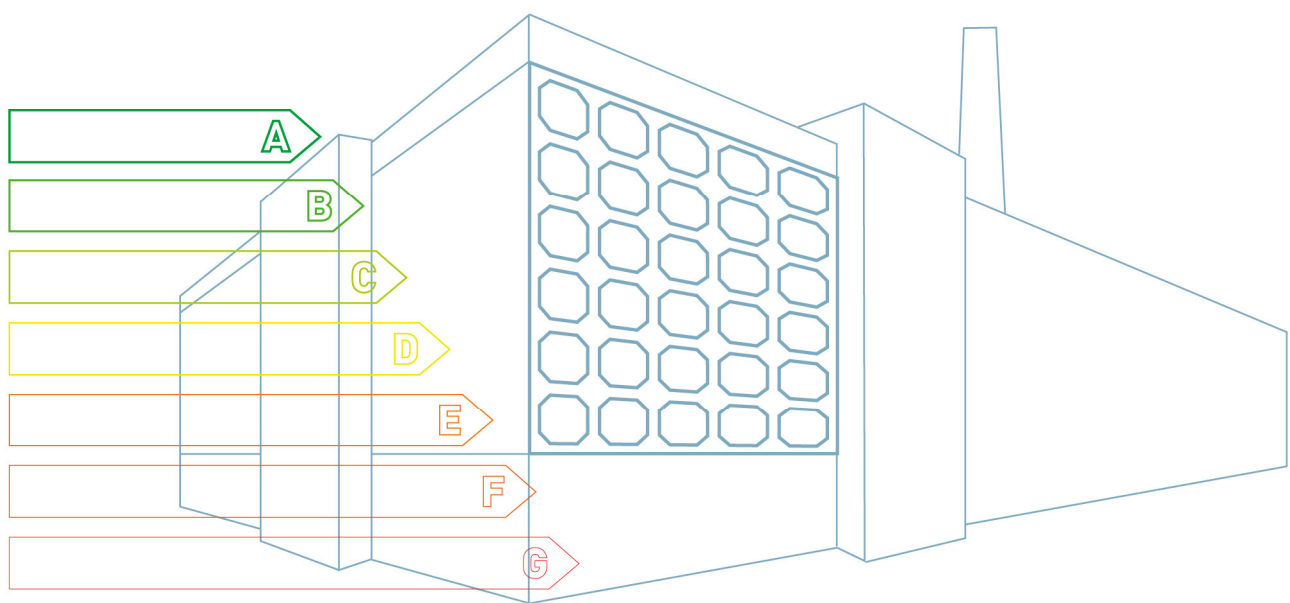




Efficient Dry and Burn

Energieeffizienter Trocknungs- und
Brennprozess für Hochleistungs-
wärmedämmmaterialien und
Auskleidungssysteme



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

NEUE ENERGIEEN 2020

Publizierbarer Endbericht – INDEX

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

1 Einleitung

Aufgabenstellung

Das wesentliche Ziel im Projekt „Efficient Dry And Burn“ ist die Senkung des spezifischen Energieverbrauches bei der Herstellung von Hochleistungswärmedämmmaterialien (Feuerleichtstoffen) und chemisch resistenten Auskleidungssystemen (Schwersteinen).

Die Hauptfragestellung der Forschungstätigkeiten in Zusammenhang mit den bei der RATH Gruppe verwendeten Tunnel- und Kammeröfen besteht in der Qualitäts- und der Effizienzsteigerung, welche nicht unbedingt getrennt betrachtet werden können. Eine optimierte Ofenluftführung bedeutet unter anderem eine bessere Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Exergie, welche durch den Primärbrennstoff Erdgas eingetragen wird. Eine gleichmäßigere Ofenraumtemperatur bedeutet auch die Vermeidung von Kurzschlüssen in der Strömungsstruktur und damit einen höheren Wirkungsgrad.

In der Untersuchung der Trockner ist man an der Fragestellung interessiert, ob eine Verkürzung der Trocknungszeit bei einer gleichzeitigen Vergleichmäßigung der Luftströmung im Trockner mit bei der RATH Gruppe vorhandenen Trocknertechnik möglich ist, oder ob eine Neuinvestition zur Erreichung dieser Ziele notwendig ist. Es sollen durch systematische Untersuchungen während des Betriebes ausgewählter Trockenkammern Erkenntnisse und Grundlagen zur möglichen Leistungssteigerung gewonnen werden. Bei allen Materialien muss durch intelligente Regelung der Trockner die Trocknungszeit herabgesetzt werden. Durch diese zeitliche Verkürzung wird wiederum Energie eingespart oder Trocknerverfügbarkeit gewonnen.

Die Suche nach alternativen Porosierungsmitteln soll einerseits den Entgasungsvorgang beherrschbarer machen und kann andererseits die Verwendung von weiteren biogenen Brennstoffen ermöglichen, wodurch wiederum der Bedarf an fossiler Primärenergie (Gas) gesenkt wird.

Schwerpunkte des Projektes

Schwerpunkte des Projektes sind:

- Experimentelle Optimierung von Kammeröfen
- Experimentelle Optimierung von Tunnelöfen
- Experimentelle Optimierung von Trockenkammern
- Bilanzierung und Modellierung durch Simulation eines Kammerofens sowie eines Trockners
- Praktische Implementierung der Ergebnisse aus Experimenten und Rechnungen
- Untersuchung von organischen Porosierungsmitteln für Leichtsteine

Einordnung in das Programm

Energiestrategische Ziele:

Hauptziel ist die deutliche Senkung des spezifischen Energieeintrags (Nm^3 Gas pro Tonne fertigem Feuerfeststein) und damit des Bedarfs an fossilen Brennstoffen beim Trocknen und Brennen mullitischer Ausgangsmaterialien in der Herstellung von Hochleistungswärmedämmmaterialien und chemisch resistenten Auskleidungssystemen. Zusätzlich zu der Reduktion des CO_2 -Ausstoßes können die Standorte in Österreich so wie in der EU nachhaltig gesichert werden. Dadurch kann auch eine Stabilisierung der Marktposition gegenüber Billigerherstellern im Nicht-EU-Ausland erzielt werden – neben einer Sicherung heimischer Arbeitsplätze und einem Beitrag zur Erreichung der Klimaziele der EU.

Durch die exklusive Verwendung von Erdgas zur Befeuerung besteht naturgemäß eine starke Abhängigkeit von importierten, fossilen Brennstoffen. Eine Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs bedeutet implizit eine verbesserte Position und geringere Angreifbarkeit des Unternehmens durch unvorhersehbare Marktschwankungen auf dem Energiemarkt.

Systembezogene Ziele:

Zusätzlich zur energetischen Optimierung der Prozesse sollen die Taktzeiten von Trocknern und den Öfen sowie die Vorschubzeiten in semikontinuierlichen Brennöfen reduziert werden- bei gleichzeitig steigender Produktqualität. Die damit verbundene Erhöhung der Ausbeute trägt zu einer Reduktion des Verbrauchs kostbarer, natürlicher Rohstoffe bei.

Technologiestrategische Ziele:

Die RATH Gruppe plant längerfristige Investitionen für anwendungsbezogene Forschungen an Trocknern und Brennöfen zu tätigen. Das Ziel des Projekts ist der Aufbau von Know-How für das Trocknen und Brennen von Feuerfestmaterial. Strategische Kooperationen mit Trockner- und Ofenherstellern werden angestrebt, um in Zukunft energieeffizientere System im Betrieb einzusetzen und an Partner in der Branche zu vermarkten.

Verwendete Methoden

Im Rahmen der Arbeiten sollen wichtige Aspekte bei Trocknung und Brennen von Feuerfeststeinen betrachtet werden.

Im gegenständlichen Projekt liefert die zeitaufgelöste, instationäre Messung und simulative Abbildung der Aufheizvorgänge wertvolle Einblicke zum besseren Verständnis der Herstellungsprozesse. Gleichzeitig können die Auswirkungen von alternativen Trocknungskonzepten vor der Einführung im Produktionsbetrieb am Computer durchgerechnet werden und kostspielige Fehlentscheidungen vermieden werden.

Als Brennöfen kommen je nach Anwendung sowohl Batch-Öfen als auch kontinuierliche Tunnelöfen zum Einsatz. Im Rahmen des Projektes sollen wichtige Design-Aspekte solcher Öfen betrachtet werden: Position und Anordnung der Heizbrenner, Flammenbild und -länge, Luftführung, Abgasverluste sowie Schadstoffemissionen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden bereits Ergebnisse der Experimente sowie der Simulationen in einer Pilotanlage oder direkt im Produktionsbetrieb umgesetzt. An diesem Pilotofen wurden verschiedene alternative Heizkurven und Prozessbedingungen ausgetestet und dadurch experimentelle Optimierungsschritte unternommen.

Zur simulativen Untersuchung wurden als Werkzeuge neben praktischen Messungen vor Ort numerische Prozess- und Strömungssimulationen zur Analyse und Verbesserung eingesetzt (cf.d.at, 2012). Im Bereich der Strömungssimulation wurde neben dem kommerziellen CFD-Paket FLUENT™ der Open-Source-Code OpenFOAM® verwendet.

Aufbau der Arbeit

Der grundsätzliche Aufbau der Arbeit ist Abbildung 1 zu entnehmen.

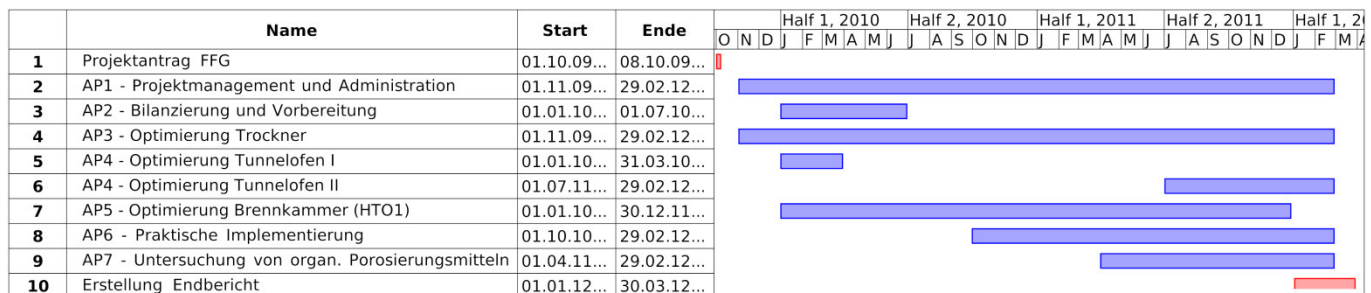


Abbildung 1: Finaler Arbeitsplan (erstellt auf Basis der geleisteten Arbeitsstunden, AP 4 ist geteilt dargestellt)

Die Arbeit wurde in sieben Arbeitspakete unterteilt, die sich mit den unterschiedlichen Themen des Projektes beschäftigen (näheres dazu in Kapitel 2). Dabei wurden die Problemstellungen sowohl durch Experimente als auch durch Strömungssimulationen analysiert.

2 Inhaltliche Darstellung

Schwerpunkte	
1	Projektmanagement und Administration
2	Bilanzierung und Vorbereitung der CFD-Rechnung
3	Optimierung Trockner
4	Optimierung Tunnelofen
5	Optimierung Kammerofen
6	Praktische Implementierung der Verbesserungsvorschläge
7	Untersuchung von organischen Porosierungsmitteln für Leichtsteine

Tabelle 1: Projektschwerpunkte

Die administrativen Aufgaben bestanden aus der laufenden Überwachung der Projektaktivitäten und deren Dokumentation sowie der Organisation von Besichtigungen und Experimenten in den Werken.

Die Erhebung aller Energie- und Stoffströme der betrachteten Prozesse sollte verlässliche Randbedingungen für geplante CFD Simulationen bringen.

Im Projekt wurde großer Wert auf die Untersuchung und Optimierung der Trockner gelegt. Eine detaillierte Erfassung des Ist-Zustandes unter definierten, möglichst homogenen Beladungen der Trockenkammern war nach der Erhebung der Pläne und den Besichtigungen vor Ort der erste Schritt. Dazu musste eine angepasste Messtechnik (SPS mit Datenerfassung, Temperatur- und Feuchtesensoren, etc.) seitens der TU WIEN entworfen und installiert werden. Neben verteilten Mess-Stellen in der Kammer wurden Zu- und Ablufttemperaturen sowie Strömungsgeschwindigkeiten gemessen, um die Trocknerläufe thermisch bilanzieren zu können.

