

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15249
Bewilligungszeitraum: 01.07.2007 - 30.06.2009
Forschungsthema: **Optimierung der Verbrennung und Steigerung der Substitutionsrate von Sekundärbrennstoffen in der Hauptfeuerung von Drehofenanlagen der Zementindustrie**

1 Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Drehofenfeuerungen

Bei der Zementherstellung wird der wesentliche Anteil an thermischer Energie für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. Die traditionellen Brennstoffe in Zementdrehofenanlagen sind Stein- und Braunkohle sowie im geringen Umfang auch Heizöl. Seit den 1990er Jahren wird Kohle in zunehmendem Maße durch Sekundärbrennstoffe substituiert. Deren Anteil am gesamten thermischen Energieeinsatz steigt kontinuierlich an und erreichte im Jahr 2008 durchschnittlich 53 % (VDZ 2009).

Zur Befuerung von Zementdrehofenanlagen wird heute ein Mix aus verschiedenartigen natürlichen Brennstoffen und Sekundärbrennstoffen verwendet. Die in der deutschen Zementindustrie eingesetzten Sekundärbrennstoffe werden eingeteilt in flüssige Brennstoffe wie Altöl und Lösungsmittel, feste flugfähige Brennstoffe, zum Beispiel Holz- und Kunststoffabfälle, aufbereitete Fraktionen aus Industrie-, Gewerbe- und Siedlungsabfällen, Tiermehl oder Klärschlamm, sowie feste grobstückige Brennstoffe; hierzu zählen vor allem Altreifen. Die Zementwerke können allerdings nur solche Abfälle als Sekundärbrennstoffe einsetzen, die die Produktqualität, den Ofenbetrieb sowie die Umweltverträglichkeit der hergestellten Produkte und des Herstellungsprozesses nicht beeinträchtigen. Sie werden in der Regel speziell für den Einsatz im Klinkerbrennprozess aufbereitet.

Niederkalorische Brennstoffe sind vor allem für den Einsatz im Calcinator mit Prozesstemperaturen zwischen 850 und 1100 °C geeignet. Stückige Brennstoffe können ausschließlich im Ofeneinlauf eingesetzt werden. Höherkalorische Brennstoffe, die zugleich flugfähig sein müssen, eignen sich für die Drehofenfeuerung.

Bisher werden in den Zementwerken unterschiedliche Substitutionsraten der fossilen Brennstoffe durch Sekundärbrennstoffe erreicht. Während einige Zementwerke insgesamt Substitutionsraten von 80 % im Langzeitbetrieb erreichen, kommen andere nicht über 30 bis 40 % hinaus. Die Sekundärbrennstoffe unterscheiden sich in ihrem Verbrennungsverhalten von den bisher in der Zementindustrie eingesetzten Brennstoffen und beeinflussen somit den Brennprozess des Zementklinkers. Bisher optimieren die Anlagenbetreiber die Feuerung ihrer Drehofenanlagen individuell für ihren Brennstoffmix und ihre eingesetzten Sekundärbrennstoffe. Die in einem Try-and-Error-Verfahren geprägten Optimierungsvorgang gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse sind nur werkspezifisch und in engen Grenzen anwendbar und auf andere Ofenanlagen übertragbar.

Die Betriebserfahrungen an vielen Ofenanlagen zeigen, dass hohe Substitutionsraten vom Regelbrennstoff Kohle durch Sekundärbrennstoffe zu veränderten Flammenformen und gestreckten Temperaturprofilen in der Sinterzone führen und damit Auswirkungen auf die Klinkerqualität und Schadstoffentwicklung haben können.

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.

Die überwiegende Befeuerung von Calcinatoren mit Sekundärbrennstoffen ist Stand der Technik. Calcinatoren werden entweder ausschließlich mit Sekundärbrennstoffen befeuert oder es wird noch eine mit Regelbrennstoffen (Kohle) beschickte Stützfeuerung mit geringem Feuerungswärmeanteil als Steuerungsinstrument eingesetzt. Ofeneinlauffeuerungen werden ausschließlich mit stückigen Sekundärbrennstoffen betrieben.

Eine weitere Substitution fossiler Brennstoffe durch Sekundärbrennstoffe kann daher häufig nur noch in der Drehofenfeuerung erfolgen. Die hohen Prozesstemperaturen und ein in nur engen Grenzen variierbares Temperaturprofil stellen hohe Anforderungen an die Drehofenfeuerung. Diese Feuerung wird einerseits durch die Brennerkonstruktion und die Verbrennungsluftführung, jedoch auch wesentlich durch die Qualität der eingesetzten Brennstoffe beeinflusst.

Technisch-wissenschaftliche Untersuchungen zur Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen liegen bisher nur aus einem von der Zementindustrie finanzierten und bei der International Flame Research Foundation, kurz IFRF, in den 1990er Jahren durchgeführten Forschungsprojekts vor (IFRF 1998). Die in einem Modellofen durchgeführten sogenannten Cemflame 3-Versuche waren jedoch auf maximale Substitutionsraten von 10 bis 40 % begrenzt und beschränkten sich auf die Variation des Brennertyps und der Primärluftführung. In der Zwischenzeit werden in der industriellen Praxis deutlich höhere Substitutionsraten angestrebt und zum Teil schon gefahren. Hierzu liegen keinerlei technisch-wissenschaftliche Untersuchungen vor. Allgemeine Erkenntnisse über die Einstellung der Drehofenfeuerung in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Sekundärbrennstoffe und des Brennstoffmixes fehlen hingegen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Verbrennung von festen flugfähigen Brennstoffen – gegebenenfalls im Brennstoffmix mit flüssigen Sekundärbrennstoffen – in der Hauptfeuerung des Drehrohrofens untersucht und optimiert.

2 Flammenoptimierung für die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen

Das Hauptziel dieses Forschungsvorhabens lag in der Optimierung der Betriebseinstellungen von Drehofenbrennern der Zementindustrie bei hohem Sekundärbrennstoffeinsatz. Beispielhaft am Fluff sollten Betriebseinstellungen gefunden werden, die bei gleichbleibender Produktqualität, niedrigen Schadstoffemissionen und ohne Beeinträchtigungen des Ofenbetriebs die Erhöhung der Substitutionsrate von Sekundärbrennstoffen deutlich über 40 bis 50 % in der Hauptfeuerung hinaus ermöglichen.

Auf technisch-wissenschaftlicher Basis sollten die Auswirkungen der Brennereinstellungen und Brennstoffe auf die Flamme und den Klinker untersucht werden. Die Erkenntnisse aus der aktiven Flammengestaltung und die Wirkung auf den Klinker und Ofenbetrieb wurden

den Betreibern von Drehofenanlagen bereit gestellt, damit diese ihre Ofenfeuerung für ihren spezifischen Brenner und Brennstoffmix zielgerichtet und individuell anpassen und damit letztlich höhere Substitutionsraten als bisher fahren können.

Um das Forschungsziel zu erreichen, waren verschiedene Forschungsergebnisse angestrebt. Einerseits sollten die Auswirkungen und Abhängigkeiten der Sekundärbrennstoffe auf die Flammenform und die Klinkerqualität bei hohen Substitutionsraten systematisch untersucht und beschrieben werden. Hierbei sollten die Brennstoffeigenschaften der Sekundärbrennstoffe, insbesondere des Fluffs, als auch des gesamten Brennstoffmixes berücksichtigt werden. Andererseits sollten die Gestaltungsmöglichkeiten der Flamme durch die Primärluft in der industriellen Praxis erfasst werden. Von Interesse waren hierbei die Ausströmgeometrie und die Primärluftimpulse am Brennermund sowie der Brennertyp.

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse (Wirkung der Brennstoffe auf die Flamme und der Gestaltungsmöglichkeiten der Flamme) sollten dann in Form verallgemeinerbarer Leitlinien der Zementwerksbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Neben den verbrennungstechnischen Fragen sollten auch solche zur Schadstoffbildung und zu Auswirkungen auf den Ofenprozess infolge der aktiven Flammengestaltung und Änderung der Brennstoffeigenschaften beantwortet werden.

Erstmalig sollten in der industriellen Praxis technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse über die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen mit Substitutionsraten deutlich über 40 bis 50 % in der Hauptfeuerung gewonnen werden. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, hat durch zielgerichtete Untersuchungen den Einfluss der Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen auf die Flamme und den Klinker sowie die Möglichkeiten der Flammengestaltung erfasst.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen an drei Ofenanlagen durchgeführt. Beispielhaft am Fluff als Repräsentant der Sekundärbrennstoffe wurden die wesentlichen Parameter, die die Substitutionsrate beeinflussen, systematisch untersucht. Die Untersuchungsmatrix enthält als Parameter die

- Variation des Brennstoffmixes,
- Variation der Brennstoffeigenschaften des Fluffs,
- Variation der Brenneinstellungen (Ausströmsystem) und des Brennerdesigns (Brennertyp)
- Variation des Primärluftimpulses und Aufteilung in Axial- und Drallimpuls.

Untersuchungsgegenstand waren in erster Linie die Flamme und das Produkt Klinker. Nebenbei wurden auch die Auswirkungen auf den Ofenbetrieb und die Emissionen betrachtet.

