



**ZIEGELWERK  
BELLENBERG**



MADE IN GERMANY

**Gemeinsamer Abschlussbericht des Forschungsvorhabens  
Energieeffizienzsteigerung in der Ziegelindustrie durch Entwicklung und Ein-  
satz eines neuen Verbrennungskonzeptes durch Nutzung von interner heißer  
Kühlluft  
(Akronym: Zie-Ver)**

**Projektlaufzeit: 01.07.17 – 29.02.2020**

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes des GWI:**

**03ET1511A**

**Simulation und messtechnische Untersuchung des neuen Verbrennungskonzeptes**

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes der IZF:**

**03ET1511B**

**Simulation und messtechnische Untersuchung der Auswirkungen des neuen Verbren-  
nungskonzeptes auf den Ziegelbrand**

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes von Lingl:**

**03ET1511C**

**Auslegung und Bau des neuen Verbrennungssystems**

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes des Ziegelwerks Bellenberg:**

**03ET1511D**

**Umsetzung des geplanten Verbrennungskonzeptes und Langzeittests**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Autoren:**

**Anne Giese, Tim Nowakowski, Tim Schneider**

Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

**Eckard Rimpel**

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.

**Markus Martl**

Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & Co. KG

**Tobias Bem**

Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co KG

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Abschlussberichts liegt bei den Autoren

## **Forschungspartner**

1. Koordinierende Forschungsstelle  
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)  
Hafenstraße 101  
45356 Essen  
Ansprechpartner:  
Dr.-Ing. Anne Giese  
T: 0201 3618-257  
E: a.giese@gwi-essen.de

2.  
Institut für Ziegelforschung Essen e. V. (IZF)  
Am Zehnthof 197  
45307 Essen  
Ansprechpartner:  
Dipl.-Ing. Eckard Rimpel  
T: +49(0)201 59 213 - 48  
E: rimpel@izf.de

3.  
Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & Co. KG (LINGL)  
Nordstraße 2,  
86381 Krumbach  
Ansprechpartner:  
Markus Martl  
T: +49 (0) 8282 825-420  
E: m.martl@lingl.com

4.  
Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co KG (ZWB)  
Tiefenbacher Str. 1  
89287 Bellenberg  
Ansprechpartner:  
Tobias Bem  
T: +49 (0) 7306 965027  
E: tobias.bem@ziegelwerk-bellenberg.de

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis:.....	6
1 Zusammenfassung.....	9
2 Ausgangssituation und Hintergründe.....	10
3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse.....	15
3.1 Funktionsweise und Aufbau des Ziegelofens des Ziegelwerks Bellenberg .....	15
3.1.1 Einfahrtschleuse .....	17
3.1.2 Aufheizzone .....	17
3.1.3 Umwälzer der Aufheizzone .....	17
3.1.4 Brennzzone .....	17
3.1.5 Hauptbrennzzone.....	18
3.1.6 Sturzkühlung.....	18
3.1.7 Heißluftabsaugung .....	18
3.1.8 Kühlzone.....	18
3.1.9 Unterwagenkühlung.....	19
3.1.10 Abgasanlage .....	19
3.2 Neues Brennerkonzept.....	20
3.3 Brennerdesign mittels CFD-Simulation .....	21
3.3.1 Parameter und Randbedingungen .....	21
3.3.2 Simulation des Ursprungszustands .....	23
3.4 Numerische Berechnung der Brennergeometrien.....	24
3.4.1 Simulationsergebnisse für einen Druck von 1,4 bar.....	26
3.4.2 Simulationsergebnisse für einen Druck von 0,9 bar.....	27
3.5 Konstruktion und Fertigung der Brenner aus hitzebeständigem Stahl.....	29
3.6 Vermessung der Tunnelofenanlage im Ursprungszustand .....	30
3.6.1 Aufnahme der Randbedingungen für messtechnische Untersuchungen .....	31
3.6.2 Messungen an der Ofenanlage im Ursprungszustand .....	31
3.7 Messtechnische Untersuchungen am GWI .....	33
3.7.1 Versuchsofenanlage des GWI.....	34
3.7.2 Versuchsbedingungen .....	37
3.7.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	38
3.8 Integration einer aus hitzebeständigem Stahl gefertigten Brennergruppe in den bestehenden Tunnelofen .....	41
3.9 Vermessung der Tunnelofenanlage nach Umbau auf Brenner aus hitzebeständigem Stahl	42
3.10 Vermessung der Tunnelofenanlage nach Umbau auf Injektorbrenner aus SiC-Material .....	45

3.11	Simulation des Brennprozess zur Abschätzung der Energieeinsparung .....	47
3.12	Versuche in einer Brennkammer [IZF].....	49
3.13	Umbau und Untersuchung der Ofenanlage vor, während und nach dem Umbau [IZF, ZWB] 51	
3.14	Einschätzung des energetischen Einsparpotenzials .....	56
3.15	Erkenntnisse zur wirtschaftlichen Gesamtanalyse bzgl. Aufwand und Nutzen .....	59
3.16	Handlungsempfehlung bei Neuauslegung einschließlich Auslegungs- und Betriebskriterien 60	
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	61
5	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	62
6	Literatur .....	63
7	Anhang .....	64

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 2.1: moderner Tunnelofen [Quelle: IZF] .....	10
Abbildung 2.2: beispielhafte Energiebilanz eines Ziegelwerkes [Quelle IZF] .....	11
Abbildung 2.3: Energieeinsparung als Funktion der Luftvorwärmung [GWI] .....	12
Abbildung 2.4: neues Verbrennungskonzept im Tunnelofen [IZF] .....	13
Abbildung 2.5: Brennerdüse zur Vermischung von Ofenatmosphäre [IZF] .....	13
Abbildung 3.1: Tunnelofen im Ziegelwerk Bellenberg (Januar 2018) [IZF] .....	15
Abbildung 3.2: typischer Besatzaufbau mit Anordnung der Thermoelemente zur Messung der Brennkurven [IZF] .....	16
Abbildung 3.3: Injektordüse und Mischrohr [GWI] .....	20
Abbildung 3.4: Stromlinien der Oxidatorströmung [GWI] .....	20
Abbildung 3.5: Aufbau Brennraum/Injektorbrenner im CFD-Modell [GWI] .....	22
Abbildung 3.6: Vorderer Teil Keramiklanze im Ursprungszustand [GWI] .....	23
Abbildung 3.7: Strömungsgeschwindigkeiten im Ist-Zustand bei 1,4 bar Gasdruck [GWI] .....	23
Abbildung 3.8: Flammenkontur (links) und Temperaturverteilung (rechts) im Ist-Zustand bei 1,4 bar Gasdruck [GWI] .....	24
Abbildung 3.9: Mischungsbruch des Brennstoffs [GWI] .....	25
Abbildung 3.10: Brennerprototyp [LINGL] .....	25
Abbildung 3.11: Injektorwirkung am Mischrohr anhand der Oxidatorstromlinien am Deckenspalt (Skala in Vol.-% O <sub>2</sub> ) [GWI] .....	26
Abbildung 3.12: Strömungsgeschwindigkeiten der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 1,4 bar Gasdruck [GWI] .....	26
Abbildung 3.13: Flammenkontur (links) und Temperaturverteilung (rechts) der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 1,4 bar Gasdruck [GWI] .....	27
Abbildung 3.14: Strömungsgeschwindigkeiten der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 0,9 bar Gasdruck [GWI] .....	28
Abbildung 3.15: (links) und Temperaturverteilung (rechts) der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 0,9 bar Gasdruck [GWI] .....	29
Abbildung 3.16: 3D-Modell des Brennerrohrs im Mittelschnitt [LINGL] .....	30
Abbildung 3.17: Einzeldetails der Konstruktionszeichnung [LINGL] .....	30
Abbildung 3.18: Gemessene CO-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	32
Abbildung 3.19: Gemessene CO <sub>2</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	32
Abbildung 3.20: Gemessene NO <sub>x</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	32
Abbildung 3.21: Gemessene O <sub>2</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	33
Abbildung 3.22: Gemessene Temperaturen der Brennerreihe 13 [GWI] .....	33
Abbildung 3.23: Seitenansicht (rechts) des Versuchsofens 1 [GWI] .....	34
Abbildung 3.24: Schematischer Aufbau des Versuchsofens 1 [GWI] .....	34
Abbildung 3.25: Blick durch das Sichtfenster auf den montierten Testbrenner [GWI] .....	35
Abbildung 3.26: Versuchsaufbau am GWI-Versuchsofen 1 [GWI] .....	35
Abbildung 3.27: Strahlungsquellen in heißen Feuerräumen [GWI] .....	36
Abbildung 3.28: OH-VIS System [GWI] .....	37

Abbildung 3.29: Digitalkamerabild der Sicht durch die Ofenöffnung bei P = 45 kW [GWI].....	40
Abbildung 3.30: OH-Aufnahme der Sicht durch die Ofenöffnung bei P = 45 kW als RMS Wert aus 70 Einzelaufnahmen [GWI] .....	40
Abbildung 3.31: 3D-Modell einer Brennergruppe für den Tunnelofen [LINGL].....	41
Abbildung 3.32: Detailsansicht aus der neuen Injektorbrennergruppe [LINGL].....	42
Abbildung 3.33: Detailsansicht der neuen Injektorbrennergruppe [IZF] .....	42
Abbildung 3.34: CO-Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	43
Abbildung 3.35: CO <sub>2</sub> -Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	43
Abbildung 3.36: NO <sub>x</sub> -Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	43
Abbildung 3.37: O <sub>2</sub> -Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI] .....	44
Abbildung 3.38: Temperaturen nach Umbau der Brennerreihe 13 [GWI].....	44
Abbildung 3.39: CO-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWI] .....	45
Abbildung 3.40: CO <sub>2</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWI] .....	45
Abbildung 3.41: NO <sub>x</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWI] .....	46
Abbildung 3.42: O <sub>2</sub> -Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWI] .....	46
Abbildung 3.43: Temperaturen mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWI] .....	46
Abbildung 3.44: Simulation des Brennprozess vor dem Umbau [IZF].....	48
Abbildung 3.45: Simulation des Brennprozess mit vorgewärmter Verbrennungsluft aus der Kühlzone [IZF].....	48
Abbildung 3.46: Brennkammer [IZF]      Abbildung 3.47: Anordnung der Brenner an der Brennkammer [IZF]	49
Abbildung 3.48: Temperaturverlauf und Sauerstoffkonzentration während eines Versuchs [IZF] .....	50
Abbildung 3.49: Temperaturverlauf und Kohlenmonoxidkonzentration während eines Versuchs [IZF] .....	50
Abbildung 3.50: Anordnung der Thermoelemente am Ofenwagenbesatz [IZF].....	51
Abbildung 3.51: Luftmengenströme am Tunnelofen im Ziegelwerk Bellenberg [IZF] .....	51
Abbildung 3.52: Brennkurven des Besatzes vor dem Umbau im Januar 2018 (Besatztemperaturen) [IZF].....	52
Abbildung 3.53: Ausschnitt aus den Brennkurven (Abbildung 3.52) vor dem Umbau im Januar 2018 im Bereich der Brennzone [IZF].....	52
Abbildung 3.54: Brennkurven des Besatzes vor dem Umbau im Januar 2019 (Besatz- und Gas-/Lufttemperaturen) [IZF] .....	53
Abbildung 3.55: Ausschnitt aus den Brennkurven (Abbildung 3.54) vor dem Umbau im Januar 2019 im Bereich der Brennzone (Besatz- und Gas-/Lufttemperaturen) [IZF].....	53
Abbildung 3.56: Brennerdüsenkonstruktion und Brennerkopf der neuen Brenner [LINGL] .....	54
Abbildung 3.57: Ausschnitt aus den Brennkurven des Besatzes nach dem Umbau im Juni 2019 im Bereich der Brennzone (Besatztemperaturen) [IZF] .....	54
Abbildung 3.58: Brennerdüsenkonstruktion aus SiC-Keramik [LINGL] .....	55

Abbildung 3.59: Ausschnitt aus den Brennkurven des Besatzes nach dem Umbau im Januar 2020 im Bereich der Brennzzone (Besatztemperaturen) [IZF] .....	56
Abbildung 3.60: Aufzeichnung des spezifischen Energieverbrauchs ZWB über drei Jahre [ZWB] .....	57
Abbildung 3.61: Aufzeichnung der Bruchquote im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle [ZWB].....	58
Abbildung 3.62: Auszug aus dem Verkaufsprospekt [LINGL] .....	59
Abbildung 4.1: Angepasster Zeitplan inkl. 7-monatiger kostenneutraler Verlängerung .....	61



## 1 Zusammenfassung

Die Herstellung von Ziegeleiprodukten erfolgt in Europa überwiegend mit gasbetriebenen Thermoprozessanlagen. Der Prozess zeichnet sich durch ein hohes Temperaturniveau aus und ist sehr energieintensiv. Gleichzeitig sind Ziegel eines der am weitest verbreiteten Baumaterialien mit einem entsprechend hohen Marktanteil bei Produkten für den Neu- und Bestandsbau. Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten und den allgemeinen Bestrebungen zur Reduzierung der Emissionen von klimaschädlichen Treibhausgasen, wie etwa Kohlendioxid im Zusammenhang mit den klimapolitischen Zielen der deutschen Bundesregierung, erscheint es sinnvoll und zielführend, den Prozess der Ziegelproduktion energetisch zu optimieren.

Im Rahmen des Projekts Zie-Ver (Energieeffizienzsteigerung in der Ziegelindustrie durch Entwicklung und Einsatz eines neuen Verbrennungskonzeptes durch Nutzung von interner heißer Kühlluft) wurde deshalb ein neues und innovatives Brennerdesign erarbeitet, das auch auf thermische Prozesse anderer Branchen übertragbar ist.

Die Methoden der numerischen Strömungssimulation sowie umfangreiche Messkampagnen an einer bestehenden Tunnelofenanlage zur Ziegelproduktion und an den Versuchseinrichtungen der beteiligten Institute bilden dabei die Basis für die Entwicklung des neuartigen Designs. Ein wesentliches Merkmal des vorliegenden Brenners ist die Nutzung von bei der Produktkühlung entstehenden heißen Kühlluft als Verbrennungsluft. Hierdurch lässt sich ein signifikanter Anteil des Brennstoffs einsparen, wobei die übrigen Prozessbedingungen und vor allem auch die Produktqualität weitestgehend unverändert bleiben.

Durch die strömungsmechanische Optimierung der Brennerdüsengeometrie wurde ein erstes Design ermittelt, das zunächst anhand von aus hitzebeständigem Stahl gefertigten Funktionsmustern im Laborversuch und an der realen Ofenanlage erprobt wurde. Darauf aufbauend wurde das Konzept weiterentwickelt und schließlich unter Anwendung additiver Fertigungsverfahren ein endgültiges Brennerdesign aus SiC-Keramik entwickelt. Das Brennerkonzept erfüllt die Anforderungen und Erwartungen. Durch den Einsatz der neuen Brenner ließ sich darüber hinaus sogar die Qualität der Ziegelprodukte verbessern.

**Die erreichte Energieeinsparung von 15 % konnte an der Tunnelofenanlage im Zuge einer abschließenden Messkampagne nachgewiesen werden.**

## 2 Ausgangssituation und Hintergründe

Moderne Tunnelöfen der Ziegelindustrie erreichen die für hohe Leistungen und gleichmäßige Produktqualitäten erforderliche Prozessführung insbesondere dadurch, dass sie nahezu im gesamten Aufheizbereich, wie auch in der Garbrandzone, mit Brennern bestückt sind, die nicht nur die am jeweiligen Ort benötigte Prozesswärme, sondern zugleich auch einen Impulsstrom mit hoher Reichweite erzeugen. Dadurch werden neben der erforderlichen Verbrennungsgas-temperatur auch eine hinreichende Vergleichmäßigung der Temperaturen und Gaszusammensetzungen über den Ofenquerschnitt erreicht. Dieses setzt voraus, dass die Ofen-atmosphäre im Aufheiz- und Garbrandbereich weitgehend durch die Verbrennungsprodukte von im Allgemeinen überstöchiometrisch, also mit Luftüberschuss, zu betreibenden Brennern erzeugt wird. Die Nutzung der in der Kühlzone entstehenden Heißluft beschränkt sich daher derzeit fast ausschließlich auf die Rohlingstrocknung, da die Aufheiz- und Garbrandzone des Tunnelofens aus den oben genannten Gründen nur in geringem Umfang zur Nutzung dieser energetisch hochwertigen Kühlluft in der Lage ist. Die zur Formgebung der Ziegelrohlinge erforderlichen Anmachwassergehalte sind gerade so groß, dass bei heute üblichen Techniken die zur Konvektionstrocknung der Rohlinge erforderliche Wärmemenge annähernd mit der in der Kühlzone des Tunnelofens freigesetzten Kühlwärme übereinstimmt.

Bei modernen Tunnelöfen der Ziegelindustrie handelt es sich verfahrenstechnisch nach **Abbildung 2.1** um die Kopplung zweier nacheinander ablaufender Teilprozesse. Der erste Teil besteht aus dem Aufheizprozess bis zur Garbrandtemperatur, bei der ein Temperatenausgleich innerhalb der Besatzpakete - bzw. beim Einlagenbrand innerhalb der Ziegelrohlinge - stattfindet. Aus keramtechnischen Gründen ist zudem unter Umständen ein Verweilen bei dieser Maximaltemperatur notwendig. Im Anschluss daran werden die Ziegel im zweiten Teilprozess in einem ein- oder mehrstufigen Gegenstromkühler auf Ausfahrttemperatur gebracht. Die hierbei erhitzte Kühlluft wird aus dem Ofenprozess ausgekoppelt und an anderer Stelle zur Trocknung der Ziegelrohlinge verwendet [3].

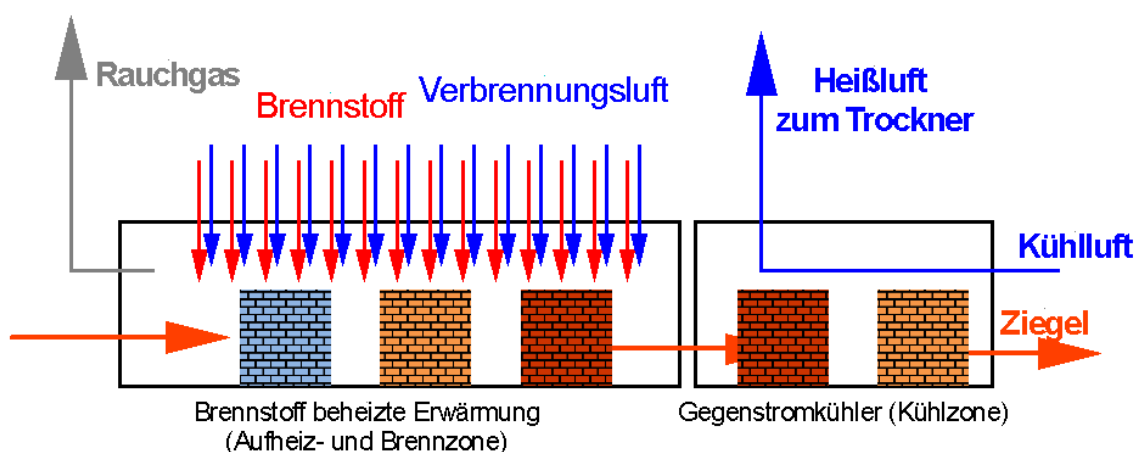


Abbildung 2.1: moderner Tunnelofen [Quelle: IZF]

Damit setzt sich der moderne Tunnelofen von früheren Tunnelofenkonzepten dadurch ab, dass in ihm keine explizite Brennzone mit vorangehender Gegenstrom-Aufheizung der Rohlinge existiert, stattdessen erfolgt - mehr oder weniger - eine Brennstoffbeheizung der gesamten Aufheiz- und Ausgleichszone.

Durch diese Verfahrensweise besteht der Zwang zur größtmöglichen Synchronisation von Ofen und Trocknerbetrieb, sodass die energetische Optimierung der Einzelprozesse nahezu unmöglich wird. Ein weiterer Punkt, der die energetische Kopplung zwischen Trockner und Ofen erschwert, ist der Umstand, dass der Brennofen kontinuierlich an 7 Tagen 24 Stunden arbeitet; der Trockner hingegen wird nur während der 5-tägigen Produktionszeit unter der Woche beschickt, so dass keine kontinuierliche Nutzung der Verbundenergie vom Ofen gewährleistet werden kann. So steht zu Wochenbeginn genügend Trockenenergie vom Ofen zur Verfügung, ab dienstags, wenn der Trockner wieder komplett mit feuchter Ware gefüllt ist, muss zusätzliche Energie durch einen Zusatzbrenner bereitgestellt werden. Am Wochenende hingegen kann die vom Ofen kommende Energie nicht komplett genutzt werden und muss, um die Produkte im Trockner nicht zu schädigen, über Dach abgelassen werden.

Ganz extrem stellt sich die Situation in Dachziegelwerken dar, da hier die Produkte einzeln in sogenannten H-Kassetten gebrannt werden. Dies bedeutet, dass im Ofen nur ca. 45 % Produkt wärmebehandelt wird, während die Kassetten ebenfalls aufgeheizt bzw. abgekühlt werden müssen. Aus diesem Grund steht in diesen Werken mehr als doppelt so viel Energie vom Ofen zur Verfügung, als für die Trocknung der Produkte benötigt wird. Bei der Herstellung dieser Produkte ist es umso wichtiger, möglichst viel Kühlluft im Ofen zu behalten.

Die Energieströme des Ofen-Trockner-Verbunds sind beispielhaft in **Abbildung 2.2** dargestellt. Mehr als 50 % der am Ofen eingesetzten Energie wird dem Trockner zugeführt. Zwar wird diese Energie zur Trocknung genutzt, für den Ofen bedeutet sie aber zunächst einen Energieverlust. Dadurch, dass dem Trockner thermische Energie durch die Ofenabluft zugeführt wird, ist der Anteil des Trockners am Gesamtenergiebedarf des Herstellungsprozesses höher als der des Ofens. Der restliche Teil der thermischen Trocknungsenergie wird, wie oben beschrieben, zeitweise durch Brenner erzeugt. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs und der hohen Energiekosten wird eine Verminderung des Energiebedarfs angestrebt.

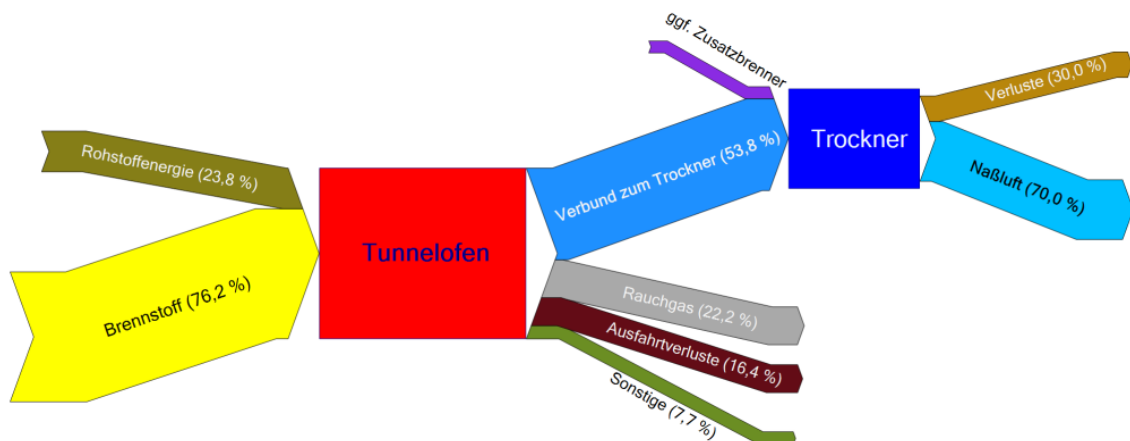


Abbildung 2.2: beispielhafte Energiebilanz eines Ziegelwerkes [Quelle IZF]

Zur weiteren energetischen Optimierung des Herstellungsprozesses von Ziegeleiprodukten gilt also, die bisherige enge energetische Kopplung zwischen der Kühlzone des Tunnelofens und der Trocknungsanlage in möglichst großem Umfang abzubauen. Hierzu bietet es sich nach dem bisherigen Stand der Technik insbesondere an, Teile der bei der Produktkühlung erhitzten Kühlluft in den Brennern des Tunnelofens als vorgewärmte Verbrennungsluft einzusetzen. Dieses geschieht mit dem ausschließlichen Zweck der Brennstoffsubstitution durch Nutzung

vorgewärmter Verbrennungsluft, also mit der Absicht, die im Brenner entstehenden Verbrennungsgase bei weitgehend gleichbleibender Quantität und Qualität und ohne nennenswerte Veränderung der theoretischen Verbrennungstemperatur zu belassen. Damit kann etwa ein Drittel der Kühlluft im Tunnelofen zur Verminderung des hier erforderlichen Brennstoffenergiebedarfs verwendet werden. In diesem Umfang sinkt die Bereitstellung von Kühlluft zur Deckung der Trocknungsenergie, die dort durch entsprechenden Einsatz von Zusatzbrennern im Bedarfsfall ausgeglichen wird.

Die verbleibenden zwei Drittel der Ofenkühlluft stehen auch weiterhin zur energetischen Grundversorgung des Trockners zur Verfügung. Die Kühlluftnutzung als vorgewärmte Verbrennungsluft ist somit eine äußerst sinnvolle Möglichkeit zur ofeninternen Nutzung der ansonsten komplett in den Verbund geratenden Kühlluft.

Derzeit ist die Nutzung vorgewärmter Verbrennungsluft für den Betrieb industriell eingesetzter Brenner in der Ziegelindustrie zumeist nur eingeschränkt und auf geringem Temperaturniveau realisiert, da der Installationsaufwand isolierter, externer Rohrleitungen oder zu ändernder Ventile und Stellaggregate die Wirtschaftlichkeit in Frage stellen.

Für die hier anstehende Problemstellung, also das Brennen von Ziegeln, ist es dabei nicht interessant, durch vorgewärmte Luft für höhere Verbrennungstemperaturen zu sorgen, sondern es geht ausschließlich um die Verminderung des Energiebedarfs bei sonst gleichbleibenden Bedingungen auch unter Inkaufnahme eines erhöhten Luftfaktors. Interessant ist hinsichtlich der Einsparpotentiale in der Ziegelindustrie jedoch **Abbildung 2.3**.

