projekt konnte nur umgesetzt werden, weil wir in eigene Analysen-

technik für die Quecksilberbestimmung investiert haben. So konnten wir selbst in Echtzeit messen, 3 x 5 Proben täglich. Das wäre mit einem Fremdlabor so nicht machbar gewesen. Auch jetzt analysieren wir im Rahmen einer kontinuierlichen Überwachung noch 5 Proben täglich.

ZKG: Wie haben Sie Ihre Mitarbeiter im Umgang mit den quecksilberhaltigen Abfällen geschult?

SALZER: Wir haben uns intensiv mit dem Umgang von quecksilberhaltigen Abfällen zum Schutz unserer Mitarbeiter beschäftigt. Wir haben diese und auch den Betriebsarzt frühzeitig in den Entscheidungsprozess integriert. Unser Ziel war es von Anfang an, Vertrauen zu schaffen. Dazu haben wir unsere Mitarbeiter nicht nur informiert, sondern auch geschult, z. B. hinsichtlich des Einsatzes der persönlichen Schutzausrüstung. Es wurden Verfahrensanweisungen erarbeitet und den Mitarbeitern erläutert, wie die Anlage funktioniert und welches Gefahrenrisiko besteht.

Aber nicht nur der offene Umgang mit unseren Mitarbeitern ist uns wichtig. Wir informieren auch die Bevölkerung im Rahmen des „gläsernen Werkes“ über unsere Emissionswerte.

Wir sind offen für Fragen und auch bereit, diese Anlage unseren Kollegen aus anderen Zementwerken zu zeigen. Wir haben gemeinsam mit unseren Partnern Scheuch und A TEC ein Interesse daran, diese Technologie nach außen zu tragen. Wir wollen und können damit einen wertvollen Beitrag leisten, die Quecksilber-Emissionen weltweit zu reduzieren.

ZKG: Herr Salzer, wir bedanken uns für das informative Gespräch und wünschen Ihnen viel Erfolg bei Ihren weiteren Optimierungsarbeiten.

www.umwelt.wup.at

Vita Florian Salzer

2005 nach dem Abitur ein Jahr Praktikant in Wietersdorf, Mitarbeit am Projekt Wärmetauscher
2006–2010 Duales Studium in Graz, mit Unterstützung von W&P
2010–2012 Projektleiter im Zementwerk Peggau
2012–2015 Verantwortlicher Projektleiter für Wietersdorf und Peggau
seit 3/2015 Head of Technology für Geschäftsfelder Zement/Beton und Kalk



Due to the current trend of maximizing the substitution rates of alternative fuels, whilst emission regulations are being made more restrictive, the cement industry is facing a new challenge with minimization of a special pollutant. Mercury emissions have been identified as being caused by alternative fuels or contaminated raw materials and require an abatement system downstream of the pyroprocess. With the new ExMercury system, the consortium of A TEC, W&P Zement and Scheuch, has set up an effective solution combining a high emission reduction of up to 80 % with minimized operating and investment costs. This article also reviews briefly the basic mechanisms of the formation and reduction of Hg in the pyroprocess.

TEXT Dr. Stefan Kern¹, Dipl.-Ing. Florian Salzer², Dipl.-Ing. Holger Reinhold³

¹ A TEC Production and Services GmbH, Gödersdorf/Austria

² W&P Zement GmbH, Wietersdorf/Austria

³ Process Technology Industrial Minerals, Scheuch GmbH, Auroolzminster/Austria

The integrated cement production plant with its five stage precalciner plant from W&P Zement in Wietersdorf/Austria

[A TEC/W&P ZEMENT/SCHEUCH](#)

Breaking the mercury cycle for emission abatement with the “ExMercury – Splitted Preheater System”

1 Introduction

The reduction of anthropogenic mercury emissions is of great interest, especially since it was agreed at the Minamata convention in 2013 which provided a basis for a worldwide reduction of mercury emissions [1]. Mercury is classified as a pollutant due to its toxicity and due to its physical properties as it forms a cycle in the atmosphere, leads to bioaccumulation and therefore

enters the food chain. Therefore the focus is set on a limitation in the emission of this element.

The cement industry has been identified as second largest gaseous emission source of mercury just behind the conventional combustion of coal in thermal power and heating plants as well as in heating systems [2]. The limitation of mercury emissions in the cement industry is regulated nationally and therefore

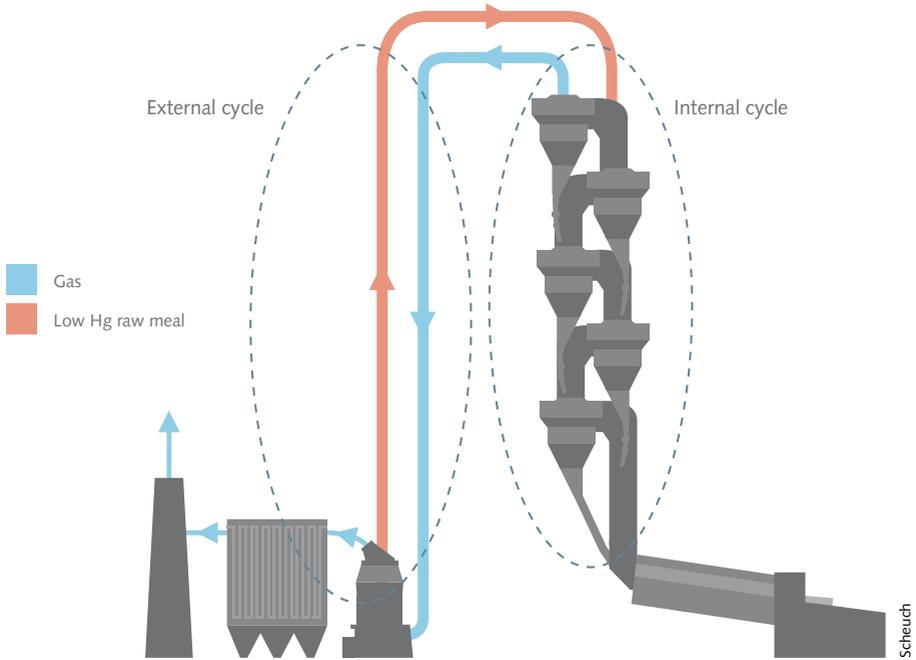


different limits between countries are valid. The most common limits are between $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ and $50 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (referred to 10% O_2). However some countries issued even stricter limits for the cement industry, like Germany, which is even more generous with $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, compared to the USA. In the USA, a new regulation will come into force during September 2015 which differs between existing (before 2005) and new or reconstructed plants where the first will be allowed to emit $55 \text{ lb}/\text{Mt}_{\text{clinker}}$ and the latter only $21 \text{ lb}/\text{Mt}_{\text{clinker}}$ (which is approx. $10 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ and $4 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, respectively) [3, 4].

To provide an impression of the importance of these values, a prior study analyzed the mercury emissions of 44 cement kilns in Germany and it turned out that most of the mercury emissions were below $40 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, only six kilns were higher than or equal to $60 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ [5]. This

impressively shows that already with the new German limitation an active reduction of the mercury emissions in the cement plants will be necessary in the respective cases. Based on these numbers, the situation in the USA will be even more challenging to meet the limits.

As the reduction of mercury emissions in the cement industry is either linked to high operating costs for fuel and raw material cleaning, flue gas sorbents, or investment costs for flue gas treatment systems, it has been decided to propose a new system combining low investment costs as well as lowest operating costs and minimized ecological footprint. The system, called ExMercury, described here, has been developed by the pyro-processing specialist, A TEC Production & Services GmbH, the filter specialist, Scheuch GmbH, and the cement manufacturer W&P Zement GmbH with its cement plant in Wietersdorf/Austria.



1 Typical diagram of a dry cement clinker production process highlighting internal and external cycle

2 Theoretical background and methods for mercury abatement

The cement clinker production process is mainly characterized by the preparation of the raw materials in the raw mill and the subsequent burning process in the pyrosection of the process, which consists of a rotary kiln where the sintering process takes place at material temperatures of 1450 °C. Depending on any separate upstream preheating and precalcining step, the plant process can differ as being wet, semi-wet, semi-dry and dry. As about 78% of Europe’s cement plants are operated according to the dry process, this process type is considered here [6].

Figure 1 shows a typical diagram of a dry cement clinker production process. In the pyroprocess itself, the temperatures of gases (combustion air and exhaust gas) and solid materials (raw materials, dust, clinker) have a very wide range from about 2000 °C (kiln burner flame), down to around 120 °C (Filter). The counter current flow

of flue gas and fresh raw material which mainly consists of CaCO₃ and CaO at zones of higher temperatures causes the simultaneous effect that acid gases such as SO₂, HCl, or HF [6] can be captured in the solids and do not leave the stack as emissions [7]. This basic principle can also be found for other species which can condense at lower temperatures at the solid particles. Two effects have to be mentioned by this process configuration, which are an internal cycle and an external cycle.

The internal cycle deals with the effect that volatile inorganic material might evaporate at the high temperatures in the hot kiln region and get condensed/adsorbed at zones in the preheater where lower temperatures than the evaporation temperature of the species apply. By the material flow, the condensed particles are recycled to the hot region where these components evaporate, at least partially, again, forming the internal cycle. Well known com-

ponents for this cycle are chlorine, sulphur and alkaline components, but also heavy metals can be found here.

The external cycle is built up downstream of the pyroprocess, from the flue gas point of view. This mass flow includes the raw mill, the filter, the raw meal silo and the pyroprocess. Some volatile species might condense at the temperatures present in this area and end up in the filter dust as cement kiln dust (CKD). The CKD is often blended to the raw meal, which leads to the reintroduction of the condensed species in the process and therefore the external cycle is closed. Typical species for being adsorbed in the external cycle are NH_3 and heavy metals.