An drei Zementdrehofenanlagen mit unterschiedlichen Brennertypen wurden Betriebsversuche von etwa zwei Wochen Dauer durchgeführt. Mit Hilfe eines Thermographiesystems wurde die Temperaturverteilung im Brennernahbereich erfasst und charakterisiert. Das Flammenbild bei unterschiedlichen Betriebseinstellungen war hierbei von Interesse. Für die drei unterschiedlichen Brennertypen wurde untersucht:

- Unterschiedliche Substitutionsraten des Sekundärbrennstoffs Fluff, bei – nach Möglichkeiten des Werks – unterschiedlichen Qualitäten des eingesetzten Fluffs.
- Variation des Primärluftimpulses in axialer, radialer und tangentialer Richtung sowie des Gesamtimpulses. Je nach Brennertyp und Ausströmsystem erfolgt die Einstellung der

Impulse durch den Primärluftmassenstrom oder durch die Austrittsgeschwindigkeit bzw. -richtung der Primärluft.

- Optimierung des Brennstoffmixes, z. B. durch Zufeuerung eines schnellzündenden Sekundärbrennstoffs, um einem ungewollten Zündverzug oder einer Flammenverlängerung entgegenzuwirken.
- An einer Ofenanlage wurde ein Brennerwechsel messtechnisch begleitet (Messung vor und nach Brennerwechsel).

Während der Betriebsversuche wurden eine Vielzahl an ein- und ausgehenden Material- und Gasströmen beprobt und quantitativ erfasst. Im Wesentlichen beinhaltete das Messprogramm

- die Messung oder kontinuierliche Erfassung von Massen- und Volumenströmen und z. T. deren Temperaturen (Brennstoffe, Primär- und Förderluft, Rohgas, Bypassgas),
- die kontinuierliche Erfassung der Konzentrationen von O₂, NO, NO₂, SO₂, CO und CO₂ (Ofeneinlauf, Vorwärmer, Rohgas) zur Bewertung des Ausbrands sowie zur Bestimmung der Emissionen und Beurteilung des Anlagenbetriebs,
- die Erfassung der Temperaturverteilung auf der Ofenwand zur Beurteilung der Flammenlänge und des Temperaturprofils im Drehrohrföfen.

Während der Betriebsversuche wurden die hergestellten Klinker beprobt. Die Klinkerproben wurden anschließend in den institutseigenen Laboren bezüglich Klinkermineralogie und Zementeigenschaften untersucht.

Die heute im Betrieb befindlichen Brenner sind durch eine Vielzahl an Lanzen, Rohren und Ringkanälen charakterisiert, die flexibel die Verbrennung von festen gemahlene und grobstückigen, flüssigen und pastösen sowie gasförmigen Brennstoffen ermöglichen (STEINBIß 1982, COLLENBUSCH und WALDBAUER 1983, HOCHDAHL 1986, KNOCH 2004, ECRA 2005).



Bild 1

Flamme mit hohem Axialimpuls und ohne Drall.
– Deutlich sichtbar ist die zur Flammenachse parallel ausgebildete Flammenform (IFRF 1998)



Bild 2

Flamme mit geringem Axialimpuls und hohem Drall. – Am Zündpunkt lässt sich die Rotation der Flamme erkennen (IFRF 1998)

Diese Mehrkanal- und Vielbrennstoffbrenner sind vom Funktionsprinzip modifizierte und erweiterte Dreikanalbrenner. Die Flammenform wird durch eine Kombination von Axialstrom, Divergenz und Rotation der Primärluft eingestellt. Die kohlenstaubbeladene Förderluft strömt axial oder mit schwacher Divergenz aus dem Kohlenstaubkanal aus. Im Drallluftkanal fächern Divergenz- und Rotationskörper die Drallluft auf und versetzen diese in eine Rotations-

(oder Spiral-) Strömung. Die Axialluft wird mit hohem Austrittsimpuls in den Ofenraum geblasen. Mit dem Ausströmsystem am Brennermund lässt sich die Länge, Divergenz und Rotation der Flamme einstellen (**Bild 1** und **Bild 2**). Aus den beiden Luftströmen wird ein die Flammenform beeinflussender resultierender Luftstrom erzeugt (ECKELMANN 1979, STEINBIß 1982, SCHUBERT 1982, LEDERER 1993).

3 Einfluss der Betriebseinstellung des Brenners auf die Drehofenfeuerung

3.1 Brennertechnologie

Bei den heute in Zementdrehöfen eingesetzten Brennern sind drei Typen Stand der Technik:

- Typ A: Um den inneren Drallluftkanal (**Bild 3**) befindet sich der Brennstoffkanal. Der Axialkanal umschließt den Brennstoffkanal. Durch die innenliegende Drallluft wird der Brennstoff mit hoher Turbulenz in die sauerstoffreiche Flammenhülle eingemischt. **Bild 7** zeigt einen Brenner vom Typ A einer neueren Generation. Die Anordnung der Kanäle ist gleich, jedoch wird die Axialluft mit hohem Druck über Jetstrahlen eingeblasen.
- Typ B: Der Drallluftkanal umschließt den inneren Brennstoffkanal. Der Axialluftkanal liegt außen (**Bild 4**).
- Typ C1: Um den inneren Brennstoffkanal liegt der einzige Primärluftkanal. Ein zur Brennerachse symmetrischer, verstellbarer Düsenkopf prägt der Primärluftströmung Divergenz und Rotation auf (**Bild 5**).
- Typ C2: Eine weitere Variation eines Brenners mit nur einem Primärluftkanal stellt die Anordnung des Kohlekanals außerhalb der Primärluftdüsen dar (**Bild 6**).

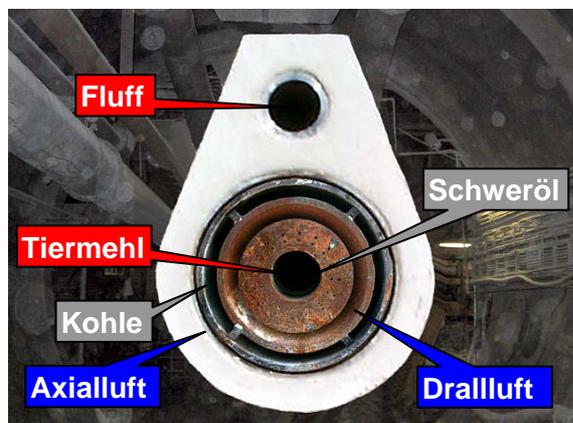


Bild 3

Brennertyp A: Rotaflam Brenner (altes Modell) der Pillard Feuerungssysteme GmbH, Taunusstein. – Bei diesem Brenner wird der Fluff über eine separate Lanze zugeführt.

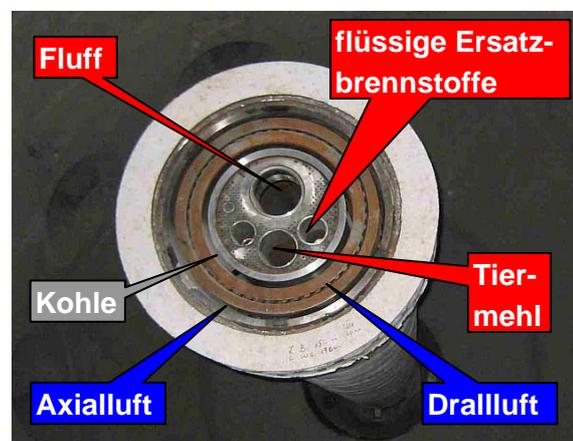
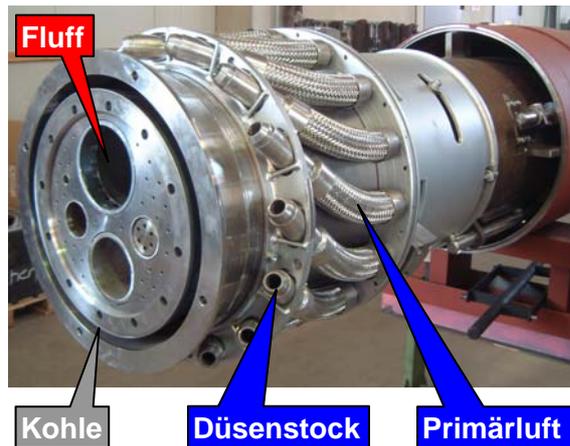


Bild 4

Brennertyp B: Rotaflam Brenner (neues Modell) der Pillard Feuerungssysteme GmbH, Taunusstein.

**Bild 5**

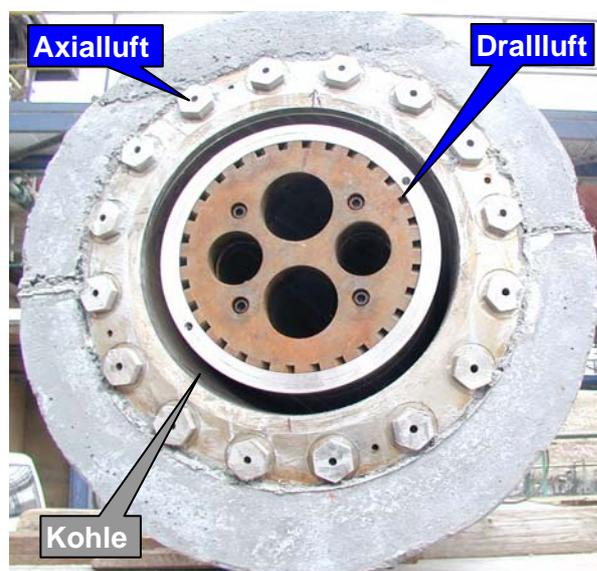
Brennertyp C1: M.A.S.-Brenner der Unitherm Cemcon Firing Systems GesmbH, Wien.

