

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15322 N
Bewilligungszeitraum: 01.09.2007 – 31.08.2009
Forschungsthema: **Steigerung der Energieeffizienz und der Minderung von CO₂-Emissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie durch Oxyfuel-Technologie**

1 Einleitung

Zementklinker, der wichtigste Hauptbestandteil des Zements, wird in Deutschland heute zum überwiegenden Teil nach dem Trockenverfahren in Drehrohrofenanlagen gebrannt. Durch die Verbrennung der Brennstoffe sowie durch Rohstoffreaktionen während des Aufheizens entstehen CO₂-Emissionen. Die Minderung des Energieverbrauches und damit der Emissionen ist seither für die Zementindustrie von großer Bedeutung. Die Potentiale der traditionellen Maßnahmen zur Emissionsminderung wie die Verbesserung der Energieeffizienz durch Optimierung, Einsatz abfallstämmiger Sekundärbrennstoffe, Reduzierung des Zementklinkeranteils im Zement und Einsatz bereits teilentsäuerter Materialien als Rohstoffersatz sind heute weitgehend erschöpft oder aus technischen bzw. Qualitätsgründen limitiert. Langfristig strebt die Politik jedoch weltweit deutlich weitergehende Minderungen von CO₂-Emissionen an. Am 01. Januar 2005 wurde das europäische Handelssystem für CO₂-Emissionen eingeführt. Hiervon sind alle in Deutschland Zementklinker produzierenden Unternehmen betroffen. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und der Verbrennung aller Brennstoffe, wobei hier die Emissionen aus biogenen Anteilen der Brennstoffe nicht berücksichtigt werden. Da Zement ein auf absehbare Zeit nicht verzichtbarer Baustoff ist, muss er mittel- oder langfristig mit möglichst geringen CO₂-Emissionen produziert werden, wenn die Produktionsstandorte in Deutschland und Europa erhalten bleiben sollen. Eine Möglichkeit hierfür bieten die CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage), bei der das CO₂ aus dem Prozess entfernt und verdichtet wird, um anschließend in geeigneten Lagerstätten (z.B. Erdöl-/Erdgasfelder, Kohleflöze, Salzstöcke) gespeichert zu werden. Hierfür ist es notwendig einen CO₂-freien Brennstoff oder ein CO₂-reiches Abgas zu erzeugen. Dieses lässt sich mit sogenannten Precombustion-, Oxyfuel- oder Postcombustion-Technologien bewerkstelligen. Allerdings sind die Kosten dieser Verfahren für heutige Produktionsbedingungen extrem hoch.

Für die Zementindustrie gibt es bisher keine bekannten wissenschaftlichen Ansätze hierzu. Somit besteht dringender Bedarf, auch für die Zementindustrie weitergehende CO₂-Minderungstechniken zu entwickeln bzw. zu erproben und die Kosten abzuschätzen. Eine erfolgversprechende Technologie ist die Oxyfuel-Technik.

Die Oxyfuel-Technologie wird in anderen Branchen wie z.B. in der Glasindustrie seit längerer Zeit eingesetzt. Dazu wird die Verbrennungsluft durch reinen Sauerstoff ersetzt, um die Energieeffizienz des Brennprozesses zu erhöhen. Die moderate Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft wird schon seit längerem auch in der Zementindustrie betrieben. So wurden bereits in einigen Zementwerken, insbesondere in den USA, Erfahrungen mit der Sauerstoffanreicherung zur Verbesserung der Produktionsleistung und der Energieeffizienz gemacht. CO₂-Emissionen wurden auf diese Weise jedoch nur indirekt gemindert. Während die Kraftwerksindustrie bereits Pilotanlagen zur Minderung von CO₂-Emissionen mittels der Oxyfuel-Technologie betreibt, liegen dagegen bislang über den Einsatz der Technologie in der Zementindustrie keine Erkenntnisse vor. Die Übertragbarkeit der durch den Kraftwerks-

