

Untersuchung der Flammenstabilität und thermischen Strahlung in einer 1-MW_{th}-Brennkammer unter Oxyfuel-Bedingungen

M. Richter^{1*}, H. Schneider², B. Özer³, A. Maßmeyer³, J. Ströhle¹ und B. Epple¹

*marcel.richter@est.tu-darmstadt.de

1 Institut für Energiesysteme und Energietechnik, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt, Deutschland

2 Institut für Reaktive Strömung und Messtechnik, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 3, 64287 Darmstadt, Deutschland

3 Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen Universität, Augustinerbach 6, 52062 Aachen, Deutschland

Abstract

Um Skalierungseffekte einer Oxyfuel-Staubfeuerung im halbindustriellen Maßstab zu untersuchen, wird ein 1 MW_{th} Oxyfuel-Brennkammersystem, basierend auf der Geometrie bzw. den aerodynamischen Eigenschaften der kleinskaligen Brenner im 40 kW_{th} – 60 kW_{th} Bereich, mit Hilfe von CFD ausgelegt und anschließend konstruiert und verbaut. Als Basis für die Modellierung des neuen Brenners wird ein CFD-Modell verwendet, das anhand eines 40 kW_{th} Brenners validiert wurde. Beide Brenner weisen eine innere Rezirkulation auf, die wichtig für die Stabilisierung der Flamme ist. Im Wandbereich unterscheiden sich die Strömungsfelder deutlich, da es sich bei der halbindustriellen Brennkammer um eine Retrofit-Anlage handelt, die im Vergleich zu der kleineren Brennkammer nicht über eine Wandspülung verfügt. Mit dem hochskalierten Brenner sollen zukünftig Experimente bzgl. der Flammenstabilität durch Variation der Sauerstoffkonzentration, Drallzahl und Brennstoffe durchgeführt werden. Dabei kommen verschiedene optische Messverfahren, sowie ein Ellipsoidal Radiometer zum Einsatz um Spezies-, Geschwindigkeits-, Temperaturfelder, sowie die thermische Strahlung zu messen.

Einleitung

Die Oxyfuel-Verbrennung ist eine vielversprechende Technologie zur Reduktion der CO₂-Emissionen bei der industriellen Verbrennung fester Brennstoffe. Da die Verbrennung weitgehend in einer CO₂-O₂-Atmosphäre stattfindet, lässt sich das CO₂ aus dem Rauchgas verglichen mit der Luftverbrennung einfach abtrennen und für weitere chemische Prozesse verwerten, oder im tiefen Erdreich einspeichern. Durch den hohen CO₂-Anteil im Brennraum und der hohen spezifischen Wärmekapazität von CO₂ wird der Flamme die benötigte Wärmeenergie, die für eine stabile chemische Reaktion notwendig ist, entzogen. Um die Flamme zu stabilisieren kann eine höhere Sauerstoffkonzentration für die Feuerung eingestellt werden, oder durch aerodynamische Maßnahmen am Brenner eine Rezirkulationszone von heißen Gasen erzeugt werden. Ein aerodynamisch optimierter Drallbrenner, der mit einem geringen O₂/CO₂-Verhältnis eine stabile Flamme erzeugt, wurde bereits im Bereich 20 – 60 kW_{th} detailliert für den niedrigeren Leistungsbereich, für eine Methangestützte Flamme, am Institut für Reaktive Strömung und Messtechnik der TU Darmstadt (RSM) und für den höheren Leistungsbereich, auch für reine Feststoffflammen, am Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen (WSA) untersucht [1, 2, 3].

Der Einfluss der geometrischen Größe und der thermischen Last im halbindustriellen Maßstab auf die Feuerung im Oxyfuel Betrieb im Vergleich zu einer Referenz-Feuerung im Labormaßstab ist aktuell Gegenstand der Forschung. Um Skalierungseffekte im halbindustriellen Maßstab zu untersuchen, wurde am Institut für Energiesysteme und Energietechnik der TU Darmstadt ein 1 MW_{th} Oxyfuel-Brennkammersystem, basierend auf der Geometrie bzw. den aerodynamischen Eigenschaften der kleinskaligen Brenner im 40 kW_{th} – 60 kW_{th} Bereich, mit Hilfe von CFD ausgelegt und anschließend konstruiert und verbaut. Ziel ist es eine möglichst ähnliche Flamme im halbindustriellen Maßstab zu erzeugen, um eine Vergleichbarkeit mit der Referenz-Brennkammer herzustellen.