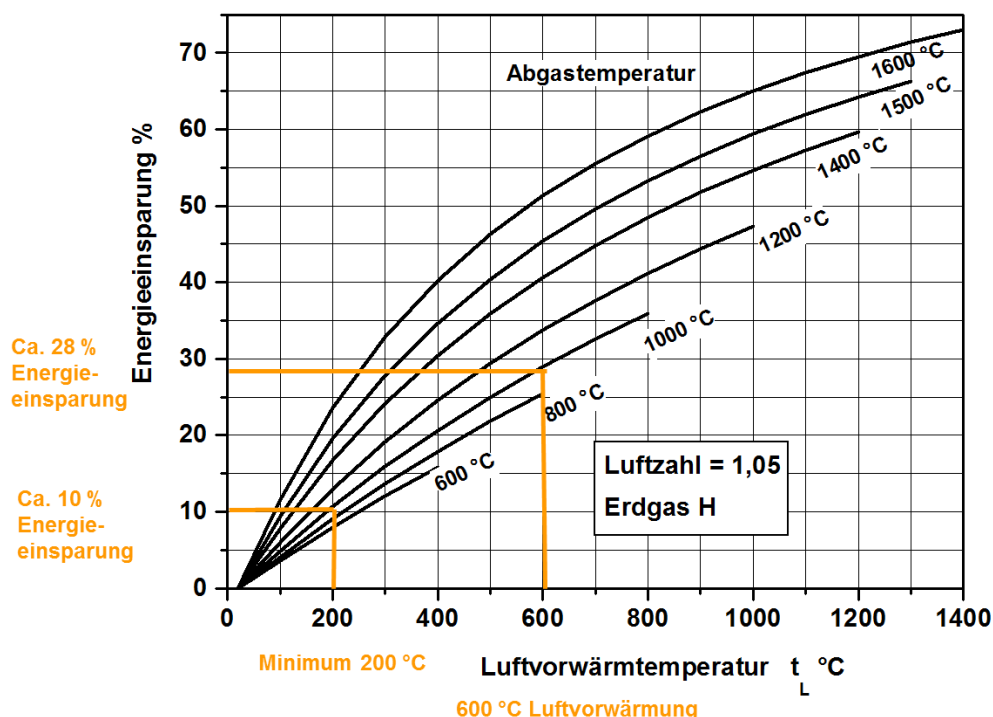


Abbildung 2.3: Energieeinsparung als Funktion der Luftvorwärmung [GWI]

Die **Abbildung 2.3** zeigt den sich aus einer Verbrennungsrechnung ergebende Einfluss der Verbrennungslufttemperatur auf die Energieeinsparung. Darin ist die mögliche prozentuale Energieeinsparung in Abhängigkeit der Luftvorwärmtemperatur für verschiedene Abgastempera-

turen ersichtlich. Für das Diagramm werden die Luftzahl und die Abgastemperatur als konstant betrachtet. Die Energieeinsparung resultiert aus der Steigerung der thermischen Energie der zugeführten Luft. Eine Energieeinsparung ist jedoch nur möglich, wenn die Wärmeenergie zur Vorwärmung der Luft über Wärmequellen, wie beispielsweise Regenerator- oder Rekupe-ratorsysteme bereitsteht. Im Tunnelofen können die Ziegelpakete als ein Regeneratorsystem angesehen werden. Den Ziegelpaketen wird in der Erwärmungszone thermische Energie zu-geführt. Diese thermische Energie wird in der Kühlzone auf die Kühlluft übertragen. Dadurch werden zum einen die Ziegelpakete abgekühlt, und zum anderen wird die aufgewärmte Kühlluft für die Verbrennung in der Erwärmungszone als vorgewärmte Luft nutzbar gemacht, siehe auch **Abbildung 2.4**.

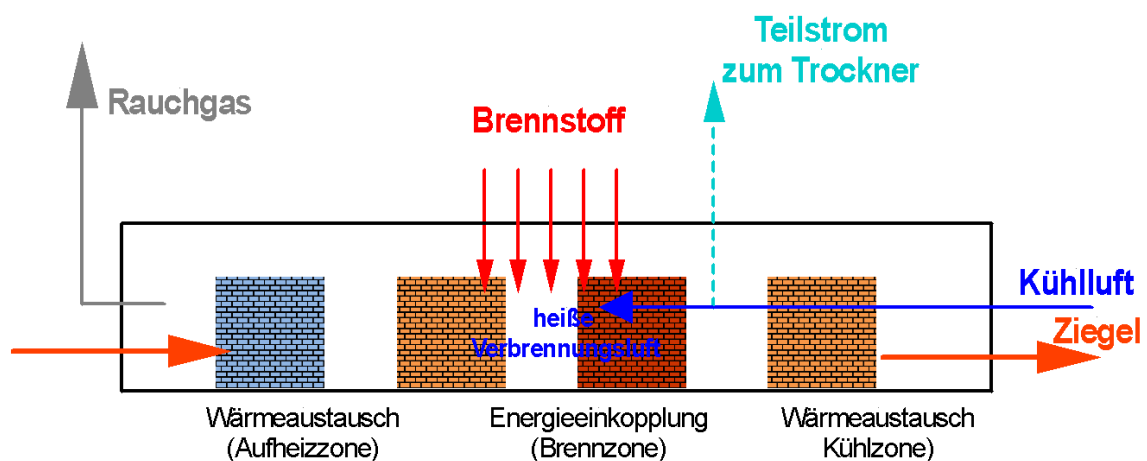


Abbildung 2.4: neues Verbrennungskonzept im Tunnelofen [IZF]

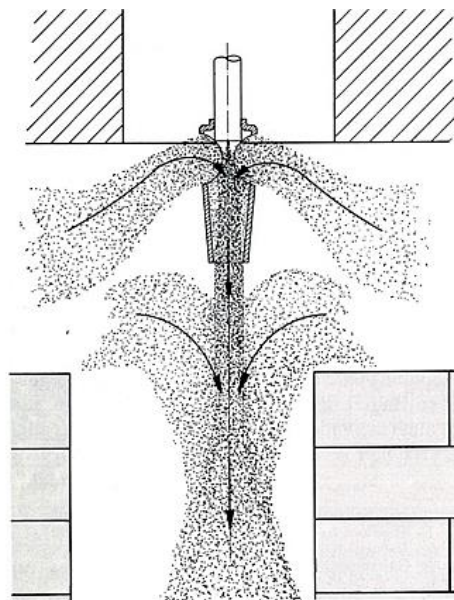


Abbildung 2.5: Brennerdüse zur Vermischung von Ofenatmosphäre [IZF]

Schafft man also die Möglichkeit, die im Ofen vorhandene heiße Luft aus der Kühlzone zu nutzen, indem man dem Ofen lediglich Festbrennstoff (Holz und Kohle) zuführt, so entfallen die zuvor beschriebenen Installationskosten. Energiekennzahlen von Öfen in Entwicklungs- und Schwellenländern belegen dies. An diesen Öfen wird, entsprechend dem klassischen Ringof-

enprinzip, lediglich Festbrennstoff in der Feuerzone zugegeben, ohne die Kühlluft zur Trocknung abzusaugen. Sicherheitsrelevante Aspekte sowie die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle.

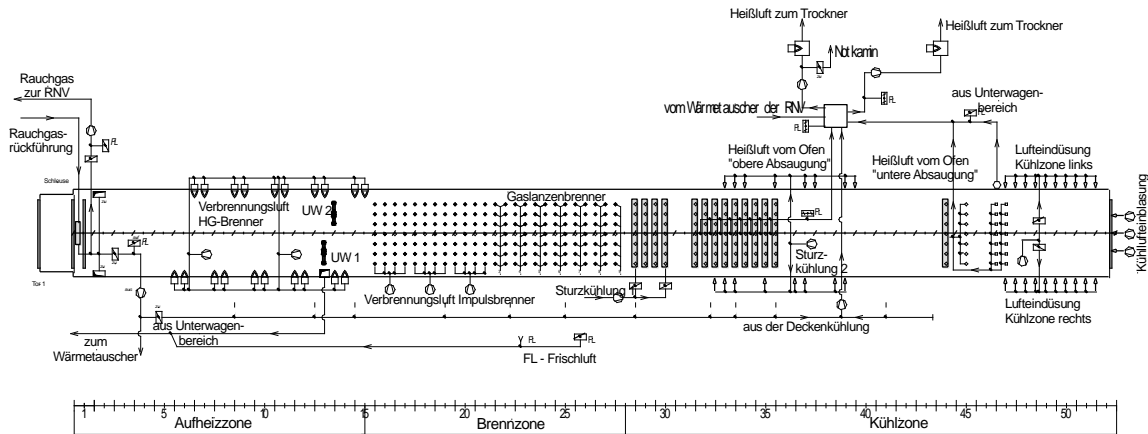
Die Einführung des in **Abbildung 2.5** gezeigten Brennerkonzeptes scheiterte seinerzeit an dem notwendigen, hohen Gasvordruck, mit dem es trotzdem nicht gelang, eine ausreichende Vergleichmäßigung von Temperaturen und Atmosphäre im Brennkammerkanalquerschnitt zu realisieren. Durch die heute im Vorfeld rechnerisch mögliche strömungstechnische Optimierung solcher „Düsen“ sollten diese Probleme gelöst werden können.

Bei diesen Versuchen in den 60er und 70er Jahren wurden die Düsengeometrien nach dem „Try and Error“ Verfahren erprobt, die gewählte Grundstruktur war aber am Ende nicht erfolgreich, weil sich die Injektorwirkung nicht wie geplant einstellte. Eine Berechnung der Düsen war zu dem damaligen Zeitpunkt nicht möglich, auch die Fertigung hochhitzebeständiger Düsen mit minimalem Kühlbedarf war noch nicht möglich. Weiter waren die damaligen Ofenquerschnitte durch große Ofenhöhen bei geringer Breite und geringen Brennschlitzten gekennzeichnet, eine für Gasbrenner geringer Impulsstärke problematische Geometrie. Neuere Anlagen, wie sie heute in den meisten Werken installiert sind, haben hier deutlich bessere Bedingungen, so dass sich diese Technik auch bei vorhandenen Anlagen umsetzen lassen wird.

### 3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse

#### 3.1 Funktionsweise und Aufbau des Ziegelofens des Ziegelwerks Bellenberg

Der in **Abbildung 3.1** schematisch dargestellte 115 m lange Tunnelofen, mit insgesamt 52 Tunnelofenwagen (TOW), wird im Gegenstromverfahren betrieben und ist beheizungstechnisch in drei Bereiche unterteilt:



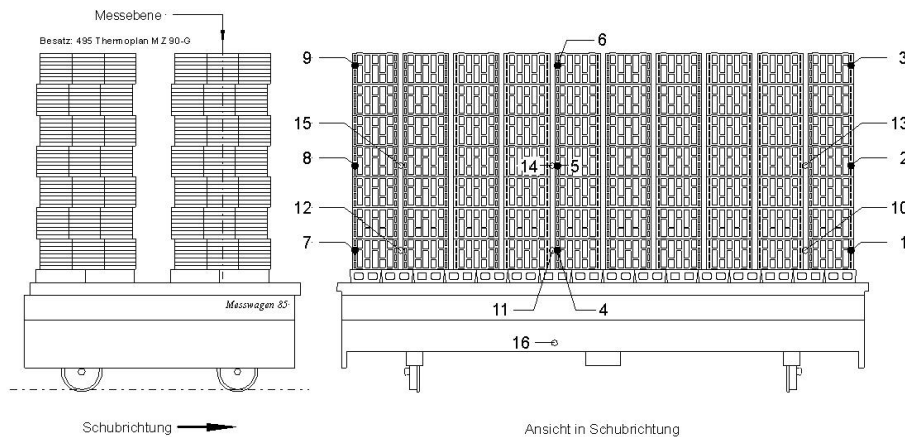
**Abbildung 3.1: Tunnelofen im Ziegelwerk Bellenberg (Januar 2018) [IZF]**

1. die Vorwärmzone, welche die Tunnelofenwagenpositionen 1 - 5 umfasst
2. die Aufheiz- und Brennzone, die sich wiederum in drei Bereiche aufgliedert:
  - a) TOW 6 - 15 seitliche Befuerung mit Hochgeschwindigkeitsbrennern,
  - b) TOW 16 - 21 Deckenbefuerung mit (Impuls-) Injektorbrennern,
  - c) TOW 22 - 28 Deckenbefuerung mit Gaslanzen
3. ab TOW 29, die Kühlzone, in der die heißen Ziegel wieder nahezu auf Raumtemperatur abgekühlt werden.

Die Befuerung des Tunnelofens findet mit Erdgas statt.

Der Tunnelofen funktioniert nach dem Prinzip eines Wärmetauschers im Gegenstromverfahren. An einem Ende des Tunnelofens werden die Tunnelofenwagen mit dem getrockneten Brenngut über eine Einfahrtsschleuse in den Tunnelofen eingeschoben. Der Weitertransport erfolgt taktweise in vorgegebenen Zeitabständen bis in die Ausfahrtsschleuse am anderen Ende des Tunnelofens.

Der Besatz steht, wie in **Abbildung 3.2** dargestellt, in 2 Stapeln auf den Ofenwagen, die durch den Ofen geschoben werden. Durch Besatzwechsel und das Brennen unterschiedlicher Formate kommt es zu Situationen mit Mischbesatz in unterschiedlicher Höhe und Durchströmungsverhalten. Die zwischen Wagenposition 6 und 28 installierten unterschiedlichen Brenner müssen jeweils bündig mit dem Schürloch abschließen und dürfen nicht in den Ofenraum überstehen.



**Abbildung 3.2: typischer Besatzaufbau mit Anordnung der Thermoelemente zur Messung der Brennkurven [IZF]**

#### Ofenwagen Abmessungen:

- Fläche Plateau: 4.050 mm x 2.200 mm
- Anzahl Stapel: 2
- Fläche Stapel: 800 mm x 3.800 mm
- Abstand Stapel (Brennschlitz): 300 mm
- mittlere Höhe Besatz und Stapel: 1.750 mm

Entgegen der Durchlaufrichtung der Ofenwagen wird am Ende des Tunnelofens Frischluft als Kühlluft zugegeben. Diese wird in Richtung Brennzone transportiert und nimmt dabei ein Großteil des Wärmeinhaltes des Tunnelofenbesatzes und des -wagens auf. Durch gezielte Anordnung von Lufterindüsungen im letzten Teil der Kühlzone kann der Wärmeübergang verbessert und eine weitere Abkühlung des Besatzes erreicht werden.

Die aufgeheizte Kühlluft wird durch in der Ofendecke angeordnete Absaugöffnungen als Heißluft für die weitere Verwendung z. B. in einem Trockner abgezogen. Die Absaugöffnungen befinden sich entsprechend den vorgesehenen Abkühlkurven an definierten Positionen der Kühlzone und werden als obere Direktabsaugung und als untere Direktabsaugung bezeichnet. Je nach Einstellung der Absaugungen kann der Verlauf der Kühlkurve beeinflusst werden. Zudem gibt es zwischen der Hauptbrennzone und der oberen Direktabsaugung eine sogenannte Sturzkühlung, in der im Bedarfsfall Umgebungsluft zur schnellen Kühlung eingeblasen werden kann.

Im weiteren Verlauf des Gasstromes in Richtung Ofeneinfahrt wird das Brenngut durch die entgegengesetzt strömenden heißen Abgase aufgeheizt. Durch gezielte Anwendung von Hochgeschwindigkeitsbrennern in der Aufheizzone, wird eine Temperaturvergleichmäßigung im Besatzquerschnitt und/oder ein optimiertes Ausbrennverhalten brennbarer Zuschlagstoffe oder im Brenngut bereits enthaltenen organischen Materials erreicht.

Nach der Einfahrtsschleuse zieht ein Abgasventilator den vom Brenngutbesatz abgekühlten Gasstrom aus dem Ofen ab und führt den Abgasstrom einer Abgasreinigungsanlage zu. Sind die Abgastemperaturen aufgrund von brennbaren Zuschlägen im Brenngut sehr hoch, wird ein im Abgasstrom befindlicher Wärmetauscher das Abgas abkühlen und die Wärme dem Trockner zuführen. Das abgekühlte und gereinigte Abgas wird zu einem Kamin weitergefördert, wo es in die Atmosphäre entweicht.



### **3.1.1 Einfahrtschleuse**

Die Einfahrt eines TOW in den Tunnelofen erfolgt über eine Schleuse. Die Tunnelofenwagen werden durch den Tunnelofen zyklisch im Brenngassenabstand durch eine am Tunnelofeneinfahrtstor angeordnete Einschubmaschine weitertransportiert.

### **3.1.2 Aufheizzone**

Die Gruppen dieser Zone sind mit Hochgeschwindigkeitsbrennern ausgestattet, die über eine eigene Zündeinrichtung und Zündüberwachung verfügen. Die Hochgeschwindigkeitsbrenner sorgen für eine gute Temperaturvergleichmäßigung im Aufheizbereich mit einer Maximaltemperatur von 750 °C.

### **3.1.3 Umwälzer der Aufheizzone**

Die Umwälzeinrichtungen befinden sich in Durchlaufrichtung des Ofenwagens im Bereich der Hochgeschwindigkeitsbrenner vor der ersten Impulsbrennergruppe. Die Umwälzer sollen die durch ungleichmäßigen Ausbrand organischer Stoffe auffächernde Temperaturkurven an den unterschiedlichen Besatzpositionen vergleichmäßigen.

### **3.1.4 Brennzone**

Die Brennzone ist entsprechend dem Wärmebedarf und je nach Funktion in mehrere Regelgruppen mit zum Teil unterschiedlicher Brennleistung aufgeteilt.

In jeder Gruppe wird die Temperatur über ein Thermoelement gemessen und geregelt. Bei Temperaturabweichungen unter den Sollwert werden das zugehörige Gasmagnetventil und die Luftklappe durch den Regler geöffnet. Die Brennstoffzufuhr erfolgt damit impulsweise und wird über den Prozessrechner der Ofensteuerung vollautomatisch ausgeführt. Darüber hinaus können die Impulsdauer und Impulspausen in Abhängigkeit von der tatsächlichen Temperaturabweichung variabel geregelt werden.

Die Leistungen eines Brenners in der Brennzone des betrachteten Tunnelofens betragen ca. 40 bis 60 kW. Im Normalbetrieb arbeitet der Brenner in einem mittleren Leistungsbereich zwischen 30 bis 50 kW. Die Brenner arbeiten mit einem konstanten Impuls. Die Pausenzeit zwischen den Impulsen variiert entsprechend der Leistungsanforderung des Brenners. Um die Besatzhöhe zu überwinden und die unteren Bereiche zu erreichen, ist eine schlanke Flamme erforderlich.

In dem betrachteten Temperaturbereich von 700 °C bis 900 °C sind je nach Besatz ca. 10 bis 18 % Sauerstoff im Brennraum vorhanden. Die Menge der Heißluft, die durch die Brennzone transportiert wird, ist Schwankungen auf Grund von Änderungen des Besatzes, Format und Massen, unterworfen.

Die Brenner befinden sich in den Schürlochreihen zwischen den jeweiligen Besatzstapeln. Es sind jeweils die Brenner von 2 Schürlochreihen zu einer Brennergruppe zusammengefasst.

Abmessungen Reingasbrenner-Gruppe:

- Abstand der Brennerreihen 1.100 mm (Mitte Schürloch zu Mitte Schürloch)
- 7 Schürlöcher pro Reihe, 2 Reihen pro Brennergruppe,
- Abstand Schürloch in Reihe 650 mm
- Länge Reihe von Schürloch links zu Schürloch rechts ist 3.800 mm

Abmessungen Schürloch:

- Schürloch Innenmaß: 170 mm
- Abdeckung Außenmaß: 200 mm
- Durchmesser Reingasbrenner am Flansch: 30 mm
- Durchmesser Einstellflansch max. 60 mm
- Schürschlitz Tiefe 330 mm
- Decke in allen Bereichen gleich hoch. Deckenspalt ca. 40 mm

### **3.1.5 Hauptbrennzone**

Die Gruppen dieser Zone sind mit Injektor-Brennern ausgerüstet, die durch die Ofentemperatur gezündet werden. Die minimale Ofentemperatur wird überwacht, eine Zündüberwachung ist hier nicht erforderlich.

Durch unterschiedliche Anordnung der Brenner und Einsatz unterschiedlicher Düsengeometrien sowie gezielter Höhenverstellung dieser Brenner soll eine optimale Temperaturvergleichmäßigkeit im Besatzquerschnitt erreicht werden. Die Brennerluft-Ventilatoren versorgen die Brenner mit der nötigen Verbrennungsluftmenge.

Die Hauptbrennzone ist im Hochtemperaturbereich mit Gaslanzen ausgestattet.

### **3.1.6 Sturzkühlung**

Im Anschluss an die Hauptbrennzone ist über 4 Schürlochreihen eine sogenannte Sturzkühlung installiert. Hierdurch kann das Brenngut im Bedarfsfall schnell auf eine oberhalb einer rohstoffabhängigen Temperatur von ca. 700 °C abgekühlt werden.

### **3.1.7 Heißluftabsaugung**

Die Absaugungen sind für die Einstellung einer gewünschten Kühlkurve erforderlich. Die Volumenströme beider Absaugungen werden zusammengeführt und mit einer Rohrleitung zum Trockner weitergeführt. Durch eine geregelte Frischluftklappe kann die Heißlufttemperatur für einen Trocknungsprozess eingestellt werden.

Die obere Direktabsaugung<sup>1</sup> befindet sich im Bereich nach der Brennzone in Durchlaufrichtung des Ofenwagens. In Abhängigkeit der einzustellenden Kühlkurve wird aufgeheizte Kühlluft aus dem Brennkanal abgesaugt.

Die Heißluft-Direktabsaugung ist temperaturgeregelt. Mit einer Frischluftklappe wird die abgesaugte Heißluft auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt und konstant gehalten.

Die untere Direktabsaugung befindet sich im Bereich vor der Tunnelofenausfahrt. Deren Einstellung richtet sich nach der gewünschten Ausfahrttemperatur des Brenngutes.

### **3.1.8 Kühlzone**

Am Ende der Kühlzone befinden in jedem Schürloch wechselseitig arbeitende Lufterindüsen. Diese sorgen für eine Erhöhung des Wärmeüberganges bei gleichzeitiger Abkühlung des Wagenplateaus.

---

<sup>1</sup> Obere Direktabsaugung bei hoher Temperatur, untere Direktabsaugung bei niedrigerer Temperatur (siehe auch Abb. 3.1)

Die zur Brenngutkühlung notwendige Zuluft wird über drei im Ausfahrtor installierte Ventilatoren temperaturgeregelt eingeblasen. Diese „schieben“ Frischluft entgegen der Besatztuchrichtung in den Brennkanal und kühlen den Besatz, daher findet man in der Literatur häufig den Begriff „Schiebeluft“.

Die Förderleistung dieser Zuluftventilatoren ist dem Abgasstrom des Abgasventilators und der oberen und unteren Direktabsaugung angepasst. Die Regelung erfolgt über die Messung der Druckveränderung im Brennkanal. Der Sollwert der Druckregelung wird über eine Wertführung entsprechend der Nachfeuertemperatur verändert.

### **3.1.9 Unterwagenkühlung**

Durch den Wärmetransport und durch mögliche Undichtigkeiten im Bereich der Sandrinnendichtung und zwischen den Wagenstößen ist eine Kühlung der Unterseiten des Wagenchassis und der Wagenräder erforderlich. Hierfür sind am Ofenende in einem Begehkanal je nach Ofenbreite ein oder zwei Ventilatoren installiert, die Kühlluft entgegengesetzt der Fahrtrichtung der Ofenwagen fördern. Die aufgeheizte Unterwagenluft wird anschließend wieder an zwei Stellen abgesaugt und dem Trocknerverbund zugeführt. Um den Differenzdruck zwischen Brennkanal und Unterwagenbereich konstant zu halten und um zu vermeiden, dass Falschluff in den Ofenraum dringt, ist die Absaugung der Unterwagenkühlung über den Differenzdruck zwischen Unterwagen und Ofenraum geregelt.

### **3.1.10 Abgasanlage**

Der frequenzgeregelt Abgasventilator zieht die Abgase über seitliche Öffnungen vom Ofen ab. Die Abgasmenge ist hauptsächlich abhängig von der Ofenleistung und der Brenntemperatur. Die Abgasmenge kann dabei wahlweise über die Abgastemperatur, die Vorfeuertemperatur, den Ofendruck oder eine vorgegebene Drehzahl geregelt werden.

Der Abgasventilator ist einer der wichtigsten Ventilatoren am Tunnelofen. Über seine eingestellte Luftleistung werden bestimmt:

- die Luftmenge, die durch die Kühlzone gezogen wird und somit die Kühlgeschwindigkeit des Brenngutes,
- zusammen mit dem Verbrennungsluft-Ventilator die Versorgung der Brennzone mit Luft (Sauerstoff),
- die Aufheizung des Brenngutes durch den Zug der heißen Abgase im Vorfeuer,
- die Druckverhältnisse im Ofenraum und damit die Gewährleistung, dass alle Verbrennungsprodukte ausschließlich über den Kamin ins Freie gelangen.

Durch den hohen Gehalt an brennbaren Bestandteilen im Brenngut ist eine thermische Nachverbrennung erforderlich. Das mit Schwelgasen belastete Rauchgas wird nachverbrannt. Zeitweise ist zusätzlicher Brennstoff für die Aufrechterhaltung der Verbrennungstemperatur von ca. 800 °C in der Reaktionskammer erforderlich. Mit einem nachgeschalteten Wärmetauscher wird die dadurch freiwerdende Wärme dem Wärmeverbund der Gesamtanlage zur Verfügung gestellt.

### 3.2 Neues Brennerkonzept

Das neue, im Rahmen dieses Projektes entwickelte Brennerkonzept beruht auf einem takten- den Betrieb. Die Oxidation des Brennstoffs wird nicht durch eine eigens dafür vorgesehene Luftzufuhr erreicht, sondern durch eine Ansaugung des bereits im Brennraum verfügbaren Oxidators in Form von Heißluft aus der Kühlzone in die Reaktionszone. Der dafür notwendige hohe Gasimpuls wird durch eine Hochgeschwindigkeitsgasdüse erzeugt, welche taktend Brenngas in die heiße Ofenatmosphäre führt. Ergänzt wird die Gasdüse durch ein sog. Mischrohr, vgl. **Abbildung 3.3**.

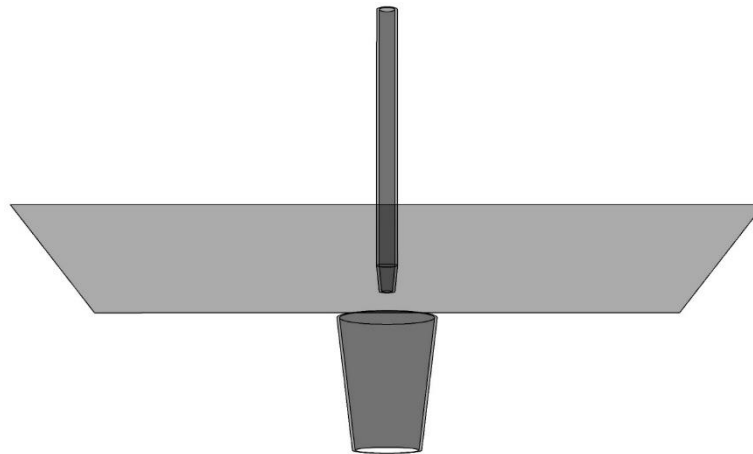


Abbildung 3.3: Injektordüse und Mischrohr [GWI]

Ziel des Prinzips ist eine zweistufige Oxidation des Brennstoffes. Die erste Stufe findet zwischen Gasdüse und Mischrohr statt, die zweite Stufe am Austritt aus dem Mischrohr. Es soll durch den hohen Gasimpuls eine Teiloxidation des Brennstoffes in der ersten Stufe erreicht werden. Durch die Mischung von Oxidator und Brennstoff im Mischrohr erhöht sich der Massenstrom deutlich gegenüber der reinen Brennstoffströmung. Am Austritt aus dem Mischrohr soll das Gas-Oxidatorgemisch aufgrund des hohen Impulses dann die notwendige Verbrennungsluft ansaugen und vollständig oxidiert werden.

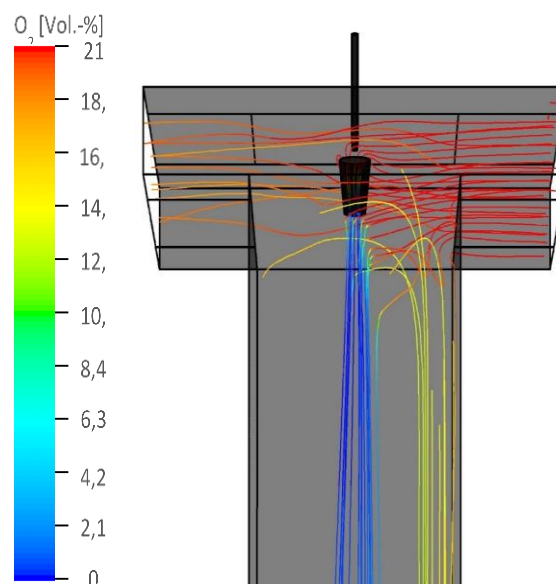


Abbildung 3.4: Stromlinien der Oxidatorströmung [GWI]

Die erste numerische Veranschaulichung des Brennerprinzips erfolgt mittels einer einfachen Kombination aus einer Gaslanze mit einer Injektordüse am Austritt sowie einem freistehenden Mischrohr. Das Simulationsgebiet wird im ersten Schritt dadurch charakterisiert, dass ein einzelner Brenner durch einen Spalt mit vorgewärmter Luft angeströmt wird und in einen rechteckigen Brennraum feuert. **Abbildung 3.4** stellt die Stromlinien des Oxidators im Feuerungsbetrieb anhand des Volumenbruchs von Sauerstoff dar und zeigt das Ansaugverhalten des Brenngases gegenüber der heißen Luft.