sektor erworbenen Kenntnisse ist jedoch auf Grund der unterschiedlichen Prozessführungen begrenzt. Zudem ist die Materialumwandlung im Ofen und damit einhergehend die spätere Produktqualität direkt abhängig von den Brennbedingungen, welche durch den Oxyfuel-Betrieb beeinflusst werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens war daher, die Grundlage für eine Bewertung zu schaffen, inwieweit die Oxyfuel-Technologie zur CO₂-Emissionsminderung für die Zementindustrie geeignet ist.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben-Nr.: 15322 N) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens war, die Möglichkeit der CO₂-Anreicherung beim Zementherstellungsprozess mit Hilfe der Oxyfuel-Technik zu erarbeiten. Obwohl der begrenzte Einsatz von Sauerstoff zur Steigerung der Produktionskapazität und Energieeffizienz für die Zementindustrie kein unbekanntes Thema darstellt, fehlen dennoch bislang Grundlagenuntersuchungen über die Auswirkungen eines echten Oxyfuel-Betriebs mit Abgasrückführung. Das Forschungsvorhaben schaffte daher die Basis für eine zusätzliche technische Option für die Zementindustrie, mittelfristig ihre CO₂-Emissionen weitergehender als bisher vermindern zu können. Das notwendige Basiswissen über die Auswirkungen der Anwendung dieser Technik beim Klinkerbrennprozess im Hinblick auf die Betriebsführung, die erforderliche Anlagentechnik, die Produkteigenschaften und Emissionen wurden mit Hilfe von Modellrechnungen und grundlegenden stofflichen Laboruntersuchungen im Rahmen dieses Projektes erarbeitet.

Während des Klinkerbrennens erfährt das Material eine Umwandlung zu den sogenannten Klinkerphasen, welche dem Zement die verschiedenen Eigenschaften verleihen. Diese chemisch-mineralogischen Reaktionen werden von verschiedenen Faktoren, wie Temperatur, umgebende Atmosphäre und Verweilzeit, beeinflusst. Die Oxyfuel-Technik beeinflusst den Ofenbetrieb erheblich. Hieraus resultiert eine direkte Beeinflussung u.a durch veränderte Temperaturführung der Klinkerphasenbildung und somit der späteren Produktqualität. Dieser Sachverhalt kann mit dem verfahrenstechnischen Prozessmodell geklärt werden, da dort die Materialumwandlung abhängig von der Temperatur abgebildet wird. Zur Bewertung der Auswirkungen des Oxyfuel-Betriebs auf den Klinkerbrennprozess wurden Simulationsrechnungen mit dem erweiterten Prozessmodell durchgeführt.

Der Einfluss der Ofenatmosphäre auf die Materialumwandlung wurde mittels Laboruntersuchungen in drei Stufen an drei Ofenmehlen unterschiedlicher Herkunft und somit unterschiedlicher Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten die Stufen Calcination, Klinkerbrand und Klinkerkühlung unter definierten Gasatmosphären. Erkenntnisse hieraus können im späteren Verlauf in die Prozessmodellierung einfließen.

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse konnten zudem erste Ansätze für eine großtechnische Umsetzung geschaffen werden. Hieraus ergaben sich Grenzen für die Nachrüstung bestehender Anlagen. Daher wurde primär ein Konzeptvorschlag für eine Neuinstallation eines Oxyfuel-Zementwerkes entwickelt. Hierfür wurde die Integration zum Einen der zusätzlich benötigten Aggregate (CO₂-Verflüssigung, LZA) und zum anderen die bereits vorhandenen Prozessschritte wie die Rohmaterialtrocknung berücksichtigt. Zusammenfassend kann eine vorläufige Bewertung der Machbarkeit und des CO₂-Minderungspotentials gegeben werden.

3 Ergebnisse

Die Laboruntersuchungen deckten die drei wesentlichen die Klinkerqualität bestimmenden Reaktionen: Calcinationsreaktion, Klinkerbrand und Klinkerkühlung, ab. Getestet wurden unter synthetisch hergestellten Atmosphären drei Ofenmehle unterschiedlicher Herkunft, um die Untersuchungen auf eine repräsentative Basis zu stellen. Die Calcinationsreaktion ist eine stark endotherme Reaktion, dessen Ablauf in direkter Abhängigkeit zum umgebenden CO_2 -Partialdruck steht. Bei den Untersuchungen dieser Reaktion stellte sich heraus, dass der CO_2 -Umgebungspartialdruck auf die getesteten Materialien eine unterschiedlich stark ausgeprägte Gleichgewichtsverschiebung der Entsäuerungsreaktion zu höheren Temperaturen bis zu 80 K zur Folge hat (siehe **Bild 1**).