**Bild 6**

Brennertyp C2: Polflame-Brenner der Polysius AG, Beckum

Das innere Zentralrohr dient zur Aufnahme von Zünd- und Flüssigbrennstoffanlagen, als auch von Rohren für stückige und pastöse Sekundärbrennstoffe (AIF Nr. 1101N 1997, IFRF 1992, HOENIG und GAJEWSKI 1994, LEDERER 1993, SCHNEIDER 1976, PICCIOTTI und GRECO 2001).

Das Ausströmsystem des Brennermunds gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Beim verstellbaren Ausströmsystem sind die Kanalrohre verschiebbar zueinander angeordnet. Durch geeignete Gestaltung des Ausströmsystems lassen sich die Öffnungsflächen und Austrittswinkel der Ringspalte verändern. Dies ermöglicht die Anpassung von Austrittsimpuls und Drall der Primärluft bei Konstanz von Primärluftanteil und Volumenstrom. Beim starren Ausströmsystem sind die Flächen und Winkel konstruktiv gegeben, und Austrittsimpuls und Geschwindigkeit der Primärluft wird über den Volumenstrom geregelt.

**Bild 7**

Brennertyp A mit starrem Ausströmsystem und Düsenöffnungen: Pyrojet-Brenner der KHD Humboldt WEDAG, Köln

Die festen stückigen Sekundärbrennstoffe werden durch ein Rohr in der Mitte des Brenners in den Kern der Flamme geblasen. Bei manchen Brennern prägt eine Swirluft am Rohrende den Brennstoffströmen einen Drall auf. Dieser führt zu einer Aufweitung des Brennstoffstrahls an der Brennerspitze, womit die Brennstoffpartikel in die Flammenhülle eingemischt werden.

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden insgesamt vier Betriebsversuche an drei Ofenanlagen der Zementindustrie durchgeführt. Dabei wurden die unterschiedlichen Untersuchungsgegenstände je nach technischen und betrieblichen Möglichkeiten unter den Werken aufgeteilt. Nicht an jeder Drehofenanlage waren alle Untersuchungen durchführbar, was auch den Rahmen des Forschungsvorhabens überschritten hätte. Die **Tabelle 1** listet die vorgesehenen Untersuchungen sowie die Durchführung in den jeweiligen Werken auf.

Tabelle 1 Untersuchungsmatrix und durchgeführte Versuche in den Zementwerken

Untersuchungen	Werk A	Werk B	Werk C
Methodik			
Variation der Brennstoffmischung	Fluff, Kunststoff-agglomerate, Lösemittel	Fluff, Kohle	nein
Variation der Brennstoffeigenschaften des Fluffs	Fluff, Kunststoff-agglomerate	nein	nein
Variation der Brennereinstellung (Ausströmsystem)	Typ A (Innendrall), Typ B (Außendrall)	Typ A (Innendrall)	Typ B (Außendrall)
Variation des Primärluftimpulses (Gesamt-, Axial- und Drallimpuls)	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls
Brennerdesign	Pillard Rotaflam	Rockteq Low-NO _x -Brenner	Pillard Rotaflam, Pillard Rotaflam RV2
Betriebsversuche			
Substitutionsraten des Fluffs	Variation zwischen 26 % und 56 %	0 %, Steigerung von 36 % auf 47 %	etwa 60 %
Qualität des Fluffs	Fluff, Kunststoff-agglomerate	nein	nein
Variation des Primärluftimpulses (Gesamt-, Axial- und Drallimpuls)	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls	Gesamtimpuls, Axialimpuls, Drallimpuls
Zufeuern schnellzündender Sekundärbrennstoffe	Lösemittel	nein	nein
Brennerwechsel	nein	nein	Pillard Rotaflam (Niederdruck), Pillard Rotaflam RV2 (Hochdruck)

Die Variation des Primärluftimpulses und die Aufteilung auf die unterschiedlichen Brennerluftströme konnte an jedem Brenner durchgeführt werden, da dies das wesentliche Leistungsmerkmal eines Brenners ist. Bei der Variation des Ausströmsystems wurden die Brennertypen A und B untersucht.

3.3 Beschreibung der Produktionsanlagen und der Feuerungssysteme

Bei der Ofenlinie im Zementwerk A handelt es sich um eine Wärmetauscheranlage mit einer für Deutschland typischen Anlagengröße von etwa 3000 t Klinkerproduktion täglich. Die Anlage besteht aus Vorwärmer, Drehrohrofen und Klinkerkühler.

Die Drehofenanlage des Zementwerks A wird mit zwei Feuerungen betrieben. Die Ofeneinlauffeuerung erbringt im Normalbetrieb etwa 35 %, die Hauptfeuerung am Ofenauslauf etwa 65 % der Feuerungswärmeleistung der Drehofenanlage. In der Ofeneinlauffeuerung werden Gummischnitzel und Altreifen am Stück als Brennstoffe eingesetzt. In der Hauptfeuerung wird ein Brennstoffgemisch aus Braunkohlenstaub, Fluff, Kunststoffagglomeraten und Lösemittel verbrannt.

Die Hauptfeuerung wird mit einem Rotaflam-Brenner von Pillard Feuerungen GmbH, Taunusstein, betrieben. Der Drehofenbrenner trägt das Brennstoffgemisch in die Flamme ein und vermischt es mit der sekundären Verbrennungsluft.

Die Produktionsanlage zur Klinkerherstellung im Zementwerk B besteht aus einem zwei-strängigen, vierstufigen Zyklonvorwärmer, einem Vorcalcinator mit verlängertem Schacht, Oberluft und zwei Brennkammern, dem Drehrohrofen und einem Rostkühler. Am Ofenkopf wird Tertiärluft für die Calcinatorbrennkammern und die Oberluft entnommen. Mit einer Klinkerleistung von 6000 t Klinker am Tag zählt diese Anlage zu den großen Ofenanlagen.

Die Ofenanlage des Zementwerks B wird mit einer Drehofen-, einer Ofeneinlauf- und zwei Calcinatorfeuerungen betrieben. Die Calcinatorfeuerungen tragen etwa 33 %, die Ofeneinlauffeuerung 9 % und die Drehofenfeuerung 58 % zur Gesamtfeuerungswärmeleistung der Ofenanlage bei. Die Kohle in der Calcinatorfeuerung trägt rund 10 % und feste Sekundärbrennstoffe ebenfalls in der Calcinatorfeuerung 23 % bei. Die Ofeneinlauffeuerung wird mit Ganzreifen betrieben. Die Drehofenfeuerung wird mit 36 % Kohle und 22 % hochkalorischen festen Sekundärbrennstoffen befeuert.

Für die Drehofenfeuerung wird ein Low-NO_x-Brenner der Rockteq International GmbH, Illertissen, genutzt. Der Brenner trägt das Brennstoffgemisch in die Flamme und vermischt es mit der Sekundärluft.

Die Ofenanlage des Zementwerks C hat eine tägliche Klinkerleistung von 1400 t/d. Mit dieser Leistung gehört sie zur Gruppe der kleinen Anlagen. Die Anlage besteht aus einem einsträngigen vierstufigen Vorwärmer, dem Drehrohrofen und einem Zweischichtrostkühler.

Die Drehofenfeuerung bringt als einzige Wärmequelle die Brennstoffenergie in den Klinkerbrennprozessen. Sowohl der alte als auch der neue Brenner stammen von Pillard Feuerungen GmbH, Taunusstein. Das alte Modell ist ein Mitteldruckbrenner vom Typ Rotaflam. Er wird mit maximalen Brennerluftdrücken von 180 mbar betrieben. Das neue Modell ist ein Hochdruckbrenner mit Betriebsdrücken bis 340 mbar und trägt die Bezeichnung Rotaflam RV2.

3.4 Ergebnisse aus den Betriebsversuchen

3.4.1 Ergebnisse der thermografischen Untersuchungen

Die Ausströmgeometrie des Brennermunds und die Austrittsgeschwindigkeiten der Luft- und Brennstoffströme beeinflussen die Flammenform und die Verbrennung. Mit der Brennerluft lässt sich die Flamme aktiv gestalten und die Verbrennung steuern.

Sowohl die Primärluftmenge als auch der Impulsstrom in axialer Richtung des brennstoffbeladenen Primärluftstrahls beeinflussen wesentlich die Mischungsintensität des Brennstoffs mit der Sekundärluft. Die hohe Geschwindigkeitsdifferenz führt zu einer hohen Turbulenz und Sogwirkung der Sekundärluft in die Flamme. Die Luftmenge und Turbulenz beeinflusst die Gesamttemperatur der Flamme sowie die Flammenlänge und die Lage des Temperaturmaximums. Je höher der Impulsstrom, desto kürzer ist die Flamme und desto näher liegt das Temperaturmaximum am Ofenauslauf. Die Brennerluftmenge und der axiale Impulsstrom werden im Wesentlichen durch die Axialluft dominiert. Axialluft- und Impulsmenge haben nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf den Flammendurchmesser.

Die Flammenbreite und Rotation werden durch radiale und tangentiale Richtungskomponenten der Brennerluft bestimmt. Hierfür dient ausschließlich die Drall- oder Tangentialluft. Die Menge und Austrittsgeschwindigkeit dieses Luftstroms variieren den Divergenzkegel und die Rotationsstärke, mit der die Primärluft und die Brennstoffe aus dem Brennermund austreten. Durch den Tangentialanteil wird dem Primärluftstrahl eine Rotation aufgeprägt, die sich auf die Flamme fortpflanzt. Die Rotation dient zur Verdrallung der Flamme.

Die Minderung des Flammendralls zeigt deutlich Wirkung auf die Flammenform und die Temperaturverteilung auf der Flammenhülle. Die Thermogramme in **Bild 8** zeigen beispielhaft sowohl die Änderungen in den ersten Minuten nach der Umstellung der Brennerlüfte als auch über einen Zeitraum von etwa einer Stunde.