Erste Simulationen zeigen, dass im taktenden Feuerungsprozess mit der vorliegenden Konfiguration durch eine zweistufige Injektionswirkung des Brenners genügend Luft für eine volle Ausprägung der Flamme angesaugt werden kann. Der Stromliniendarstellung ist zudem zu entnehmen, dass im Bereich der Injektordüse durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit des Brenngases ein Teil der Luft angesogen wird und am Austritt des Mischrohrs durch den hohen Impuls des Brennstoff-Oxidatorgemisches ein weiterer Anteil des Oxidators in den Brennraum gelangt.

### **3.3 Brennerdesign mittels CFD-Simulation**

Die Entwicklung eines neuartigen Reingas-Injektorbrenners ist komplex und birgt umfangreiche Herausforderungen an die Konstruktion und Strömungsberechnung. CFD-Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics) der Strömungs- und Verbrennungsprozesse bieten hier ein sinnvolles Tool zur Unterstützung der Brennerauslegung und -entwicklung, da Parameterstudien sowie eine strömungstechnische Optimierung verschiedener Geometrieansätze noch vor der eigentlichen Fertigung des Bauteils durchgeführt werden können.

Im Zuge des Vorhabens wurden umfangreiche Simulationsarbeiten mittels stationären und instationären RANS-Simulationen (RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes) durchgeführt. Numerische Betrachtungen kamen dabei in verschiedenen Schritten des Projektes vor: Darstellung des Brennerprinzips, simulationsgestützte Entwicklung des Brenners, Betrachtung des Brenners in einem Brennraum, welcher an die reale Einbausituation angelehnt ist sowie der Vergleich zwischen der alten und der neuen Geometrie. Das Ziel der vorliegenden Simulationen war die Verbrennungsvorgänge der einzelnen Brenneransätze in einem Simulationsgebiet zu vergleichen, welche durch Atmosphäre, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeiten an einen Ziegelofen angelehnt ist.

#### **3.3.1 Parameter und Randbedingungen**

Die Simulationen wurden in einem Brennraum durchgeführt, welcher hinsichtlich Feuerungsraum, Strömungszuständen sowie thermischer und stofflicher Eigenschaften an einen Ziegelofen angelehnt sind. Aufgrund der Feinheit und Komplexität der einzelnen Brenner, wird im Zuge des Vorhabens jeweils nur ein einzelner Brenner betrachtet. Um eine ganze Brennerreihe oder gar den ganzen Ofen innerhalb einer Simulation abzubilden, wären erhebliche Kompromisse der Gitterfeinheit notwendig, welche das Strömungsgebiet rund um den Brenner nicht mehr fein genug auflösen lassen. Der Brennraum wurde daher geometrisch an ein Segment zwischen zwei Ziegelstapeln angelehnt, in welches der Brenner von der Decke herab feuert

und durch eine seitlich aufgeprägte Luft-Abgasströmung oxidiert wird, vgl. **Abbildung 3.5** und **Tabelle 3.1**.

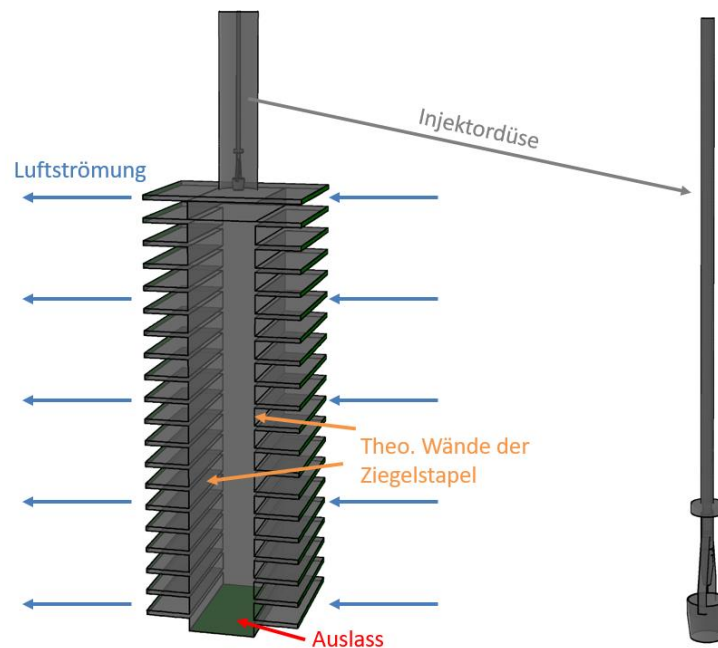


Abbildung 3.5: Aufbau Brennraum/Injektorbrenner im CFD-Modell [GWI]

Tabelle 3.1: Maße des Brennraumes

Maße Brennraum		Maße Schürloch	
<b>Breite</b>	300 mm	<b>Durchmesser</b>	780 mm
<b>Höhe</b>	615 mm	<b>Höhe</b>	170 mm
<b>Tiefe</b>	2.000 mm		-

Das Brenngas wird druckkontrolliert und mit Umgebungstemperatur in den Brennraum gedüst. Als Eingangsdruck werden die Druckniveaus 0,9 bar (industrieller Standard) und 1,4 bar (Leitungsdruck am Ziegelwerk Bellenberg) vorgesehen. Als Brenngas wird ein Referenz-Erdgas H genutzt, vgl. **Tabelle 3.2**.

Tabelle 3.2: Verwendete Brenngaszusammensetzung

Komponente	Einheit	Konzentration
CH <sub>4</sub>	[Vol.-%]	88,71
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	[Vol.-%]	6,93
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	[Vol.-%]	1,25
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	[Vol.-%]	0,28
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> +C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	[Vol.-%]	0,07
CO <sub>2</sub>	[Vol.-%]	1,94
N <sub>2</sub>	[Vol.-%]	0,82

Als Oxidator wird ein Abgas-Luftgemisch genutzt, wie es typischerweise in der Ofenatmosphäre im Zuge der Messkampagnen gemessen wurde, vgl. **Tabelle 3.3**. Dieses wird mit

einer Temperatur von 850 °C sowie einer Geschwindigkeit von 5 m/s in den Brennraum geströmt. Die Oxidatortemperatur wird ebenfalls an die Messwerte angelehnt. Die Oxidatoreintrittsgeschwindigkeit stellt einen Erfahrungswert der Forschungspartner dar.

Tabelle 3.3: Oxidatorzusammensetzung

Komponente	Einheit	Konzentration
H <sub>2</sub> O	[Vol.-%]	3,35
CO <sub>2</sub>	[Vol.-%]	1,79
O <sub>2</sub>	[Vol.-%]	17,20
N <sub>2</sub>	[Vol.-%]	77,65

### 3.3.2 Simulation des Ursprungszustands

Zur Bewertung der im Zuge dieses Projektes entwickelten Brenner gilt es zunächst den Ist-Zustand als Referenz abzubilden. Die ursprünglich eingebaute Lösung besteht aus einer einfachen, keramischen Gaslanze. Die Keramikgaslanze besitzt eine Länge von 780 mm und einen Innendurchmesser von 8 mm. An der Spitze befindet sich ein Düsenkopf, welcher den Innendurchmesser der Gaslanze auf 4 mm verjüngt, siehe **Abbildung 3.6**. Die Gaslanze schließt bündig mit der Decke ab, vgl. **Abbildung 3.7**. Die Simulation des Ist-Zustandes wurde mit den in Abschnitt **3.3.1** genannten Randbedingungen durchgeführt.

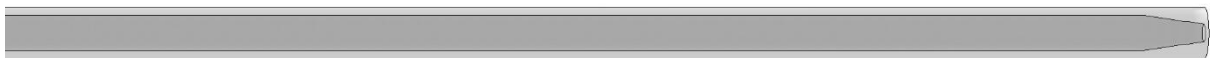


Abbildung 3.6: Vorderer Teil Keramiklanze im Ursprungszustand [GWI]

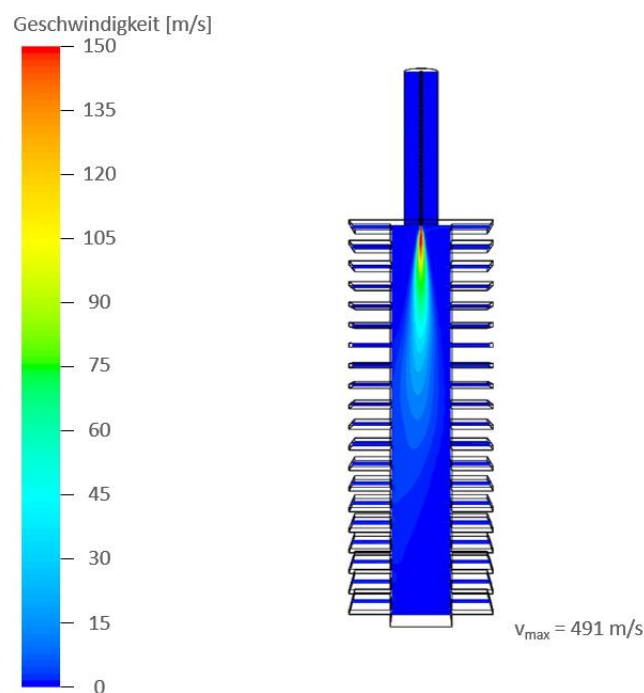
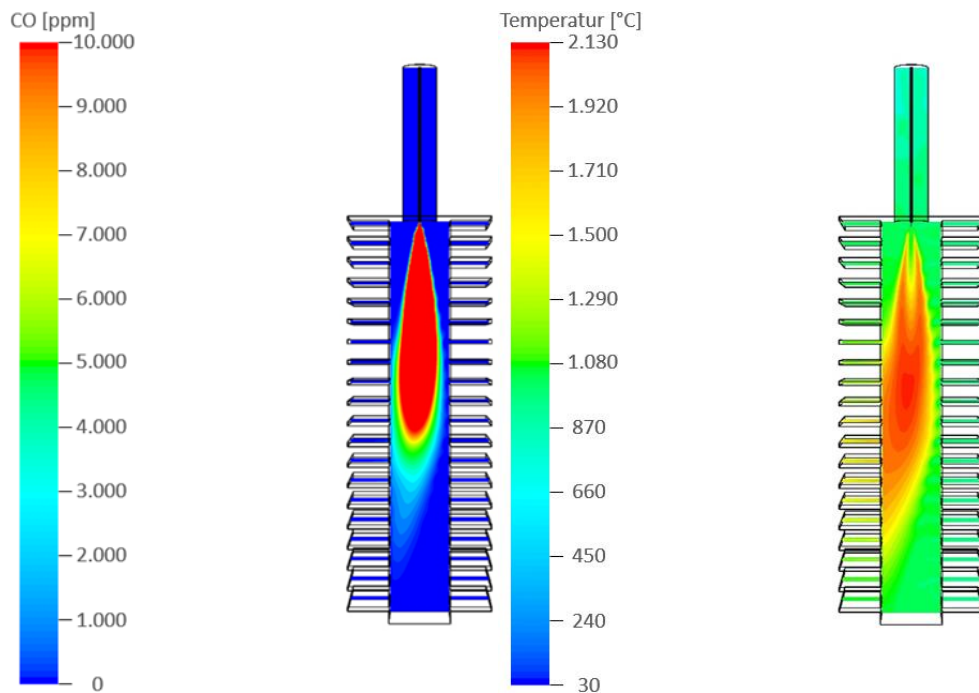


Abbildung 3.7: Strömungsgeschwindigkeiten im Ist-Zustand bei 1,4 bar Gasdruck [GWI]

Die Keramiklanze düst Brennstoff mit einem Gasdruck von 1,4 bar in den Brennraum ein. Es wird dadurch für den stationären Betrieb des Keramikbrenners eine Brennerleistung von etwa 242 kW erreicht. Der Brennstoff tritt dabei mit einer hohen Geschwindigkeit von bis zu 491 m/s in den Brennraum, vgl. **Abbildung 3.7**.

In **Abbildung 3.8** werden die Flammenkontur anhand des trockenen CO-Volumenbruchs von 0 - 10.000 ppm sowie die Temperatur auf einer Skala von 30 - 2.130 °C angegeben. Die erzeugte Flamme und das dadurch erzeugte heiße Abgas deckt einen Großteil des Ziegelstapels ab.



**Abbildung 3.8:** Flammenkontur (links) und Temperaturverteilung (rechts) im Ist-Zustand bei 1,4 bar Gasdruck [GWI]

### 3.4 Numerische Berechnung der Brennergeometrien

Die Simulationsergebnisse haben den Entwicklungsprozess des neuen Brenners aktiv unterstützt, da eine Vielzahl verschiedener Geometrieansätze numerische betrachtet wurde. Dadurch konnten beispielsweise verschiedene Geometriesansätze für die Düse und das Mischrohr vorzeitig ausgeschlossen oder näher untersucht werden. Anhand **Abbildung 3.9** wird beispielweise der Mischungsbruch des Brennstoffs angezeigt. Es ist erkenntlich, dass der Brennstoff aus seitlichen Öffnungen zwischen der Düse und dem Mischrohr austritt. Dadurch wird ein ausreichender Injektionseffekt verhindert und eine erhöhte thermische Belastung des Bauteils erzeugt.



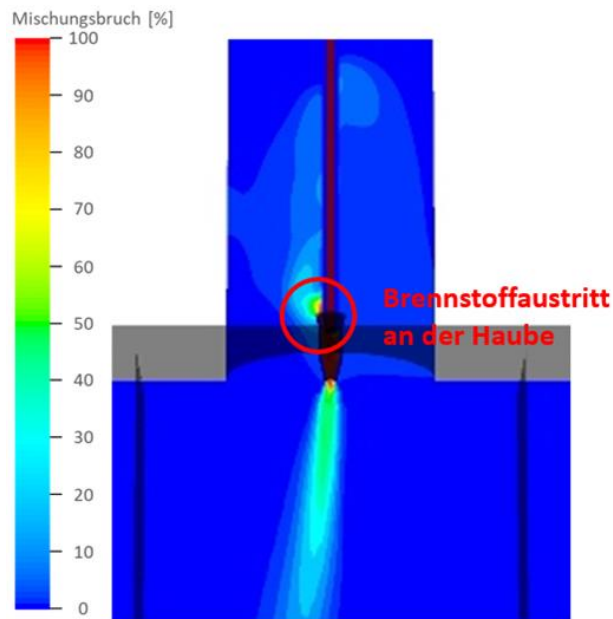


Abbildung 3.9: Mischungsbruch des Brennstoffs [GWI]

Auf Basis der Konstruktions- und Simulationsergebnisse der Forschungspartner wurde ein Brennerprototyp entwickelt, welcher in zwei Größen untersucht wird. Die Unterschiede belaufen sich dabei auf die Maße des Düsenquerschnitts sowie des Mischrohrs. Der Prototyp ist aus **Abbildung 3.10** ersichtlich.

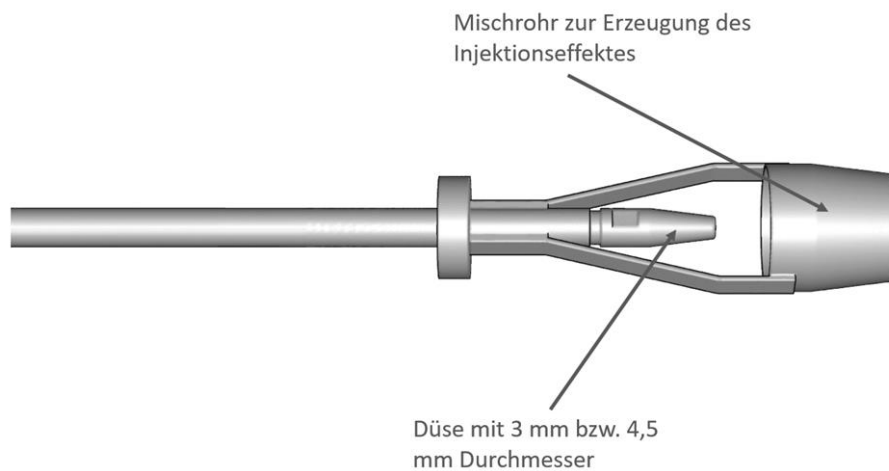


Abbildung 3.10: Brennerprototyp [LINGL]

Mittels des Prototypbrenners wird ein zweistufiger Injektionseffekt erzeugt. Dies wird in **Abbildung 3.11** anhand der Oxidatorstromlinien des am Deckenspalt einströmenden Luft-Abgasgemisches in Form des Sauerstoffanteils dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der einströmende Oxidator durch den Brenner deutlich beeinflusst wird. Durch den hohen Einströimpuls wird ein Teil des Oxidatorstroms in das Mischrohr gesogen. Der dadurch entstehende Strom bestehend aus Brennstoff und Oxidator beeinflusst die Strömung des Oxidators ebenfalls deutlich, so dass ein Großteil des Oxidators vom Deckenspalt in die Reaktionszone des Brenners gefördert wird.

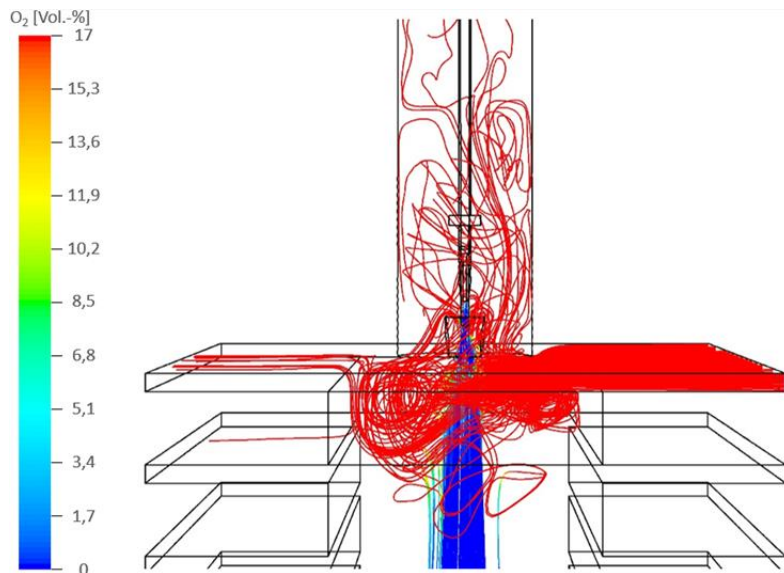


Abbildung 3.11: Injektorwirkung am Mischrohr anhand der Oxidatorstromlinien am Deckenspalt (Skala in Vol.-% O<sub>2</sub>) [GWl]

### 3.4.1 Simulationsergebnisse für einen Druck von 1,4 bar

Um den Einbaufall am Ziegelwerk Bellenberg widerzugeben, wurden Simulationen des Brenners mit einem Gaseingangsdruck von 1,4 bar durchgeführt. Durch die druckgesteuerte Eindüsung des Brennstoffes wird eine stationäre Brennerleistung von 112 kW bei 3 mm Düsendurchmesser sowie 261 kW bei 4,5 mm Düsendurchmesser erreicht. Diese Brennerleistung entspräche einer stetigen Eindüsung von Brennstoff. Im realen Einbaufall wird der Brenner jedoch taktend mit einer Taktzeit von bis zu 1 s betrieben. Darauf folgt ein Pausentakt von mehreren Sekunden, wodurch die durchschnittliche Brennerleistung deutlich sinkt.

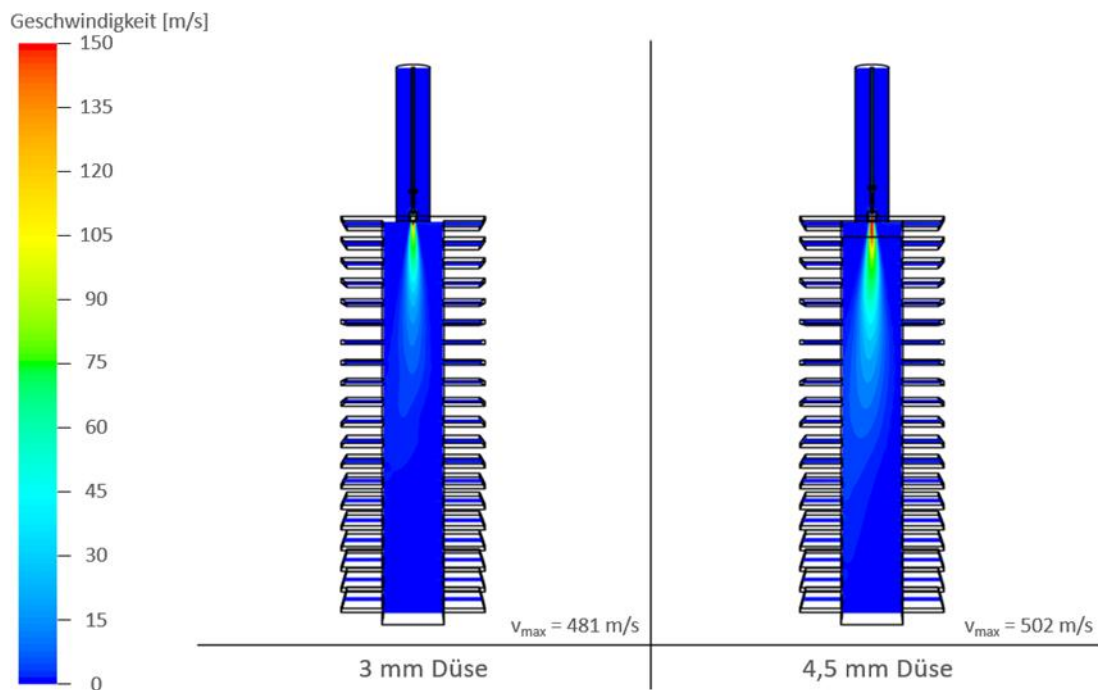
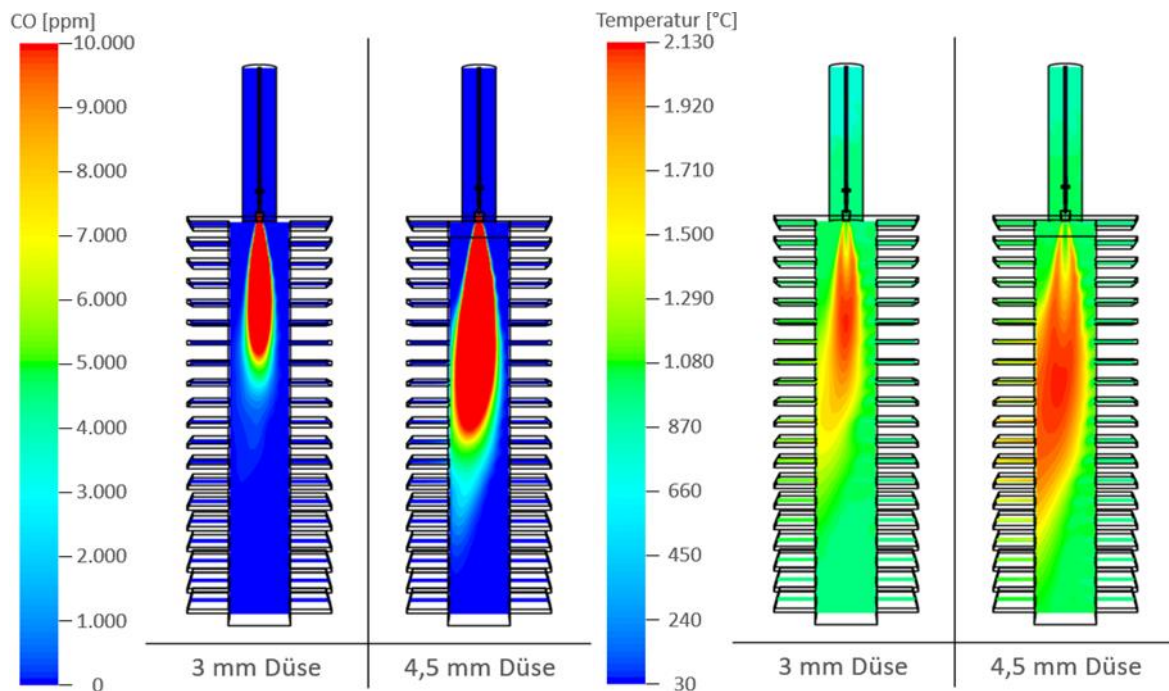


Abbildung 3.12: Strömungsgeschwindigkeiten der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 1,4 bar Gasdruck [GWl]

Durch die schmalen Düsenquerschnitte und den hohen Eingangsdruck entstehen kurz nach dem Düsenaustritt hohe maximale Geschwindigkeiten von ca. 500 m/s, vgl. **Abbildung 3.12**. Die Abbildung zeigt die Kontur der Geschwindigkeitsverteilung von 0 - 150 m/s in einer vertikalen Ebene entlang der Strömungsrichtung. Es ist zu erkennen, dass die vom Brenner ausgehende Strömung ihren Impuls über einen großen Teil der Brennraumhöhe behält und wenig vom seitlich anströmenden Oxidator beeinflusst wird. Das Ziel der möglichst hohen Durchdringung des Brennraumes und der möglichst hohen Strömungsumwälzung wird dadurch begünstigt.

Der hohe Impuls der Gaslanze spiegelt sich auch in der Flammenkontur sowie der Temperaturverteilung im oben genannten Querschnitt wider, vgl. **Abbildung 3.13**. Die Abbildung zeigt die Flammenkontur anhand der CO-Verteilung in einem Intervall von 0 - 10.000 ppm (trocken) sowie die Temperaturverteilung in einem Intervall von 30 - 2.130 °C.

In den Darstellungen ist anhand der CO-Kontur ersichtlich, dass die Flamme - speziell mit dem Düsenquerschnitt von 4,5 mm - weit in den Brennraum reicht. Die Temperaturverteilung zeigt zudem, dass ein großer Teil der linken Austrittsfläche mit heißem Abgas durchströmt wird. Für den Betrieb im Ziegelofen bedeutet dies, dass Ziegel fast auf der ganzen Höhe von ca. 2 m durch die neuartigen Brenner beheizt werden können.