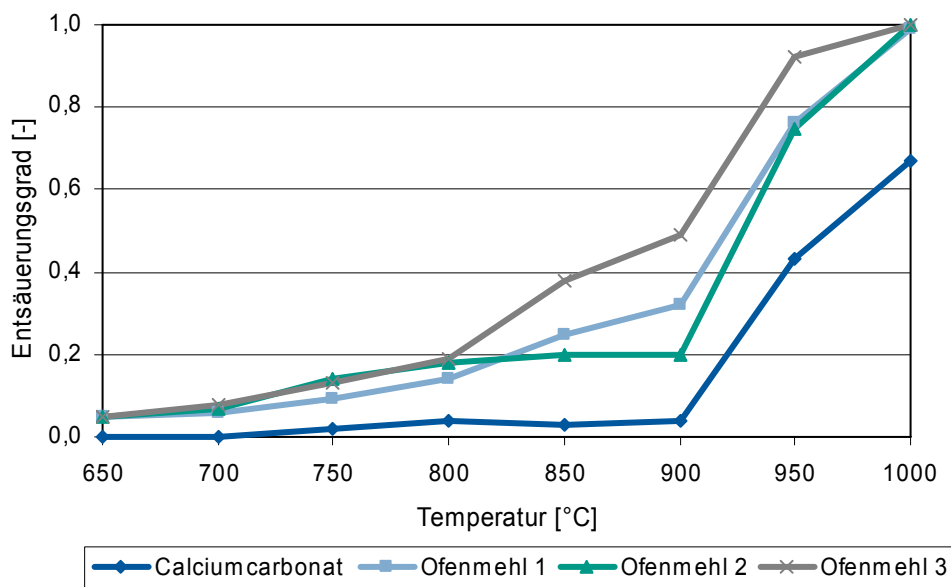


Bild 1 Vergleich der Entsäuerungsverläufe der Ofenmehle und reinem Calciumcarbonat bei einem CO_2 -Partialdruck von 0,97 bar

Durch verschiedene Analysen an den Ofenmehlen (z.B. Zusammensetzung, Korngröße, spez. Oberfläche) wurde festgestellt, dass die unterschiedlich starke Temperaturverschiebung der jeweiligen Calcinationsverläufe im Wesentlichen durch den Verwachsungsgrad der Silicium- und Calciumoxidbestandteile beeinflusst wird, da dieser sich stark auf die exotherme diffusionsgesteuerte Folgereaktion zu den Klinkerphasen auswirkt. Neben dem Einfluss auf den Brennstoffenergiebedarf, sind hierdurch ebenfalls der Einsatz von Sekundärbrennstoffen und die Ansatzbildung betroffen.

Nach diesem einleitenden Schritt wurden auch Klinkerbrand und Klinkerkühlung durch Herstellung von Laborklinkern unter Atmosphären variierender Zusammensetzung untersucht. Die Klinker wurden röntgendiffraktometrisch als auch mikroskopisch analysiert. Insgesamt wurde bei den durchgeführten Analysen kein auf den CO_2 -Gehalt zurückzuführender Effekt, wie reduzierendes Brennen oder Rekarbonatisierung, erkennbar. Vielmehr wurden geringe Schwankungen erkennbar, die im Versuchsaufbau verursacht liegen können. Es wird deutlich, dass trotz Klinkerbrand und -kühlung unter CO_2 -Atmosphäre ein Klinker üblicher Qualität hergestellt werden kann.

Im Weiteren wurden mittels Prozessmodellierung die Vorgänge innerhalb der eigentlichen Ofenanlage unter Oxyfuel-Bedingungen näher betrachtet. Das verwendete Computerpro-

