



TUBAF
Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.



Eigenschaften von MgO-Steinen nach Wärmebehandlungen in einem Tunnelofen unter wasserdampfhaltigen Atmosphären

5. Freiburger Feuerfestsymposium vom 22.-24.04.2024

U. Schuhmacher 1, Jana Hubálková 2, E. Rimpel 3, C.G. Aneziris 2

1: Refratechnik Holding, München

2: Institut für Keramik, Feuerfest und Verbundwerkstoffe, TU Bergakademie Freiberg

3: Institut für Ziegelforschung e. V., Essen

Agenda

- Einleitung - Aufgabenstellung und Zielsetzung
- Brennen basischer Steine in einem Tunnelofen - Prozessbeschreibung
- Versuchsprogramm: Refratechnik, TU Bergakademie Freiberg (TUBAF), Institut für Ziegelforschung (IZF)
- Versuchsdurchführung bei Refratechnik - Fertigung der Grünsteine - Teil 1
- Hochbrand einzelner Steine aus dem - IZF Teil 2
- Versuchsdurchführung und Datenerfassung am Institut für Ziegelforschung
- Auswertung der Ergebnisse von Refratechnik, dem Institut für Ziegelforschung sowie Durchführung weiterer Untersuchungen an der TU Bergakademie Freiberg
- Diskussion der Ergebnisse
- Zukünftige Maßnahmen
- Zusammenfassung

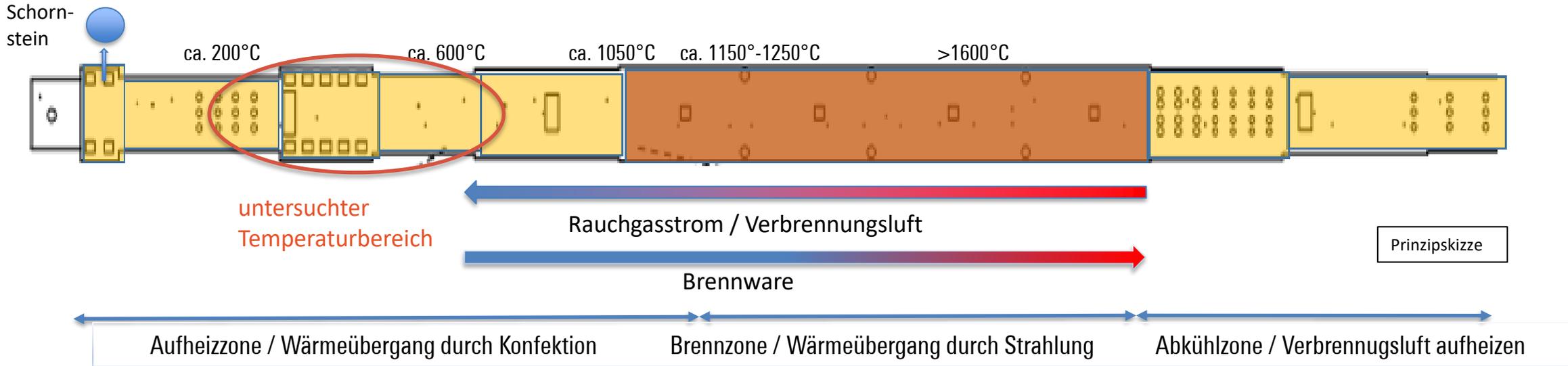
- **Klimaschutzgesetz - Mit dem geänderten Klimaschutzgesetz werden die Zielvorgaben für weniger CO₂-Emissionen angehoben. Das Minderungsziel für 2030 steigt um 10 Prozentpunkte auf mindestens 65 Prozent.**
- Die Erreichung der Zielvorgabe ist durch unter anderem durch den Einsatz von „grünem“ Wasserstoff als Energieträger möglich. Da beim Verbrennen von Wasserstoff lediglich Wasserdampf entsteht und kein klimaschädliches CO₂.

Gibt es Risiken beim Einsatz von Wasserstoff als Energieträger beim Brand basischer Steine in einem Tunnelofen?

- Hat der erhöhte Wasserdampfanteil in der Ofenatmosphäre, insbesondere der Aufheizzone, durch Brucitbildung oder andere mineralogische Reaktionen einen schädigenden Einfluss auf die Mikrostruktur und physikalischen Eigenschaften des Endproduktes?

Der bisherige Erkenntnisstand lässt keine eindeutige Aussage zu.

