

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ gGmbH
Forschungseinrichtung 1:	VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungseinrichtung 2:	Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V.
IGF-Vorhaben-Nr.:	19221 N
Bewilligungszeitraum	01.10.2016 – 30.06.2019

Forschungsthema:

## **Einfluss der Verringerung von Schmelzpunkt und Viskosität der Klinkerschmelze durch Aschen alternativer Brennstoffe auf Sinterreaktionen und Coatingbildung**

### **1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Der Ersatz primärer durch alternative Brennstoffe ist für die Zementindustrie von großer Bedeutung. Die meisten Stoffe, die als alternative Brennstoffe verwendet werden, liegen als Abfallstoffe vor. Der große Vorteil des Einsatzes dieser Stoffe in der Zementindustrie gegenüber Müllverbrennungsanlagen liegt darin, dass ihre Verwertung bei der Portlandzementklinkerproduktion nicht nur energetisch, sondern auch stofflich erfolgt. Dieser ökonomisch und ökologisch sinnvolle Einsatz von alternativen Brennstoffen wird durch die Zementindustrie auch weiterhin verfolgt, und die Verwertungsrate soll weiterhin gesteigert werden.

Die Brennstoffaschen beeinflussen die chemische Zusammensetzung des Klinkers und deren Eigenschaften. Während die Hauptoxide ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) der Aschen bei der Planung der Rohmehlzusammensetzung berücksichtigt werden, so dass die Hauptelementzusammensetzung des Klinkers unverändert bleibt, können die eingetragenen Nebenoxide ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) Schmelzpunkt, Viskosität und Menge der Klinkerschmelze verändern. Dies kann sich auch auf die Ausbildung und die Eigenschaften der schützenden Ansätze („Coatingschicht“) auf der feuerfesten Zustellung im Drehrohrofen auswirken. Genaue Kenntnisse über diese Auswirkungen sind für die weitere Steigerung der Ersatzbrennstoffraten und die gleichzeitige Optimierung von Ofenbetrieb sowie für die Beibehaltung der Klinkerqualität und der Lebensdauer der feuerfesten Zustellung unabdingbar.

In dem 2015 abgeschlossenen Forschungsprojekt „Einfluss der Aschen von Sekundärbrennstoffen auf die Viskosität der Klinkerschmelze und deren Auswirkung auf die feuerfeste Auskleidung der Sinterzone des Drehrohrofens“ (IGF 16905N) wurde bereits gezielt untersucht, wie die Viskosität der Klinkerschmelze durch die Aschen alternativer Brennstoffe

beeinflusst wird. Mit steigendem  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Verhältnis stieg die Viskosität der Klinkerschmelze. MgO bewirkte bei Temperaturen um 1350 °C tendenziell eine Verschiebung zu höheren, bei Temperaturen um 1450 °C dagegen zu niedrigeren Viskositäten. Die untersuchten Aschen führten teilweise bereits bei der niedrigsten untersuchten Temperatur von 1300 °C zur vollständigen Verflüssigung der Klinkerschmelze. Einflüsse auf die Alitbildung wurden nicht detailliert untersucht. Außerdem blieb noch offen, in welchem Temperaturfenster sich die Klinkerschmelze der aschehaltigen Modellsysteme tatsächlich bildet, und wie sich dies auf die Phasenzusammensetzung des Klinkers sowie die Ausbildung der Coatingschicht auf der feuerfesten Zustellung im Drehrohrofen auswirkt.

Die Anwesenheit und die Menge der Schmelze im Klinkersystem bei einer gegebenen Temperatur haben entscheidenden Einfluss auf die Alitbildung. Der Alitgehalt im Klinker ist zur Herstellung von Portlandzementen mit guten technologischen Eigenschaften maßgeblich. Es ist davon auszugehen, dass die Aschen alternativer Brennstoffe durch das Herabsetzen der Schmelztemperatur einen positiven Einfluss auf die Alitbildung bei der Klinkerherstellung haben können. In diesem Fall kann die Brenntemperatur bei gleichbleibender Klinkerqualität abgesenkt werden. Deutliche Energieeinsparungen bei der Zementklinkerproduktion wären dann möglich.