Skalierung des Oxyfuel Brenners und Dimensionen der unterschiedlichen Anlagen

Für die Untersuchung der Flamme an einer 1 MW_{th} Anlage unter Oxyfuel-Bedingungen dient als Referenz ein 40 kW_{th} und ein 60 kW_{th} Brenner, der bereits an der RWTH Aachen detailliert untersucht wurde, bspw. in [1, 3]. In Abbildung 1 ist der 40 kW_{th} Brenner dem hochskalierten Brenner der 1 MW_{th} Anlage gegenübergestellt.

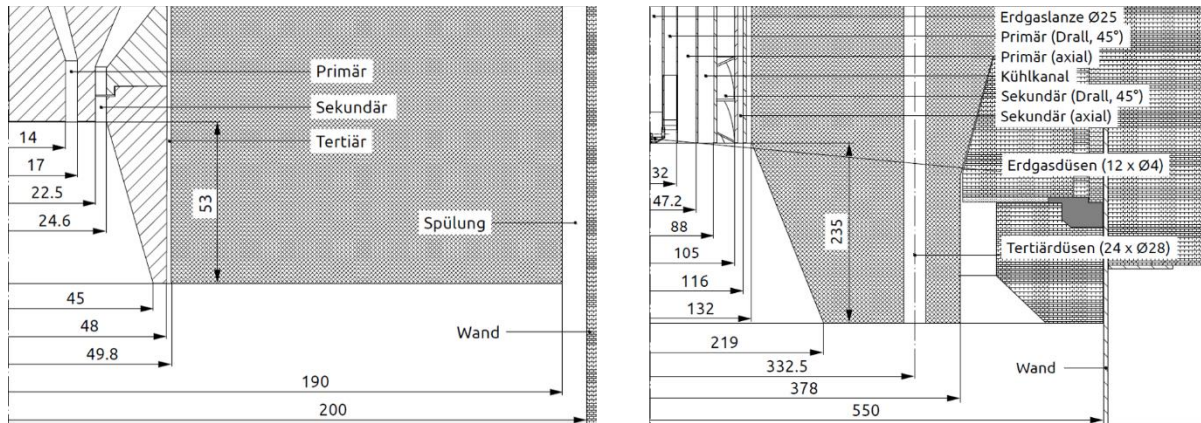


Abbildung 1. Querschnitt des oberen Bereiches der kleinskaligen Brennkammer inkl. Brenner [1] (links) und der halbindustriellen Brennkammer inkl. Brenner (rechts). Alle Maße in Millimeter.

