

IGF-Forschungsvorhaben Nr.:	16980 N
Bewilligungszeitraum:	01.06.2012 - 30.11.2014
Forschungsstellen:	VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungsthema:	Prozessstabilisierung bei hohem Sekundärbrennstoffeinsatz durch Sauerstoffeindüsung bei Drehofenanlagen der Zementindustrie

1 Ausgangssituation

Bei der Zementherstellung wird der wesentliche Anteil an thermischer Energie für das Brennen des Zementklinkers in Drehrohröfen aufgewendet. Seit den 1990er Jahren werden die traditionellen Brennstoffe Stein- und Braunkohle in zunehmendem Maße durch Alternativbrennstoffe * substituiert, die im Jahr 2013 einen Anteil von durchschnittlich 62 % erreichten [VDZ 13].

Auf Grund des hohen Energiekostenanteils an den Herstellungskosten für Zement ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, den Bedarf an Brennstoffen und elektrischer Energie zu reduzieren. Da das verfahrenstechnische Potenzial zur Minderung des Energiebedarfs heute praktisch erschöpft ist, konzentrieren sich die Anstrengungen daher auf die Substitution fossiler Brennstoffe. Die stoffliche und energetische Verwertung der Abfälle bei der Verbrennung im Zementdrehofen stellt eine sinnvolle und umweltverträgliche Alternative zur konventionellen Entsorgung wie Deponierung und Müllverbrennung dar.

Bisher werden in den Zementwerken unterschiedliche Substitutionsraten der fossilen Brennstoffe durch Alternativbrennstoffe erzielt. Während einige Zementwerke insgesamt Substitutionsraten von 80 % im Langzeitbetrieb erreichen, kommen andere nicht über 30 bis 40 % hinaus. Die Alternativbrennstoffe unterscheiden sich in ihrem Verbrennungsverhalten von den bisher in der Zementindustrie eingesetzten Brennstoffen und beeinflussen somit den Brennprozess des Zementklinkers. In ungünstigen Fällen – z.B. bei sehr hohen Ersatzbrennstoffraten - bzw. nicht angemessener Anpassung des Ofenbetriebs kann ein solch hoher Alternativbrennstoffeinsatz mit negativen Auswirkungen auf die Prozessstabilität oder auf die Produktqualität verbunden sein.

Eine grundsätzliche technische Möglichkeit, den Alternativbrennstoffeinsatz zu optimieren (bzw. gegebenenfalls auch zu erhöhen), die Prozessstabilität zu verbessern und negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden, stellt die gezielte Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff dar (Sauerstoffeindüsung). Darüber hinaus bietet diese Technologie dem Leitstandsfahrer eine zusätzliche Stellgröße, um schnell auf Prozessschwankungen reagieren zu können. Der Fokus liegt dabei auf der Anwendung in der Drehofenfeuerung, da der Brennstoffeinsatz im Ofeneinlauf und in der Calcinatorfeuerung aufgrund der dortigen Betriebsbedingungen keine Sauerstoffanreicherung erfordert.

* Nomenklatur-Hinweis:

im vorliegenden Bericht wird statt dem Begriff „Sekundärbrennstoff“ der Begriff „Alternativbrennstoff“ verwendet. Beide Benennungen werden als gleichwertige Überbegriffe für die gleiche Gruppe an Brennstoffen verstanden.

Die Sauerstoffanreicherung im Klinkerbrennprozess zur Prozessoptimierung ist eine relativ junge Entwicklung. Sie ist abzugrenzen von der gezielten Sauerstoffanreicherung zu Zwecken der Produktionssteigerung, wie sie seit den 1960er Jahren in einigen US - amerikanischen Zementwerken eingesetzt wird. In Europa begann der Sauerstoffeinsatz zur Prozessoptimierung im Jahr 2008 in zwei deutschen Zementwerken. Die ersten Testversuche waren vielversprechend [EHR 09, LAU 11, MUE 10].

2 Ziele des Forschungsvorhabens

Hauptziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Auswirkungen der Sauerstoffanreicherung von Drehofenflammen in Zementklinkerproduktionsanlagen auf das Produkt Klinker, den Ofenbetrieb und den Alternativbrennstoffeinsatz sowie auf die Abgaszusammensetzung zu evaluieren. Dabei sollten die verfahrenstechnischen Grundlagen dieser Technologie untersucht werden. Im Vordergrund stand der Einsatz von Alternativbrennstoffen aus Industrie- und Gewerbeabfällen (insbesondere Fluff).