Mehrere Trockenkammern wurden an den Produktionsstandorten Krummnußbaum und Bennewitz vermessen und die spezifischen Probleme in der Temperatur- und Feuchteverteilung der Kammern herausgearbeitet. Mit begleitenden CFD Simulationen wurden Verbesserungsvorschläge erstellt.

Die Untersuchung der Tunnelöfen wurde am Produktionsstandort Bennewitz (D) durchgeführt, wo erstmalig seit dem Bestehen des Tunnelofens durch die TU WIEN eine Schleppmessung über die gesamte Ofenlänge an einem Tunnelofenwagen erfolgreich durchgeführt werden konnte. Dabei wurden an acht Thermoelementen über die gesamte Brenndauer und Ofenlänge (zirka 100m) die Temperaturen aufgezeichnet. Weiters wurden die Ofenatmosphäre und der Ofendruck erfolgreich analysiert und eine Thermographie der Außenwände in den heißen Bereichen des Tunnelofens durchgeführt, um Reparaturschäden und thermische Kurzschlüsse im Mauerwerk und der Decke sichtbar zu machen. Die geplanten, aufwändigen CFD Untersuchungen erübrigten sich durch die aussagekräftigen Messergebnisse.

Bei den diskontinuierlichen Hochtemperatur-Kammeröfen gab es das größte Energieoptimierungspotenzial. Sowohl die Messungen als auch die Simulationen gestalteten sich jedoch anspruchsvoller und aufwändiger als erwartet. Bei den Messungen gab es immer wieder Rückschläge auf Grund der hohen Temperaturen und langen Brennzeiten in den Brennkammern. Die eingesetzten Materialien, die Edelmetalle Platin und Rhodium für die Thermoelemente und hochtemperaturbeständige Aluminiumoxid-Keramik für deren Isolierung, wurden in den Experimenten an ihre physikalischen Einsatzgrenzen geführt. Die Messungen wurden im laufenden

Produktionsbetrieb an eigens modifizierten Ofenwägen durchgeführt, um die Temperaturverteilung und Verläufe während des Brennvorganges zu erfassen. Mit Hilfe von begleitenden Laboranalysen der RATH Gruppe wurde nach jeder Modifikation des Produktionsablaufes festgestellt, ob die Produktqualität innerhalb der Spezifikationen lag. Durch systematische Optimierung der Brennkurven und des Ofenwagenaufbaus (Brennbehelf) und schrittweise Implementierung der Änderungen in der laufenden Produktion konnten die Erkenntnisse aus den CFD-Simulationen des Ist-Zustandes und verbesserter Geometrien direkt in praktisch umsetzbare Veränderungen einfließen.

Aus der konstruktiven Zusammenarbeit von der RATH Gruppe und der TU WIEN ergaben sich zum Thema des Hochtemperaturofens (HTO) bisher vier wissenschaftliche Publikationen und eine Einreichung zum Staatspreis 2012 für Umwelt und Energietechnologie.

Es wurden die Erkenntnisse der experimentellen und simulativen Untersuchungen der Trockner und der Öfen in praktische Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt.

Weiters wurde eine Laborklimakammer auf die Bedürfnisse der RATH Gruppe angepasst und eine passende Datenaufzeichnung von Temperatur, Feuchte, Schrumpfung und Gewicht basierend auf LabView® geplant, konstruiert, getestet und der RATH Gruppe für hausinterne Experimente und Entwicklung optimierter Trocknungskurven übergeben.

Zusätzlich fanden Analysen von Porosierungsmitteln für Feuerleichtsteine statt. Im Zentrum der Arbeiten stand die thermogravimetrische Analyse von organischen Porosierungsmitteln, die bei der RATH Gruppe zum Einsatz kommen. In Bennewitz werden Hartholz, Weichholz und Kaffesatz verwendet, am Standort Wirges (D) kommt Styropor für Feuerleichtsteine zum Einsatz. Der Angelpunkt ist die temperatur- und atmosphärenabhängige Energiefreisetzung der Reinsubstanzen sowie der Einfluss von Mischungen von Porosierungsmitteln und das thermische Verhalten in Mischung mit den verschiedenen eingesetzten Tönen. Grundidee war hier die Erstellung von „Fingerabdrücken“ der Porosierungsmittel, um die Mischeigenschaften im Vorfeld zu kennen und das Ausbrandverhalten im Stein zu optimieren. Sämtliche Versuche dieses Arbeitspaketes wurden in den Labors der TU WIEN durchgeführt.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 CFD Untersuchung des Hochtemperaturkammerofens

3.1.1 Ausgangssituation und Ziele

Auf Grund des hohen spezifischen Erdgasverbrauchs beim Brennen von Hochwertschamotten liegt in diesem Prozessschritt das größte Optimierungspotenzial hinsichtlich Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß. Es wurden CFD Simulationen zur Beurteilung des Ist-Zustandes der Strömung und Temperaturverteilung eines Hochtemperaturofens (HTO 1) am Fertigungsstandort Krummnußbaum durchgeführt, welche die experimentellen Bestimmungen der Temperaturen begleiteten. Zielsetzung war die Optimierung des Brennvorganges hinsichtlich Verkürzung der Dauer und Minimierung des Gasverbrauches bei gleichbleibender, hoher Produktqualität. Die Optimierung der HTOs wurde in dem Projekt von Anfang an prioritär behandelt.

3.1.2 Implementierte Geometrie

Für die simulative Untersuchung des Hochtemperaturofens, der bei der RATH Gruppe zum Brand von Hochwertschamottesteine verwendet wird, wurde ein dreidimensionales Modell aus den Konstruktionsplänen des Ofens abgeleitet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dieser hat eine geschichtete Wandstruktur mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften, wobei die Steine der Wand nicht einzeln abgebildet werden, sondern nur Bereiche ungleicher Steine gesondert behandelt werden (die Farben in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellen nicht die realen Farben der Ofensteine dar)

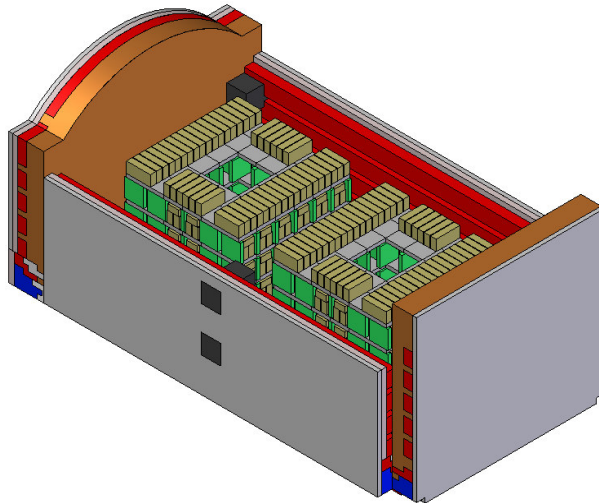


Abbildung 2: Implementierte Geometrie des Hochtemperaturofens

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die zu brennenden Steine (hellbraun) erkennbar. Diese werden auf zwei getrennten Wägen gestapelt. Um ein gegenseitiges Zusammendrücken der Steine zu verhindern, wird ein Brennbehelf aus Aluminiumoxidsteinen verwendet. Jeder dieser Steine wird für die Simulation einzeln abgebildet. In der Abbildung wurde die Decke des Ofens ausgeblendet.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind weiters schwarze Quader sichtbar, welche die Position der sechs Brenner darstellen. Bei der Untersuchung wurde jene Strategie verfolgt, dass zuerst der Verbrennungsprozess in einer detailliert aufgelösten Brennergeometrie berechnet wurde (siehe Abschnitt 3.2) und Ergebnisse als Randbedingungen auf den inneren Flächen der Quader für die Ofensimulation verwendet wurden. Ein Ziel der Simulationen war die Positionierung der Brennbehelfsteine so zu optimieren, dass dadurch eine Verbesserung der Umströmung des Brenngutes erreicht wird.

Dieses Modell wurde für die CFD Simulation in zirka 2500 Subvolumina aufgeteilt, damit ein qualitativ hochwertiges Rechengitter mit etwa 15,5 Millionen Zellen geschaffen werden konnte. Die Simulationen sind in OpenFOAM® (OpenCFD Ltd. (SGI), 2012) und FLUENT™ (ANSYS Inc., 2012) durchgeführt worden. Aufgrund der Komplexität des Modells bedingt durch die Geometrie wurde für die Modellierung der chemischen Reaktionen ein einfaches Verbrennungsmodell verwendet.

3.2 Strömungssimulation (CFD) der bei RATH Gruppe eingesetzten Brenner der Firma RIEDHAMMER GmbH für den Einsatz in Hochtemperaturöfen

3.2.1 Ausgangssituation und Ziele

Für eine komplette Ofensimulation sind physikalisch korrekte Randbedingungen ausschlaggebend, um richtige Simulationsergebnisse zu erreichen. Auf Grund der Komplexität der Simulation wurde diese in die Simulation der Brenner und in die Simulation des Ofens zweigeteilt. Die Brennersimulation liefert Randbedingungen für die Ofensimulation (siehe Abschnitte 3.1 und 3.4) und erlaubt detaillierte Einblicke in die Arbeitsweise und das Optimierungspotenzial der Brenner (Thema O₂-Anreicherung).

3.2.2 Simulation

Hochtemperaturkammeröfen der RATH Gruppe werden mit Erdgas (Methan) befeuert. Um Fragestellungen wie Beurteilung einer Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft und die Temperaturverteilung in den Hochtemperaturöfen behandeln zu können, wurde die Verbrennung mit detaillierten CFD-Modellen simuliert. Experimente bei diesen hohen Temperaturen sind zeit- und kostenintensiv und können daher nur zur Modellüberprüfung eingesetzt werden. Insbesondere liefern solche Messungen auch aufgrund der schlechten Zugänglichkeit der Öfen während der Produktion immer nur punktuelle Temperaturinformationen. Durch die Kombination von Experimenten und CFD kann eine umfassendere Beschreibung der Vorgänge und Zusammenhänge im Hochtemperaturofen im Vergleich zu den einzeln angewandten Methoden erreicht werden.

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Geometrie der Brenner für die Detailsimulation.

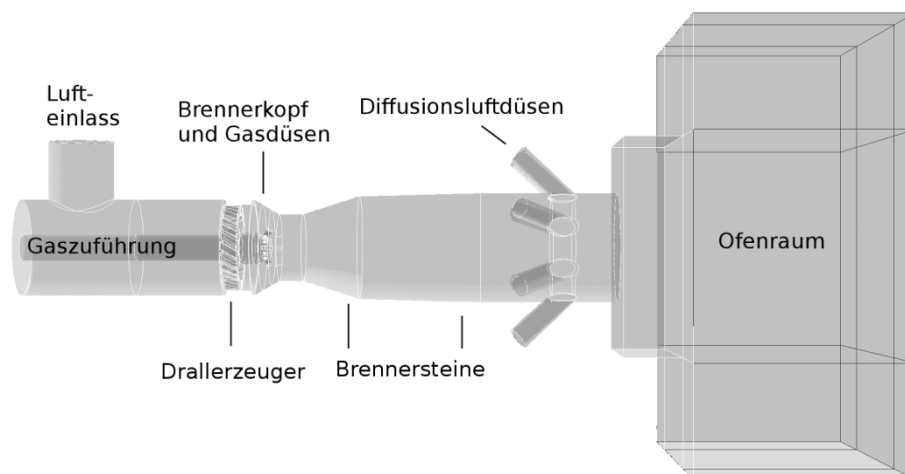


Abbildung 3: Übersicht der mit CFD simulierten Brennergeometrie

Der eingesetzte Methan/Luft-Brenner erzeugt eine nicht vorgemischte, hochturbulente und verdrallte Flamme mit einer Spitzenleistung von zirka 250 kW. Für die Befeuerung des kleinsten Kammerofens, der bei der RATH Gruppe im Einsatz ist, sind 6 Brenner in Verwendung. Damit lassen sich Brenntemperaturen bis knapp unter 1800 °C erreichen, die zum Beispiel zum Brand von hochaluminiumoxidhaltigen Steinen benötigt werden. Ein wichtiges Produkt der RATH Gruppe, ein Hochwertschamotte für die Auskleidung von Gasphasenreaktoren wird bei Spitzentemperaturen über 1600 °C gebrannt.