In den ersten Schritten des Skalierungsprozesses wurde die Grundgeometrie der kleineren Brenner weitestgehend übernommen. Dies betrifft den Öffnungswinkel des Diffusors sowie das Größenverhältnis der Abstände und Dimensionen der einzelnen Luftstränge zum Brennerdurchmesser. Die Anordnung der Ringspalte für den Brennstofftransport und die Verbrennungslüfte sind für beide Brenner identisch. Der Brennstoff-Ringspalt befindet sich im Zentrum des Brenners und der Ringspalt für die Verbrennungsluft umgibt den Brennstoff-Ringspalt, sodass bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von ca. 2:1 der Sekundärluftgeschwindigkeit und Brennstofftransportluftgeschwindigkeit (primär), ein Sog entsteht und Brennstoff in die Verbrennungslüfte gezogen wird. Durch die Scherkräfte der beiden Ströme, sowie die Druckänderung durch den Diffusor entsteht eine innere Rezirkulationszone in unmittelbarer Nähe des Brenners. Diese Rezirkulationszone ist wichtig für die Flammenstabilität, da sie kontinuierlich heiße Gase, Radikale und unverbrannte Brennstoffpartikel zurück in die Reaktionszonen transportiert. Der induzierte Drall verstärkt zusätzlich den Rezirkulationseffekt und sorgt für eine bessere Durchmischung des Brennstoffes mit der Verbrennungsluft. Die Drallzahl, sowie die lokale und globale Stöchiometrie ist für den kleinen und den großen Brenner identisch. Aufgrund der höheren Last, sowie konstruktiven Gegebenheiten der Brennkammer sind Abweichungen im Vergleich zur kleinskaligen Brennkammer vorhanden. Dies betrifft die Tertiärluft, welche im großskaligen Brenner kein Ringspalt, sondern ein Düsenkranz ist. An der Brennkammer der 40 kW_{th} und 60 kW_{th} Brenner befindet sich an den Wänden ein Spülluftkanal, da es sich um höhenverstellbare Brenner handelt. Ein solcher Kanal ist bei der 1-MW_{th}-Brennkammer aus konstruktiven Gründen nicht möglich. Außerdem befinden sich zusätzliche Kanäle im großen Brenner für die Kühlung um eine Zündung innerhalb des Brenners zu vermeiden, sowie ein zusätzlicher drallbehafteter Kanal mit Verbrennungsluft für die Erdgasflamme, die zum Aufheizen der Brennkammer verwendet wird. Des Weiteren besitzt die kleinskalige Brennkammer gemauerte Wände, die beheizt werden. Die 1-MW_{th}-Brennkammer besitzt wassergekühlte Membranrohrwänden und ist im Gegensatz zu der kleineren Brennkammer nicht zylindrisch, sondern hat eine hexagonale Form.

Numerische Simulation

Um die Skalierung besser bewerten zu können wird jeweils eine CFD Simulation aufgesetzt für den 40 kW_{th} Brenner und den halbindustriellen Brenner bei 500 kW_{th}. Damit soll gezeigt werden, dass beide Brenner über eine ausreichende innere Rezirkulationszone verfügen, die genügt um bei geringen Sauerstoffkonzentrationen in der Verbrennungsluft eine stabile Flamme aufrecht zu halten. Die Drallzahl von 1, eine Sauerstoffkonzentration von 21 vol% im CO₂ und die Stöchiometrie von 0,6 in

Brennernähe (lokal) sowie 1,3 bei vollständiger Umsetzung des Brennstoffes (global) ist für beide Brenner identisch. Die kleine Brennkammer wird mit 450.000 Hexaedern vernetzt, wobei eine Simulation mit 1,3 Mio. Zellen vorausgegangen ist, aber keinen Mehrwert geliefert hat. Die 1-MW_{th}-Brennkammer ist mit 400.000 Zellen vernetzt, wobei die Tertiärdüsen mit unstrukturierten Netzen diskretisiert sind. Die halbindustrielle Brennkammer besitzt aktuell eine grobe Auflösung um schneller Betriebspunkte für den realen Betrieb zu ermitteln. In Abbildung 2 sind beide Vernetzungen gegenübergestellt.