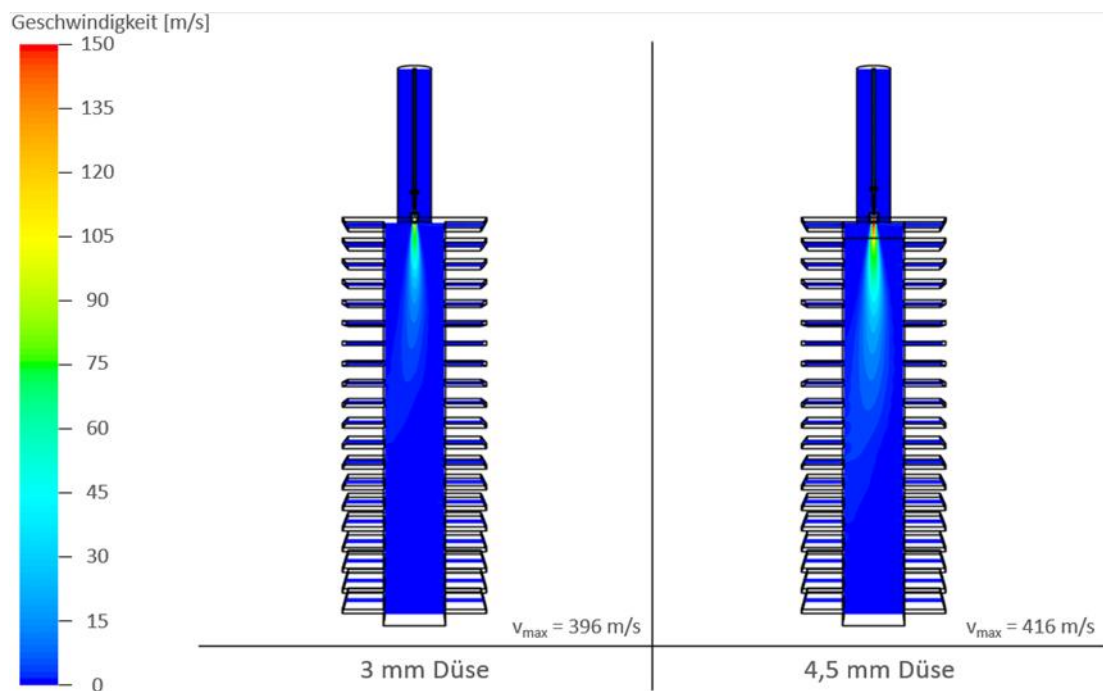
**Abbildung 3.13:** Flammenkontur (links) und Temperaturverteilung (rechts) der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 1,4 bar Gasdruck [GWI]

### 3.4.2 Simulationsergebnisse für einen Druck von 0,9 bar

Analog zu den Simulationen mit einem Gasdruck von 1,4 bar wurden numerische Berechnungen mit einem Gasdruck von 0,9 bar durchgeführt. Da nicht bei allen industriellen Abnehmern ein Gasdruck von 1,4 bar verfügbar ist, wird die Funktionalität des Prinzips bei einem verringerten Gasdruck überprüft. Der Gasdruck von 0,9 bar stellt dabei nach Erfahrung der Forschungspartner einen industriellen Standard dar.

Durch den verringerten Gasdruck sinkt die stationäre Brennerleistung. Für die Düsendurchmesser von 3 mm bzw. 4,5 mm wird eine Leistung von 87 kW bzw. 206 kW erreicht. Dies entspricht einer um etwa 21 % verringerten stationären Brennerleistung gegenüber dem Gasdruck von 1,4 bar. Analog zu den sinkenden Leistungswerten, fallen auch die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten ab, vgl. **Abbildung 3.14**. Für beide Düsenquerschnitte sinken die Maximalgeschwindigkeiten auf ein Niveau von etwa 400 m/s. Dies entspricht einer verringerten Geschwindigkeit von etwa 18 % gegenüber den Werten bei höherem Gasdruck. Zudem ist am Geschwindigkeitsverlauf ersichtlich, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Brennraum schneller zurückgehen.

In **Abbildung 3.15** werden die Flammenkonturen und Temperaturverteilung anhand des trockenen CO-Volumenanteils auf einer Skala von 0 - 10.000 ppm sowie die Temperaturverteilung auf einer Skala von 30 - 2.130 °C dargestellt. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass analog zum Gasdruck bei 1,4 bar eine hohe Durchdringung des Brennraumes durch die Flamme erreicht wird, speziell bei der 4,5 mm Düse. Ziegel können dadurch über fast die komplette Stapelhöhe beheizt werden. Das neue Brennerkonzept zeigt sich daher wenig anfällig für einen verringerten Gasdruck.



**Abbildung 3.14:** Strömungsgeschwindigkeiten der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 0,9 bar Gasdruck [GWI]

Aus den CFD-Simulationen kann daher entnommen werden, dass das Injektionsprinzip grundsätzlich für verschiedene Druckniveaus und Düsenquerschnitte funktioniert. Es kann sowohl eine Teiloxidation im Mischrohr sowie eine vollständige Brennstoffoxidation im Brennraum erreicht werden. Speziell für den Düsenquerschnitt von 4,5 mm wird aus Sicht der numerischen Simulationen eine hohe Eindringtiefe der Flamme und des heißen Abgases in den Brennraum sowohl bei einem Gasdruck von 0,9 bar sowie 1,4 bar erreicht.

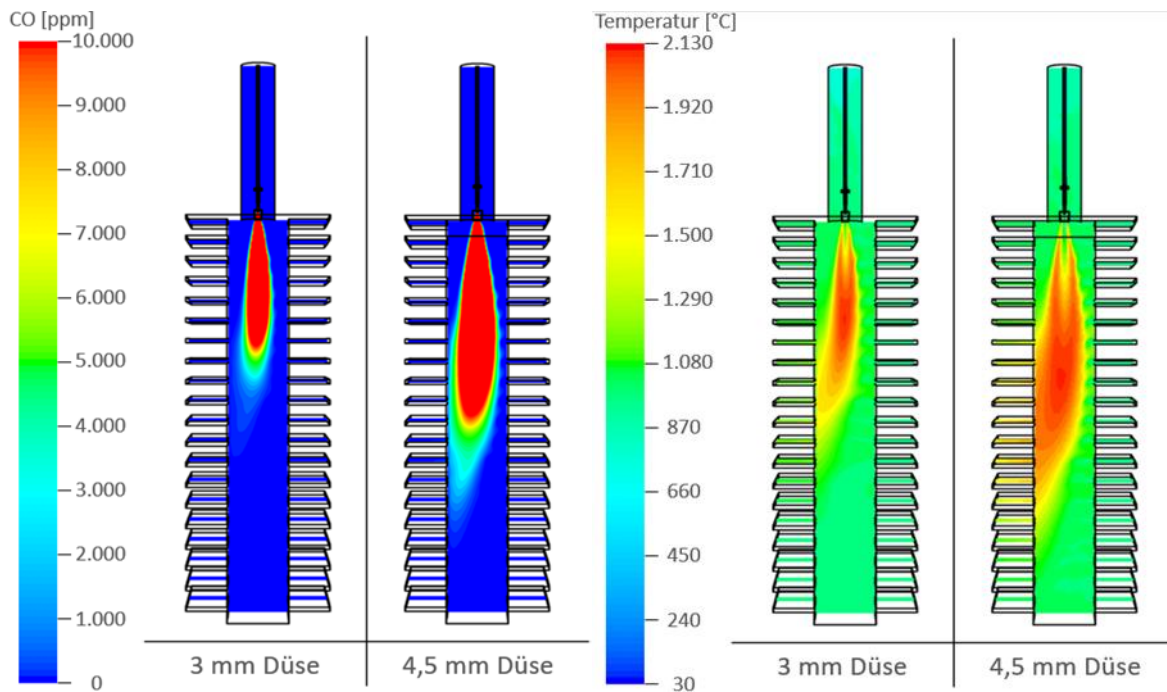


Abbildung 3.15: (links) und Temperaturverteilung (rechts) der Brenner mit 3 mm- und 4,5 mm-Düse bei 0,9 bar Gasdruck [GWI]

### 3.5 Konstruktion und Fertigung der Brenner aus hitzebeständigem Stahl

Auf Basis der ersten Auslegungen und der Simulationen verschiedener Geometrien wurde ein Testbrenner für die Versuche beim GWI und IZF entwickelt.

Als Grundlage für die Entwicklung eines Testbrenners wird der LINGL-Reingasbrenner herangezogen. Der Reingasbrenner ist für eine Wärmeleistung bzw. Heizlochbelastung von 20 bis 60 kW ausgelegt worden. Der Arbeitsdruck für Erdgas liegt im Bereich 0,9 bis 2,0 bar. Das Brennerrohr ist aus SiSiC (Keramik) oder Inconel 601 (hitzebeständiger Stahl) mit einem Nenn-durchmesser DN 6. Besonderheit ist, dass der Brenner mit einem externen Spülluftanschluss ausgestattet ist. Die Spülluft soll ein Verkoken des geringen Durchmessers an der Brennerrohrmündung verhindern. Eine Zuführung der Spülluft erfolgt nur während der Pausenzeit. Der Brenner wird vorzugsweise als Deckenbrenner eingesetzt. Um eine einwandfreie Zündung sicherzustellen, sind Reingasbrenner nur in einem Temperaturbereich  $> 750\text{ °C}$  einzusetzen. Für die Fertigung der Testbrenner wird auf die SiC-Düse verzichtet. Als Ersatz wird hitzebeständiger Stahl herangezogen. Als maßgebliche Größen für die Funktionsweise wurden die Parameter Durchmesser Treibdüse, Durchmesser Mischrohr/Injektorhaube und Abstand der Treibdüse zum Mischrohr identifiziert. Damit der jeweilige Einfluss auf die Funktionsweise ermittelt werden kann, sind diese bei dem Testbrenner einstellbar bzw. können entsprechende Bauteile durch wenige Handgriffe gewechselt werden. Somit wurde eine einfache Einstellung der verschiedenen Kombinationen im Testbetrieb gewährleistet.

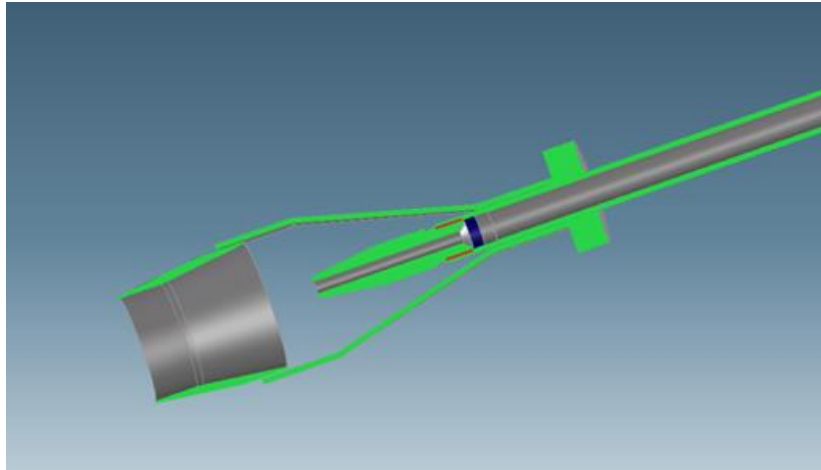


Abbildung 3.16: 3D-Modell des Brennerrohrs im Mittelschnitt [LINGL]

Die Konstruktionen bestehen hauptsächlich jeweils aus einer Treibdüse mit zwei verschiedenen Durchmessern und jeweils einer Brennerhaube mit einem auf den Düsenquerschnitt abgestimmten Durchmesser zur Erzeugung eines zweistufigen Injektionseffektes. Die Grundlage zur Dimensionierung der verschiedenen Parameter sind dabei maßgeblich, die in der numerischen Simulation gewonnenen Ergebnisse.

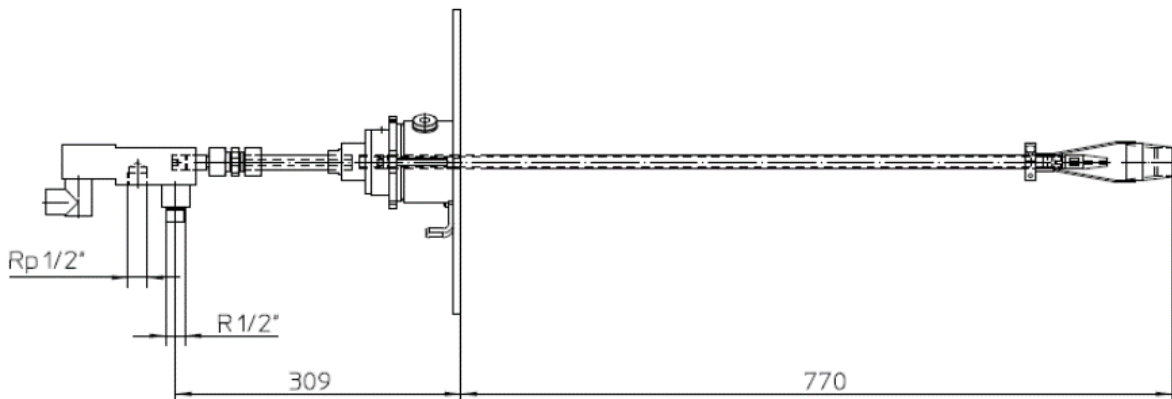


Abbildung 3.17: Einzeldetails der Konstruktionszeichnung [LINGL]

Einzelne Komponenten der Testbrenner können durch Lieferanten gefertigt werden. Der Zusammenbau der Testbrenner erfolgt allerdings im Haus der Fa. LINGL.

### 3.6 Vermessung der Tunnelofenanlage im Ursprungszustand

Um die Effizienz der neu entwickelten Brenner im realen Betrieb der Tunnelofenanlage beurteilen zu können, wird die Anlage zunächst in ihrem Ursprungszustand vermessen. Durch die Wiederholung einer solchen Betriebsmessung nach dem Umbau auf die neu entwickelten Brenner ist mittels der gewonnenen Messdaten ein Vorher-Nachher-Vergleich möglich, der Aufschluss über etwaige Einflüsse der geänderten Brennertechnik gibt.

### 3.6.1 Aufnahme der Randbedingungen für messtechnische Untersuchungen

Vor Beginn der Messungen am Ziegelofen werden zunächst die herrschenden Randbedingungen des Ofens und des Brennprozesses ermittelt. Dies ist notwendig, um etwaige Abweichungen bei der Prozessführung für die nachfolgenden Messungen ausschließen zu können und um eine realistische Nachbildung des Prozesses im Laborversuch zu erreichen.

Die erdgasbetriebenen Deckenbrenner der Ofenanlage sind zu so genannten Brennerreihen zusammengefasst, wobei alle Einzelbrenner mit Ventilgruppen versehen sind, die einen taktenden Betrieb ermöglichen. Mittels der vorhandenen Prozesssteuerung können die Brennerreihen einzeln angesteuert werden. Dabei lässt sich der Gesamtprozess in verschiedene (Ofen)-Zonen aufteilen. Relevant für die Untersuchungen ist die Brennzone.

Die ursprünglich projektierten Leistungen eines Einzelbrenners in der Brennzone des Tunnelofens betragen ca. 40 bis 60 kW. Im Normalbetrieb arbeitet die Brenner in einem mittleren Leistungsbereich zwischen 30 bis 50 kW bei einem unteren Gasdruck von 0,9 bar und einem oberen Gasdruck von 1,4 bar.

Der Temperaturbereich der Brennzone erstreckt sich von 700 °C bis 900 °C. Je nach Besatz sind ca. 10 bis 18 % Sauerstoff im Brennraum vorhanden. Die Menge der Heißluft, die durch die Brennzone transportiert wird, ist Schwankungen auf Grund von Änderungen des Besatzformats usw. unterworfen.

### 3.6.2 Messungen an der Ofenanlage im Ursprungszustand

Zur Aufnahme des Ursprungszustands wird eine Messung für die Schadstoffe CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und O<sub>2</sub> sowie für die Temperaturen im Brennraum durchgeführt. Es werden dazu Messungen an insgesamt 11 Brennerreihen bei unterschiedlichem Ziegelbesatz durchgeführt.

Für die Messung der Abgasemissionen wird ein wassergekühltes Absaugpyrometer verwendet. Die Probenahme erfolgt in den Öffnungen der installierten Gasbrenner, wobei die einzelnen Brenner für die Messungen demontiert und ein vertikales Raster vermessen wird. Dabei kommt ein Multikomponenten-Abgasanalysator vom Typ NGA 2000 des Herstellers Rosemount Analytical zur Anwendung, dem die Abgasprobe über einen Filter und einen Messgaskühler zugeführt wird. Vor der Durchführung der Messung wird der Analysator mittels geeigneter Gasgemische kalibriert. Spezifikationen der Geräte sind aus der nachstehenden **Tabelle 3.4** ersichtlich.

Tabelle 3.4: Spezifikationen der Messgeräte und der Kalibriergase

Komponente	Messzelle	Messbereich	Messfehler	Kalibriergas
O <sub>2</sub>	paramagnetisch	0 - 25 Vol.-%	± 1 % Skalenendwert	20,9 Vol.-%
CO <sub>2</sub>	NDIR	0 - 15 Vol.-%	≤ 1 % Skalenendwert	14,01 Vol.-%
CO	NDIR	0 - 2.000 ppm	≤ 1 % Skalenendwert	1.918 ppm
NO <sub>x</sub>	NDIR	0 - 5.000 ppm	≤ 1 % Skalenendwert	4.116 ppm

Durch die Schadstoff- und Temperaturmessungen kann auf die Verteilung der erfassten Größen innerhalb einer Brennerebene geschlossen werden. Die **Abbildungen 3.18** bis **3.22** zeigen



exemplarisch die aufgenommenen Werte für die Brennerreihe 13 sowie die Temperaturverteilung entlang der Brennzone. Es ist die Messtiefe im Brennraum auf der y-Achse dargestellt, auf der x-Achse ist die Breite des Brennraumes aufgetragen.

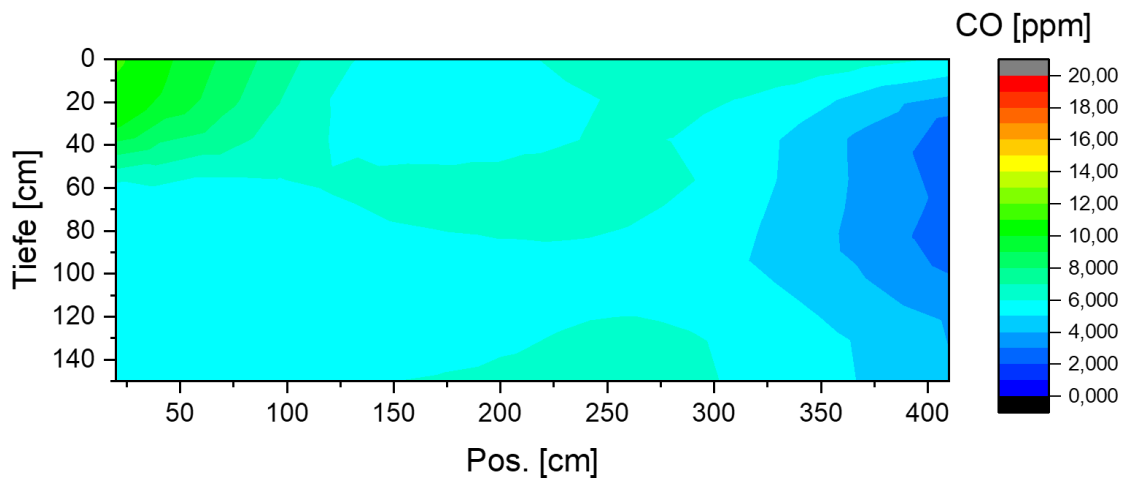


Abbildung 3.18: Gemessene CO-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]

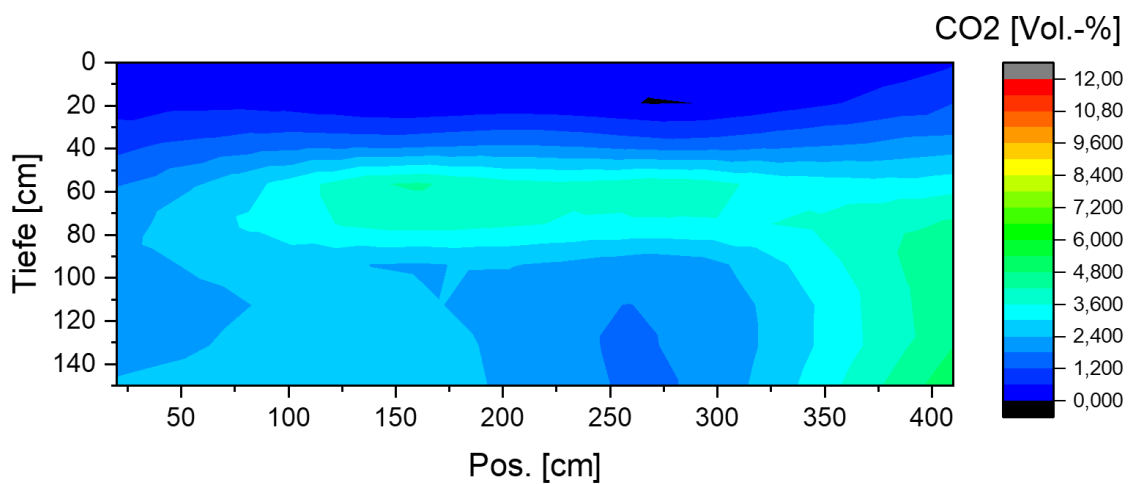


Abbildung 3.19: Gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]

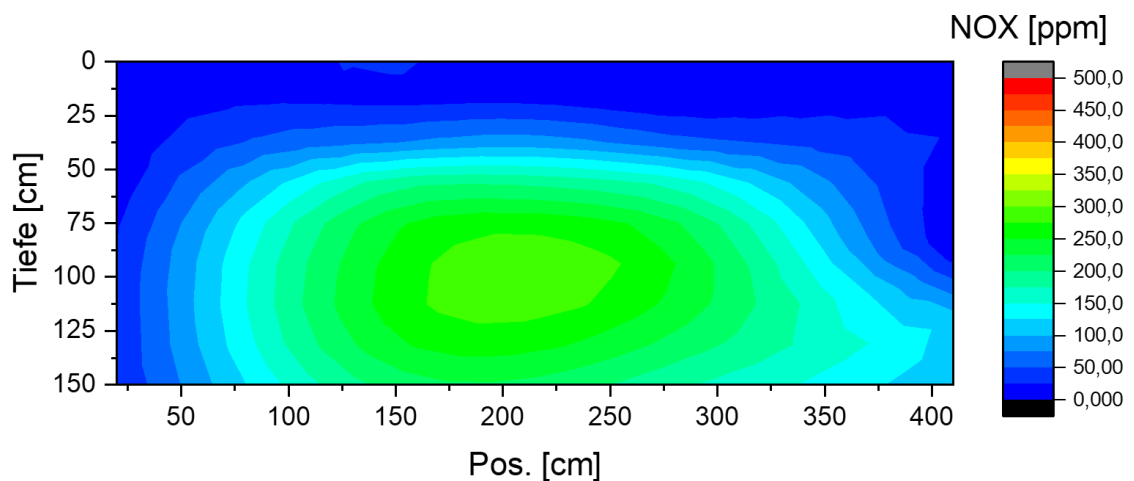


Abbildung 3.20: Gemessene NO<sub>x</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]



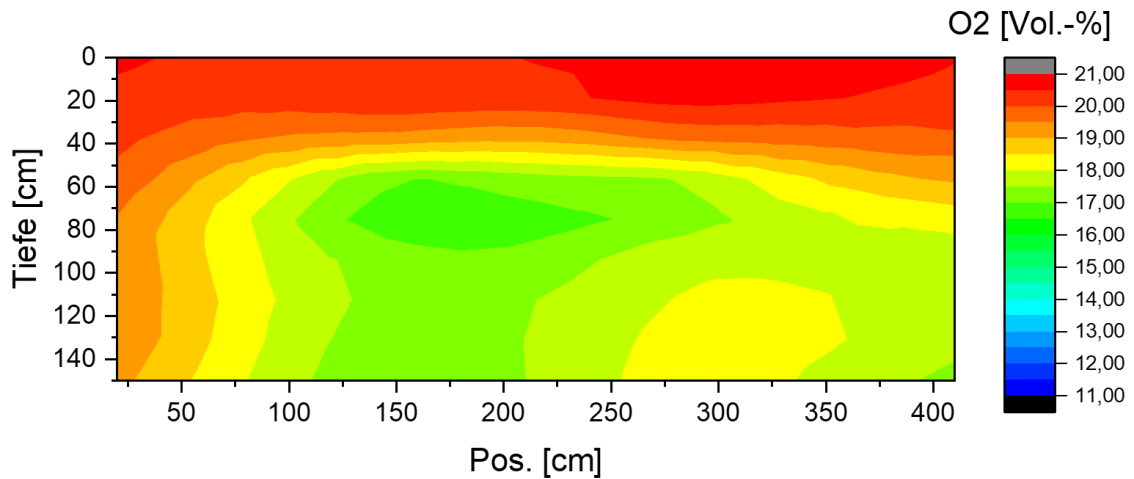


Abbildung 3.21: Gemessene O<sub>2</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI]

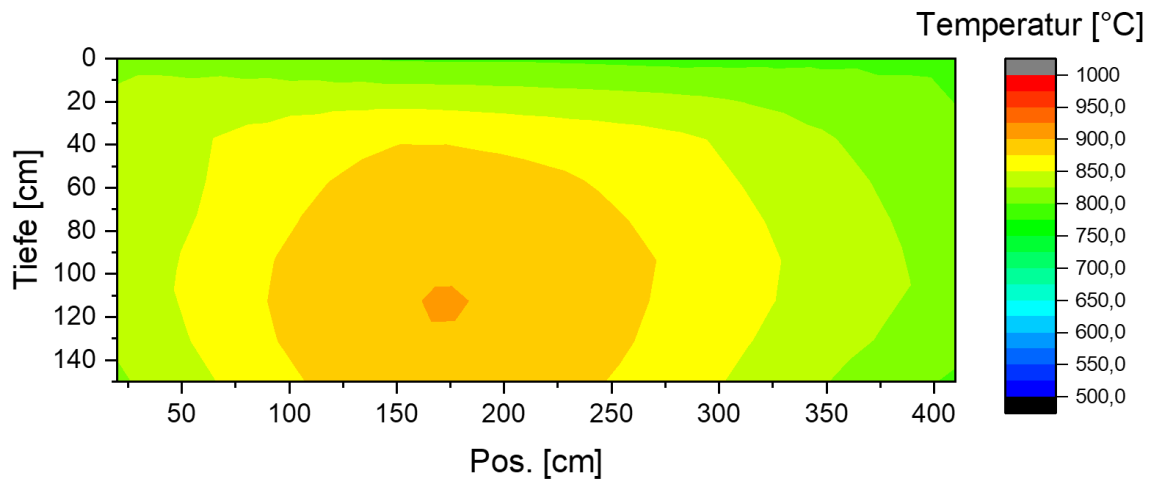


Abbildung 3.22: Gemessene Temperaturen der Brennerreihe 13 [GWI]

Anhand der **Abbildung 3.22** wird deutlich, dass sich die Temperaturen über ein Intervall von 750 °C bis ca. 950 °C erstrecken. Im Zentrum des Ofenquerschnitts herrschen höhere Temperaturen als in den Randbereichen. Dies geht einher mit höheren NO<sub>x</sub>-Konzentrationen und einem geringeren Sauerstoffgehalt in der Mittelzone, vgl. **Abbildungen 3.20 und 3.21**. Hinsichtlich der Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, und O<sub>2</sub> kann außerdem eine seitliche Asymmetrie festgestellt werden, wobei am rechten Rand höhere Werte feststellbar sind. Außerdem zeigt sich ein Gebiet mit geringer Temperatur und insgesamt niedrigen Emissionen nahe der Ofendecke. Dies ist vordergründig auf abweichenden Strömungsbedingungen zwischen den Ziegelstapeln und der Ofendecke oder den Randspalten zurückzuführen.

### 3.7 Messtechnische Untersuchungen am GWI

Zur Beurteilung des Flammenbilds und des Emissionsverhaltens der neu entwickelten Brenner wird ein aus Stahl gefertigter Einzelbrenner an einer Versuchsofenanlage des GWI messtechnisch untersucht.

### 3.7.1 Versuchsofenanlage des GWI

Die für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen am GWI verwendete Versuchsofenanlage 1 besteht aus einer Stahlblechkonstruktion, die mit einem feuerfesten Fasermaterial ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ausgekleidet ist. Es sind insgesamt sieben verschließbare Öffnungen in der Mittelebene des Ofen vorhanden, die einen direkten Zugang zur Brennkammer während des Betriebes ermöglichen. Außerdem kann ein größeres Sichtfenster im vorderen Ofenabschnitt geöffnet werden, welches die Anwendung optischer Verfahren zur Sichtbarmachung und Vermessung von Brennerflammen erlaubt. Mittels vier gasbeheizter Strahlheizrohre kann zusätzliche Wärme in den Ofenraum eingebracht werden. Vier luftbetriebene Kühlrohre ermöglichen die Darstellung einer Last durch Wärmeabfuhr. Der grundsätzliche Aufbau der Anlage ist aus den **Abbildungen 3.23** und **3.24** ersichtlich.