gramm zur mathematischen Modellierung des Klinkerbrennprozesses wurde am Forschungsinstitut der Zementindustrie entwickelt. Es beschreibt den Prozess in verschiedenen Teilanlagen von der Aufgabe des Ofenmehls in den Vorwärmer bis zum gekühlten Klinker. Die Teilanlagen Vorwärmer, Calcinator, Ofen, Kühler und ggf. Bypass werden separat berechnet. Um den stationären Zustand der Anlage zu bestimmen, werden diese anschließend durch die ein- und austretenden Ströme der jeweiligen Bilanzräume miteinander verknüpft. Dieser modulare Aufbau lässt die Simulation unterschiedlichster Anlagenschaltungen, die zudem geometrisch definiert werden können, zu. Die Berechnungen beinhalten die Energie- und Stoffbilanzen für Brenngut-, Staub- und Gasströme sowie die Verbrennung der Brennstoffe und die Wärmeübertragung. Als Beurteilungsgrundlage der Simulationsstudie dienen die vom Modell gelieferten umfangreichen Prozessgrößen wie Massen- und Volumenströmen sowie deren Zusammensetzungen, Gas- und Feststofftemperaturen sowie Wärmeverluste.

Um Änderungen des Anlagenbetriebs beurteilen zu können, wurde als Ausgangspunkt der Simulationsrechnungen zunächst ein Referenzzustand festgelegt. Es handelt sich dabei um eine Ofenanlage mit einer Klinkerproduktionskapazität von 3000 t/d sowie einem fünfstufigen Vorwärmer, Calcinator und Tertiärluftleitung. Diese wurde nach dem BAT-Referenzdokument für die Zementindustrie ausgelegt und weist einen klinkerspezifischen Energiebedarf von $3026 \text{ kJ/kg}_{\text{Klinker}}$ auf. Von diesem Zustand ausgehend wurde zunächst der Stickstoff aus der Primärluft (Brennerluft) entfernt. Allein hierdurch werden die Temperaturprofile im Ofen, insbesondere in der Sinterzone, deutlich angehoben. Um ein Überbrennen des Klinkers und mögliche Schäden an der Ofenausmauerung zu vermeiden, wurde der Brennstoffeinsatz bis zur Erlangung der Sinterzonentemperatur des Referenzzustandes reduziert. Auf diese Weise war es möglich, den spezifischen Energiebedarf um 2,1 % zu mindern. Unberücksichtigt blieb allerdings die zur Luftzerlegung, d.h. zur Bereitstellung des Sauerstoffs, nötige Energie.

Bei der Modifikation der Ofenatmosphäre vom Luft- zum Oxyfuel-Betrieb wurde grundsätzlich ersichtlich, dass durch die höhere spezifische Wärmekapazität von CO_2 zu N_2 die Temperaturprofile der Anlage mit zunehmender CO_2 -Konzentration sinken. Es kommt insgesamt zu einer Energieverschiebung in der Ofenanlage. Ein Indiz hierfür sind die für den Energiebedarf ausschlaggebenden Kühler- und Vorwärmerwirkungsgrade. So steigt der Kühlerwirkungsgrad von 73 % im Referenzfall auf 86 % bei maximalem CO_2 -Gehalt, während der Vorwärmerwirkungsgrad gegenläufig vom Referenzfall (68 %) auf 61 % sinkt (siehe **Bild 2**).

Die niedrigeren Temperaturen haben auf die Wärmeübertragung allerdings keinen signifikanten Einfluss, da sie durch den höheren Emissionsgrad des CO_2 kompensiert werden. Die Klinkerphasenbildung verschiebt sich über die Ofenlänge durch Änderungen im Wärmeübertragungsverhalten, jedoch entstehen im Endprodukt Klinker nur wenige Abweichungen. Diese Effekte waren unabhängig von der Produktionskapazität der Ofenanlage zu beobachten. Geringe Abweichungen zwischen einer 3.000 tato- und einer 5.000 tato- Ofenanlage ergaben sich lediglich durch geringere spezifische Wandwärmeverluste der größeren Anlage.

