

IGF-Forschungsvorhaben Nr.:	18862 N
Bewilligungszeitraum:	01.10.2015 - 31.03.2018
Forschungsstellen:	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ)
Forschungsthema:	Steigerung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in der Hauptfeuerung von Zementdrehrohröfen

1 Ausgangssituation

Bei der Zementherstellung wird der wesentliche Anteil an thermischer Energie für das Brennen des Zementklinkers in Drehofenanlagen aufgewendet. Dazu werden heute fossile Brennstoffe und parallel Ersatzbrennstoffe (bzw. Alternativbrennstoffe) eingesetzt. Auf Grund des hohen Energiekostenanteils an den Herstellungskosten für Zement ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, den Bedarf an Brennstoffen zu reduzieren und zu optimieren. Maßgebliche Anstrengungen konzentrieren sich auf die Substitution fossiler Brennstoffe durch Ersatzbrennstoffe.

Neben den Eigenschaften und Mengen der Brennstoffe bestimmen die Anlagen- und Brennerkonstruktion, die Gestaltung der Zufuhr kalter Primärluft und heißer Sekundärluft im Bereich Brenner/Ofenkopf sowie die Gestaltung der Brennstoffzufuhr die Betriebseigenschaften und damit auch die einsetzbaren Ersatzbrennstoffmengen. Eine Beeinträchtigung der Klinkereigenschaften und der Verfügbarkeit der Ofenanlagen soll vermieden werden.

2 Ziele des Forschungsvorhabens

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollte untersucht werden, wie die Einsatzmenge von aufbereiteten, festen, flugfähigen Ersatzbrennstoffen (EBS) in der Hauptfeuerung des Drehrohrrofens weiter erhöht und dadurch die Wirtschaftlichkeit des Zementherstellungsprozesses verbessert werden kann. Dies sollte auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebsmessungen sowie Betriebserfahrungen erarbeitet werden. Ziel des Projekts war es, Sensitivitäten und Abhängigkeiten der verschiedenen Einflussgrößen auf den EBS-Abbrand in einer anlagenunabhängigen allgemeingültigen Form zu erarbeiten. Konkret bedeutet dies:

- Gewinnung vertiefter Kenntnisse zur Sensitivität von Prozessparametern auf den Abbrand der Ersatzbrennstoffe
- Ableitung von vorteilhaften Betriebseinstellungen zur Steigerung des EBS-Einsatzes
- Einfluss der Anlagentypen/-bauweisen auf die Verbrennung von Ersatzbrennstoffen
- Bereitstellung eines Leitfadens zur optimierten Auslegung und zum optimierten Betrieb von Drehofenanlagen in Hinblick auf hohe EBS-Substitutionsraten

Zur Erreichung der Ziele wurden numerische Simulationen der EBS-Verbrennung in Drehrohröfen unter Variation von Anlagenbauweisen und Betriebsparametern durchgeführt und anhand von Betriebsmessungen und -versuchen erweitert und überprüft. Neben den Emp-

fehlungen zum EBS-Einsatz sollten auch die für Simulationen am besten geeigneten Modellkombinationen im Sinne von „Best Practice“ Regeln herausgearbeitet werden.

3 Umfang der Untersuchungen

3.1 Betrachtete Ersatzbrennstoffe

Das Projekt konzentrierte sich auf Ersatzbrennstoffe aus aufbereiteten Siedlungs- und Industrieabfällen (Fluff) für den Einsatz in der Hauptfeuerung. Diese Ersatzbrennstoffe bestehen zumeist aus Fraktionen von zwei- und dreidimensionalen Kunststoffen, Papier- und Pappe-Agglomeraten, Schaumstoffen, verschiedensten Textilien, aber auch Inert- und Störstoffen wie Glas oder Metall.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die eingesetzten Ersatzbrennstoffe eingehend untersucht (Heizwert, Fluchtgehalt, Feuchtegehalt, Partikelgrößenanalyse, etc.) und die Ergebnisse anschließend für die Simulationsberechnungen und die Auswertung der Betriebsmessungen verwendet. **Bild 1** stellt exemplarisch die Ergebnisse einer Sortieranalyse eines im Projekt betrachteten Ersatzbrennstoffs dar.