Die Bildung der Coatingschicht auf der Feuerfest-Oberfläche erfolgt mit Beteiligung der Klinkerschmelzphase. Die Coatingschicht schützt die feuerfeste Zustellung im Drehrohrofen vor Überhitzung, Thermoschock und mechanischem Abrieb. Veränderungen der Klinkerschmelzeigenschaften (Temperatur, Viskosität) können sich daher nachteilig auf die Bildung der Coatingschicht auswirken und so die Haltbarkeit der feuerfesten Zustellung trotz und wegen herabgesetzter Schmelztemperatur stark verringern. Die Bildung der Coatingschicht muss auch unter den Bedingungen eines erhöhten Eintrags von Aschen alternativer Brennstoffe und bei gleichzeitig herabgesetzter Schmelztemperatur des Klinkers gewährleistet sein.

## **2 Ziele des Forschungsvorhabens**

Das erste Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Einfluss von Nebenoxiden aus Brennstoffaschen auf die Bildungstemperaturen der Klinkerschmelze und auf die damit Klinkermineralogie herauszuarbeiten. Es sollte geklärt werden, ob durch die Nebenoxide ggf. die Prozesstemperatur abgesenkt werden kann, ohne die Klinkermineralogie wesentlich zu verändern. Die Zementhersteller sollen dadurch in die Lage versetzt werden, die Einflüsse der eigenen Brennstoffaschen auf die Viskosität und die Schmelzbildungstemperatur des zu brennenden Klinkers zu bewerten, die Vorteile der früheren Schmelzbildung im Klinkerbrennprozess zu nutzen und den Einsatz der alternativen Brennstoffe gezielt weiter zu steigern. Sowohl eine mögliche Verringerung der Prozesstemperatur als auch die Steigerung der Alternativbrennstoffrate verfolgen indirekt das Ziel, die klinkerspezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen zu senken.

Als zweites Ziel des Forschungsvorhabens sollten die Auswirkungen der verringerten Prozesstemperatur und der veränderten Eigenschaften der Klinkerschmelze auf die notwendige Bildung von Coatingschichten sowie die Feuerfestkorrosion und damit auf die Haltbarkeit der feuerfesten Zustellung in der Sinterzone des Drehrohrofens aufgeklärt werden.

Die Hersteller feuerfester Erzeugnisse können somit ihre Erzeugnisse an die durch gesteigerte Alternativbrennstoffraten veränderten Bedingungen im Drehrohrföfen anpassen und so die Lebensdauer der feuerfesten Zustellung gegenüber dem heutigen Stand mindestens erhalten.

Das Forschungsprojekt ermöglicht somit branchenübergreifende Lösungen in interdisziplinärer Zusammenarbeit und verfolgte klar branchenübergreifende Ziele.

### **3 Umfang der Untersuchungen**

In dem Forschungsvorhaben wurde untersucht, wie sich die durch Alternativbrennstoffaschen abgesenkte Viskosität der Klinkerschmelze auf die Sinterreaktionen und die feuerfeste Zustellung in Drehrohrföfen auswirkt. Es wurde untersucht, ob die für Alternativbrennstoffaschen typischen Nebenoxide dazu führen können, dass ein ausreichender Sinterungsgrad bereits bei niedrigeren Prozesstemperaturen erreicht werden kann. Insbesondere wurden die Auswirkungen auf die Chemie und Mineralogie von Klinkern und Einflüsse auf die Zementqualität sowie auf das Feuerfestmaterial untersucht. Für die Untersuchungen werden Rohmehl-Asche-Gemische hergestellt. Zudem wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Schmelzmenge und -bildungstemperatur untersucht.

Im statischen und dynamischen Brennverfahren wurden Laborklinker aus den aschedotierten Gemischen hergestellt, um die Einflüsse des Brennverfahrens auf die Schmelzbildung aufzuklären. Darüber hinaus wurde die Qualität der Laborklinker bewertet. Um die Auswirkungen der veränderten Schmelzbildung auf die feuerfeste Ausmauerung im Drehrohrföfen zu ermitteln, wurden in der Labor-Drehtrommelanlage die Coatingbildung und die Feuerfestkorrosion untersucht.