A further difference coming from the operation mode of the raw mill is if the raw mill is on (compound mode) or off (direct mode). In the compound mode, the potential for the adsorption of the species mentioned above is higher due to the lower final exhaust gas temperatures and the increased load of the gas flow with fresh raw material as sorbent. In direct mode the pollutants adsorb on the CKD only and the final exhaust gas temperature at the filter inlet might be higher. Due to the fact that the plants mainly operate in the compound mode (80–90%) [8], this mode will be considered for the explanations here.

Mercury is introduced by the raw materials and/or the fuels for cement production. Especially alternative fuels can be the source of increased values of mercury [9–12]. Mercury emissions are a complex topic due to the wide range of mercury compounds that can be formed in the process. Beside elemental mercury, it can be released from the combustion process as particle-bound mercury (adsorbed) or oxidized as Hg^{2+} . Here the oxidized mercury contains the range of various compounds of mercury with other elements that are present in the process. Their formation depends mainly on the operating conditions and the compounds present in the pyroprocess as well as the cooling step (quenching speed and time) [7]. The different temperatures of melting, boiling and sublimation can be found in **Table 1**.

Mercury is a species which affects the process of the internal as well as the external cycle as shown in **Figure 2**. As explained above, mercury can be introduced by the fuels or the raw materials. In the pyrosection both sources evaporate and condense again in the raw mill or kiln filter. Therefore the highest concentration of mercury can be found in the cycle between kiln meal silo and the pyroprocess. If the dust cycle is highly loaded with mercury or if the temperature prior to the main filter is too high,

Tab. 1 Temperatures of melting, evaporation and sublimation for different Hg species [13, 14]

Formula	Melting point [°C]	Boiling point [°C]	Decomposition/Sublimation temperature [°C]
Hg(0)	-39	357	n.a.
Hg ₂ Cl ₂	525	n.a.	383
HgCl ₂	277	302	n.a.
Hg ₂ SO ₄	n.a.	n.a.	n.a.
HgS	n.a.	446-583	580
HgO	n.a.	356	500
Hg ₂ Br ₂	405	n.a.	340–350
HgBr ₂	237	322	n.a.
Hg ₂ I ₂	n.a.	n.a.	140
HgI ₂	259	350	n.a.
Hg ₂ F ₂	n.a.	n.a.	570
HgF ₂	645	650	645
Hg ₂ (NO ₃) ₂	n.a.	n.a.	70
Hg(NO ₃) ₂	79	n.a.	n.a.

PROCESS

the mercury cannot be adsorbed or condensed at the dust in a sufficient way and mercury emissions occur.

Several mass balance studies showed that the controlled removal, even partial, of CKD from the system leads to an unloading of the cycle between kiln meal silo and pyroprocess, ending up with reduced mercury emissions.

A reduction of mercury emissions by changing the raw material is almost impossible as in most of the cases of cement plants, the plant is built near the quarry and long transport of raw material is unattractive. Switching fuel is also not a satisfactory goal as particularly alternative fuels are favored to reduce fuel costs. Therefore in most of the cases a strategy for flue gas treatment has to be chosen.

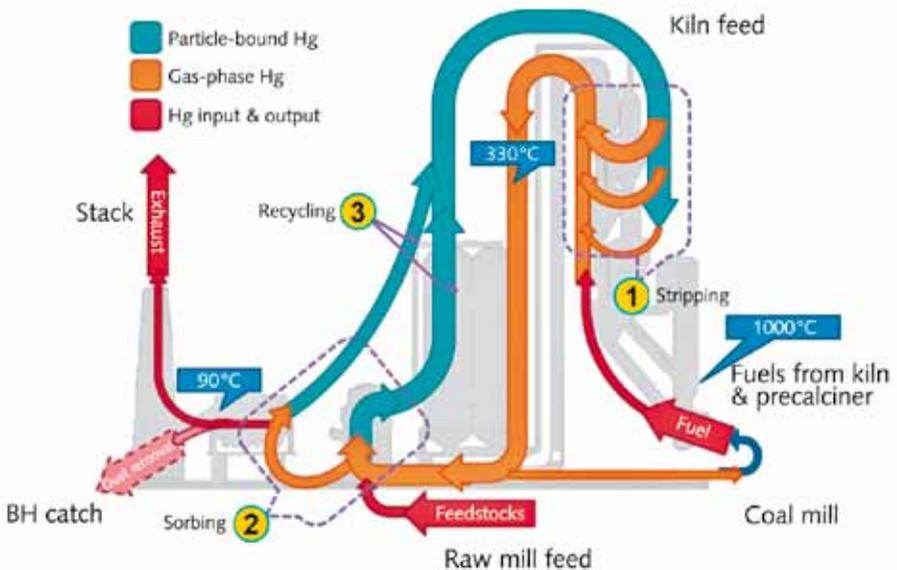
Beside the method of a subsequent activated carbon filter and the injection of activated carbon before the main filter, which both use large amounts of activated carbon, dust shuttling to unload the cycle turned out to be a suitable way. The disadvantage here is that depending on the mercury input, huge amounts of dust have to be

removed from the system coming with the drawbacks of missing raw materials and a logistic problem to get rid of the dust.

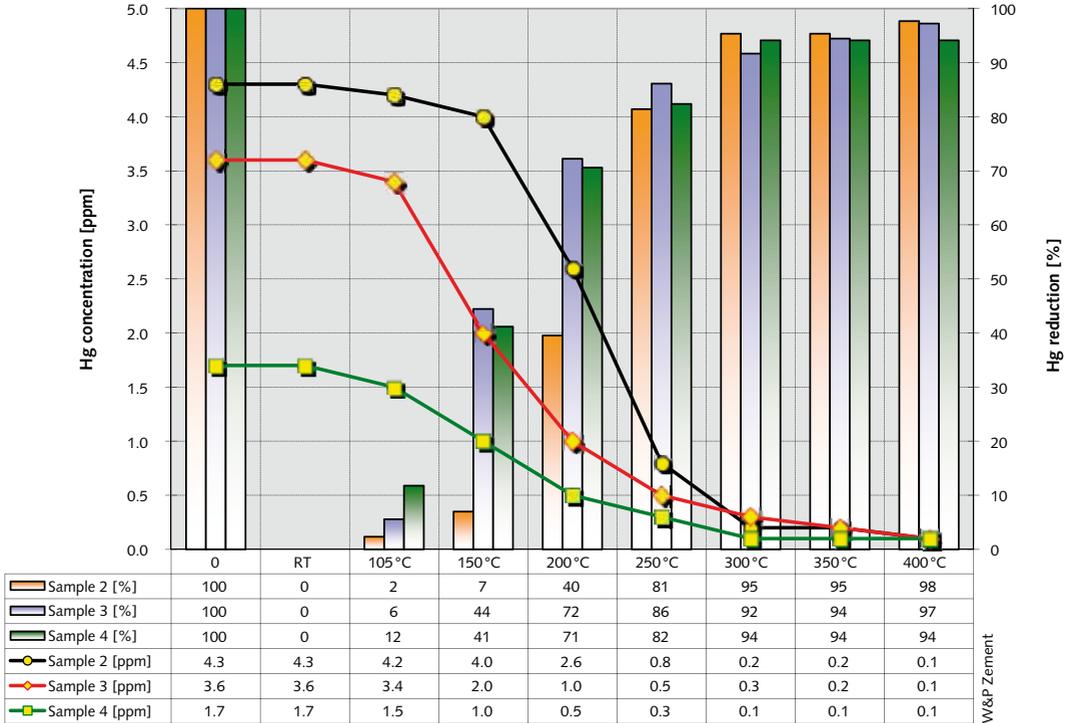
The solution to this has been found in the ExMercury system described here as it unloads the mercury cycle in the system and further removes the mercury from the dust to allow a reintroduction of the CKD in the pyroprocess.

3 The cement plant of W&P in Wietersdorf/Austria

The cement production at W&P in Wietersdorf/Austria has quite a long history as it was established in 1893. In more recent times, the plant was modernized and an essential part was the conversion of the pyroprocess from a Lepol system to a five stage precalciner plant. The utilization of alternative fuels is very high, reaching thermal substitution rates of about 85% in typical operation. Furthermore alternative raw materials are partly used. This new preheater, including the in-line precalciner as well as the bypass system went in operation in 2005 and was designed and supplied by A TEC.



2 Mercury pathways in the cement production pyroprocess [15]



3 Results of the thermal treatment tests of filter dust focusing on the evaporation, and therefore reduction, of Hg

4 Fact finding for the process design of the pilot plant in Wietersdorf

To gain knowledge about the mercury cycle in the plant, a balance of the system with a focus on mercury was accomplished. The main finding was that the internal cycle of mercury was 19 times as high as the input where the CKD already contained already 11 times the fraction of Hg of the input. The results were gaseous mercury emissions of 39 µg/Nm³ at the stack.

In a second campaign the whole amount of CKD was removed (dust shuttling) and already after about three days of dust shuttling the internal cycle was reduced to the factor of 5.5 (of the mercury input). The result was a reduction of the mercury emissions down to 10 µg/Nm³.

This test showed the high potential of dust shuttling. The problem which arose was the high amount of dust which is lost and should

be handled. Therefore the aim was a high re-utilization of the dust and a small fraction of Hg loaded material.

Heating tests of the kiln dust (Figure 3) showed that the evaporation of the total mercury reaches a high level at temperatures above 300 °C. Based on these results, it was decided to plan a thermal treatment of the dust to remove Hg from the CKD with the aim to reintroduce the clean dust in the system. The gaseous mercury should be bound to a low amount of sorbent.