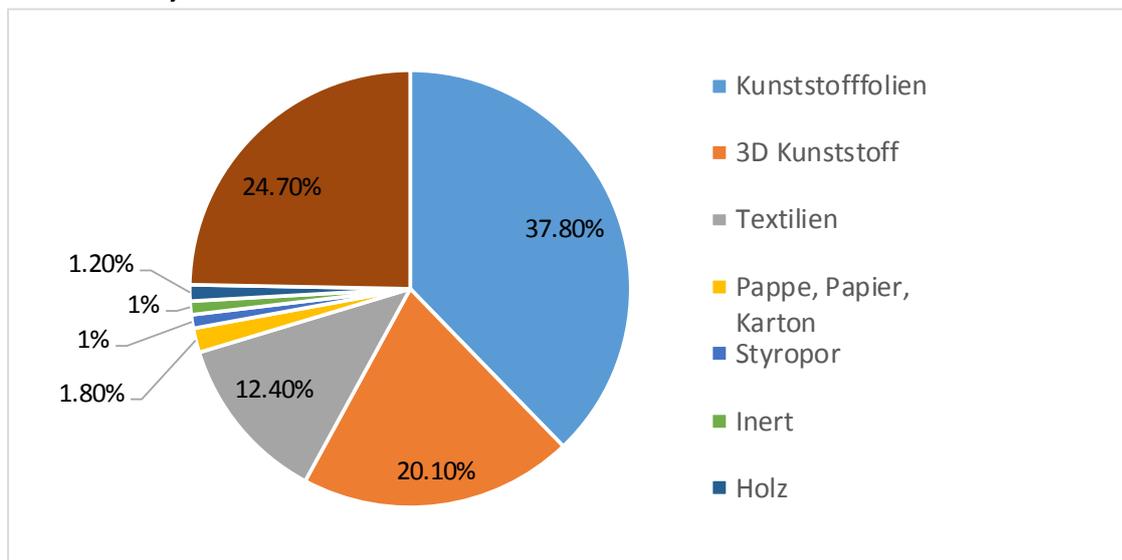


Bild 1 Exemplarische Massenverteilung eines untersuchten Ersatzbrennstoffs (Ergebnis einer Sortieranalyse)

3.2 Durchführung von Betriebsversuchen

Ein wesentliches Ziel der Betriebsmessungen durch das FIZ war es, Basisdaten für die Simulationen zu ermitteln. Zudem sollten an den Ofenanlagen durch gezielte Veränderung von Betriebsparametern wesentliche Einflussgrößen für die Verbrennung der Sekundärbrennstoffe in der Praxis ermittelt werden. Dabei wurde insbesondere auch untersucht, inwieweit die Veränderung der Parameter eine Auswirkung auf den Prozess sowie auf die Emissionen hat. Die ermittelten Messergebnisse können als Randbedingungen für die Simulationen dienen.

Bild 2 gibt einen Überblick über die an einer Ofenanlage durchgeführten Messungen.