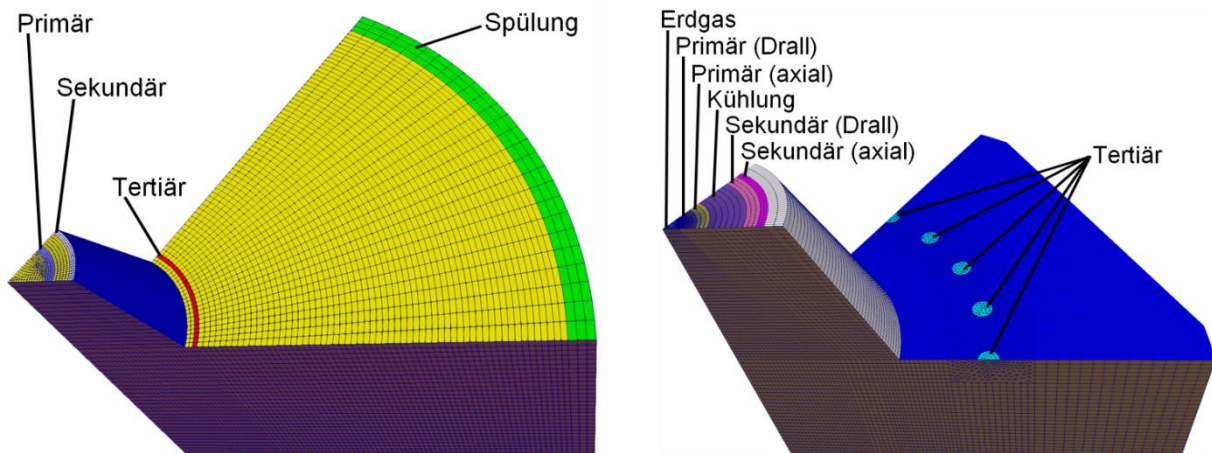


Abbildung 2. Zyklisches, numerisches Netz der kleinskaligen Brennkammer (links) und der halbindustriellen Brennkammer (rechts).

Die Massen- und Volumenströme für die beiden Simulationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Als Turbulenzmodell wird das Standard k- ϵ -Turbulenzmodell [4, 5] verwendet. Als Strahlungsmodell das Finite Volumen Diskrete Ordinaten Modell [6] und für die Gasstrahlung das Weighted Sum of Grey Gases Modell [7]. Die Partikel werden als grau betrachtet mit einem konstanten Streuungsfaktor von 0,9. Die Brennkammerwände werden ebenfalls als grau und diffus strahlend angenommen. Als Pyrolysemodell wird eine Ein-Schritt-Kinetik nach Badzioch und Hawksley [8] verwendet und für den Koksabbrand das Standard Kinetik Diffusion Limited Rate Modell nach Baum und Street [9] mit den Parametern für Oxyfuel nach Askarizadeh et al. [10]. Bei dem verwendeten Brennstoff handelt es sich um rheinische Braunkohle. Die Analysedaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Netz wurde mit ANSYS MESHING erstellt und die Simulation mit OpenFOAM durchgeführt. Die Randbedingungen bzw. Betriebspunkte der beiden Brenner sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1. Proximat- und Elementaranalyse der rheinischen Braunkohle in Massenprozent [1].

	Roh	Trocken	Trocken und aschefrei
Wasser	8,4	-	-
Asche	4,1	4,48	-
Flüchtige	46,6	50,87	53,26
Koks	40,9	44,65	46,74
C	67,4	73,58	77,03
H	4,24	4,63	4,85
O	14,7	16,05	16,8
N	0,86	0,94	0,98
S	0,3	0,33	0,34

Tabelle 2. Randbedingungen für den 40 kW_{th} Brenner [1] und die 1 MW_{th} Brennkammer bei einem 500 kW_{th} Betrieb.

	40 kW _{th} (RWTH Aachen)		500 kW _{th} (TU Darmstadt)	
	Volumen- (m ³ /h)/ Massenstrom (kg/h)	Temperatur (K)	Volumen- (m ³ /h)/ Massenstrom (kg/h)	Temperatur (K)
Kohle (kg/h)	6,5	313	81,3	289
Primär (m ³ /h)	17,6	313	96,1 (axial) 49 (drall)	298
Sekundär (m ³ /h)	26,6	333	168,5 (axial) 618,5 (drall)	383
Tertiär (m ³ /h)	1,5	333	55,1	383
Spülung (m ³ /h)	54,9	1173	-	-
Kühlung (m ³ /h)	-	-	0	289

Ergebnisse

Im Vorfeld wurde eine Simulation für den 40 kW_{th} Brenner aufgesetzt und mit den Ergebnissen in [1] verglichen. Die Ergebnisse für das Geschwindigkeitsfeld in axialer Richtung, für die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration sind in Abbildung 3 in radialer Richtung mit unterschiedlichen Abständen unterhalb des Brenner-Diffusors dargestellt.