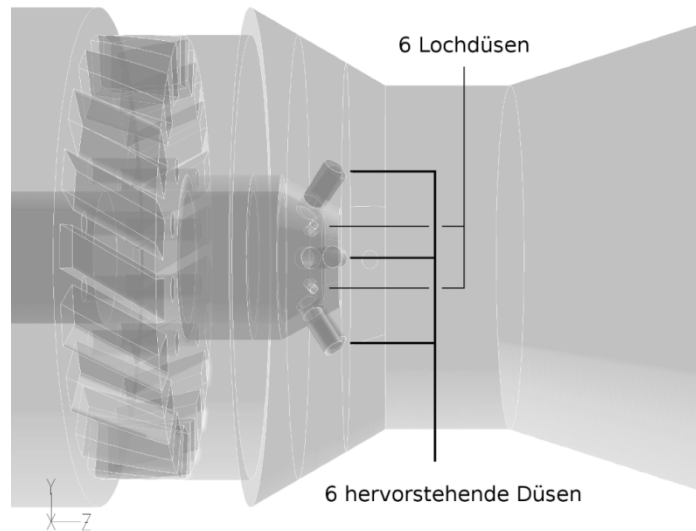


Abbildung 4: Detail der Geometrie des Drallerzeugers und der Gasdüse des Brenners

Die Geometrie des Brenners wurde bis ins letzte Detail diskretisiert. Dadurch konnten sowohl der Effekt der Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft simuliert werden, als auch Randbedingungen für eine instationäre Ofensimulationen erhalten werden. Die ersten Simulationen des Brenners wurden mit der kommerziellen CFD-Software ANSYS FLUENT™ gerechnet, um möglichst rasch Randbedingungen für die relativ zeitaufwändige Ofensimulation zu erhalten. In einem zweiten Schritt wurde die gleiche Geometrie mit dem open-source CFD-Code OpenFOAM® (OpenCFD Ltd. (SGI), 2012) simuliert. In beiden Fällen kamen stationäre Verbrennungssolver zum Einsatz. In den Abbildungen 5 bis 8 sind die mit OpenFOAM® erhaltenen Simulationsergebnisse dargestellt, die gut mit den Ergebnissen aus FLUENT™, die zuvor publiziert wurden (siehe auch Zwischenbericht Projekt EDAB), übereinstimmen.

Technische Details zu den Simulationen mit OpenFOAM® und FLUENT™ können aus den frei zugänglichen Publikationen (Harasek et al., 2010) und (Harasek et al., 2011) entnommen werden.

Die Kernpunkte und Ergebnisse der Simulation können so zusammengefasst werden:

- Der Ausbrand innerhalb der Brennersteine ist unvollständig. Nur etwa 60 % des vorhandenen Methans brennen unter Volllast im Brenner selbst aus. Der Rest der Wärme wird im Ofenraum freigesetzt.
- Das Design des Brenners unterstützt die Kühlung der Brennersteine mit kühler Frischluft aus dem Drallapparat.
- Diese Kühlung fällt bei der Steigerung der O₂-Konzentration zusehends weg. Dieser Effekt kann ab etwa 27 % (v/v) O₂ in der Verbrennungsluft zur Überhitzung der Brennersteine führen.

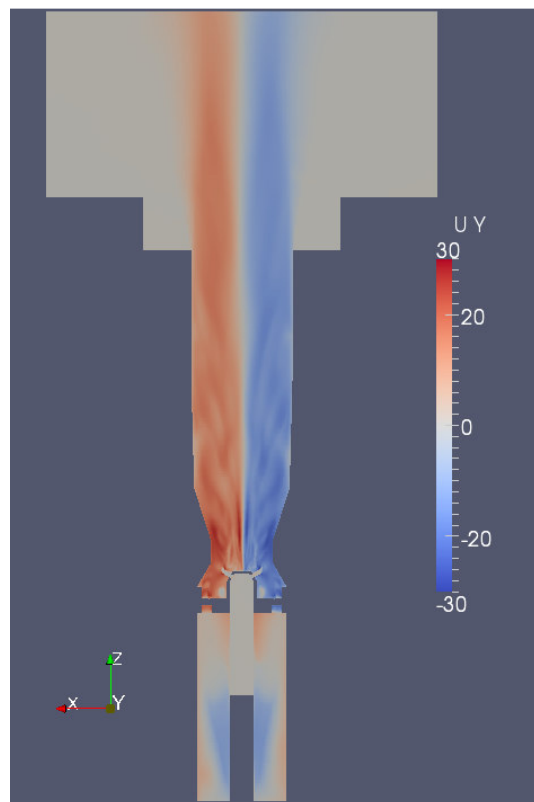
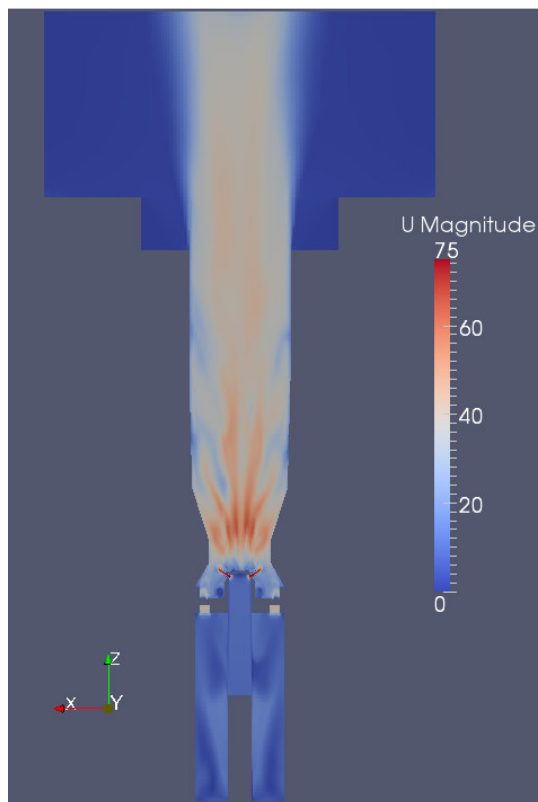


Abbildung 5: Links: Absolutgeschwindigkeit (m/s), rechts: Y-Komponente der Geschwindigkeit (m/s) in der Mittenebene des Brenners

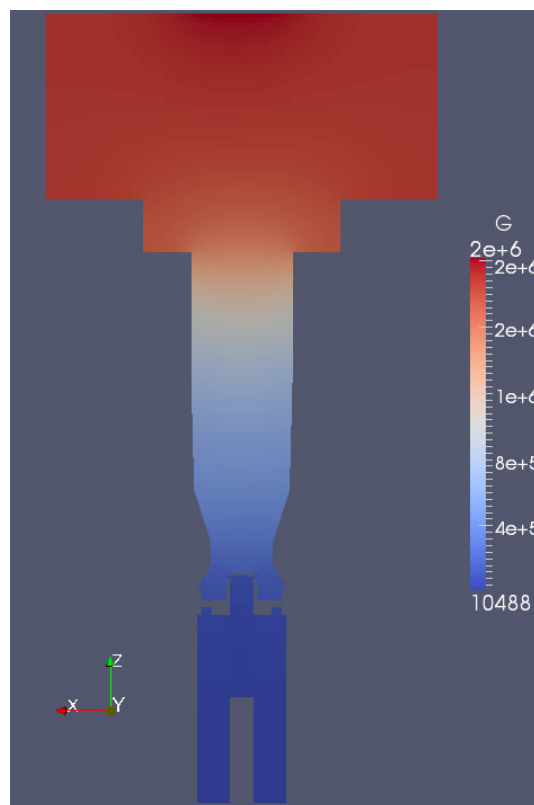
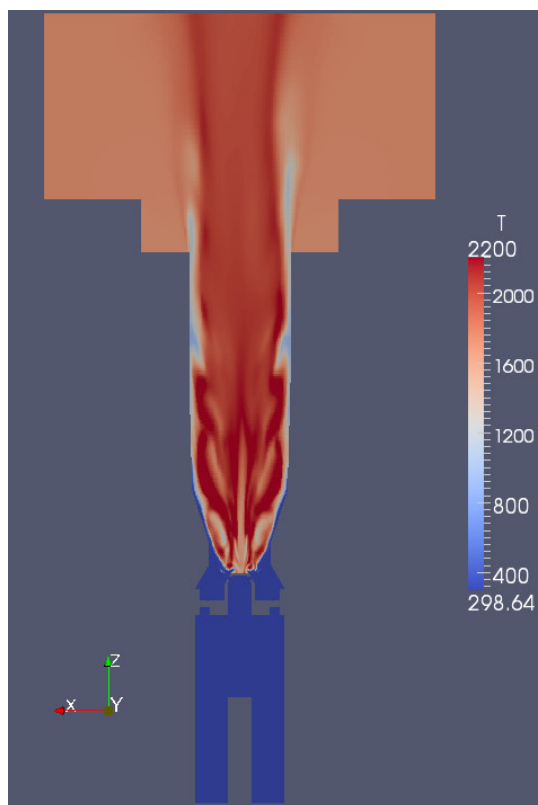


Abbildung 6: Links: Temperatur (K), rechts: Strahlungsdichte (W/m^2) in der Mittenebene des Brenners

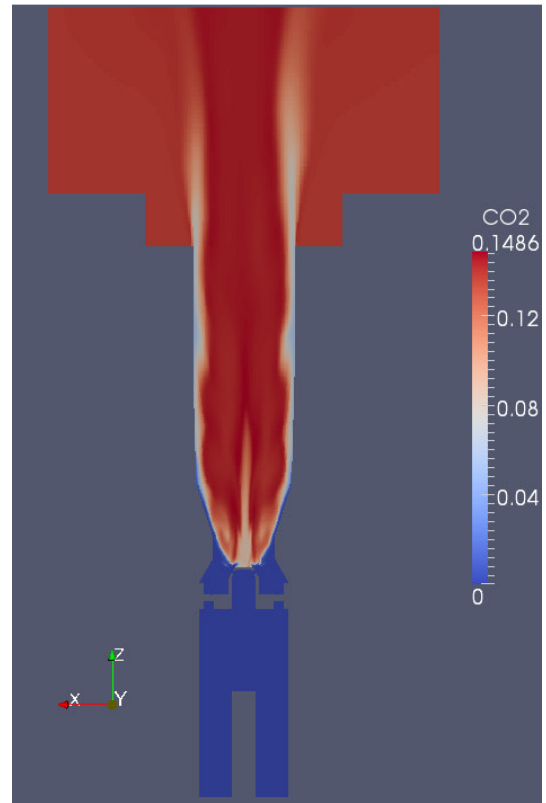
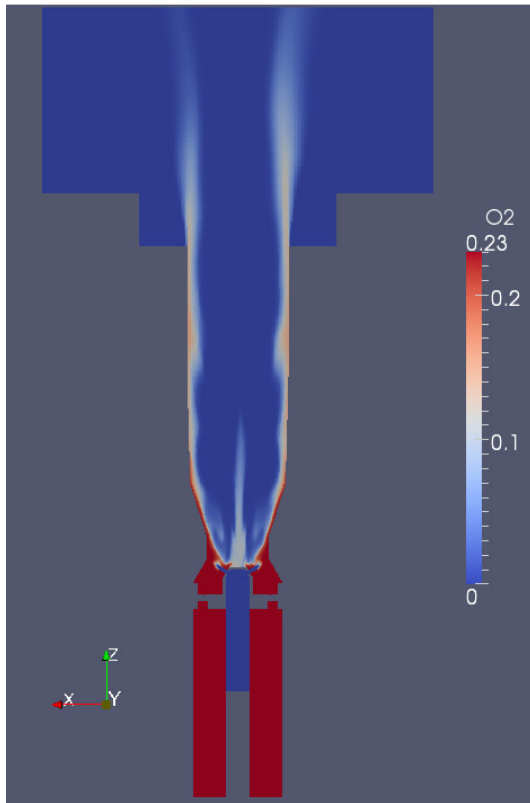