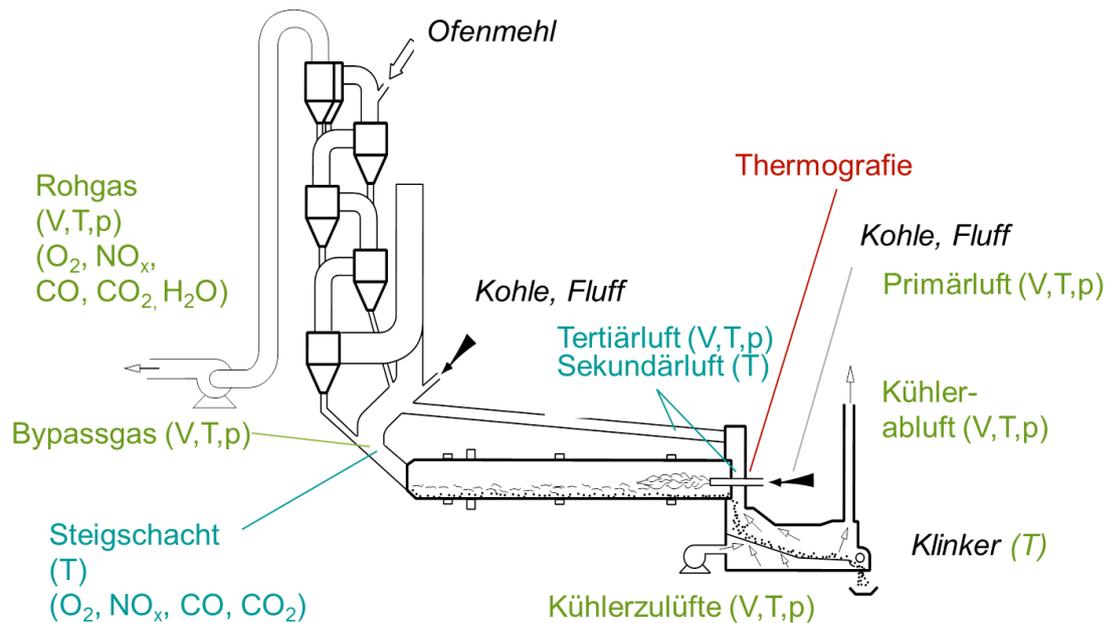


Bild 2 Durchgeführte Messungen an einer Ofenanlage im Rahmen der Betriebsmessungen

Erläuterung der Abkürzungen:

Volumenströme (V): T = Temperatur; p = Gasdruck

Temperaturmessungen (T): Sekundärluft / Klinker / Ofeneinlauf bzw. Steigschacht

Kontinuierliche Gasanalyse: O_2 = Sauerstoffgehalt; CO = Kohlenmonoxidgehalt; CO_2 = Kohlendioxidgehalt; NO_x = Stickstoffmonoxid – und dioxidgehalt; H_2O = Wassergehalt

Thermografie = Optische Flammenuntersuchung mittels Thermografie-Kamera

3.3 Numerische Simulationen

Grundlagen und Bewertung numerischer Simulationen

Die Simulation der Verbrennungsprozesse im Drehrohrföfen wurde vom LEAT mit speziell entwickelten, fraktionsspezifischen Modellen [1] zur Berechnung der thermischen Umsetzung und der Bewegung der Partikel durchgeführt. Die Klinkerkühlersimulationen in diesem Forschungsprojekt wurden vom LUAT mit einer innerhalb dieses Forschungsprojektes entwickelten Modellierung des Klinkerbettes vorgenommen. Die in diesem Projekt untersuchten Klinkerkühler waren ausschließlich Rostkühler. Die im Projekt durchgeführten Simulationen wurden mit der CFD-Software ANSYS Fluent® durchgeführt. Die Berechnung des Bewegungs- und Abbrandverhaltens der Ersatzbrennstoffe erfolgte über EBS-Modelle des LEAT. Die Implementierung der EBS-Modelle erfolgt über das in der CFD-Software enthaltene Discrete-Phase-Model.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der im Projekt durchgeführten Simulationen und Betriebsmessungen konnten vertiefte Erkenntnisse über das Abbrandverhalten von Ersatzbrennstoffen in Zementdrehrohren gewonnen werden.

Projektergebnisse:

- Eine Erhöhung der EBS-Rate führt zu einer schmaleren und längeren Flamme. Eine zu stark erhöhte EBS-Rate führt zu einer Verzögerung der Zündung einer Zunahme des Freikalkgehaltes. Näherungsweise wurde ein linearer Zusammenhang zwischen EBS-Rate, Flammenbreite und Freikalkgehalt festgestellt.
- Die Simulationen ergaben, dass einige EBS-Partikel teilumgesetzt auf das Klinkerbett oder die Ofenwand treffen. Die Restumsetzung erfolgt dort allerdings schnell (wenige Sekunden). Grobe Brennstoffpartikel mit geringen Oberflächen (3D) bewegen sich grundsätzlich entlang ihrer Trägheitsbahn (bestimmt durch die Initialbedingungen) mit Trajektorien ähnlich einer Wurfparabel. Kleinere Partikel bzw. Partikel mit hoher spezifischer Oberfläche (in Bezug auf das Partikelgewicht) werden hingegen deutlicher von der Gasströmung beeinflusst und weiter in den Ofen getragen. Generell zeigen erstgenannte (3D) Partikel auch geringere Sensitivitäten auf eine Änderung der Primärlufteinstellungen.
- Die Simulationen ergaben, dass die Aufenthaltszeit der EBS-Partikel in der Gasphase einen wesentlichen Einfluss auf die Umsetzungsgrade vor Wand- oder Klinkerkontakt hat. Entscheidend für den Umsatz ist zudem der Zustand der Gasphase (Temperatur und Sauerstoffgehalt) entlang der Flugbahn.
- Simulationen und Messungen zeigen, dass eine Verringerung der Partikelgröße eine effektive Möglichkeit darstellt, den EBS-Abbrand und damit auch die Bildung der gewünschten Klinkerphasen in der Sinterzone zu verbessern.
- Eine Änderung der Primärlufteinstellungen verändert auch immer das Verhalten der Regelbrennstoffe. Die resultierenden Effekte können für verschiedene Brennstoffe unterschiedliche Wirkung haben. Beispielsweise erzeugt ein höherer Drehimpuls (Drall) eine bessere Vermischung von heißer, sauerstoffreicher Sekundärluft und Regelbrennstoff (Kohlenstaub) im Brennernahbereich, was in der Folge zu einer breiteren und heißeren Flamme führt. Auf der anderen Seite werden EBS-Partikel aus der Flamme geschleudert und treffen früher gegen Ofenwand oder Klinkerbett. Der Einsatz einer separaten Lanze (Satellitenbrenner) für die Zuführung des EBS kann die Einstellungen für Regel- und Ersatzbrennstoffe entkoppeln. Die Betriebsmessungen haben gezeigt, dass sich die Verbrennung intensiviert, die Flamme verkürzt und der Freikalkgehalt im Klinker sinkt. Zudem ergaben sich Hinweise auf eine Verkürzung der Vorkühlzone und einen Anstieg der Sekundärlufttemperatur.
- Aus den Simulationen lässt sich ableiten, dass die Sekundärluftströmung aus dem Klinkerkühler einen großen Einfluss auf die Strömung im Drehrohr und dementsprechend auf die Temperatur- und Sauerstoffverteilung sowie die Flugbahnen der Partikel hat. Die Ausbildung der Sekundärluftströmung hängt deutlich von der Anlagenbauweise ab. Neben der Geometrie und Anordnung des Klinkerkühlers (unterhalb oder hinter dem Ofen) beeinflusst auch die Position des Tertiärluftabzugs die Strömung im Drehrohr z. T. deutlich.

- Messungen und Simulationen haben gezeigt, dass im Ofenkopf deutliche Gradienten in der Sekundärlufttemperatur vorliegen. Die mittlere Sekundärlufttemperatur am Ofenauslauf kann deshalb messtechnisch im Ofenkopf nur mit großem Aufwand zuverlässig quantitativ erfasst werden.

Handlungsempfehlungen

Die Handlungsempfehlungen wurden aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen und/oder den Ergebnissen der Betriebsversuche abgeleitet. Zudem flossen Betriebserfahrungen des Projektbegleitenden Ausschusses mit ein.

Primärlufteinstellungen am Hauptbrenner:

- Hohe Primärluftimpulse (Axial) verkürzen die Flamme und beschleunigen die Brennstoffpartikel. Die Aufenthaltszeiten in der heißen Flamme werden verkürzt, die Temperatur entlang der Flugbahn nimmt jedoch etwas zu. Die Erhöhung des Primärluftimpulses wirkt sich positiv auf den Abbrand der Regelbrennstoffe (Kohlenstaub) aus und führt zu einer kürzeren und heißeren Flamme. Sie bewirkt hingegen nur geringfügige Unterschiede in der Umwandlung der Ersatzbrennstoffe in der Gasphase.
- Hohe Drallluftimpulse erzeugen eine heiße und breite Flamme (ebenfalls bedingt durch intensivere Umsetzung der Regelbrennstoffe). Bei zu hohem Drall können EBS-Partikel aus der Flamme geschleudert werden. Anhand der Simulationen konnte für diesen Fall eine Abnahme der Umsetzung der Ersatzbrennstoffe in der Flamme identifiziert werden.

Sekundärluftparameter:

- Hohe Sekundärlufttemperaturen führen zu einem besseren EBS-Abbrand. Bei höherem Temperaturniveau in der Ofenanlage nehmen die Aufheizung und die thermische Umsetzung der Partikel zu.

EBS-Zuführung:

- Die Zuführung über einen Satellitenbrenner kann die Aufenthaltszeiten von EBS-Partikeln erhöhen und Partikel-Flugbahnen entlang hoher Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen ermöglichen.
- Eine separate Zuführung führt dazu, dass die EBS-Partikel-Flugbahnen weniger stark durch die Primärlufteinstellungen beeinflusst werden (z. B. Drallluft am Hauptbrenner).
- Die Position und Ausrichtung des Satellitenbrenners ist wichtig für den Abbrand der EBS und die Temperaturverteilung in der Gasphase. Bei ungünstiger Ausrichtung kann eine zusätzliche Flamme versetzt zur Hauptflamme entstehen. Die Simulationen zeigten, dass eine Neigung der Lanze Richtung Hauptflamme zu einem frühzeitigen Kontakt der EBS mit dem Klinker führen kann. Eine Zugabe der EBS über einen im Ofenkopf befindlichen Satellitenbrenner führte während der Betriebsversuche zu einer früheren Zündung.
- Zu hohe Fördergeschwindigkeiten bei der Brennstoffzuführung der EBS können die Fluggeschwindigkeit erhöhen und damit die Aufenthaltszeiten in der heißen Flammenzone verkürzen.

- Eine Verdrallung der EBS-Förderluft zeigte keinen wesentlichen Effekt auf die Verbrennung.

Brennstoffeigenschaften

- Es sollten nach Möglichkeit geringe Partikelgrößen angestrebt werden.
- Der Anteil „voluminöser“ Partikel, z. B. 3D-Kunststoffe sollte möglichst klein gehalten werden.
- Generell führt ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Partikelgewicht zu einem günstigeren Flug- und Abbrandverhalten. Leichte und flächige Partikel (Folien) sind daher zu bevorzugen.

5 Literatur

- [1] Liedmann B. et al.; An approach to model the thermal conversion and flight behaviour of Refuse Derived Fuel; Fuel; Vol. 200; pp. 252–271, 2017
- [2] International Flame Research Foundation (IFRF); The Combustion of Pulverized Coal and Alternative Fuels in Cement Kilns – Results of the CEMFLAME-3 Experiments; Ijmuiden 1999
- [3] Forschungsinstitut der Zementindustrie; Optimierung der Verbrennung und Steigerung der Substitutionsrate von Sekundärbrennstoffen in der Hauptfeuerung von Drehofenanlagen der Zementindustrie; Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15249 N. Düsseldorf 2009

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18862 N der Deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. (DVV) 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.