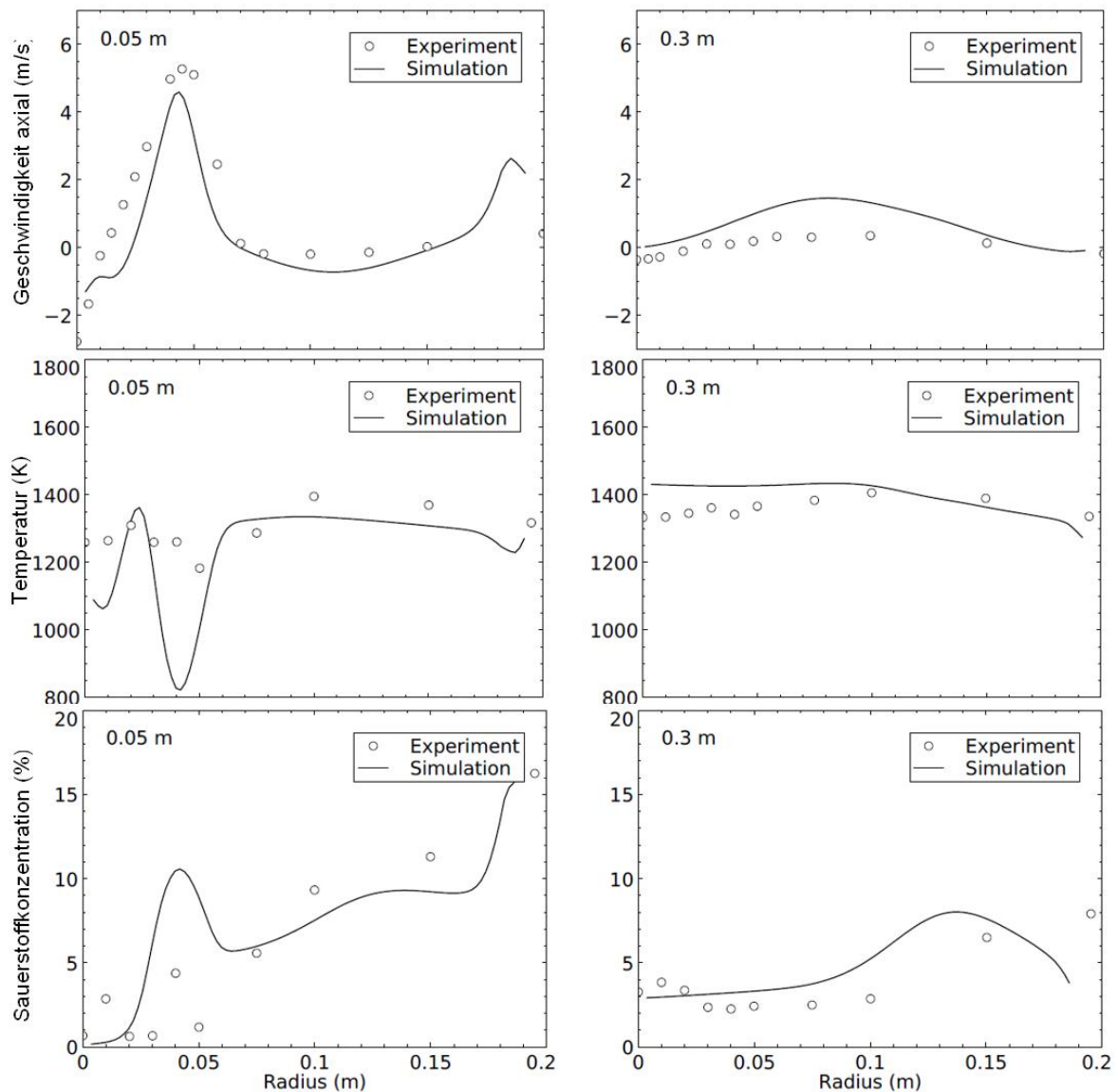


Abbildung 3. Axialgeschwindigkeit, Temperatur und Sauerstoffkonzentration über den Radius mit einem Abstand von 0,05 und 0,3 m vom Brenner-Diffusor (40 kW_{th} Oxyfuel Brenner [1]).