Es wurde eine Datenbasis erarbeitet, anhand derer Zementhersteller durch eine geeignete Auswahl alternativer Brennstoffe und deren Anteil die Schmelzphasenbildung beeinflussen und weiter optimieren können. Den Herstellern feuerfester Erzeugnisse wird als Ergebnis eine verbesserte Wissensbasis zum Einfluss der Aschen alternativer Brennstoffe und der verringerten Betriebstemperatur auf die Coatingbildung und die Stabilität ihrer Produkte in Drehrohrföfen zur Verfügung gestellt. Dadurch können insbesondere klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) im Bereich der Zementherstellung und im Bereich der Herstellung von Feuerfesterzeugnissen ihre Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit verbessern

## **4 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse**

### **4.1 Herstellung und Berechnung der Rohmehle**

Die im Forschungsvorhaben hergestellten Rohmehle wurden an die Modellsysteme des abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhabens IGF 16905 N angelehnt. Es wurden zwei Referenzrohmehle (R1, R2) mit unterschiedlichen Tonerdemodulen ( $TM = 1,2$  und  $1,7$ ) hergestellt. Damit die Hauptoxidzusammensetzung vergleichbar blieb, wurden Kalkstandard ( $K_{ST}=94$ ) und Silikatmodul ( $SM=2,0$ ) aller Rohmehle durch Berücksichtigung der durch die Asche eingetragenen Hauptoxide konstant gehalten. Als Brennstoffaschen wurden synthetische Gemische in für die einzelnen Brennstoffe typischer chemischer Zusammensetzung verwendet.

## 4.2 Untersuchungen zur Festlegung der Brenntemperatur

Zur Bestimmung der Schmelzbildungstemperatur wurden drei verschiedene Methoden verwendet, nämlich die Hochtemperatur-Röntgenbeugung (HT-RBA), die Simultanthermoanalyse (STA) sowie die Methode Monotones Aufheizen (MMH).

Die **HT-RBA** ist zur Festlegung der Brenntemperatur zwar grundsätzlich geeignet, der im Forschungsvorhaben zur Verfügung stehende Versuchsaufbau erlaubte aber keine ausreichend genaue Analyse. Da es bei dem eingesetzten Diffraktometer parallel zur Goniometerverschiebung zu einer gerätetechnisch bedingten Verkippung der Temperaturkammer kam. Mittels **STA** konnte die Schmelzbildungstemperatur über einzelne Peaks oberhalb des Temperaturbereichs von 1000 °C ermittelt werden.

Zur Untersuchung des Einflusses alternativer Brennstoffaschen auf die Bildungstemperaturen der Klinkerschmelze in verschiedenen, synthetisierten Rohmehl-Asche-Gemischen wurde an der FE 2 (FGF) das Verfahren **MMH** angewendet. Die Ermittlung der Schmelzbildungstemperaturen war erforderlich zur Festlegung der Brenntemperaturen, mit denen die Rohmehle und Gemische im statischen Verfahren (Laborofen, VDZ) bzw. dynamischen Verfahren (Labor-Drehtrommelanlage, FGF) zu Klinker gebrannt wurden. Neben der Ermittlung der Schmelzbildungstemperaturen erwies sich MMH auch zur Ermittlung der Kristallisationstemperaturen der Klinkerschmelze während der Abkühlung als geeignet. Die mittels MMH an den untersuchten Rohmehlen ermittelten Bildungstemperaturen der Klinkerschmelze haben ergeben, dass lediglich der Zusatz an Fluffasche (SF) zu einer Absenkung der Bildungstemperaturen der Klinkerschmelze führt. Die Differenzen für die reinen Rohmehle zu den Gemischen mit Fluffasche betragen dabei etwa 10 K. Der Zusatz an Klärschlammasche zu den Rohmehlen bewirkte einen Anstieg der Bildungstemperaturen der Klinkerschmelzen in Höhe von etwa 30 K. Die Ergebnisse für die Gemische mit Mischaschen (50% SF / 50% SK) führten ebenfalls zu einem Anstieg der Bildungstemperaturen der Klinkerschmelze, der etwa mittig zwischen dem Einfluss der reinen zugesetzten Aschen liegt. Die für R1 ermittelten Schmelzbildungstemperaturen liegen etwas niedriger als für R2, entsprechend des höheren Tonerdemoduls in R2. In R1+SF wurde bei 1277 °C die insgesamt niedrigste Bildungstemperatur der Klinkerschmelze ermittelt. Für das Projektziel, der Absenkung der Bildungstemperatur der Klinkerschmelze, erwies sich daher dieses Gemisch als zielführend.