Brand basischer Steine in einem Tunnelofen - Prozessbeschreibung

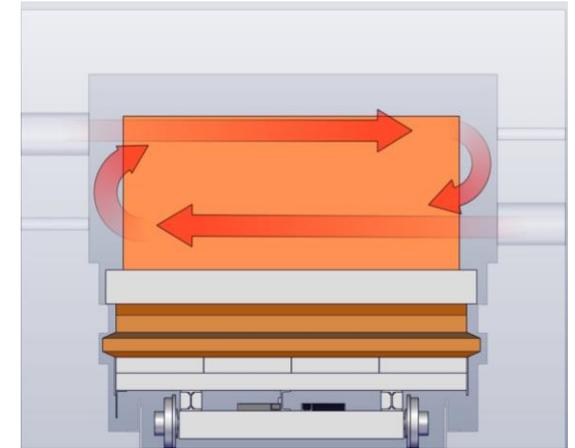
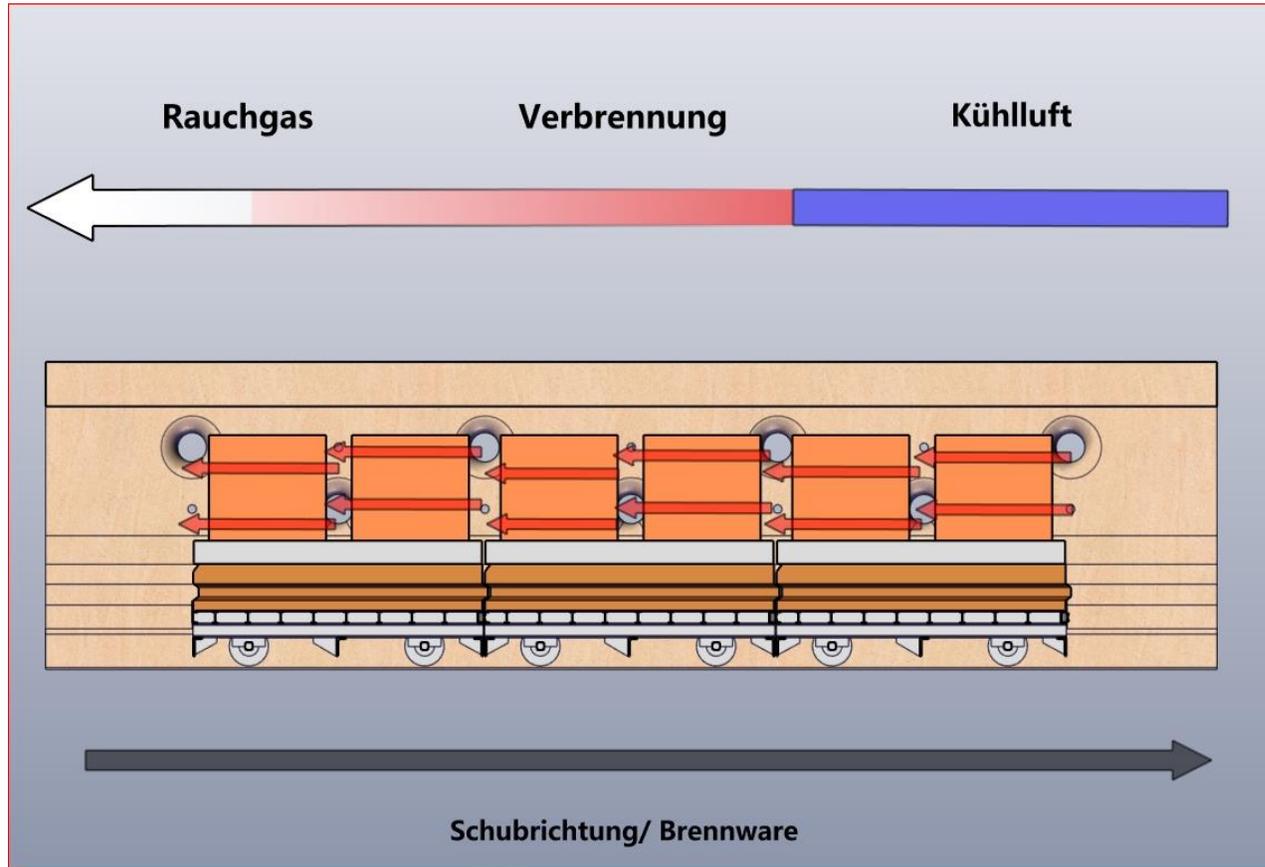


Ein Tunnelofen ist als Durchschubofen konzipiert und funktioniert nach dem Gegenstromprinzip wie ein Wärmetauscher. Die Verbrennungsluft wird in der Abkühlzone aufgeheizt. In der Brennzonen reagiert die Verbrennungsluft mit dem Energieträger und bewirkt als entstandenes Rauchgas das Aufheizen des Brenngutes. Die Brennware dient nach Verlassen der Brennzonen in der Abkühlzone wiederum zur Erwärmung der Verbrennungsluft.

Beim Einsatz von Erdgas als Energieträger entstehen im Rauchgas 18% Wasserdampf, beim Einsatz von reinem Wasserstoff 35%, wenn die Verbrennung stöchiometrisch mit λ 1,1 erfolgt.

Für einen Hersteller basisch gebrannter Steine stellt sich die Frage, ob Erhöhungen der Wasserdampfanteile in der Ofenatmosphäre im Bereich der Aufheizzone zu temporärer Brucitbildung oder anderen mineralogischen Reaktionen führen, die einen schädigenden Einfluss auf die Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften des Endproduktes führen?

Brennen basischer Steine in einem Tunnelofen - Prozessbeschreibung



Längsschnitt: Teildarstellung; Blick in die Brenngassen

Die Kühlluft/Rauchgas werden im Gegenstrom zur Brennware durch den Ofen gezogen. Damit die Brennware gleichmäßig aufgeheizt wird, sind die Seitenwandbrenner in den Brenngassen alternierend (oben/unten) angeordnet und erzeugen eine sogenannte „Feuerwalze“. Der Besatz wird somit vom Rauchgas vorgewärmt und nach dem Brand durch die Kühlluft abgekühlt.

Versuchsprogramm: Refratechnik, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Ziegelforschung

Mit einem teilweisen oder vollständigen Ersatz von Erdgas als Energieträger des Brennstoffs durch Wasserstoff, besteht die Gefahr einer temporären Brucitbildung (MgOH) oder weiterer mineralogischer Reaktionen während der Aufheizphase.

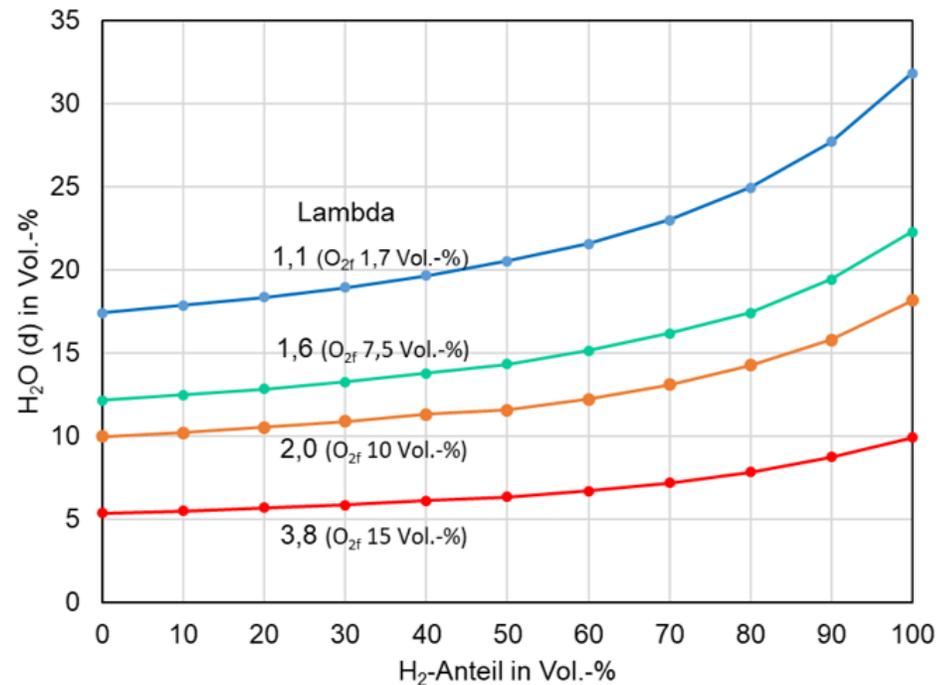
- Institut für Ziegelforschung
Brand / Tempern der Grünsteine in einem Versuchsofen bei unterschiedlichen Temperaturen (200°C , 400°C und 600°C) und Rauchgaszusammensetzungen 100% Wasserstoff, 50% Wasserstoff / 50% Erdgas, 100% Erdgas).
- Refratechnik Holding
Brennen einzelner vorbehandelter Steine aus den Versuchsreihen des IZF Essen in einem Tunnelofen bei $> 1.600^\circ\text{C}$.
- TU Bergakademie Freiberg
Durchführung der Untersuchungen an den getemperten und gebrannten Steinen des IZF und der Refratechnik
 - Physikalische Eigenschaften
 - Kaltdruckfestigkeit (Spaltversuch)
 - Chemische und Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung, RFA)
 - Mikroskopie