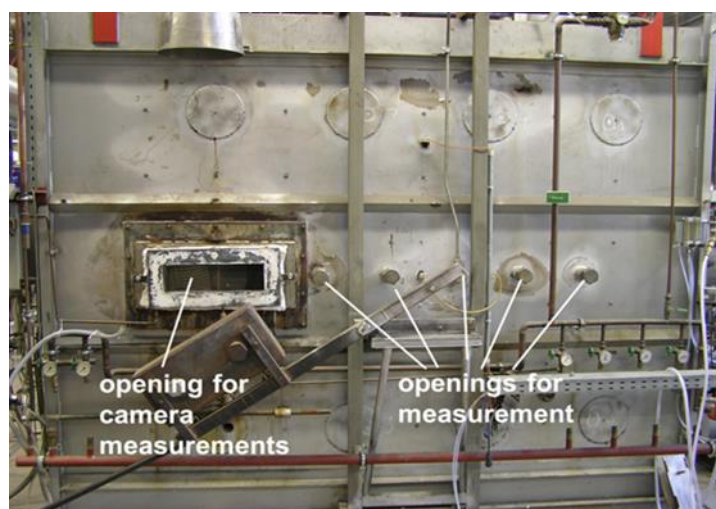


Abbildung 3.23: Seitenansicht (rechts) des Versuchsofens 1 [GWI]

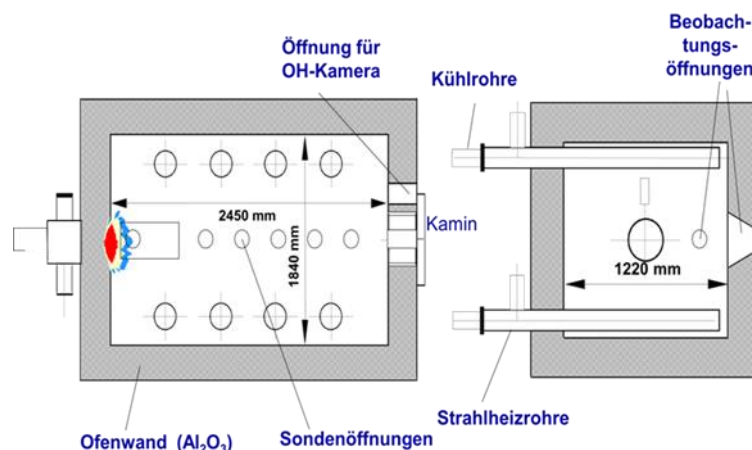


Abbildung 3.24: Schematischer Aufbau des Versuchsofens 1 [GWI]



Abbildung 3.25: Blick durch das Sichtfenster auf den montierten Testbrenner [GWI]

Für die Untersuchungen wird der Testbrenner stirnseitig an den Versuchsofen montiert, wobei aufgrund des vergleichsweise geringen Außendurchmessers des Brenners der verbleibende Raum der Anschlussöffnung des Ofens mit Fasermaterial ausgekleidet wird. Im fertig montierten Zustand ragt die Mündung des Testbrenners etwa 20 cm tief in das Innere des Ofens. **Abbildung 3.25** zeigt eine Ansicht des montierten Brenners als Blick durch das seitliche Sichtfenster.



Abbildung 3.26: Versuchsaufbau am GWI-Versuchsofen 1 [GWI]

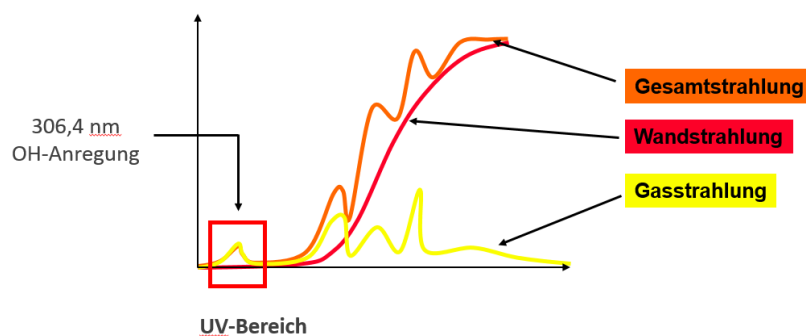
Zur Darstellung des Kühlluftstromes im Versuchsofen ist eine Abänderung der Luftversorgung erforderlich. Im Gegensatz zu der brenngasparallelen Luftzuführung konventioneller Industriebrenner erfolgt eine seitliche Zuführung der Verbrennungsluft durch fünf der sieben Öffnungen in der Ofenseitenwand. Hierzu werden die Öffnungen mittels Metallwellschläuchen an eine zentrale Luftleitung angeschlossen. Mithilfe eines gasbetriebenen Lufterhitzers erfolgt

eine Vorwärmung des Oxidators in Anlehnung an die Verhältnisse der realen Ofenanlage. In der Luftleitung wird zusätzlich noch ein weiterer Anschluss vorgesehen, durch den die Verbrennungsluft mit Stickstoff angereichert werden kann, um den  $O_2$ -Gehalt zu vermindern. Der Versuchsaufbau wird aus **Abbildung 3.26** deutlich.

Zur Messung der Abgasemissionen kommt ein wassergekühltes Absaugpyrometer zur Anwendung. Die Probennahme erfolgt im Kamin der Ofenanlage. Hierbei kommen unterschiedliche, miteinander verschaltete Abgasanalysatoren zur Anwendung, denen die Abgasprobe über einen Filter und einen Messgaskühler zugeführt wird. Die Spezifikationen der Geräte entsprechen denen der in **Tabelle 3.4** aufgeführten Messzellen. Vor der Durchführung der Messung werden die Analysatoren kalibriert.

Um die Flammenbeschaffenheit beurteilen zu können, kommt ein OH-Kamerasystem und eine gewöhnliche Digitalkamera zur Anwendung, wobei der optische Zugang zu der Flamme durch die vorhandene Öffnung im vorderen Abschnitt der Ofenseitenwand möglich ist. Das zugrundeliegende Prinzip der OH-Kamera (OH-VIS) beruht dabei auf der Erfassung von in der Reaktionszone freigesetzter UV-Strahlung. Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen erfolgt über unterschiedliche Reaktionspfade. Hierbei entsteht eine Vielzahl von Zwischenprodukten der Verbrennung, die teilweise elektromagnetische Strahlung freisetzen.

Während der Existenz der Zwischenprodukte (Radikale) wird UV-Strahlung in einem engen Spektrum von etwa 306 nm emittiert. In diesem Wellenlängenbereich kommen andere Strahlungsquellen, wie etwa die Strahlung der heißen Feuerraumwände, praktisch nicht in Betracht, da diese Strahlung in einem anderen Wellenlängenbereich emittieren. **Abbildung 3.27** verdeutlicht die Zusammenhänge.



**Abbildung 3.27:** Strahlungsquellen in heißen Feuerräumen [GWI]

Ursächlich für UV-Strahlung in dem genannten Spektrum ist somit das Vorhandensein von OH-Radikalen, die einen unmittelbaren Rückschluss auf die Reaktionszone erlauben.

Das verwendete OH-VIS System umfasst eine Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera, die in der Lage ist, bei einer Auflösung von maximal 1.280 x 1.024 Pixeln bis zu 70 Einzelbilder pro Sekunde zu erzeugen. Hierdurch ist eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Darstellung von Flammenstrukturen möglich. Das System beinhaltet außerdem ein UV-durchlässiges Objektiv, dem ein Filter vorgesetzt ist, um UV-selektive Bilddaten zu generieren. Zwischen Kamera und Objektiv ist zudem ein Bildverstärker vorgesehen, der für eine ausreichende Signalintensität bei schwachen Strahlungsquellen sorgt. **Abbildung 3.28** zeigt den Aufbau des OH-VIS Systems.





Abbildung 3.28: OH-VIS System [GW]

Die Steuerung des Kamerasystems und die Datenerfassung erfolgen mittels eines Computers, der über eine entsprechende Hard- und Software verfügt.

### 3.7.2 Versuchsbedingungen

Ausgehend vom Leistungsbereich der realen Ofenanlage und der projektierten Leistung für die Einzelbrenner, ergibt sich eine relevante Brennerleistung von etwa 30 bis 60 kW. Um darüber hinaus das gesamte mögliche Einsatzspektrum zu ermitteln, wird für die Versuche ein Leistungsintervall von 20 bis 100 kW gewählt. Aufgrund der, durch das Funktionsprinzip des Brenners, bedingten Verwendung von vorgewärmter Kühlluft als Oxidator kommt dem Sauerstoffgehalt der Kühlluft eine entscheidende Bedeutung zu. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden auch Versuche mit einem variierenden  $O_2$ -Gehalt des Oxidators durchgeführt. Der angesaugte Volumenstrom der Kühlluft ist in erster Linie abhängig von den strömungsmechanischen Verhältnissen im Bereich der Brennerdüse und des Impulses des Brenngasstroms im Mündungsbereich des Brenners und kann daher nicht einfach, wie bei konventioneller Brennertechnik üblich, durch die Gebläseleistung oder die Stellung einer Klappe variiert werden. Aus diesem Grund wird bei allen experimentellen Untersuchungen ein konstanter Oxidatorvolumenstrom verwendet. Unter Berücksichtigung der Gegebenheiten wird ein Versuchsplan auf Basis unterschiedlicher Laststufen des Brenners festgelegt. Einzelheiten hierzu können der nachstehenden **Tabelle 3.5** entnommen werden.

Tabelle 3.5: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen am GWI

Nr.	Oxidator	$T_{\text{Ofenraum}}$	$V_{\text{Luft}}$	$P_{\text{Brenner}}$
	-	°C	m <sup>3</sup> /h	kW
1	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	20
2	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	30
3	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	40
4	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	50
5	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	60
6	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	70
7	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	80
8	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	90

<b>9</b>	Luft (20,9 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	100
<b>10</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	20
<b>11</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	30
<b>12</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	40
<b>13</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	50
<b>14</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	60
<b>15</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	70
<b>16</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	80
<b>17</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	90
<b>18</b>	Luft + N <sub>2</sub> (17,5 Vol.-% O <sub>2</sub> )	750 - 850	konstant	100

### 3.7.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Nach der Installation des Brenners an der GWI-Versuchsofenanlage werden die Betriebspunkte gemäß dem Versuchsplan eingestellt und die Parameter ermittelt. Im unteren Leistungsbereich ist die Verwendung der gasbetriebenen Strahlheizrohre erforderlich, da die freigesetzte Wärmeenergie nicht ausreichend ist, um den Ofenraum auf den Zieltemperaturbereich von 750 bis 850 °C aufzuheizen. Eine Temperatur  $\geq 750$  °C ist aufgrund des Brennerdesigns ohne Zündeinrichtung und Pilotflamme notwendig, um eine Selbstzündung des Gemischs gewährleisten zu können. Der seitlich in den Ofenraum eingebrachte Verbrennungsluftvolumenstrom liegt bei allen Betriebspunkten bei etwa 325 m<sup>3</sup>/h. Vor Beginn der Messreihen mit unkonditionierter Verbrennungsluft und mit N<sub>2</sub>-angereicherter Luft wird die Ofenatmosphäre ohne Verbrennung vermessen, um den Einfluss eines möglichen Abgaseintrags durch die Strahlheizrohre abschätzen zu können und um den verbleibenden O<sub>2</sub>-Gehalt nach der N<sub>2</sub>-Zumischung zu kontrollieren. Dieses Vorgehen führt zu einer Gesamtzahl von 20 Einzelmessungen.

Die gemessenen Abgasemissionswerte und Betriebsparameter sind den nachstehenden **Tabellen 3.6** und **3.7** zu entnehmen.

Bei der Messung der Ofenatmosphäre ohne Brennerbetrieb im Versuch Nr. 1 zeigt sich lediglich eine geringe Kontamination mit CO<sub>2</sub> und CO aufgrund der Verwendung der gasgefeuerten Strahlheizrohre. Im unteren Lastbereich des Brenners lassen sich nennenswerte CO-Konzentrationen feststellen, die jedoch ab einer Leistung von etwa 50 kW stark zurückgehen. Die Konzentrationen der Stickoxide sind mit Ausnahme des Lastpunkts 50 kW (Versuch Nr. 5) vernachlässigbar gering. Der zugeführte Luftvolumenstrom von etwa 325 m<sup>3</sup>/h führt zu einer stark überstöchiometrischen Verbrennung in allen Lastpunkten.

**Tabelle 3.6: Messergebnisse der Versuche mit unconditionierter Luft des trockenen Abgases**

Nr.	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	T <sub>Ofenraum</sub>	V <sub>Luft</sub>	V <sub>Gas</sub>
	Vol.-%	Vol.-%	ppm	ppm	°C	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
1	20,9	0,12	3	0	757	332	0
2	19,5	1	450	1	778	323	2
3	18,7	1,4	325	1	791	324	3
4	17,9	2	30	1	810	322	4
5	16,9	2,5	2	67	836	322	5
6	16	2,9	54	2	802	326	6
7	15,3	3,4	5	3	817	330	7
8	14,6	3,8	3	2	821	326	8
9	13,9	4,2	2	2	823	323	9
10	12,9	4,7	2	2	825	324	10

**Tabelle 3.7: Messergebnisse der Versuche mit N<sub>2</sub>- Zumischung des trockenen Abgases**

Nr.	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	T <sub>Ofenraum</sub>	V <sub>Luft</sub>	V <sub>Gas</sub>
	Vol.-%	Vol.-%	ppm	ppm	°C	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
11	17,5	0,2	2	0	760	324	0
12	16,4	0,8	300	0	785	322	2
13	15,7	1,2	160	0	803	317	3
14	14,9	1,7	20	1	829	318	4
15	14,3	2,1	200	0	806	318	5
16	13,4	2,5	130	1	803	323	6
17	12,6	2,9	50	1	812	320	7
18	11,8	3,4	28	1	818	321	8
19	11	3,8	9	1	822	319	9
20	10,5	4,1	11	1	820	321	10

Die Versuchsergebnisse der Tests mit N<sub>2</sub>-Zumischung zum Oxidator unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ergebnissen der Versuche mit unconditionierter Luft. Die Ofenatmosphäre ist abgesehen von dem durch die N<sub>2</sub>-Zumischung bedingten geringeren O<sub>2</sub>-Gehalt nahezu vergleichbar. Im Brennerbetrieb zeigen sich auch hier vor allem im kleineren und mittleren Lastbereich teilweise dreistellige CO-Konzentrationen, Stickoxide treten hingegen im gesamten untersuchten Lastbereich praktisch nicht auf.

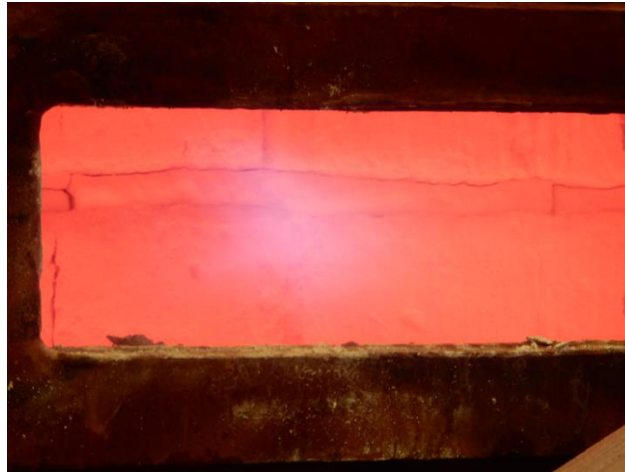


Abbildung 3.29: Digitalkamerabild der Sicht durch die Ofenöffnung bei P = 45 kW [GWI]

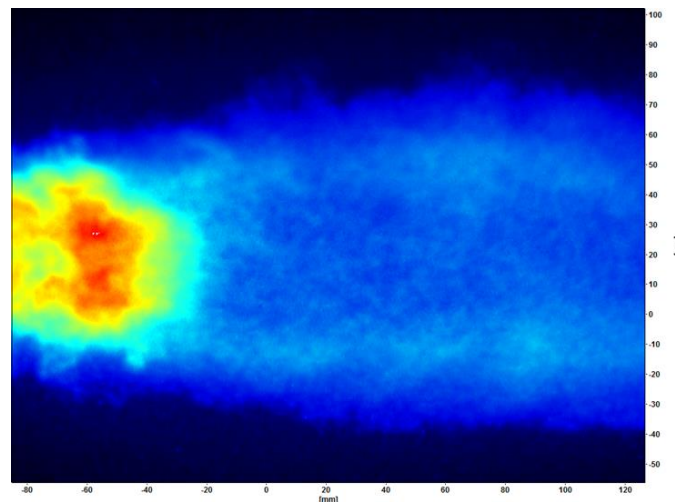


Abbildung 3.30: OH-Aufnahme der Sicht durch die Ofenöffnung bei P = 45 kW als RMS Wert aus 70 Einzelaufnahmen [GWI]

Die geringen  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Testbrenners beruhen auf einer flammenlosen Verbrennung. Bei fast allen Betriebspunkten bildete sich keine sichtbare Flamme aus, der hohe Brenn- gasimpuls führte zu einer starken Durchmischung und Verdünnung der Reaktionszone. Im Zu- sammenhang mit der Ofenraumtemperatur von  $\geq 750^\circ\text{C}$  konnte sich keine stabile, sichtbare Flamme ausbilden und die Oxidation des Brenngases erfolgte flammenlos. Lediglich im Lei- stungsbereich von 40 bis 50 kW und 80 kW bildete sich in einigem Abstand zur Mündung des Brenners eine instabile Flamme aus, die ihre Position häufig und sprunghaft entlang der Bren- nerachse veränderte. Die **Abbildungen 3.29** und **3.30** veranschaulichen die Flamme bei einer Leistung von 45 kW als Digitalfoto und OH-Aufnahme.

Es ist eine kompakte, wolkenförmige Flamme erkennbar, die eine klar umgrenzbare Hauptre- aktionszone und eine stromab verlaufende Reaktionszone schwacher Intensität aufweist. Die Temperatur in der Flamme ist im Vergleich zu der flammenlosen Verbrennung deutlich größer, weshalb sich hier vermehrt thermische Stickoxide bilden. Dies erklärt die gemessene Spitzen- konzentration von 67 ppm des Versuchs Nr. 5.

Das breite Leistungsspektrum von 20 bis 100 kW ist ein großer Vorteil für den Einsatz in einem Tunnelofen. Die überwiegend flammlose Verbrennung und das geringe Emissionsverhalten in



Bezug auf  $\text{NO}_x$  sind ebenfalls sehr positiv. Insgesamt scheint die Verbrennung gegenüber äußeren Einflüssen (schwankender  $\text{O}_2$ -Gehalt) sehr stabil zu sein.

### 3.8 Integration einer aus hitzebeständigem Stahl gefertigten Brennergruppe in den bestehenden Tunnelofen

In Anlehnung an die Konstruktion der Testbrenner wurde für die gewählte Anlage in Bellenberg eine gesamte Brennergruppe gefertigt. Diese Gruppe umfasst 13 Brenner mit einer theoretischen Leistung von je 100 kW bei dem vorgegebenen Gasdruck von 1,4 bar.

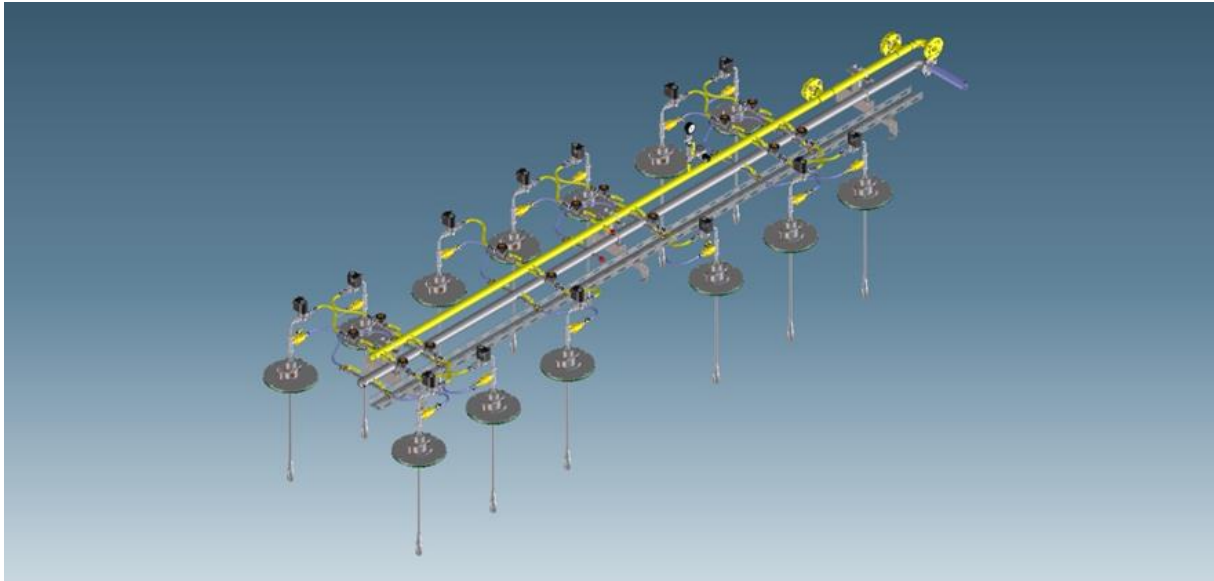


Abbildung 3.31: 3D-Modell einer Brennergruppe für den Tunnelofen [LINGL]

Die Brenner werden über die bestehende Gasleitung mit Brennstoff versorgt. Abgetrennt wird die Brennergruppe durch ein Magnetventil (ebenfalls bestehend). Jedem Einzelbrenner ist ein eigenes Magnetventil zur Steuerung des Impulsbetriebes zugeordnet. Die Taktung erfolgt nach Sequenz in ausgewählter Reihenfolge. Neben der Gasversorgung werden die Brenner zusätzlich mit einer geringen Menge Spülluft versorgt. Diese soll eine Verkokung der Brennerspitzen verhindern. Die Spülluftzufuhr erfolgt mit Kaltluft und wird von einer benachbarten HG-Brennergruppe entnommen.

Zur schnellen Integration wird eine komplette Gruppe der bestehenden Brenner mit den neu entwickelten Injektorbrennern ersetzt. Die Gruppe besteht, aus 13 Brennern, einer Gruppengasleitung und einer Luftleitung. Die Gruppengasleitung wird über die zentrale Gasleitung versorgt. Ein bereits vorhandenes Gasmagnetventil in der zentralen Gasleitung ermöglicht bzw. verschließt die Gaszufuhr zu den einzelnen Brennern. Jedem Brenner ist gasseitig ein Kugelhahn, Dosierventil, Gasmagnetventil und ein Rückschlagventil zugeordnet. Die Luftversorgung dient nur als Spülung der Injektorlanze und ist für eine Verbrennung unerheblich. Versorgt wird die Gruppe über eine benachbarte HG-Brennergruppe. Der Luftverbrauch ist nur marginal. Die Spülluft eines jeden Brenners ist über einen Kugelhahn absperbar.



Abbildung 3.32: Detailsansicht aus der neuen Injektorbrennergruppe [LINGL]

Bezüglich der MSR-Technik werden keine Anpassungen durchgeführt. Die Regelung erfolgt ähnlich der alten Brennergruppe und stellt damit keine wesentliche Änderung gegenüber dem vorherigen Konzept dar. Jeder Gruppe ist ein Thermoelement zugeordnet. Ist die Temperatur auf dem Sollwert schließt das Gruppenventil und die Freigabe für die Brenner ist erloschen. Liegt die Temperatur unter dem Sollwert wird das Gruppenventil geöffnet und die Brenner takten in einer vorgegebenen Frequenz durch.



Abbildung 3.33: Detailsansicht der neuen Injektorbrennergruppe [IZF]

### 3.9 Vermessung der Tunnelofenanlage nach Umbau auf Brenner aus hitzebeständigem Stahl

Nach dem Umbau der Brenner der Brennzone des Tunnelofens auf den aus Stahl gefertigten neu entwickelten Brenner erfolgt eine weitere Vermessung der Anlage zur Identifikation der Auswirkungen der Umbaumaßnahme. Das Vorgehen entspricht dabei der Vermessung des Ursprungszustands, wobei die Randbedingungen unverändert bleiben. Die Ergebnisse der Emissions- und Temperaturmessungen sind aus den nachfolgenden **Abbildungen 3.34 bis 3.38** ersichtlich.