Abbildung 7: Links: Massenanteil an Sauerstoff (O_2) (1), rechts: Massenanteil an Kohlendioxid (CO_2) (1) in der Mittenebene des Brenners

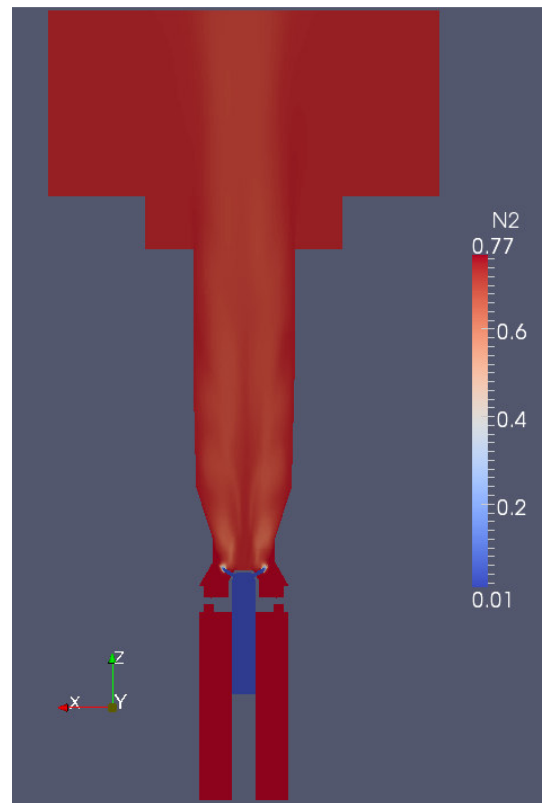
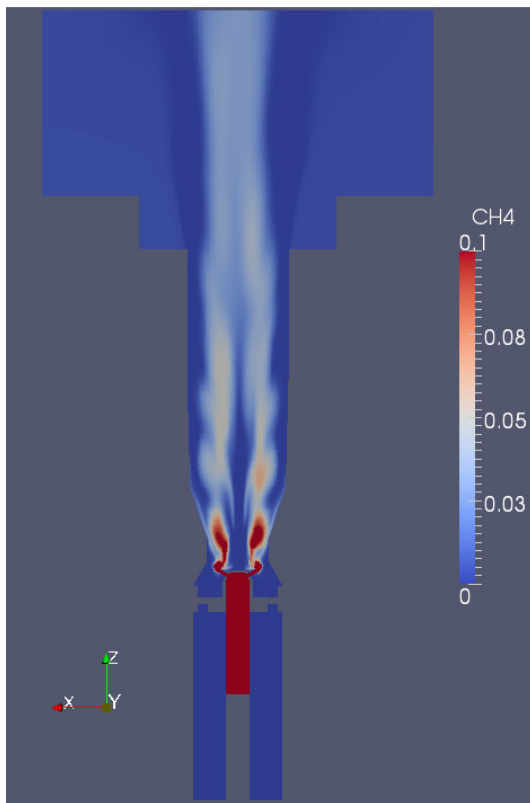


Abbildung 8: Links: Massenanteil an Methan (CH_4) (1), rechts: Massenanteil an Stickstoff (N_2) (1) in der Mittenebene des Brenners

3.3 Experimentelle Untersuchung der Sauerstoffanreicherung

In Zusammenarbeit mit der Firma MESSER AUSTRIA GmbH wurde an einem Brennerprüfstand die Sauerstoffanreicherung für die bestehende Kombination aus Methan-Luft Brennern und den vorhandenen Brennersteinen untersucht. Dabei sollten auch die zuvor simulierten Fälle mit Experimenten verglichen und interpretiert werden.

Durch die Sauerstoffanreicherung verringert sich der Anteil von inertem Stickstoff in der Verbrennungsluft. Damit steigt die Nutzung des eingesetzten Brennstoffes. Weiters erhöht sich der volumetrische Anteil an Kohlendioxid und Wasserdampf in den Verbrennungsgasen, was durch die höheren Emissionsfaktoren der Mischung zu besserem Strahlungswärmeübergang führt. Je nach Prozess und Anwendung ist man ab zirka 30 % (v/v) Sauerstoff in der Verbrennungsluft wirtschaftlicher als mit reiner Luftverbrennung – besonders, wenn es um hohe Temperaturen geht. Die höheren adiabaten Flammentemperaturen sind aber für nachträglich umgerüstete Brenner und Prozesse möglicherweise problematisch.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der bei Firma MESSER AUSTRIA GmbH eingebaute Brenner bei 900 und 1450 °C Ofenwandtemperatur dargestellt. Sobald sich die Flammentemperatur an die Ofenraumtemperatur annähert, wird die Flamme trotz gleichbleibender oder steigender Brennerleistung unsichtbar.

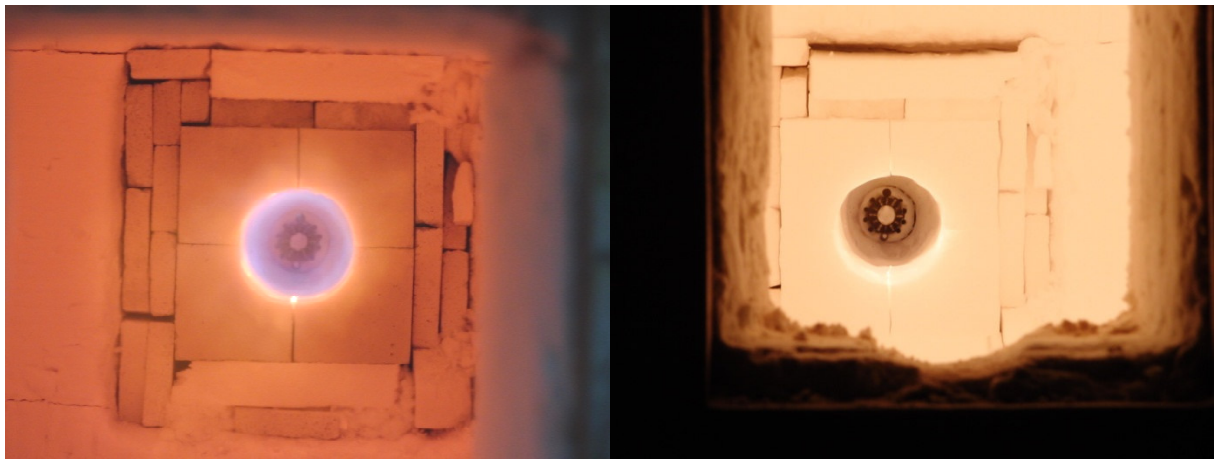


Abbildung 9: Blick in die Brennkammer der Firma MESSER AUSTRIA GmbH. Der eingebaute Brenner läuft in beiden Fällen unter Volllast (ungefähr 250 kW). Links: Ofenwandtemperatur: 900 °C. Rechts: Ofenwandtemperatur: 1450 °C. Bei diesen Temperaturen ist die Flamme auf Grund der geringen Temperaturunterschiede nicht mehr sichtbar.

In dem Experiment wurden die Oberflächentemperaturen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) der vorderen Brennersteine mit drei Thermoelementen über den gesamten Versuchsverlauf kontrolliert sowie die Ofenraumtemperaturen und Abgaszusammensetzungen aufgezeichnet und auf einen konstanten Sauerstoffüberschuss und konstante Ofenwandtemperaturen reguliert, um für die unterschiedlichen Anreicherungen vergleichbare thermische Bedingungen zu erzielen.

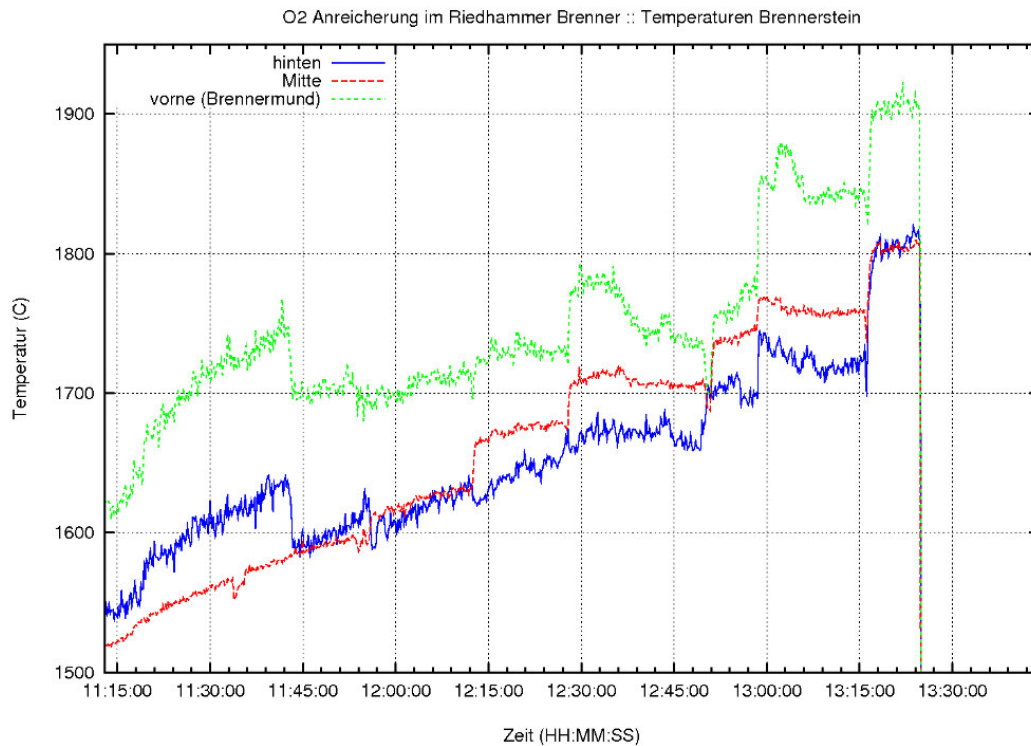


Abbildung 10: Gemessene Temperaturen am Brennerstein. Versuchsverlauf mit stufenweiser Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff (20,9 / 22,5 / 25,0 / 27,5 und 30,0 % (v/v)). In der vorletzten Stufe (bei 27,5 % O₂) ist die gemessene Temperatur bereits zu hoch, um eine lange Lebensdauer des Steins garantieren zu können.

Die Experimente sollten die Möglichkeiten und Grenzen der Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff aufzeigen. In den CFD-Simulationen wurde eine Überhitzung der Brennersteine und eine damit verbundene kürzere Lebensdauer vorhergesagt, in den Experimenten wurde diese Befürchtung durch gemessene Temperaturen über den Spezifikationen der Brennersteinen bestätigt. Bereits bei 27,5 % (v/v) O₂ in der Verbrennungsluft waren die Brennersteine an der Oberfläche für einen dauerhaft stabilen Betrieb zu heiß. Da dies unter dem wirtschaftlich sinnvollen Limit von 30 % (v/v) O₂ lag, kann man mit großer Sicherheit sagen, dass eine nachgerüstete Sauerstoffanreicherung bei den bestehenden Hochtemperaturofen der RATH Gruppe ohne kostenintensive Umbauten und Neuauslegungen weder technische noch wirtschaftliche Vorteile bringt.

3.4 Strömungssimulation des Hochtemperaturofens (HTO 1)

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt Teile der Ofenwand und die Temperaturverteilung auf zwei Schnittflächen in der Höhe der beiden Brennerebenen im Ofen.