5 The ATEC/Scheuch/W&P ExMercury system

Based on the investigation described before, the ExMercury system was designed as a “splitted preheater” with the following function shown in the basic principle in Figure 4. The kiln filter dust is heated up by hot combustion flue gas, which is withdrawn from the lowest cyclone stage. In

PROCESS

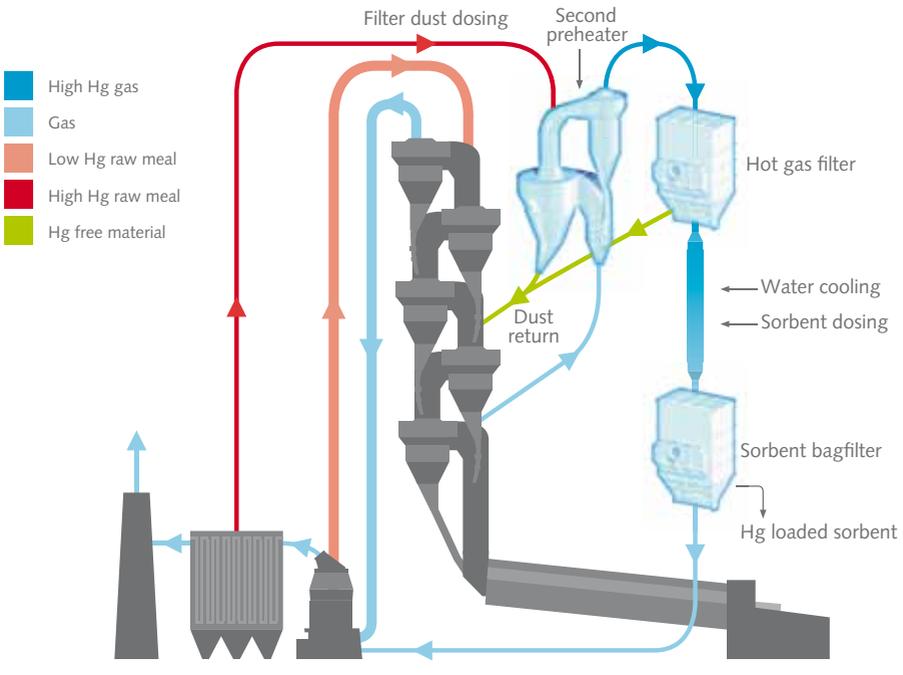
this second preheater line, the kiln filter dust is heated up to the required temperature examined in the tests before (Figure 3) to evaporate the mercury. By several cyclones, the hot dust is separated and returned to cyclone stage three of the preheater tower. After the cyclones, a hot gas filter using ceramic filter candles removes any fine particles which are returned similar as the particles from the cyclones to the preheater while the mercury is still gaseous.

The particle free mercury loaded gas stream is rapidly quenched by water injection in the quenching reactor where simultaneously activated carbon or any other sorbent (e.g. lignite coke) is injected where the mercury is captured. Subsequently to this step a bag filter separates the sorbent. The sorbent can be recycled in the system until the mercury load is too high and mercury is detected after the filter which removes the sorbent. This allows a maximum uti-

lization of the sorbent and leads to minimized sorbent consumption. Another safety aspect to avoid any mercury emissions at the stack is that the mercury free gas is added to the main gas stream prior to the raw material mill.

6 First operational results of the system in Wietersdorf

The ExMercury system installed in the cement plant in Wietersdorf was commissioned at the beginning of 2015. Impressions of the installation can be seen in Figures 5–8. It was started with values of mass and volume flow rates and temperatures, which means a filter dust input of 5–7 t/h and heating up to a temperature of max. 400 °C. The gas withdrawal from preheater stage 5 is approx. 3–5% of the total gas flow in the pyro-process. Analysis of the Hg content of the dust particles shows impressively the function of the system as described below.



4 The ExMercury splitted preheater system implemented in the existing system



W&P Zement

5 View of the second preheater line ductwork (between stack and downcomer duct)



W&P Zement

6 Cooling duct and bag filter for sorbent separation

The input concentration on the filter dust was up to 10 ppm of Hg what means 100% of mercury input into the ExMercury system. Measurements showed that after evaporation in the second preheater line approx. 90–95% of the mercury load will still be in the gaseous phase after the cyclones and the hot gas filter. The particles separated in the cyclones and the hot gas filter and returned to the preheater at the elevated temperature contained the rest of the mercury load.

Although the difference in the Hg concentration of the dust separated in the cyclones (0.05–0.2 ppm) and in the hot gas filter (0.25–0.5 ppm) is only minimal, the slightly increased concentration of mercury on the filter dust can be attributed to two main mechanisms. The main reason is that the temperature dropped towards the filter slightly and a few mercury compounds already re-condensed and secondly as there the particle size can be expected to be much smaller, the increased specific surface of the particles allows in general higher concentrations. However consid-

ring the mass flow rates separated in the cyclones and in the hot gas filter, this effect will not influence the balance of the system very much.

Subsequently to the hot gas filter, the pure gas stream transporting the gaseous mercury is cooled by water injection in the cooling reactor (which is located between the hot gas filter and the bag filter for sorbent separation) to about 100–120 °C. In this section the sorbent for mercury adsorption is injected. The system is designed to handle organic as well as inorganic sorbents. Currently lignite char is used due to the lower price compared to activated carbon or brominated activated carbon. It has been found out that the lignite char can be loaded with Hg to an extraordinary high level without any problems. To keep this level, the sorbent is replaced in a low amount continuously with a rate of less than 50 kg per day. Consequently, this leads to a yearly consumption of this sorbent of only up to 20 t/a.

Even the consumption of fresh additive is at a low level, the removal efficiency of the

PROCESS

ExMercury system is more than 90% and the mercury emissions at stack were reduced up to 80%.

The cleaned gas after the bag filter is added before the raw mill to use the main stack. The Hg content in the gas is monitored to influence the extraction rate of the sorbent. Any residual Hg emissions from the ExMercury system if they occur are scrubbed in the raw mill.

Having also a short look at the energy and heat consumption of the system, it soon becomes clear that the removed gas and heat from cyclone stage 5 does not lead to an increased heat consumption of the overall system. As the

dust is heated up and returned hot to the pyroprocess. It is just a different way of feeding to the system. Instead of feeding a blend of CKD and raw meal conventionally, the dust is fed separately in this “splitted preheater”. The residual gas temperature after particle separation in the cyclones and the hot gas filter is about 360 °C which is not significantly different from the preheater top stage exit temperature. Therefore, the overall heat balance of the system remains unchanged. Operating costs occur only due to the fan which drives the system and the small drives of the dust conveying system.



7 Partly visible cyclones for separation of the heated dust particles after the thermal treatment in the second preheater line



8 Sorbent extraction system

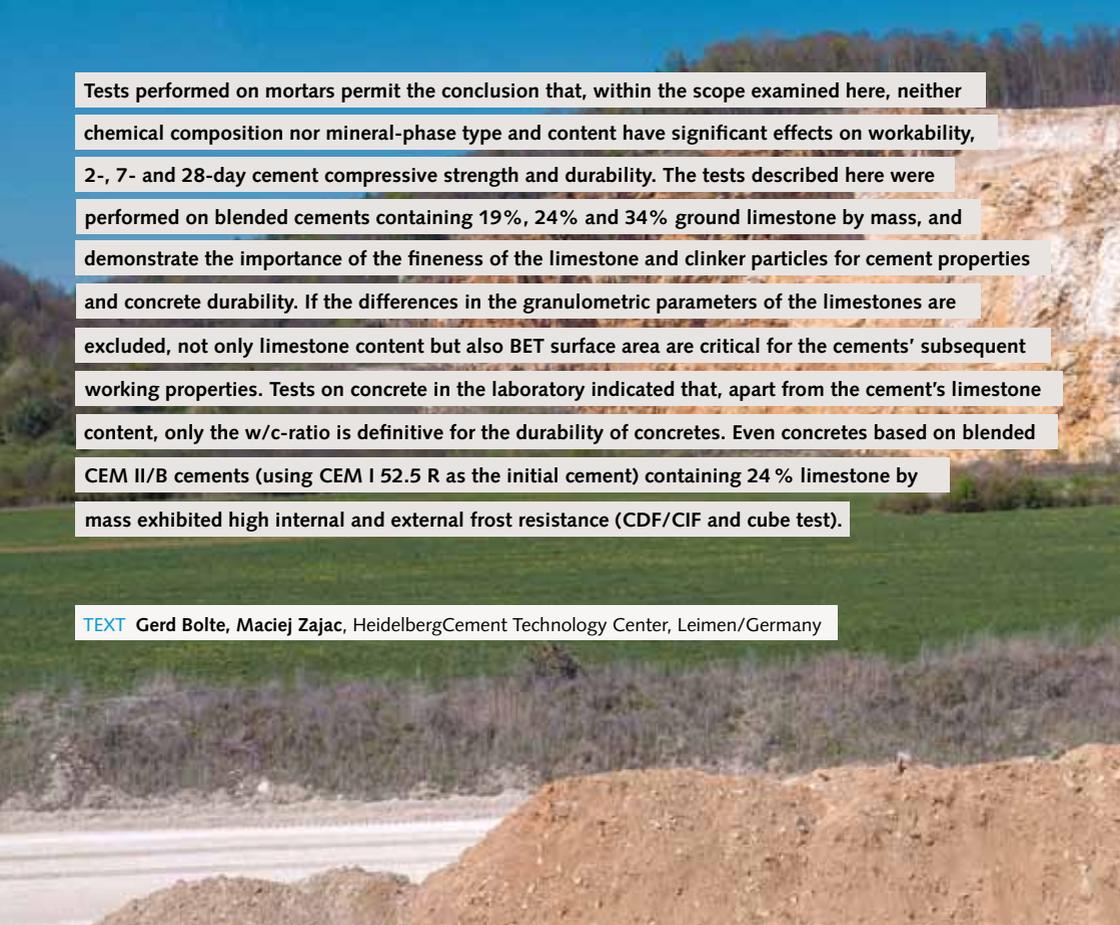
7 Future outlook

As the system is operated now a comparably short period any mainly with a high Hg content in the dust, the main goal is to gain long-term experience about the reduction potential of Hg emissions. Operational testing campaigns are planned to obtain information about the sys-

tem concerning the influence of the temperatures in the system on the mercury evaporation and sorption. Therefore a temperature variation is planned and the test of different sorption materials, such as activated carbon, brominated activated carbon and potential inorganic sorbents.