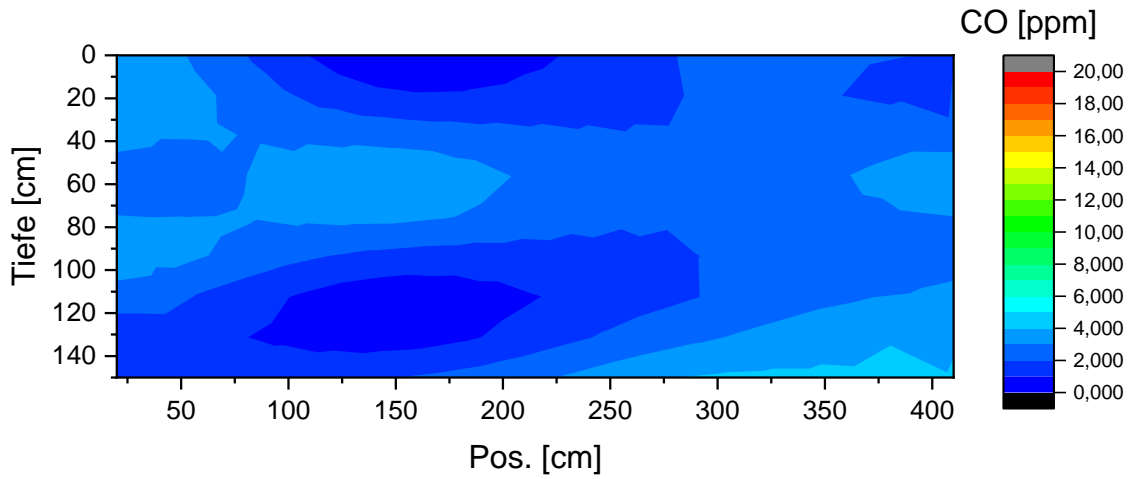


Abbildung 3.34: CO-Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]

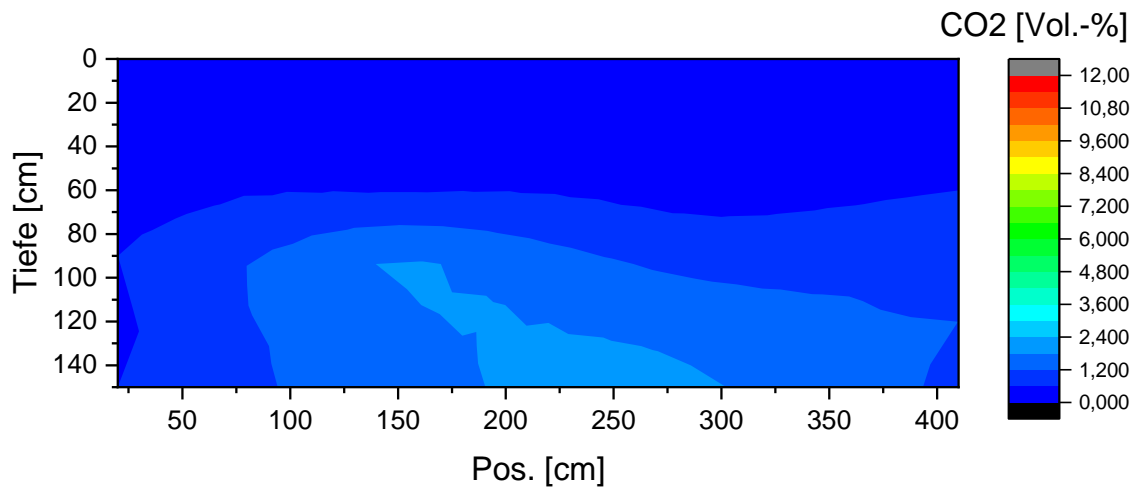


Abbildung 3.35: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]

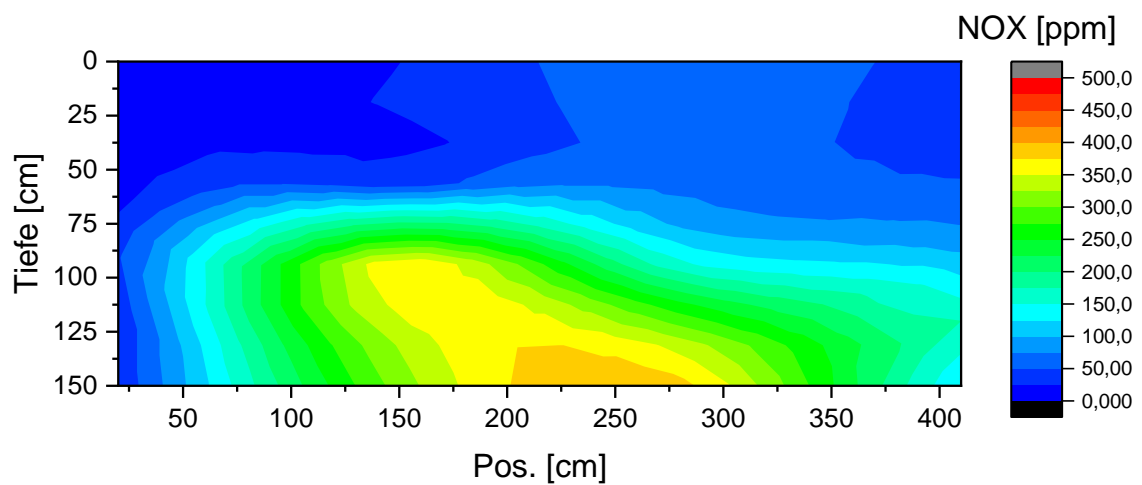


Abbildung 3.36: NO<sub>x</sub>-Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWl]

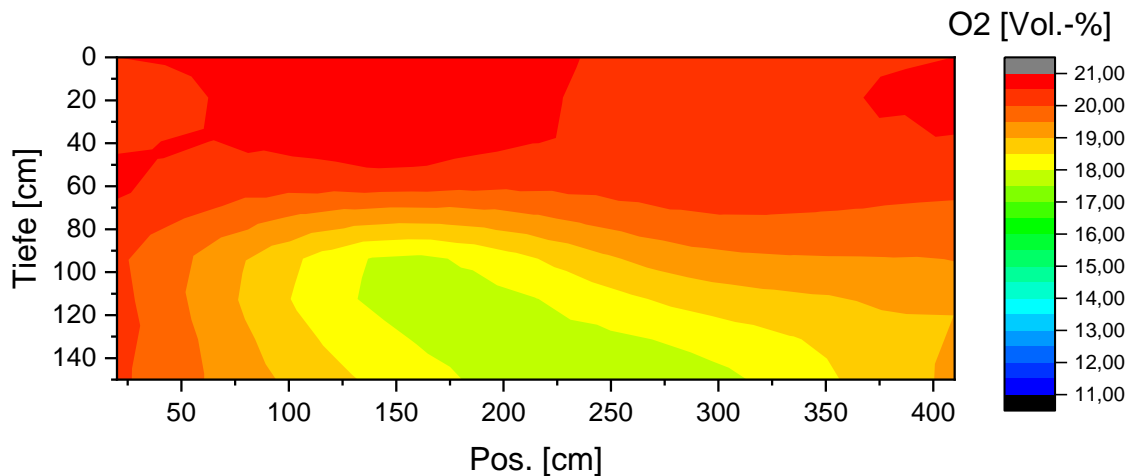


Abbildung 3.37: O<sub>2</sub>-Konzentrationen nach Umbau (trockene Rohemissionen) der Brennerreihe 13 [GWI]

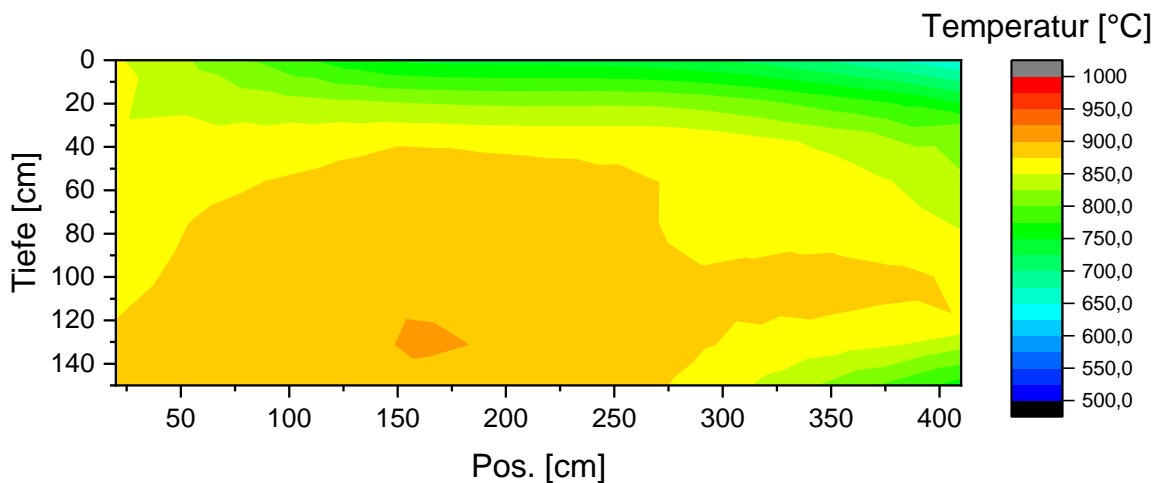


Abbildung 3.38: Temperaturen nach Umbau der Brennerreihe 13 [GWI]

Im Vergleich zu dem Zustand vor dem Umbau auf die Injektorbrenner aus Stahl zeigt sich eine deutliche Vergleichmäßigung der Temperatur in der Brennzone. Vor allem der für den Brennvorgang wichtige Bereich mit Temperaturen um ca. 900 °C ist räumlich stärker ausgeprägt. Niedrige Temperaturen finden sich nur noch in den Randgebieten sowie nahe der Ofendecke. Die O<sub>2</sub>-Konzentration erscheint gegenüber dem Ursprungszustand insgesamt höher. In weiten Abschnitten der vermessenen Zone liegen die Messwerte oberhalb von 19 Vol.-%. Geringere Konzentrationen lassen sich lediglich im unteren Zentralbereich feststellen.

Bei den Stickoxiden zeigen sich in Teilbereichen der untersuchten Zone höhere Stickoxidkonzentrationen. Dieser Umstand ist vordergründig auf die größeren Temperaturen in der Brennzone zurückzuführen, da bei dem vorliegenden Prozess die thermische Stickoxidbildung maßgeblich ist.

Ungeachtet dessen, sind die gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte jedoch durchweg auf einem Niveau unterhalb der für diesen Anlagentyp verbindlichen Schadstoffgrenzwerte von 350 mg/m<sup>3</sup> (neue TA-Luft).

Im Gegensatz dazu weisen die CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen geringere Werte auf, wofür ebenfalls die erhöhten O<sub>2</sub>-Anteile und Temperaturen ursächlich sind, da hierdurch der Ausbrand des Brenngases begünstigt wird und ein Verdünnungseffekt entsteht.

### 3.10 Vermessung der Tunnelofenanlage nach Umbau auf Injektorbrenner aus SiC-Material

Als Abschluss der Umbauten und experimentellen Untersuchungen am Tunnelofen wird eine weitere Messung nach der Installation der aus SiC gefertigten Brenner in der Brennzone zur Identifikation möglicher Unterschiede aufgrund der geänderten Brennerinstallation durchgeführt. Das Vorgehen bleibt dabei weiterhin unverändert. Eine Übersicht der gemessenen Daten bieten die **Abbildungen 3.39 bis 3.43**.

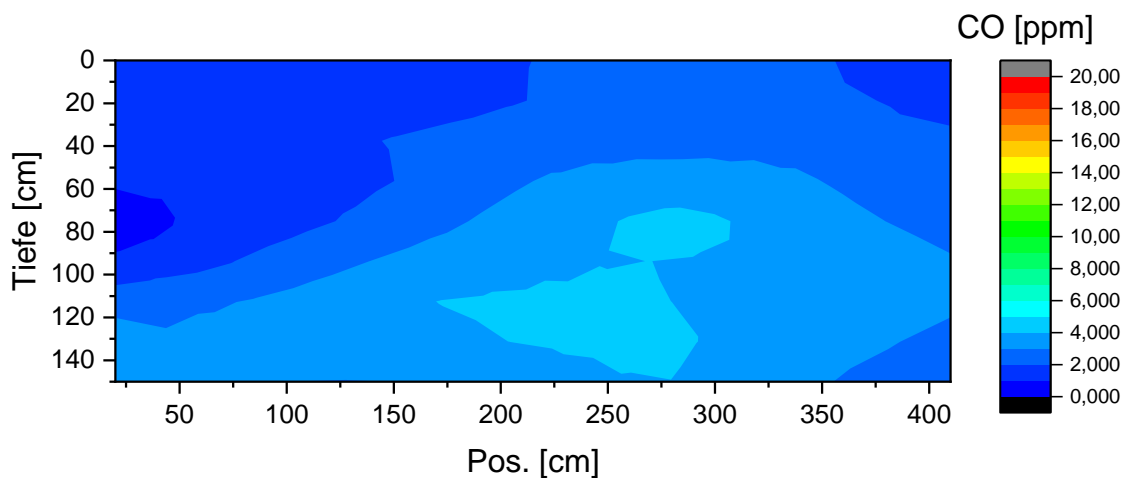


Abbildung 3.39: CO-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWl]

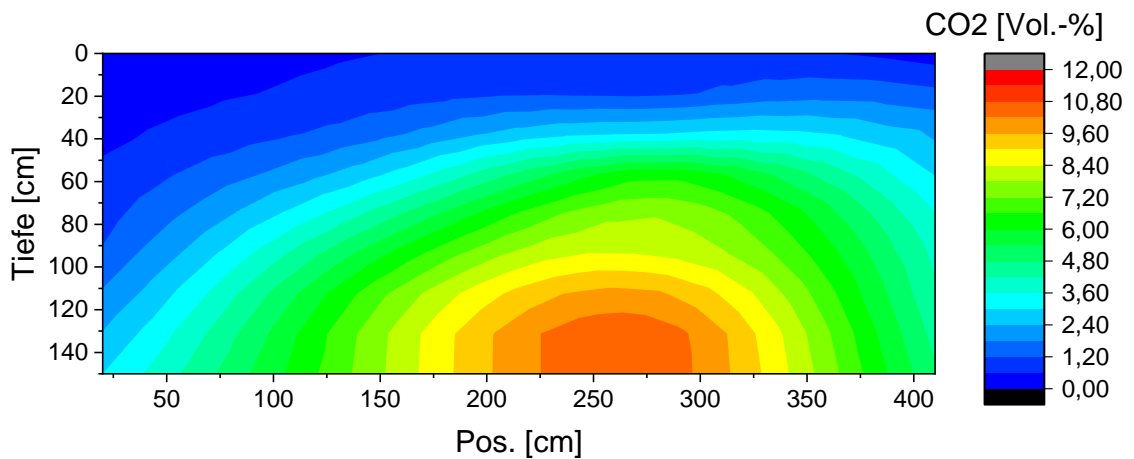


Abbildung 3.40: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWl]

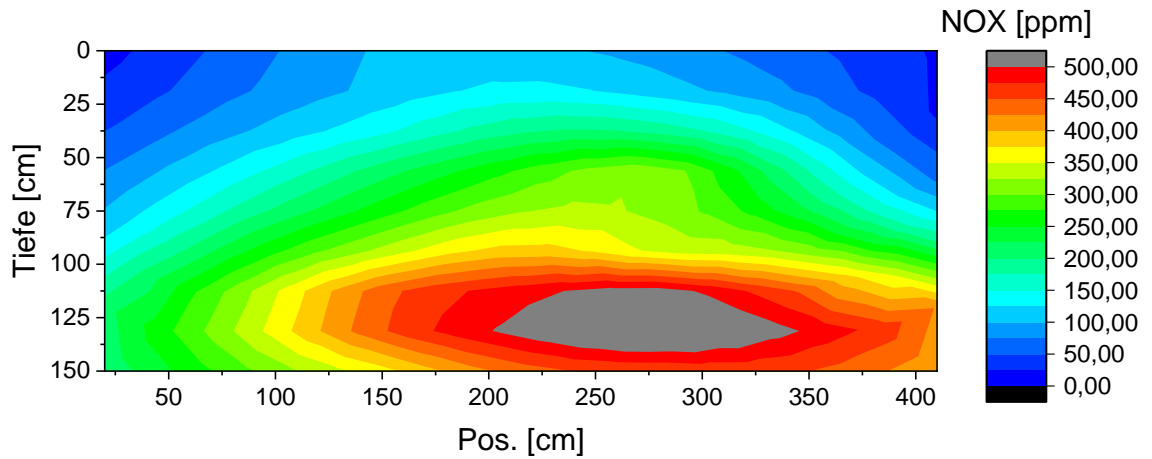


Abbildung 3.41: NO<sub>x</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWl]

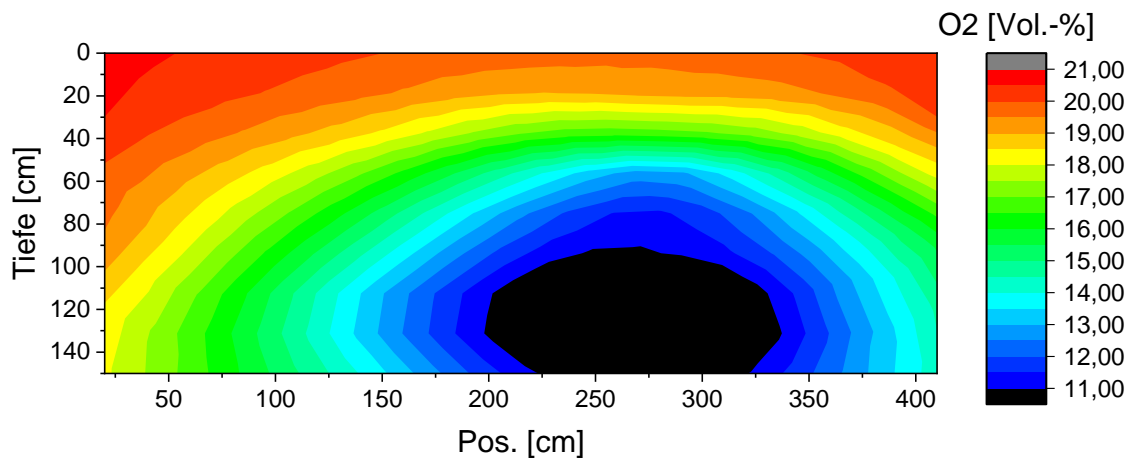


Abbildung 3.42: O<sub>2</sub>-Konzentrationen (trockene Rohemissionen) mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWl]

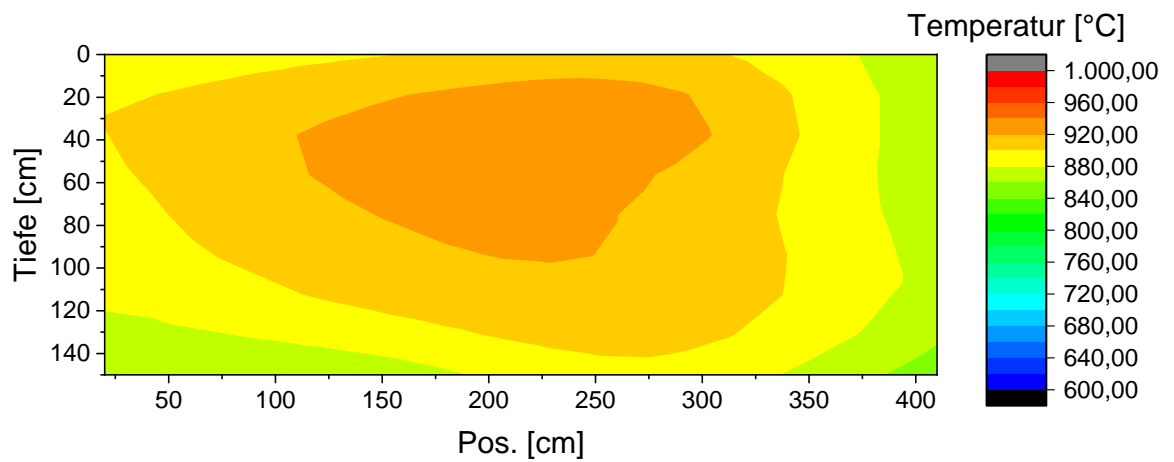


Abbildung 3.43: Temperaturen mit SiC-Brennern der Brennerreihe 13 [GWl]

Gegenüber den Messwerten der aus Stahl gefertigten Brenner sind die in der Ofenzone ermittelten Temperaturen gestiegen. Der Bereich mit  $T > 900 \text{ °C}$  ist wesentlich weiter. Außerdem erreichen nun die Werte unterhalb der Ofendecke etwa  $900 \text{ °C}$ . Geringere Temperaturen sind lediglich in schmalen Randbereichen feststellbar. Der Sauerstoffgehalt in dem vermessenen Abschnitt ist vor allem im Zentrum stark gesunken, hohe  $\text{O}_2$ -Konzentrationen treten nur noch in den oberen Randbereichen auf. Einhergehend mit dem Temperaturanstieg und der geringeren Verdünnung des Abgases mit Luft, kommt es vor allem in der Mitte des vermessenen Gebiets zu einem Anstieg der Stickoxidkonzentrationen. Die relevante  $\text{NO}_x$ -Konzentration der Gesamtanlage liegt dabei jedoch weiterhin unterhalb des zulässigen Grenzwerts. Der gemessene Anteil des  $\text{CO}_2$  ist aufgrund der geringeren Verdünnung der Verbrennungsgase insgesamt gestiegen. Kohlenmonoxid tritt als Folge des guten Ausbrands nur in Konzentrationen im einstelligen Vol.-%-Bereich auf.

Im Vergleich zu den aus hitzebeständigem Stahl gefertigten Brennern hat sich die strömungsmechanisch relevante Geometrie der SiC-Brenner praktisch nicht geändert. Insofern sind die auftretenden Unterschiede eher auf produktionsbedingte Abweichungen bei den Randbedingungen, wie beispielsweise dem Anteil von Porosierungstoffen, abweichenden Druck- und Zugbedingungen im Ofen, geänderten Rauchgasmengen und dergleichen zurückzuführen. Kapitel 3.14 verdeutlicht die wesentlichen Änderungen der Prozessgrößen.

### **3.11 Simulation des Brennprozess zur Abschätzung der Energieeinsparung**

Um die zu erwartende Energieeinsparung durch den Einsatz der neuen Injektorbrenner abzuschätzen, wurde ein Simulationsprogramm des IZF verwendet, das den Ofenprozess nachbildet. Hierzu wurden die im Ziegelwerk gemessenen Geometriedaten und die Produktionsleistung des Ofens verwendet.

Die Produktionsleistung wurde mit  $410 \text{ t/d}$  angesetzt bei einer Schubzeit von 24 Minuten pro Tunnelofenwagen. Dies bedeutet, dass alle 24 Minuten ein Tunnelofenwagen um seine Länge ( $2,20 \text{ m}$ ) im Ofen weitergeschoben wird. Ebenso wurde die durch die Rohstoffmischung eingebrachte Energie berücksichtigt.

Der kalkulierte Energieverbrauch konnte so zu  $620 \text{ kJ/kg}$  bezogen auf die gebrannte Ware berechnet werden.

In einem weiteren Schritt wurde dann die im Ofen verbleibende Heißluft aus der Kühlzone erhöht, so dass die Verbrennungslufttemperatur im letzten Brennzonenabschnitt mit der aus der Kühlzone vorgegebenen Temperatur von ca.  $800 \text{ °C}$  vorliegt. Bei ansonsten unveränderten Randbedingungen betrug der kalkulierte Energieverbrauch  $549 \text{ kJ/kg}$ .



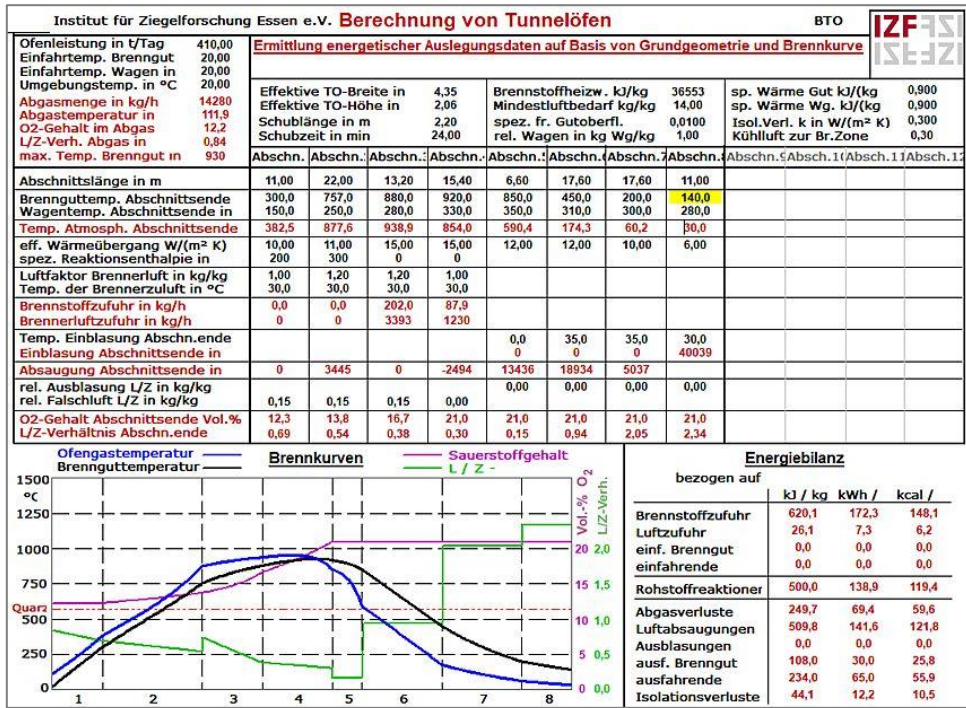


Abbildung 3.44: Simulation des Brennprozess vor dem Umbau [IZF]

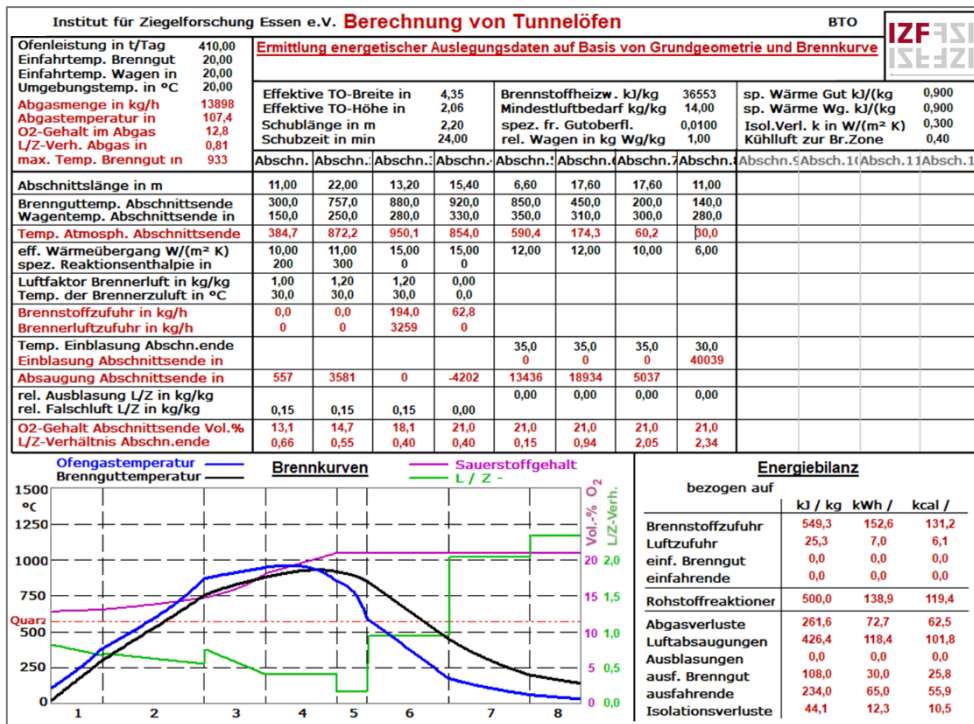


Abbildung 3.45: Simulation des Brennprozess mit vorgewärmter Verbrennungsluft aus der Kühlzone [IZF]

Dieses bedeutet eine rechnerische Energieeinsparung von 11,5 %. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei der Simulation die komplette letzte Zone des Ofens mit dieser heißen Verbrennungsluft versorgt wird und nicht, wie im Vorhaben geplant, nur eine Brennerreihe.



### 3.12 Versuche in einer Brennkammer [IZF]

Der im Antrag geplante Einbau eines Brenners in den Herdwagenofen des IZF wurde im Laufe des Projektes verworfen, da der Effekt eines Brenners zu gering war für die Größe des Ofens.



Abbildung 3.46: Brennkammer [IZF]

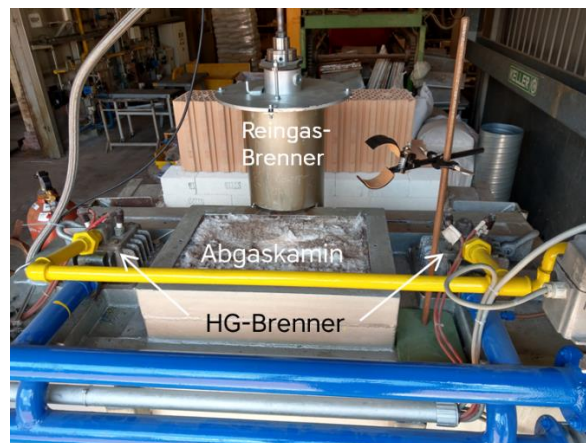


Abbildung 3.47: Anordnung der Brenner an der Brennkammer [IZF]

Aus diesem Grund wurde zur Untersuchung des Brennverhaltens des neuen Brenners eine Brennkammer aufgebaut, wie sie in **Abbildungen 3.46** gezeigt wird mit der Anordnung der Brenner wie in **Abbildung 3.47**.

Neben dem Injektorbrenner waren an der Brennkammer zwei Hochgeschwindigkeitsbrenner installiert, die die erforderliche Kammertemperatur von  $> 700\text{ °C}$  erzeugten, um so die Selbstzündung des Injektorbrenners sicherzustellen. Zusätzlich wurde durch diese Brenner die für den Reingasbrenner erforderliche Verbrennungsluft zur Verfügung gestellt, bzw. beeinflusst. Durch die an der Kammer installierten Schaulöcher konnte die Flamme beobachtet werden. Es wurden jeweils zeitlich kurze Versuche durchgeführt, da die sonst zur Verfügung zu stellende heiße Verbrennungsluftmenge für längere Versuche nicht ausgereicht hätte. Die Ergebnisse der Versuche sind in den **Abbildungen 3.48 und 3.49** dargestellt.