Für die durchgeführten Versuche am Institut für Ziegelforschung wurde ein Restsauerstoffgehalt von 15-Vol% Sauerstoff im Rauchgas eingestellt.

Hiermit sollten die derzeit üblichen Wasserdampf- und Sauerstoffgehalte im Temperaturbereich der Aufheizzonen (200-600°C) in einem Tunnelofen simuliert werden.

CH₄-H₂ Mischung

■ Wasserdampf in der Ofenatmosphäre



Bei der reinen Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff entstehen 35% Wasserdampf im Rauchgas.

Bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff mit Sauerstoff unter Berücksichtigung von 15% Sauerstoff im Brenngas entstehen 10% Wasserdampf. Bei der Verbrennung von reinem Erdgas sind dies 5%.

Sollte der Sauerstoffgehalt im Rauchgas weiter reduziert werden, z. B. durch Reduzierung von Falschlufteintritt, Einsatz von HG-Brennern oder Reingasbrennern, wird der Wasserdampfanteil im Rauchgas erhöht.

Ein erhöhter Wasserdampfanteil in der Aufheizzone könnte durch temporäre Brucitbildung oder weiterer mineralogische Reaktionen einen schädigenden Einfluss auf die Mikrostruktur bewirken.



Produktbeschreibung

Rohstoffbasis Magnesia-Spinell

Chemische Analyse

MgO	85 - 89	[Gew.-%]
Al ₂ O ₃	9 - 12	[Gew.-%]
CaO ca.	1.0	[Gew.-%]
SiO ₂ ca.	0.5	[Gew.-%]
Fe ₂ O ₃ ca.	0.5	[Gew.-%]

Physikalische Daten

Rohdichte	2.85 - 3.00	[g/cm ³]
Offene Porosität	16 - 18	[Vol.-%]

Auszug aus dem Datenblatt

Aus der laufenden Produktion wurden Grünsteine für die nachfolgenden Untersuchungen entnommen. Nach dem Tempern im Tunneltrockner wurden die Versuchssteine an das Institut für Ziegelforschung versendet. Die Versuche sollten bewusst an industriell gefertigten Steinen durchgeführt werden.

Versuchsdurchführung und Datenerfassung am IZF

Aufgabenstellung/Randbedingungen

Durchführung von Vergleichsbränden mit Erdgas 50 Vol.-% CH₄/50 Vol.-% H₂ und 100Vol.-% Wasserstoff am Versuchsofen des IZF, bei 3 Ofentemperaturen.

Folgende Randbedingungen wurden definiert:

- Brenntemperatur 200°C, 400°C, 600°C
- Haltezeit 12h
- Aufbau im Ofen (8 Rohlinge)

Erfasst wurden:

- Ofentemperatur
- Ofentemperatur zwischen Besatz
- Proben temperaturen (im Besatz)
- Sauerstoffgehalt
- Brennschwindigkeit