Die wesentlichen Einzelziele dieses Forschungsvorhabens waren:

- den Brennprozess bei hohem Alternativbrennstoffeinsatz zu optimieren und damit zu vergleichmäßigen
- den Alternativbrennstoffeinsatz zu erhöhen, und heterogene und niederkalorische Alternativbrennstoffe nutzbar zu machen
- negative Auswirkungen auf die Klinkerqualität und die Abgas-Emissionen zu vermeiden

Der Nutzbarmachung von heterogenen, niederkalorischen und damit minderwertigen sowie schwierig zu verbrennenden Alternativbrennstoffen für den Einsatz im Klinkerbrennprozess wird angestrebt, da die Nachfrage nach den üblicherweise eingesetzten hoch aufbereiteten und hochwertigen Alternativbrennstoffen in den letzten Jahren stark gestiegen ist und infolge dessen auch die Preise für diese Brennstoffe. Da die Brennstoffkosten einen wesentlichen Anteil der Produktionskosten einnehmen, führen steigende Marktpreise zu höheren Produktionskosten, die kaum an den Kunden weitergegeben werden können. Der Einsatz heterogener und niederkalorischer Alternativbrennstoffe kann hingegen dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu stärken. Die Herausforderung besteht dabei in der Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Ofenbetriebes und der Klinkerqualität.

3 Umfang der Untersuchungen

Es wurden Betriebsversuche an zwei Ofenanlagen durchgeführt, die für eine Sauerstoffeindüsung ausgerüstet sind. Die Zugabe des Sauerstoffs erfolgte über Lanzen an der Brennerspitze der Drehofenfeuerung.

Im Rahmen der Betriebsversuche wurden über mehrere Wochen Prozessmessungen vorgenommen und Betriebsmesswerte ausgewertet. Für die Beobachtung der Drehofenflamme kam ein Thermografiesystem mit Auswertung des visuellen Strahlungsspektrums zum Einsatz (siehe auch [EMB 07]). Zudem wurden Klinker- sowie Brennstoff-Proben gezogen und anschließend im Labor analysiert.

Einer der Betriebsversuche wurde an einer Ofenanlage mit Calcinator und Tertiärluftleitung durchgeführt (Ofenanlage A). Bei dieser Ofenanlage wird lediglich ca. die Hälfte der Feuerungswärmeleistung über die Drehofenfeuerung aufgegeben, der Rest über Feuerungen im Calcinator (**Bild 1**). Ein weiterer Betriebsversuch fand an einer konventionellen Ofenanlage ohne Calcinator statt, bei der die Feuerung maßgeblich über die Drehofenfeuerung vorgenommen wird (Ofenanlage B). Im Untersuchungszeitraum erfolgten jeweils mehrere Parametervariationen der Betriebseinstellungen, insbesondere der Sauerstoffeindüsung (**Tabelle 1**).