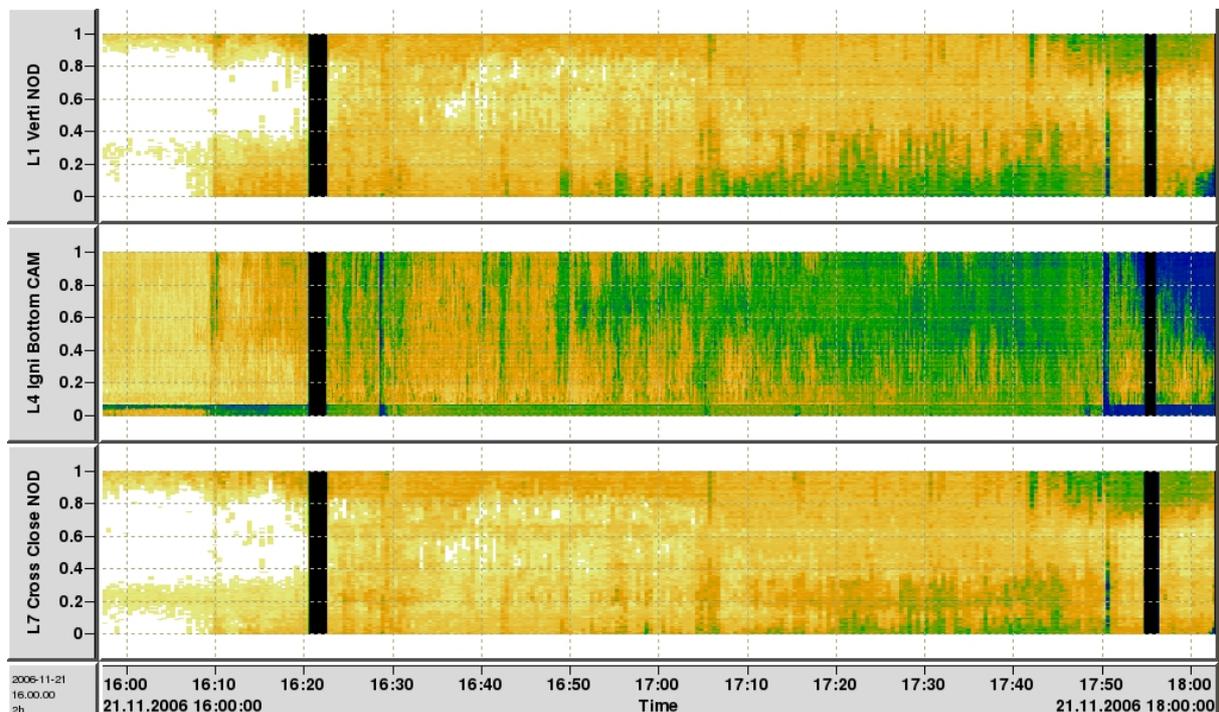


Bild 8 Minderung des Flammendralls um 17:01 Uhr

Die größten Veränderungen der Flamme auf die Minderung des Flammendralls finden innerhalb 10 Minuten nach der Umstellung statt, jedoch folgen noch weitere Veränderungen über diesen Zeitpunkt hinaus. In den ersten Minuten wird die Flamme in fast allen Bereichen kühler. Lediglich an der Unterseite der Flamme tritt neu ein heißer Bereich auf. Dieser könnte durch die Wechselwirkung des Strahlungsaustauschs mit dem Klinkerbett hervorgerufen werden. Vor der Umstellung überwog im brennernen Bereich der Strahlungsfluss von der Flamme auf das Klinkerbett. Mit der Drallminderung wurde die Flamme länger und schlanker, womit sich auch die Temperaturspitze und die Sinterzone in den Ofen in Richtung Mitte verlagert. Im Brennernahbereich heizt nun in den Minuten nach der Flammendrallminderung das Brenngut den Flammenfuß, solange bis es von der Ofenkante in den Kühler fällt. Für den nachfolgenden Klinker hat sich durch das gestreckte Temperaturprofil die Vorkühlzone bereits verlängert, sodass der heiße Bereich nach ein paar Minuten bereits wieder verschwindet.

Eine Veränderung in der Aufheiz- und Zündstrecke tritt erst nach etwa 10 Minuten ein. Nach dieser Zeit wird sie deutlich kühler, behält aber vorerst ihre Länge bei. Weiter nimmt ihre Temperatur ab und die Trennung zwischen unverbranntem Brennstoffstrom und Flammenfuß wird undeutlicher. Innerhalb eines Zeitraums von einer Stunde nimmt die Temperatur auf der Flammenhülle weiter ab. Die Flamme wird dabei zunehmend schmaler. Die Drallminderung führt zu einer kühleren und engeren Flamme.

Mit der Drall- oder Tangentialluft wird die Flamme verdrallt. Mit dem Flammendrall wird einerseits durch weitere Turbulenz die Einmischung der Verbrennungsluft gefördert. Durch Verdrallung lässt sich zudem die Länge der Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe einstellen. Weiter wird mit dem Drall die Temperatur im brennernen Bereich beeinflusst. Tiefer im Ofen hat der Drall wenig Einfluss auf die Flammentemperaturen.

Die Zentralluftmenge bestimmt die Mischungsintensität im brennernen Bereich und im Flammenkern. Mit der Zentralluft wird lediglich die Temperatur in der Flammenwurzel beeinflusst. Die Zentralluft ist weiterhin eine Stellgröße für die Beeinflussung der Zündung der Brennstoffe. Mit ihr lässt sich die Länge der Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe einstellen. Dabei gibt es eine optimale Betriebsmenge. Zu wenig Luft führt zu einer nicht ausreichenden Stabilisierung der Flamme im Inneren. Die Flamme wird unruhig und schlägt gegen den Brenner. Eine zu hohe Luftmenge bringt zu viel kalte Primärluft in die Flamme. Die Aufheiz- und Zündstrecke wird länger und der Flammenansatz kühler.

Den Effekt der Minderung der Zentralluftmenge auf die Temperaturverteilung im Ofenraum stellen beispielhaft die Thermogramme in **Bild 9** dar.

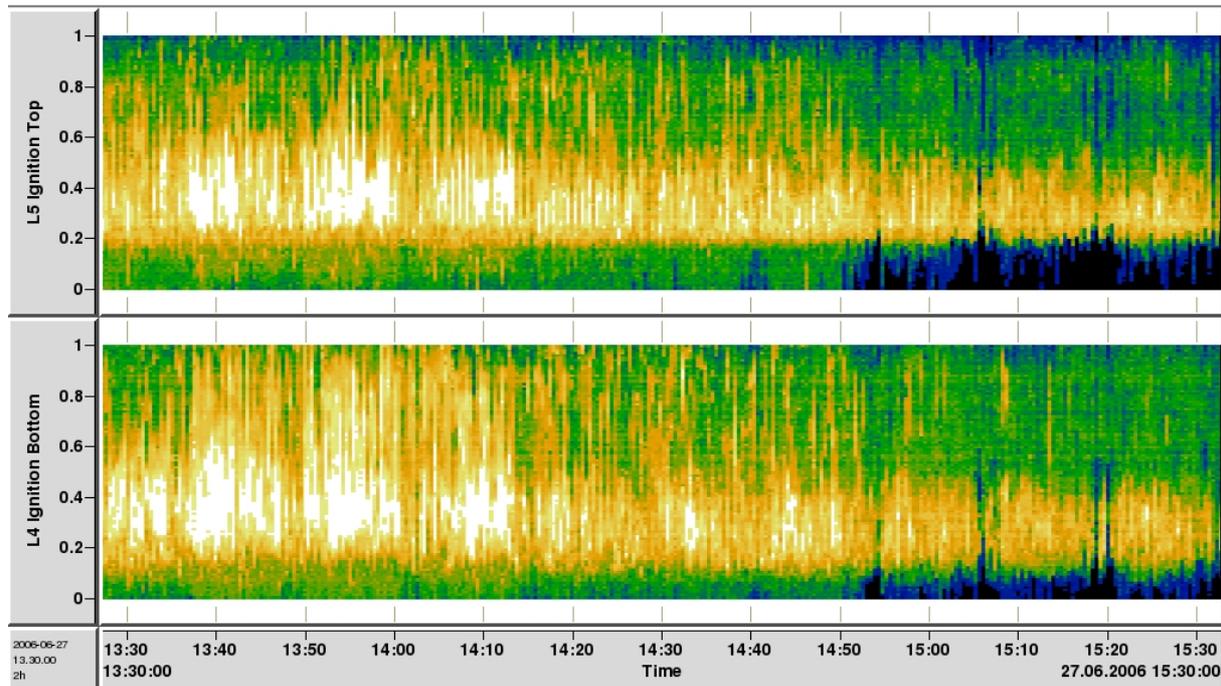


Bild 9 Minderung der Zentralluft um 14:03 Uhr

Bereits 10 Minuten nach der Verringerung der Zentralluftmenge musste eine weitere Veränderung der Brennereinstellung vorgenommen werden. Trotz des kurzen Beobachtungszeitraums, lassen sich die kurzzeitigen Veränderungen der Temperaturen im Ofenraum nach der Änderung der Zentralluft in den Thermobildern erkennen. Die sprunghaften Veränderungen in der Temperaturverteilung im Ofenraum infolge der Minderung der Zentralluftmenge lassen sich wie folgt beschreiben:

- Die Rezirkulationszone wird kühler und wandert eventuell in den Ofen hinein
- Die Aufheizstrecke verlängert sich geringfügig
- Die Flamme wird im Querschnitt enger.