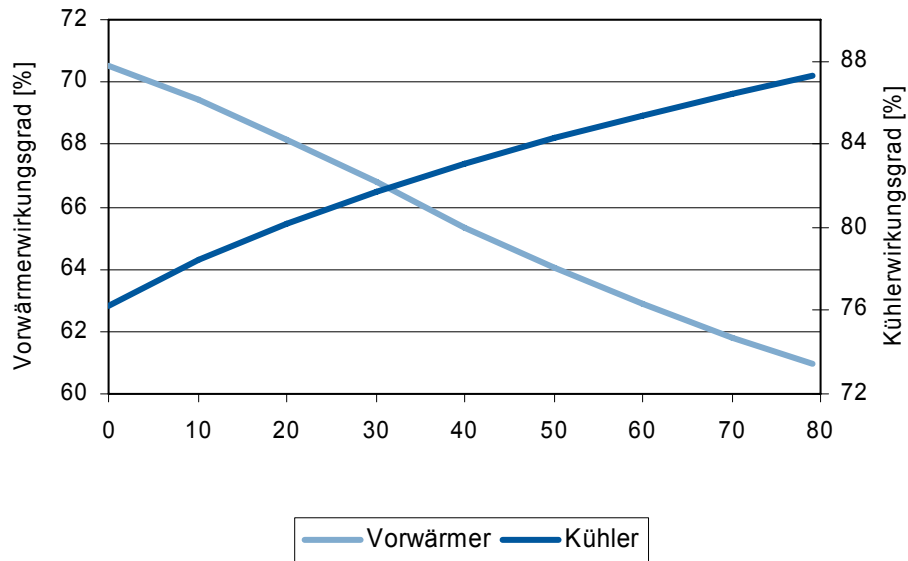


Bild 2 Vorwärmer- und Kühlerwirkungsgrade in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration

Ferner stellt der Sauerstoffgehalt einen weiteren Freiheitsgrad dar, da das Optimum wahrscheinlich oberhalb von 21 Vol.-% liegen dürfte. Auf Grund eines reduzierten Gasstroms und damit einhergehend die Störung der Vorwärmerfunktion, ist der Sauerstoffgehalt nicht grenzenlos variabel. Daher war eine Anhebung der O₂-Konzentration auf max. 30 Vol.-% möglich. Es zeigte sich bei einer Anhebung auf 25 Vol.-% eine Temperatursteigerung von 100 K in der Sinterzone (siehe **Bild 3**).

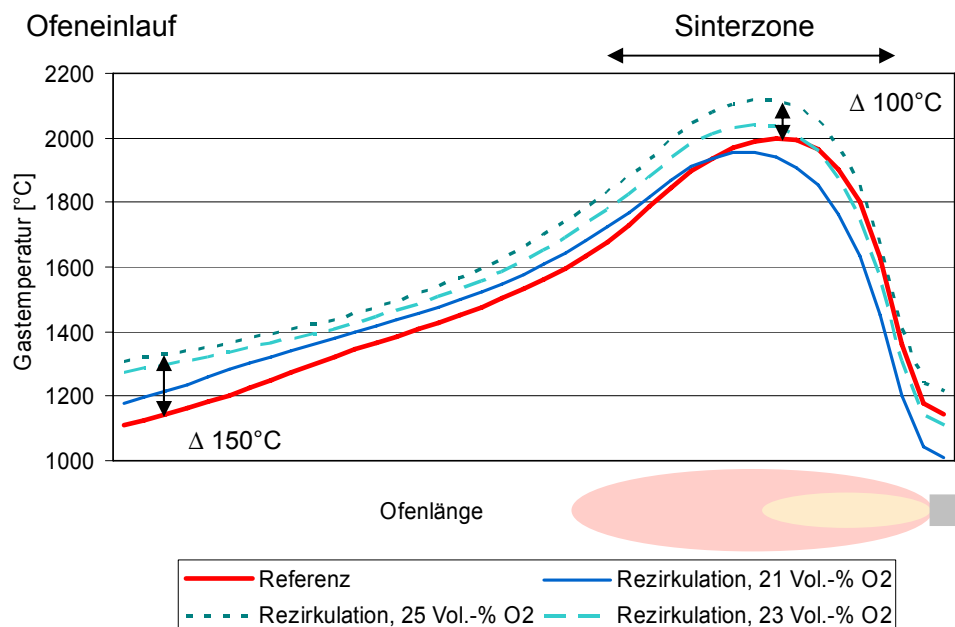


Bild 3 Einfluss der Brennatmosfera auf das Gastemperaturprofil über die Drehofenlänge

Somit kann auf Grund der wiederum veränderten Gaseigenschaften eine geringe Erhöhung des Sauerstoffgehalts den Einfluss des CO₂ auf Temperaturprofile sowie Strahlungsverhalten kompensieren. Durch Optimierung der Feuerfestausmauerung des Ofens wären auch die

hohen Temperaturen in der Sinterzone beherrschbar. Im Ofeneinlaufbereich erhöhen sich die Temperaturen jedoch um mehr als 150 K, was zu Problemen mit Ansatzbildung und somit zu Störungen des Betriebs führen kann, so dass der Vorentsäuerungsgrad ggf. herabgesetzt werden müsste. Insgesamt lässt sich unter den heutigen Betriebsbedingungen, z.B. ohne weitere Verringerung des Falschlufteintrages, das Optimum des Sauerstoffgehalts zwischen 23 und 25 Vol.-% ausmachen.