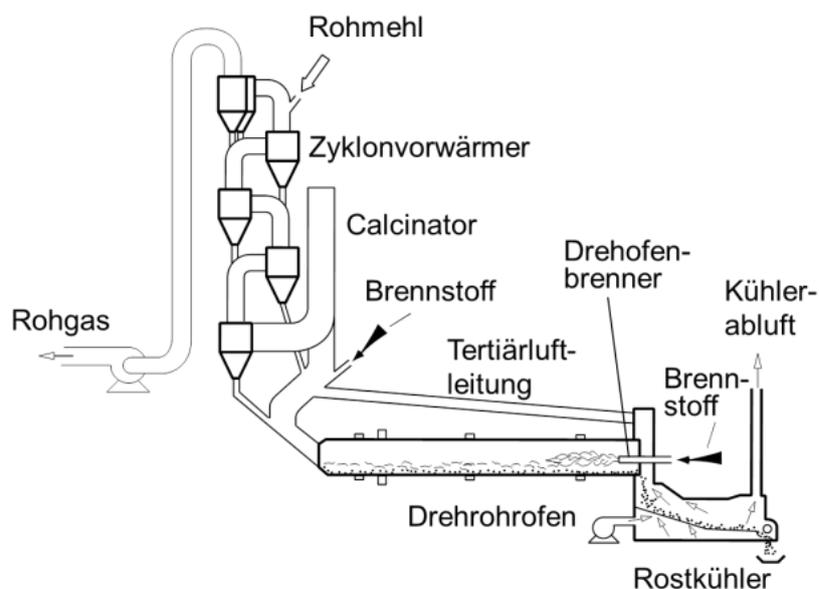


Bild 1 Schematische Darstellung einer Drehofenanlage mit Calcinator

Tabelle 1 Durchgeführte Parameteränderungen der Betriebseinstellungen

Ofenanlage	Parameteränderungen der Betriebseinstellungen	Sauerstoffaufgabemenge	ABS-Rate [% d. ges. FWL]*
Ofenanlage A	Variation der Sauerstoffmenge bei normalem Axial- und Drallimpuls	Variation (0, 600, 1000 kg/h)	ca. 80 %
	Variation der Sauerstoffmenge bei geändertem Axial- und Drallimpuls	Variation (0, 600, 1000 kg/h)	ca. 80 %
	Variation des Sauerstoffsplittings auf die zwei Sauerstoffanlagen	1000 kg/h	ca. 80 %
	Einsatz heterogener und niederkalorischer Brennstoffe in der Drehofenfeuerung	Variation (0, 1000 kg/h)	ca. 80 %
Ofenanlage B	Variation der Sauerstoffmenge, Variation der Fluffart und -rate	Variation (0, 500 kg/h)	75 – 100 %

* ABS = Alternativbrennstoff

ges. FWL = gesamte Feuerungswärmeleistung

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

4.1 Auswirkung der Sauerstoffanreicherung auf die Flamme

Die thermografischen Untersuchungen der Drehofenflamme an Ofenanlage A bestätigten die Hypothese, dass die Sauerstoffzugabe zu einer Verbesserung der Verbrennungsbedingun-

gen in der Flamme führt. Im Einzelnen wurden eine Verringerung der Zündstrecke der Brennstoffe und eine Erhöhung der Flammentemperatur festgestellt. Die Straffung der Flamme bewirkte eine Verkürzung der Vorkühlzone. Eine daraus resultierende gestiegene Heißklinkertemperatur erhöhte die Wärmerekuperation im Klinkerkühler und damit verbunden auch die Sekundärlufttemperatur. Dieser Effekt trat auch auf, wenn eine Anpassung der Flammenform durch Veränderungen des Axial- und Drallimpulses vorgenommen wurde. Bei Ofenanlage B ließen sich die Daten der thermografischen Untersuchung aufgrund Abschattung der Flamme durch hohe Staubentwicklung im Klinkerkühler leider nicht auswerten.

4.2 Auswirkung der Sauerstoffanreicherung auf die Klinkereigenschaften

Die Auswertung aller chemischen und mineralogischen Klinkeranalysen an Ofenanlage A lässt erkennen, dass der Klinker bei Betriebseinstellungen mit Sauerstoffanreicherung einen Trend hin zu höheren Alitgehalten aufwies, verglichen mit den Betriebseinstellungen ohne Sauerstoffzugabe (**Bild 2**). Korrespondierend hierzu sanken die Belitgehalte im Klinker (**Bild 3**). Die Freikalkgehalte unterschieden sich allerdings nicht signifikant. Die Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen an den Klinkerproben mit Hilfe der Lichtmikroskopie lassen vermuten, dass durch den Einsatz von Sauerstoff die Vorkühlzone verkürzt wird und dadurch weniger Alitzerfall und Sekundärbelitbildung bei der Vorkühlung des Klinkers stattfindet. Dieser Effekt konnte bei Ofenanlage B allerdings nicht festgestellt werden.