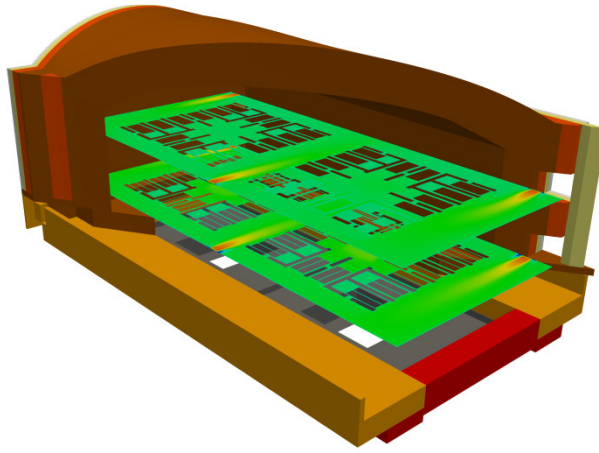


Abbildung 11: Ofengeometrie mit Temperaturverteilung auf zwei Ebenen

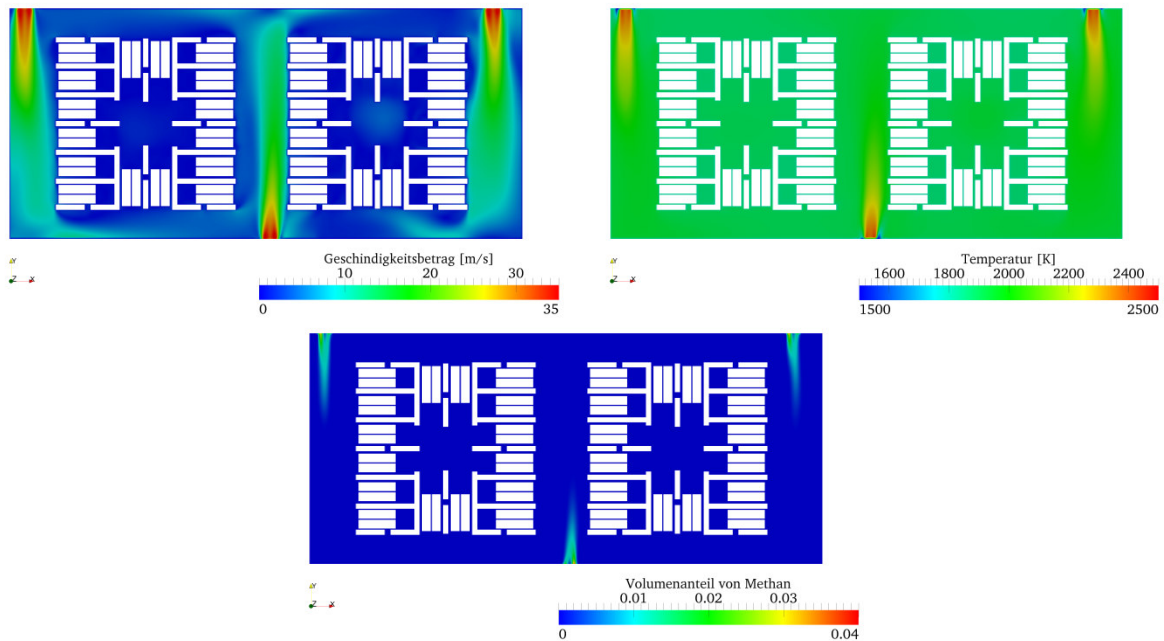


Abbildung 12: Verteilung von Geschwindigkeitsbetrag, Temperatur und Methan im Brennofen auf der oberen Auswerteebene

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sieht man die Verteilung von Geschwindigkeitsbetrag, Temperatur und Methan im Brennofen auf der oberen Auswerteebene. Hieraus ist zu entnehmen, dass die Methanverbrennung am Auslass der Brenner nicht vollständig abgeschlossen ist und noch in der Brennkammer stattfindet. Hier erfolgt die Verbrennung jedoch vollständig und es entweicht kein Methan in den Ofenkamin. Die Strömung der Produktgase verläuft in erster Linie um das Brennbehelfgerüst und das Brenngut herum und nur in zweiter Linie zwischen diesen hindurch. Am Auslass der Brenner ist die Temperatur merkbar höher als im restlichen Ofenvolumen.

3.4.1 Optimierung des Ofens durch Simulation

Aus den Simulationsergebnissen kann man zwei Phänomene ableiten, die zur ungleichmäßigen Temperaturverteilung und damit auch zu einem inhomogenen Brennprozess beitragen.

Erstens ist **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen, dass im Ofen gewisse aufbaubedingte Asymmetrien existieren. Einerseits sitzen vier Brenner auf der rechten Seite (Blickrichtung gegen Ofenrückwand) und zwei Brenner auf der linken Seite. Außerdem sind die beiden mittleren Brenner in Bezug auf die Position

der beiden Brennbehelfgerüste in Richtung der Tür verschoben. Dies legt nahe, dass Steine, die auf der Türseite liegen, bevorzugt durch vier Brenner mit Wärmeenergie und jene Steine auf der Wandseite, nur durch zwei Brenner versorgt werden. Um diese Vermutungen zu bestätigen, wird die Temperaturerhöhung nach einer festgelegten Zeitspanne an ausgewählten Positionen in den Steinen herangezogen.

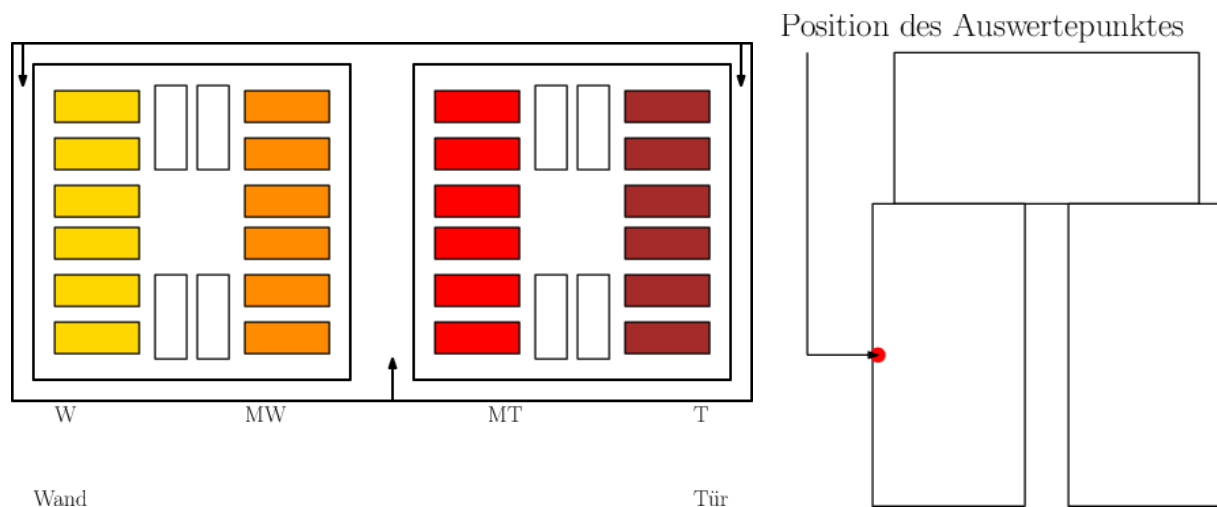


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Auswertepositionen

Diese ausgewählten Positionen können **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden. Dazu wird immer die Temperaturerhöhung in Steinen nahe der Steinoberfläche in den Brennbehelfskammern, die nahe an der Hinterwand (gelbe Kammern in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) liegen, genommen und ein Mittelwert errechnet. Nach dem gleichen Verfahren wird ein Mittelwert für die Steine in der Mitte (orange und rote Kammern) und für Steine in Türnähe (braune Kammern) berechnet. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** kann man sehen, dass Steine auf der Wandseite in der betrachteten Zeit eine um 10-20 % niedrigere Temperaturerhöhung aufweisen als Steine auf der Türseite. Die symmetrische Positionierung des mittleren Brenners ist für zukünftige Brennöfen zu bevorzugen.

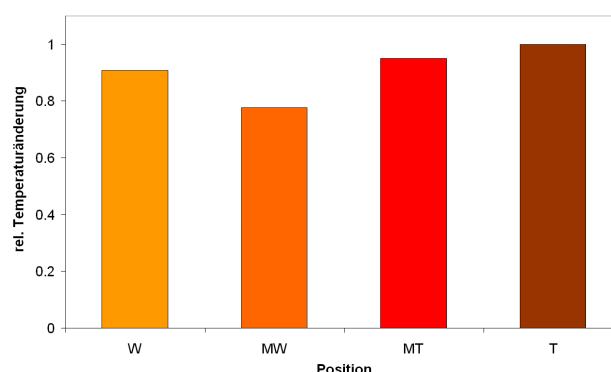


Abbildung 14: Mittelwerte der Temperaturänderung in ausgewählte Brennbehelfskammern

Aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist erkennbar, dass die Verteilung des Geschwindigkeitsbetrages eine gewisse Asymmetrie aufweist. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Konvektion und zu einer unregelmäßigen Temperaturverteilung. Eine vorgeschlagene Optimierungsmaßnahme bestand darin, die Konvektion des Verbrennungsgases gleichmäßiger zu gestalten. Dazu wurden drei unterschiedliche Brennbehelfgeometrien entworfen und simulativ untersucht. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind einige Kammern des

Brennbehelfgerüst in einem eingezoomten Bereich dargestellt, welcher der linken unteren Ecke in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entspricht. Dabei wurde die Durchlässigkeit der Hinter- bzw. Seitenwände einzelner Kammern durch Öffnen und Schließen von Gerüstlücken verändert.

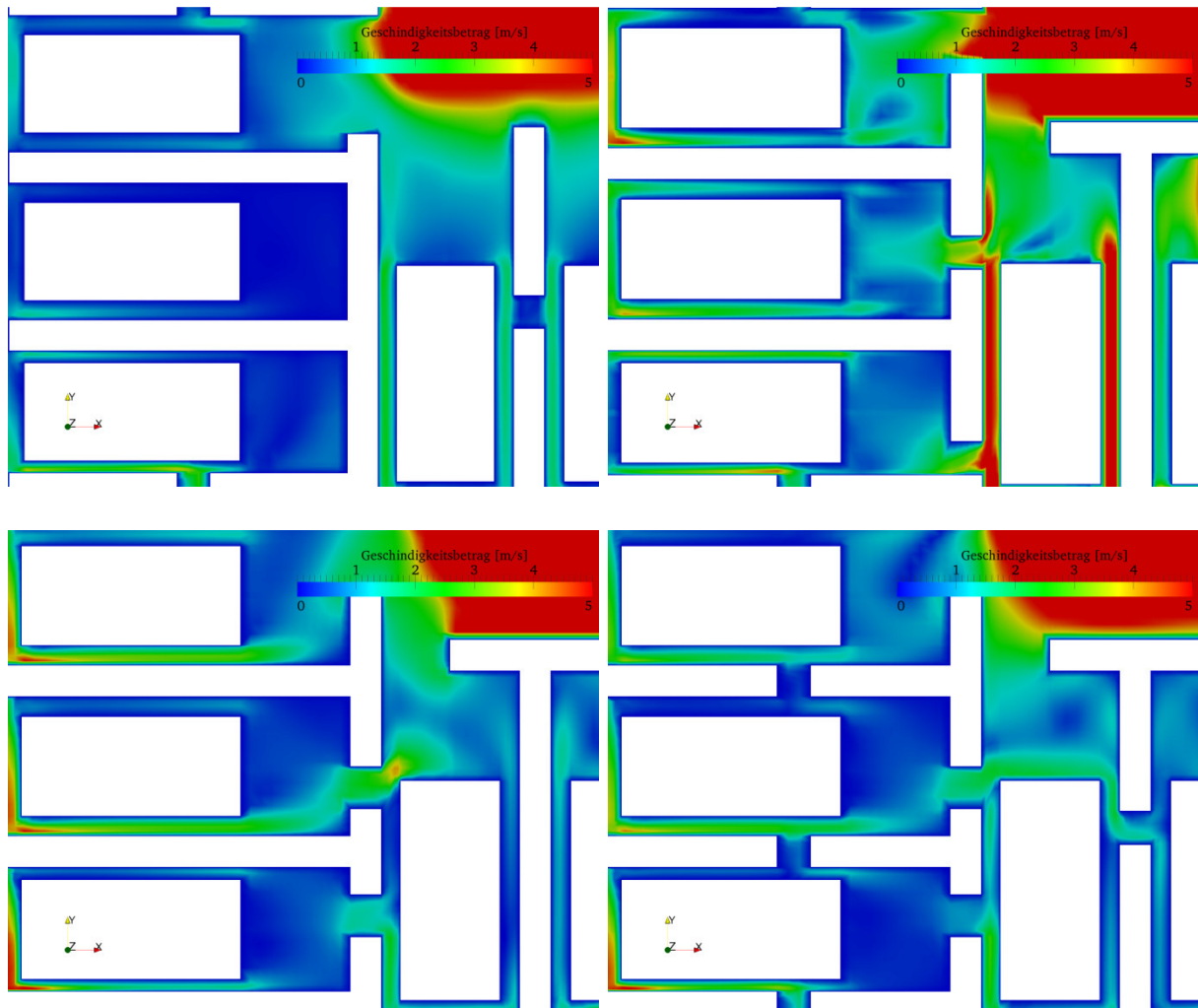


Abbildung 15: Unmodifizierter Aufbau (links oben) und drei Modifikationen des Brennbehelfgerüsts

Die drei Modifikationen unterscheiden sich durch die Positionierung der Brennbehelfsteine sowie durch die Anzahl an verwendeten Brennbehelfsformaten. In den ursprünglich zugestellten Kammern erhöht und vergrößert sich die Geschwindigkeit. Die zweite Geometriemodifikation erbringt die größte Verbesserung.