Der Betrachtungszeitraum umfasst lediglich 10 Minuten, sodass langsame Veränderungen nicht beobachtet werden können. Trotz des kurzen Zeitraums lassen sich Veränderungen in der Flammengestalt erkennen. Der Flammendurchmesser wird enger und entfernt sich vom Brennermund.

Die Verringerung der Zentralluftmenge reduziert den Primärluftanteil der Verbrennungsluft als auch die Austrittsgeschwindigkeit der flammengestaltenden Luftströme. Durch die Veränderung der Turbulenz ändert sich die Vermischung der Sekundärluft mit den Brennstoffen. Die Flamme wird im Brennernahbereich kühler und wandert in den Ofenraum hinein. Neben den schnellen Veränderungen der Temperaturverteilung sofort nach der Umstellung finden auch langsame Veränderungen über mehrere Stunden infolge der Umstellung statt. Die Flammentemperatur nimmt weiter ab, ebenso verringert sich der Flammendurchmesser. Die Strahlung der Ofenwand nimmt so weit ab, dass die untere Grenze der thermografischen Berechnung erreicht wird. Auch der fallende Heißklinker kühlt deutlich ab. Die Flamme wird schmaler und entfernt sich vom Brennermund.

3.4.2 Ergebnisse der Verbrennungsuntersuchungen

Die Verbrennung wird anhand der Gaskonzentrationen von Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden nach Brennbereich charakterisiert. Die Kohlenstoffmonoxidkonzentration am Ende des Brennbereichs dient der Bewertung des Ausbrands. Je weniger Kohlenstoffmonoxid verbleibt, desto weitgehender ist die Oxidation der Brennstoffe bis zum Kohlenstoffdioxid. Die Stickstoffoxide werden einerseits als umweltrelevanter Schadstoff erfasst und andererseits kann basierend auf den Stickstoffoxidkonzentrationen auf die Flammentemperatur geschlossen werden. Hohe Konzentrationen werden durch die Bildung thermischen Stickstoffoxids verursacht, das überwiegend bei hohen Temperaturen gebildet wird.

Sowohl der axiale Impulsstrom als auch der Flammendrall, ausgedrückt mit der Kennzahl Drallzahl, beeinflussen wesentlich die Einmischung der Sekundärluft in die Flamme und damit die Vermischung von Brennstoffen und Verbrennungsluft. Je höher die Turbulenz und das Luftangebot in der Flamme, desto besser ist die Verbrennung. Dies führt zu einem höheren Ausbrandgrad und niedrigeren Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen. Weiter werden höhere Flammentemperaturen erzeugt, die die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen begünstigen sowie sich günstig auf die Klinkerphasenbildung und –qualität auswirken. Die höheren Flammentemperaturen als Folge der besseren Vermischung fördern jedoch auch die Stickstoffoxidbildung.

Die **Bilder 10** und **11** zeigen beispielhaft die Abhängigkeiten der gemessenen Kohlenstoffmonoxid- und Stickstoffoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf in Abhängigkeit des eingetragenen spezifischen Axialimpulsstroms und des Dralls.

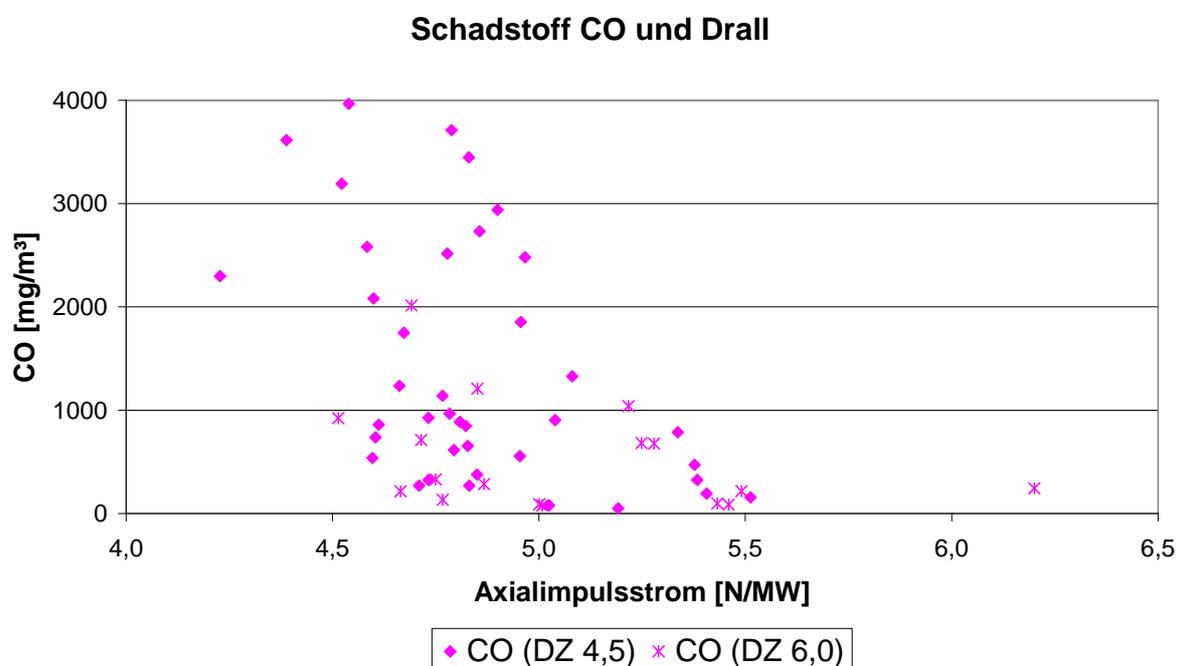


Bild 10 Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf in Abhängigkeit vom Axialimpulsstrom und vom Flammendrall

Die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf sind stark vom Axialimpulsstrom abhängig. Bei Impulsströmen über 5,5 N/MW liegt das Kohlenmonoxidniveau konstant bei einem niedrigen Wert. Mit abnehmendem Impulsstrom steigt der Bereich der möglichen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen. Die bei den verschiedenen Versuchseinstellungen erreichten maximalen Konzentrationen liegen bei einem Drall von 6 bei etwa 2000 mg/m³, bei 4½ bei etwa 4000 mg/m³.

Auch bei der partiellen Oxidation des Verbrennungskohlenstoffs zeigt sich die Abhängigkeit von der Vermischungsintensität. Bei hoher Turbulenz mit hohem Drall mindert das große Sauerstoffangebot die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen. Ein hoher Impulsstrom fördert ebenfalls das Sauerstoffangebot und verbessert die Verbrennung. Mit zunehmendem Impulsstrom sinken die maximal möglichen Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen.

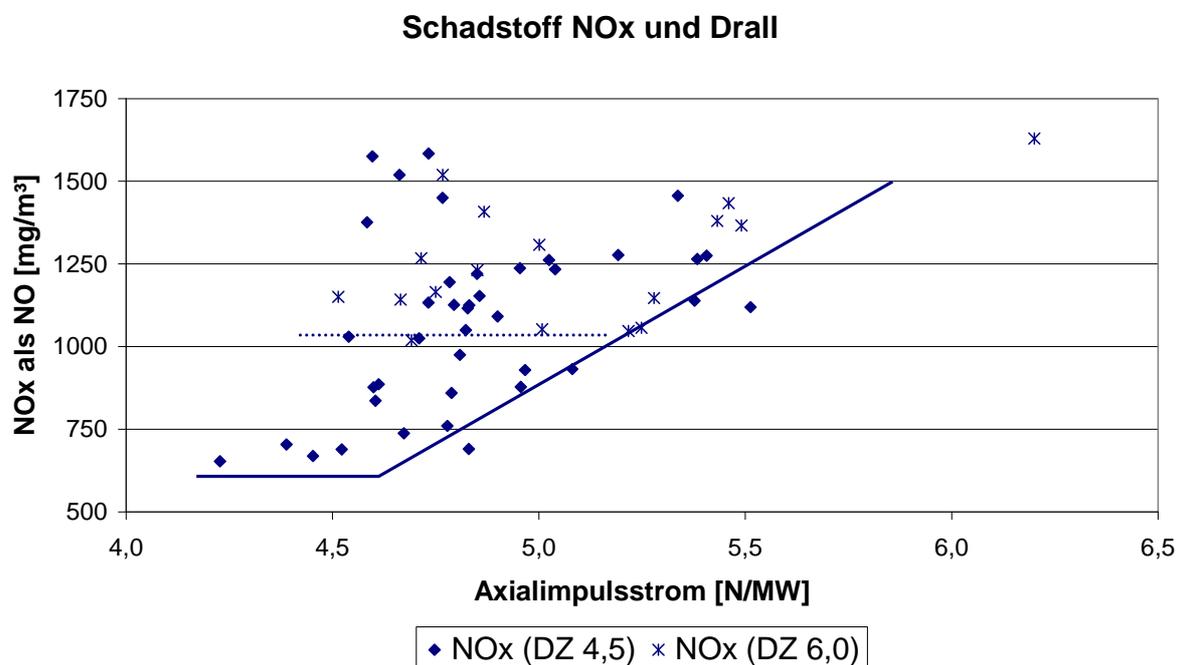


Bild 11 Stickstoffoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf in Abhängigkeit vom Axialimpulsstrom und vom Flammendrall

Die minimal erreichbaren Stickstoffoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf zeigen im vorliegenden Fall eine starke Abhängigkeit vom spezifischen Axialimpulsstrom. Bis einem Impulsstrom von etwa 4,6 N/MW kann eine konstante Stickstoffoxidkonzentration von etwa 600 mg NO/m³ im Ofeneinlauf nicht unterschritten werden. Bei Impulsströmen über 4,6 N/MW steigen die minimal erreichbaren Stickstoffoxidkonzentrationen mit zunehmendem Impulsstrom annähernd linear an. Eine eindeutige Abhängigkeit der Stickstoffoxidkonzentrationen vom Drall ist nicht erkennbar. Bei einem Drall von 4½ werden unter 4,6 N/MW Axialimpulsstrom Konzentrationen von 600 mg NO/m³ nicht unterschritten, bei einem Drall von 6 liegt dieser Wert bei etwa 1000 mg NO/m³. Die untere Grenze der erreichbaren Stickstoffoxidkonzentrationen für einen Drall von 4½ mit einer durchgezogenen Linie und für einen Drall mit 6 als punktierte Linie dargestellt. Für einen Drall von 6 reicht die minimal erreichbare Stickstoffoxidkonzentration bis zu einem Impulsstrom von etwa 5,3 N/MW. Bei Impulsströmen über

5,3 N/MW steigen die minimal erreichbaren Stickstoffoxidkonzentrationen mit zunehmendem Impulsstrom an.