## 4.3 Statische Klinkerbrände

Durch die bei der Rohmehlherstellung konstant gehaltene Zusammensetzung der Hauptoxide schwankten nach den statischen Brennversuchen sowohl Kalkstandard als auch die Moduln nicht signifikant. Eine leichte Erhöhung des Kalkstandards durch die Zugabe der synthetischen Fluffasche konnte festgestellt werden. Bereits bei Brenntemperaturen von unter 1300 °C waren im Referenzklinker deutliche Alitmengen zu beobachten, bei etwas oberhalb von 1300 °C wurde nahezu schon die maximale Alitmenge erreicht. Die Klinker mit Fluffaschedotierung zeigten die Alitbildung bei nochmals niedrigerer Temperatur und in größerem Umfang, was für eine mögliche Absenkung der notwendigen Prozessstemperatur spricht. Die Dotierung mit Klärschlammasche hingegen bewirkte eine deutliche Reduzierung der Alitbildung, selbst bei Brenntemperaturen von 1400 °C. Verlängerte Sinterdauern führten bei allen Brenntemperaturen nur zu unwesentlich höheren Alitgehalten. In allen Klinkern, insbesondere aber in den mit erhöhten Sulfat- und Alkaligehalten dotierten Proben, traten Domänen mit sehr groß gesprossenen Alitkristallen auf. Welchen Einfluss die beschriebenen Änderungen in

der Klinkermineralogie auf die Leistungsfähigkeit solcher Klinker haben, wurde in diesem Forschungsvorhaben nicht untersucht.

#### **4.4 Dynamische Klinkerbrände in der Drehtrommel-Versuchsanlage**

Durch die dynamischen Brände wurden zumeist Klinker mit hohen Brenngraden und entsprechend des Kalkstandards maximalen Alitgehalten erreicht. Insbesondere bei der Dotierung mit Fluffasche lagen die Alitgehalte besonders hoch, während die Dotierung mit Klärschlammasche zu geringeren Alitgehalten führte. Die Klinker wirkten in großen Teilen zudem homogener und feinkörniger als die Klinker aus den statischen Bränden. Trotzdem waren auch hier Domänen mit grobkörnig gesprossenen Alitkristallen zu beobachten, die auf lokal erhöhte Konzentrationen von Alkalien und Sulfat schließen ließen. Da die dynamisch gebrannten Klinker abschließend allerdings kaum noch Alkalien und Sulfat enthielten, muss das Kristallwachstum in den Domänen frühzeitig eingesetzt haben, als die volatilen Bestandteile das System noch nicht verlassen hatten. Abweichend von den statisch gebrannten Klinkern wurden bei den dynamischen Bränden überwiegend Belite der  $\beta$ -Modifikation gebildet. Bei der Dotierung mit Klärschlammasche entstand auch kein röntgenographisch nachweisbarer Phosphat-Belit. Offensichtlich wurde durch die ausgesprochen gute Homogenisierung (relativ hohe Drehzahl des Ofens) auch lokal die Schwellenkonzentration an Phosphat zur Bildung dieser Phase nicht überschritten.

#### **4.5 Coatingbildung**

Die Coatingbildung wurde bei deutlich abgesenkter Temperatur durch die Anwesenheit der Fluffasche nicht intensiviert. Bezüglich der verwendeten basischen Feuerfesterzeugnisse lässt sich bei Prüftemperaturen ab 1450 °C eine Reihenfolge der „Ansatzfreudigkeit“ der vier untersuchten basischen Feuerfesterzeugnisse feststellen: basischer Stein; MgO(FeO reich); Pleonast > basischer Stein; MgO; Hercynit oder Magnesiaspinell > basischer Stein; MgO; Pleonast.