REFERENCES

- [1] Minamata Convention on Mercury, Annex I, "Resolution on arrangements in the interim period", Nr. 10
- [2] Global Mercury Assessment 2013: Sources, emissions, releases, and environmental transport, United Nations Environment Programme (UNEP), 2013
- [3] Edwards, P.: Global cement emission standards, *Global Cement*, March 2014, pp. 28–31
- [4] U.S. EPA. Fact sheet, final amendments to national air toxics emission standards and new source performance standards for Portland cement manufacturing, 2010
- [5] German Cement Works Association. Activity report 1999-2001; 2001
- [6] CEMBUREAU, The European Cement association, Best available technologies for the cement industry, 1999
- [7] Zheng, Y.; Jensen, A.D.; Windelin, C.; Jensen, F.: Review of technologies for mercury removal from flue gas from cement production processes, *Progress in Energy and Combustion Science* 38, 2012, pp. 599–629
- [8] Department of Environmental Quality State of Oregon. Ash grove mercury reduction, advisory committee's report, 2007
- [9] Hills, L.M.; Stevenson, R.W.: Mercury and lead content in raw materials. PCA R&D Serial No. 2888, 2006
- [10] Sprung, S.; Rechenberg, W.: Levels of heavy metals in clinker and cement, *Zement-Kalk-Gips*, 1998, 47, 183
- [11] Fyttili, D.; Zabaniotou, A.: Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12, pp. 116–140
- [12] Åmand, L.E.; Leckner, B.: Metal emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in fluidized bed, *Fuel*, 2004, 83, pp. 1803-1821
- [13] Perry, R.H.; Green, D.W.; Maloney, J.O., (editors): *Perry's chemical engineers' handbook*, 7th ed. The McGraw-Hill Companies Inc., 1997
- [14] Wikipedia. Category: mercury compounds, http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Mercury_compounds
- [15] Sikkema, J.K.: Fate and transport of mercury in Portland cement manufacturing facilities, Graduate Theses and Dissertation, Iowa State University, USA, 2011, Paper 11907



Tests performed on mortars permit the conclusion that, within the scope examined here, neither chemical composition nor mineral-phase type and content have significant effects on workability, 2-, 7- and 28-day cement compressive strength and durability. The tests described here were performed on blended cements containing 19%, 24% and 34% ground limestone by mass, and demonstrate the importance of the fineness of the limestone and clinker particles for cement properties and concrete durability. If the differences in the granulometric parameters of the limestones are excluded, not only limestone content but also BET surface area are critical for the cements' subsequent working properties. Tests on concrete in the laboratory indicated that, apart from the cement's limestone content, only the w/c-ratio is definitive for the durability of concretes. Even concretes based on blended CEM II/B cements (using CEM I 52.5 R as the initial cement) containing 24 % limestone by mass exhibited high internal and external frost resistance (CDF/CIF and cube test).

TEXT Gerd Bolte, Maciej Zajac, HeidelbergCement Technology Center, Leimen/Germany

HEIDELBERGCEMENT TECHNOLOGY CENTER

Limestone requirements for high-limestone cements

1 Introduction

Among endeavours for reduction of climate-relevant CO₂ emissions in the cement industry, particular importance is attached to the replacement of Portland cement clinker by other main constituents. Around the globe, only fly ash and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) are currently available in significant quantities. Both of these materials are by-products, and are subject to significant cyclical economic and

seasonal fluctuations, unlike limestone, which is available in adequate quantities at numerous locations.

Natural occurring limestone is a non-homogeneous mixture of a range of different minerals. The European cement standard EN 197, Part 1, therefore specifies certain minimum requirements for limestones for the production of Portland limestone cement:

» CaCO₃ ≥ 75% by mass



All HeidelbergCement

Within certain limits, these extremely fine limestone particles can increase packing density and thus workability and durability. Optimisation of packing density is a complex process, however, and depends inter alia on parameters such as cement fineness and ground limestone volume.

Calcite can, in addition, react in small amounts with the aluminates from the clinker, forming carboaluminates [3], which subsequently enhance the stability of the ettringite. At high limestone contents, the dilution of the reactive clinker content predominates, however. Giergiczny [4] shows, by way of example, the loss of strength as limestone content rises. Locher describes, in [5], a limestone content of approx. 15% by mass as the limit for joint grinding. Up to this content, it is possible to compensate for the fall in compressive strength by means of finer grinding of the Portland limestone cement.

Only relatively few studies documenting the properties of Portland limestone cements as a function of limestone quality are available [6].

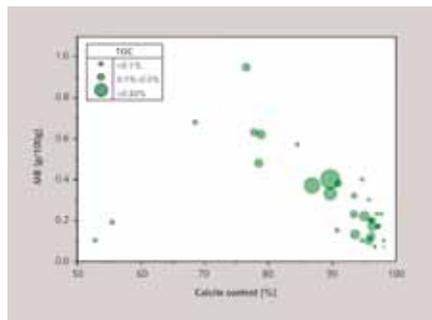
2 Performance of tests

Thirty-two limestone specimens from twenty-four different deposits were firstly dried at 105 °C. A representative subset was ground in a vibratory disc mill to approx. 5000 cm²/g for the subsequent analyses. Figure 1 shows the differences here compared to the requirements of EN 197. Not only these normative requirements,

- » Clay content ≤ 1.2 g/100 g, measured using the methylene blue adsorption method
- » Organic carbon (TOC) ≤ 0.2% by mass for Type LL limestone and ≤ 0.5% by mass for Type L limestone

European cement standard EN 197, Part 1, permits the use of 5 to 35% by mass of limestone in Portland limestone cements (CEMII/A-L, -LL and CEM II/B-L, -LL).

The addition of up to 5% by mass as a minor constituent to all other cements is also possible. Limestone as a minor constituent is generally ground together with the clinker and possesses a lower hardness than Portland cement clinker, and therefore accumulates in the fines fraction [1, 2].



1 CaCO₃ contents, clay content (methylene blue adsorption) and organic carbon (TOC) in the limestones used

MATERIALS

Material		OPC-A1	OPC-B1	OPC-B2	OPC-B3	OPC-B4	OPC-C1	PLC-D1
Blaine	[cm ² /g]	5840	3080	3960	4630	6480	5130	7160
LoI	[%]	1.1	3.1	3.4	3.0	2.4	1.2	11.2
SiO ₂	[%]	19.6	19.2	19.0	19.1	19.1	20.0	16.5
Al ₂ O ₃	[%]	5.8	5.3	5.2	5.5	5.4	5.4	4.8
Fe ₂ O ₃	[%]	3.6	2.9	3.1	2.9	2.9	3.3	2.4
CaO	[%]	61.2	62.0	62.1	61.7	62.9	61.8	58.6
MgO	[%]	1.8	2.1	2.1	2.2	2.8	3.2	2.0
Na ₂ O equ.	[%]	1.0	0.8	0.8	0.8	0.6	1.0	0.5
SO ₃	[%]	3.6	3.1	3.2	3.4	3.4	3.3	3.1

Table 1 Portland cement

but also other parameters were analysed, such as BET surface area, for example, as a measure of the external and the internal surface area of the ground limestone.

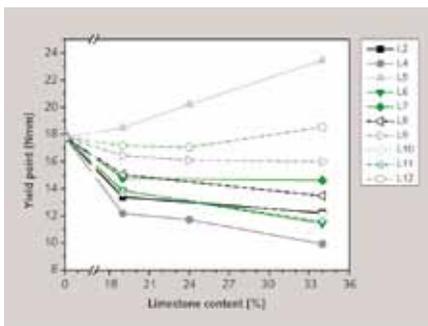
Ten limestones were separately ground by way of example in a laboratory-scale mill and mixed with works-ground Portland cement, in order to determine their influence on the most important cement properties. This cement was specially produced for this purpose without any addition of minor constituents (OPC-A1).

The particle-size distribution of the ground limestone must approximate as closely as possible the particle-distribution curve of the Portland cement used in order to reduce as far as possible the potential effects arising from a change in the particle-size distribution of the blended cement. The limestones were therefore ground for 20 mi-

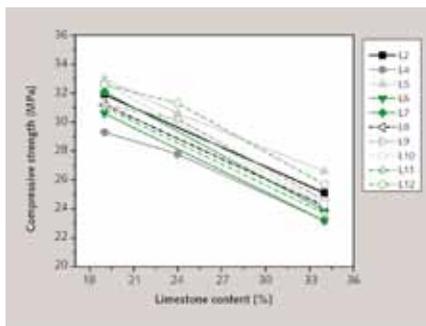
nutes in a laboratory ball mill. The particles of > 90 µm screened out were subsequently also ground for a further 15 minutes and then homogeneously mixed with the screen underflow.

The Portland cement : ground limestone mixing ratios were selected to accordance with the limits stated in EN 197: 19% and 34% by mass. Four limestones were additionally tested at a rate of 24% by mass. The sulphate content of the blended cements was adjusted to a constant 3.0% via the addition of a separately refined calcium sulphate anhydrite.

A second series of tests illustrates the influence of clinker fineness via the combination of a ground limestone (L2) with four Portland cements from one production facility, which differ essentially in their fineness (OPC-B1, -B2, -B3 and -B4).