Der axiale Ursprung befindet sich am Ende des Diffusors. An der Brennkammerwand (radiale Position 0,2 m) kommt es zu größeren Abweichungen sowohl durch die festen Randbedingungen und einer groben Auflösung des Wandbereiches im numerischen Modell, als auch einer groben Auflösung der Messungen im Wandbereich.

Der Verlauf der Axialgeschwindigkeit bei einer axialen Position von 0,05 m stimmt mit den Messungen gut überein, weist jedoch einen Sprung nahe der Wand auf, da in der Simulation die Geschwindigkeit der Spülluft noch stärker ausgeprägt ist als bei den Messungen. Ebenso gibt es die bereits genannten Unsicherheiten in der Messung am Randbereich. Im Zentrum der Flamme wird die innere Rezirkulation von der Simulation unterschätzt. Die Temperatur bei einer axialen Position von 0,05 m ist im Flammenzentrum geringer als bei den Messungen. Der zweite Sprung, entlang des Radius, hin zu einer geringeren Temperatur ist der ausgeprägteren Sekundärluft in der Simulation geschuldet. Der Temperaturabfall nahe der Wand wird durch die Spülluft verursacht. Die Sauerstoffkonzentrationen sind bei der Simulation und den Messungen auf der Brennerachse nahe des Diffusors gering, da hier ein unterstöchiometrischer Zustand vorliegt. Bei der radialen Position von 0,05 m ist ein Sprung der Sauerstoffkonzentration zu erkennen, der durch die Sekundärluft verursacht wird. Nahe der Wand sind die Sauerstoffkonzentrationen durch die Spülluft verhältnismäßig hoch.

Die hier durchgeführte Simulation liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie die von Toporov et al. [1]. Die Modellierung des 40 kW_{th} Brenners wurde anschließend auf die 1 MW_{th} Brennkammer übertragen. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse für die Geschwindigkeit in axialer Richtung und die Temperaturkontur beider Simulationen dargestellt.