Brenner: im Betrieb mit 100 % Erdgas



Brenner - Außenansicht



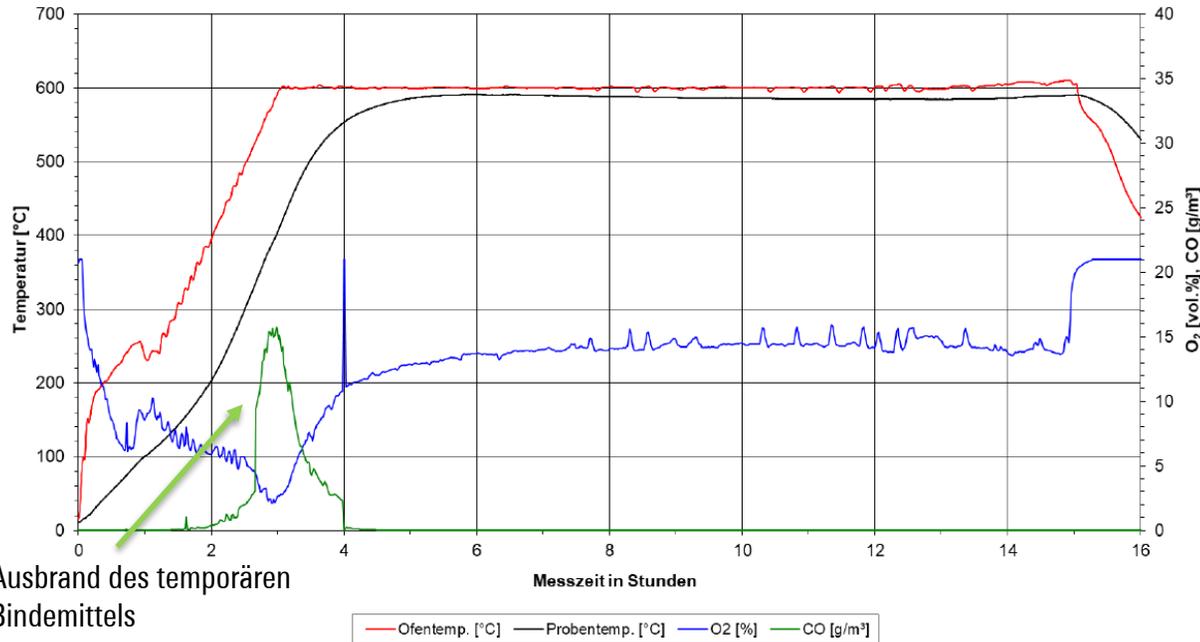
Brenner: im Betrieb mit 100 % H₂



Brenner – BIC 15 KW

Temperatur und O₂-Verlauf - 100 Vol.-% H₂ - 600°C

Refratechnik, 600°C Wasserstoff
Messzeit: 28.02.-01.03.2023



Festgelegte Randbedingung durch die Projektpartner: Der Sauerstoffgehalt im Rauchgas soll für alle Versuchstemperaturen ca. 15% betragen. Dieser Sauerstoffgehalt wird üblicherweise in den Tunnelöfen der Ziegel-, Keramik- und Feuerfestindustrie im Temperaturbereich zwischen 200-600°C gemessen.

Der Sauerstoffgehalt sollte zukünftig weiter reduziert werden, da die CO₂-Emissionen hierdurch ebenfalls reduziert werden. → z. B. Minimierung von Falschlufteintrag

Die Reduzierung des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas hat logischerweise eine Zunahme der Wasserdampfkonzentration und somit ein höheres Angriffspotential zur Folge.

Die berechnete Verdoppelung der Wasserdampfkonzentration im Rauchgas bei der Verbrennung mit reinem Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas wurde durch Messungen bestätigt.



Brennen einzelner
vorbehandelter Steine aus den
Versuchsreihen des Instituts für
Ziegelforschung im Tunnelofen
bei $> 1.600^{\circ}\text{C}$.

Nach dem Brand im Tunnelofen
wurden sowohl die beim IZF
„vorbehandelten“ Steine als
auch die gebrannten Steine aus
dem Tunnelofen für weitere
Untersuchungen an die TU
Freiberg versendet.

Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit

Material: gepresste, getemperte und anschließend bei 1600 °C gesinterte MgO-Steine

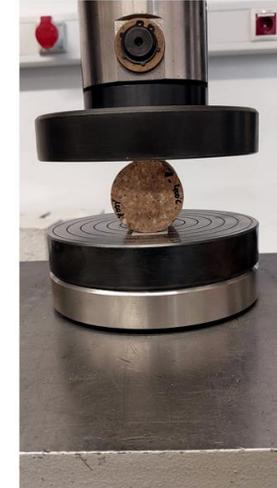
Vorbehandlung/Tempern:

Temperaturen: 200, 400 und 600 °C

Atmosphären: Erdgas, 50% Erdgas / 50% Wasserstoff, 100 % Wasserstoff

Atmosphäre/Temperatur der Vorbehandlung	200 °C	400 °C	600 °C
Erdgas	3,11 ± 0,08 MPa	3,07 ± 0,15 MPa	3,03 ± 0,21 MPa
50 % Erdgas / 50 % Wasserstoff	3,03 ± 0,12 MPa	2,95 ± 0,19 MPa	2,84 ± 0,28 MPa
100 % Wasserstoff	3,44 ± 0,13 MPa	3,03 ± 0,10 MPa	2,59 ± 0,26 MPa

Bestimmung der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6



während der Belastung



nach dem Erreichen der Höchstkraft

Bestimmung der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6

Belastungsgeschwindigkeit: 0,05 MPa/s

Die Spaltzugfestigkeit wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\sigma_{SZF} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

σ_{SZF} – Spaltzugfestigkeit in MPa

F – Höchstlast in N

L – Länge der Kontaktlinie des Probekörpers in mm

D – Durchmesser des Probekörpers in mm

Bei der Spaltzugfestigkeit wird im Gegensatz zum 3-Punkt Biegeversuch die Schubspannung über das gesamte Volumen des Probekörpers entlang der Länge der Kontaktlinie L ermittelt. Sie simuliert die Zugspannung deutlich besser als der Biegeversuch.

Der Einfluss eines erhöhten Wasserdampfanteils im Rauchgas ist anhand der Ergebnisse aus den Spaltzugfestigkeiten eindeutig zu erkennen.

- Die Ergebnisse aus den Spaltzugversuche konnten mittels Röntgenbeugung nicht eindeutig untermauert werden.
Zu vermutende Anteile an Brucit und/oder weiterer Mineralphasen liegen offensichtlich unter 3% und somit unterhalb der Nachweisgrenze.
- Durchgeführte Mikroskopische Untersuchungen ergaben keine eindeutigen Aussagen.
- Mit zunehmender Versuchstemperatur und zunehmendem Wasserstoffanteil konnten niedrigere Ecken- und Kantenfestigkeiten an den Versuchssteinen des Institutes für Ziegelforschung eindeutig festgestellt werden .

- Eindeutige Rückschlüsse lassen sich aus den Ergebnissen Differential Scanning Calorimetriy (DSC) schließen.