#### **4.6 Feuerfestkorrosion**

##### **4.6.1 Basische Erzeugnisse**

Mittels REM wurden die Kontaktzonen der basischen Erzeugnisse zum Klinker hinsichtlich der Korrosion untersucht, die während der Drehtrommelprüfungen zur Coatingbildung ausgelöst wurde. Besondere Aufmerksamkeit galt den von Klinkerschmelze infiltrierten Bereichen, denn die Infiltration begünstigt Sinterschwindung und chemische Korrosion, die insbesondere die in den Magnesia-Erzeugnissen enthaltenen Spinelle (MA-Spinell, Hercynit, Pleonast) betrifft. Die Spinelle werden als Elastifizierer zugesetzt, sie sollen aber auch die Ansatzbildung erleichtern. Verglichen wurden die Proben nach den Prüfungen bei 1350 und 1500 °C, um den Einfluss der Temperatur auf Infiltration, Sinterung und chemische Korrosion zu beschreiben.

Als Ergebnis der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Korrosion in den basischen Feuerfesterzeugnissen durch die Klinkerbrände mit R1+SF naturgemäß bei 1350 °C geringer ist als bei 1500 °C. Sie hat jedoch auch bei der hohen Prüftemperatur bei keinem der Erzeugnisse ein kritisches Maß erreicht. Allen vier untersuchten basischen Erzeugnissen ist gemein, dass die durch die Versinterung der Matrix verursachte Schwindung durch die Anwesenheit der infiltrierten Klinkerschmelze beschleunigt wird. Durch die Versinterung ver-

größern sich die Matrixbestandteile inklusive der Poren. Je höher die Prüftemperatur, desto intensiver sind Infiltration und Schwindung.

#### 4.6.2 Aluminiumsilikatische Erzeugnisse

Die Prüfungen zur Untersuchung der Korrosion vier verschiedener feuerfester Erzeugnisse auf der Basis  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  in der Drehtrommel-Versuchsanlage wurden bei 1200 °C (betriebliche Normaltemperatur) und 1300 °C (betriebliche Übertemperatur) gegenüber dem Rohmehl-Asche-Gemisch R1+SF durchgeführt. Geprüft wurden die Hochtonerde-Erzeugnisse 5 (Mullit-Korund-Stein), 6 (Andalusit-Stein), 7 (Mullit-Andalusit-SiC-Stein) und 8 (Hochtonerde-Baddeleyit-SiC-Feuerbeton) zunächst bei einer Temperatur von 1200 °C, entsprechend 150 K unterhalb der abgesenkten Klinkerbrenntemperatur. Dies entspricht der zu erwartenden Temperatur vor der Übergangszone eines üblichen Zement-Drehrohrofens bei abgesenkter Brenntemperatur. Im Anschluss erfolgte die Prüfung bei 1300 °C, um die Korrosion im Fall einer betrieblichen Übertemperatur zu untersuchen.

Die Untersuchung der Korrosion der aluminiumsilikatischen Feuerfesterzeugnisse durch R1+SF zeigen, dass bei 1200 °C insbesondere Kalium in die kontaktnahen Bereiche der Feuerfestmaterialien eingelagert wird, ab 1300 °C in deutlich intensiviertem Ausmaß. Dies führt zur Bildung von Kalium-Aluminium-Silikaten. Natrium wird nur in geringerem Umfang in Silikate eingebunden und nur unmittelbar am Kontakt zwischen R1+SF und dem Feuerfestmaterial. Zudem entstehen insbesondere bei 1300 °C auch Schmelzphasen, welche zu geringem Materialverlust führen (<1mm) und das Ankleben von R1+SF fördern. R1+SF befindet sich in einem der Temperatur entsprechenden Brennzustand und wird durch die Schmelzen, die aus der Reaktion mit dem Feuerfestmaterial entstehen, chemisch verändert. Die in den Korrosionszonen durchgeführten EDX-Analysen deuten auf die Bildung von Gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ), Leucit ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ ), Kalsilit ( $\text{KAlSiO}_4$ ), Nephelin ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ) oder anderen typischen Phasen, die bei der Korrosion aluminiumsilikatischer Feuerfesterzeugnisse durch calciumsilikatische, alkalihaltige Systeme gebildet werden können. Die Entstehung dieser Minerale ist typisch für Alkalikorrosion und ist verbunden mit einer Volumenzunahme. Typische Risse, die entsprechend auf Dehnungsprozesse hinweisen, treten verbreitet in den Kontaktzonen der untersuchten Proben auf.