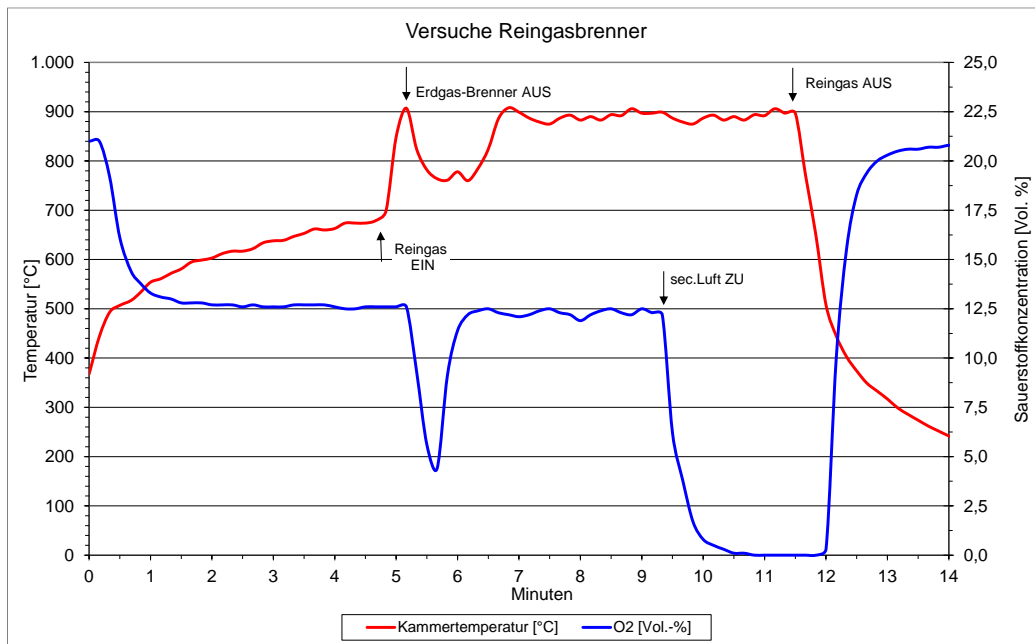


Abbildung 3.48: Temperaturverlauf und Sauerstoffkonzentration während eines Versuchs [IZF]

Die Kammer wurde zunächst mit den Hochgeschwindigkeitsbrennern aufgeheizt bis die Zündtemperatur sichergestellt war. Anschließend wurde der Injektorbrenner gezündet und die HG-Brenner gestoppt. Auch mit diesem Brenner war es möglich, die Temperatur zu halten. **Abbildung 3.48** zeigt, dass die Verbrennung 100 %-tig stattfand. Es konnte, solange die Sekundärluft zugeführt wurde, kein Kohlenmonoxid in der Brennkammer gemessen werden. Erst nach Abschalten der Sekundärluft stieg die CO-Konzentration. Der Brenner arbeitete erwartungsgemäß so lange, bis der Sauerstoff komplett verbraucht war. Während der Versuche konnte ebenfalls festgestellt werden, dass der Injektorbrenner selbst mit einer so geringen Luftmenge, wie sie durch die Kühlung der Schaugläser in die Kammer eingebracht wurde, noch brennen konnte. Die CO-Konzentration stieg dann allerdings entsprechend an.

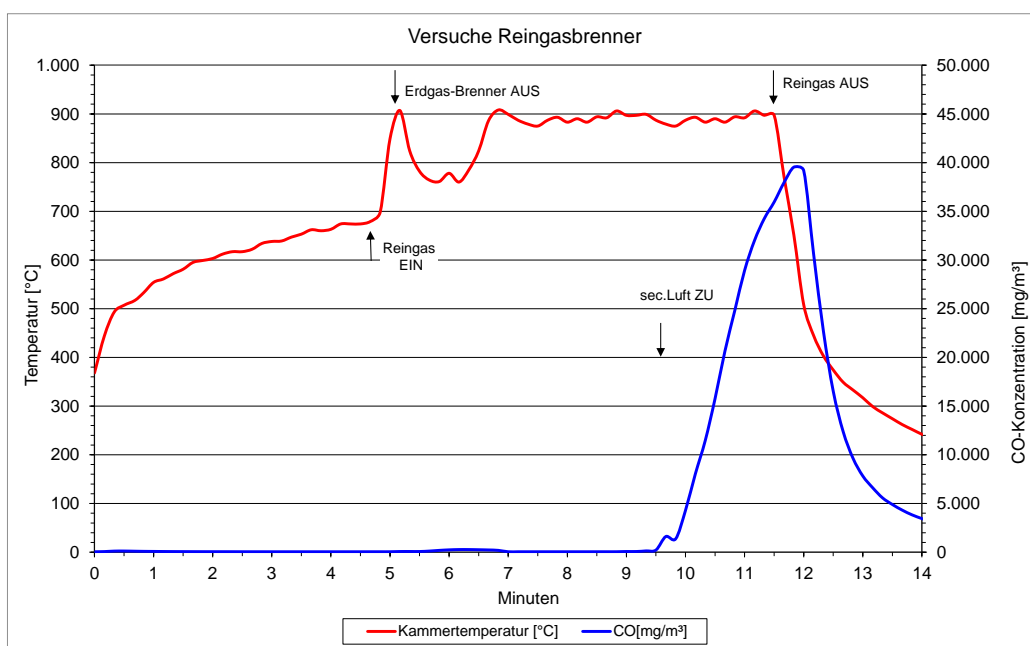


Abbildung 3.49: Temperaturverlauf und Kohlenmonoxidkonzentration während eines Versuchs [IZF]

### 3.13 Umbau und Untersuchung der Ofenanlage vor, während und nach dem Umbau [IZF, ZWB]

Die Randbedingungen für die messtechnischen Untersuchungen und der Versuchsplan wurden mit dem Anlagenbetreiber und Projektpartner Ziegelwerk Bellenberg abgesprochen und aufgestellt. Die messtechnischen Untersuchungen wurden durch das Ziegelwerk derart vorbereitet, dass während der Messkampagne eine möglichst gleichmäßige Produktion gewährleistet war, ohne großartige Format- oder Produktwechsel.

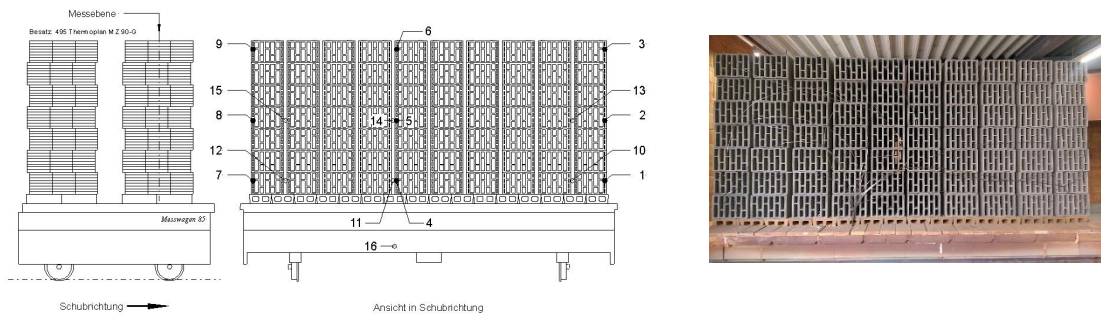


Abbildung 3.50: Anordnung der Thermoelemente am Ofenwagenbesatz [IZF]

Für die Untersuchung der Ofenanlage wurde der Besatz jeweils auf einem Tunnelofenwagen mit Thermoelementen bestückt, um so orts- und zeitabhängig die während der Ofenreise auftretenden Besatz- und Luft-/Gastemperaturen zu erfassen. Die Anordnung der Thermoelemente auf dem Ofenwagen zeigt beispielhaft **Abbildung 3.50**.

Zeitgleich mit den Messungen der Brennkurven wurden sämtliche für die Beurteilung des Prozesses und der Energetik notwendigen Luft- und Gasmengen erfasst, wie sie in **Abbildung 3.51** gezeigt werden.

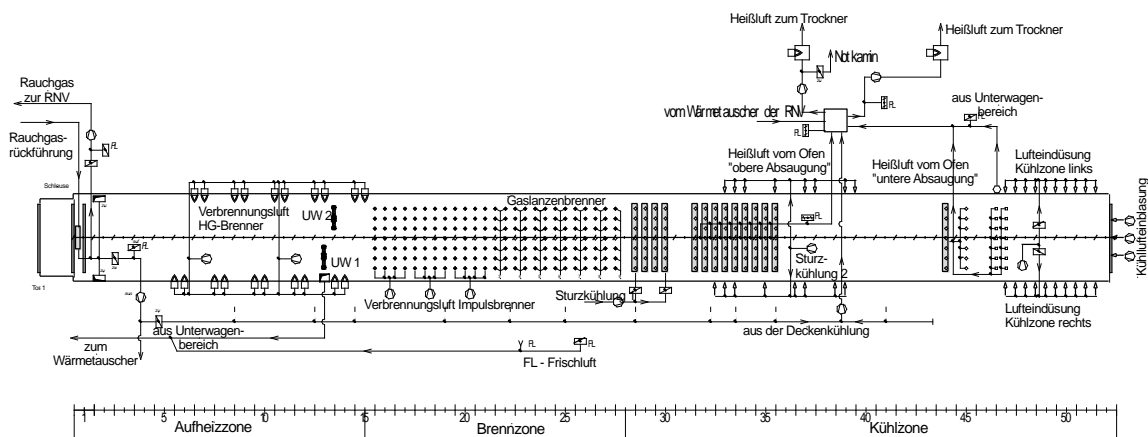


Abbildung 3.51: Luftmengenströme am Tunnelofen im Ziegelwerk Bellenberg [IZF]

Die Ergebnisse einer ersten Messung im Januar 2018 vor dem Umbau bzw. Einbau der neuen Brenner zeigen die **Abbildungen 3.52** und **3.53**.

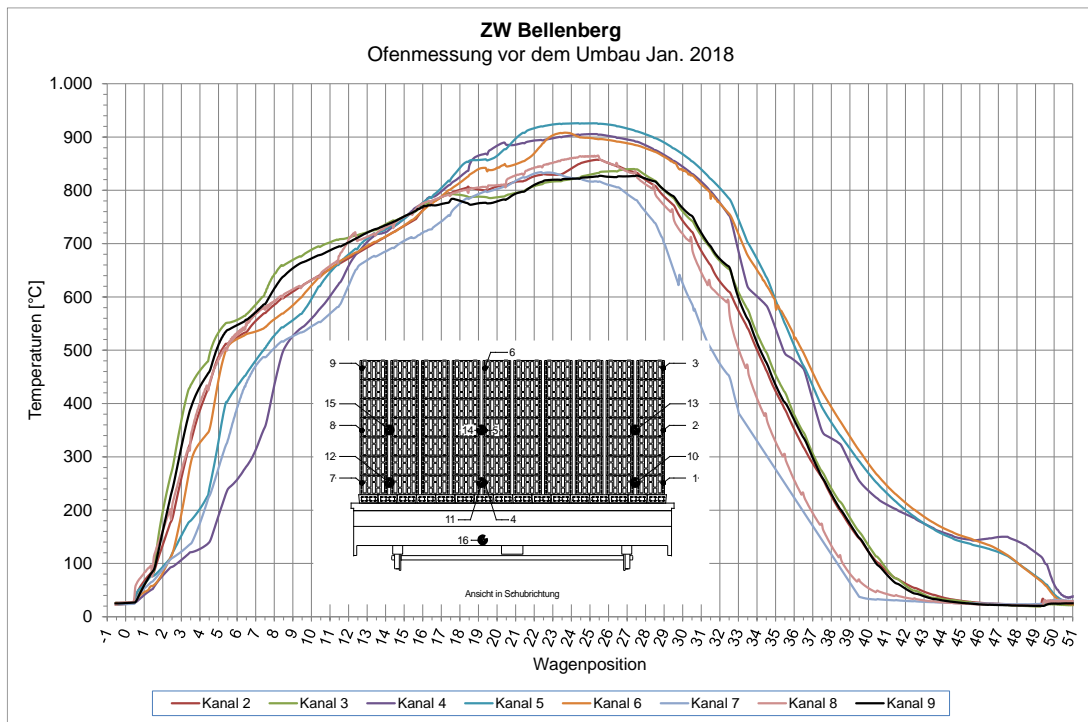


Abbildung 3.52: Brennkurven des Besatzes vor dem Umbau im Januar 2018 (Besatztemperaturen) [IZF]

Nach Einfahrt in den Ofen fächern die Temperaturkurven zunächst geringfügig auf. Dies bedingt jedoch einen unterschiedlichen Beginn des Ausschwelprozesses der organischen Porosierungsmittel, so dass die Besatztemperaturen weiter auseinanderlaufen. Erst im Bereich der beiden Umwälzer werden die Temperaturen wieder vergleichmäßig, bevor sie im Bereich der Hauptbrennzone wieder auffächern.

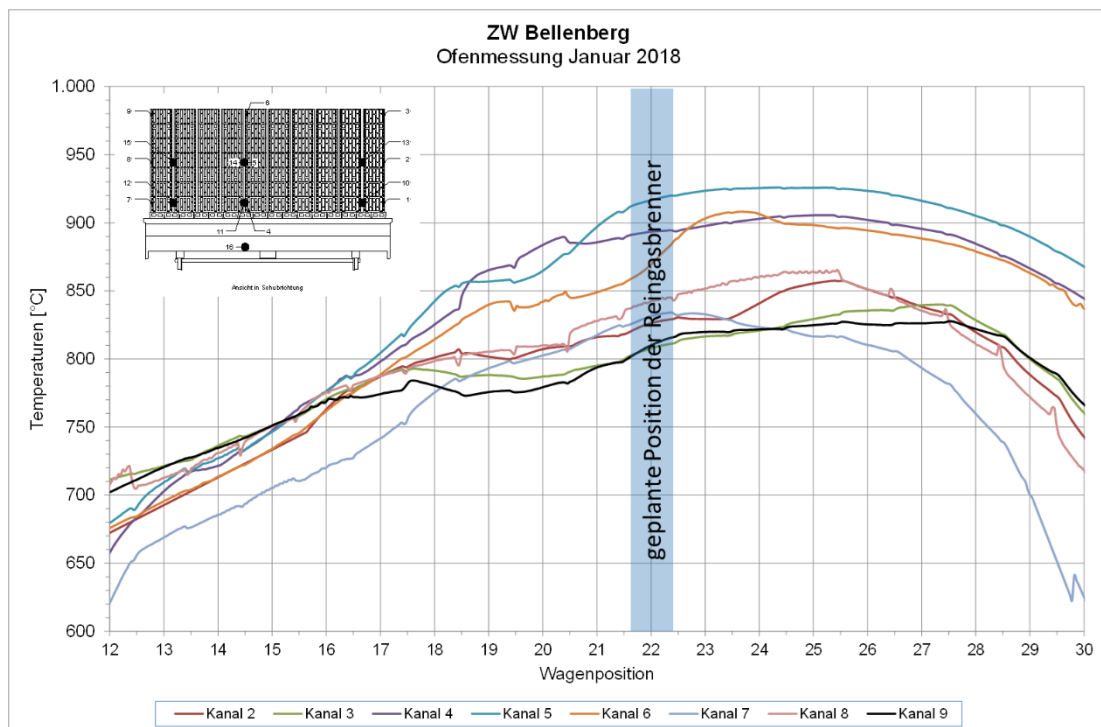
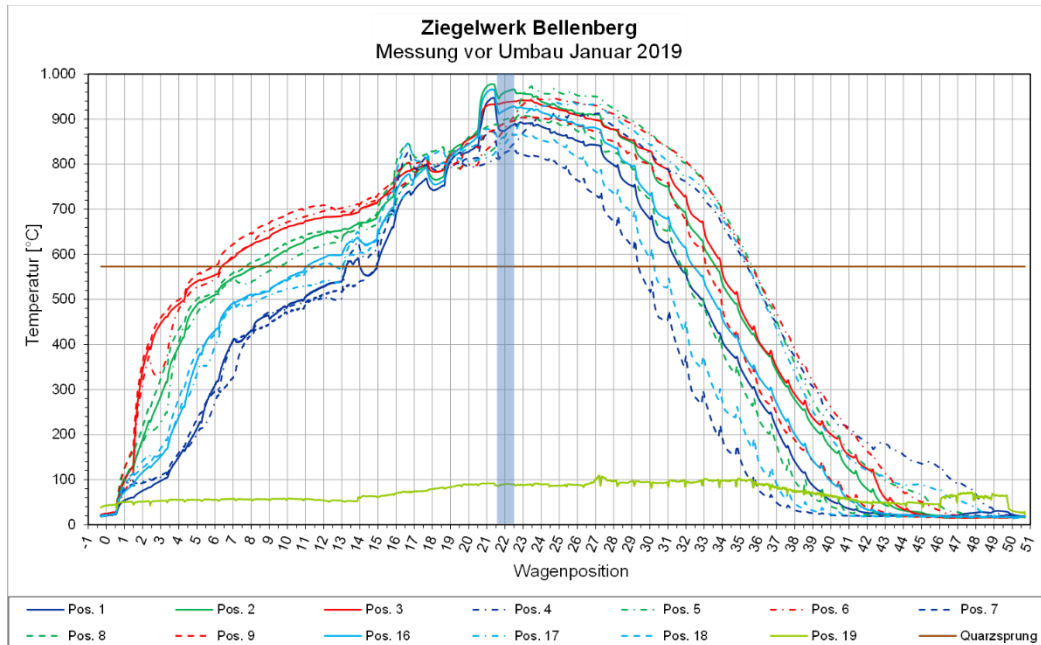
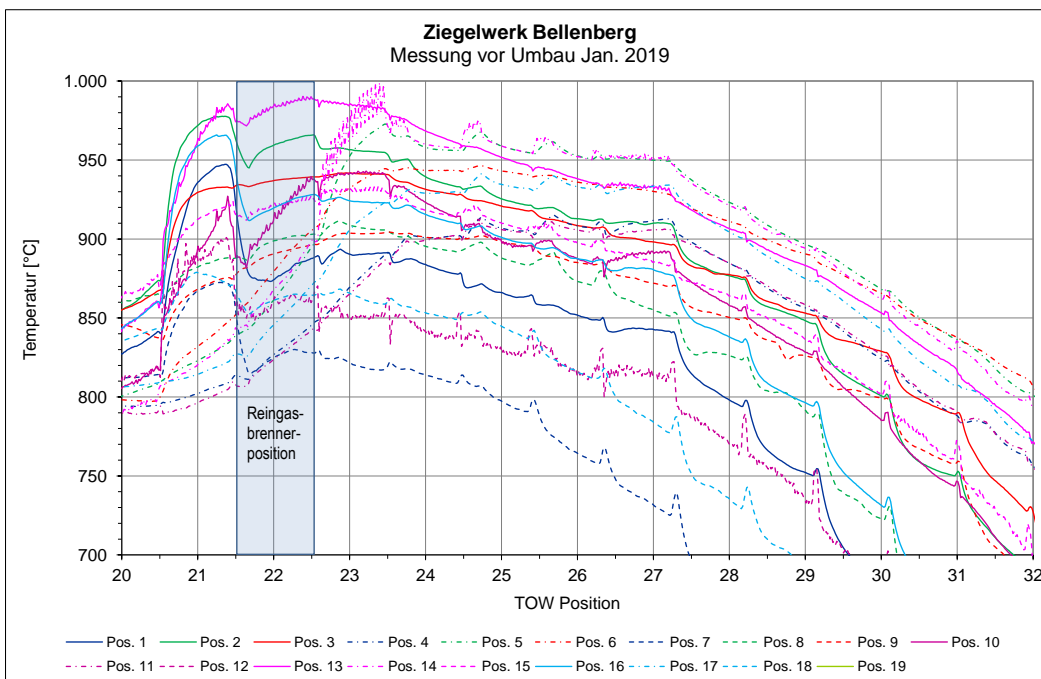


Abbildung 3.53: Ausschnitt aus den Brennkurven (Abbildung 3.52) vor dem Umbau im Januar 2018 im Bereich der Brennzone [IZF]

Eine weitere Messung wurde mit einem ähnlichen Format direkt nochmals vor dem Einbau der Brenner durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in den **Abbildungen 3.54** und **3.55** zu sehen. Es wird deutlich, dass der Besatzaufbau durch die unterschiedlichen Formate, bei sonst ähnlichen Einstellungen des Ofens, einen entscheidenden Einfluss auf die Brennkurve ausübt.



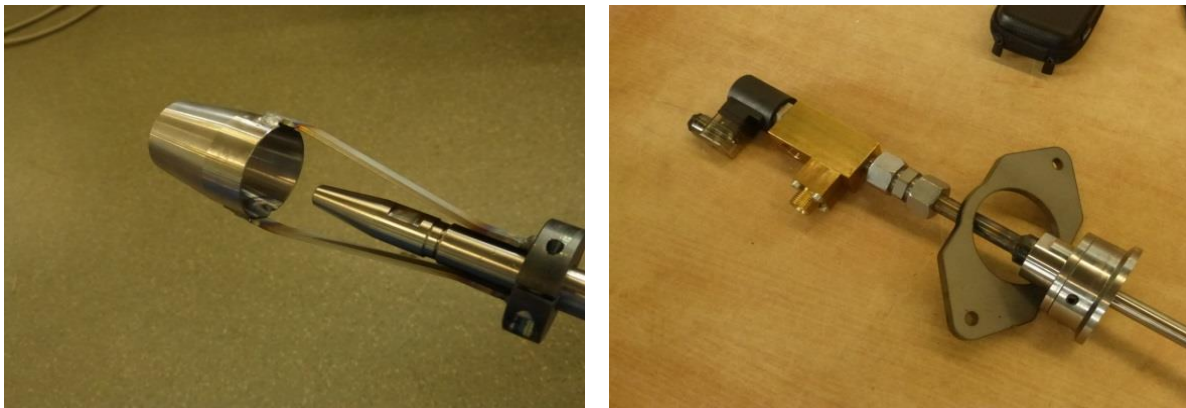
**Abbildung 3.54: Brennkurven des Besatzes vor dem Umbau im Januar 2019 (Besatz- und Gas-/Lufttemperaturen) [IZF]**



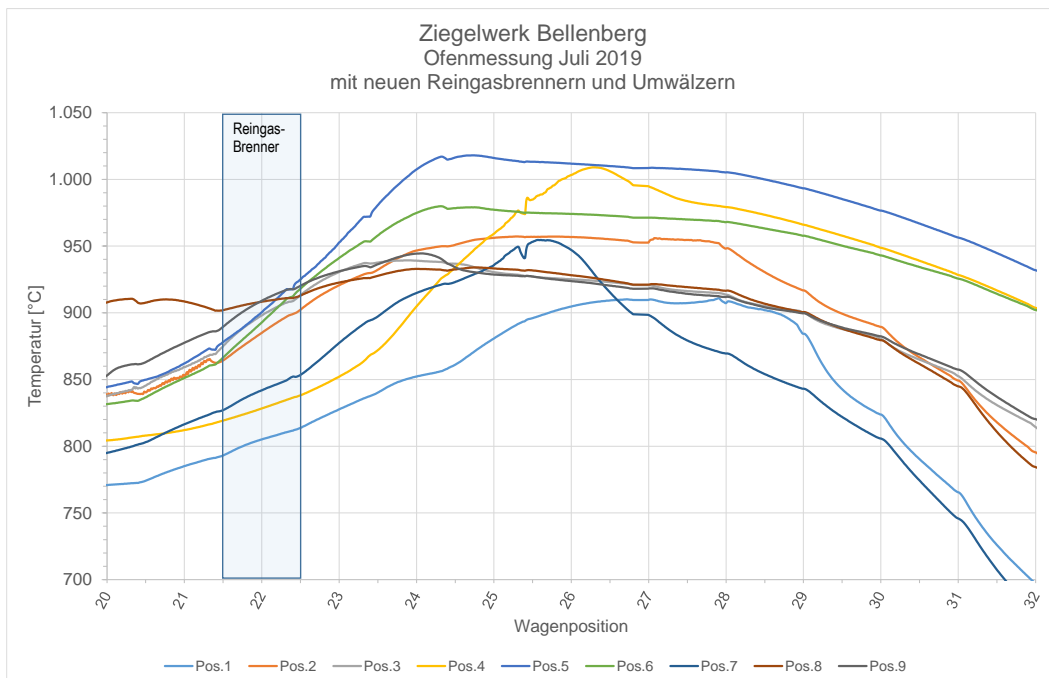
**Abbildung 3.55: Ausschnitt aus den Brennkurven (Abbildung 3.54) vor dem Umbau im Januar 2019 im Bereich der Brennzonenzone (Besatz- und Gas-/Lufttemperaturen) [IZF]**

In beiden Fällen wird die Auffächerung der Temperaturen durch die zu dem Zeitpunkt in diesem Brennzonenabschnitt vorhandenen Brenner deutlich.

Wie in **Abbildung 3.33** gezeigt, wurde eine Brennergruppe, bestehend aus 12 Einzelbrennern durch die neuen Injektorbrenner ersetzt. Das Ziegelwerk begleitete den Einbau und die Verrohrung. Die Luftzufuhr musste dem neuen Verbrennungskonzept angepasst werden. Weiterhin wurden die neuen Injektorbrenner in das Gesamtkonzept der Brenneranlage integriert, die Ofenfahrweise sowie die Mess- und Regelungstechnik angepasst und in die bestehende Ofensteuerung integriert. Die zu diesem Zeitpunkt verwendeten stahlgefertigten Brenner zeigt **Abbildung 3.56**. Bei diesen Brennern war es vorgesehen, die Venturidüse zu möglichen Einstellzwecken auf der Gaslanze zu verschieben, um das Mischungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärluft bei Bedarf zu verändern.



**Abbildung 3.56: Brennerdüsenkonstruktion und Brennerkopf der neuen Brenner [LINGL]**



**Abbildung 3.57: Ausschnitt aus den Brennkurven des Besatzes nach dem Umbau im Juni 2019 im Bereich der Brennzone (Besatztemperaturen) [IZF]**

Die neuen Injektorbrenner wurden durch das Ziegelwerk in Betrieb genommen und die Betriebsparameter bestimmt, um in den folgenden eigenen Langzeitstudien entsprechende Anpassungsmaßnahmen zu treffen.



Nach Erreichen eines stabilen Ofenbetriebs wurde ein Termin für eine weitere Messkampagne durch das IZF zur Bestimmung des Energieverbrauchs und des Einflusses auf die Brennkurven abgestimmt.

Das Ergebnis der Messungen ist in **Abbildung 3.57** zu erkennen. Der Besatz entsprach dem in **Abbildung 3.50** aufgezeigten und ist vergleichbar mit den Ergebnissen in den **Abbildungen 3.53** und **3.55**.

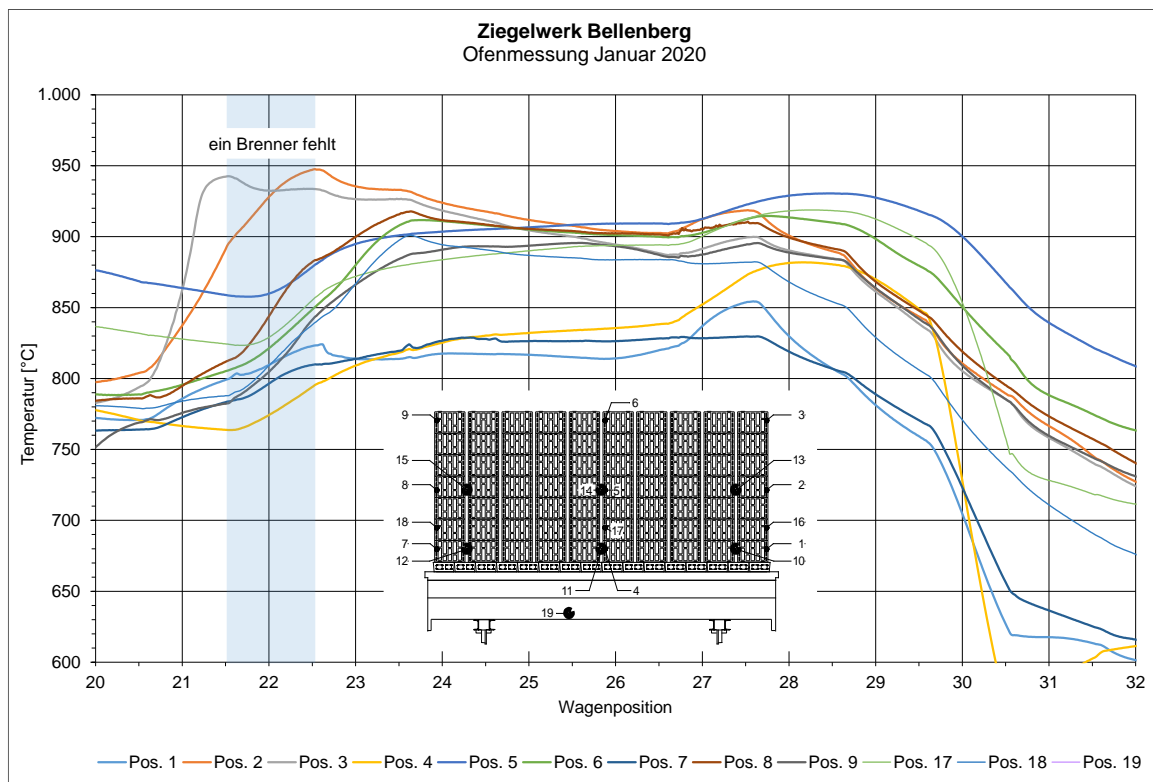
Es ist zu erkennen, dass selbst diese eine Brennergruppe für eine Vergleichmäßigung der Temperaturen sorgen kann. Die drei unteren Temperaturkurven (dunkelblau, blau, gelb) zeigen Besatzpositionen, die zu dem Zeitpunkt von den Brennern nicht ausreichend erreicht wurden. Hier ist durch Einstellarbeiten, z. B. über den Gasdruck Abhilfe zu schaffen.