Bedingt durch die äußerst energieintensive Luftzerlegung wird zumeist ein Sauerstoffgemisch mit ca. 95 Vol.-% O₂ hergestellt. Daher wurde ein weiteres Element (Argon), welches bei der Luftzerlegung angereichert wird, in das Modell implementiert. Dieses hat zwar keine wärmetechnischen Auswirkungen, es wird jedoch möglich, den Aufwand der Abgasaufbereitung vor der CO₂-Verdichtung besser abzuschätzen.

Letztendlich werden im Abgas durch die Rezirkulierung CO₂-Konzentrationen im Mittel um 78,5 Vol.-% (trockener Zustand ca. 84 Vol.-%) erreicht (siehe **Tabelle 1**). Dieses wirkt sich erleichternd auf die spätere CO₂-Abtrennung aus dem Abgas aus. Auf Grund der Rezirkulation des Abgases werden jedoch ohne eine Reduzierung von Falschlufteinträgen ca. 10 % Stickstoff (bei 6 % Falschlufft) akkumuliert.

Tabelle 1 Abgaszusammensetzung in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungs„luft“

Komponente [Vol.-%]	21 Vol.-% Sauerstoff	23 Vol.-% Sauerstoff	25 Vol.-% Sauerstoff
CO ₂	78,50	79,40	79,80
O ₂	3,27	3,00	2,96
N ₂	10,30	9,50	8,70
H ₂ O	6,47	6,91	7,28
Ar	1,44	1,27	1,24
SO ₂	0,0093	0,011	0,012
Rezirkulationsrate	0,58	0,55	0,52

Zur Verringerung des Energiebedarfs der CO₂-Abtrennung wäre ein CO₂-Gehalt über 90 Vol.-% wünschenswert, welches nur durch weitere Falschluffminimierung umsetzbar ist. Eine Reduzierung, d.h. Abdichten, gestaltet sich durch den Übergang von statischen (Ofeneinlauf, Ofenkopf) auf bewegte Teile (Drehrohrofen) allerdings technisch anspruchsvoll. Auf lange Sicht wäre die Optimierung der Dichtungen trotz hoher Investitionskosten die wirtschaftlichere Lösung.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnten erste Aussagen über die technische Umsetzung gemacht werden. Dies beinhaltet ein erstes Konzept eines Oxyfuel-Zementwerkes, geeignet für Neuinstallationen, welche die zusätzlich benötigten energieintensiven Prozessschritte, wie eine Luftzerlegungsanlage und eine CO₂-Reinigungs- und -Kompressions-einrichtung, einschließt (siehe **Bild 4**).

Nach Begutachtung der spezifischen Bedürfnisse an die Sauerstoffbereitstellung können diese nach heutigem Stand lediglich durch eine kryogene Luftzerlegung (LZA) bedient werden. Der Energiebedarf der LZA ist direkt abhängig von der Sauerstoffreinheit, welche u.a. die Abgaszusammensetzung und damit den Aufwand der Reinigung vor dem Abtransport des CO₂ mitbestimmt.