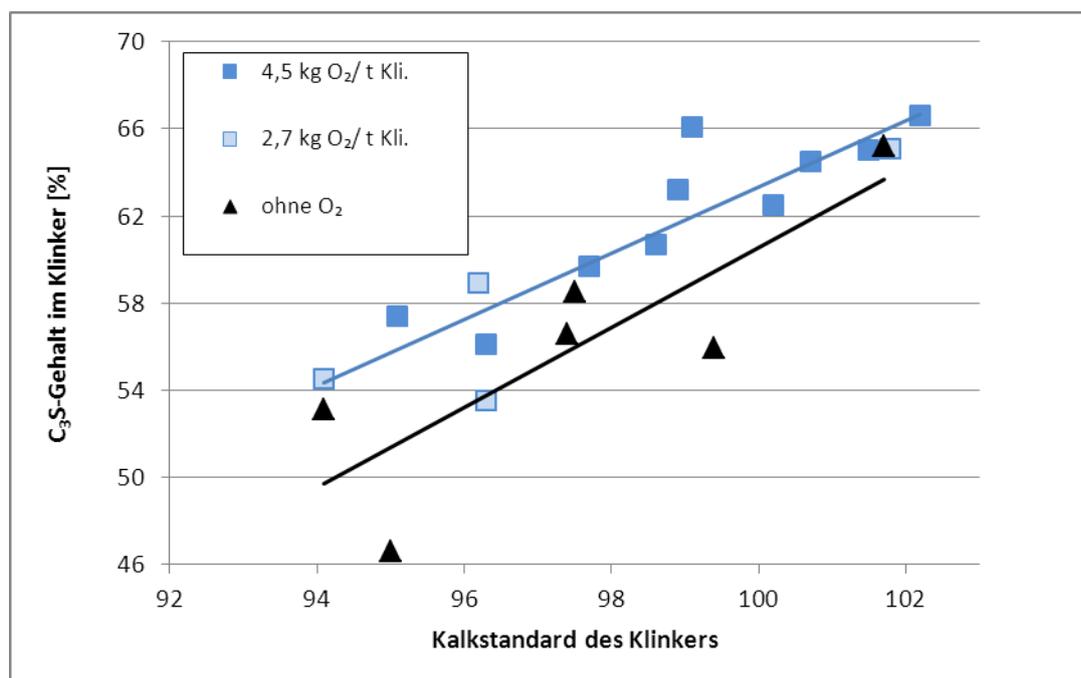


Bild 2 Alitgehalt der Klinker bei den Betriebseinstellungen mit/ohne O₂-Zugabe (Ofenanlage A)

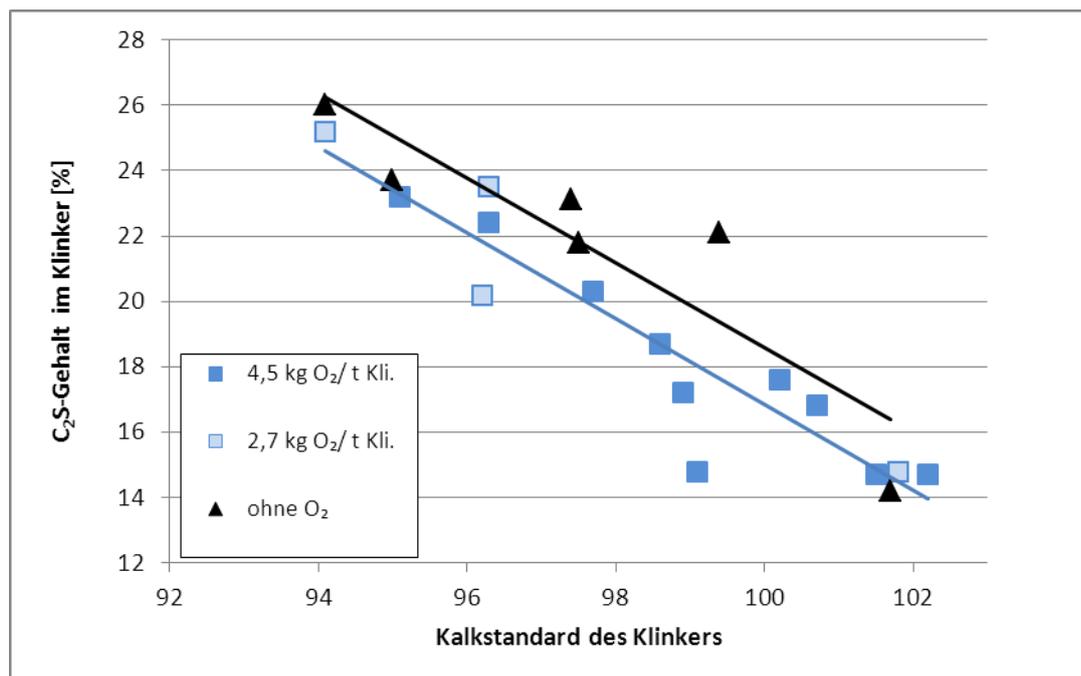


Bild 3 Belitgehalt der Klinker bei den Betriebseinstellungen mit/ohne O₂-Zugabe (Ofenanlage A)

Bei Ofenanlage A wurden bei einer Reihe von Klinkerproben anhand der lichtmikroskopischen Untersuchungen reduzierende Brennbedingungen festgestellt, die darauf zurückzuführen sind, dass größere Brennstoffpartikel in der Flamme nicht vollständig verbrennen und in das Klinkerbett fallen. Die chemischen Analysen ergaben bei genau diesen Klinkerproben erhöhte Eisen-II-Gehalte, die somit ebenfalls als Hinweis auf reduzierende Brennbedingungen anzusehen sind. Die Betriebsversuche haben gezeigt, dass diesen reduzierenden Brennbedingungen durch gezielten Einsatz von Sauerstoff entgegen gewirkt werden kann. Die Sauerstoffzugabe von 1000 kg/h führte zu einer Zunahme der O₂-Konzentration um ca. 1 bis 1,5 Vol.-% am Ofeneinlauf. Die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Drehrohr hatte geringere Eisen-II-Gehalte im Klinker zur Folge.

Bei Ofenanlage B wurden ebenfalls reduzierende Brennbedingungen beobachtet als bei einer Betriebseinstellung die Alternativbrennstoffrate deutlich erhöht wurde.

4.3 Auswirkung der Sauerstoffanreicherung auf die NO-Bildung und CO-Ausbrand

Bei Ofenanlage A wurde bei Anwendung der Sauerstoffeindüsung im Mittel eine Erhöhung der NO_x-Konzentration am Ofeneinlauf um ca. 40% festgestellt. Dieser Effekt trat unabhängig von den Brennereinstellungen (Einstellung des Axial- und Drallimpulses) auf. Ursache für die erhöhte NO-Bildung ist in erster Linie die Zunahme der Flammentemperatur, die vierfach exponentiell in die thermische NO-Bildungsrate eingeht. Teilweise ist der Anstieg auch auf das insgesamt höhere Sauerstoffangebot im Drehrohr zurückzuführen. Bei Ofenanlage B wurde dagegen keine signifikante Zunahme der NO_x-Konzentration am Ofeneinlauf festgestellt. Bezüglich der Auswirkungen der Sauerstoffzugabe auf die NO-Bildung in Ofenanlagen lassen sich daher keine allgemein gültigen Aussagen treffen.

Beide Ofenanlagen betreiben – wie die meisten Drehofenanlagen in Deutschland - als sekundäre NO_x-Minderungsmaßnahme eine SNCR-Anlage. Die Ofenanlage A ist zudem mit einer gestuften Feuerung ausgestattet, die ebenfalls zur prozessintegrierten NO_x-Minderung eingesetzt wird. Durch den Einsatz beider Minderungsmaßnahmen wurde die durch den Sauerstoffstoffeinsatz bedingte Zunahme der NO-Bildung aufgefangen und die derzeit geltenden NO_x-Grenzwerte eingehalten. Im Hinblick auf sich weiter verschärfende Grenzwerte sind die Ergebnisse der Untersuchungen jedoch dahingehend bedeutsam, als dass der Sauerstoffeinsatz bei einigen Ofenanlagen offensichtlich eine gewisse Zunahme der NO-Bildung in der Drehofenfeuerung zur Folge haben kann. In diesem Fall ist mit erhöhtem Aufwand bezüglich der NO_x-Maßnahmen, z.B. mit steigenden Reduktionsmittelverbrauch, zu rechnen.

Hinsichtlich der CO-Konzentrationen am Ofeneinlauf - und damit verbunden hinsichtlich der Qualität des CO-Ausbrandes - haben die Untersuchungen weder Vor- noch Nachteile des Sauerstoffeinsatzes ergeben.

4.4 Effizienz des Sauerstoffeinsatzes bei unterschiedlichen Ofenanlagen

Bei Ofenanlage A handelt es sich um eine Anlage mit Calcinator und Tertiärluftleitung, bei der nur ca. die Hälfte der Feuerungswärmeleistung dem Drehrohrbrenner aufgegeben wird. Trotz doppelter Klinkerkapazität ist bei Ofenanlage A ein vergleichbar großer Brenner mit nahezu der gleichen Brennerluftmenge und der gleichen Feuerungswärmeleistung installiert wie bei Ofenanlage B.

Für einen Vergleich von Ofenanlagen hinsichtlich der Effizienz des Sauerstoffeinsatzes sind deshalb spezifische Werte heranzuziehen. Üblicherweise wird dafür die eingesetzte Sauerstoffmenge auf die Klinkerleistung der Anlage bezogen. Der maximale Sauerstoffeinsatz betrug sowohl bei Ofenanlage A als auch bei Ofenanlage B jeweils 4,5 kg O₂ / t Klinker.

Bezieht man die Sauerstoffmenge hingegen auf die Feuerungswärmeleistung der Drehofenfeuerung (DF), ergeben sich Werte von 12,1 kg O₂/ MW_{DF} (Ofenanlage A) bzw. 5,9 kg O₂/ MW_{DF} (Ofenanlage B). Bei Ofenanlage A ergab sich für die Brennerluft rechnerisch eine Zunahme des Sauerstoffgehalts um 3,7 Vol.-% (20,9 auf 24,6 Vol.-%). In der Flamme wurde die Sauerstoffkonzentration also deutlich angehoben. Bei Ofenanlage B hingegen wurde der Sauerstoffgehalt in der Brennerluft rechnerisch lediglich um 1,8 Vol.-% (von 20,9 auf 22,7 Vol.-%) erhöht.

Entsprechend der höheren Sauerstoffkonzentration in der Brennerluft – und damit am Flammenfuß und im Flammenkern - (bzw. der höheren Sauerstoffzugabe bezogen auf die gleiche Feuerungswärmeleistung) ergeben sich bei Ofenanlage A eine schnellere Zündung der Brennstoffe sowie höhere Temperaturen in der Flamme. Dies ist vermutlich der Grund dafür, dass die Zugabe von 4,5 kg Sauerstoff je Tonne Klinker bei Ofenanlage A bereits ausreichte, um einen positiven Effekt auf die Klinkerqualität zu bewirken, wogegen die gleiche spezifische Menge Sauerstoff bei Ofenanlage B keine signifikanten Auswirkungen zur Folge hatte. An dieser Stelle bestätigte sich die Vermutung, dass der Einsatz von Sauerstoff bei Ofenanlagen mit Tertiärluftleitung als effizienter anzusehen ist als bei Anlagen ohne Tertiärluftleitung.

4.5 Einsatz von heterogenem, niederkalorischem Brennstoff

Der Einsatz eines niederkalorischen und weniger homogenen Brennstoffes - die Substitution von hochkalorischem durch mittelkalorischen Fluff an Ofenanlage A - führte zu einem Absinken der Flammentemperaturen und einer Verlängerung der Zündstrecke. Ursache hierfür war vermutlich in erster Linie der höhere Wassergehalt des Brennstoffes, da bei der Verdampfung des Wassers eine Flammenkühlung auftritt. Wurde gleichzeitig gezielt Sauerstoff aufgegeben, um die Verbrennung zu intensivieren, kam es zwar zu einer Zunahme der Flammentemperatur, die Zündung der Brennstoffe konnte jedoch nicht ausreichend wieder in Brennernähe stabilisiert werden. Entsprechend blieb die Situation im Ofen unverändert, als dass die Vorkühlzone verlängert, die Kühlung verlangsamt und die Sekundärlufttemperatur zu weit abgesenkt war. Die Gefüge-Untersuchung des Klinkers ergab, dass der Schwachbrandanteil des Klinkers deutlich anstieg, auch wenn zusätzlich Sauerstoff zur Unterstützung der Verbrennung eingesetzt wurde. Bei dem mittelkalorischen Fluff werden vermutlich höhere Sauerstoffmengen benötigt. Vor dem Hintergrund, dass der Sauerstoffeinsatz mit hohen Betriebskosten verbunden ist, muss seine Anwendung sorgfältig abgewogen werden.

4.6 Erhöhung des Alternativbrennstoffeinsatzes

An Ofenanlage B wurde eine Erhöhung der Alternativbrennstoff-Rate von 75 auf 100% vorgenommen. Dies führte trotz gezielter Sauerstoffzugabe zu einer Verlängerung der Flamme und zu einer Verschiebung des Wärmeprofiles in Richtung auf den Ofeneinlauf. Ferner trat eine Verlängerung der Vorkühlzone und damit verbunden niedrigere Heißklinker- und Sekundärlufttemperatur. Der Klinker hatte einen relativ hohen Feinanteil, was auf eine schlechte Granulation aufgrund verringerter Sinterzonentemperatur hindeutet.

Die Steigerung der Alternativbrennstoffrate auf 100% führte zu lokal reduzierenden Bedingungen für den Klinkerbrand. Die Gefügeuntersuchungen an Klinkerproben unter dem Mikroskop haben gezeigt, dass im Klinker lokal reduzierenden Brennbedingungen auftraten, die von nicht ausgebrannten Aschepartikel im Klinkerbett herrührten. Offensichtlich waren die Verbrennungsbedingungen nicht optimal, so dass grobe Brennstoffpartikel in der Flamme nicht vollständig verbrannten und in das Klinkerbett fielen. Auch bei zusätzlichem Einsatz von 4,5 kg Sauerstoff je Tonne Klinker traten lokal reduzierende Brennbedingungen auf.

Die Zugabe von Sauerstoff hatte bei Ofenanlage B keine positiven Auswirkungen auf die Klinkereigenschaften. Weder anhand der chemischen und mineralogischen noch anhand der mikroskopischen Analytik wurden signifikante Effekte festgestellt.

4.7 Gleichmäßigkeit des Ofenbetriebes

Eine signifikante Vergleichsmäßigung des Ofenbetriebes durch die gezielte Zugabe von Sauerstoff wurde nicht festgestellt. Bei Ofenanlage B wurden während des auf 100% erhöhten Alternativbrennstoff-Einsatzes deutliche Schwankungen der Ofenantriebsleistung und anderer Betriebsparameter festgestellt, was als Indikator für einen sehr unruhigen Ofengang zu sehen ist. Der Einsatz von Sauerstoff zur Unterstützung der Verbrennung ergab keine nachweisbare Vergleichsmäßigung. Erst nachdem die Alternativbrennstoffrate an der Drehofenfeuerung reduziert und das Luftangebot in der Drehofenfeuerung erhöht wurde, nahmen die Schwankungen signifikant ab. Vermutlich waren die an Ofenanlage B eingesetzten Sau-

erstoffmengen zu gering, um sich signifikant auf den Ofenbetrieb auszuwirken. Bei Ofenanlage A ließ sich aufgrund der kurzen Zeiträume der einzelnen Betriebseinstellungen keine Auswertung bezüglich des Ofenbetriebes durchführen.

4.8 Variation der Aufgabe des Sauerstoffs über mehrere Lanzen

Bei Ofenanlage A erfolgte die Zugabe des Sauerstoffes zur Brennerluft über zwei Lanzen, die im Brenner links und rechts von der Brennerachse verlaufen. Bei üblicher Betriebsweise der Anlage wurden 30 % des Sauerstoffs auf diejenige Lanze gegeben, die auf der klinkerfallenden Seite positioniert ist, der restliche Anteil auf die andere Lanze. Im Rahmen der Betriebsuntersuchungen wurde festgestellt, dass sich eine Umkehrung dieses Sauerstoffsplittings nachteilig auf die Klinkereigenschaften auswirkt. Anhand der Gefüge-Untersuchung des Klinkers wurden bei dieser Betriebseinstellung Hinweise auf eine Verlängerung der Vorkühlzone, eine Verlangsamung der Kühlung und eine Erhöhung des Schwachbrandanteils im Klinker gefunden. Zwar wurde keine signifikante Verringerung der Sekundärlufttemperatur beobachtet, die NO-Bildung sank jedoch leicht ab. Es ist zu vermuten, dass die am Ofenkopf vorliegenden unsymmetrischen Temperatur- und Strömungsprofile der Sekundärluft zu einer unsymmetrischen Anströmung des Brenners und der Flamme führen (bedingt durch den unsymmetrischen Abwurf des Ofens hinsichtlich Menge und Feinheit in den Klinkerkühler). Die thermografische Untersuchung ergab in dieser Hinsicht leider keine genaueren Erkenntnisse über Flammentemperatur und Zündstrecke.

5 Kurzzusammenfassung

Eine grundsätzliche technische Möglichkeit, den Alternativbrennstoffeinsatz zu optimieren bzw. zu erhöhen, stellt die gezielte Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff dar. Hauptziel des Forschungsvorhabens war es, die Auswirkungen der Sauerstoffanreicherung auf das Produkt Klinker, den Ofenbetrieb und den Alternativbrennstoffeinsatz sowie auf die Abgaszusammensetzung zu evaluieren. Vom Forschungsinstitut wurden dazu über mehrere Wochen umfangreiche Messungen im Rahmen zweier Betriebsversuche an Drehofenanlagen der Zementindustrie durchgeführt.

Für die Betreiber von Zementdrehrohröfen wurden wichtige Erkenntnisse, sowohl hinsichtlich der Möglichkeiten als auch hinsichtlich der Grenzen des Verfahrens gewonnen. Die Sauerstoffzugabe bewirkt insbesondere eine Intensivierung der Verbrennung und unterstützt die Zündung der Brennstoffe, was wiederum zu einer Verkürzung der Vorkühlzone im Bereich des Drehofenauslaufs führt. Alitzerfall und Sekundärbelitbildung werden als Folge verringert. Die Sauerstoffanreicherung wirkt zudem lokal reduzierenden Brennbedingungen entgegen. Allerdings wurde eine Zunahme der NO_x-Bildung in der Drehofenfeuerung festgestellt.

Die Untersuchungen an einer Ofenanlage haben gezeigt, dass eine Verbesserung der Klinkereigenschaften durch Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft erzielt werden konnte. An einer anderen Ofenanlage war dies jedoch mit der im Betriebsversuch eingesetzten Sauerstoffmenge nicht erreichbar - vermutlich wären höhere Mengen erforderlich. Die Betriebsversuche ergaben ferner, dass der Einsatz von Sauerstoff bei Ofenanlagen mit Vorcalcinier-technik und Tertiärluftleitung effektiver ist, als bei konventionellen Ofenanlagen, da bei gleicher spezifischer O₂-Menge höhere Sauerstoffkonzentrationen in der Flamme erreicht

werden können. Vor dem Hintergrund, dass der Sauerstoffeinsatz mit hohen Betriebskosten verbunden ist, muss seine Anwendung sorgfältig abgewogen werden.

6 Literatur

- [EHR 09] Ehrenberg, Christopher et al.: Optimisation of the combustion of secondary fuels by O₂ enrichment. Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing : 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.-02.10.2009). Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2009, S. 190-193.
- [EMB 07] Emberger, Bernhard; Hoenig, Volker: Optimierung der Drehofenfeuerung in Zementwerken bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen:Flammenthermografie zur Untersuchung des Einflusses der Brennereinstellung und der Brennstoffe auf Drehofenflammen; 23. Deutscher Flammentag; VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.) – Düsseldorf: VDI-Verl., 2007 – (VDI-Berichte Nr. 1988)
- [LAU 11] Laux, Stefan; Mocsari, Jeff: Oxygen-enhanced combustion of alternative fuels. Global Cement Magazine (2011) Feb, pp. 33-36.
- [MUE 10] Müller-Pfeiffer, Michael: Einsatz von Sauerstoff zur Optimierung des Ausbrands von Sekundärbrennstoffen. VDZ : Fachtagung Zementverfahrenstechnik (Düsseldorf, 11.02.2010).
- [VDZ 13] Verein Deutscher Zementwerke: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie; Verein Deutscher Zementwerke e.V.; Düsseldorf; 2013

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 16980 N der Forschungsvereinigung VDZ gemeinnützige GmbH – VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.