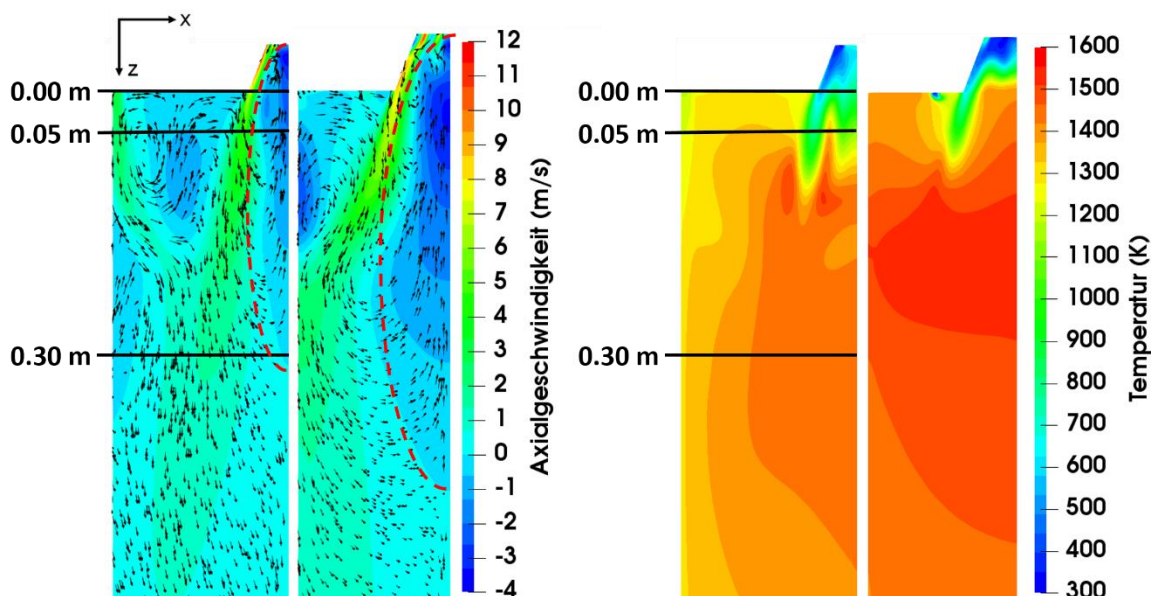


Abbildung 4. Simulationsergebnisse für das Strömungsfeld des 40 kW_{th} Brenners (links) und des halbindustriellen Brenners (rechts), sowie die Temperaturverteilung im oberen Bereich beider Brennkammern. Die Höhenangaben beziehen sich nur auf den 40 kW_{th} Brenner.

Beide Geschwindigkeitsfelder weisen eine innere Rezirkulationszone entlang der Mittelachse auf (rot gestrichelter Bereich), wobei diese Zone für die 500 kW_{th} Flamme deutlich ausgeprägter ist. Diese Rezirkulationszone ist wichtig für die Flammenstabilität. Für den halbindustriellen Brenner weitet sich die Flamme stärker auf, da sich durch den zusätzlichen Drallkanal ein stärkerer Drall insgesamt ausbildet, was auch zu einer früheren Zündung des Brennstoffes führt. Bei vorangegangenen Simulationen mit unterschiedlicher Drallzahl für 500 kW_{th} hat sich gezeigt, dass bei geringerer Drallzahl eine räumlich verzögerte Zündung stattfindet und die Flamme geringer aufgeweitet ist. Des Weiteren unterscheiden sich die Strömungsfelder im Wandbereich stark. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem 40 kW_{th} Brenner ca. die Hälfte der Gesamtluftmenge durch den Spülkanal eingetragen wird. Dieser ist bei der halbindustriellen Brennkammer nicht vorhanden wodurch eine Aufteilung der Verbrennungsluftmenge unter den Primär-, Sekundär- und Tertiärkanälen notwendig ist um ein Lambda von 0,6 im Flammenkern und ein globales Lambda von 1,3 zu erreichen. Beide Brenner weisen eine

Zündung am Ende, bzw. kurz nach dem Diffusor auf, was sich durch einen hohen Temperaturgradienten in dieser Zone erkennen lässt. Umschlossen wird dieser Bereich von der Verbrennungsluft aus den Sekundärkanälen. Die 500 kW_{th} Flamme weist für die Temperaturverteilung heißere Zonen im Flammenkern und im Wandbereich auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis der Untersuchungen eines 40 kW_{th} und 60 kW_{th} Oxyfuel Brenners wurde ein hochskaliertes Modell für eine 1 MW_{th} Brennkammer entworfen mit dem Ziel ein möglichst ähnliches Strömungsfeld mit einer inneren Rezirkulation zu erzeugen, die für eine stabile Flamme bei geringer Sauerstoffkonzentration im Oxyfuel Betrieb sorgt. Für beide Brennkammern wurde ein numerisches Netz erstellt und Simulationen durchgeführt. Die numerischen Ergebnisse des 40 kW_{th} Brenners zeigen Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten. Die Modelle für die Simulation des 40 kW_{th} Brenners wurden auf den halbindustriellen Brenner übertragen und dort ebenfalls für die Simulationen genutzt. Beide Brenner weisen eine innere Rezirkulation, sowie ein ähnliches Strömungsfeld im Brennernahbereich und eine Zündung kurz nach dem Diffusor auf. Im Wandbereich unterscheiden sich die Strömungsverläufe, da die halbindustrielle Brennkammer über keinen Spülkanal an der Wand verfügt.

Die Erkenntnisse aus der Skalierung sowie den Ergebnissen aus der Simulationen wurden bei der Konstruktion des halbindustriellen Brenners genutzt und helfen darüber hinaus bei den Einstellungen von Betriebszuständen im zukünftigen Betrieb.