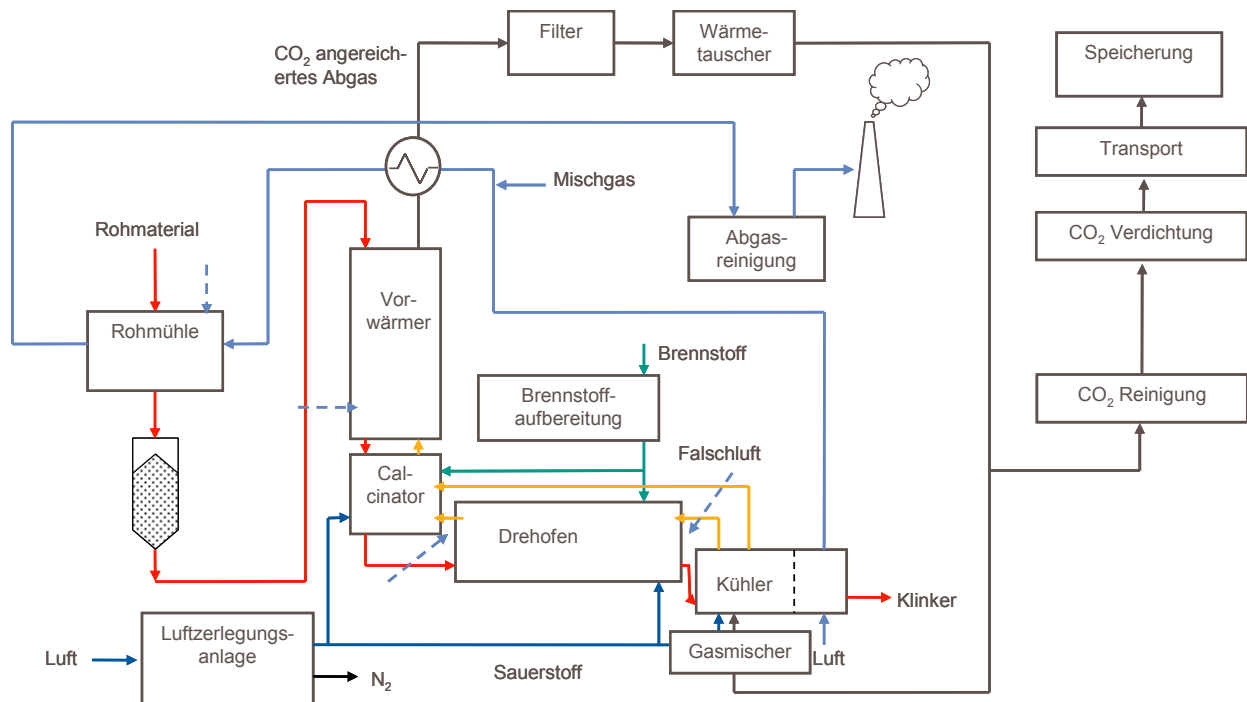


Bild 4 Möglicher Aufbau eines Oxyfuel-Zementwerkes

Einen weiteren erheblichen Einflussfaktor auf die CO_2 -Konzentration des Abgases bildet der Anteil an Falschluff. So lässt die Reduzierung der Falschluff von einem Prozent eine Verringerung der Reinheit des Oxidants von 99,5 auf 95 Vol.-% zu. Infolge dessen sinkt der Energieverbrauch der LZA erheblich und verbunden damit die Betriebskosten der Gesamtanlage. Das Sauerstoffgemisch der LZA wird zu zwei Brennstellen (Calcinator und Hauptfeuerung) als sogenannte Primärluft und zur Erzeugung eines Gasmisches aus Sauerstoff und recirkuliertem Abgas zum Kühler gefördert. Im Kühler rekuperiert das Gasmisch einen Teil der Wärme vom heißen Klinker und wird dem Ofen (Sekundärluft) und dem Calcinator (Tertiärluft) zugeführt. Um CO_2 -haltige Kühlerabluft zu vermeiden und dennoch den Klinker ausreichend zu kühlen, wurde der Kühler in zwei Stufen geteilt, welche gasdicht gegeneinander abgetrennt sind. Die zweite Stufe wird lediglich mit Umgebungsluft betrieben. Neben diesen Aspekten muss die Abwärmenutzung, die bislang zur Rohmaterialtrocknung diente, an den geänderten Betrieb angepasst werden. Um eine luftdichte Rohmühle zu vermeiden, wird die aus der zweiten Kühlerstufe entstehende Abluft zur Rohmaterialtrocknung genutzt, welche allerdings den Energiebedarf zur Trocknung einer durchschnittlichen Rohmaterialfeuchte nicht vollständig aufbringen kann. Mittels eines Gas-Gas-Wärmetauschers wird daher Wärme vom Abgas auf die Kühlerabluft übertragen. Unter diesen Bedingungen ist ein zusätzlicher Stromgewinnungsprozess mittels Abwärmenutzung des Abgases auf Grund der geforderten Prozesskontinuität stark abhängig von der Rohmaterialfeuchte. Insgesamt ist die Übertragbarkeit dieses Konzeptes auf bestehende Anlagen stark begrenzt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Anwendbarkeit der Oxyfuel-Technologie auf den Zementklinkerbrennprozess geprüft. Zur Erreichung dieses Ziels wurden zum Einen Laboruntersuchungen und zum Anderen Simulationsberechnungen mittels eines am FIZ entwickelten verfahrenstechnischen Modells durchgeführt.