Mit zunehmendem Axialimpulsstrom wird die Turbulenz gesteigert und die Vermischung von Brennstoffen und Verbrennungsluft intensiviert. Das erhöhte Sauerstoffangebot in der Reaktionszone fördert die Bildung von Stickstoffoxiden. Auch ein erhöhter Drall fördert die Durchmischung des Brennstoffs mit Verbrennungsluft. Aufgrund des vergrößerten tangentialen Austrittswinkels verbreitert sich der Ausströmkegel der Brennstoffe und der Flammenfuß. Der steilere Winkel zum Sekundärluftstrom fördert die Einmischung von Verbrennungsluft in die Flamme. Das verbesserte Sauerstoffangebot erhöht die Stickstoffoxidbildung.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind stark vom eingesetzten Brenner und der Ofenanlage abhängig. Der generelle Trend und die Abhängigkeit der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden sind bei allen untersuchten Brenner und Ofenanlagen ähnlich. Sie unterscheiden sich wesentlich im Niveau der Konzentrationen und der Größenordnung des Axialimpulses und der Stärke des Flammendralls.

Das **Bild 12** stellt die Veränderung der Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf in Abhängigkeit der Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen für eine Ofenanlage dar. Dabei ist die Substitutionsrate der Anteil der Sekundärbrennstoffe bezogen auf die Feuerungswärmeleistung der Drehofenfeuerung.

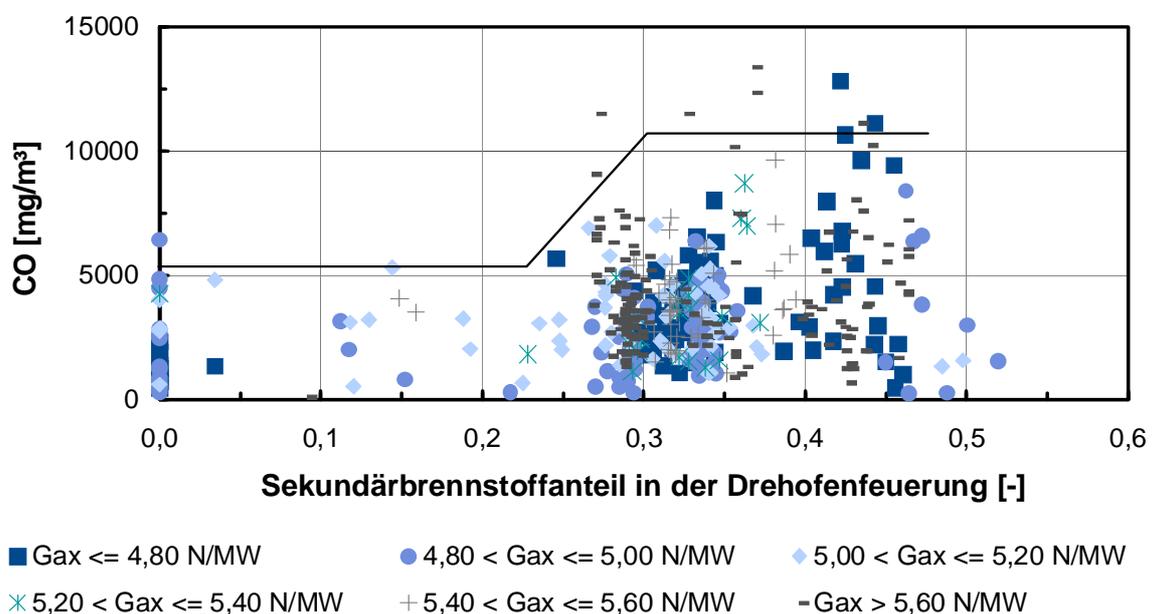


Bild 12 Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf in Abhängigkeit der Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen in der Drehofenfeuerung

Bei Substitutionsraten geringer als 25 % liegen die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf unter 6500 mg/m^3 auf. Bei Raten über 25 % treten hingegen Konzentrationen bis $14\,000 \text{ mg/m}^3$ auf.

Der Ausbrandgrad im Drehofen ist zudem von der Substitutionsrate der Regelbrennstoffe durch Sekundärbrennstoffe abhängig. Bis zu einer bestimmten Substitutionsrate, die anlagenspezifisch ist, ist der Ausbrand im Drehofen vielmehr durch die Primärluftführung als durch die Sekundärbrennstoffe bestimmt. Bei hohen Einsatzmengen steigen die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf auf ein höheres Niveau. Auf dem hohen Niveau zeigt sich vielfach keine Abhängigkeit mehr von der Substitutionsrate. Bei sehr hohen Substitutionsraten reicht die Verweilzeit im Drehrohr - auch in Abhängigkeit der Ofenlänge - z. T. nicht mehr für die vollständige CO-Oxidation aus. In diesen Fällen wird der Restausbrand in den Gassteigschacht oder Calcinator verschoben. Bei geringen Sekundärbrennstoffraten steigt die Stickstoffoxidbildung, da ein energiereicher Brennstoff zu lokal höheren Flammentemperaturen führt. Bei hohen Einsatzmengen grobstückiger Brennstoffe wird die Flamme auf Grund der langsameren Verbrennungsgeschwindigkeit und der langen Verweilzeit in der Flamme gestreckt, wobei die maximalen Flammentemperaturen sinken. Die Wärmefreisetzung erfolgt über eine längere Strecke. Die Stickstoffoxidbildung geht zurück.

3.4.3 Anpassung der Drehofenfeuerung an die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen

Die erweiterte Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen in der Drehofenfeuerung bedingt ein ausreichendes Angebot an Sekundärluft um eine sichere Verbrennung und einen weitgehenden Ausbrand der Brennstoffe zu gewährleisten. Weiter muss für den hohen Sekundärbrennstoffeinsatz günstige Zündbedingungen geschaffen werden. Der erhöhte Sekundärbrennstoffeinsatz bewirkt wiederum Effekte, denen mit Hilfe der Brennereinstellung entgegen gewirkt werden kann. Daraus ergibt sich nachfolgend dargestellter Leitfaden, welche Maßnahmen bei der Sekundärbrennstofferrhöhung getroffen werden sollen:

1. Erhöhung der Verbrennungsluftmenge:
Die Maßnahme 1 ist die notwendige Voraussetzung für den erweiterten Sekundärbrennstoffeinsatz. Ohne diese Maßnahme ist keine erhebliche Steigerung des Sekundärbrennstoffeinsatzes möglich. Eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Ofeneinlauf auf mindestens 1 bis 1,5 % sollte angestrebt werden.
2. Einstellen einer kurzen Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe und Erzeugen von heißen Flammentemperaturen mit Hilfe der Zentralluft:
Eine schnelle Zündung der Brennstoffe wird durch eine kurze Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe sowie durch hohe Flammentemperaturen im brennernen Bereich erreicht. Die Maßnahme 2 lässt sich schnell und einfach realisieren. Sie ist kontinuierlich entsprechend den Veränderungen in der Brennstoffmischung und in den Brennstoffeigenschaften durchzuführen. Eine optimale Einstellung der Zentralluftmenge kann nur durch die direkte Beobachtung der Aufheiz- und Zündstrecke erfolgen.
3. Erhöhung des Sekundärbrennstoffeinsatzes:
Mit den Maßnahmen 1 und 2 sind günstige Brennereinstellungen und Verbrennungsbedingungen für den höheren Sekundärbrennstoffeinsatz geschaffen worden. In Schritt 3 wird die Sekundärbrennstoffmenge erhöht.
4. Kompensieren der Wärmeverschiebung durch die Sekundärbrennstoffe mit Hilfe des Axialimpulsstroms und des Flammendralls:
Der erhöhte Sekundärbrennstoffeinsatz bewirkt eine Wärmeverschiebung innerhalb des Drehrohrofens. Mit der Maßnahme 4 wird versucht, den negativen Einfluss der hohen

Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen auf die Wärmefreisetzung und die Flamme zu kompensieren. Hierzu bietet sich die Anpassung des Axialimpulsstroms und des Flammendralls an. Bei einer Wärmeverschiebung zum Ofeneinlauf hin und zunehmenden Ofeneinlauftemperaturen durch den erweiterten Sekundärbrennstoffeinsatz muss die Wärmefreisetzung der Flamme wieder näher an den Ofenauslauf herangeholt werden. Eine straffere und kürzere Flamme wird durch die Erhöhung des Gesamtaxialimpulses und des Flammendralls erreicht. Ein Axialimpulsstrom von mindestens 6,5 N/MW erzielt auch bei einem hohen Sekundärbrennstoffeinsatz einen hohen Ausbrand. Die Drallzahlen sind stark brennerabhängig und muss aus Betriebserfahrungen der jeweiligen Werke ermittelt werden.