2 Yield point of a mortar (EN 196-1) at an age of 8 minutes as a function of limestone content



3 Compressive strength (EN 196-1) after 2 days as a function of limestone content (βDF2 OPC-A1 = 40.4 MPa)

Material		L2	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L2-G
CaCO ₃	[%]	96.0	98.2	78.7	97.5	68.7	93.9	87.3	93.5	67.1	80.5	97.3
MB	[g/100g]	0.27	0.07	0.80	0.80	0.80	0.20	0.50	0.40	0.13	0.20	0.15
TOC	[%]	0.02	0.01	0.09	0.02	0.04	0.08	0.08	0.43	0.03	0.07	0.01
Lol	[%]	42.9	43.6	35.8	43.6	32.2	42.9	39.5	42.7	24.9	37.1	43.4
SiO ₂	[%]	1.8	0.3	14.9	0.5	22.0	1.2	5.7	2.4	21.1	9.4	0.7
Al ₂ O ₃	[%]	0.4	0.1	2.5	0.2	2.8	0.5	1.9	0.6	6.3	3.7	0.3
Fe ₂ O ₃	[%]	0.1	0.1	0.9	0.2	1.2	1.1	1.0	0.2	2.8	1.3	0.1
CaO	[%]	53.8	55.0	44.1	54.6	38.5	42.6	48.9	52.4	37.6	45.1	54.5
MgO	[%]	0.3	0.3	0.5	0.4	1.3	0.6	1.0	0.6	2.7	1.1	0.3
SO ₃	[%]	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.2	0.4	0.9	0.3	1.5	0.6	<0.1
BET	[m ² /g]	2.6	1.1	8.1	2.1	6.6	3.6	5.5	2.5	2.7	6.2	1.6

Table 2 Limestones

The third series of tests compares two ground limestones of differing fineness but identical composition (L2, L2-G) in combination with a Portland cement (OPC-C1). Finally, a Portland limestone cement (PLC-D1) with a limestone content of 28% by mass produced using joint grinding was tested with varying w/c ratios.

The individual results for the Portland cement and the limestone are shown in Table 1 and Table 2.

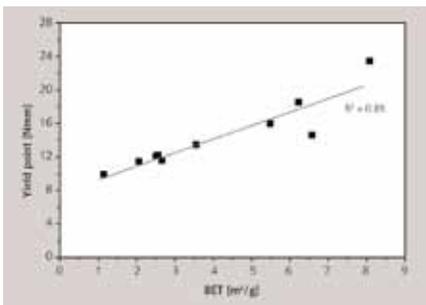
3 Results and discussion

3.1 The influence of limestone quality

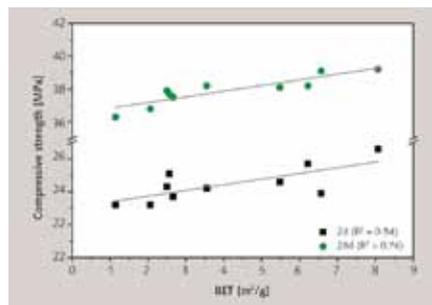
The yield point of a mortar was selected as the criterion for assessment of working properties. The yield point of the Portland cement used was

18 Nmm. In this test apparatus, the decrease in the reactive clinker particles did not, in principle, result in an improvement in working properties. The influence of the limestone on the yield point becomes more and more pronounced as limestone input increases (Figure 2). As expected, the decrease in the reactive clinker particles results in a reduction in compressive strengths (Figure 3).

The BET surface area of the prepared ground limestones was identified in this study as a critical factor for performance properties (Figure 4). With approximately identical fineness and particle distribution in the feed materials, the workability of the resultant blended cements declines significantly as the BET surface area of the

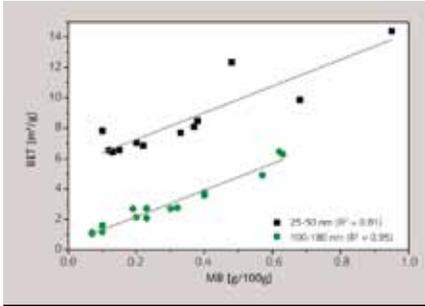


4 Flow point of a mortar (EN 196-1) at an age of 8 minutes as a function of BET surface area of ground limestones of identical fineness (blended cement containing 34% ground limestone by mass)



5 Compressive strength (EN 196-1) after 2 and 28 days as a function of BET surface area of ground limestones of identical fineness (blended cement containing 34% ground limestone by mass)

MATERIALS

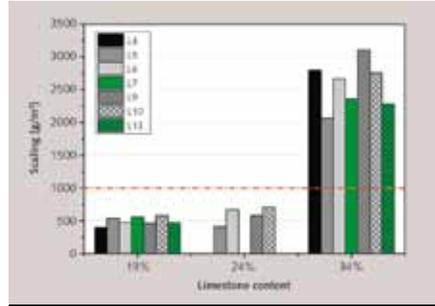


6 BET surface area of ground limestones as a function of clay content (MB value) and crystallite size of calcites in nm

ground limestone increases. A slight increase in compressive strength as BET surface area rises is also simultaneously observable (Figure 5).

The differences in the BET surface area at identical fineness can in part be explained by the differences in clay content as determined using the methylene blue adsorption method. A clear correlation becomes apparent only in combination with the crystallite size of the calcites (Figure 6).

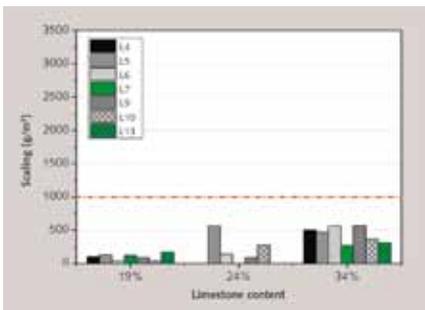
The durability of concretes produced from cements with a high limestone content are also of significance for assessment of performance properties. The method specified in CEN TS 12390-



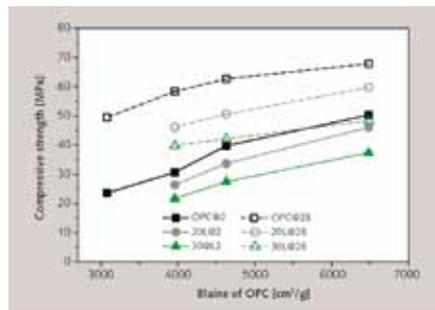
7 Freeze-thaw resistance after fifty-six cycles in accordance with CEN TS 12390-9, Part 5 (cement content 320 kg/m³, w/c = 0.50); acceptance criterion 1000 g/cm²

9, Part 5 (slab test) was used for assessment of resistance to freeze-thaw cycles. The composition of the concrete is orientated around the limits for Exposure Class XF3 as per DIN EN 206-1/DIN 1045-2. Testing was performed on a concrete mixture with no artificial air pores. The air content of the fresh concretes is in the 1.4% vol. to 1.8% vol. range.

The Portland limestone cements containing 19% and 24% by mass ground limestone meet the requirements for frost resistance (Figure 7). Scaling with 24% by mass ground limestone differs only slightly from the results for 19% by mass ground limestone. Frost resistance declines



8 Freeze-thaw resistance after 56 freeze-thaw cycles, in accordance with CEN TS 12390-9, Part 5 (cement content 320 kg/m³, w/c = 0.50, LP content 4.5% vol.); acceptance criterion 1000 g/cm²



9 Compressive strength in accordance with EN 196-1 of blended cements consisting of OPC-B1, OPC-B2, OPC-B3 and OPC-B4 with 0%, 20% and 30% ground limestone by mass as a function of specific surface area as per Blaine in the Portland cements used

		OPC-C1	L2	L2-G
Blaine	[cm ² /g]	5130	5100	n.a.
RRSB location parameter	[μm]	12.3	15.2	135.6
RRSB slope	[-]	1.02	0.76	0.79
BET	[m ² /g]	n.d.	2.6	1.6

Table 3
Fineness parameters

Material			66% OPC-C1 + 34% L2	66% OPC-C1 + 34% L2-G
Location parameter		[μm]	13	26.1
Slope		[-]	0.77	0.68
Blaine		[cm ² /g]	5110	3820
WD		[%]	30	26.5
Start of setting		[min]	120	140
End of setting		[min]	150	170
Compressive strength of mortar	1d	[MPa]	13.6	12.9
	2d	[MPa]	23.7	21.4
	7d	[MPa]	35.4	32.4
	28d	[MPa]	44.8	43.0

Table 4 Fineness, water demand, setting and compressive strength of Portland limestone cements

over-proportionally when the ground limestone content is raised to 34% by mass. Scaling then more than doubly exceeds the limit. A correlation between the quality parameters of the limestones and scaling is not apparent in this study.

For testing for de-icing salt resistance, the concretes were adjusted by means of air-entraining agents to an air content of 4.5 ± 0.5% vol. in the fresh concrete. Scaling in the de-icing agent resistance test on air-entrained concrete is well below the limit, at 570 g/m² (Figure 8). This permits the supposition that porosity and the transport processes in the concrete play a more important role (see also 3.4 on this).

3.2 The influence of clinker fineness

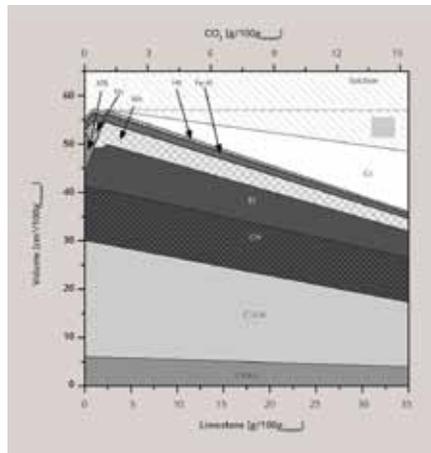
The influence of clinker fineness was determined using mixtures of a ground limestone with three Portland cements of differing fineness and identical origin (see Table 1, OPC-B1, -B2, -B3 and -B4). A ground limestone was added at rates of 20% and 30% by mass to these Portland cements. Sulphate content was adjusted to 3.0% via the addition of refined calcium sulphate anhydrite.