Die erste Geometrievariante wurde in der Produktion umgesetzt, da diese betriebstechnisch am einfachsten umzusetzen ist. Dazu wurde bei einem Brand ein Wagen mit der originalen Brennbehelfgeometrie sowie ein Wagen mit der ersten Variante besetzt. Nach dem Brand wurden jeweils 31 statistisch verteilte Steine von jedem der Wagen zur Qualitätsuntersuchung herangezogen. Als Maß für die Qualität werden in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beispielsweise die Längen der einzelnen Steine herangezogen.

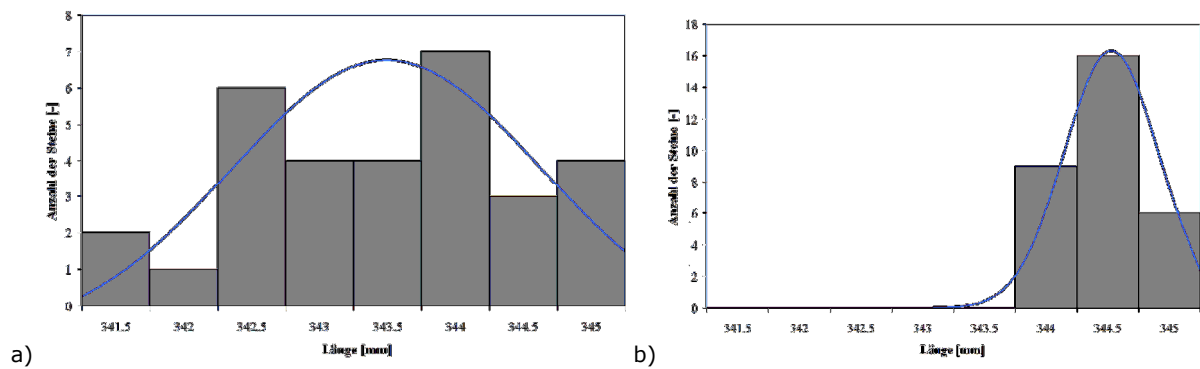


Abbildung 16: Statistische Auswertung der Steine auf dem unmodifizierten Wagen (a) und auf dem modifizierten Wagen (b), statistische Gausskurve ist inkludiert, skaliert jedoch nicht mit der Ordinatenachse

Dabei ist zu erkennen, dass die Standardabweichung (Längenstreuung des Produktes) der Länge von 0,98 mm auf 0,33 mm um einen Faktor Drei verringert werden konnte, was aus Sicht der Qualitätssicherung einen wichtigen Schritt darstellt. Gleichzeitig wurde bei den anderen Qualitätsmerkmalen entweder eine gleichartige Verbesserung festgestellt oder zumindest keine Verschlechterung gefunden.

Weitere Details zu den Untersuchungen und zur Optimierung des Brennofens sind den Veröffentlichungen (Nagy et al., 2011a) und (Nagy et al., 2011b) zu entnehmen.

3.5 Optimierung des Ofens durch Experimente

Als Ergebnisse und Konsequenzen für durchzuführende Fertigungsversuche zur Optimierung des Brennprozesses wurden folgende Punkte erzielt:

- Das Brenngut kann in der Praxis schneller als bisher abgekühlt werden. Folge: Verkürzung der Prozesszeit und Reduzierung des Energieverbrauchs, da die Ware brennergeregelt abgekühlt wird.
- Ein beträchtlicher Anteil an Energie wird beim Halten des Brennguts auf Spitztemperatur verbraucht. Eine Verkürzung dieser Haltezeit bei gleichbleibenden Eigenschaften ist möglich. Folge: Verkürzung der Prozesszeit und Reduzierung des Energieverbrauchs.
- Ein Teil der verwendeten Öfen weisen in bestimmten Temperaturbereichen eine höhere verfügbare Heizleistung auf als bisher genutzt wird. Nach Materialuntersuchungen kann der Werkstoff in bestimmten Temperaturbereichen deutlich schneller als bisher aufgeheizt werden. Folge: Verkürzung der Prozesszeit

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wurden im Rahmen der laufenden Fertigung stufenweise die Prozessbedingungen durch Modifikationen der Programmschritte (siehe Abbildung 12) Aufheizen (Heizratenerhöhung, soweit technisch realisierbar), Haltebereich (Verkürzung der Haltezeit) und Abkühlen (Erhöhung der Kühlgeschwindigkeit) angepasst. Dabei wurden auch die technischen Grenzen beim Aufheizen ermittelt, die in erster Linie durch die verfügbare Heizleistung der Brenner bestimmt werden. Beim Abkühlen wird die Kühlgeschwindigkeit einerseits durch die Werkstoffeigenschaften (zulässige maximale Wärmespannungen durch inhomogene Temperaturverteilung im Produkt, die zur Zerstörung des Produkts führen können) bestimmt. Andererseits wird diese durch die verfügbare Kühlleistung, durch die maximale mögliche Kühlluftmenge und die zu kühlende Masse (abhängig von der Ofenkonstruktion bzw. Zustellung, feuerfeste Innenauskleidung) bestimmt.

Ofenkurve zum Brand von Feuerfest-Werkstoffen (prinzipieller Verlauf)

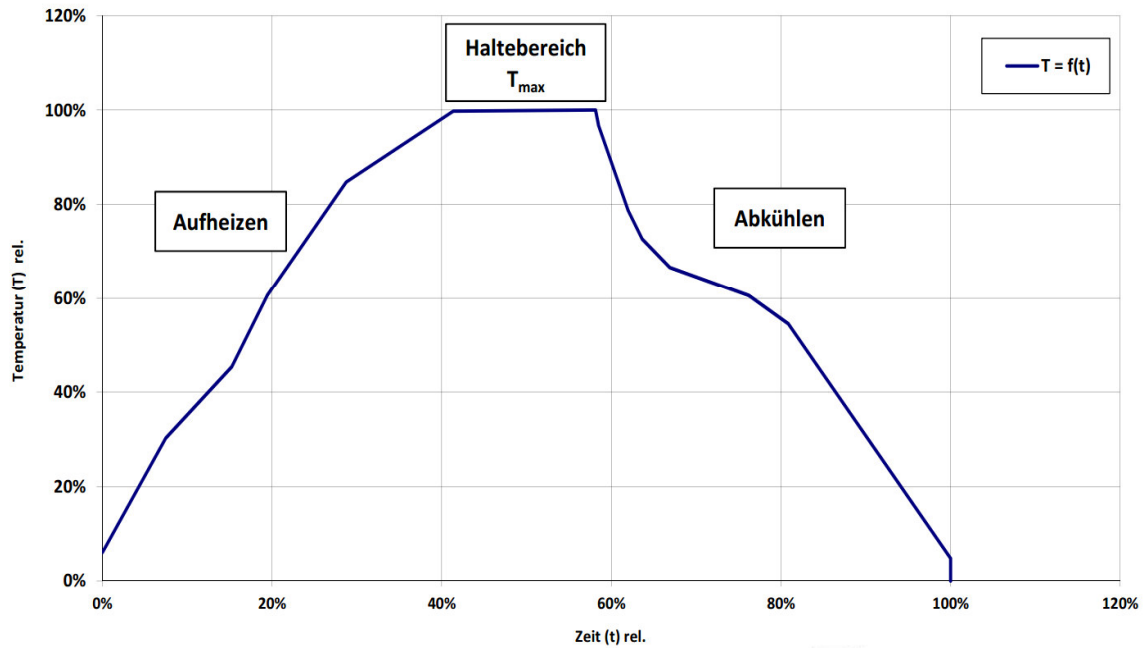


Abbildung 17: Verlauf der Ofentemperatur während des Brennprogramms

Durch die stufenweise Veränderung des Brennprozesses in zwei Schritten konnte im Mittel der Erdgasverbrauch in Bezug auf den alten Standardbetriebszustand um 4 % und 9 % reduziert werden (siehe Abbildung 18). Gleichzeitig konnte bei jeder Stufe eine Reduzierung der Prozesszeit im Bezug zum Standard um etwa 10 % und 14 % realisiert werden (siehe Abbildung 19). Eine Verkürzung der Prozesszeit ergibt eine direkte Steigerung der möglichen Produktionskapazität, das heißt es kann pro Zeiteinheit mehr Produkt hergestellt werden. Damit werden die bestehenden Ofenanlagen deutlich besser genutzt.

Entwicklungs des Energie-Verbrauchs (Erdgas) in Abhängigkeit von den Programm-Modifikationen (Standard: 100 %)

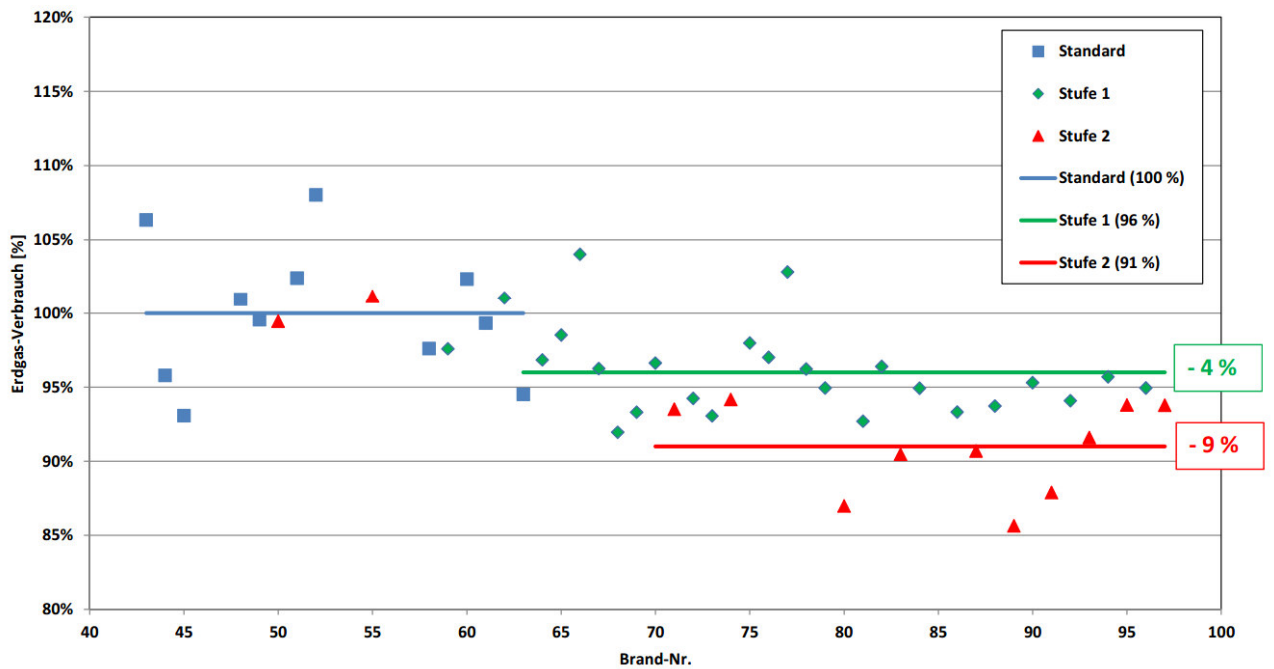


Abbildung 18: Reduzierung des Energieverbrauchs durch Versuche

Entwicklung der Prozesszeit (Kapazität) in Abhängigkeit von den Programm-Modifikationen (Standard: 100 %)