Bei den Laboruntersuchungen an drei Ofenmehlen unterschiedlicher Herkunft stellte sich heraus, dass der CO_2 -Umgebungspartialdruck auf die getesteten Materialien eine unterschiedlich stark ausgeprägte Gleichgewichtsverschiebung der Entsäuerungsreaktion zu höheren Temperaturen um bis zu 80 K zur Folge hat, welches wiederum den Brennstoffenergiebedarf erhöht. Durch Analysen an den Ofenmehlen wurde festgestellt, dass deren Entsäuerungsverhalten im Wesentlichen durch den Verwachsungsgrad der Silicium- und Calciumoxidbestandteile beeinflusst wird, da dieser sich stark auf die exotherme diffusionsgesteuerte Folgereaktion zu den Klinkerphasen auswirkt. Bei der Untersuchung des Klinkerbrands und der Klinkerkühlung unter CO_2 -Atmosphäre wurde sowohl röntgendiffraktometrisch als auch mikroskopisch kein auf den CO_2 -Gehalt zurückzuführender Effekt, wie reduzierendes Brennen oder Rekarbonatisierung, erkennbar.

Mit Hilfe der Prozessmodellierung wurden anlagen- sowie prozesstechnische Anforderungen bei Oxyfuel-Fahrweise eines Zementdrehofens ermittelt. Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet eine sogenannte BAT (Best Available Techniques) -Ofenanlage mit einem spezifischen Energiebedarf von ca. $3.000 \text{ kJ/kg}_{\text{Klinker}}$ bei einer Produktionskapazität von 3.000 t/a. Auf diese Weise wurde deutlich, wie die Substitution von Stickstoff aus der Primärluft und die Rezirkulation von Abgas eine Energieverschiebung in der ganzen Anlage bewirkt. So zeigten Simulationen sinkende Temperaturprofile und Veränderungen im Wärmeübertragungsverhalten mit ansteigender CO_2 -Konzentration im Verbrennungsgas u.a. auf Grund der höheren spezifischen Wärmekapazität von CO_2 gegenüber N_2 . Zudem stellt der Sauerstoffgehalt im Verbrennungsgas einen weiteren Freiheitsgrad dar. Durch eine geringe Erhöhung der Sauerstoffkonzentration kann der Einfluss des CO_2 kompensiert werden. Insgesamt wurde für die jetzigen Betriebsbedingungen, d.h. ohne weitere Verringerung des Falschlufteintrages, das Sauerstoffoptimum zwischen 23 und 25 Vol.-% ermittelt. Die Abgaszusammensetzung und damit der Aufwand für die spätere CO_2 -Reinigung und -Verdichtung ist stark abhängig von dem Falschluffanteil (Annahme: 6%), der Reinheit des Sauerstoffgemisches (95 Vol.-% O_2) von der LZA und dem Sauerstoffüberschuss (3 Vol.-% O_2). Unter diesen Bedingungen beträgt die CO_2 -Konzentration im Abgas max. 79 Vol.-% (trocken 85 Vol.-%). Zur weiteren Anreicherung der CO_2 -Konzentration wurden verfahrenstechnische Anforderungen wie z.B. die Verbesserung der Dichtungen ermittelt.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde ein erstes Konzept für die technische Umsetzung entwickelt werden, welches sich für Neuinstallationen eignet. Zusammenfassend wurde innerhalb dieses Forschungsvorhabens erstmals gezeigt, dass die Anwendbarkeit der Oxyfuel-Technologie auf den Zementklinkerbrennprozess grundsätzlich möglich ist. Jedoch besteht zur detaillierten Auslegung noch zusätzlicher Forschungsbedarf.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht, da eine gute wissenschaftliche Basis für eine zusätzliche technische Option für die Zementindustrie, mittelfristig ihre CO_2 -Emissionen weitergehend als bisher zu vermindern, geschaffen wurde.