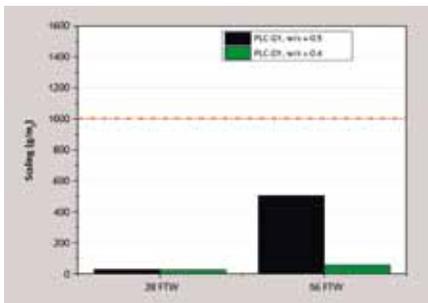
The strength level of the cements increases when the fineness of grind of the clinker is

10 Calculated phase volume for Portland limestone cement as a function of limestone content;

- Cc – Calcite
- CH – Portlandite
- Et – Ettringite
- M\$ - Monosulfoaluminate
- Hc – Hemicarboaluminate
- Mc – Monocarboaluminate
- Ht – Hydrotalcite
- Fe-H – Iron-containing hydrogarnet
- Por – Porosity

A description of the modelling concept is provided in [3]





11 Freeze-thaw resistance after 28/56 cycles (FTR) in accordance with CEN TS 12390-9, Part 5 (cement content 320 kg/m³); acceptance criterion 1000 g/cm²

raised. This is observable equally in both Portland and Portland limestone cements (Figure 9). In this system, a fineness of ~3400 cm²/g is adequate in a Portland cement to achieve a compressive strength in the mortar after 2 days of, for example, 26 MPa. A clinker fineness of no less than ~4000 cm²/g is necessary for a Portland limestone cement containing 20% limestone by mass. At 30% limestone by mass, the necessary clinker fineness rises to ~4600 cm²/g. The clinker fineness requirements at high limestone contents rise significantly as hydration time progresses. After 28 days, the Portland cement with ~3400 cm²/g achieves a compressive strength of ~53 MPa. A clinker fineness of no less than ~5000 cm²/g is necessary to attain the same compressive strength level in a Portland limestone cement containing 20% limestone by mass, while the necessary clinker fineness rises to > 6500 cm²/g for 30% limestone by mass.

3.3 The influence of ground limestone fineness

As noted above, high clinker fineness is necessary in order to meet compressive strength requirements. This generally has a detrimental effect on working properties. This was to be counteracted by means of systematic combination with a ground limestone with a reduced fine particles content. A works-ground Portland cement was

combined for this purpose with two ground limestones which differed only in their fineness (Table 3).

As a result of the process used, the Blaine measuring method does not supply repeatable measured data for ground limestone L2-G. The BET surface area of these two ground limestones differed only insignificantly compared to the bandwidth of the BET surface area determined for limestones of various origins (Table 2). This is indicative of a comparatively slight influence by fineness of grind on the BET surface area of the ground limestones.

As expected, variation of the fineness of the ground limestone affects the performance properties of the cements produced from it. The use of the coarse ground limestone improves workability significantly. The main reason for this may be found in the widening of the particle size distribution. This correlation between particle size distribution and water demand is also correspondingly described, for example, in [7]. The lower compressive strength observed simultaneously when ground limestone L2-G is used corresponds to the correlation between the BET surface area of the limestone and compressive strength in the mortar shown in Figure 4.

3.4 The influence of w/c ratio on freeze-thaw resistance

Resistance to freeze-thaw cycles is influenced very greatly by porosity and strength. It is known that porosity also increases as limestone content rises [3].

A Portland limestone cement (PLC-D1) with a limestone content of 28% by mass and produced by means of joint grinding was also tested with a w/c ratio of 0.40. Testing was performed on a concrete mixture with no artificial air pores. At a w/c ratio of 0.40, an air content in the fresh concrete of 1.2% vol. stabilised, compared to 2.1% vol. air at a w/c ratio of 0.50.

Scaling after twenty-eight freeze-thaw cycles is extremely low in both concretes (24 to 26 g/m²). Significant differences become apparent after fifty-six freeze-thaw cycles, however.

Scaling was 504 g/m^2 for a concrete with a w/c ratio of 0.50. At the reduced w/c ratio, this figure increased only marginally, from 24 g/m^2 to 55 g/m^2 .

Drilling cores for determination of porosity in accordance with SIA 262/1, Appendix A were taken after 28-day conditioning of the test objects. As was to be expected, porosity declined significantly, from 12.2% vol. to 9.8% vol., as a result of the reduction in the w/c ratio. This difference is equally apparent in water absorption in accordance with SIA 262/1, Appendix A. This is 1960 g/m^2 at a w/c ratio of 0.50, but 1130 g/m^2 at a w/c ratio of 0.40.

4 Summary

Limestone used for the production of Portland limestone cements must conform to the requirements of EN 197, Part 1. These normative criteria cannot be used for any prediction of cement quality, however.

BET surface area is a useful parameter, since it correlates to the performance properties of the cements produced. The workability of the cement declines significantly, and compressive strength increases slightly, as BET surface area increases. In addition to clinker properties, the granulometric parameters of the limestones as a

function of limestone content in the cement were responsible for the cement properties determined during testing.

At a limestone content of $\geq 19\%$ by mass, compressive strengths decreased in this study in accordance with the dilution of the clinker content. Such a decline in compressive strength can be adjusted only by increasing the fineness of the clinker. Finer grinding is achieved only at the cost of workability, however. In cements with a high limestone content, workability can be improved by using ground limestones with a lower ultra-fine particle content. Compressive strength is affected simultaneously only very slightly.

The cements with a limestone content of 19%/24% by mass tested here exhibit high resistance to freeze-thaw cycles. The scaling rate is in this context unrelated to the purity of the limestone and its BET surface area. All mixtures containing 34% limestone by mass manifest inadequate resistance to freeze-thaw cycles. Concrete making provisions, such as the reduction of the w/c ratio or the incorporation of artificial air pores, nonetheless, do make it possible to produce from such high-limestone cements a concrete with adequate resistance to freeze-thaw cycles [8].

REFERENCES

- [1] Ménétrier-Sorrentino, D., Particle size distribution in blended cements, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio De Janeiro, Brazil, 1988, Vol. IV, pp. 60–65.
- [2] Schiller, B.; Ellerbrock, H.-G., The grinding and properties of cement with several main constituents, Zement-Kalk-Gips Vol. 45, No. 7, 1992, pp. 325–334
- [3] Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B., Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, Cement & Concrete Composites 46 (2014), pp. 99–108
- [4] Giergiczy, Z., Sokołowski, M., Limestone as component of composite cements, 3rd International Symposium on non-traditional cement & concrete, 2008, Brno
- [5] Locher, F. W., Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung. 1st edition. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2000
- [6] Sprung, S.; Siebel, E.: Eignung von Kalkstein als Zuzahlstoff für die Zementherstellung, VDZ-Aus der Forschung für die Praxis, 1990
- [7] Siebel, E., Sprung, S., Influence of limestone in Portland limestone cement on the durability of concrete, Beton Vol. 41, No. 3, 1991, pp. 113–117
- [8] Müller, C., Palm, S., Graubner, C.A., Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Neufert, W., Reuken, I., Cement with high limestone content – durability and practicability, Cement International. 2/2014, Vol. 12, pp. 78–85



Bauerlag BV GmbH, 3331 Gütersloh, www.bauerlag.de

APPGRADE YOUR KNOWLEDGE.

THE ZKG INTERNATIONAL APP.

MORE MULTIMEDIA: enjoy more videos, pictures and interactive content. **MORE TRANSPARENCY:** use our search engine to find articles from all published issues. **MORE OVERVIEW:** store all your issues in our archive. **Scan the QR Code** to install our app onto your mobile device or visit www.app.zkg.de for the desktop version.

www.app.zkg.de
the desktop version



Unternehmensportrait HeidelbergCement AG

HEIDELBERGCEMENT

Muttergesellschaft	HeidelbergCement AG
Branche	Baustoffindustrie
Produkte	Zement & Bindemittel, Beton & Fließestrich, Sand & Kies, Betonprodukte, Kalksandstein
Standorte	Weltweit in ca. 60 Ländern
Umsatz	
Mitarbeiter	
Deutschland	Ca. 4.000
Europa	
weltweit	Ca. 62.000
Praktika	Hochschulpraktika in allen Bereichen möglich
Studien- und Abschlussarbeiten	Auf Anfrage möglich
Gesuchte Fachrichtungen	Bauingenieurwesen, Bergbau, Chemieingenieurwesen, Maschinenbau, Rohstoffingenieurwesen, Verfahrenstechnik, (Wirtschafts-)Informatik, Wirtschaftsingenieurwesen, Wirtschaftswissenschaften
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Traineeprogramme in den Bereichen Baustofftechnologie; Technik; Vertrieb; Finance, Accounting & Controlling; Human Resources, IT; Logistics; Purchasing
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Hands-on Mentalität, Auslandserfahrung, sehr gute Englischkenntnisse, Flexibilität, hohe Lern und Einsatzbereitschaft, Teamfähigkeit
Einstellung von Bachelor/Master	Überwiegend Master, vereinzelt auch Bachelor
Auslandseinsatz	In einigen Traineeprogrammen möglich
Kontaktadresse	HeidelbergCement AG Berliner Str. 6 69120 Heidelberg
Ansprechpartner für Studenten	Heike Gaude +49 6221 481 32047
Ansprechpartner für Absolventen	Natalie Greineck +49 6221 481 32010
Sonstige Informationen	www.heidelbergcement.com/karriere
Homepage	www.heidelbergcement.com

Unternehmensportrait AUMUND Fördertechnik GmbH



Gesellschaft	AUMUND Fördertechnik GmbH
Branche	Maschinenbau
Produkte	Förder- und Lagertechnik für heiße und abrasive Schüttgüter
Standorte	Rheinberg sowie Auslandsgesellschaften und Repräsentanzen weltweit
Umsatz	
Mitarbeiter Deutschland Europa weltweit	ca. 320 Deutschland ca. 440 insgesamt (incl. deutsche Gruppe)
Praktika	Möglich nach individueller Absprache
Studien- und Abschlussarbeiten	Möglich nach individueller Absprache
Gesuchte Fachrichtungen	Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Verfahrenstechnik
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Direkteinstieg, individuelles Trainee-Programm, Praktika, Bachelor-/Master-Arbeiten
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Verfahrenstechnik, Vertrieb, Konstruktion
Einstellung von Bachelor/Master	Bachelor und Master
Auslandseinsatz	Möglich nach individueller Absprache (auch im Rahmen von Praktika)
Kontaktadresse	AUMUND Fördertechnik GmbH Abt. Personal Saalhoffer Str. 17 47495 Rheinberg
Ansprechpartner für Studenten	Hannelore Hoffmann 02843 720 bewerbung@aumund.de
Ansprechpartner für Absolventen	Hannelore Hoffmann 02843 720 bewerbung@aumund.de
Sonstige Informationen	
Homepage	www.aumund.com



Zukunft gestalten – weltweit

Die **AUMUND Gruppe** ist weltweit für anspruchsvolle Lösungen in der Förder- und Lagertechnik bekannt. Wenn höchste Kapazität oder Dauerbelastung, schwieriges Material oder extreme Einsatzbedingungen nach neuen Ideen verlangen, dann blühen unsere Ingenieurinnen und Ingenieure auf.

Als inhabergeführtes, mittelständisch geprägtes, weltweit tätiges Unternehmen bieten wir jungen Leuten vielseitige Perspektiven und eine erfolgreiche Zukunft in **kaufmännischen** und **technischen** Berufen. Wenn Sie sich für **Praktika**, **Bachelor-** bzw. **Masterarbeiten** oder für einen Direkteinstieg interessieren, rufen Sie uns an!

Besuchen Sie uns auf unserer Homepage. Hier finden Sie attraktive Stellenangebote, die Sie interessieren werden. **www.aumund.com**
 Weitere Infos erhalten Sie unter Tel. +49 2843 72 230.



Unternehmensportrait Gebr. Pfeiffer SE



GEBR. PFEIFFER

Muttergesellschaft	Gebr. Pfeiffer SE
Branche	Maschinenbau
Produkte	Maschinen und Anlagen zum Mahlen von Zementrohmaterialien, Klinker, Hüttensand und Kohle für die Zementindustrie. Neben Walzenschüsselmühlen werden Spezialmaschinen für die Klassierung und Trocknung von mineralischen Schüttgütern sowie für die Aufbereitung von Kalk und Gips gefertigt.
Standorte	<u>Tochtergesellschaften:</u> Gebr. Pfeiffer (India) Private Ltd., Noida Indien Gebr. Pfeiffer Inc. / USA, Pembroke Pines USA Gebr. Pfeiffer Grinding Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing China Gebr. Pfeiffer do Brasil, Sao Paulo, Brasilien Gebr. Pfeiffer Egypt LLC, Kairo Ägypten
Umsatz	Im Geschäftsjahr 2014/15: 139,7 Mio. €
Mitarbeiter Deutschland Europa weltweit	420 Mitarbeiter ca. 500 Mitarbeiter
Praktika	Auf Anfrage
Studien- und Abschlussarbeiten	Auf Anfrage
Gesuchte Fachrichtungen	Maschinenbau/Verfahrenstechnik
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Training on the job im Bereich Vertrieb, Projektentwicklung, Konstruktion, Inbetriebnahme
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Englisch, 2. Fremdsprache von Vorteil, Reisebereitschaft
Einstellung von Bachelor/Master	Bachelor und Master
Auslandseinsatz	Dienstreisen weltweit
Kontaktadresse	Barbarossastr. 50–54 67655 Kaiserslautern carsten.vieth@gebr-pfeiffer.com
Ansprechpartner für Studenten	Herr Carsten Vieth
Ansprechpartner für Absolventen	Herr Carsten Vieth
Sonstige Informationen	http://www.gebr-pfeiffer.com/jobs.html
Homepage	www.gebr-pfeiffer.com



IHRE ZUKUNFT BEI GEBR. PFEIFFER

Wir sind ein mittelständisches, konzernunabhängiges Unternehmen mit langer Tradition, das im Rahmen seiner weltweiten Aktivitäten über 500 Mitarbeiter beschäftigt. Mit eigenen Niederlassungen in den USA, in Indien und in China sowie einem umfassenden Netz an Kooperationen, Repräsentanzen und Vertretungen sind wir mit einem sehr hohen Exportanteil auf allen Märkten erfolgreich tätig. Unsere Erfahrung und hohe Ingenieurkompetenz machen uns zu einem der führenden Unternehmen in der Herstellung von Mühlen und Maschinen zur Materialaufbereitung.

In einer Phase dynamischer Entwicklung bieten wir Ihnen in verschiedenen Bereichen den Einstieg ins Berufsleben als:

- Dipl.-Kaufmann (m/w)
- Elektro-Ingenieur (m/w)
- Inbetriebnahme-Ingenieur (m/w)
- Konstruktions-Ingenieur (m/w)
- Projekt-Ingenieur (m/w)
- Vertriebs-Ingenieur (m/w)
- Wirtschafts-Ingenieur (m/w)

Neben diesen interessanten Aufgabengebieten finden Sie bei uns auch:

- einen zukunftssicheren Arbeitsplatz
- einen stabilen Unternehmenshintergrund
- ein motivierendes, familiär geprägtes Arbeitsumfeld
- viele interessante, verantwortungsvolle Aufgaben
- eine leistungsgerechte Bezahlung
- flache Hierarchien

**Anfragen sowie Initiativbewerbungen richten Sie bitte schriftlich oder per E-Mail an:
carsten.vieth@gebr-pfeiffer.com**



Olaf Tremer, M.Sc.,
Berufseinstieg bei
Gebr. Pfeiffer 2012

Aktuelle Stellenausschreibungen
finden Sie auf unserer Homepage
unter: www.gebr-pfeiffer.com



Unternehmensportrait Hoffmeier Industrieanlagen GmbH + Co. KG

Muttergesellschaft	Hoffmeier Industrieanlagen GmbH + Co. KG
Branchen	Stahlbau, Anlagentechnik, Entstaubungstechnik, Maschinenbau, Large Components, Dienstleistung
Produkte	Planung, Fertigung, Montage, Wartung, Instandhaltung
Standorte	Weitere Werke in Rüdersdorf bei Berlin, Kraysberggemeinde (Thüringen), Bedburg und Leimen
Umsatz	Nicht veröffentlicht
Mitarbeiter	1300
Praktika	Möglich nach individueller Absprache
Studien- und Abschlussarbeiten	Möglich nach individueller Absprache
Gesuchte Fachrichtungen	Maschinenbau, Anlagenbau, Konstruktionstechnik, Anlagentechnik, Stahlbau, Fördertechnik, Bauingenieurwesen, Wirtschaftsingenieurwesen
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Praktika, Bachelor-/Masterarbeiten, Young professionals und Professionals
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Sichere Englischkenntnisse, weitere Sprachen von Vorteil, Reisebereitschaft
Einstellung von Bachelor/Master	Master
Auslandseinsatz	Projektbezogen weltweit möglich
Kontaktadresse	Hoffmeier Industrieanlagen GmbH + Co. KG Abt. Personal Kranstrasse 45 59071 Hamm
Ansprechpartner für Studenten	Frau Karin Kötting/Frau Nina Oberdick Tel.: 02388-33220/02388-33321 E-Mail: karin.koetting@hoffmeier.de/E-Mail: nina.oberdick@hoffmeier.de
Ansprechpartner für Absolventen	Frau Karin Kötting/Frau Nina Oberdick Tel.: 02388-33220/02388-33321 E-Mail: karin.koetting@hoffmeier.de/E-Mail: nina.oberdick@hoffmeier.de
Sonstige Informationen	
Homepage	www.hoffmeier.de

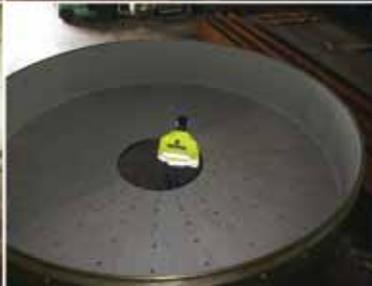
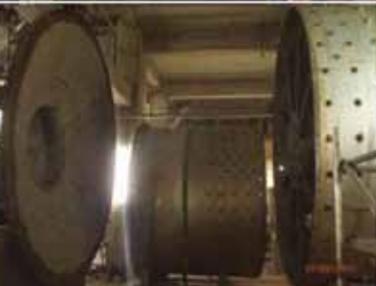
SIND SIE INTERESSIERT IN UNSEREM TEAM MITZUARBEITEN?