5. Einstellen der Einmischung der Sekundärbrennstoffe in die Flamme mit Hilfe der Swirl-luft: Die Maßnahme 5 stellt die Feinabstimmung für die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen dar und optimiert die Einmischung und Verbrennung des Fluffs in der Flammenhülle. Die Swirl-luft soll gerade so stark eingestellt werden, dass noch kein Brennstoff aus der Flamme fällt und kein Klinker mit Braunverfärbungen hergestellt wird. Die Einstellung der Swirl-luft sollte als letzte Maßnahme umgesetzt werden.

Es wird empfohlen, den dauerhaft hohen Einsatz von Sekundärbrennstoffen schrittweise zu erreichen und die Brennereinstellung entsprechend den neuen Bedingungen anzupassen. Daher können die Maßnahmen 2, 3 und 4 solange wiederholt werden, bis die gewünschte Sekundärbrennstoffmenge erreicht ist oder betriebsbedingt keine weitere Steigerung des Sekundärbrennstoffeinsatzes mehr möglich ist.

3.4.4 Auswirkungen auf die Produkteigenschaften

Zusammenfassend zeigte sich, dass der erhöhte Sekundärbrennstoffeinsatz keinen signifikanten Effekt auf die Klinkerzusammensetzung (z. B. Alit-, Belit-, Freikalkgehalt) bzw. dessen mineralogischen Eigenschaften hat. Wenn z. B. erhöhte Freikalkgehalte auftraten, konnte dies eher auf ungünstige Brennereinstellungen zurückgeführt werden. Unterschiede wurden dagegen erwartungsgemäß festgestellt, wenn Brennstoffe mit hohen Aschegehalten variiert wurden (z. B. Eiseneintrag bei unterschiedlichen Altreifenmengen).

An den Klinkerproben eines Zementwerks wurden lichtoptische Mikroskopieuntersuchungen an gebrochenem Material durchgeführt. Die **Bilder 12, 13 und 14** zeigen die Gefüge der Fraktion für unterschiedliche Einsatzraten der S0ekundärbrennstoffe in der Drehofenfeuerung.

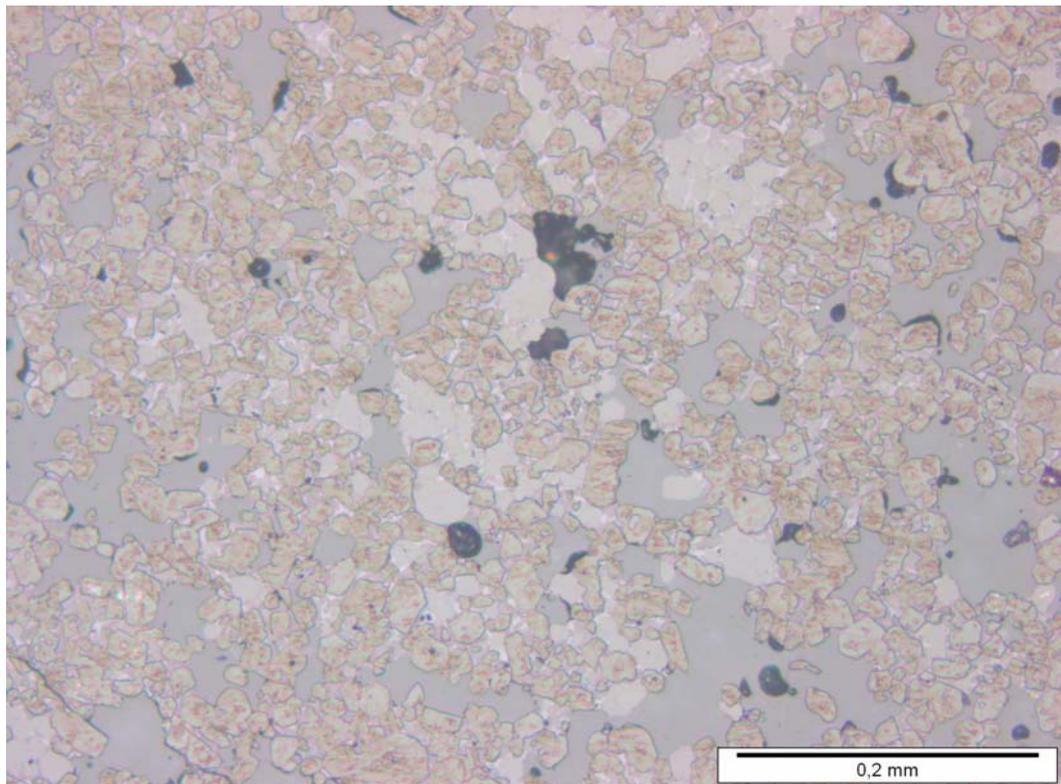


Bild 12 Klinkergefüge bei reinem Kohlebetrieb, Fraktion 2 bis 4 mm

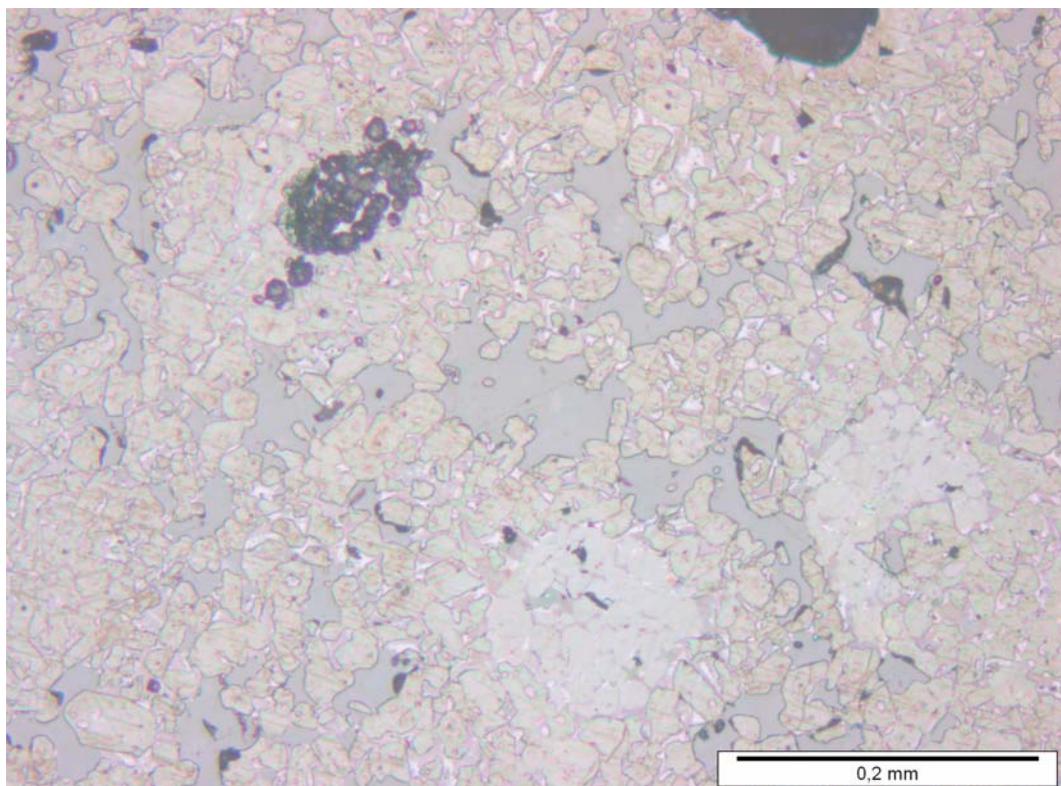


Bild 13 Klinkergefüge des Referenzversuchs mit 38 % Sekundärbrennstoffrate, Fraktion 2 bis 4 mm