Die in den Prüfungen in der Labor-Drehtrommelanlage festgestellten Korrosionsprozesse sind jedoch oberflächennah und führen hier nicht zu nennenswertem Materialabtrag. Die Bildung von Schmelzphasen im Zuge der Korrosion führte jedoch gelegentlich zu intensiviertem Anhaften von festen Reaktionsprodukten und Rohmehl/Klinker.

#### 4.6.3 Isoliermaterial (Feuerleichtstein)

Während der Untersuchungen in der Labor-Drehtrommelanlage wurde in einer der Drehtrommel nachgeschalteten Prüfkammer feuerfestes Isoliermaterial auf Basis  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  im Abgasstrom eingebracht, welches im betrieblichen Einsatz zur Wärmedämmung in Zement-Drehrohröfen verwendet wird. Hier wurden die Wechselwirkungen der Isoliererzeugnisse mit den Abgasen untersucht, welche erhöhte Anteile an Aschekomponenten wie Alkalien, Chloride und Sulfate enthalten können. An dem Material, das den Abgasen während der Prüfung der Coatingbildung mit R1+SF bei den höchsten Drehtrommeltemperaturen (1500 °C) ausgesetzt wurde, wurden bei einer Temperatur von < 450 °C am Isoliermaterial nur sehr geringe Mengen an Alkalien abgelagert. Die chemische Zusammensetzung der oberflächennahen Schicht des Leichtsteines wurde während der Auslagerung im Abgaskanal fast

nicht verändert gegenüber seiner originalen Zusammensetzung. Die Temperatur reicht zudem nicht aus, um Alkalikorrosion auszulösen.

#### **4.7 Statische Brände mit technischem Rohmehl**

Da sich eine weiterreichende Dotierung des synthetischen Rohmehls als nicht zielführend erwiesen hatte, wurde entschieden, stattdessen Versuche mit einem großtechnisch hergestellten Rohmehl vergleichbarer chemischer Zusammensetzung. Die Versuche erfolgten am Referenzrohmehl sowie nach Dotierung mit Fluffasche, wodurch bei nahezu konstanten Moduli vor allem die Alkali- und Sulfatgehalte erhöht wurden. Insgesamt war die Übertragbarkeit der Ergebnisse der synthetischen Rohmehle auf das technische Rohmehl sehr gut. Ähnlich wie beim synthetischen Rohmehl konnten bereits unterhalb von 1300 °C deutliche Alitgehalte erzeugt werden. Bei 1400 °C zeigte sich der Klinker als abschließend gebrannt, was wieder auf ein mögliches Absenken der notwendigen Prozesstemperatur hinweist. Seine Mikrostruktur war homogener als bei den synthetischen Rohmehlen. Allerdings traten aufgrund einzelner grober Kalkstein- und Quarzpartikel dichte Belit- und Freikalkcluster auf. Neben der Alit-dominierten, feinkörnigen Grundstruktur fanden sich auch im Referenzklinker Domänen mit gröber gesprossenen Alitkristallen. Ein beträchtlicher Anteil des verbleibenden Belits war vermutlich beim Abkühlen in die  $\gamma$ -Modifikation übergegangen. Dieser Effekt war in dem alkalireichen dotierten Klinker nicht zu erkennen, dessen Belitgehalte überwiegend in der  $\alpha'$ -Modifikation vorlagen. Generell waren in diesem Klinker auch die Anteile der gröber strukturierten Partien höher. Wie auch beim synthetischen Rohmehl zeigten sich in der Phasenverteilung der Grundmasse systematische Unterschiede zwischen Referenzklinker und der dotierten Variante. Im Referenzklinker entsprach die Phasenverteilung in etwa den aus dem Tonerdemodul berechneten Werten, während die Dotierung wiederum zu einem überproportional hohen  $C_3A$ -Gehalt führte, der wieder überwiegend in der orthorhombischen bzw. monoklinen Modifikation ausgebildet war.

#### **Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben Nr. 19221 N der VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.