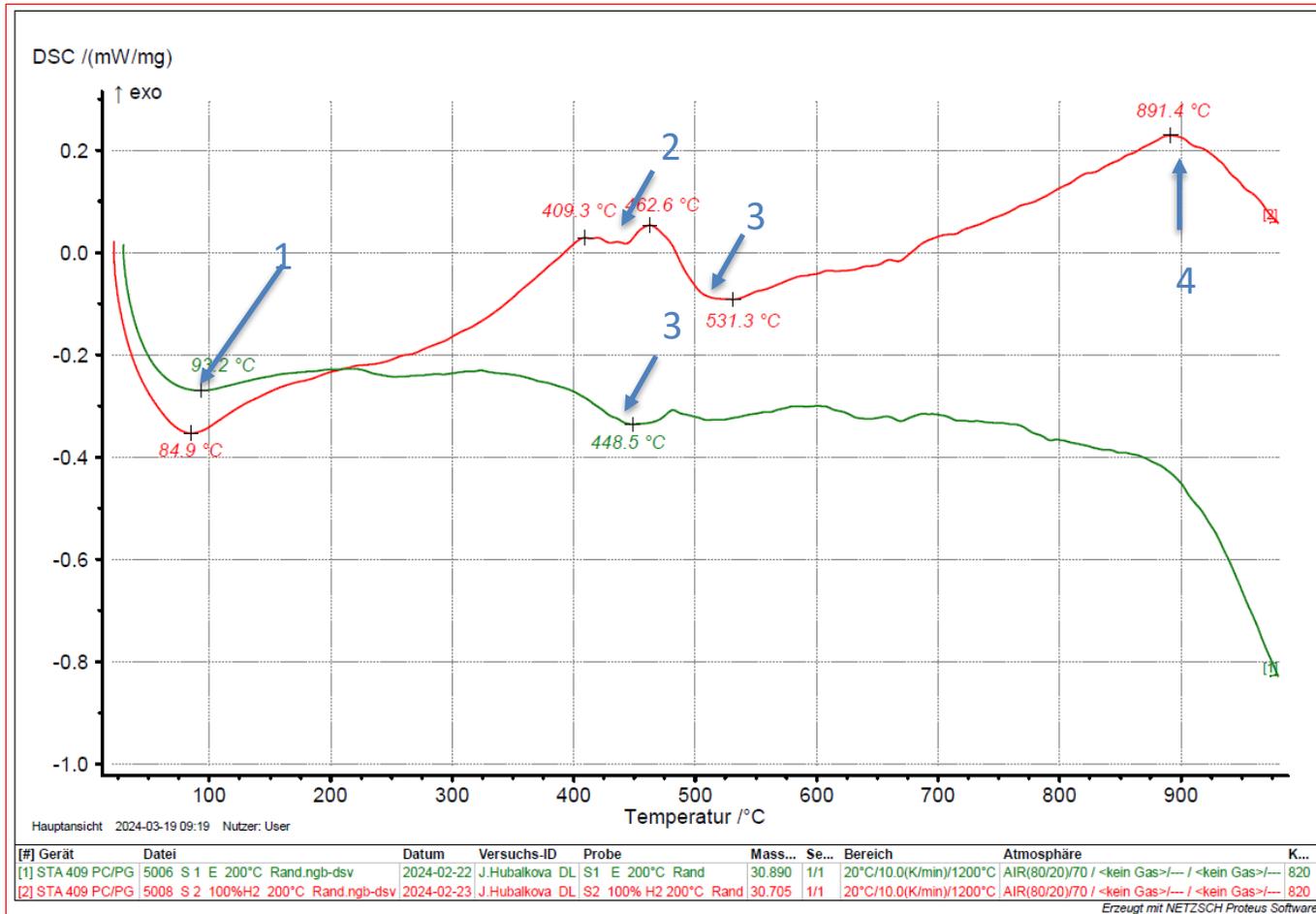


Probenvorbereitung: Probenmaterial wurde aus den behandelten Steinen entnommen und aufbereitet.

Die Messergebnisse wiesen unabhängig von der Entnahmestelle (Steinrand - mitte) bei gleichen Vorbehandlungstemperaturen und Gasatmosphären keine Unterschiede auf.

Versuche an der TU Bergakademie Freiberg

Differential Scanning Calorimetry (DSC) - (20-900°C)



Die bei 200°C und 100% Erdgas (grün) vorbehandelte Probe weist lediglich die erwartete exotherme Reaktion infolge der Dissoziation von Brucit bei ca. 430°C auf (1).

Die bei 200°C und 100 %Wasserstoff behandelte Probe (rot) zeigt folgendes Verhalten:

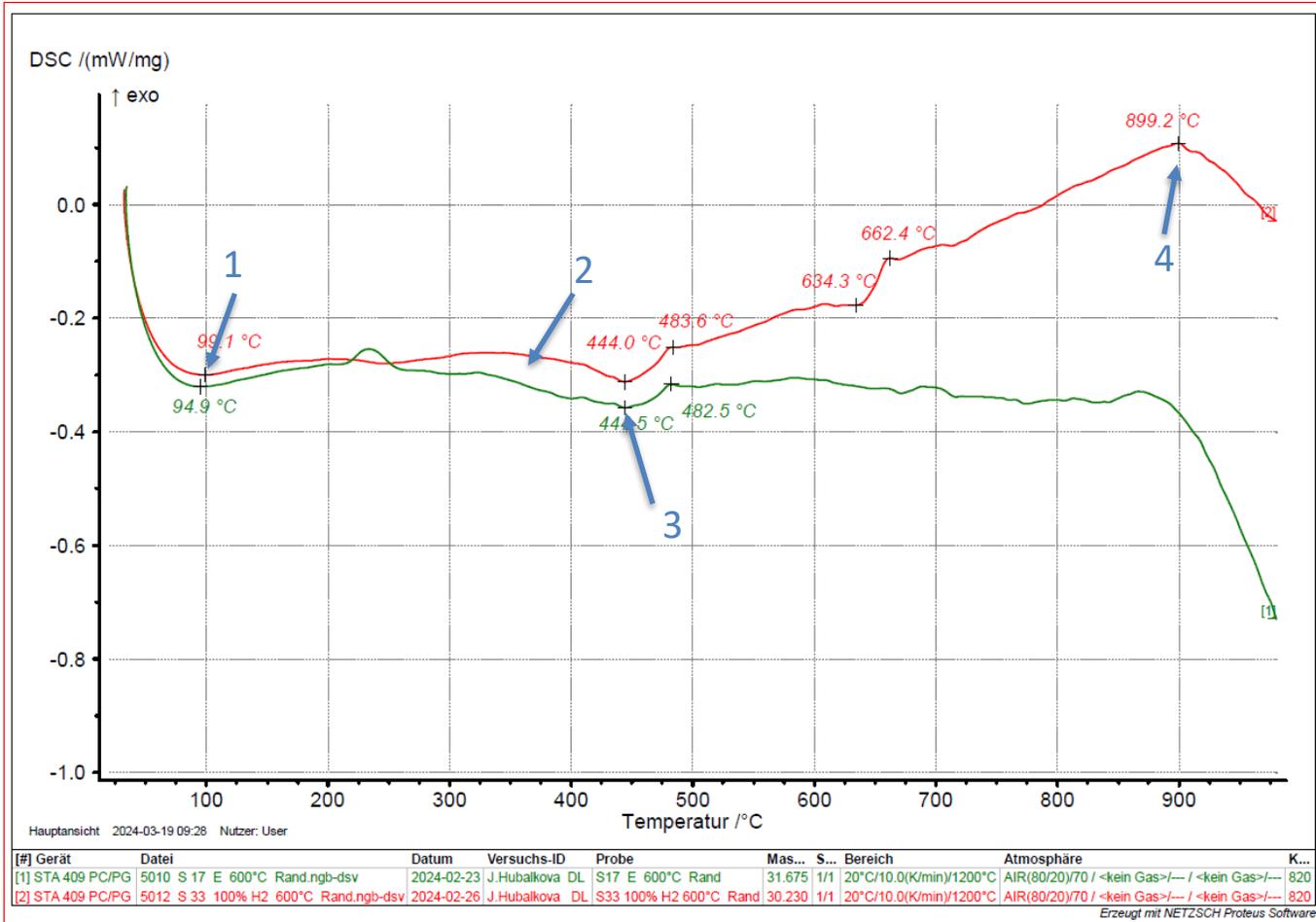
- 1 Der SiO₂-Anteil aus dem Rohstoff wurde unter Bildung von MSH-Phasen angegriffen. Im Temperaturbereich zwischen 80-140°C entweicht Wasserdampf und es bildet sich kolloidales SiO₂.
- 2 Zwischen 300-500°C bilden sich in einer ersten Phase MgO-Silikate aus.
- 3 Der ebenfalls gebildete Brucit Mg(OH)₂ dissoziiert erst bei 500°C (Verschiebung der Dissoziationstemperatur).
- 4 Ab ca. 550°C ist eine zweite, deutliche Phase der Ausbildung von Silikaten - Forsterit Mg₂(SiO₄), Enstatit Mg₂(Si₂O₆) etc. erkennbar.

Vorbrand am IZF: Brenntemperatur 200°C; Haltezeit 12 H; 100% Erdgas grün;

100% Wasserstoff rot

Versuche an der TU Bergakademie Freiberg

Differential Scanning Calorimetry (DSC) - (20-900°C)



Die bei 600°C und 100% Erdgas (grün) vorbehandelte Probe weist lediglich die erwartete exotherme Reaktion infolge der Dissoziation von Brucit bei ca. 430°C auf (1).

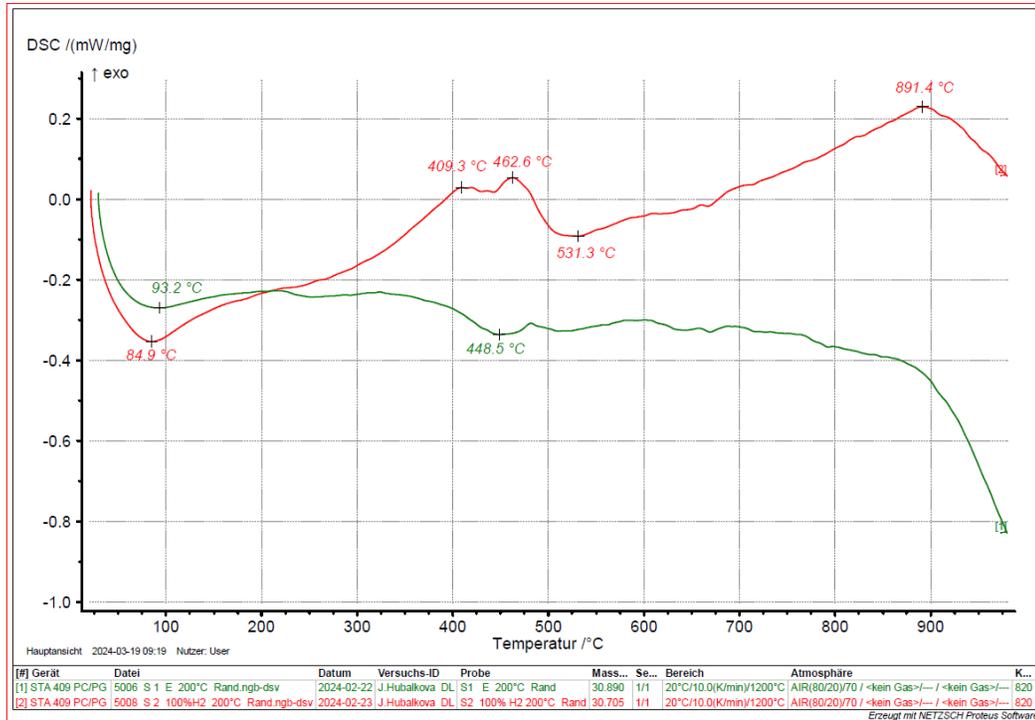
Die bei 600°C und 100 Wasserstoff behandelte Probe (rot) zeigt folgendes Verhalten:

- 1 Der SiO₂-Anteil aus dem Rohstoff wurde unter Bildung von MSH-Phasen nicht angegriffen. Im Temperaturbereich zwischen 80-140°C entweicht Wasserdampf und es bildet sich kolloidales SiO₂.
- 2 Zwischen 300-500°C bilden sich keine Schichtsilikate aus.
- 3 Der gebildete Brucit Mg(OH)₂ dissoziiert bei ca. 430°C (keine Verschiebung der Dissoziationstemperatur).
- 4 Ab ca. 550°C ist eine deutliche Phase der Ausbildung von Schichtsilikaten erkennbar.

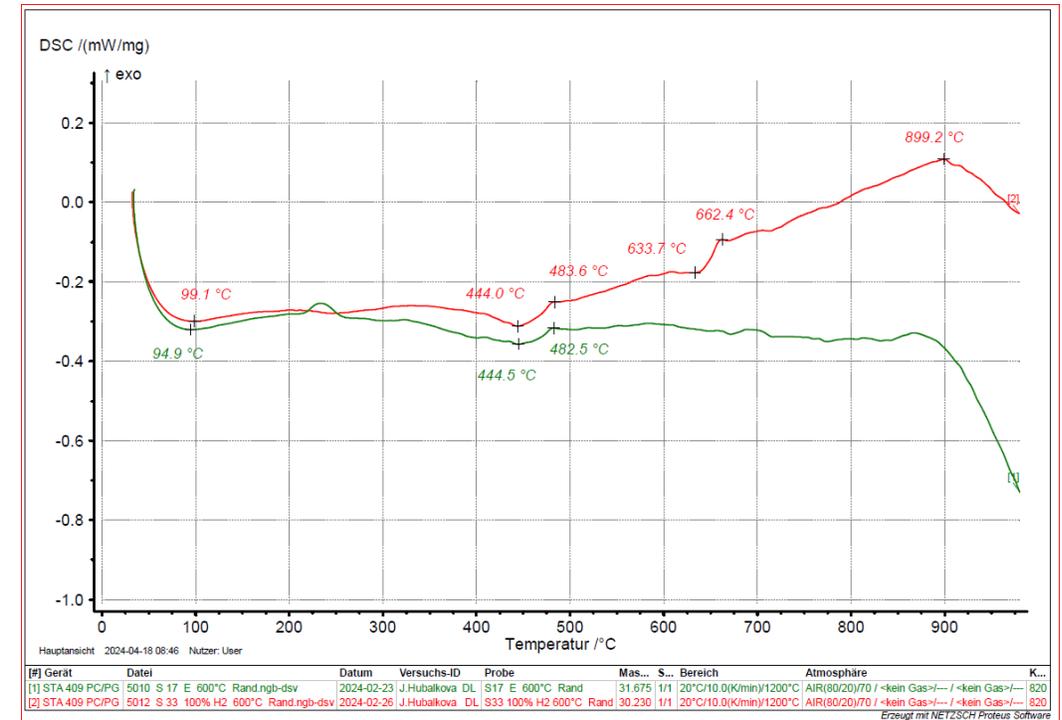
Vorbrand am IZF: Brenntemperatur 600°C; Haltezeit 12 H; 100% Erdgas grün;
100% Wasserstoff rot

Versuche an der TU Bergakademie Freiberg

Differential Scanning Calorimetry (DSC)



Tempern / Vorbrand: 200°C / 12 h Haltezeit
 Deutlich stärkere Dissoziation der MSH-Phasen bzw. das kolloidale SiO₂ verliert Wasser (80-140°C)
 Ausbildung von MS-Phasen zwischen 300-500°C (Phase 1)
 Dissoziation des Brucits bei ca. 500°C (Wasserstoffprobe)
 Ausbildung weiterer Silikate bis 900°C (Phase 2)



Tempern / Vorbrand: 600°C / 12 h Haltezeit
 keine Dissoziation der MSH-Phasen erkennbar
 Ausbildung von Silikaten nicht eindeutig nachweisbar (Phase 1)
 Dissoziation des Brucit bei ca. 430°C (Literaturwert)
 Ausbildung von Silikaten bis 900°C (Phase 2)

Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis der exothermen Reaktionen (MS-Phasenbildungen) bis zur Bildung von Forsterit und/oder Enstatit kommt es zu Volumenänderungen, die zu Festigkeitsreduzierungen führen.

Brucit ist sicherlich der primäre Faktor (ca. 50-% Volumenzunahme), jedoch nicht der alleinig bestimmende, was die Ergebnisse der DSC-Analyse zeigen. Durch den Angriff des Wasserdampfes auf das SiO₂ im Feinkorn und Mehl des MgO-Zuschlagstoffes mit resultierenden Volumenzunahmen (ca. 10.-Vol. %) wird die Schwächungen der Gefüge in Abhängigkeit der Temperaturen und Wasserstoffanteile im Verbrennungsgasgemisch noch verstärkt.

Also es ist nicht nur die Brucitbildung!

Hierzu entsteht, ergänzt um weitere aus Messungen der Dilatometrie und Hochtemperatur-XRD, eine Publikation, die in der Open Ceramics veröffentlicht wird.

Diskussion der Ergebnisse

Weitere Untersuchungen des Wirkmechanismus sind notwendig, zum Beispiel:

- Versuche beim IZF mit 7,5% Sauerstoff im Rauchgas
- Versuche bei IZF mit Haltezeiten bei 200°C und danach Hochfahren auf 400°C, 600°C zur besseren Simulation des Brandes im Tunnelofen
- Versuche mit gepressten Tabletten aus Feinkorn, damit die Angriffe von Wasserdampf in Abhängigkeit der Konzentration im Rauchgas, der Temperatur und der Zeit genauer untersucht werden können.
- > evtl. deutlichere Ausbildung der Mineralphasen
- > Noch deutlicher Festigkeitsunterschiede
- ➔ Weitere Versuche unter Beteiligung von Mitgliedern aus dem DKG/DGM Fachausschuss Feuerfest sollten in einem gemeinsamen Forschungsprojekt durchgeführt werden, da es sich hierbei um ein übergeordnetes Problem handelt, das alle Hersteller basischer Steine betrifft.

Zukünftige Maßnahmen und deren Einflüsse auf die Materialeigenschaften **REFRATECHNIK** gebrannter basischer Steine

(Reduzierung der CO₂-Emissionen ist das übergeordnete Ziel nicht der Einsatz von Wasserstoff)

- Weitere Reduzierung des Gasverbrauchs -> Reduzierung der CO₂-Emissionen
-> Reduzierung Energieverbrauchskosten für Erdgas und CO₂-Zertifikate

Anpassung und Verbesserung der Brenntechnik - aktiv

Einsatz von HG-Brennern -> besserer Wärmeübergang

Einsatz von Reingasbrennern -> besserer Wärmeübergang

Einsatz von Umwälzern in der Aufheiz- / Vorwärmzone -> besserer Wärmeübergang

- > geringere Temperaturdifferenz im Besatzblock
- > keine Erhöhung des Wasserdampfanteil in der Aufheizzone
- > kein Einfluss auf das gebrannte Endprodukt

Reduzierung des Falschlufteintrags in der Aufheiz- / Vorwärmzone - passiv

Beimischung von Wasserstoff (bis ca. 25%) zum Erdgas - passiv

- > Reduzierung des Gasverbrauchs
- > erhöhter Wasserdampfanteil in der Vorwärmzone, da der Verdünnungseffekt durch Falschlufteintrag wegfällt.



Venturidüse am Brennerkopf eines Reingasbrenners

Zukünftige Maßnahmen und deren Einflüsse auf die Materialeigenschaften gebrannter basischer Steine **REFRATECHNIK**

➤ Nutzen von Strom als elektrischer Energieträger

Vorteil: Keine CO₂-Emissionen beim Einsatz von grünem Strom
Kein Wasserdampf im Bereich der Aufheiz- / Vorwärmzone

Der Einsatz von klassischen Heizelementen wie sie in Laboröfen eingesetzt werden ist in einem Tunnelofen für den Hochtemperaturbrand basischer Steine derzeit unwirtschaftlich. Die Heizelemente wären äußerst teuer und der Wärmeübergang mittels Strahlung ohne Umwälzung nicht gewährleistet.



Aufgrund der Besatzdichte würde die Strahlungsenergie bei den heutigen Öfen nicht ausreichen, damit ein Brand unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden könnte. Hierzu müssten neue Ofentypen entwickelt

Bei einer Auflockerung des Besatzes besteht die Gefahr erhöhter Ausschussmengen durch Ecken- und Kantenbeschädigungen sowie einer Reduzierung der Standfestigkeit des Besatzes, verbunden mit einem erhöhten Gefahrenpotential für Besatzeinstürze.

Zukünftige Maßnahmen und deren Einflüsse auf die Materialeigenschaften gebrannter basischer Steine **REFRATECHNIK**

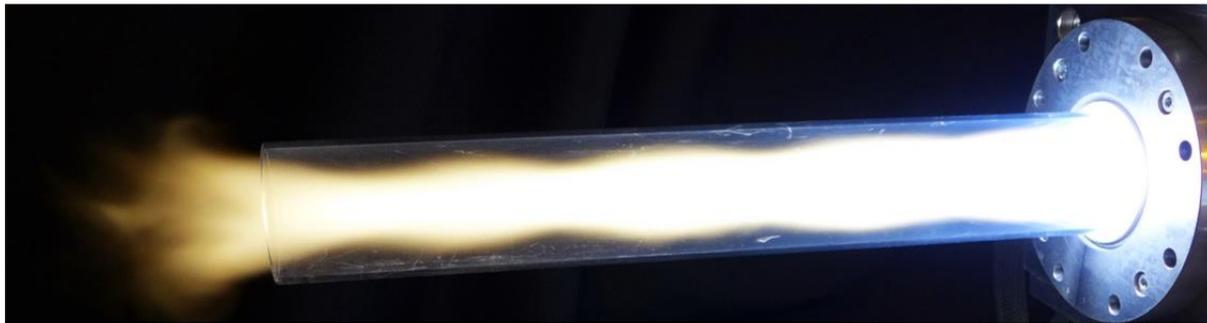
➤ Nutzen von Strom als elektrischer Energieträger - Hybrid-FIRE



Versuchsanlage am IKFVW



Offene Fragen / Optimierungsbedarf



Ofenraum Wärmeeintrag	Ofenwand/Dämmung /Abschirmung	Plasmaerzeugung Energiezufuhr
→Maximaler Energieeintrag	→Minimierung Energieverluste	→Optimierung Temperatur
Stabiles Brennerrohr anstelle von Quarzglas	Wärmedämmmaterial unter hoher Temperaturbelastung infolge der Strahlung	Gekühlter Brennerkopf (Al) Evtl. Neugestaltung bzw. anderes Material

Der Einsatz von Mikrowellen-plasmabrennern stellt eine mögliche Alternative zu den bisher eingesetzten Gasbrennern dar.

Funktionsweise:

In einem Magnetron werden Mikrowellen einer bestimmten Frequenz erzeugt und anschließend in einem Plasmabrenner gezündet. Das Plasma wird über ein Brennerrohr, analog zu den bisher genutzten Brennern in die Brenngassen im Tunnelofen geblasen.

Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert (BMWK).



Zukünftige Maßnahmen und deren Einflüsse auf die Materialeigenschaften gebrannter basischer Steine

➤ Nutzen von Strom als elektrischer Energieträger - **Hybrid-FIRE**

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die derzeitigen Laborbrenner in Phase 1 weiterentwickelt werden. An der TU Bergakademie Freiberg wird in Phase 2 ein Demonstratorofen für Technikumsversuche und gebaut und ein Prototyp für den Einsatz in einem Tunnelofen entwickelt. In Phase 3 wird das Brennersystem im industriellen Umfeld an Schmelzöfen der Eisen- und Stahlindustrie sowie an Tunnelöfen getestet.

Vorteile dieses Brennertyps:

- Keine Emissionen von CO₂
- Keine Emissionen von Wasserdampf
- An vorhandenen Tunnelöfen sollten keine aufwendigen Umbaumaßnahmen notwendig sein.
- Ein Parallelbetrieb mit bisherigen Erdgasbrennern ist möglich.

- Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit geben eindeutige Informationen über die Risiken beim Brand basischer Steine mit erhöhten Anteilen an Wasserstoff. Eine weitere Reduzierung des Sauerstoffanteils im Rauchgas wird zu weiteren Reduzierungen der Festigkeiten der gebrannten Steine führen.
Der genaue Wirkmechanismus sollte noch detaillierter untersucht werden.
- Der Einsatz von Wasserstoff als alleiniger Energieträger für den Brand basischer Steine in einem Tunnelofen ist aufgrund der Wasserdampfbildung nicht geeignet.
- Die Weiterentwicklung der bisherigen Brennertechnologien muss konsequent fortgesetzt werden.
- Erdgas wird als Brennstoff noch weiterhin vorhanden sein, evtl. mit Beimischungen an Wasserstoff.
- Mit dem Einsatz von Mikrowellenplasmabrennern könnten sowohl die Konzentrationen von Wasserdampf als auch von CO₂ im Rauchgas reduziert werden. Daher stellt der Einsatz von Mikrowellenplasmabrennern in Tunnelöfen eine Möglichkeit für das Brennen basischer Produkte in einen Tunnelofen durch das Nutzen elektrischer Energie dar.
- In einer Übergangsphase wird es sicherlich einen „Mischbetrieb“ mit diversen Systemen geben.

Herzliches Glückauf