Eine weitere Messung wurde im Januar 2020 durchgeführt, bei der die zunächst aus hochwarmfestem Stahl gefertigten Brenner durch entsprechende Brenner, die aus SiC gefertigt wurden, ersetzt waren. Dieses Material bietet bei den Einsatztemperaturen deutliche Vorteile gegenüber der Ausfertigung aus Stahl. Durch die verschiedenen Versuche der Fa. LINGL wurde die optimale Düsenkonstruktion gefunden, so dass auf die bei der Stahlkonstruktion gegebene Möglichkeit der Veränderung des Abstands zwischen Venturi- und Gasdüse verzichtet werden konnte. Diese Brennerkonstruktion ist in **Abbildung 3.58** zu erkennen.



**Abbildung 3.58: Brennerdüsenkonstruktion aus SiC-Keramik [LINGL]**

Die Messungen fanden in gleicher Weise statt wie zuvor beschrieben, d. h. die Thermoelemente in Besatz waren an den gleichen Positionen angebracht und ebenfalls wurden die für die energetische Beurteilung notwendigen Luft- und Gasmengenströme bestimmt. In **Abbildung 3.59** ist wiederum die Vergleichmäßigung der Temperaturen durch lediglich diese eine Brennergruppe zu erkennen.



**Abbildung 3.59: Ausschnitt aus den Brennkurven des Besatzes nach dem Umbau im Januar 2020 im Bereich der Brennzone (Besatztemperaturen) [IZF]**

Nach der Vergleichmäßigung der relativen Brenntemperaturen innerhalb der „neuen“ Brennergruppe kommt es im anschließenden Bereich der „alten“ Brenner wieder zu einer Auffächerung der Temperaturen. Gleichzeitig ist aber auch zu erkennen, welchen Einfluss der Ausfall eines einzelnen Brenners besitzt. Die beiden Temperaturkurven der Messpositionen 8 und 9 zeigen die ungenügende Vergleichmäßigung der Temperaturen an dieser Stelle.

### 3.14 Einschätzung des energetischen Einsparpotenzials

Zeitgleich mit den Messungen der Brennkurven wurden sämtliche für die Beurteilung des Prozesses und der Energetik notwendigen Luft- und Gasmengen an den Aggregaten erfasst, wie im Ofenschema in **Abbildung 3.51** dargestellt. Aus den Ergebnissen konnte dann jeweils eine Energiebilanz erstellt werden.

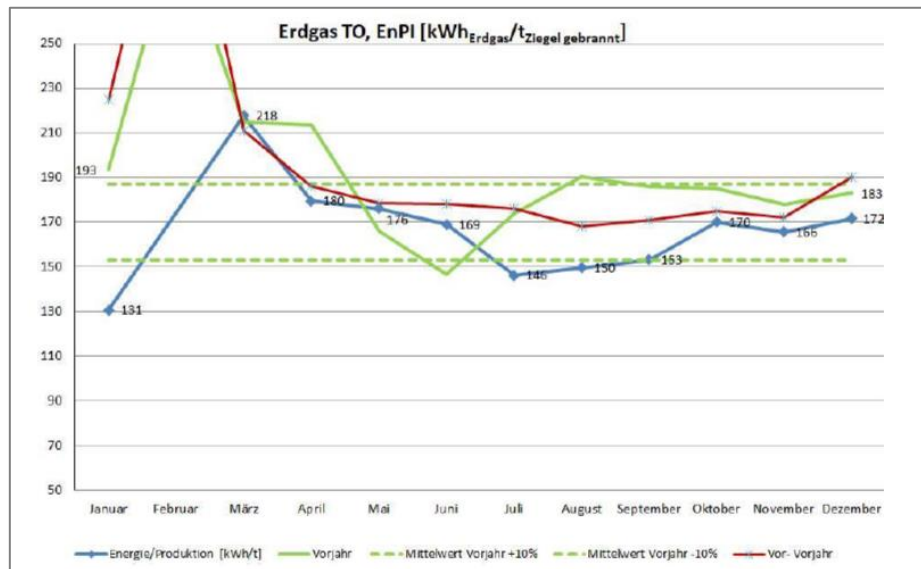
Als Auszug der kompletten Bilanzen ist in **Tabelle 3.8** der Energieverbrauch durch den Einsatz von Erdgas aufgelistet. Im Werk wird Erdgas H mit einem durchschnittlichen Heizwert von  $36,6 \text{ MJ/m}_N^3$  eingesetzt.

**Tabelle 3.8: spezifische Energieverbräuche im Vergleich (bezogen auf gebrannte Ware)**

	kJ/kg	kWh/kg
vor dem Umbau 2018	637	0,18
nach dem Umbau Juni 2019	522	0,15
nach dem Umbau September 2019	521	0,14
nach dem Umbau 2020	548	0,15



Beurteilt man den Energieverbrauch vor und nach dem Umbau, so ist rechnerisch eine **Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs von 15 %** zu verzeichnen. Hier ist jedoch anzumerken, dass während des Einbaus der neuen Brenner weitere Optimierungen am Ofen durchgeführt wurden, so dass die Summe der Maßnahmen zu dieser Energieeinsparung führte. Die Größenordnung der Einsparung deckt sich mit den zuvor durchgeführten Simulationen des Brennprozesses.



**Abbildung 3.60: Aufzeichnung des spezifischen Energieverbrauchs ZWB über drei Jahre [ZWB]**

Im Ziegelwerk Bellenberg werden durch die Ofensteuerung und die angeschlossene Mess- und Regelungstechnik verschiedene Betriebsdaten aufgezeichnet. Hier ist insbesondere der monatlich gemittelte spezifische Gas-Energieverbrauch zu nennen. In der **Abbildung 3.60** sind die Aufzeichnungen aus 2017, 2018 und 2019 zu erkennen.

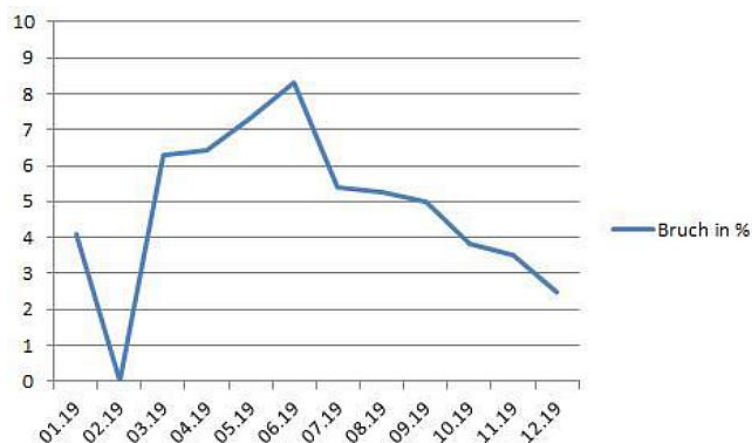
Es ist auch in diesen Langzeitaufzeichnungen zu erkennen, in welcher Weise der Einbau einer Brennergruppe mit den neuen Injektorbrennern zu einer Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs (blaue Kurve) geführt hat. Die Messwerte liegen deutlich unter denen aus 2017 (rote Kurve) und 2018 (grüne Kurve).

Wie zuvor erwähnt, wurden sämtliche relevanten Luftvolumenströme und ihre Temperaturen am, vom und zum Ofen gemessen. Im Folgenden wird die direkt durch die „obere“ und „untere“ Absaugung aus dem Ofen zum Trockner geführte Heißluftmenge aus der Kühlzone betrachtet. Nach dem Einbau der neuen Brenner zeigten die Messungen zwar eine Verminderung dieser Luftmenge, so dass eine größere Menge heißer Luft aus der Kühlzone in die Brennzona strömt. Da lediglich eine Brennergruppe ersetzt wurde, ist auch mit Hilfe einer Massenbilanz am Ofen dieser Effekt nicht aussagekräftig messbar. Er geht im Rahmen der normalen Schwankungen durch Formatwechsel oder Veränderung der Betriebsmischung unter. Bei den Messungen nach dem Einbau der neuen Brenner wurde bei den zeitlich punktuellen Messungen nicht nur eine Verminderung der dem Trockner zugeführten Luftmenge festgestellt, sondern auch eine Verminderung der über die im Verbundluftstrom installierten Brennerleistung festgestellt, so dass davon auszugehen ist, dass mit Integration der Injektorbrenner, Adaption

in die Brennzzone und die Steuerung des Ofens eine energetische Optimierung des Gesamtprozesses einherging. Während im Januar 2019 die spezifische Energie zum Trockner 1.088 kJ/kg betrug, konnten im Januar 2020 lediglich 924 kJ/kg gemessen werden und das bei verminderten Erdgaseinsatz.

Durch die Messung der in den Ofen eingebrachte Verbrennungsluftmenge konnte festgestellt werden, dass diese nach und nach vermindert wurde. Zum einen, weil die deutlich überstöchiometrische Luftmenge korrigiert wurde, aber auch weil die Verbrennungsluftmenge aus der Kühlzone zur Verfügung gestellt wurde. Während im Januar 2019 vor dem Umbau noch 6.240 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h für die Verbrennung bereitgestellt wurden, waren es im Januar 2020 nur noch 4.190 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h ohne dass es zu Reduktionerscheinungen oder unterstöchiometrischer Verbrennung kam.

Neben den durch die Institute gemessenen Werte und Untersuchungen, ist die durch das Ziegelwerk im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle festgestellten Qualitätsvergleichmäßigung der Produkte zu nennen. Festzustellen ist dieses an der aufgezeichneten Bruchquote, deren Verlauf des Jahres 2019 in **Abbildung 3.61** gezeigt wird.



**Abbildung 3.61:** Aufzeichnung der Bruchquote im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle [ZWB]

Hier wird deutlich, wie mit Installation der neuen Brenner und die Integration in die Ofenregelung, die Bruchquote gesenkt und somit die Produktqualität vergleichmäßigt werden konnten.

Das aus dem Forschungsvorhaben entstandene Produkt wird von der Fa. Lingl mit den in **Abbildung 3.62** gezeigten Kennzahlen vermarktet.

## Reingas - Injektor - Brenner

### Einsatz und Funktion

Der LINGL-ReinGas-Injektor-Brenner, entwickelt als Deckenbrenner für keramische Öfen, ist einsetzbar bei Ofenraumtemperaturen  $\geq 750$  °C. Durch die spezielle geometrische Form der Austrittsdüse wird heiße Ofenraumluft als Verbrennungsluft angesaugt, im Mischkorb mit dem Brennstoff intensiv vermischt und anschließend im Ofenraum gezündet und verbrannt. Der LRIGB arbeitet dabei energieeffizienter als herkömmliche Vergaserbrenner, da dem Ofen keine kalte Verbrennungsluft zugeführt werden muss. Mittels hoher Austrittsgeschwindigkeiten an der Mündung der Brennstoffdüse wird eine zusätzliche Umwälzung der Ofenraumluft generiert und somit eine deutlich verbesserte Temperaturverteilung erreicht.



LRIGB mit schwenkbarem Brennerkopf, Schauloch und optionalem Spülluftanschluss



Detailansicht der Brennerdüsen-Geometrie

### Technische Daten

Wärmeleistung bzw. Heizlochbelastung	40 bis 100 kW (in Abhängigkeit von Gasdruck und Einstellung)
Benötigter Heizlochdurchmesser	160 mm
Gasart	Erdgas/Propangas/Mischgase
Gasdruck	0,9 bar - 1,4 bar
Brenneraustrittsgeschwindigkeit max.	250 bis 300 m/s (abhängig vom Gasdruck)
Lebensdauer (Schaltspiele)	500.000.000 Schaltungen
Schalzhäufigkeit max.	800 Imp/min

Abbildung 3.62: Auszug aus dem Verkaufsprospekt [LINGL]

Der Gesamtprospekt ist im Anhang am Ende des Berichtes zu sehen.

### 3.15 Erkenntnisse zur wirtschaftlichen Gesamtanalyse bzgl. Aufwand und Nutzen

In Deutschland wurden im Jahre 2019 eine Menge von 6.035 Mio. m<sup>3</sup> Mauerziegel, 0,852 Mio. m<sup>3</sup> Vormauerziegel, 0,463 Mio. m<sup>3</sup> Pflasterklinker sowie 592,371 Mio. Stück Dachziegel produziert [3]. Unter der Annahme eines durchschnittlichen Energieverbrauches von nur 2,3 MJ/kg ergibt dies einen jährlichen Energieverbrauch von etwa 23.109 MJ. Bei einem Gaspreis von 3 bis 4 Cent/kWh betragen damit die jährlichen Energiekosten zwischen 192 bis 255,5 Mio. Euro. Der Umsatz der beiden Branchen betrug in diesem Jahr 1.364 Mio. Euro [3]. Die Energiekosten machen, aufgrund der zurzeit niedrigen Erdgaspreise somit einen Anteil von bis zu 25 % des Umsatzes aus. Hieraus ist aber ersichtlich, dass durchaus ein hohes Einsparpotenzial sowohl an Energie als auch an Kosten besteht. Drastische Energieeinsparungen wurden in der Vergangenheit nur durch die Einführung neuer Technologien erreicht. Einem kompletten Technologiewechsel stehen jedoch die Langlebigkeit bestehender Anlagen und die notwendigen Investitionssummen entgegen. Daher werden Konzepte benötigt, die auf die bisherigen Tunnelöfen übertragen werden können. Geht man davon aus, dass durch die Ergebnisse dieses Vorhabens in der gesamten Ziegelindustrie zwischen 10 bis 15 % an Energie gespart werden können, bedeutet dies nicht nur eine jährliche Einsparung von Energiekosten in Höhe von 20 bis 30 Millionen Euro, sondern auch eine Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 124.400 bis 185.540 Tonne pro Jahr.

### 3.16 Handlungsempfehlung bei Neuauslegung einschließlich Auslegungs- und Betriebskriterien

Der Lingl Reingas Injektor Brenner (LRGIB) ist, aufgrund der Zündtemperatur von Erdgas und der nicht vorhandenen Zündüberwachung an den Brennern, ein Deckenbrenner für keramische Öfen und ist für den Einsatz bei Ofenraumtemperaturen oberhalb von  $^3 750 \text{ }^\circ\text{C}$  vorgesehen. Die innige Mischung von Gas und Luft erfolgt unmittelbar nach dem Austritt der Flamme aus dem Brenner. Durch die spezielle geometrische Form der Austrittsdüse wird heiße Ofenraumatmosfera aus dem Deckenspalt als Verbrennungsluft angesaugt, im Mischkorb mit dem Brennstoff vermischt und anschließend im Ofenraum gezündet und verbrannt. Der LRGIB arbeitet dabei energieeffizienter als normale Vergaserbrenner, da keine kalte Verbrennungsluft dem Brenner zugeführt werden muss. Durch die hohen Austrittsgeschwindigkeiten an der Mündung der Brennstoffdüse wird eine zusätzliche Umwälzung der Ofenraumatmosfera generiert und damit eine gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht.

Bei Neuanlagen kann die Brennerleistung dem Energiebedarf angepasst werden. Die Anzahl der Brenner in einer Schürlochreihe richtet sich nach der Besatzhöhe, der Art des Besatzes, dem Besatzaufbau und dem gewünschten Umwälzeffekt.

Tabelle 3.9: Technische Daten

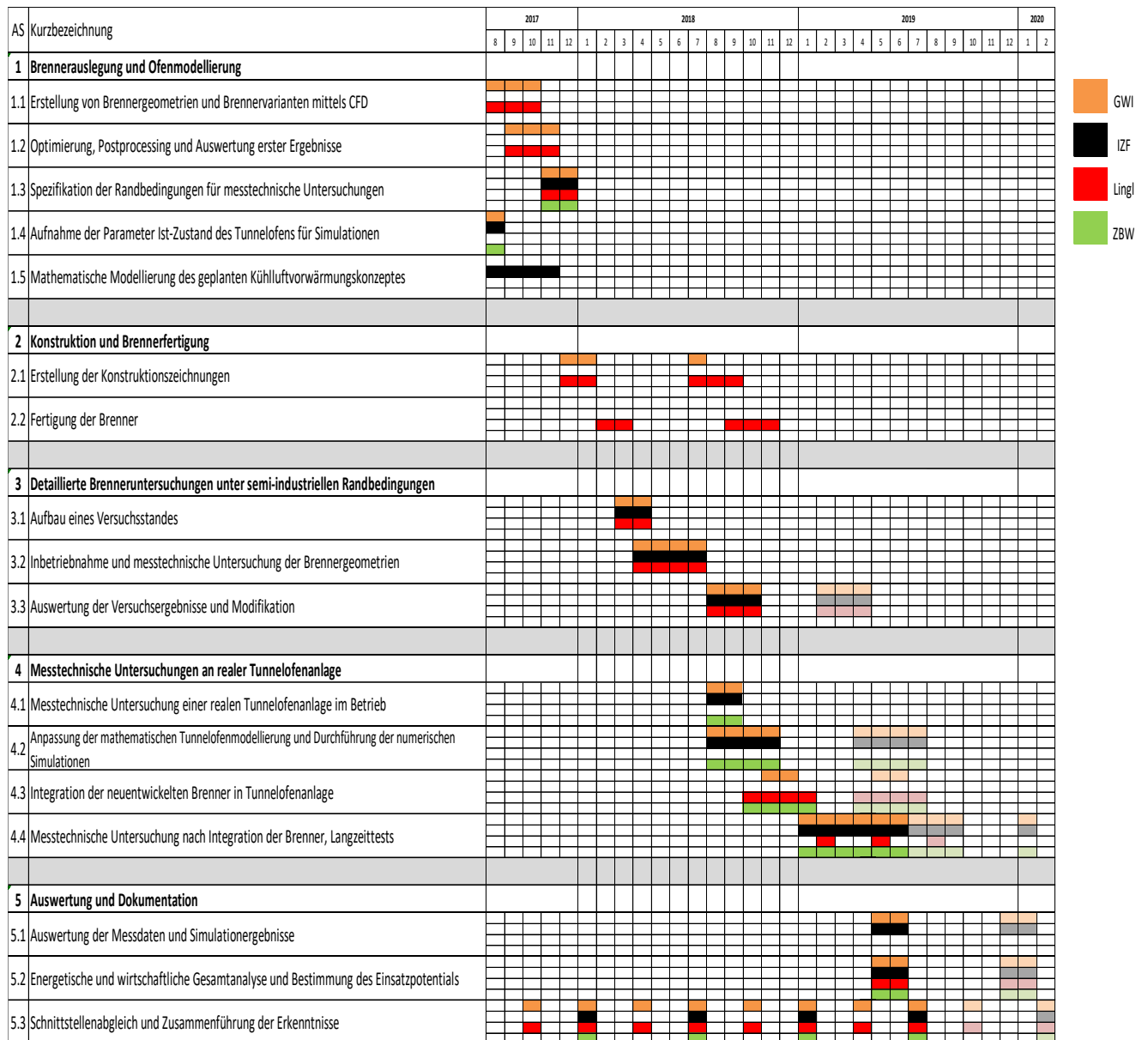
Wärmeleistung bzw. Heizlochbelastung	40 bis 100 kW
Benötigter Heizlochdurchmesser	160 mm
Gasart	Erdgas
Gasdruck	0,9 bar
Gasanschluss	DN 15
Gasmengeneinstellung	Dosierventil
Spülluftdruck	30 mbar
Spülluftanschluss	DN 15
Spülluftmengeneinstellung	Drosselklappe (am Luftverteilerrohr)
Werkstoff	SiSiC oder Metall
Brenneraustrittsgeschwindigkeit max.	250 bis 300 m/s (abhängig vom Gasdruck)
Betriebsmodi	Impulsbetrieb (stationäre nach techn. Abklärung)
Elektr. Versorgungsspannung	24 V DC

Die Gasversorgung der Brennergruppe erfolgt über die zentrale Gasleitung. Mit dem Gasmagnetventil wird die Gasversorgung geregelt. Jedem Brenner werden ein Kugelhahn, Dosierventil und ein Gasmagnetventil zugeordnet. Eine minimale Luftversorgung dient als Spülung der Injektorlanze und ist für die Verbrennung unerheblich. Die Installation der Brenner auf der Ofendecke erfolgt analog der Installation der Vergaserbrenner.

Der große Vorteil dieser Brenner ist, dass vorhandenen Öfen ohne große Umbauten umgerüstet werden können indem vorhandene Brenner ersetzt werden. Insbesondere bei Öfen, die einen "Heißluftüberschuss" aus der Kühlzone besitzen, wie es bei den Dachziegelöfen mit H-Kassettenbesatz der Fall ist, wird, neben der Nutzung vorgewärmter Verbrennungsluft, eine weitere Prozessoptimierung durch Verringerung des Überangebots an Energie im Ofen-Trockner-Verbund erreicht.

## 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Bearbeitungszeitraum wurden die Arbeiten gemäß den Arbeitspaketen durchgeführt. Die Arbeiten erfolgten entsprechend dem Arbeitsplan und teilweise darüber hinaus und waren notwendig und angemessen. Die für dieses Projekt eingeplanten Ressourcen wurden ausgeschöpft. Die angestrebten Ergebnisse wurden im Laufe des Vorhabens erreicht, allerdings mit einer 7 monatigen kostenneutralen Verzögerung, siehe angepassten Arbeitsplan in **Abbildung 4.1**. Für die durchgeführten theoretischen und praktischen Arbeiten waren die eingeplanten Mitarbeiter (Techniker und Ingenieure) der beteiligten Forschungspartner im beantragten Umfang tätig.



**Abbildung 4.1: Angepasster Zeitplan inkl. 7-monatiger kostenneutraler Verlängerung**

## 5 Fortschreibung des Verwertungsplans

Nach eingehender Prüfung der Patentwürdigkeit dieser Brenner konnte im Projektzeitraum keine Patentanmeldungen erfolgen.

Das Projekt und erste Ergebnisse wurden auf folgenden Tagungen/Messen/Konferenzen, auf Webseiten und in folgenden Zeitschriften vorgestellt und veröffentlicht:

Projektsteckbrief

[http://gwi.wvgw-config.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe\\_lfd\\_Projekte/Jahr\\_2017/Steckbrief\\_Zie-Ver.pdf](http://gwi.wvgw-config.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2017/Steckbrief_Zie-Ver.pdf)

GW I

1. Höhr-Grenzhausener Silikatkeramik Symposium	27.11.2018	IZF
58. Würzburger Ziegellehrgang	03. - 05.12.2019	IZF
IZF-Seminar 2019	19. - 20.9.2019	IZF
Workshop bei der Fa. Röben Tonbaustoffe Werk Brüggen	06. - 07.08.2019	IZF

Weiterhin wurde vom IZF im Rahmen der persönlichen Industrieberatungen zur Steigerung der Energieeffizienz, die Nutzung dieser Brenner und damit die Energieeinsparung durch vorgewärmte Verbrennungsluft propagiert. Bei Projekten im Rahmen der Förderberatung von KMU's sind diese Brenner vorgesehen, so dass die Fa. Lingl bereits zahlreiche Anfragen für das Produkt erhalten und die Fa. Wiest Bellenberg bereits außerhalb dieses Vorhabens eine weitere Brennergruppe umgerüstet hat. Weitere Umbauten bestehender Anlagen sind innerhalb des nächsten Jahres vorgesehen.

Weiterhin sind folgende Veröffentlichungen geplant:

- Abschlussbericht auf den Webseiten der Forschungspartner
- Veröffentlichung in der Ziegelindustrie International Herbst 2020
- Veröffentlichung in der Zeitschrift Prozesswärme Ende 2020/Anfang 2021
- ....

## 6 Literatur

- [1] Junge, K., Schnelltrocknung und Schnellbrand, ZI-Jahrbuch 1999, Bauverlag Wiesbaden, S. 44 – 57
- [2] Junge, K., Energieeinsparung durch Verbrennungsluftvorwärmung, ZI-Jahrbuch 2000, Bauverlag Wiesbaden, S. 78-85
- [3] Jahresbericht 2020 des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Berlin



**LRGIB**

**REINGAS - INJEKTOR - BRENNER**

**LING!**  
MADE IN GERMANY

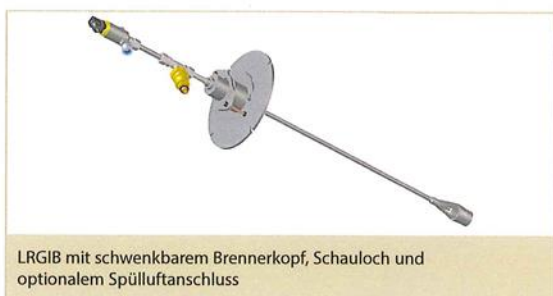




## Reingas - Injektor - Brenner

### Einsatz und Funktion

Der LINGL-ReinGas-Injektor-Brenner, entwickelt als Deckenbrenner für keramische Öfen, ist einsetzbar bei Ofenraumtemperaturen  $\geq 750$  °C. Durch die spezielle geometrische Form der Austrittsdüse wird heiße Ofenraumluft als Verbrennungsluft angesaugt, im Mischkorb mit dem Brennstoff intensiv vermischt und anschließend im Ofenraum gezündet und verbrannt. Der LRIGB arbeitet dabei energieeffizienter als herkömmliche Vergaserbrenner, da dem Ofen keine kalte Verbrennungsluft zugeführt werden muss. Mittels hoher Austrittsgeschwindigkeiten an der Mündung der Brennstoffdüse wird eine zusätzliche Umwälzung der Ofenraumluft generiert und somit eine deutlich verbesserte Temperaturverteilung erreicht.



LRIGB mit schwenkbarem Brennerkopf, Schauloch und optionalem Spülluftanschluss



Detailansicht der Brennerdüsen-Geometrie

### Technische Daten

Wärmeleistung bzw. Heizlochbelastung	40 bis 100 kW (in Abhängigkeit von Gasdruck und Einstellung)
Benötigter Heizlochdurchmesser	160 mm
Gasart	Erdgas/Propangas/Mischgase
Gasdruck	0,9 bar - 1,4 bar
Brenneraustrittsgeschwindigkeit max.	250 bis 300 m/s (abhängig vom Gasdruck)
Lebensdauer (Schaltspiele)	500.000.000 Schaltungen
Schalhäufigkeit max.	800 Imp/min

### Haben Sie Interesse? Kommen Sie gerne auf uns zu!

Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & Co. KG  
Nordstraße 2  
86381 Krumbach/Germany  
phone: +49 82 82/825-0  
fax: +49 82 82/825-510  
mail: [lingl@lingl.com](mailto:lingl@lingl.com)  
web: [www.lingl.com](http://www.lingl.com)

**LINGL**  
MADE IN GERMANY