In der 1 MW_{th} Anlage soll zukünftig die Flammenstabilität unter Oxyfuel-Bedingungen experimentell untersucht und der Gesamtstrahlungswärmestrom an verschiedenen Positionen der Brennkammermembranwand mit einem Ellipsoid-Radiometer gemessen werden. Weiterhin werden die Emissionen bei der Verbrennung mit einer stationären Abgasanalyse, einem Fourier-Transform-Infrarot Spektrometer (FTIR) gemessen, sowie der Ausbrand der Feststoffpartikel untersucht und Partikelgeschwindigkeiten ermittelt. Die Versuchspunkte zielen dabei auf den Einfluss verschiedener Brennstoffe, O₂/CO₂-Konzentrationen, Variationen der Drallzahl, sowie unterschiedliche thermische Lasten. Bei den untersuchten, staubförmigen Brennstoffen handelt es sich um rheinische Braunkohle, Walnussschalen und Buchenholz. Die rheinische Braunkohle dient als Referenz, da sie bei den kleinskaligen Brennern bereits detailliert untersucht wurde und somit eine bessere Vergleichbarkeit möglich ist. Ziel ist es im halbindustriellen Maßstab Einflüsse auf die Flammenstabilität unter Oxyfuel-Bedingungen zu untersuchen, sowie auf die thermische Strahlung der Flamme, die eine bedeutende Rolle in der Oxyfuel-Feuerung spielt, da CO₂ ein stark absorbierendes Gas im thermischen Spektrum ist. Außerdem soll der Einfluss der gekühlten Brennkammerwände auf die Strahlungseigenschaften untersucht werden, da die Brennkammer des WSA, anders als die halbindustrielle Anlage, über beheizte Wände verfügt. Darüber hinaus können die Ergebnisse Anhaltspunkte für die Skalierung vom Labormaßstab hin zu großtechnischen Feuerungsanlagen im höheren Megawattbereich mit einer Oxyfuel-Atmosphäre liefern.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB/TRR 129 „Oxyflame“ (215035359) finanziert.

Literatur

- [1] Toporov D., Bocian P., Heil P., Kellermann A., Stadler H., Tschunko S., Förster M., Kneer R.: *Detailed investigation of a pulverized fuel swirl flame in CO₂/O₂ atmosphere*, Combustion and Flame, 155, 605 – 618, 2008.
- [2] Nicolai H., Debiagi P., Janicka J., Hasse C.: *Flamelet LES of oxy-fuel swirling flames with different O₂/CO₂ ratios using directly coupled seamless multi-step solid fuel kinetics*, Fuel, 344, 128089, 2023.
- [3] Zabrodiec D., Becker L., Hees J., Maßmeyer A., Habermehl M., Hatzfeld O., Dreizler A., Kneer R.: *Detailed Analysis of the Velocity Fields from 60 kW Swirl-Stabilized Coal Flames in CO₂/O₂- and N₂/O₂-Atmospheres by Means of Laser Doppler Velocimetry and Particle Image Velocimetry*, Combustion Science and Technology, 189, 1751–1775, 2017.

- [4] El Tahry S. H.: *k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows*, Journal of Energy, 7, 345 – 353, 1983.
- [5] Launder B. E., Spalding D. B.: *The numerical computation of turbulent flows*, Computer methods in applied mechanics and engineering, 3, 269 – 289, 1974.
- [6] Murthy J. Y., Mathur S. R.: *Radiative Heat Transfer in Axisymmetric Geometries using an Unstructured Finite-Volume Method*, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 33, 397 – 416, 1998.
- [7] Hottel H. C., Sarofim A. F.: *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1, 1967.
- [8] Badzioch S., Hawksley P. G. W.: *Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles*, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 9, 521–530, 1970.
- [9] Baum M., Street P. J.: *Predicting the combustion behaviour of coal particles*, Combustion Science and Technology, 3, 231–243, 1971.
- [10] Askarizadeh H., Nicolai H., Zabrodiec D., Pielsticker S., Hasse C., Kneer R., Maßmeyer A.: *Numerische Untersuchung zur Relevanz von Teilmodellen für Pyrolyse und Koksabbrand in turbulenten drallbehafteten Flammen unter Oxyfuel Bedingungen*, 30. Deutscher Flammentag, 2021.