Unsere aktuellen Stellenangebote finden Sie unter:

www.hoffmeier.de



**STAHLBAU
ANLAGENTECHNIK
ENTSTAUBUNGSTECHNIK
MASCHINENBAU
LARGE COMPONENTS
DIENSTLEISTUNGEN**



Unternehmensportrait BEUMER Group



Muttergesellschaft	BEUMER Group GmbH & Co. KG
Branche	Maschinen- und Anlagenbau
Produkte	Intralogistiksysteme für Schütt- und Stückgüter
Standorte	ca. 29 Standorte weltweit
Umsatz	700 Mio. € (2015)
Mitarbeiter Deutschland Europa weltweit	941 1835 ca. 4000
Praktika	Angebote für Schüler und Studenten, weitere Informationen hierzu auf unserer Homepage
Studien- und Abschlussarbeiten	Bachelor und Masterarbeiten werden laufend vergeben, weitere Informationen hierzu auf unserer Homepage
Gesuchte Fachrichtungen	Maschinenbau, Elektrotechnik, Wirtschaftsingenieurwesen
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Absolventen, Young Professionals und Professionals
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Intralogistik, Förder- und Verladetechnik, Automatisierungstechnik
Einstellung von Bachelor/Master	Bachelor und Master
Auslandseinsatz	projektbezogen
Kontaktadresse	Oelder Straße 40, 59269 Beckum
Ansprechpartner für Studenten	Frau Karoline Lampe Tel.: 02521 24216
Ansprechpartner für Absolventen	Frau Karoline Lampe Tel.: 02521 24216
Sonstige Informationen	www.beumergroup.com/karriere
Homepage	www.beumergroup.com

Unternehmensportrait Loesche GmbH



Muttergesellschaft	LOESCHE GmbH
Branche	Maschinenbau
Produkte	<p>Seit 1906 baut die Firma Loesche vertikale Wälzmühlen. Die bereits 1928 patentierte Wälzmühlentechnologie wurde ständig weiterentwickelt und ist mittlerweile zu einem Synonym für die Loesche GmbH geworden.</p> <p>Die Kernkompetenz des Unternehmens liegt in der Entwicklung und Konstruktion von individuellen Konzepten für Mahltrocknungsanlagen in der Zement-, Hüttenwerk-, Kraftwerks-, Erz- und Mineralienindustrie. Das Leistungsspektrum reicht von der ersten Planung bis hin zur Inbetriebnahme von kompletten Anlagen mit hohem verfahrenstechnischen Ingenieuranteil. Darüber hinaus bietet Loesche einen breitgefächerten Servicebereich, der sowohl die Wartung, Reparatur, Ersatzteilbeschaffung und Training als auch die Modernisierung von Mahlanlagen umfasst.</p> <p>Loesche bietet zusammen mit der A TEC Holding GmbH als Partner für die Umsetzung von Anlagenoptimierungs- und Umweltschutzprojekten komplette Prozesslösungen an.</p>
Standorte	Die Loesche GmbH ist ein unabhängiges Familienunternehmen mit Hauptsitz in Düsseldorf. Sie ist weltweit mit Tochtergesellschaften in den USA, Brasilien, Spanien, Großbritannien, Südafrika, Indien, Nigeria, China, Indonesien, den Vereinigten Arabischen Emiraten und Russland sowie Vertretungen in mehr als 20 Ländern präsent.
Umsatz	
Mitarbeiter Deutschland weltweit	Ca. 330 Ca. 850
Praktika	Ja
Studien- und Abschlussarbeiten	Ja
Gesuchte Fachrichtungen	Verfahrenstechnik, Maschinenbau
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Praktikum, Auszubildende, Trainee, Abschlussarbeiten
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	
Einstellung von Bachelor/Master	Master
Auslandseinsatz	Ja
Kontaktadresse	LOESCHE GmbH Hansaallee 243 D-40549 Düsseldorf Tel.: +49 211 5353-0 Fax: +49 211 5353-500 Email: loesche@loesche.de www.loesche.com
Ansprechpartner	Herr Sascha Marx
Homepage	www.loesche.com

Unternehmensportrait FLSmidth Pfister GmbH



Muttergesellschaft	FLSmidth Pfister GmbH
Branche	Kontinuierliche Dosier- und Wiegesysteme für die Zement-, Minerals- und Stahlindustrie, kohlebefeuerte Kraftwerke
Produkte	Dosierrotorwaagen, Dosierbandwaagen, kontinuierliche Wiegetechnik, Plattenbandwagen
Standorte	Augsburg Deutschland, Bethlehem USA, Kuala Lumpur Malaysia, Votorantim Brasilien, Lyon Frankreich, Qingdao China, Mumbai Indien
Umsatz	nicht veröffentlicht
Mitarbeiter Deutschland Europa weltweit	110 400
Praktika	Laufend
Studien- und Abschlussarbeiten	Laufend
Gesuchte Fachrichtungen	Elektrik, Maschinenbau, Mechatronik, Verfahrenstechnik
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Projektierung, Auftragsabwicklung, Entwicklung, Vertrieb, Service
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Verfahrenstechnik, Englisch, weitere Fremdsprachen wünschenswert
Einstellung von Bachelor/Master	Bachelor und Master, Dipl.-Ing Techniker, Wirtschaftsingenieure
Auslandseinsatz	möglich
Kontaktadresse	FLSmidth Pfister GmbH, Staetzlinger Str. 70, 86165 Augsburg
Ansprechpartner für Studenten	Karin Schweikl, Personalleiterin
Ansprechpartner für Absolventen	Karin Schweikl, Personalleiterin
Sonstige Informationen	
Homepage	www.flsmidthpfister.com

One Source



Dosing technology worldwide

Die Augsburger FLSmidth Pfister GmbH ist spezialisiert auf Wäge- und Dosiertechnologien, die z.B. in der Zement- und Kraftwerksbranche seit Jahrzehnten eingesetzt werden. Unsere Dosierrotorwaagen sind patentiert, mit deren Zuverlässigkeit und Genauigkeit haben wir es zum internationalen Marktführer in Spezialbereichen gebracht.

Unser beständiges Wachstum verdanken wir u.a. unserem engagierten Team, das sich weltweit für uns einsetzt.

Junge Mitarbeiter mit Engagement und Ideen sind uns willkommen.

Wir bieten Chancen für:

- Praktikanten
- Werkstudenten
- Diplomanden
- Hochschulabsolventen

Ihre Fragen oder Ihre Bewerbung richten Sie bitte an:

FLSmidth Pfister GmbH | z.H. Frau Schweikl
Stätzlinger Str. 70 | 86165 Augsburg
karin.schweikl@flsmidthpfister.com

www.flsmidthpfister.com

FLSMIDTH
PFISTER

**Unternehmensportrait
Refratechnik Cement GmbH**

REFRATECHNIK

Muttergesellschaft	Refratechnik Cement GmbH
Branche	Feuerfestprodukte
Produkte	chromerzfreie basische, basische und hochtonerdehaltige Steine, hochtonerdehaltige Schamottesteine, Sondersteine; Engineering- und Serviceleistungen
Standorte	Göttingen, Gochsheim sowie Tochtergesellschaften weltweit
Umsatz	250–300 Mio. €
Mitarbeiter Deutschland Europa weltweit	ca. 400
Praktika	Ja, auf Anfrage
Studien- und Abschlussarbeiten	Ja, auf Anfrage
Gesuchte Fachrichtungen	Mineralogie, Geologie, Ingenieur Glas Keramik Bindemittel, Ing. Maschinenbau oder Verfahrenstechnik
Einstiegs- und Einsatzmöglichkeiten	Vertrieb, Fertigungstechnologie, F&E Direkteinstieg auch ohne Berufserfahrung
Erwünschte Zusatzqualifikationen/ Vertiefungsrichtung	Englisch, weitere Sprachen, Mobilität
Einstellung von Bachelor/Master	Bachelor und Master
Auslandseinsatz	projektbezogen weltweit möglich
Kontaktadresse	Refratechnik Cement GmbH Rudolf-Winkel-Straße 1 37079 Göttingen
Ansprechpartner für Studenten	Dorothea Tacke personal@refra.com
Ansprechpartner für Absolventen	s.o.
Sonstige Informationen	
Homepage	www.refra.com

Expect the best. **REFRATECHNIK**



Zukunft schon geplant? Karriere bei Refratechnik!



Neugierig?

Die Refratechnik Gruppe gehört mit ihren feuerfesten Produkten und Konzepten weltweit zu den innovativen und erfolgreichen Partnern der Zement-, Kalk-, Stahl- und Nichteisen-Metall-Industrie sowie der Keramik- und Ziegelindustrie.

Wir suchen ständig akademischen Nachwuchs aus den Fachbereichen Mineralogie, Geologie, Glas/Keramik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Bergbau, Gesteinshüttenkunde (Bachelor und Master) für den Einsatz im Bereich Forschung & Entwicklung, Vertrieb und Fertigungstechnologie.

Refratechnik Cement GmbH
Rudolf-Winkel-Strasse 1
37079 Göttingen
Germany
Phone +49 551 6941 0
personal@refra.com

INSERENTENVERZEICHNIS

Inserent	Internetseite	Seite
AUMUND Holding B.V	www.aumund.com	141
BEUMER Maschinenfabrik GmbH & Co. KG	www.beumer.com	79
FLSmidth PFISTER GmbH	www.flsmidth.com	149
Hoffmeier Industrieanlagen GmbH & Co. KG	www.hoffmeier.de	145
Intercem Engineering GmbH Intercem Installation GmbH	www.intercem.de	71
Loesche GmbH	www.loesche.com	27
Gebr. Pfeiffer SE	www.gebr-pfeiffer.com	21, 143
Refratechnik Cement GmbH	www.refra.com	151
SCHENCK PROCESS GmbH	www.schenckprocess.com	81, 151
Toni Technik Baustoffprüfsysteme GmbH	www.tonitechnik.com	95



ZKG INTERNATIONAL MY KEY TO SUCCESS

Secure your key information from one of the most renowned scientific trade magazines for the cement lime and gypsum industry. Everything about milling and firing technology, maintenance and markets, research and developments – 10 times a year.

ZKG INTERNATIONAL:
SUBSCRIBE NOW
via www.zkg.de/order

leserservice@bauverlag.de or by fax +49 5241 80690880



ZKG Fachexkursionen – der direkte Kontakt zu international erfolgreichen Unternehmen!



Mit ZKG bieten wir regelmäßig Fachexkursionen mit einer anschließenden Werksbesichtigung vor Ort in einem Zementwerk an.

Informieren Sie sich über ein ganz besonderes Fachgebiet des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus.

Studenten aus den Fachbereichen Verfahrenstechnik und Maschinenbau lernen mögliche Arbeitgeber von morgen kennen!

Es erwarten Sie

- » technische Fachvorträge und Firmenpräsentationen
- » Werks- und Steinbruchbesichtigungen
- » Tipps zu Karrierechancen im Maschinen- und Anlagenbau
- » Direkte Kontakte zu den Personalleitern