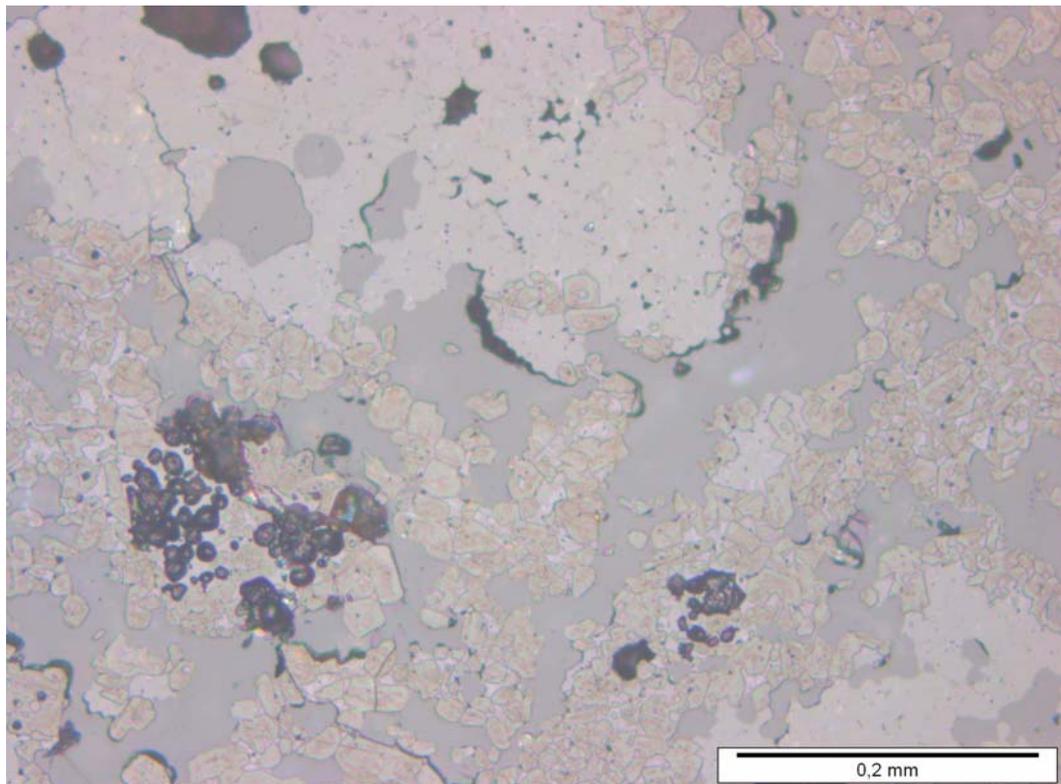


Bild 14 Klinkergefüge bei 46 % Sekundärbrennstoffrate, Fraktion 2 bis 4 mm

Das Gefügebild der drei untersuchten Klinkerproben ist sehr ähnlich und zeigt keine systematische Veränderung bezüglich der Versuchseinstellungen. Die Poren der Klinkergranalien zeigen eine übliche Porosität. In den Rändern der Granalien befinden sich kleine Poren, die gleichmäßig verteilt sind. Die Poren im Kern sind dagegen meist größer. Im Kern konnten weiterhin Nester an Freikalk entdeckt werden. Sowohl in den Rändern als auch im Kern befinden sich Belitkristalle zwischen den Alitkristallen eingestreut. Die Alitkristalle treten in der typischen pseudo-hexagonalen Form auf. Bei Berührung mit der Aluminatphase zeigen die Alitkristalle an den Rändern leichte Korrosion, was auf eine relativ rasche Vorkühlung nach der Sinterzone deutet.

Zusammenfassend zeigen die Klinker ein typisches Gefüge ohne Einfluss durch die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen. Die Phasen- und Kristallbildung wurde - im Rahmen der durchgeführten Versuche - durch den Einsatz der Sekundärbrennstoffe nicht signifikant verändert.

4 Zusammenfassung: Optimierte Betriebseinstellung des Drehofenbrenners für den erweiterten Sekundärbrennstoffeinsatz

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden an drei Zementdrehofenanlagen Untersuchungen zur Möglichkeit der Flammgestaltung, der Auswirkung des hohen Sekundärbrennstoffeinsatzes auf die Flamme, den Ofenbetrieb und die Emissionen durchgeführt. Die Möglichkeiten der Flammgestaltung umfassten die Veränderung der Ausströmgeometrie am Brennermund sowie die Aufteilung und Menge der flammgestaltenden Luftströme auf Axial-, Drall- und Zentralluft. Bei der Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen wurden ver-

schiedene Einsatzraten sowie unterschiedliche Qualitäten betrachtet. Alle Untersuchungen konzentrierten sich insbesondere auf den Einsatz von fluffigen Materialien, die bei der Aufbereitung von Abfällen aus Industrie- und Gewerbemüll als Leichtfraktion gewonnen werden. Aufgrund ihres relativ hohen Heizwertes und ihrer Flugfähigkeit eignen diese Sekundärbrennstoffe sich für den Einsatz in der Drehofenfeuerung. Die Partikelgröße und Verbrennungseigenschaften limitieren jedoch ihren Einsatz. Die Grenzen und Möglichkeiten des Einsatzes dieser Art von Sekundärbrennstoffen war Gegenstand und Ziels dieses Forschungsprojekts.

Mit dem Ausströmsystem am Brenner lassen sich die Länge, Divergenz und Rotation der Flamme einstellen. Mit Hilfe der neuen Brennergeneration, die sich in der Zementindustrie in den vergangenen Jahren durchgesetzt hat, sind diese Einstellmöglichkeiten deutlich verbessert worden. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben ermöglicht, allgemeingültige Erkenntnisse und Regeln für die Brenneinstellung bei hohem Sekundärbrennstoffeinsatz zu formulieren. Bei hohen Sekundärbrennstoffeinsatzraten in der Hauptfeuerung von Zementdrehofenanlagen kann die Verbrennung vor allem mit Hilfe der Verstärkung des Axialluftimpulses verbessert werden. Der erhöhte Axialluftimpuls führt zu einer kürzeren Flamme und damit zu höheren Maximaltemperaturen in der Sinterzone. Aus den Ofenuntersuchungen ergab sich, dass ein Axialimpulsstrom von mindestens 6,5 N/M/W eingestellt werden sollte, um einen optimalen Ausbrand zu erzielen. Gleichzeitig sollte ein ausreichender Drall eingestellt werden, um eine rasche Vermischung der heißen Sekundärluft mit der Drehofenflamme sicherzustellen. Die gemessenen bzw. berechneten Drallzahlen sind stark brennerabhängig und reichen von 0,01 bis 0,12. Zur Unterstützung einer schnellen Brennstoffzündung kann zudem Zentralluft in den Flammenkern eingeblasen werden. Hierdurch kann die Zündstrecke der Brennstoffe beeinflusst werden. Mit Hilfe dieser Möglichkeiten kann der häufig in der Praxis festgestellte Effekt eines gestreckten Flammenprofils im Drehofen aufgrund des Sekundärbrennstoffeinsatzes zumindest teilweise kompensiert werden. Diese Verschleppung der Verbrennung kann zu einem verringerten Ausbrand im Drehrohr und einer Verlagerung dieses Ausbrands in den Gassteigschacht bzw. den Calcinator der Ofenanlage führen. Zum Einen sollte die Luftzahl im Drehofen gegenüber der herkömmlichen Fahrweise leicht angehoben werden. Durch die Anpassung der Zentralluftmenge kann die Zündstrecke angepasst und ein heißer Flammenkern erzeugt werden. Die Wärmeverschiebung aufgrund des erhöhten Sekundärbrennstoffeinsatzes sollte mit Hilfe der Axialluft und des Flammendralls kompensiert werden. Entsprechende quantitative Empfehlungen konnten aus den Versuchen abgeleitet werden. Diese Regeln ermöglichen es Betreibern von Drehofenanlagen nunmehr, gezielt die Drehofenfeuerung individuell an die eingesetzten festen Brennstoffe anzupassen.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben 15249) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert und mit Eigenmitteln des Vereins Deutscher Zementwerke e. V. finanziert. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, führte das Forschungsvorhaben durch.

5 Literaturverzeichnis

- AiF Nr. 1101N 1997: Optimierung der Drehofenfeuerung bei der Herstellung von Portlandzementklinker. AiF-Abschlussbericht zum Vorhaben-Nr. 1101N.
- COLLENBUSCH, W.; WALDBAUER, G. 1983: Kohlenstaubfeuerungen für die Industrie der Steine und Erden – Entwicklungen und heutiger Stand. In: Zement-Kalk-Gips 36 (1983) Heft 9, S. 517-522.
- ECKELMANN, G.: Drehofenbrenner für feste Brennstoffe und Brennstoffgemische. In: Zement-Kalk-Gips 32 (1979) Heft 8, S. 386-389.
- ECRA (Hrsg.) 2005: ECRA-Newsletter 02/2005. European Cement Research Academy (2005). Düsseldorf.
- HOCHDAHL, O. 1986: Brennstoffe und Wärmewirtschaft – Aufbereiten, Lagern und Dosieren der Primär- und Ersatzbrennstoffe; Feuerung und Brenner; Energierückgewinnung. In: Zement-Kalk-Gips 39 (1986) Heft 2, S. 57-66.
- HOENIG, Volker; GAJEWSKI, Steffen 1994: Einflüsse von Brenner und Brennstoff auf den Betrieb und die NO_x-Emissionen von Drehrohröfen der Zementindustrie. Zement-Kalk-Gips 47 (1994) Heft 8, S. 462-466.
- IFRF (Hrsg.) 1998; Haas, J.; Agostini, A.; Martens, C.; Carrea, E.; Kamp, W. L. van de: The Combustion of Pulverized Coal and Alternative Fuels in Cement Kilns – Results of the CEMFLAME-3 Experiments. International Flame Research Foundation Research Report. Ijmuiden.
- KNOCH, Alexander 2004: Burner Technology. In: World Cement 35 (2004) Heft 12, S. 49-52.
- LEDERER, H. 1993: Neuartiger Drehofenbrenner mit nur einer Primärluftführung. In: Zement-Kalk-Gips 46 (1993) Heft 12, S.779-783.
- PICCIOTTI, Guido; GRECO, Clemente 2001: Innovative Burners. In: World Cement 32 (2001) Heft 9, S. 91-93.
- SCHUBERT, P. 1982: Mehrkanalbrenner für grobkörnige, feste Brennstoffe. In: Zement-Kalk-Gips 35 (1982) Heft 5, S. 246-249.
- SCHNEIDER, F. 1976: Kohlenaufbereitung und Kohlenfeuerung für Zementdrehöfen. In: Zement-Kalk-Gips 29 (1976) Heft 7, S. 289-294.
- STEINBIß, E. 1982: Mehrstrahlbrenner für die besonderen Anforderungen bei Kohlenstaubfeuerungen. In: Zement-Kalk-Gips 35 (1982) Heft 5, S. 250-252.
- VDZ 2009: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008. Verein Deutscher Zementwerke (2009). Düsseldorf.