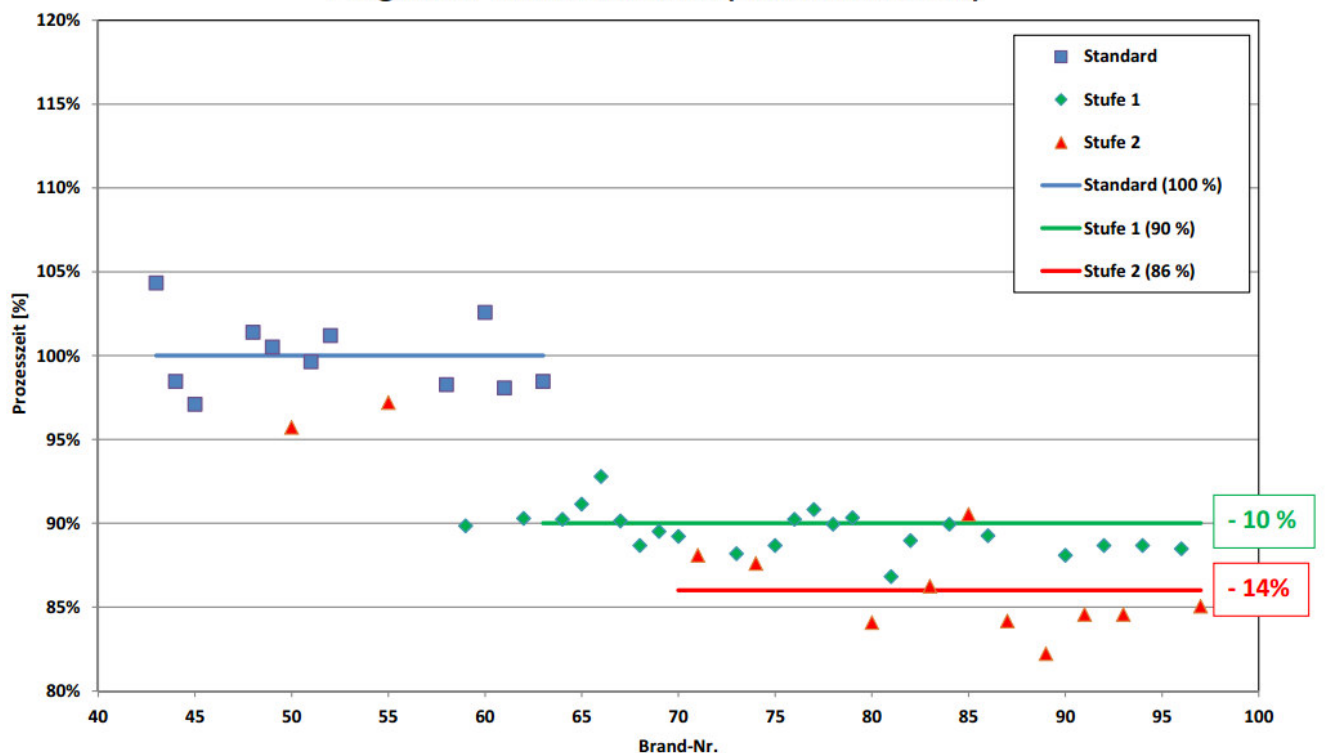


Abbildung 19: Reduzierung der Prozesszeit (Zykluszeit) durch Versuche

In Abbildung 20 ist der spezifische Energie- bzw. Erdgasverbrauch (Verbrauch pro Mengeneinheit Produkt) und die daraus resultierende spezifische CO₂-Emissionen dargestellt. Bei einer jährlichen Produktionsmenge von 1000 t Produkt als Basis fielen bei der alten Situation CO₂-Emissionen von zirka 2600 t an. Je nach Veränderungs-Schritt

können jetzt zirka 100 t beziehungsweise zirka 240 t CO₂-Emissionen eingespart werden. Als Ausblick erscheint aktuell eine Verringerung des Energieverbrauchs um etwa 14 %, entsprechend einer Verringerung der CO₂-Emissionen um mehr als 360 t bei einer Produktionsbasis von 1000 t möglich. Da dies auch mit einer weiteren Verkürzung der Prozesszeit in Zusammenhang steht, kann dies als Ausblick mit einer Erhöhung der Produktionskapazität von bis zu 20 % verbunden sein.

Energie- bzw. Erdgas-Verbrauch und CO₂-Emission				
	Verbesserungsschritt			
	Standard	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3*
Spezifischer Energieverbrauch [m ³ /t]	1.306	1.255	1.187	1.122
Relativ	100%	-3,9%	-9,1%	-14,1%
Spez. CO ₂ -Emission [t/t Produkt]	2,6	2,5	2,4	2,2
CO ₂ -Emission [t/a] bei 1000 t/a	2612	2510	2373	2245
CO ₂ -Reduktion [t/a]		-102	-239	-367

Bemerkung: 2 kg CO₂ pro 1 m³ Erdgas

Entwicklung der Produktionskapazität				
	Verbesserungsschritt			
	Standard	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3*
Kapazität [t/h]	0,115	0,129	0,134	0,140
Relativ		+11,7%	+16,7%	+21,6%

*: Ausblick

Abbildung 20: Übersicht der erzielten Ergebnisse (Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs bzw. der Kohlendioxid-Emission bei gleichzeitiger Kapazitätssteigerung)

Die Erkenntnisse können im Weiteren auch auf andere Produkte übertragen werden, womit die CO₂-Emissionen im Gesamtbetrag der Fertigung in Krummnußbaum weiter reduziert werden, da dieses Produkt nur ca. 30 % der Gesamtproduktion darstellt.

3.6 Experimentelle Untersuchungen am Tunnelofen in Bennewitz

Tunnelöfen sind durch eine ausgeklügelte Luftführung (Vorwärmung, Schubluft, Muffeln, etc.) und quasi-stationären Betrieb im Vergleich zu Batchöfen, die Temperaturzyklen fahren, schon vom Konzept her relativ energieeffizient. Im Zuge des Projektes sollten Daten gesammelt werden, die dabei helfen, eine Investition in einen neuen Tunnelofen zu beurteilen. Der thermische und atmosphärische Ist-Zustand eines bestehenden Tunnelofens wurde als Grundlage für diese Entscheidung ermittelt.

Am Tunnelofen am Produktionsstandort Bennewitz wurden eine Schleppmessung eines voll besetzten Ofenwagens während eines Brandes sowie eine Atmosphärenmessung des Ofens durchgeführt. Ergebnis der Schleppmessung ist, dass der Tunnelofen, entgegen den früheren Befürchtungen von der RATH Gruppe, in der seitlichen Verteilung der Temperaturen sehr gleichmäßig ist und der Ofenwagen der vorgegebenen Brennkurve sehr gut folgt. Die Schwankungen im Hochtemperaturbereich lassen sich auf den gepulsten Brennerbetrieb zurückführen, werden aber als unproblematisch für das Brenngut eingestuft. Ein gutes thermisches Verhalten des Ofens wird auch durch

wandnahe Temperaturmessungen, die im Wesentlichen die Brennkurve widerspiegeln, bestätigt.

Bei der Ofenatmosphärenmessung wurden über eine Keramiklanze bei zugänglichen Schaulöchern in den einzelnen Ofenfeldern die Temperatur mit einem Thermoelement und die Ofenluftzusammensetzung (CO , CO_2 , O_2 , NO_x) mit Gasanalysatoren bestimmt. Weiters wurde der Ofendruck aufgezeichnet. Die Zusammensetzung in der Ofenatmosphäre hängt stark vom Ausbrandverhalten der organischen Porosierungsmittel ab und kann grob in oxidierende, neutrale und reduzierende Bereiche des Tunnelofens unterteilt werden.

3.7 Messung und Zusammenstellung der Materialeigenschaften

Für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Simulations- und Bilanzierungsrechnungen war es erforderlich, über die notwendigen Stoffdaten der Produkte zu verfügen. Zusätzlich wurde die Gelegenheit auch genutzt, um die Angaben in den im Unternehmen vorhandenen Produktdatenblättern zu erweitern und zu aktualisieren.

Diese Stoffdaten umfassen in erster Linie die Materialdichte, sowie Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität, die auch temperaturabhängig ermittelt wurden.

Messtechnische Methoden:

- Materialdichte: gravimetrische Bestimmung (Auswiegen eines definierten Probenvolumens).
- Wärmekapazität: Differenzkalorimetrie (TGA/DSC, Firma NETZSCH Gerätebau GmbH) als Hauptmethode, zur raschen temperaturabhängigen Messung. Zusätzlich wurde die Messgröße mittels eines an der TU WIEN entwickelten adiabaten „Drop-Kalorimeter“ (eine definierte Probenmenge wird auf eine definierte Ausgangstemperatur gebracht und in ein Flüssigkeitsbad fallen gelassen, dessen Temperaturänderung gemessen wird) punktuell überprüft.
- Wärmeleitfähigkeit: Da die normgemäße Messung mit Zweidrahtmethode zur Projektlaufzeit noch nicht zur Verfügung stand, wurde im Rahmen einer im Projekt durchgeführten Diplomarbeit (Crespo Poyo, 2012) eine Methode entwickelt, die von der Messung der Kerntemperatur von Probenkörpern bei gesteuerter Aufheizung mit einem rampenförmigen Temperaturprofil in einem Ofen ausgeht (Magee und Bransburg, 1995).

3.7.1 Messreihe zur Bestimmung der mikroskopischen Wärmeleitfähigkeit von Hochwertschamotte

3.7.1.1 Ausgangssituation und Ziele

Durch die standardmäßig eingesetzte Heißdrahtmethode lassen sich die makroskopischen Wärmeleitfähigkeiten von Feuerfestmaterialien bestimmen. Für Messungen in kleinen Bereichen (wenige mm) eignet sich die Laser-Flash Methode. Dadurch kann die Wärmeleitfähigkeit innerhalb des Werkstückes durch entsprechende Probennahme (Steinoberfläche, Kern) charakterisiert werden. Aus der Wärmeleitfähigkeit lassen sich Rückschlüsse auf die Gefügeeigenschaften ziehen.

3.7.1.2 Messungen

Es wurde eine Messreihe der mikroskopischen Wärmeleitfähigkeit der Hochwertschamotte am Institut für Festkörperphysik der TU WIEN durchgeführt. Das dort vorhandene Messgerät FL3000 der Firma Anter Corporation inklusive Infrastruktur wurde für die Messungen von Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Bauer zur Verfügung gestellt.

Aus statistischen Gründen wurden vier Proben vier- bis sechs Mal bei Temperaturen von 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C sowie 1000 °C vermessen. Zwei Proben wurden dem Kern eines Schwersteines und zwei der Oberfläche desselben Steines entnommen.

T (°C)	λ Kern [W/(m·K)]	λ Oberfläche [W/(m·K)]
200	20.38	29.99
400	19.83	29.17
600	20.24	30.45
800	21.56	32.26
1000	23.53	35.86

Tabelle 2: Gemittelte Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Proben

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte der Einzelmessungen aller Proben zusammengefasst. Man erkennt deutlich, dass die Proben im Kern eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Der Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit ist dadurch verursacht, dass Hochwertschamotte ein inhomogenes Gemisch aus Mullit, Cristobalit und Glas mit unterschiedlichen Phasen ist. Abhängig davon, welcher Bestandteil in welcher Phase am untersuchten Ort vorherrscht, ergibt sich eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit. Hinzu kommt, dass diese Werte höher sind als jene, die durch die RATH Gruppe angegeben werden. Die hier gemessenen Werte stellen den mikroskopischen Wert der Wärmeleitfähigkeit dar, wohingegen in dem gesamten Stein noch zusätzlich Lufteinschlüsse vorhanden sind, die die Gesamtwärmeleitfähigkeit des Steines erniedrigen.

3.8 Entwicklung einer experimentellen Labortrockenschrank

Bestandteil des Projektes war es auch, für das Labor der RATH Gruppe am Standort Krummnußbaum eine steuerbare Labortrockenkammer zur Optimierung der Trocknerläufe für die Produktion zu entwickeln. Die Gestaltung der Labortrockenkammer auf Basis eines Klimaschranks mit einem Volumen von zirka 200 l ermöglicht es, Originalsteine aus der Produktion zu verwenden und unter geregelter Feuchte und Temperatur auf einer Wägeplattform mit Datenaufzeichnung zu behandeln. Der Einsatz der Steine in den produzierten Formaten ist insbesondere wichtig, da manche Formen und Dimensionen bei der Trocknung besonders rissanfällig sind. Auf diese Art können die Auswirkungen verschiedener Trockenparameter auf die Trocknungsgeschwindigkeit direkt erfasst werden. Mit Hilfe von Einstech-Thermofühlern kann zusätzlich die Wanderung der Trocknungsfront in den Produkten beobachtet und aufgezeichnet werden.

Der Aufbau und die Ausrüstung des Klimaschranks erfolgte an der TU WIEN, nach der Durchführung einiger Testläufe mit kritischen Steinformaten wurde das Gerät der Firma zur weiteren Verwendung übergeben.

3.9 Messung und Bilanzierung von Trockenkammer-Läufen

In der Produktion der RATH Gruppe werden unter anderen an den Standorten Krummnußbaum und Bennewitz mehrere Trockenkammern betrieben. Da es in einzelnen Kammern vermehrt zu Produktschäden durch Trocknungsrisse kommt bzw. generell Möglichkeiten zur Reduktion von Trockenzeit und Energieeintrag gefragt sind, wurde versucht, Temperatur- und Feuchteverlauf innerhalb der betreffenden Kammern mittels Messung zu charakterisieren und die Ursachen für die Abweichung von einer idealen Verteilung zu finden.

Im Rahmen der Messungen sind insbesondere auch die starken Schwankungen in der Zuluftversorgung aufgefallen – Druck und Temperatur sind zeitlich äußerst instabil. Es stellte sich heraus, dass die Heißlufttemperatur im Verlauf eines Trocknungsvorganges sich um mehr als 100 K verändern kann. Da die Regelung die Schwankungen nicht immer ausgleichen kann, können diese in die Trockenkammer durchschlagen und das Produkt belasten. Die Ursache für diese Abweichungen ist die Speisung der Zuluftversorgung mit mehreren Hochtemperaturöfen im Batch-Betrieb. Es wurden Gegenmaßnahmen gesetzt und für die Zukunft sind weitere Verbesserungen geplant.

4 Ausblick und Empfehlungen

Im Bereich der Hochtemperatur-Brennöfen konnten im Rahmen des Projektes Optimierungen für die Brennprogramme vorgeschlagen werden, die bereits zum Zeitpunkt der Berichtslegung zu deutlich niedrigeren spezifischen Energieverbräuchen und zu einer Kapazitätssteigerung geführt haben. Weitere Einsparungspotentiale sind identifiziert und werden in weiterer Folge schrittweise umgesetzt.

Die numerische Vollsimulation eines Produktionsofens (HTO1) lieferte wertvolle Erkenntnisse bezüglich einer günstigen Positionierung der Brenner und die daraus resultierende Luftführung im Ofen. Ebenfalls konnte eine detaillierte Untersuchung der Umströmung der Produktsteine und des Brennhilfsmittelaufbaus durchgeführt werden, die dazu führt, dass alternative Positionskonfigurationen vorgeschlagen wurden, die in der Produktion umgesetzt wurden. Weitere Optimierungsschritte in der Produktion bezüglich der optimalen Umströmung der Produktsteine sollen auch in Zukunft durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der detaillierten Brennersimulationen zeigten, dass die vorhandenen Brenner nur für eine geringe Anreicherung (bis max. 25 %) der Verbrennungsluft mit Sauerstoff geeignet sind, da die stark erhöhten Temperaturen im Bereich der Verbrennungsgasverteilung voraussichtlich zu starker Hochtemperaturkorrosion der Brennersteine führen würden. Ähnliche Ergebnisse lieferten die experimentellen Untersuchungen von Sauerstoffanreicherung eines Brenners bei Firma MESSER AUSTRIA GmbH. Eine Umrüstung der bestehenden Öfen auf eine sauerstoffangereicherte Fahrweise kann daher nicht empfohlen werden.

Mit den im Projekt gesammelten Erkenntnissen zu den Rohmaterialien, zu den Brennkurven und zur energietechnischen Optimierung werden nicht nur aktuelle Anlagenplanungen erleichtert, sondern es sollen auch in Zukunft gemeinsam mit Industrieofenbauern grundlegend neu gestaltete Brennofenkonzepte entwickelt werden.

Durch geeignete Dimensionierung der Ofenquerschnitte, der Ofenwägen und des Brennbehelfes sollen neben erhöhter Flexibilität und kürzeren Brennzeiten auch wesentlich niedrigere spezifische Energieverbräuche erreicht werden können. Experimentelle Ergebnisse der Trocknerkammern ergaben, dass das größte Produktionsoptimierungspotenzial in der Behebung der Instabilitäten der Versorgungsleitungen liegt. Der Umbau der Trockenkammer soll in Zukunft unter anderem diese Instabilitäten beheben. Alle Kammern sollen zukünftig mit diesen Verbesserungen ausgerüstet werden. Entsprechende Arbeiten an einer Testkammer sind gerade in einer Umsetzungsphase – nach erfolgreichen Funktionstests (Anpassung und Zeitoptimierung der Trockenprogramme, Reduktion des Ausschusses) werden alle Trockenkammern auf die neue, ressourcenschonende Steuerung umgerüstet.

Zur Untersuchung der Trocknungsvorgänge einzelner Rohlinge wurde ein Klimaschrank aufgebaut, konfiguriert und für Messungen bei der RATH Gruppe bereitgestellt. Mit der Anlage wurden Versuche zur Vermeidung von Ausschuss durch Trocknungsrisse durchgeführt, die auch nach Projektende weitergeführt werden. Der Labortrockenschrank soll zukünftig die weitere firmeninterne Optimierung der Produkte erleichtern.

Zur Untersuchung der Porosierungsmittel wurden mittels TGA/DSC mehrere einzelne Porosierungsmittel und deren Mischung untersucht. Ebenfalls wurden Ausbrandversuche einzelner Steine aus der Produktion durchgeführt, um den Einfluss der Diffusionslimitierung genauer einschätzen zu können. Die Produktion von Feuerleichtsteinen am Standort Bennewitz soll aufgrund der Ergebnisse des Projektes mit energieeffizientem Verfahren ausgebaut werden. In Zukunft sollen auch weitere Materialien getestet werden, somit sind neue Messungen zu diesem Thema vorgesehen (TGA-DSC, Ganzsteinversuche). Neben dem Erkenntnisgewinn für die Projektpartner sind auch zusammenfassende wissenschaftliche Publikationen im Bereich angewandte Thermogravimetrie vorgesehen. Die im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführten Untersuchungen zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Feuerfest-Materialien werden an der TU WIEN fortgeführt.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt angeführt, können die erzielten Ergebnisse direkt zur Nutzung im Rahmen der RATH Gruppe an anderen Standorten eingesetzt werden. Die erfolgreiche Umsetzung der Prozessoptimierung am Standort Krummnußbaum ist für die anderen Betriebsstätten wegweisend und zeigt die Notwendigkeit einer Potentialanalyse für alle energieaufwändigen Trocken- und Brennprozesse. Eine der Folgen davon ist beispielsweise die Umrüstung und Kapazitätserweiterung des Werkes in Bennewitz, die auf Basis der Projekterkenntnisse eingeleitet wurde.

Die an den untersuchten Standorten hergestellten Produkte stehen aktuell unter hohem Preis- und Qualitätsdruck, daher hat die RATH Gruppe mit diesen Verbesserungen die Möglichkeit, weiterhin ihre Marktposition im Bereich der Feuerleicht- und Schwersteine zu stabilisieren um damit später auch Entscheidungen für weitere umfassende Modernisierungsaktivitäten für die Hafnerware zu treffen.

Natürlich geben die Projektmitwirkenden das erworbene Zusatzwissen an die betroffenen Betriebe der Zulieferindustrien (Ofenbauer, Trockenkammertechnologie...) weiter, welche die Ergebnisse direkt in ihre Produktentwicklung einfließen lassen können. Neben den firmen- bzw. konzerninternen Zielgruppen sind über die wissenschaftlichen Publikationen, in welchen substantielle Teile der Forschungserkenntnisse dargelegt werden, natürlich

auch alle einschlägigen Firmen in der Branche angesprochen. So können insbesondere andere Brenner- und Ofenbauer sowie Trockenkammer-Lieferanten direkten Nutzen aus den Angaben ziehen. Viele Ergebnisse sind ohne größere Einschränkungen in themenverwandte Bereiche, wie Keramikindustrie und Ziegeleien, übertragbar.

5 Literaturverzeichnis

ANSYS Inc., ANSYS FLUENT™ Homepage, (2012), online:
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent/>

Celia del Carmen Crespo Poyo: *Measurement and Simulation of Heat Conduction in Refractory Materials*, Master thesis, TU WIEN (2012).

Harasek M., Horváth A., Jordan C., Maier C., Nagy J., *Short notes on the numerical simulation of the effects of oxygen enrichment in a turbulent, non-premixed, swirling methane-air burner*. Projektberichte Zentraler Informatikdienst, TU WIEN (2010), online:
http://www.zid.tuwien.ac.at/fileadmin/files_zid/projekte/2010/10-166-1.pdf

Harasek M., Horváth A., Jordan C., Kuttner C., Maier C., Nagy J., Pohn S., *Steady-state RANS simulation of a swirling, non-premixed industrial methane-air burner using edcSimpleFoam*. Projektberichte Zentraler Informatikdienst, TU WIEN (2011), online:
http://www.zid.tuwien.ac.at/fileadmin/files_zid/projekte/2011/11-166-2.pdf

Harasek M., *cfD.at Homepage*, (2012), online: <http://www.cfd.at/>

Magee T.R.A., Bransburg T., *Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour*, Journal of Food Engineering, **25**, (1995), 223-232, S. 223-232.

Nagy J., Horváth A., Jordan C., Harasek M., *CFD Simulations of a High Temperature Furnace*, In Proceedings of 8th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and process Industries, SINTEF/NTNU, Trondheim, Norwegen, 21-23 Juni 2011.

Nagy J., Horváth A., Jordan C., Harasek M., *Improvement of an Industrial High Temperature Furnace*, In Proceedings of 5th Open Source CFD International Conference 2011, Paris-Chantilly, Frankreich, 3-4 November 2011.

OpenCFD Ltd. (SGI), *OpenFOAM® Homepage*, (2012), online:
<http://www.openfoam.com/>

6 Anhang

List der Publikationen, die im Rahmen des Projektes entstanden sind:

Harasek M., Horváth A., Jordan C., Maier C., Nagy J., *Short notes on the numerical simulation of the effects of oxygen enrichment in a turbulent, non-premixed, swirling methane-air burner*. Projektberichte Zentraler Informatikdienst, TU WIEN (2010), online: http://www.zid.tuwien.ac.at/fileadmin/files_zid/projekte/2010/10-166-1.pdf

Harasek M., Horváth A., Jordan C., Kuttner C., Maier C., Nagy J., Pohn S., *Steady-state RANS simulation of a swirling, non-premixed industrial methane-air burner using edcSimpleFoam*. Projektberichte Zentraler Informatikdienst, TU WIEN (2011), online: http://www.zid.tuwien.ac.at/fileadmin/files_zid/projekte/2011/11-166-2.pdf

Nagy J., Horváth A., Jordan C., Harasek M., *CFD Simulations of a High Temperature Furnace*, In Proceedings of 8th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and process Industries, SINTEF/NTNU, Trondheim, Norwegen, 21-23 Juni 2011.

Nagy J., Horváth A., Jordan C., Harasek M., *Improvement of an Industrial High Temperature Furnace*, In Proceedings of 5th Open Source CFD International Conference 2011, Paris-Chantilly, Frankreich, 3-4 November 2011.

Celia del Carmen Crespo Poyo: *Measurement and Simulation of Heat Conduction in Refractory Materials*, Master thesis, TU WIEN (2012).

IMPRESSUM

Verfasser

Rath AG
Walfischgasse 14, 1010 Wien
Tel: +43 (1) 5134427-0
Fax : +43 (1) 5134427-87
E-Mail: info@rath-group.com
Web: www.rath-group.com

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH