

Schlussbericht vom 30.06.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21773 N

Thema

Entwicklung flexibler Flächenbrennersysteme zur Integration von Prozessgasen und Wasserstoff in energieintensive Industrieprozesse; Kurztitel: EffiH2

Berichtszeitraum

01.01.2022 bis 31.12.2023

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1. Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
2. RWTH Aachen – Institut für Technische Verbrennung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	1
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	2
2.1	Anlass für den Forschungsantrag/ Ausgangssituation/ Stand der Forschung	3
2.1.1	Stand der Technik.....	3
3	Forschungsziele/Ergebnisse/Lösungsweg	6
3.1	Forschungsziele	6
3.2	Angestrebte Forschungsergebnisse und Lösungswege.....	6
3.2.1	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse.....	7
4	Vorgehensweise	8
4.1	Experimentelle Untersuchung.....	8
4.1.1	Untersuchungen an generischen Brennerdüsen	8
4.1.2	Experimentelle Untersuchungen an vorhandenen Flächenbrennersystemen.....	12
4.2	Simulation und Modellentwicklung	14
4.2.1	Modellentwicklung.....	14
4.2.2	Simulation und Validierung.....	17
4.3	Fertigung des Brennermodells	36
4.3.1	Versuchsergebnisse und Beurteilung.....	36
5	Ausblick	46
6	Gegenüberstellung von Forschungszielen und Forschungsergebnissen.....	47
7	Nutzen der Forschungsergebnisse	48
7.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	48
7.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU.....	48
8	Plan zum Ergebnistransfer.....	50
9	Projektplan	51
9.1	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	52
10	Danksagungen	53
11	Literaturverzeichnis.....	54

1 Zusammenfassung

Das ehrgeizige Ziel, ein fortschrittliches Brennersystem für einen Flächenbrenner zu entwickeln, das die nahtlose Integration von Prozessgasen und Wasserstoff in energieintensive Industrieprozesse ermöglicht, konnte erfolgreich umgesetzt werden. Dieses Projekt stellte hohe Anforderungen an die Entwicklung und Optimierung des Brennersystems, die durch intensive und gründliche Entwicklungsarbeit voll erfüllt werden konnten.

Im Zuge der Entwicklungsphase wurden zahlreiche innovative Ansätze und modernste Technologien eingesetzt, um ein System zu schaffen, das sowohl in seiner Effizienz als auch in seiner Umweltverträglichkeit neue Maßstäbe setzt. Besonders hervorzuheben ist die Optimierung des Brennersystems durch den Einsatz numerisch optimierter Brennerdüsen. Diese hochpräzisen Düsen wurden mit modernsten numerischen Methoden entwickelt, um die bestmögliche Leistung und Effizienz zu gewährleisten.

Die sorgfältige Abstimmung und Feinabstimmung der Brennerdüsen spielt eine entscheidende Rolle, um die hohen technischen Anforderungen zu erfüllen. Durch die präzise Steuerung der Verbrennungsvorgänge konnte eine signifikante Reduktion der Stickoxidemissionen (NO_x -Emissionen) erreicht werden. Dies ist ein entscheidender Fortschritt, da NO_x -Emissionen einen bedeutenden Umweltfaktor darstellen, der sich negativ auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit auswirken kann.

Die Ergebnisse der umfangreichen Tests und Versuchsreihen haben eindeutig gezeigt, dass das neue Brennersystem die Verbrennung von Prozessgasen und Wasserstoff mit beeindruckend niedrigen NO_x -Emissionen bewältigt. Diese bemerkenswerte Leistung ist ein Beweis für die Wirksamkeit der angewandten Optimierungstechniken und die hohe Qualität der entwickelten Brennertechnologie.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass dieses innovative Brennersystem nicht nur den aktuellen Anforderungen der energieintensiven Industrie gerecht wird, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung leistet. Die erfolgreiche Integration von Prozessgasen und Wasserstoff in industrielle Verbrennungsprozesse ist ein wichtiger Schritt in eine nachhaltigere und umweltfreundlichere Zukunft der Energieerzeugung und -nutzung.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erfüllt.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Flächenbrennersysteme kommen in vielen Industriezweigen für unterschiedliche Zwecke, z. B. zur Realisierung von Trocknungsprozessen, zur thermischen Nachverbrennung kontaminierter oder unterstöchiometrischer Abgase, oder zum Aufheizen säurehaltiger Prozessluft, zum Einsatz. Zu den Anwendungsgebieten gehören unter anderem die Baustoff-, Porzellan-, Lebensmittel-, Papier- und Lackierindustrie, sowie der Bereich der Holzverarbeitung. Im Anfahrprozess und im Anlagen-Dauerbetrieb nutzen Flächenbrenner zumeist Erdgas, Propan oder Biogas. Prozessabhängig werden während des Dauerbetriebs auch individuelle Prozessgase, bestehend aus u. a. Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO), weiteren Kohlenwasserstoffen sowie inerten Bestandteilen, verbrannt. Diese Gase weisen teilweise sehr unterschiedliche verbrennungstechnische und strömungsmechanische Eigenschaften auf (Luftzahl, Dichte, Heiz- bzw. Brennwert). Hieraus ergeben sich bereits heute eine Vielzahl verschiedener technischer Anforderungen an die Entwicklung von Flächenbrennersystemen, um gesetzliche Emissionsgrenzwerte einzuhalten und stabile Betriebsfenster zu garantieren.

Zur Einhaltung der Klimaziele muss in verschiedenen Industriesektoren der Verbrauch an fossilen Brennstoffen und der damit einhergehende Ausstoß an Kohlenstoffdioxid (CO_2) deutlich reduziert und vermehrt Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wind- oder Solarenergie sowie Biomasse genutzt werden. Mittels Elektrolyseverfahren kann z. B. durch Überschussstrom aus Solar- und Windenergie H_2 hergestellt werden, welcher entweder lokal gespeichert bzw. genutzt oder in das Erdgasnetz eingespeist wird.

Dieser Trend wird im Mittel zu einem steigenden H_2 -Anteil im Erdgasnetz führen, der jedoch bundesweit als auch an einzelnen Anlagen aufgrund der räumlich und zeitlich sehr volatilen Bereitstellung von starken Fluktuationen geprägt sein wird. Diese extreme Dynamik in der Gaszusammensetzung stellt im Allgemeinen eine große Herausforderung für technische Verbrennungssysteme dar [Lei18]. Speziell für Flächenbrennersysteme addiert sich der steigende und gleichzeitig stark fluktuierende H_2 -Anteil im Erdgas zu den bereits genannten technischen Herausforderungen. Die Verbrennung von H_2 weist ein signifikant anderes Verbrennungsverhalten auf als übliche gasförmige Kohlenwasserstoffe. Während die Beimischung kleinerer Mengen H_2 (im einstelligen Prozentbereich nach DVGW-Regelwerk G 262 [G262]) nur geringfügige Auswirkungen auf das Verbrennungsverhalten und die Emissionsbildung hat, entstehen durch den Betrieb mit größeren und variablen Anteilen von H_2 neue Herausforderungen. Durch die höhere Beimischung von H_2 ändern sich die Verbrennungstemperatur, die Schadstoffbildung, die Stabilität der Flamme, aber auch sicherheitstechnische Aspekte, wie das Risiko des Flammenrückschlags, signifikant. Beispielsweise weist H_2 je nach gewähltem Verbrennungsluftverhältnis eine um den Faktor fünf höhere laminare Brenngeschwindigkeit auf als CH_4 . Zudem sind die Temperaturen von H_2 -Flammen deutlich höher als von vergleichbaren Erdgas-Flammen, was eine erhöhte Neigung zur Stickoxidbildung (NO_x) zur Folge haben kann. Eine gängige Methode zur Reduzierung der NO_x -Emissionen ist die Abmagerung des H_2 -Luft-Gemisches. Allerdings kann dies bei sehr mageren Flammen aufgrund der starken Diffusionsneigung von H_2 zu thermodynamischen Instabilitäten führen [Ber18]. Diese, teils konträren, Effekte der Beimischung von H_2 machen die Auslegung geeigneter brennstoffflexibler Brennersysteme zu einer äußerst komplexen und anspruchsvollen Aufgabe.

Die aus den verschiedenen Anwendungsgebieten resultierenden, spezifischen Anforderungen an neue Flächenbrennersysteme erschweren eine einheitliche Entwicklung, so dass viele Anlagen teure Einzelanfertigungen sind. Um die geforderten Garantien bezüglich Emissionen, stabiler Betriebsfenster, sowie der

Bauteil-Lebensdauer für solche Einzelanfertigungen gewährleisten zu können, werden großzügige Sicherheitszuschläge einkalkuliert, die zu einer Überdimensionierung der Systeme führt.

Ein besseres Verständnis für die Auswirkung flexibler Brennstoffzusammensetzungen mit hohen H₂-Anteilen auf die Verbrennung und Emissionsbildung kann dabei helfen die Entwicklung neuer Flächenbrennersysteme zu vereinheitlichen und Sicherheitszuschläge zu reduzieren. Hierbei hat sich die Simulation mit Hilfe von 3D-CFD Programmen als unverzichtbares Auslegungs- und Analysewerkzeug bei der Entwicklung neuartiger Brennerkonzepte etabliert. Um mit Hilfe von numerischen Simulationen prädiktive Aussagen machen zu können, sind exakte Modelle zur Beschreibung der Verbrennung und Emissionsbildung in Kombination mit Turbulenz und Strahlung erforderlich. Für die nicht-vorgemischte und teilweise vorgemischte Verbrennung, wie sie üblicherweise in Flächenbrennern zum Einsatz kommt, gibt es bereits gängige Verbrennungsmodelle [Ihm08, Knu09, Knu12], die auf dem Flamelet-Ansatz basieren. Allerdings müssen diese Modelle erweitert werden, um die Brennstoffflexibilität und die besonderen Eigenschaften von H₂ berücksichtigen zu können.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist die Entwicklung und Bereitstellung geeigneter numerischer und geometrischer Modelle. Die numerischen Verbrennungsmodelle sollen die wesentlichen Effekte der Verbrennung und Emissionsbildung bei unterschiedlichen Gaszusammensetzungen abbilden können. Anhand generischer Flächenbrennerkonzepte wird überprüft wie gut diese Modelle den Einfluss kritischer Design- und Betriebsparameter von Flächenbrennern während des Anfahrvorgangs und im Dauerbetrieb für einzelne Gase wiedergeben können. Mithilfe der neuen Modelle wird ein geometrisches Modell für ein Brennermodul zur Anwendung als Flächenbrenner erstellt, welches sich für die Verbrennung verschiedener Prozessgase und H₂ eignet. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden zudem spezifische Handlungsempfehlungen für KMU abgeleitet, die diese direkt nutzen können.

2.1 Anlass für den Forschungsantrag/ Ausgangssituation/ Stand der Forschung

2.1.1 Stand der Technik

2.1.1.1 Flächenbrenner

Flächen- und Kanalbrenner werden für verschiedene Einsatzzwecke genutzt, darunter für Trocknungsprozesse für die Holzverarbeitung, die Baustoff-, Porzellan- und Lackierindustrie sowie die thermische Nachverbrennung und das Aufheizen von Prozessluft. Die Leistungsbereiche umfassen dabei je nach Anwendungs- und Industriebereich Größen von 1 MW bis hin zu 150 MW [Bue24, Fiv24, IBS24, Max24, Nor24]. Anders als in üblichen, industriellen Brennern, wird für den Betrieb von Flächenbrennern im Prozess befindliche Luft bzw. Abgase mit hohem Sauerstoffanteil zur Verbrennung genutzt. Diese Prozessluft wird durch einen hohen Gasimpuls in die Verbrennungszone gefördert. In **Abbildung 2.1.1** ist der Aufbau und die Funktionsweise schematisch dargestellt. Dazu muss jedoch, in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes, in zwei verschiedene Betriebsweisen unterschieden werden.

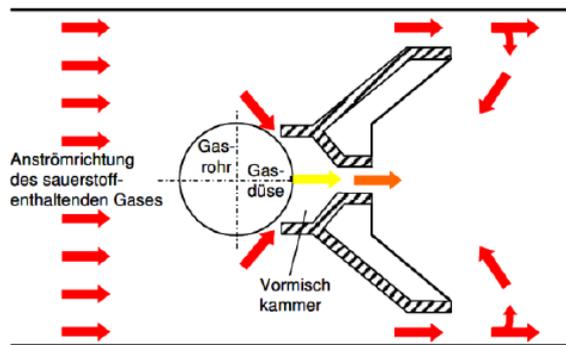


Abbildung 2.1.1.1 Schema eines Flächenbrenners [Kös04]

Bei einem O_2 -Gehalt im Oxidator von über 17 Vol.-% wird zumeist ausschließlich die Prozessluft genutzt, bei O_2 -Gehalten unter 17 Vol.-% kann eine zusätzliche Luftzufuhr zum Einsatz kommen. Die Prozessluft ist je nach Anwendungszweck kalt oder auf bis zu 400 °C vorgewärmt. [Bue20, Fiv20, IBS20, Max20, Nor20]. Als Brennstoff für Flächenbrenner kommen eine Vielzahl verschiedener Gase zum Einsatz. Für Anfahrprozesse sowie den Betrieb werden Erdgas, Propan oder LPG genutzt. In verschiedenen industriellen Anwendungszwecken werden zudem niederkalorische Gase wie Biogas oder Koksofengas für den Brennerbetrieb verwendet [Bue20, Fiv20, IBS20, Max20, Nor20].

Die Anwendungszwecke und Randbedingungen für den Einsatz von Flächenbrennern sind zahlreich. Durch eine Vielzahl unterschiedlicher Brenngase und Oxidatoren entstehen große Anforderungen an die Konstruktion und Flexibilität dieser Bauteile sowie an die Simulation der dazugehörigen Strömungs- und Verbrennungsprozesse. Speziell für den Einsatz von regenerativem H_2 oder eines Erdgas- H_2 -Gemisches mit höheren und fluktuierenden H_2 -Anteilen besteht großer Forschungsbedarf, um Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess bei Flächenbrennern zu erarbeiten und diese konstruktiv zu kompensieren. Zudem gilt es konventionelle numerische CFD-Ansätze hinsichtlich der Eignung zur Modellierung von Verbrennungsprozessen mit H_2 in Verbindung mit der Oxidatoransaugung, Teilvormischung und Brennstoffflexibilität zu untersuchen und weiterzuentwickeln.

2.1.1.2 Wasserstoffzumischung und Verbrennungssystem

Wasserstoff gilt als einer der bedeutsamsten Energieträger der Zukunft. Die Auswirkungen der Verbrennung und Zumischung von Wasserstoff in Industrie- und Haushaltsanwendungen sind vielseitig und wurden bereits anhand verschiedener Forschungsvorhaben untersucht, z. B. [Der07, Iav19, Kon09, Par08, Sch14, Tom02, Zha19]. Schwerpunkte der Untersuchung waren die Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess sowie die Schadstoffbildung bei konventionellen Industrie- und Haushaltsbrennern. Aufgrund des Umfangs der durchgeführten Untersuchungen wird im Folgenden lediglich ein Auszug wichtiger, bisheriger Erkenntnisse dargelegt.

Im Vorhaben „ H_2 -Substitution“ [Now17] wurden die Auswirkungen der H_2 -Beimischung in Erdgas-feuerungen industrieller Anlagen für verschiedene Prozesse untersucht. Der Fokus der Untersuchungen lag in den Auswirkungen auf das Verbrennungs- und Schadstoffbildungsverhalten anhand wichtiger verbrennungstechnischer Kenngrößen. Es wurden einerseits numerische Untersuchungen mittels CFD und andererseits experimentelle Untersuchungen an den Hochtemperaturöfen des GWI durchgeführt. In diesen Versuchsöfen können einzelne Brenner bei Ofenraumtemperaturen bis zu 1.600 °C sowie einer Brennerleistung bis zu 1,2 MW untersucht werden. Aus den Arbeiten geht u. a. hervor, dass für die untersuchten

handelsüblichen Brennersysteme (Vormischbrenner, Gebläse-brenner) grundsätzlich auch höhere H₂-Anteile (bis zu 50 Vol.-% wurden im Rahmen des Vorhabens untersucht) zugemischt werden können, sofern eine Überwachung und Regelung wichtiger Prozessparameter, wie etwa Leistung und Luftzahl unabhängig voneinander erfolgt und somit Änderungen der Gaszusammensetzung und H₂-Gehalte kompensiert werden.

Allerdings führt die Zumischung von H₂ tendenziell zu höheren NO_x-Emissionen speziell im Falle, dass hinsichtlich der schwankenden Gasbeschaffenheit keine Kompensationsmaßnahmen getroffen werden. Bei den untersuchten Brennern ist die gezielte Luftzuführung Bestandteil der Brennergeometrie und beeinflusst u. a. die Flammenform, Schadstoffminderung und Wärmeübertragung. Bei Flächenbrennern, wie vorher ausgeführt, wird die Luft durch den Impuls des Brennstoffeintritts in die Reaktionszone gesaugt. Schwankungen der Brennstoffzusammensetzung führen damit zu Änderungen des Brennstoffimpulses und somit der Mischungsvorgänge und des Ausbrands.

3 Forschungsziele/Ergebnisse/Lösungsweg

3.1 Forschungsziele

Der Fokus des Projektes liegt auf der Entwicklung eines flexibel arbeitenden Flächenbrennerkonzeptes für verschiedene Prozessgase und H₂. Dazu werden die folgenden Hypothesen bei der Entwicklung verfolgt:

1. Da Flächenbrenner oftmals modular aufgebaut sind, können die experimentellen und numerischen Untersuchungen zunächst an einzelnen Modulen stattfinden. Die Betrachtung einzelner, repräsentativer Module ermöglicht einen detaillierten Einblick in die Strömungs- und Verbrennungsprozesse, welcher zur Optimierung des Verbrennungsmodells notwendig ist.
2. Die Effekte unterschiedlicher Vormischung, schwankender Gaszusammensetzungen und H₂-Beimischung, können durch die Erweiterung des Verbrennungsmodells um einen Vormischgrad und eine Transportgleichung für den H₂-Mischungsbruch berücksichtigt werden. Das erweiterte Verbrennungsmodell erlaubt eine direkte Zuordnung der Emissionen zu den jeweiligen Verbrennungsmodi „vorge-mischt“ und „nicht-vorgemischt“.
3. Das entwickelte Verbrennungsmodell kann die Strömungs- und Verbrennungsvorgänge sowie die Wechselwirkungen mehrerer, verschalteter Flächenbrennermodule abbilden. Dazu erfolgen numerische Simulationen und experimentelle Untersuchungen im semi-industriellen Maßstab für eine Mehrmodulanordnung, um das Modell zu verifizieren und zu optimieren.
4. Mithilfe des erweiterten Verbrennungsmodells und der durchgeführten numerischen und experimentellen Arbeiten können wichtige Parameter für das Brennerkonzept abgeleitet werden:
 - Die Realisierung einer auf die Brenngaszusammensetzung anpassbaren (Teil-)Vormischung von Brennstoff und Oxidator. Dies kann beispielsweise über eine modulare und regelbare Gaszuführung realisiert werden, bei der verschiedene Gasdüsen mit unterschiedlichen Vormischstrecken flexibel beaufschlagt werden können. Damit sollen schwankende Gaszusammensetzungen sowie eine fluktuierende H₂-Beimischung, die in instabilen Verbrennungsvorgängen und damit höheren Schadstoffemissionen münden, kompensiert werden.
 - Die geometrische Auslegung und Konzipierung der Gaszuführung durch unterschiedliche Düsen-/Lochdurchmesser für die unterschiedlichen Gaszusammensetzungen, damit ein hoher Austrittsimpuls gewährleistet werden kann.
5. Die Skalierung der gewonnenen Erkenntnisse und ermittelten geometrischen Parameter auf industriellen Maßstab ist mithilfe des CFD-Modells durchführbar. Dies bietet die Möglichkeit der anwendungsbezogenen Demonstration und der Aufstellung von Handlungsempfehlungen. Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines brenngasflexiblen Brennerkonzeptes als Basis für die Neu- oder Weiterentwicklung von Flächen- und Kanalbrennersystemen zur effizienten und schadstoffarmen Verbrennung von Prozess- und Erdgasen inklusive H₂-Zumischung, sowie die Entwicklung und Bereitstellung numerischer Verbrennungsmodelle, die die Brenngasflexibilität von Flächen- und Kanalbrennern abbilden.

3.2 Angestrebte Forschungsergebnisse und Lösungswege

Die Nutzung der FuE-Ergebnisse erfolgt branchenübergreifend und bringt vor allem folgenden Nutzergruppen technische und wirtschaftliche Vorteile:

- Betreiber von Trocknungs- und Dampferzeugungsanlagen der Baustoff-, Porzellan-, Papier- und Lackierindustrie sowie der Holzverarbeitung (meist KMU) erhalten ein neues Modell zur Ausle-

gung eines innovativen Flächenbrenners, welcher flexibel gegenüber der Brennstoffzusammensetzung inkl. H₂ ist. Die Übermittlung von Informationen zur Modellierung und Konzeptionierung eines hinsichtlich H₂ brennstoffflexiblen Brenners trägt zur allgemeinen Akzeptanz klimaneutraler Brennstoffe wie H₂ bei Anlagenbetreibern bei und leistet so-mit einen Beitrag zur Senkung von fossilem CO₂ in den Anlagen verschiedener industrieller Branchen.

- Das entwickelte Verbrennungsmodell wird zudem für den Open-Source-Code OpenFOAM angepasst. Dadurch kann ein von lizenzierten Programmen unabhängiger Transfer der Ergebnisse in die Industrie gewährleistet werden.
- Ebenfalls kann die langfristige Wettbewerbsfähigkeit von Anlagenbauern und Komponentenherstellern für industrielle Flächen- und Kanalbrenner durch die Ergebnisse des Vorhabens gesichert werden. Die Erkenntnisse können direkt in die Entwicklung von Anlagen zum Betrieb mit variierenden Prozessgaszusammensetzungen sowie Erdgas-H₂-Gemischen ein-fließen.
- Die technische Anschlussfähigkeit der Ergebnisse wird dadurch gewährleistet, dass die er-mittelten Konzepte und Verbrennungsmodelle auch von anderen Brenner- und Anlagen-herstellern anderer Industriebranchen (z. B. Kraftwerkstechnik) übernommen werden können.
- Betreiber von H₂-Einspeiseanlagen profitieren von einer besseren Akzeptanz der Gesamttechnologie seitens der Industrie. Es besteht zudem die Möglichkeit, basierend auf den FuE-Ergebnissen, anwenderspezifische Konzepte und Anlagen zu entwickeln. Da eine Vielzahl an Industrieanlagen ganzjährig und kontinuierlich betrieben werden, entsteht eine im Vergleich zum Haushaltssektor nicht fluktuierende Absatzmöglichkeit.

3.2.1 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

In allen o. g. potenziellen Nutzergruppen sind KMU stark vertreten, so dass auch der aus der Umsetzung des FuE-Ergebnisses resultierende konkrete Nutzen in hohem Maße KMU zugute-kommt. Dieser wird sich für die Anlagenbetreiber neben der Sicherung der Produktqualität auch in der Emissionsminderung sowie einer effizienteren Fahrweise ihrer Anlagen durch das flexiblere Brennerkonzept niederschlagen. Für Anlagenbauer und Brennerhersteller werden sich Umsatzsteigerungen und die Sicherung bzw. der Zuwachs an Arbeitsplätzen durch die Nachfrage nach neuen oder modifizierten Produkten realisieren lassen. Betreiber von H₂-Ein-speisungsanlagen profitieren langfristig von erhöhten H₂-Einspeisemengen.

Zusammenfassend werden hier Lösungswege für eine Umsetzung der energiepolitischen und der Klimaschutzziele der Bundesregierung angeboten. Mit diesen Ergebnissen können sowohl die Betreiber von Industrieanlagen als auch Anlagenbauer, Komponentenhersteller und Be-treiber von Einspeiseanlagen ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Mittelständische Servicefirmen wie Ingenieurbüros können von der Umsetzung des Ergebnisses ebenfalls profitieren, wenn sie in die Adaption der Produktionsprozesse, der Umrüstungs- und Anpassungsarbeiten der Industrieanlagen einbezogen werden.

4 Vorgehensweise

4.1 Experimentelle Untersuchung

4.1.1 Untersuchungen an generischen Brennerdüsen

Zur detaillierten Untersuchung der Verbrennung turbulenter $\text{CH}_4\text{-H}_2$ -Flammen mit partieller Vormischung wurden Flammen in einem generisches Laborbrennersystem experimentell untersucht. Diese Untersuchungen dienten der Erforschung des Einflusses der Brennstoffzusammensetzung auf die Verbrennungseigenschaften sowie der Validierung des entwickelten Verbrennungsmodells. Hierfür wurde ein vorhandenes Schlitzbrennersystem vorgesehen, welches konzeptuelle Ähnlichkeit zu einem Flächenbrenner aufweist. Für die Ermittlung der Flammenstruktur, der elementare Zusammensetzung der Flamme und des Mischungsbruchs, sowie der lokalen Temperatur wurden als Messtechniken die planare laserinduzierte Fluoreszenz von OH (PLIF), die laserinduzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS), sowie Temperaturmessungen mit geeigneten Hochtemperatur-Thermoelementen vorgesehen. Die experimentellen Arbeiten erfolgten in den Teilaufgaben des Versuchsaufbaus, der Versuchsdurchführung und der Auswertung der Versuche.

4.1.1.1 Aufbau des Brennerprüfstands

Für den Brennerprüfstand wurde der am ITV bereits vorhandene Schlitzbrenner zunächst modifiziert, um geltenden Sicherheitsstandards zu entsprechen und in die Laborinfrastruktur eingebunden werden zu können. Weiterhin wurde die Sicherheitsinfrastruktur des Labors erweitert, um trotz signifikant höherer Brenngeschwindigkeiten von H_2 im Vergleich zu CH_4 und der für das menschliche Auge unsichtbaren H_2 -Flammen einen sicheren Betrieb des Brenners zu gewährleisten. Beim Start des Brennerbetriebs zeigte sich durch die Bildung einer asymmetrischen Flamme, dass der eingesetzte Schlitzbrenneraufbau optimiert werden muss, um die zugrundeliegende Ungleichverteilung der austretenden Gasströme zu beheben. Diese Ungleichverteilung konnte mithilfe eines neu entwickelten, verstellbaren Flammenhalters behoben werden, wie **Abbildung 4.1.1** zu entnehmen ist.

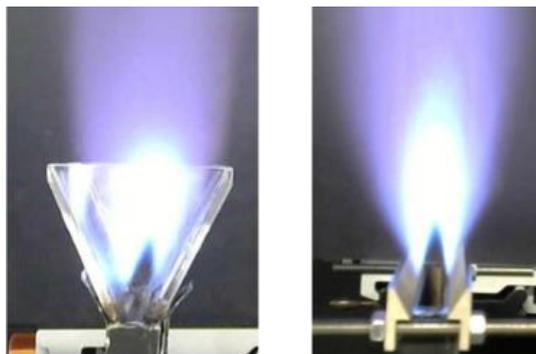


Abbildung 4.1.1: Schlitzbrennerflamme mit ursprünglicher Quarzglas-Düse (links) und neu entwickeltem Flammenhalter (rechts).

Nachdem während des Brennerbetriebs mit H_2 -Beimischung erneut Probleme bei der Stabilisierung der Flamme auftraten, die auf eine Deformation des Brennermaterials durch die hohe thermische Belastung zurückzuführen sind, folgte eine ausgiebige Problemanalyse und die Umsetzung mehrerer Lösungsansätze. Diese beinhalteten die Demontage und Neuausrichtung der inneren und äußeren Düse, die Justage der Gaszufuhrventile, die Variation der Vormischlänge und die Fertigung und eines Verlängerungsstücks

mit niedrigen Fertigungstoleranzen. Da diese Ansätze allerdings erfolglos blieben und eine Verzögerung der experimentellen Untersuchungen als nicht vertretbar erachtet wurde, wurde die Entscheidung für den Einsatz einer alternativen, am ITV vorhandenen Brennerkonfiguration getroffen, welche in **Abbildung 4.1.2** dargestellt ist.

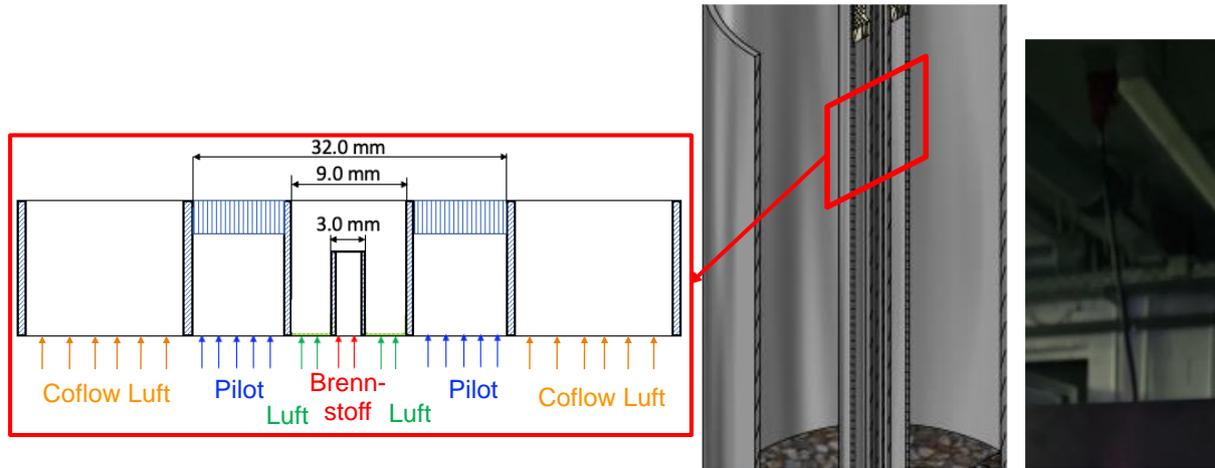


Abbildung 4.1.2: Schematische Darstellung der Stromführung des Jetbrenners (links) und Schnitt des CAD-Modells (Mitte); beispielhafte Jetbrenner Flamme (rechts).

Der eingesetzte Jetbrenner besteht aus runden, koaxial angeordneten Düsen. Die beiden inneren Düsen stellen den Brennstoff und den Oxidator, hier Luft für die Hauptflamme des Brenners bereit. Die umliegende Düse führt ein stöchiometrisches CH_4 -Luft-Gemisch, die der Stabilisierung der Hauptflamme dient. Der Coflow aus Luft dient der klaren Definition von Randbedingungen für die Flamme des Jetbrenners und der Abschirmung gegen die Umgebung. Die thermische Leistung des Brenners beträgt mit ca. 0.9-3.5 kW für die untersuchten Bedingungen nur etwa ein Achtel der thermischen Leistung des Schlitzbrenners bei äquivalenten Bedingungen, wodurch das Risiko einer Veränderung am Brenner durch einen hohen Wärmeeintrag in das Material der Düsen reduziert ist. Der Aufbau des Brenners sowie Optimierungsarbeiten zur Zentrierung der Brennstoffdüse, um eine homogene Verteilung des Gases zu erzielen wurden erfolgreich abgeschlossen.

4.1.1.2 Aufbau der Messmethoden

Während des Aufbaus der eingesetzten Messmethoden erfolgte die Erstellung und Umsetzung eines neuen Sicherheitskonzepts. Grund dafür war das besondere Gefährdungspotential eines der genutzten Lasergeräte durch das Arbeitsmedium Fluor. Während der Betriebsphase des Schlitzbrenners wurde die LIBS-Messmethode aufgebaut und erprobt, um lokal die elementaren Massenanteile in der Flamme (C, H, N, O) zu ermitteln. Die zuvor am ITV nur an laminaren Flammen validierte Messmethode und Auswerterroutine wurde anhand der turbulenten Flamme des Schlitzbrenners optimiert. Damit konnte eine Minimierung der Messungenauigkeiten erzielt werden, was eine Unterscheidung zwischen Messungenauigkeiten und turbulenten Schwankungen vereinfacht.

Aufgrund der Verzögerungen durch die bereits erwähnte Problemanalyse am Schlitzbrennersystem, sowie den Wechsel auf die Jetbrenner-Konfiguration wurde die Entscheidung getroffen, für die Vermessung der Flamme die weniger zeitintensive OH^* -Chemilumineszenz-Messmethode heranzuziehen. Diese Messmethode basiert auf der Visualisierung der bei der Verbrennungsreaktion chemisch angeregten Strahlung

von OH*. Die Chemilumineszenz-Aufnahmen geben Aufschluss über die mittleren Flammenlängen, Projektionsflächen und Oberflächendichte der Flamme. Daraus können Informationen zur Verteilung der Wärmefreisetzung der Flamme und Neigung zur Schadstoffbildung in Kombination mit Simulationen abgeleitet werden.

4.1.1.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur Festlegung der zu untersuchenden Flammenbedingungen wurde eine Stabilitätsanalyse des Jetbrenners durchgeführt. Auf dieser Basis wurden die in **Tabelle 4.1** aufgeführten Parametervariationen für die Variation der Reynoldszahl Re , der Luftzahl λ und des Wasserstoffgehalts im Brennstoff $X_{H_2,B}$ (Rest CH_4) festgelegt.

Tabelle 4.1: Untersuchte Flammenbedingungen der Jetbrenner Hauptflamme. Re , λ und $X_{H_2,B}$ und $X_{O_2,O}$ bezeichnen die Reynoldszahl der kalten vorgemischten Strömung der Hauptflamme, die Luftzahl, den molaren Anteil von H_2 in der Brennstoffmischung (Index B) und den molaren Anteil von O_2 im Oxidator (Index O). Pilotflamme ist für alle Konditionen eine stöchiometrisch vorgemischte CH_4 -Luft-Flamme mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.2 m/s

Re	λ	$X_{H_2,B}$	$X_{O_2,O}$
7.000	2.5	0 – 100 %	21 %
9.000	2.5	0 – 100 %	21 %
9.000	1.67	0 – 100 %	21 %
13.000	1.25	0 – 75 %	21 %

Abbildung 4. veranschaulicht eine Flamme mit reinem H_2 als Brennstoff und die zugehörige Chemilumineszenz-Aufnahme, welche die über 100 Einzelbilder gemittelte OH*-Verteilung der Flamme zeigt. Dieser Vergleich unterstreicht die Notwendigkeit der Betrachtung eines Flammenfront-Indikators wie OH*, da der sichtbare Anteil der Strahlung der Flamme sehr gering ist und mit der rötlichen Strahlung des Verbrennungsprodukts Wasser bei hohen Temperaturen verwechselt werden kann. Aus diesen Aufnahmen wurden die Flammenlänge, die mittlere Projektionsfläche der Flamme, sowie die Oberflächendichte unter Annahme einer annähernd rotationssymmetrischen Flamme bestimmt.

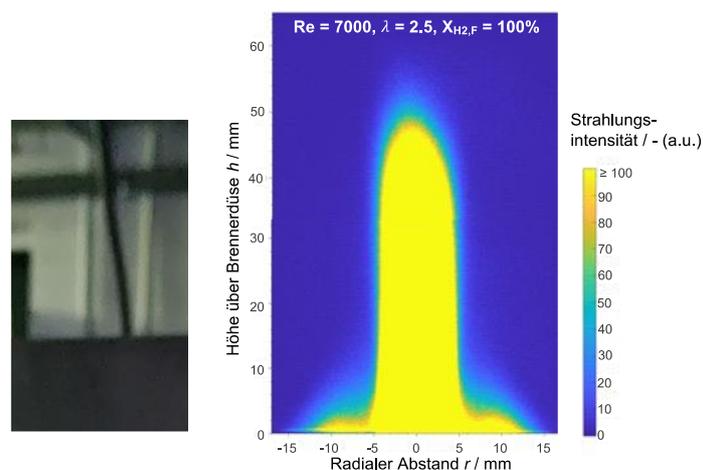


Abbildung 4.1.3.: Fotoaufnahme (links) und zugehörige Chemilumineszenz-Aufnahme einer Flamme mit molarem H_2 -Anteil im Brennstoff $X_{H_2,B} = 100 \%$, Reynoldszahl $Re = 7.000$ und Luftzahl $\lambda = 2.5$

Die Ergebnisse aus der Ermittlung der Flammenlänge L_F sind in **Abbildung 4.1..1.4 (a)** aufgeführt. Für die Flammen mit $Re = 7000$ und 9000 bei $\lambda = 2.5$ ist für $X_{H_2} \leq 0.5$ keine geschlossene Flammenfront mit eindeutiger Flammenspitze vorhanden. Dies weist darauf hin, dass die Flamme lokal verlöscht und eine unvollständige Verbrennung vorliegt. Entsprechend werden diese Konditionen für die weitere Analyse nicht betrachtet. Für alle weiteren Konditionen zeigt sich eine Verkürzung der Flamme durch Zugabe von H_2 , die auf die höhere Reaktivität von H_2 im Vergleich zu CH_4 zurückzuführen ist. Aus der Variation von $Re = 7000$ und 9000 bei gleicher Luftzahl $\lambda = 2.5$ zeigt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen den ermittelten Flammenlängen. Während allerdings mit Absenkung von $\lambda = 2.5$ bei $Re = 9000$ eine Verkürzung der Flamme bei $X_{H_2} = 0.75$ erzielt wird, resultiert eine weitere Absenkung der Luftzahl auf $\lambda = 1.67$ und Erhöhung der Reynoldszahl auf $Re = 13000$ in einer längeren Flamme. Als möglicher Grund für diesen nicht monotonen Effekt der Erhöhung von Re und Absenkung von λ auf die Flammenlänge ist das Zusammenwirken von verlängernden und verkürzenden Effekten auf die Flamme zu nennen, welche für die betrachteten Konditionen unterschiedlich stark wirken: Mit zunehmendem Re wird der Turbulenzgrad höher und resultiert in einem stärkeren Entrainment von Umgebungsluft. Durch die damit einhergehende Abmagerung des Brenngemisches verlängert sich die Flamme. Dem wirkt zum einen die Absenkung der Luftzahl von $\lambda = 2.5$ auf $\lambda = 1.67$ entgegen, da eine Annäherung an stöchiometrische Bedingungen erreicht wird, die eine Verkürzung der Flamme zur Folge hat. Gleichzeitig kommt es bei H_2 -Flammen zur Bildung von Krümmungen in der Flammenoberfläche durch thermodiffusive Instabilitäten, welche die Flammenoberfläche lokal vergrößern, die turbulente Brenngeschwindigkeit erhöhen und verkürzend wirken. Dieser Effekt wird durch einen stärkeren Turbulenzgrad zusätzlich verstärkt.

Der Vergleich der mittleren Projektionsflächen A_F in **Abbildung 4.1..1.4 (b)** zeigt, dass diese sich analog zur Flammenlänge für die untersuchten Flammen mit steigendem $X_{H_2,B}$ verringert. Dadurch wird die Wärmefreisetzung der Flamme auf eine kleinere Projektionsfläche konzentriert, was auf höhere lokale Temperaturen und damit auf eine erhöhte Bildung von thermischem NO_x hinweist. Auch hier ist kein wesentlicher Unterschied zwischen den Werten für die Variation der Reynoldszahl mit $Re = 7000$ und 9000 bei $\lambda = 2.5$ zu erkennen. Für die Variation von λ bei $Re = 9000$ weichen die ermittelten Projektionsflächen ebenfalls nicht stark voneinander ab. Die Projektionsfläche der Flamme mit $Re = 13000$, $\lambda = 1.25$ ist allerdings um den Faktor $2.1 - 5$ größer als die der anderen Flammen. Da die Flammenlänge sich nur um den Faktor $1.2 - 3.8$ erhöht, muss auch eine Zunahme der Flammenbreite vorliegen. Dies erscheint plausibel, da mit höheren Turbulenzgraden und mit höheren H_2 -Anteilen im Brennstoff eine Zunahme von Flammeninstabilitäten einhergeht, die sich in der Breite der Flamme niederschlägt.

Die Oberflächendichte der mittleren Flamme sinkt für die gemessenen Konditionen mit zunehmendem $X_{H_2,B}$ und λ . Dies ist der Verbreiterung der Flamme bei gleichzeitiger Verkürzung geschuldet. An dieser Stelle ist jedoch zu beachten, dass die angegebene Oberflächendichte sich lediglich auf die gemittelte Flammenoberfläche bezieht und keine Oberflächenzunahme durch Instabilitäten berücksichtigt werden, die mit erhöhter Reynoldszahl und H_2 -Anteil erwartet werden. Daher sollen zukünftige Untersuchungen die Bestimmung der instantanen Flammenstruktur beinhalten.

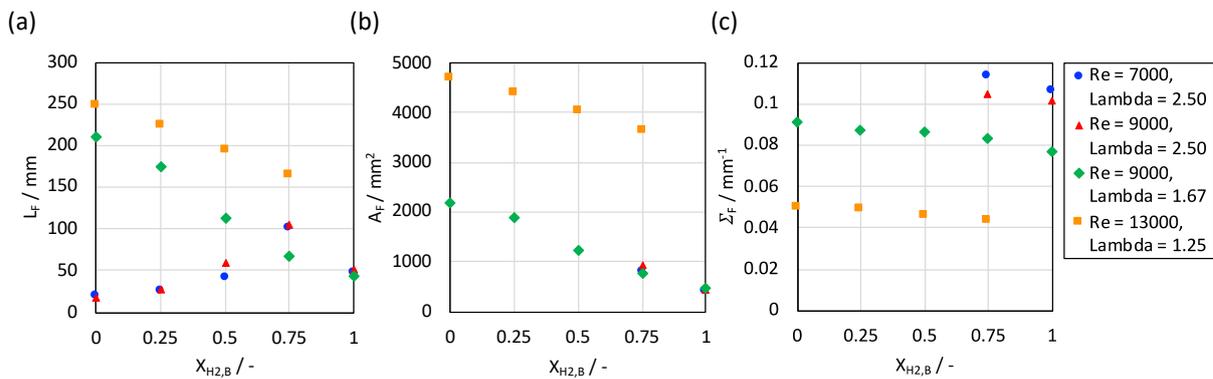


Abbildung 4.1.4: Mittlere Flammenlänge L_f (a), mittlere Projektionsfläche A_F (b) und Oberflächendichte der mittleren Flamme Σ_F (c) für die Variation des molaren H₂ Anteils im Brennstoff $X_{H_2,B}$ für die untersuchten Flammen.

4.1.2 Experimentelle Untersuchungen an vorhandenen Flächenbrennersystemen

4.1.2.1 Verwendetes Brennersystem

Grundsätzlich lassen sich Flächenbrenner in zwei verschiedene Arten zur Aufheizung und Nachverbrennung von Prozessluft unterscheiden, sog. offene und geschlossene Systeme. Bei offenen Systemen, üblicher Einsatzbereich bei Sauerstoffanteilen in der Prozessluft > 17 Vol.-%, wird ausschließlich die Prozessluft als Oxidator genutzt. Bei dieser Bauweise sitzt der Brenner nach hinten hin offen im Kanal und wird durch die Prozessluft an- und durchgeströmt.

Eine weitere Bauweise sind geschlossene Flächenbrenner. Diese Bauart findet üblicherweise Anwendung bei Prozessgasströmen mit verringertem Sauerstoffanteil. Diese Brenner sind gegenüber dem Kanal nach hinten hin geschlossen und verfügen über eine eigene Verbrennungsluftzufuhr, wodurch sich das Frisch- bzw. Abgas erst nach dem Brenner mit dem Prozessluftstrom mischt. So kann gewährleistet werden, dass selbst bei geringen Sauerstoffanteilen in der Prozessluft noch eine stabile Verbrennung erreicht wird. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen an Brennern des Standes der Technik sollen daher jeweils ein geschlossener sowie ein offener Flächenbrenner am Versuchsofen des GWI untersucht werden.

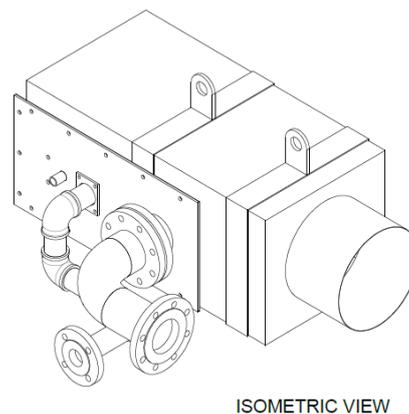


Abbildung 4.1.5: Konzept des Versuchsbrenners mit geschlossener Bauweise (Quelle: Seibold + Comtherm)

Der Testbrenner verfügt über einen Gasstutzen sowie einen Verbrennungs- und einen Prozessluftstutzen. Zur betriebsnahen Anströmung des Brennermoduls wurde zudem ein Kanalabschnitt gefertigt. Der Brenner wurde in die neue Ofenwand eingebaut und mit Feuerfest- und Faserungsmaterial fixiert.

4.1.2.2 Aufbau des Versuchsofens

Das GWI verfügt über mehrere Versuchsofen, an welchen Brenner verschiedener Geometrien und Leistungsklassen untersucht werden können. Die vorhandenen Versuchsofen sind jedoch hinsichtlich der maximalen Dimensionen der Brenner, bedingt durch eine begrenzte Öffnung in der Ofenwand, eingeschränkt. Der Ofen ist jedoch modular aufgebaut, wodurch einzelne Komponenten wie die Brennerstirnwand ausgetauscht werden können. Für die Montage eines Flächenbrenners muss eine gänzliche neue Stirnwand gefertigt werden inkl. Feuerfestauskleidung. Diese ermöglicht einerseits die Montage des Brennermoduls im Ofen sowie andererseits eine gleichmäßige großflächige, Anströmung vorgewärmter Luft für die Oxidation des Brennstoffs. Für die Durchführung der Messreihen am GWI wurde daher die Förderung der Anschaffung der neuen Ofenwand beantragt. Diese Ofenwand ermöglicht durch die besonders große Öffnung (ca. 1 m x 1 m, siehe **Abbildung 4.1.6**) die Montage großflächiger Brennermodule wie sie bei Flächenbrennern zum Einsatz kommen.

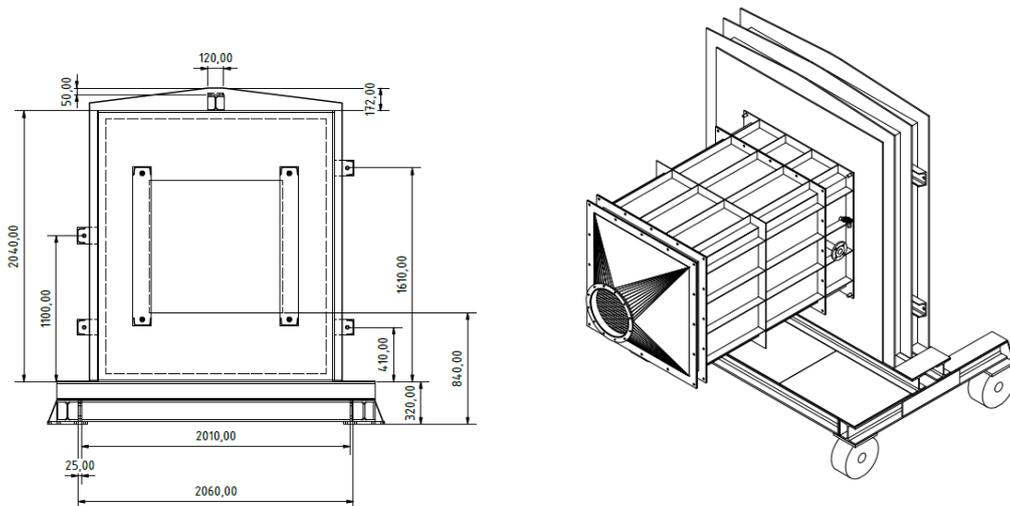


Abbildung 4.1.6: Zeichnung der Ofenstirnwand mit vergrößerter Öffnung (Quelle: GWI)

Die Hochtemperaturversuchsanlage des GWIs (siehe. **Abbildung 4.1.7**) weist die Maße 4 m x 1,2 m x 1 m auf und kann bis zu einer maximalen Temperatur von 1.600 °C betrieben werden. Durch die am GWI befindlichen Gasmisch- und Regelungsanlagen können eine Vielzahl verschiedener Gas- und Oxidatorzusammensetzungen sowie unterschiedliche Betriebszustände (Temperaturen und Luftzahlen) untersucht werden.

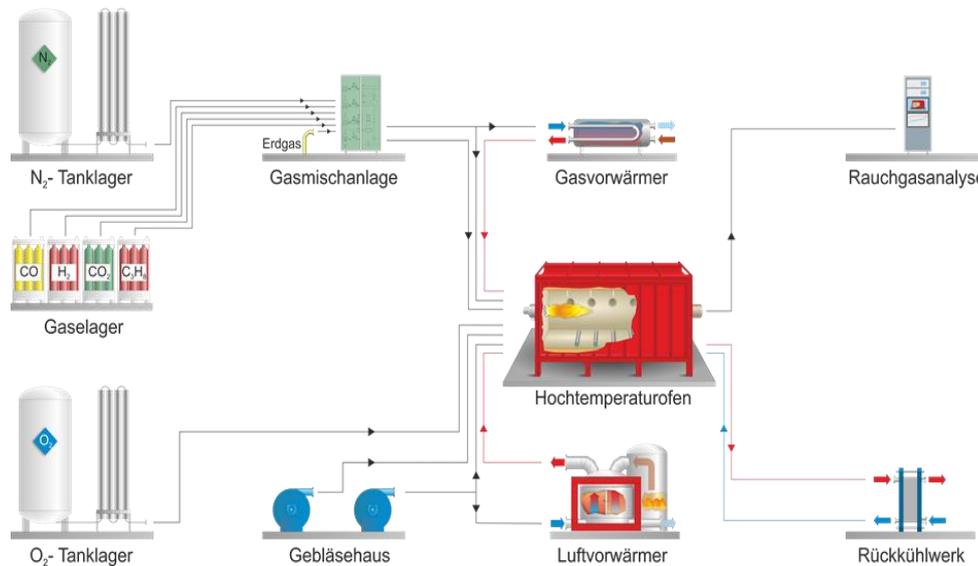


Abbildung 4.1.7: Schema der Hochtemperaturversuchsanlage „Roter Ofen“ des GWI (Quelle: GWI)

4.2 Simulation und Modellentwicklung

4.2.1 Modellentwicklung

Die Beimischung von Wasserstoff zu Methan schafft aufgrund unterschiedlicher Verbrennungseigenschaften eine Reihe von Herausforderungen. Da RANS-Simulationen zur Abbildung der besonderen Effekte, welche bei der Verbrennung von Wasserstoff auftreten, nicht ausreichen, werden Verbrennungsmodelle für Large Eddy Simulationen (LES) entwickelt und kontinuierlich erweitert. Der für die Modellierung relevanteste Aspekt ist die hohe Diffusivität von Wasserstoff im Vergleich zu Methan und anderen Reaktanden sowie im Vergleich zur thermischen Diffusion. Diese Eigenschaft wird insgesamt als differentielle Diffusion bezeichnet. Um hohe Stickoxid-Emissionen zu vermeiden, eignen sich vor allem magere, vorge-mischte Wasserstoffflammen für technische Anwendungen. Allerdings kann es besonders bei diesen aufgrund der differentiellen Diffusion zu thermo-diffusive Instabilitäten kommen. Die Modellierung der Instabilitäten ist von großer Relevanz, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Flammenstruktur, die Temperaturverteilung und die Brenngeschwindigkeit haben.

4.2.1.1 Modellvalidierung für laminare Flammen

Ein entsprechendes Verbrennungsmodell nach Regele et. al. [Reg13] wurde in einen Strömungs-Löser implementiert und validiert. Die Implementierung erfolgte in OpenFOAM, einem Open Source Code für Strömungsprobleme, mit welchem unter anderem auch komplexe Geometrien simuliert werden können. Durch den modularen Aufbau und die öffentliche Zugänglichkeit des Codes wird eine Wiederverwendbarkeit der Implementierung gewährleistet. Die Validierung erfolgt zunächst an vorgemischten 1D Flammen, wobei die Ergebnisse des implementierten Modells mit dem institutseigenen Chemielöser FlameMaster verglichen werden. **Abbildung 3**, zeigt den Vergleich zwischen den beiden Ergebnissen jeweils für ein Brennstoff-Luftverhältnis $\phi = 0.4$ und $\phi = 0.8$. Zunächst wird deutlich, dass die Entmischung, welche durch die differentielle Diffusion hervorgerufen wird in beiden Fällen durch ein Absinken des Mischungsbruches Z abgebildet wird. Es kann zudem gezeigt werden, dass der Effekt wie erwartet stärker ausgeprägt ist für ein niedrigeres Brennstoff-Luftverhältnis von $\phi = 0.4$.

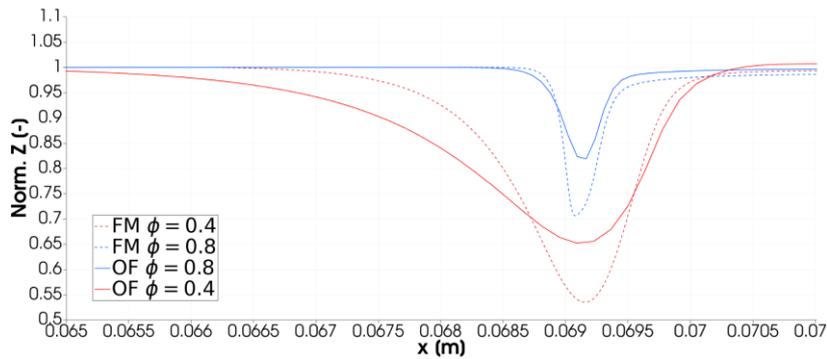


Abbildung 3.2.1: Vergleich des Mischungsbruchs Z zwischen Chemielöser (FlameMaster, FM) und Regele-Modell (OpenFOAM, OF) für 1D Simulation mit $\phi = 0.4$ und $\phi = 0.8$.

Insgesamt wird der Entmischungseffekt vom verwendeten Verbrennungsmodell leicht unterschätzt. Dies zu korrigieren wird Gegenstand weiterführender Modellentwicklungen sein. Der nächste Schritt beinhaltet die Validierung des Modells für laminare 2D Flammen mit DNS-Daten. Hier wird die Validierung für ein Brennstoff-Luftverhältnis von $\phi = 0.8$ gezeigt.

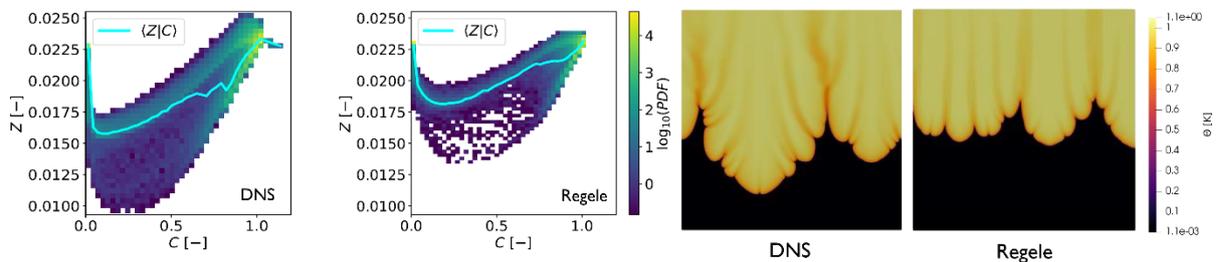


Abbildung 4.2.2: Vergleich von gemeinsamer PDF von Z und C (links) und normalisierter Temperatur zwischen DNS und Regele-Modell (rechts)

Dazu wurde die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte (engl.: probability density function, PDF) vom Mischungsbruch Z über die Fortschrittsvariable C sowie die normalisierte Temperatur θ ermittelt (**Abbildung 4.2.2**). Es wird deutlich, dass das Regele-Modell die erwarteten Effekte (Entmischung, super-adiabate Temperaturen) abbilden kann, wenngleich die Effekte etwas schwächer ausgeprägt sind. Da das Regele-Modell nur für laminare Fälle gültig ist, wurde eine Erweiterung für turbulente Strömungen entwickelt.

4.2.1.2 Modellvalidierung für turbulente Flammen

Mit der Einführung eines zusätzlichen Modellierungsparameters (Varianz der Fortschrittsvariable, \widetilde{C}^{r2}) und der Tabellierung aller nötigen Variablen in Abhängigkeit der Modellierungsparameter kann somit eine dreidimensionale turbulente Flamme unter Berücksichtigung der besonderen Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff berechnet werden. Die Ergebnisse für die Modellierungsparameter sind in **Abbildung 4.2.3** dargestellt.

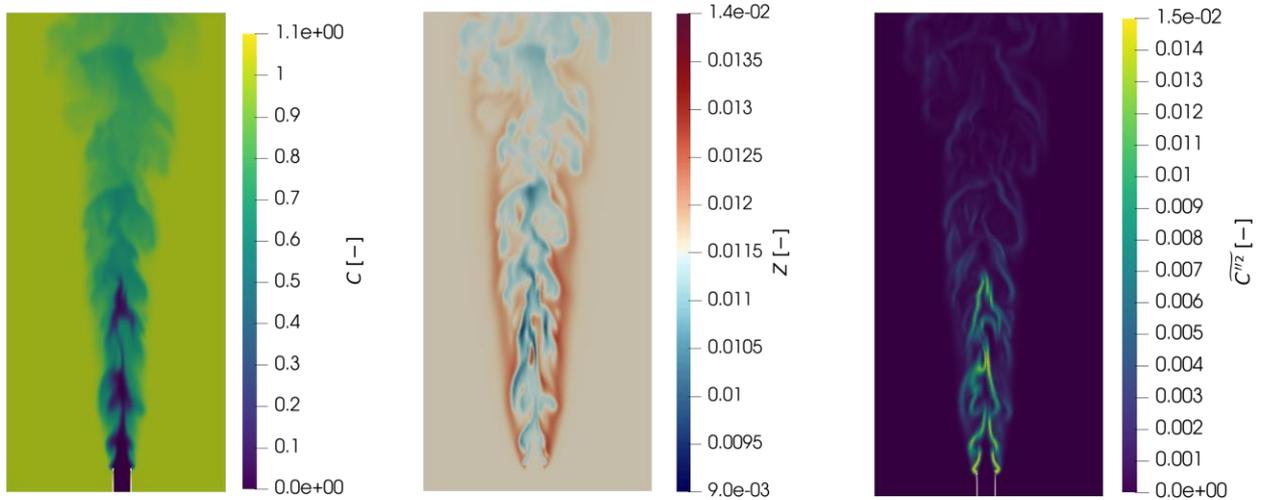


Abbildung 4.2.3: Konturplots der Modellierungsparameter C , Z und \widetilde{C}^{m2} für eine 3D turbulente Jetflamme mit $Re = 11.000$.

Zur Validierung der 3D Daten und zur Verdeutlichung der Verbesserung der Ergebnisse mit dem verwendeten Verbrennungsmodell wird in **Abbildung 4.2.4** die normalisierte Temperaturverteilung gezeigt. Es wird deutlich, dass mit dem entwickelten Modell eine deutliche Annäherung der Ergebnisse an die DNS-Daten möglich ist. Die Flammenstruktur weist eine deutliche Krümmung auf. Darüber hinaus können mit dem Modell super-adiabate Temperaturen, welche einen zentralen Effekt der thermodynamischen Instabilitäten darstellen, abgebildet werden. Das aktuelle Forschungsprojekt hat einen wichtigen Grundstein für weitergehende Forschung für eine noch genauere Darstellung der tatsächlichen Flammenstruktur mit LES gelegt.

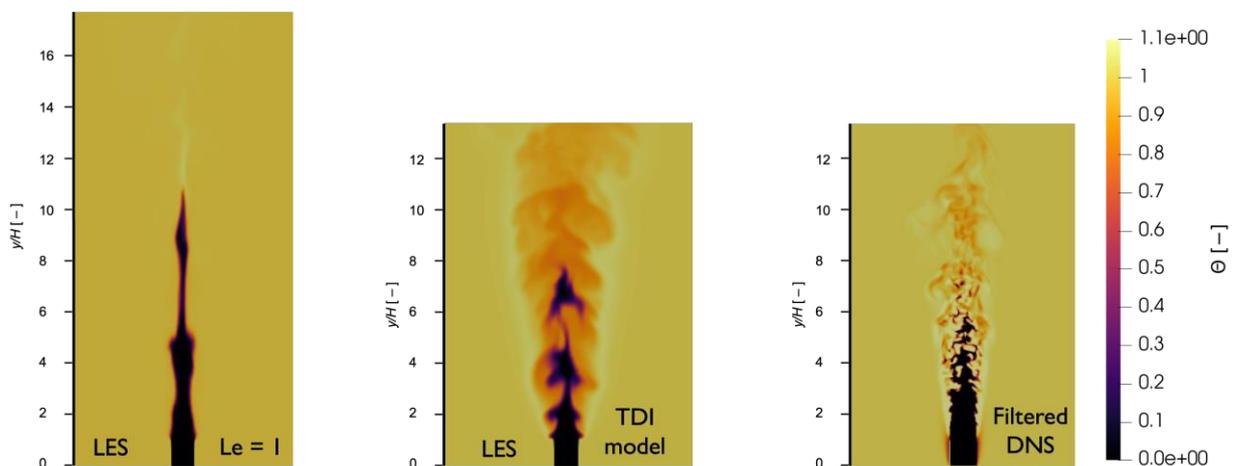


Abbildung 4.2.4.: Vergleich von Konturplots der normalisierten Temperatur Θ für eine 3D turbulente Jetflamme mit $Re = 11.000$: LES mit $Le = 1$ (links), LES mit dem erweiterten Verbrennungsmodell (mittig) und gefilterte DNS-Daten (rechts).

4.2.1.3 Partiiell vorgemischte Flammen

Abschließend wird das Konzept der partiell vorgemischten Flammen betrachtet, da vorgemischte Flammen, trotz ihrer Vorteile bezüglich geringerer NO_x -Emissionen, für viele industrielle Anwendungen nicht in Frage kommen. Dies liegt vor allem an Sicherheitsrisiken, beispielsweise aufgrund möglichem Flammenrückschlags. Es wird der Knudsen-Regime-Indikator nach Knudsen et al. [Knud12] verwendet, da für

eine akkurate Modellierung in der Simulation zwischen vorgemischten und nicht-vorgemischten Bereichen unterschieden werden muss. Nachfolgend ist das Ergebnis einer partiell vorgemischten Flamme anhand der normalisierten Temperatur und des Massenbruchs von Wasserstoff Y_{H_2} in **Abbildung 4.2.5** dargestellt. Es wurde das gleiche Setup des Jetbrenners verwendet wie für die Untersuchung der vorgemischten 3D Flamme ($\phi = 0.4$, $d = 8$ mm).

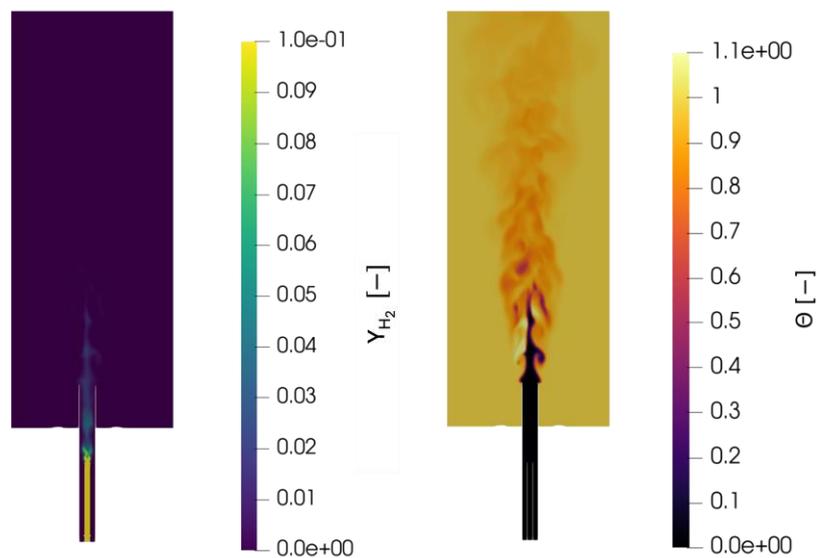


Abbildung 4.2.5: Konturplots der normalisierten Temperatur Θ und des Massenbruchs von Wasserstoff Y_{H_2} für eine partiell vorgemischte 3D turbulente Jetflamme mit $d = 8$ mm, $l_{mix} = 9d$ und $\phi = 0,4$.

Das Rohr innerhalb des Jets, durch welches der Wasserstoff zur Verfügung gestellt wird, wird mit einem Abstand von $l_{mix} = 9d$ zum Jetauslass positioniert, sodass sich Brennstoff und Sauerstoff vor der Verbrennung auf dieser Länge mischen können. Zunächst soll festgehalten werden, dass die Kombination der entwickelten Modelle erfolgreich war. Darüber hinaus kann als erste Erkenntnis für den untersuchten Fall eine gute Durchmischung der Reaktanden benannt werden. Dies bedeutet, dass durch eine optimierte Vormischlänge sowohl das Risiko eines Flashbacks reduziert werden kann, da die Flamme nicht mehr voll vorgemischt ist, als auch die Vorteile einer gut durchmischten Flamme beibehalten werden können. Weiterführende Untersuchungen werden die Variation der Mischungslänge sowie die genauere Untersuchung des Strömungsfeldes im Mischungsbereich beinhalten.

4.2.2 Simulation und Validierung

4.2.2.1 Numerische Strömungssimulationen

(CFD) Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics) ermöglichen es, eine Anlage zu analysieren, auszulagern und zu optimieren, ohne dabei experimentelle Kosten und Risiken in Kauf nehmen zu müssen. Einige Vorteile von CFD-Simulationen sind die erzeugten Datenmengen sowie die Möglichkeit, verschiedene Parameter- oder Geometriestudien mit einem vertretbaren Aufwand durchführen zu können. Der Arbeitsaufwand kann hier in drei Schwerpunkte gegliedert werden. Im ersten Teil, dem sogenannten Pre-Processing, wird die Geometrie modelliert und anschließend vernetzt. Dabei ist zu beachten, dass potenzielle Geometrievereinfachungen nicht die Aussagekraft der Simulation beeinflussen dürfen. Die Netzgenerierung ist ein sehr wichtiger Schritt, weil die Konvergenz der Simulation in vielen Fällen von einem guten Gitter abhängt. Als nächstes werden im CFD-Programm die Randbedingungen angegeben sowie die

Modelle ausgewählt. Hierbei ist die Erfahrung des Anwenders und die richtige Auswahl der Modellkombinationen eine grundlegende Voraussetzung für ein optimales Ergebnis. Im zweiten Schritt, dem Processing, erfolgt die Simulation. Die Rechenzeit hängt von der Auswahl des Turbulenz- und Verbrennungsmodells sowie von Anzahl der Gitterzellen ab. Im letzten Schritt, dem Post-Processing, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse.

4.2.2.2 Geometriemodellierung und CFD-Modellierung

Die zu simulierende Geometrie ist in **Abbildung 4.2.2.2** dargestellt. Der Brenner ist in einem kurzen Kanalstück eingebaut und am Ofen angeschlossen. Im Eintrittsbereich des Kanalstücks ist ein kurzer sehr steiler Diffusor angebracht. Dieser weitert die Prozessluftzuführung von einem Kreisquerschnitt mit 400 mm Durchmesser auf einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 1.000 mm auf. Der Anschluss der Prozessluft an den Diffusor erfolgte mit einem 90° Umlenkbogen gefolgt von einer konischen Aufweitung des Durchmessers von 300 mm auf 400 mm.

Die Zuführung der Prozessluft erfolgte über einen Schlauch. Wegen der begrenzten Platzverhältnisse in der Halle ergeben sich mehrere 90° Umlenkungen des Schlauchs.



Abbildung 4.2.2.2 Am Ofen angeschlossener Brenner mit Prozessluftzuführung

Für die CFD-Simulationen wird zuerst die Gesamtgeometrie modelliert und anschließend ein Berechnungsgitter generiert. Die modellierte Gesamtgeometrie ist in **Abbildung 4.2.2.2** dargestellt.

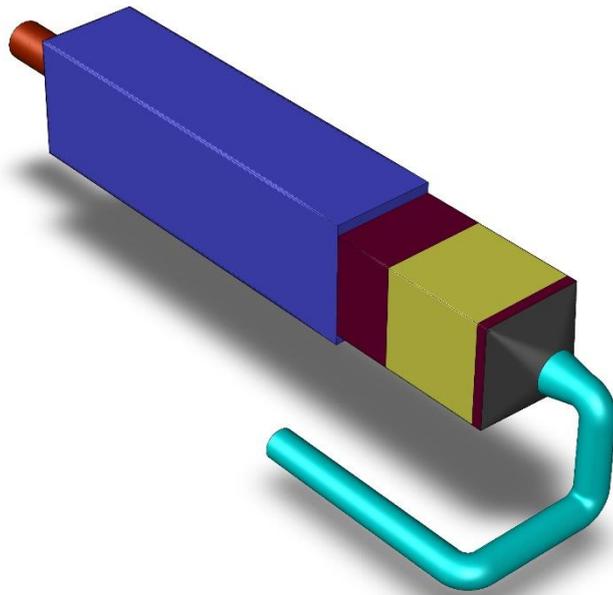


Abbildung 4.2.2.2 Modellierte Gesamtgeometrie für CFD-Simulationen

Abbildung 4.2.2.2 zeigt das generierte Berechnungsgitter des Brenners. Links ist der Brenner mit und rechts ohne Kanalabschnitt dargestellt.

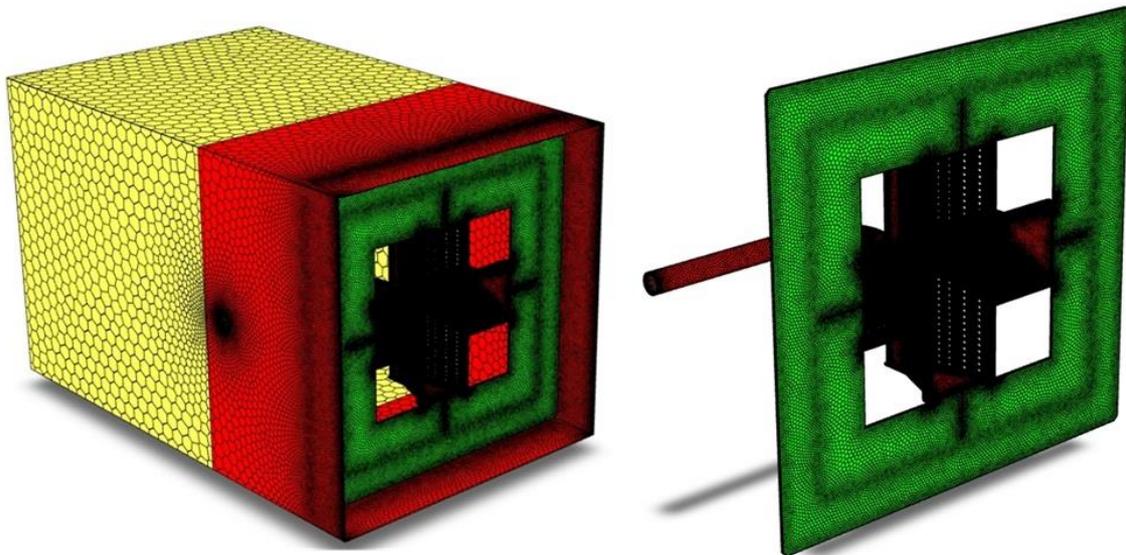


Abbildung 4.2.2.2 Berechnungsgitter Brenner links mit und rechts ohne gefertigten Kanalabschnitt

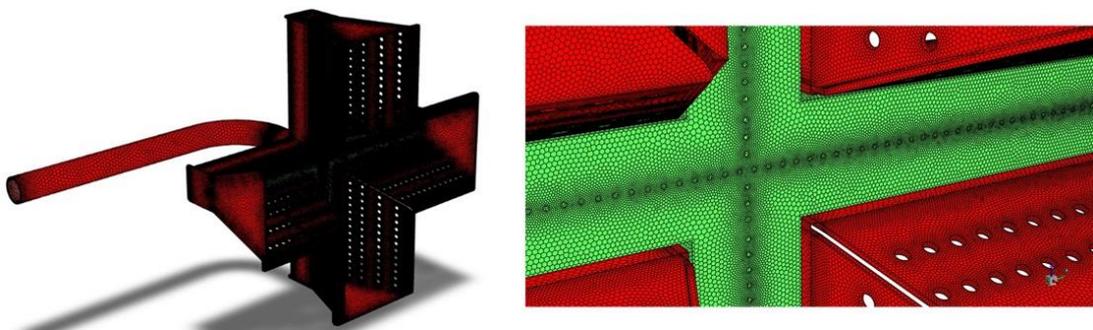


Abbildung 4.2.2.2 Berechnungsgitter Brenner, Detail der Brennstoff- und Luftdüsen

In **Abbildung 4.2.9** ist das Berechnungsgitter des Brenners im Bereich der Brennstoff- und Luftdüsen im Detail dargestellt. **Abbildung 4.2.10** zeigt das Berechnungsgitter des Gesamtmodells bestehend aus Luftzuführung, Brenner und Ofen.

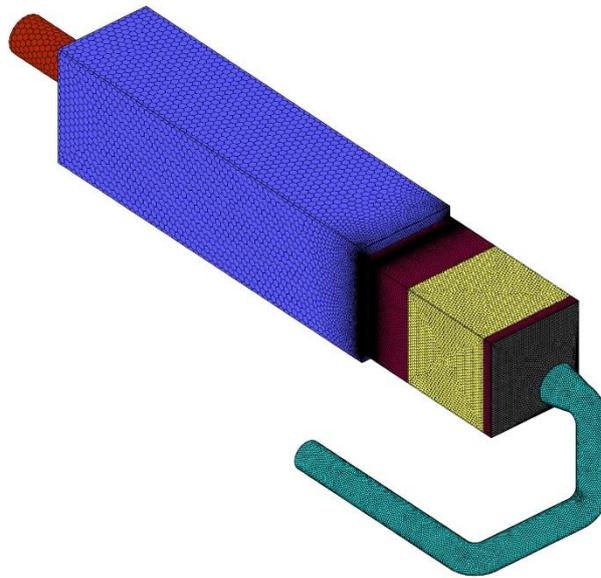


Abbildung 4.2.2.2 Berechnungsgitter des Gesamtmodells

4.2.2.3 Turbulenz- und Verbrennungsmodellierung

Grundsätzlich bieten kommerzielle CFD-Anwendungen eine Reihe von verschiedenen Modellen zur Beschreibung von Turbulenz, Verbrennung und Strahlung an, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile haben. Welche Modelle herangezogen werden, hängt von der Aufgabenstellung ab. Die Modellauswahl ist daher grundsätzlich mit Bedacht zu treffen. Hier fließt auch die Erfahrung des CFD-Ingenieurs ein.

In dem vorliegenden Fall wird die Turbulenz der Strömung mit dem $k-\epsilon$ -realizable-Modell simuliert. Dieses Modell eignet sich für hoch-turbulente Strömungen und wird oft für industrielle Aufgabenstellungen eingesetzt. Die Verbrennung wird mit dem PDF-Gleichgewichts-Modell abgebildet, da dieses Modell für verschiedene Brennstoffzusammensetzungen, wie sie hier vorliegen, geeignet ist. Bei der anderen Modellfamilie, den sogenannten Wirbelzerfallsmodellen, hingegen werden aussagekräftige Reaktionsmechanismen benötigt, um den Besonderheiten der verschiedenen Brennstoffe Rechnung zu tragen. Diese Mechanismen sind jedoch oft sehr umfangreich und daher auch rechenzeit-intensiv. Deshalb ist ein tabellenbasiertes Modell wie das nicht-adiabate PDF-Gleichgewichtsmodell (PDF: Probability Density Function) für derartige Untersuchungen besser geeignet, wie bereits auch in vorangegangenen Untersuchungen belegt wurde [Now17].

PDF-Gleichgewichtsmodelle basieren auf sogenannten Look-Up-Tables. Bei diesem Modellierungsansatz wird vorausgesetzt, dass bei nicht-vorgemischten Flammen die chemische Reaktion viel schneller abläuft als die turbulente Mischung der Reaktionspartner. Durch die Annahme „gemischt = verbrannt“ wird der Verbrennungsprozess durch das Mischungsverhalten von Oxidator und Brenngas bestimmt. Anders als bei den Wirbelzerfallsmodellen, wo für jede Spezies eine Transportgleichung bilanziert wird, werden bei tabellenbasierten Verfahren nur zwei weitere Transportgleichungen für den mittleren Mischungsbruch und die mittlere Varianz des Mischungsbruches gelöst. Der numerische Aufwand bleibt damit überschaubar, selbst bei komplexen Brennstoffen.

Die Strahlung wird mit dem Discrete-Ordinates-Model modelliert. In **Tabelle 4.2.2.3** sind die Setup Einstellungen für den CFD-Code zusammengefasst.

Tabelle 4.2.2.3: CFD-Setup

Code	Ansys Fluent v2021 R1 (Reynolds Averaged Navier-Stokes, stationär)
Turbulenzmodell	Realizable k-ε-Modell
Strahlungsmodell	Discrete Ordinates Modell (DO)
Verbrennungsmodell	Nicht-Adiabates PDF-Gleichgewichtsmodell
Wände	Nicht adiabatisch

Randbedingungen:

- Leistung: 500 kW
- Luft: 3.640 m³/h
- Brennstoffe
 1. Erdgas H
 2. Koksofengas
 3. 30 Vol.-% Wasserstoff
 4. 100 Vol.-% Wasserstoff

4.2.2.4 CFD-Ergebnisse und Validierung

Um den verwendeten Berechnungsansatz zu validieren, findet im Folgenden eine Gegenüberstellung und Vergleich der gemessenen und simulierten Ergebnisse für den Brennstoff Erdgas H statt. In **Abbildung 4.2.2.411** ist die Temperaturverteilung der CFD-Simulation in der Messebene dargestellt. Die Temperaturverteilung der CFD-Simulation wird in **Abbildung 4.2.12** der gemessenen Temperaturverteilung gegenübergestellt. Um denselben Bereich vergleichen zu können, wird die Temperaturverteilung der CFD-Simulation nach Brenner und vor Kamin etwas abgeschnitten. Die simulierte Temperaturverteilung passt gut zu der gemessenen. Die simulierte Flamme ist geringfügig länger. Im Gegensatz zu den Messwerten ragt ein kleiner heißer Bereich der Flammenfront noch in den dargestellten Bereich hinein. In **Tabelle 4.2.2.4** sind die gemessenen und simulierten Kaminwerte einander gegenübergestellt. Es ergeben sich Abweichungen von 40 °C bei der Temperatur, 0,5 Vol.-% bei der Sauerstoff- und 0,3 Vol.-% bei der CO₂-Konzentration. Die NO_x-Werte liegen deutlich auseinander.

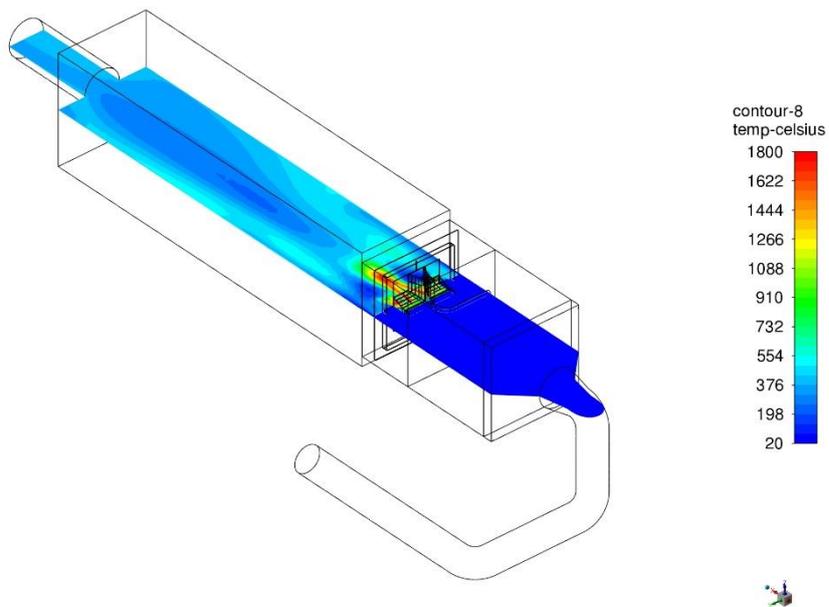


Abbildung 4.2.2.411 Temperaturverteilung in der Messebene

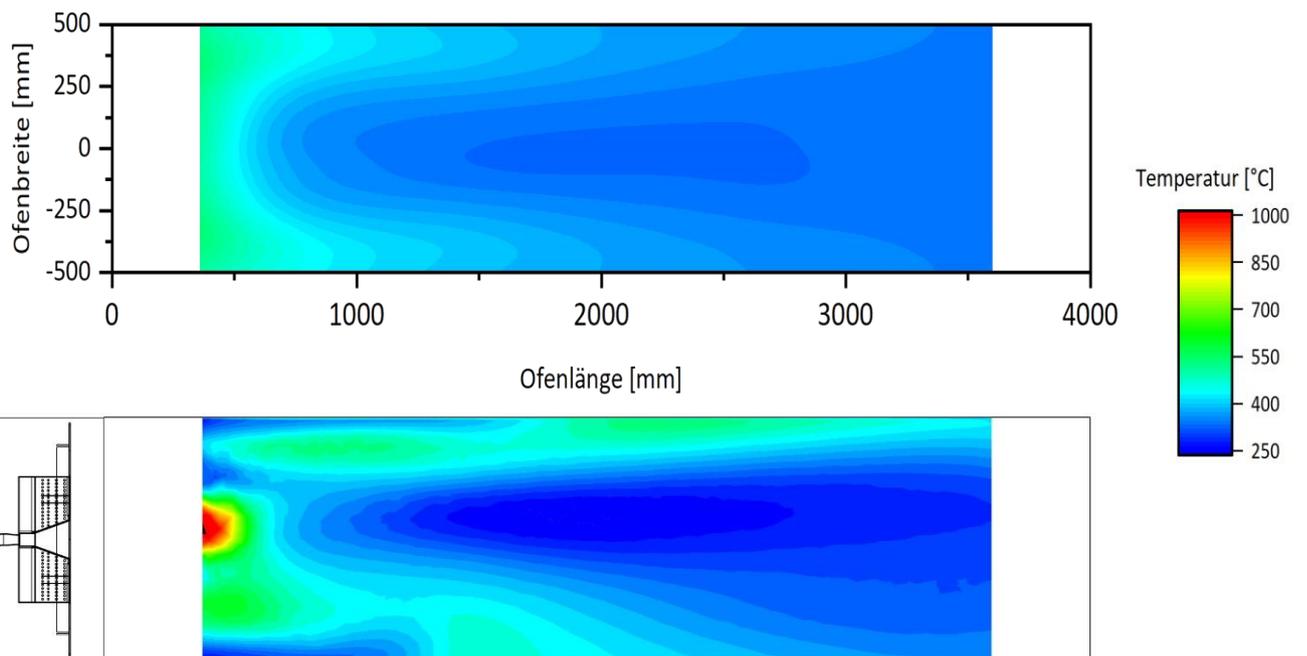


Abbildung 4.2.2.412 Vergleich Temperaturverteilung, Messung oben und Simulation unten

Tabelle 4.2.2.4 Kaminwerte

Kaminwerte	Messung	CFD
Temperatur [°C]	380	339
O ₂ trocken [Vol.-%]	18,8	18,3
CO [ppm]	12	0
CO ₂ trocken [Vol.-%]	1,25	1,56
NO _x [ppm] _{trocken}	11,6	753

Bei der Betrachtung von Geschwindigkeitsverteilungen zeigt sich eine stark inhomogene Anströmung des Brenners. Die **Abbildung 4.2.2.413** zeigt den Geschwindigkeitsbetrag im Vertikalschnitt. An der letzten Umlenkung am Eintritt des Diffusors und auch durch den großen Öffnungswinkel des Diffusors kommt es zur Strömungsablösung. Die Strömung ist auf den oberen Kanalquerschnitt konzentriert. Dies ist auch in **Abbildung 4.2.2.4** zu erkennen, wo die Normalgeschwindigkeit in einem Querschnitt vor dem Brenner dargestellt ist. Im oberen Querschnittsbereich sind positive Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s vorhanden. Im unteren Querschnittsbereich kommt es zu einer Rückströmung mit negativen Geschwindigkeiten von bis zu 4 m/s.

Ein Gleichverteilungsindex stellt dar, wie eine bestimmte Feldvariable über eine Oberfläche variiert. Der flächengemittelte Gleichverteilungsindex einer bestimmten Feldvariable wird mithilfe der folgenden Gleichung berechnet:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\Phi_i - \overline{\Phi_a}|) A_i]}{2|\overline{\Phi_a}| \sum_{i=1}^n A_i}$$

wobei i der Facettenindex einer Oberfläche mit n Facetten ist und Φ_a der Mittelwert der Feldvariable über der Oberfläche ist

$$\overline{\Phi_a} = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Ein Wert von 1 zeigt die beste und ein Wert von 0 die schlechteste Gleichverteilung an. Bei Rückströmung und besonders inhomogener Verteilung kann der Gleichverteilungsindex sogar negative Werte annehmen.

Die Normalgeschwindigkeit in einem Querschnitt vor dem Brenner ist in **Abbildung 4.2.2.4** dargestellt. Die Auswertung des Gleichverteilungsindex der Normalgeschwindigkeit in diesem Querschnitt ergibt einen Wert von -0,32 .

Kanalbrenner sind bei normalen Betriebsbedingungen ideal angeströmt. Meistens sind sie in einem längeren geraden Kanalstück eingebaut. Nach Möglichkeit sind im Vorlaufbereich des Brenners keine Umlenkungen, Bögen oder andere Störungen vorhanden. Um die Laborversuche an den wirklichen Betriebszustand anzunähern und eine homogenere Anströmung des Brenners zu erreichen, wurden Änderungen am Versuchsaufbau durchgeführt. Eine gleichmäßigere Anströmung des Brenners sollte auch zu einer besseren Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Werte führen. Die Luftzuführung des Brenners wurde durch eine gerade Schlauchführung ohne Umlenkungen und Bögen ersetzt. Eine Versperrung von einzelnen Feldern eines vorhandenen Gleichrichters nach Diffusor sollen ebenfalls zu einer Vergleichmäßigung der Strömung führen.

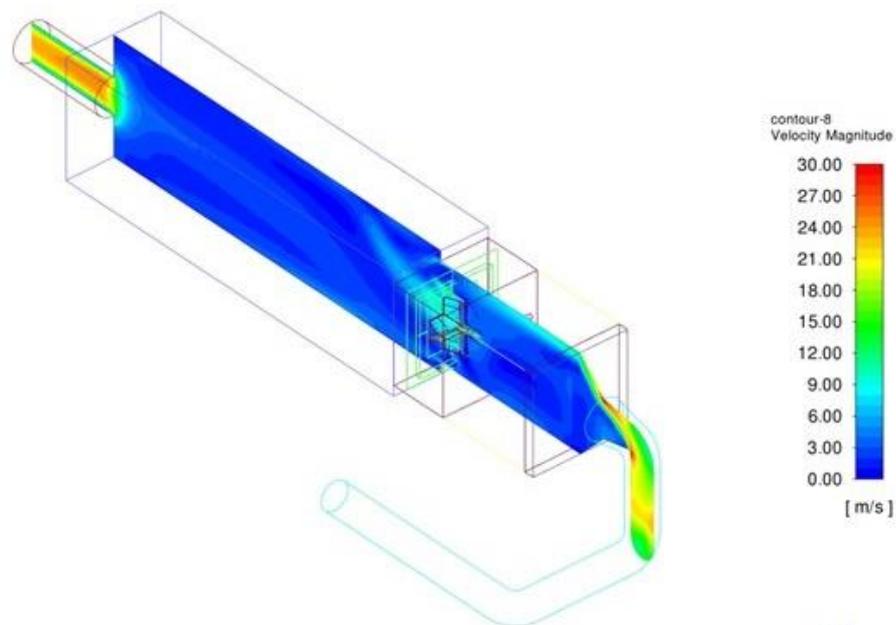


Abbildung 4.2.2.413 Geschwindigkeitsbetrag im Vertikalschnitt

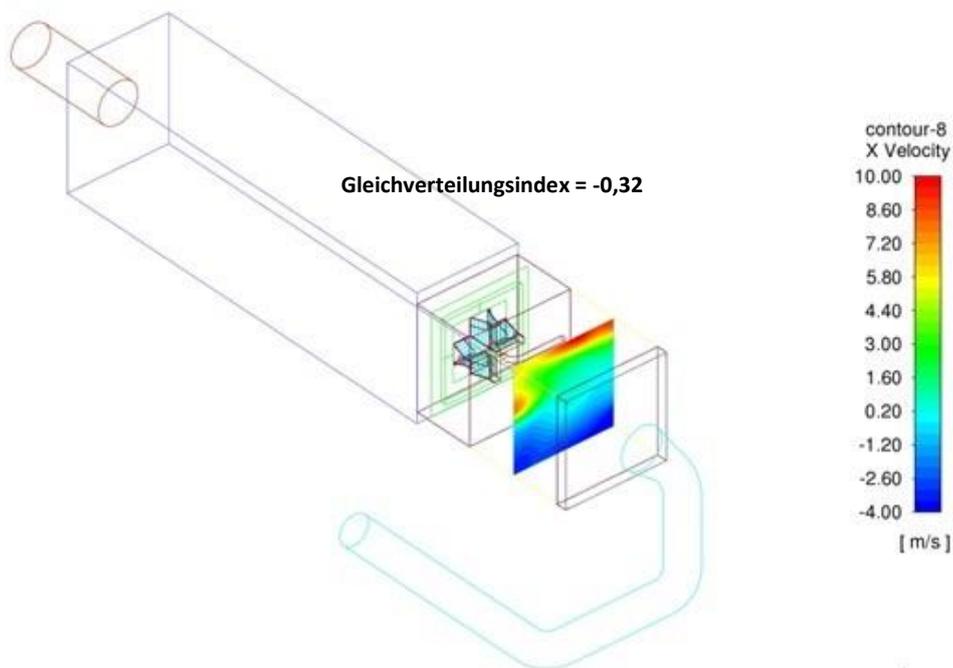


Abbildung 4.2.2.4 Normalgeschwindigkeit am Brenneintritt

Diese Möglichkeiten wurden im Vorfeld durch CFD-Testsimulationen untersucht. **Abbildung 4.2.15** zeigt links die Geschwindigkeitsverteilung in axialer Richtung bei gerader Luftzuführung ohne Umlenkungen. Die Strömung wird durch den Diffusor nicht gleichmäßig auf die Querschnittsfläche verteilt. Hohe Geschwindigkeiten sind in der Flächenmitte kreisförmig konzentriert. Im äußeren Bereich treten sogar Rückströmungen auf. Der Gleichverteilungsindex ist mit $-0,058$ sehr bescheiden. Mehrere Konfigurationen von verschiedenen Versperrungen wurden mittels CFD-Simulationen untersucht. In **Abbildung 4.2.15** rechts ist die Konfiguration dargestellt, mit der die beste Vergleichmäßigung erreicht wurde. Der Gleichverteilungsindex erreicht hierbei einen Wert von $0,7$. Die hierfür benötigten Versperrungen des Gleichrichters sind im Detail in **Abbildung 4.2.16** dargestellt.

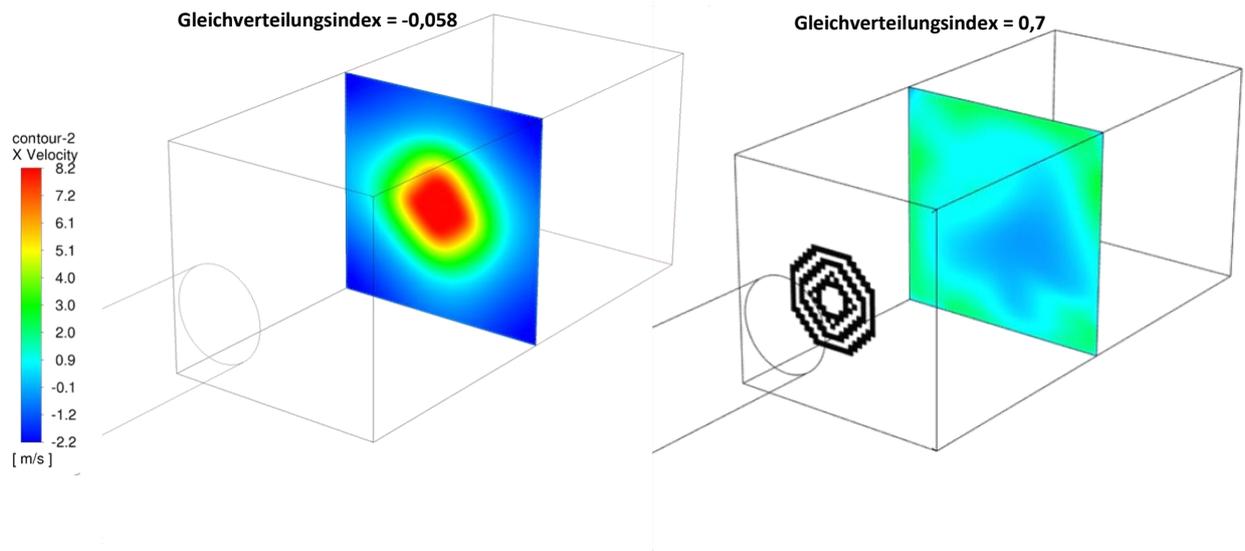


Abbildung 4.2.2.44 Geschwindigkeitsverteilung in axialer Richtung, links ohne und rechts mit Versperrungen im Gleichrichter

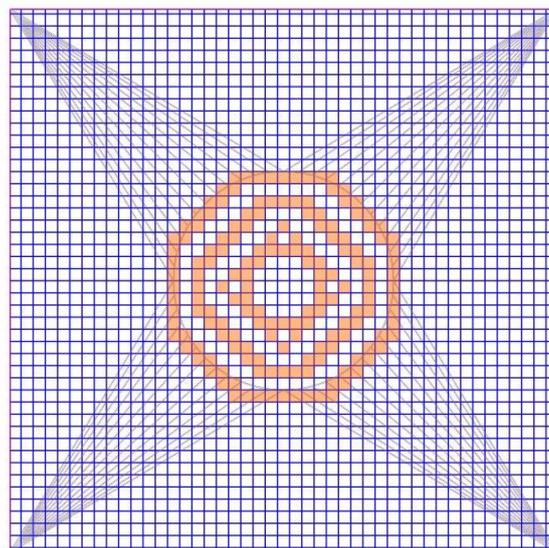


Abbildung 4.2.2.45 Benötigte Versperrungen im Gleichrichter

Die Geschwindigkeitsverteilung im Vertikalschnitt im Gesamtmodell bei gerader Luftzuführung und mit Versperrungen im Gleichrichter zeigt die **Abbildung 4.2.2.46**. Durch die gerade Luftzuführung konzentriert sich die Strömung nun in der Kanalmitte. Die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt vor dem Brenner ist in **Abbildung 4.2.2.47** dargestellt. Die Versperrungen bauen Geschwindigkeitsspitzen ab und verteilen die Strömung gleichmäßiger über den Querschnitt. Der Gleichverteilungsindex vor dem Brenner ist mit 0,3 deutlich besser als bei Anströmung mit Umlenkungen und ohne Versperrungen.

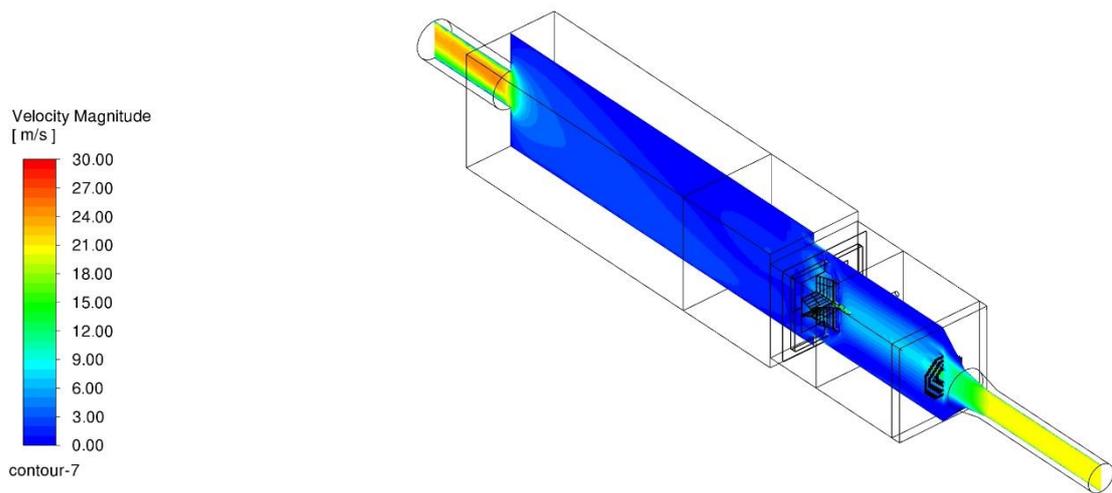


Abbildung 4.2.2.46 Geschwindigkeitsbetrag im Vertikalschnitt bei geradem Zulauf und Versperrungen im Gleichrichter

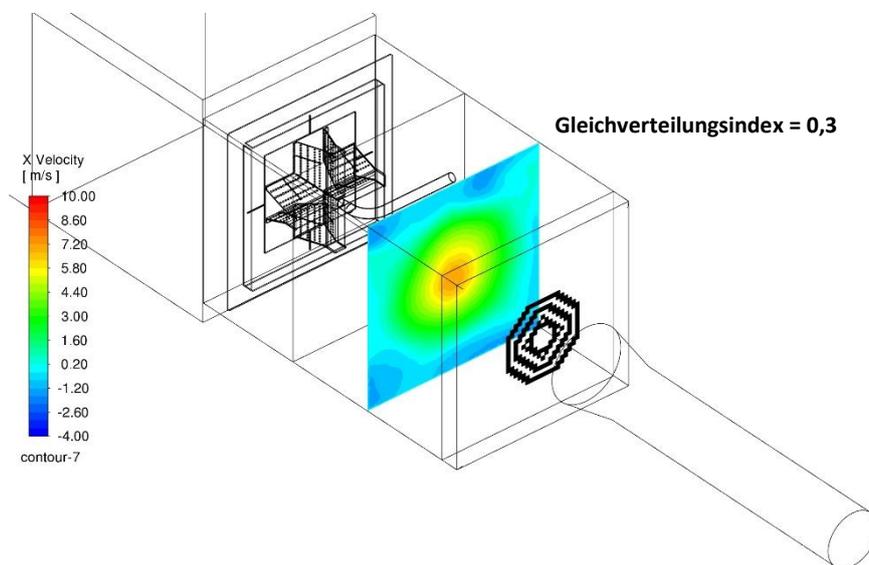


Abbildung 4.2.2.47 Normalgeschwindigkeit vor Brenneintritt bei gradem Zulauf und Versperrungen im Gleichrichter

Für die Feldmessungen wird der neue verbesserte Aufbau verwendet. Den neuen Aufbau zeigt **Abbildung 4.2.19**. Links ist die verbesserte gerade Luftzuführung zu sehen, rechts die realisierten Versperrungen im Gleichrichter.

Für den neuen verbesserten Aufbau wird ebenfalls eine Gegenüberstellung und Vergleich der gemessenen und simulierten Ergebnisse für den Brennstoff Erdgas H durchgeführt. **Abbildung 4.2.2** zeigt den Vergleich der Temperaturverteilung. Unten sind die gemessenen Werte und oben die berechneten zu sehen. **Abbildung 4.2.2** zeigt die Gegenüberstellung der Kohlenmonoxid- und **Abbildung 4.2.2** der Kohlendioxid-Konzentrationen.

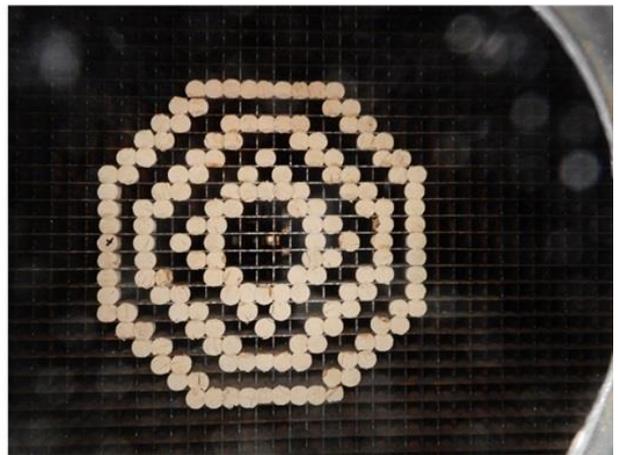


Abbildung 4.2.2.48 Realisierte Luftzuführung links, realisierte Versperrungen im Gleichrichter rechts

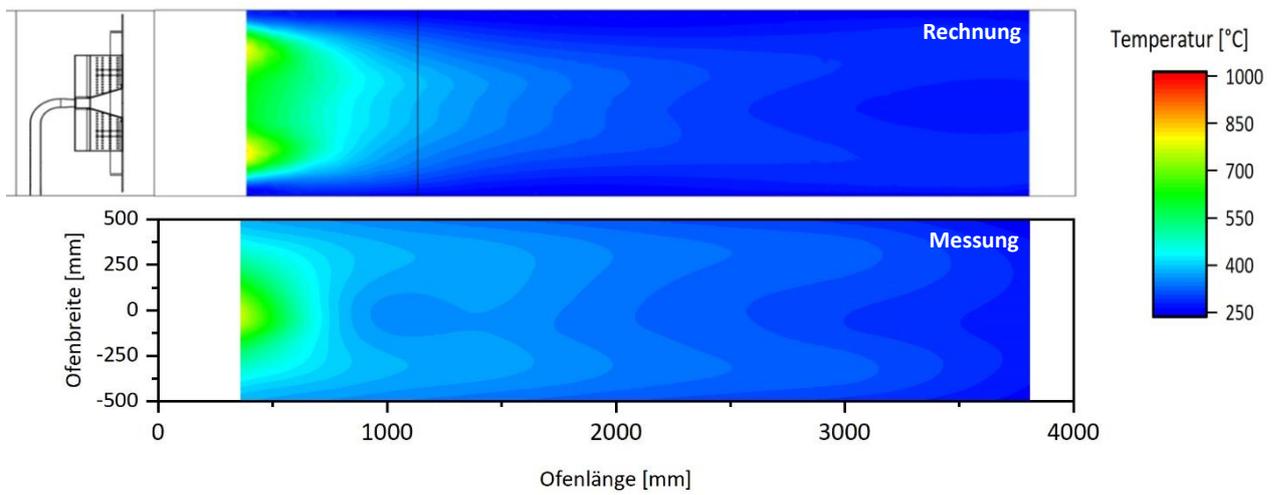


Abbildung 4.2.2.40 Vergleich der berechneten (oben) und gemessenen (unten) Temperaturverteilung

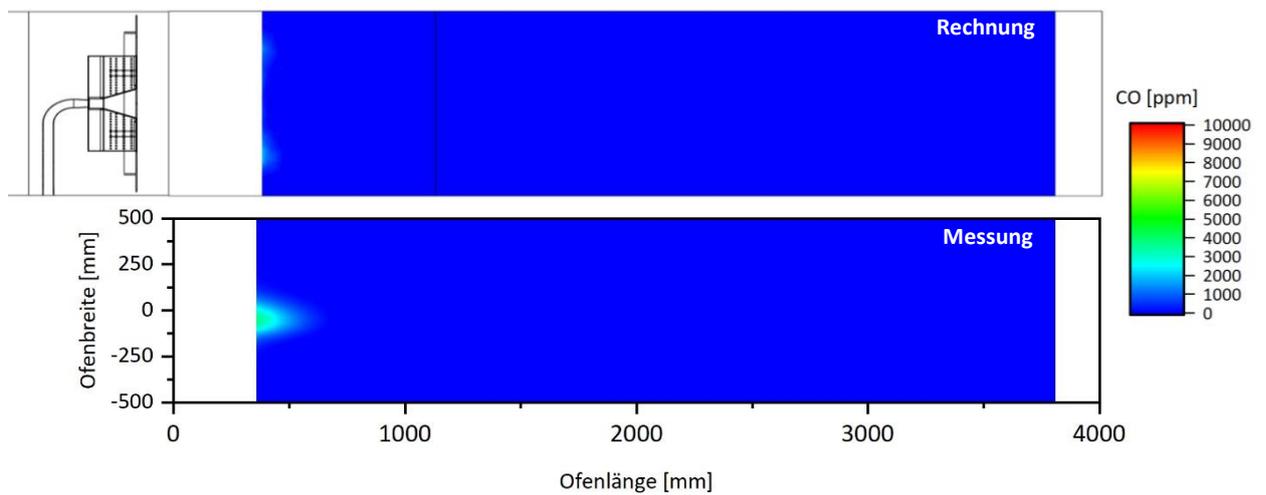


Abbildung 4.2.2.41 Vergleich der berechneten (oben) und gemessenen (unten) Kohlenmonoxid- Konzentration in ppm trocken

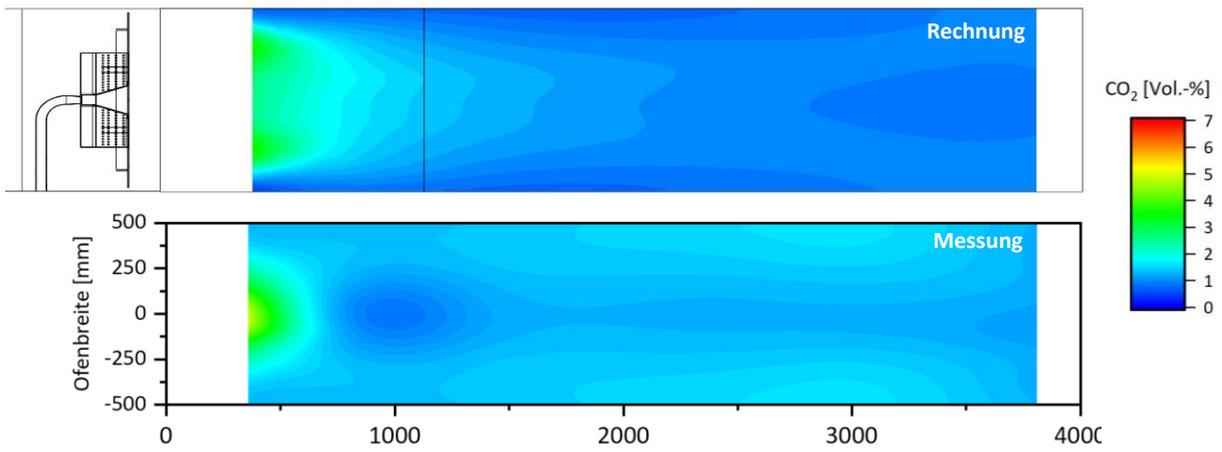


Abbildung 4.2.2.42 Vergleich der berechneten (oben) und gemessenen (unten) Kohlendioxid- Konzentration in Vol.-% trocken

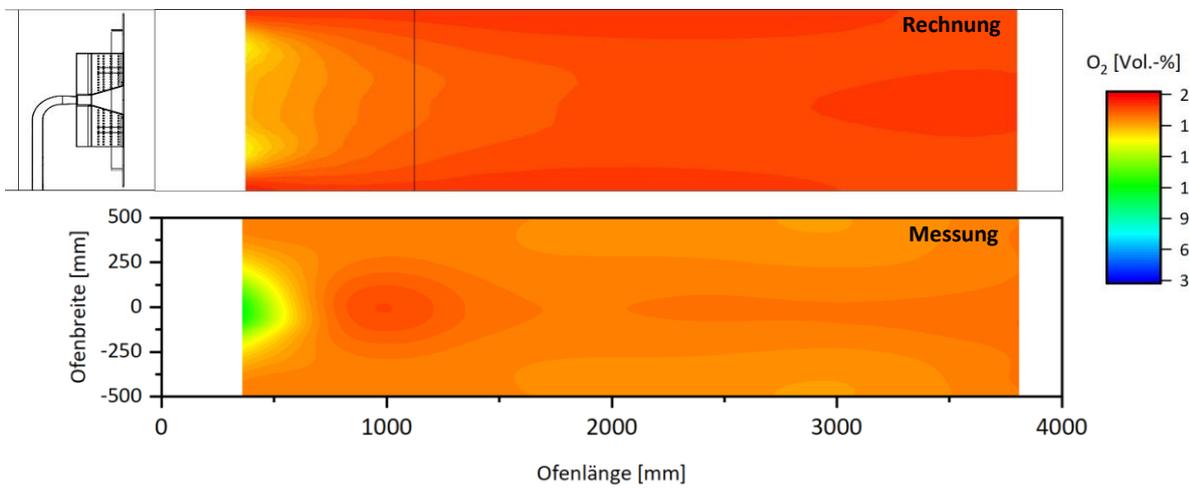


Abbildung 4.2.2.43 Vergleich der berechneten (oben) und gemessenen (unten) Sauerstoff- Konzentration in Vol.-% trocken

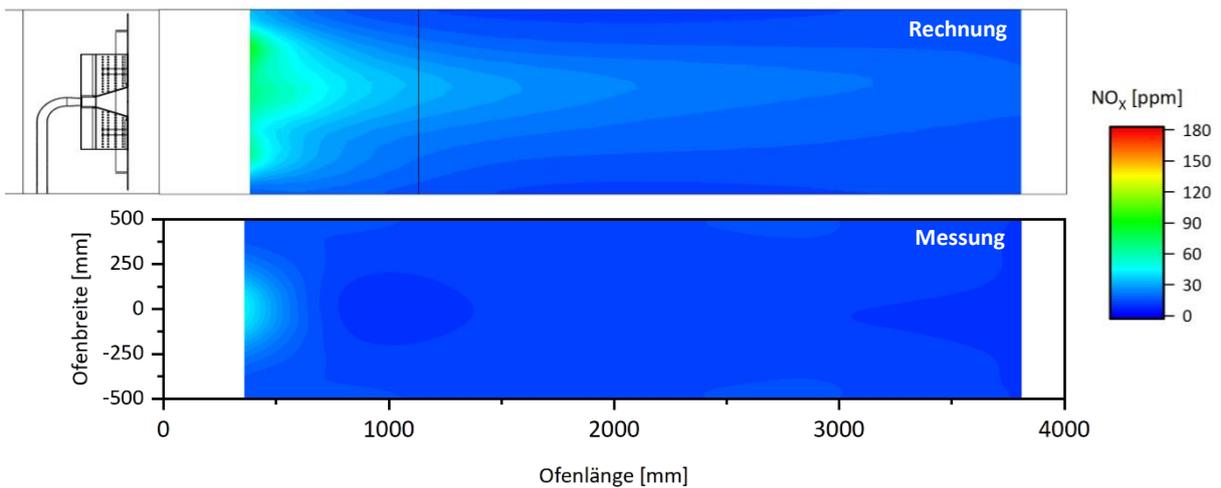


Abbildung 4.2.24 Vergleich der berechneten (oben) und gemessenen (unten) NO_x-Konzentration in ppm trocken

Die Gegenüberstellung der Sauerstoff-Konzentrationen ist in **Abbildung 4.2.23** und der NO_x-Konzentrationen in **Abbildung 4.2.24** dargestellt. **Tabelle 4.2.2.4** zeigt den Vergleich der Kaminwerte für den neuen Versuchsaufbau mit dem Brennstoff Erdgas H.

Tabelle 4.2.2.4 Kaminwerte neuer Versuchsaufbau, Brennstoff Erdgas H

Kaminwerte	Messung	CFD
Temperatur [°C]	250	266
O ₂ trocken [Vol.-%]	18,95	19,1
CO [ppm]	1	0
CO ₂ trocken [Vol.-%]	1,19	1,04
NO _x [ppm] _{trocken}	10,58	20,72

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Ergebnisse zeigt eine ausreichend genaue Übereinstimmung. Die geringen Abweichungen können auf folgende Punkte zurückzuführen sein:

- Numerische Vereinfachungen
- Der Gleichrichter bestehend aus 45 x 45 Feldern wurde im Berechnungsgitter nicht abgebildet. Eine Abbildung des Gleichrichters hätte zu einem unverhältnismäßig großen Gitter geführt. Stattdessen wurde der Gleichrichter im CFD-Modell als poröse Zone definiert. Es wurden Druckverlustbeiwerte für alle drei Strömungsrichtungen vorgegeben. Diese Druckverlustbeiwerte wurden geschätzt.
- Die Anzeige des Gebläses für die Verbrennungsluft war sehr ungenau. Deshalb sind Abweichungen von der gewünschten Verbrennungsluftmenge möglich.

4.2.2.5 CFD-Ergebnisse bei idealer Anströmung

Die Anströmung des Brenners ist durch den neuen Versuchsaufbau deutlich gleichmäßiger geworden, jedoch noch weit von einer idealen Anströmung entfernt. Da eine ideale Anströmung des Brenners dem wirklichen Betriebszustand eher nahekommmt, wird für weitere CFD-Simulationen eine ideale Anströmung angenommen. Das Berechnungsgitter wird modifiziert. Die Bereiche Schlauch und Diffusor werden aus dem Gitter entfernt. Als Brennereintritt ergibt sich eine quadratische Querschnittsfläche von 1000 x 1000 mm. Hier wird als Randbedingung eine homogene Geschwindigkeitsverteilung vorgegeben.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der CFD-Simulationen, bei idealer Anströmung, in einem Horizontalschnitt dargestellt. Der Horizontalschnitt entspricht dabei der Messebene der Feldmessung. Es wird der Betrieb mit den Brennstoffen Erdgas H, 30 Vol.-% Wasserstoff, Koksofengas und 100% Wasserstoff betrachtet. Die **Abbildung 4.2.25** zeigt die Temperaturverteilung im Horizontalschnitt für den Betrieb mit den verschiedenen Brennstoffen in der zuvor genannten Reihenfolge. Die **Abbildung 4.2.26** zeigt die Sauerstoffkonzentrationen. Die Kohlenmonoxid Konzentrationen sind in **Abbildung 4.2.27** und die Kohlendioxid Konzentrationen in **Abbildung 4.2.28** dargestellt. Zum Schluss werden NO_x-Konzentrationen bei Betrieb mit den verschiedenen Brennstoffen in **Abbildung 4.2.29** dargestellt.

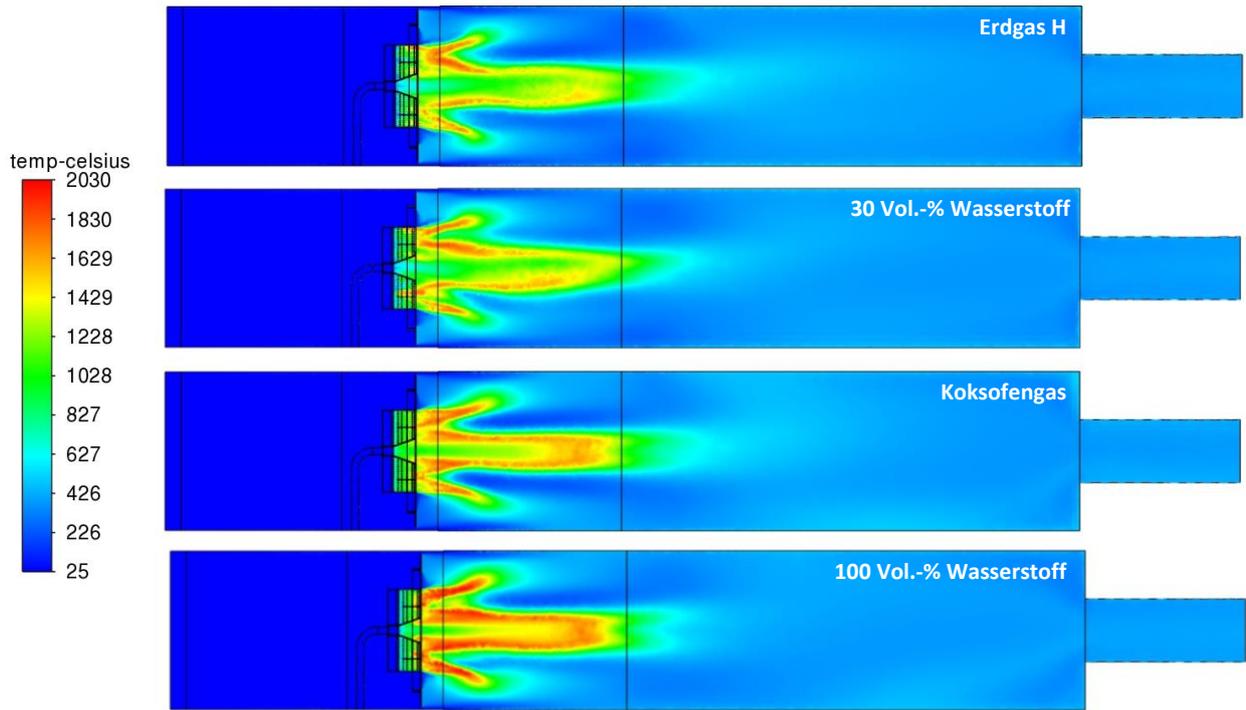


Abbildung 4.2.2.5 Temperaturverteilung [°C]

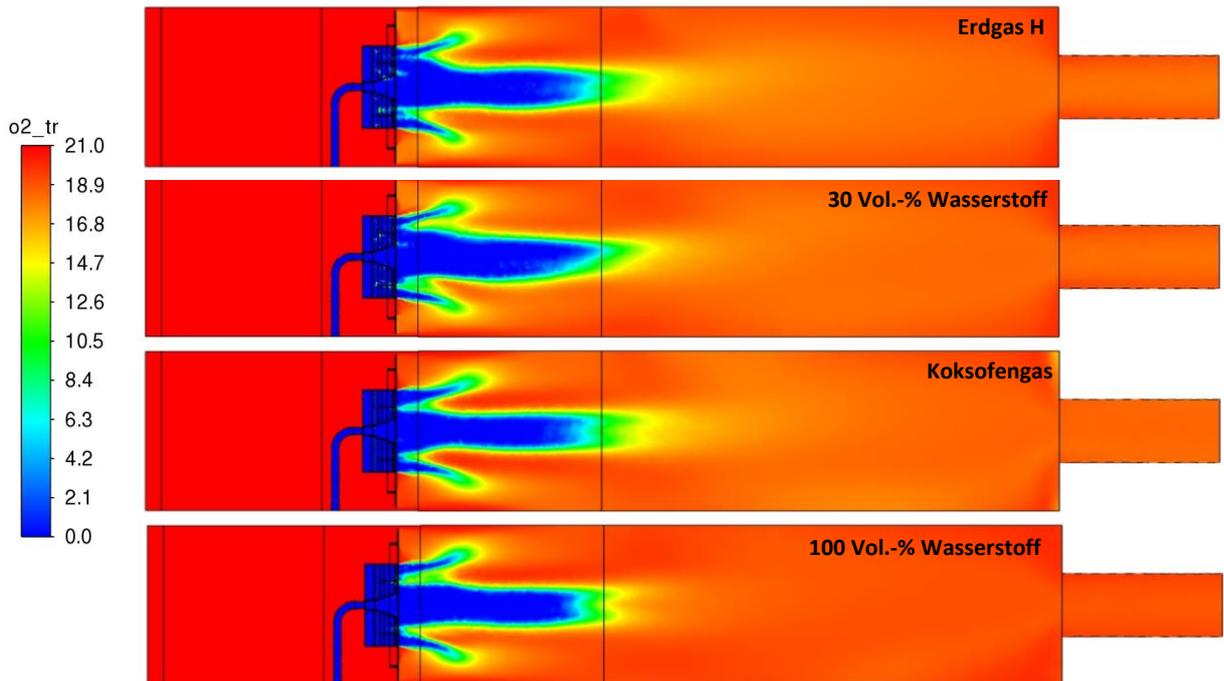


Abbildung 4.2.2.5 Sauerstoffkonzentration trocken [Vol.-%]

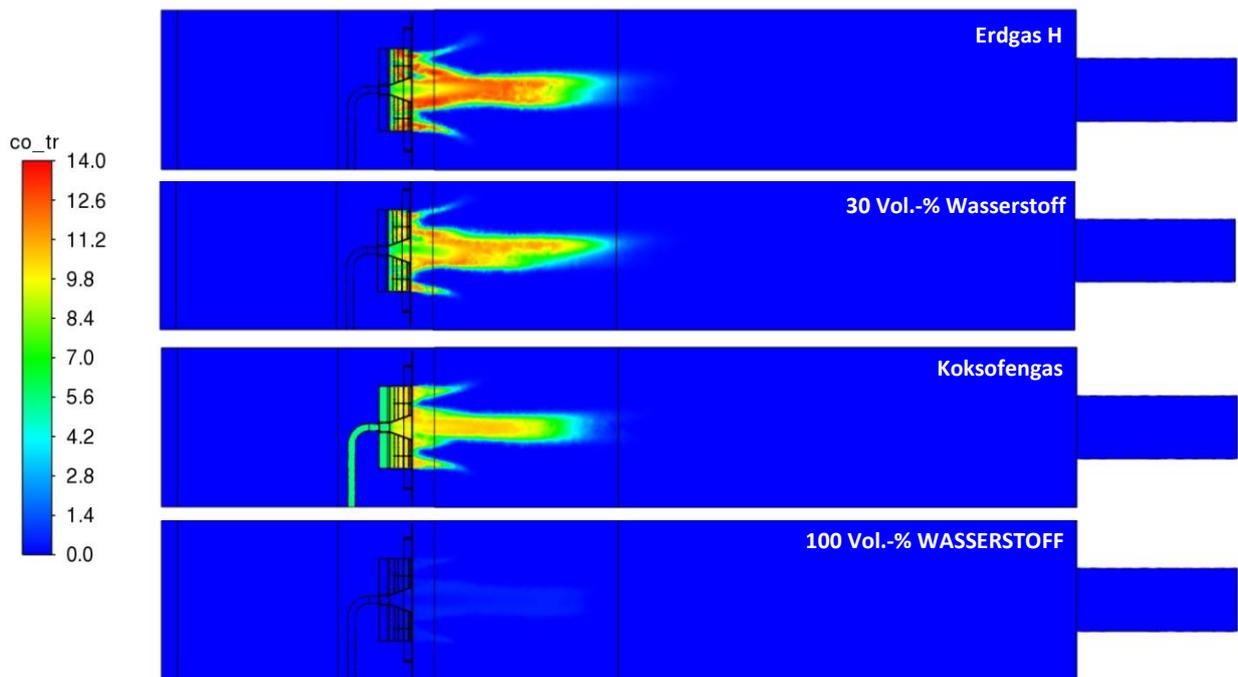


Abbildung 4.2.2.5 Kohlenmonoxid Konzentration trocken [Vol.-%]

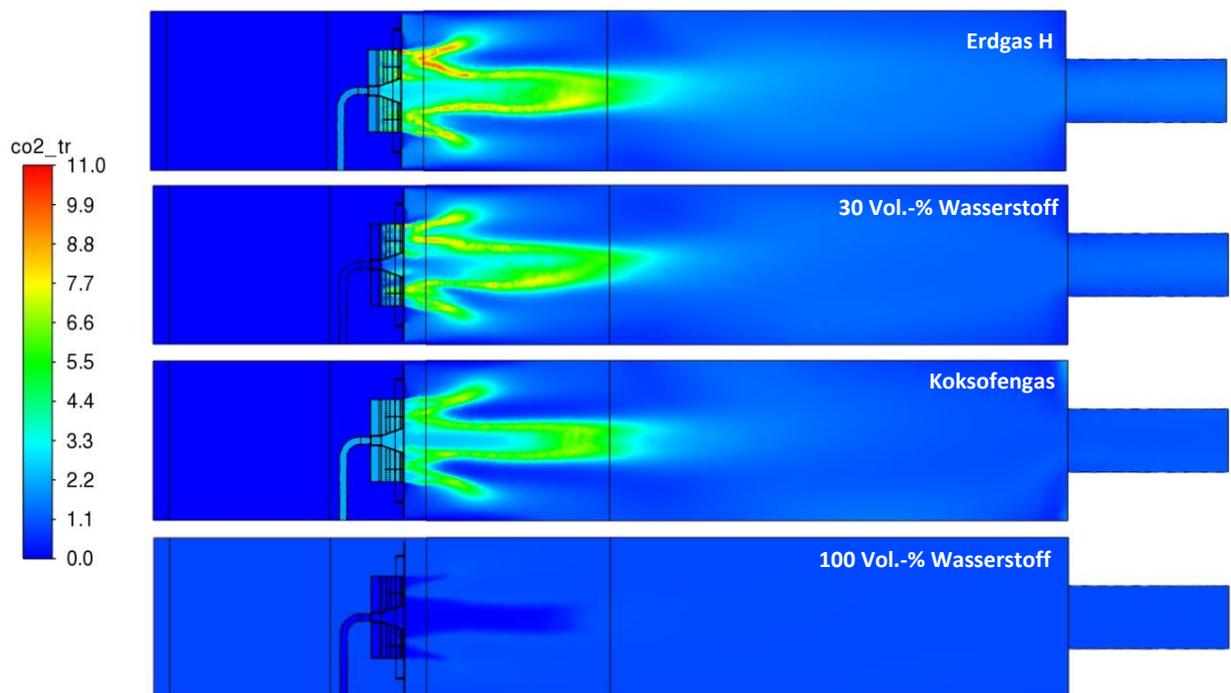


Abbildung 4.2.28: Kohlendioxid Konzentration trocken [Vol.-%]

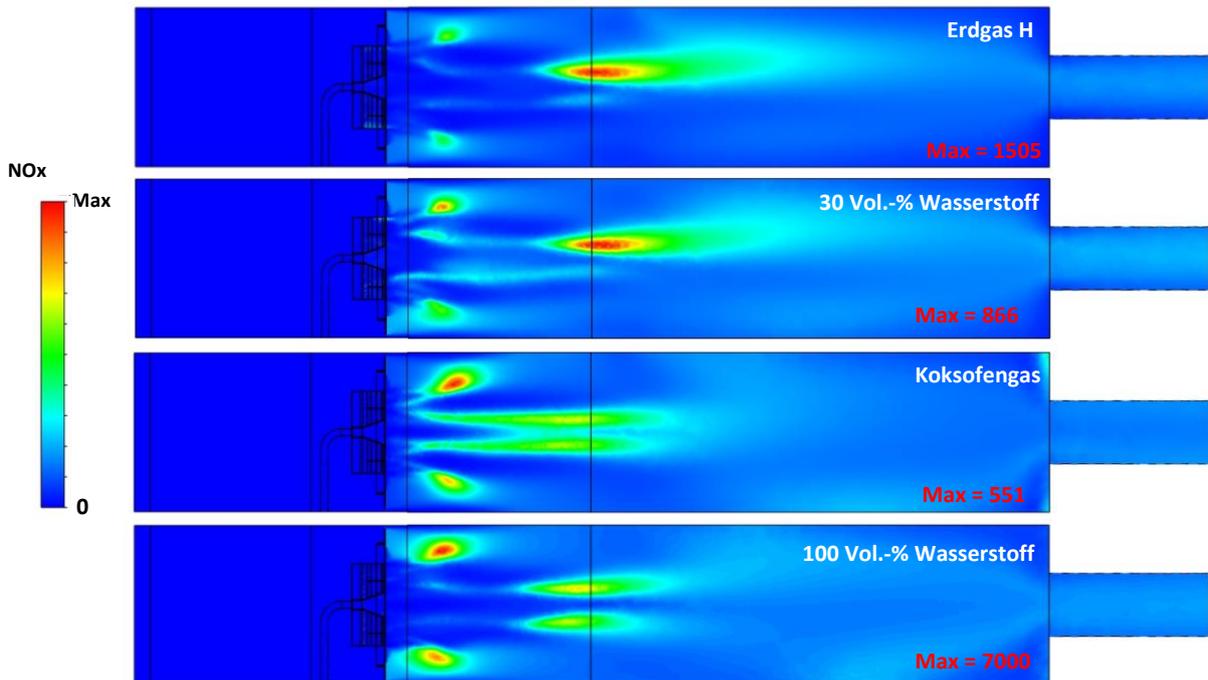


Abbildung 4.2.2.5 NO_x-Konzentration [ppm]

Für alle Brennstoffe ergibt sich bei idealer Anströmung eine stabile deutlich längere Flamme. Durch die hohe Prozessluftmenge ist ein erheblicher Sauerstoffüberschuss vorhanden. Ein vollständiger Brennstoffausbrand ist gewährleistet. Der Brenner erreicht bei allen Brennstoffen die volle Leistung. Der Betrieb mit 100 Vol.-% Wasserstoff ist möglich. Für die Simulationen mit 100 Vol.-% Wasserstoff wurde der Verbrennungsluft ein Volumenanteil von 1% CO₂ hinzugefügt. Die geringe Menge CO₂ wurde vom Strahlungsmodell für die Bestimmung der Absorptionskoeffizienten benötigt. Deshalb sieht man in **Abbildung 4.2.28** für den Brennstoff 100 Vol.-% H₂ leichte Spuren von CO₂ in der Verbrennungsluft. In **Tabelle 4.2.2.5** sind die NO_x-Kaminwerte der verschiedenen Brennstoffe aufgelistet. Ausgehend vom Brennstoff Erdgas H sinken die NO_x-Werte zunächst mit zunehmendem Wasserstoffgehalt bis zum Brennstoff Koksofengas. Beim Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff ist dann ein massiver Anstieg der NO_x-Werte zu verzeichnen.

Tabelle 4.2.2.5 NO_x-Kaminwerte der verschiedenen Brennstoffe

Brennstoff	NO _x [ppm] _{trocken}	NO _x [mg/m ³ _N] @17 Vol.-% O ₂	NO _x [mg/MJ]
Erdgas H	267	600	644,2
30 Vol.-% Wasserstoff	184	426	444,9
Koksofengas	91	221	221,3
100 Vol.-% Wasserstoff	1.267	3.330	3014,8

4.2.2.6 Brenneroptimierung

Eine Optimierung des Brenners soll mittels CFD-Simulationen durchgeführt werden. Die Optimierung erfolgt bei idealer Anströmung des Brenners. Durch die Optimierung soll eine Reduzierung der NO_x -Werte erreicht und eine Überhitzung des Brenners vermieden werden. Es wird untersucht wie sich eine Reduzierung oder Erhöhung des Impulsstroms an den Brennstoffdüsen auf die thermische Belastung des Brenners und die NO_x -Werte auswirkt. Für eine Erhöhung des Impulsstroms wird jede zweite Düse verschlossen. Für eine Reduzierung des Impulsstroms wird der Durchmesser aller 150 Düsen von 2,2 mm auf 2,4 mm vergrößert. Die CFD-Ergebnisse zeigten eine niedrigere thermische Belastung des Brenners und niedrigere NO_x -Werte bei Verringerung des Impulsstroms. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit dem ursprünglichen Düsendurchmesser von 2,2 mm und dem vergrößerten Düsendurchmesser von 2,4 mm. In **Abbildung 4.2.30** ist die Temperaturverteilung im Brennernaufeld für den Brennstoff Erdgas H links bei einem Düsendurchmesser von 2,2 mm und rechts von 2,4 mm dargestellt. In **Abbildung 4.2.31** ist die Temperaturverteilung im Brennernaufeld für den Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff links bei einem Düsendurchmesser von 2,2 mm und rechts von 2,4 mm dargestellt.

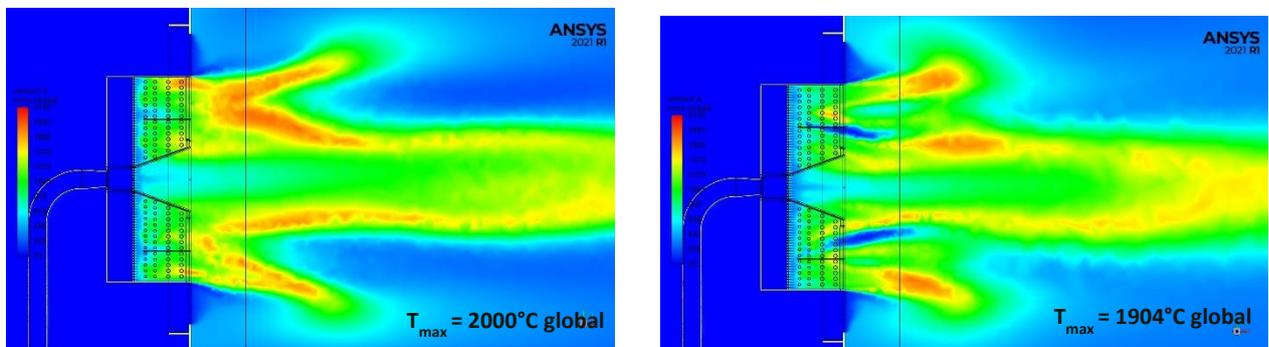


Abbildung 4.2.2.6 Temperaturverteilung im Brennernaufeld, Brennstoff Erdgas H, Düsendurchmesser links 2,2 mm rechts 2,4 mm

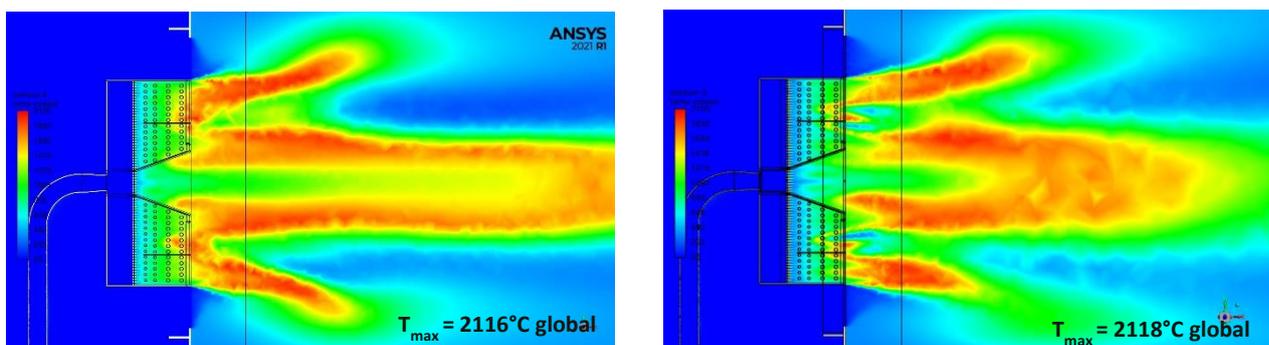


Abbildung 4.2.2.6- Temperaturverteilung im Brennernaufeld, Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff, Düsendurchmesser links 2,2 mm rechts 2,4 mm

Nach der Erweiterung der Düsendurchmesser sinkt die maximal auftretende Temperatur im Ofen für den Brennstoff Erdgas H um fast 100 °C. Für den Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff ist dagegen keine nennenswerte Absenkung der Temperatur mit den größeren Düsendurchmessern zu verzeichnen. Die Flamme wirkt kürzer. Dies liegt aber daran, dass die Flamme senkrechte zur Darstellungsrichtung umgelenkt wird.

Auch die Wandtemperatur des Brenners sinkt nach dem Aufbohren der Düsen deutlich.

In **Abbildung 4.2.32** ist die Wandtemperatur des Brenners für den Brennstoff Erdgas H in einer Ansicht von vorne dargestellt. Links ist die Wandtemperaturen für die Düsendurchmesser 2,2 mm und rechts für die Düsendurchmesser 2,4 mm zu sehen.

Abbildung 4.2.33 zeigt die Wandtemperatur des Brenners für den Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff. Hier sind ebenfalls links die Wandtemperaturen für die Düsendurchmesser 2,2 mm und rechts für die Düsendurchmesser 2,4 mm dargestellt. Nach dem Aufbohren der Düsen ist eine deutliche Temperaturabnahme an der Brennerwand für beide Brennstoffe erkennbar.

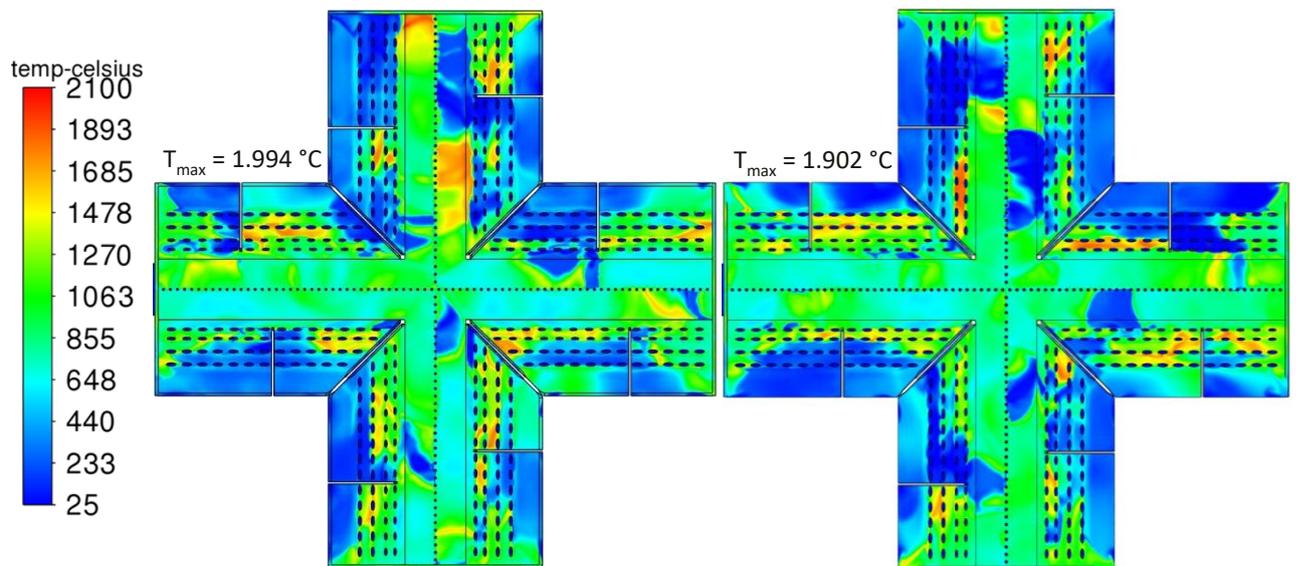


Abbildung 4.2.2.6 Wandtemperatur Brenner, Brennstoff Erdgas H, Düsendurchmesser links 2,2 mm, rechts 2,4 mm

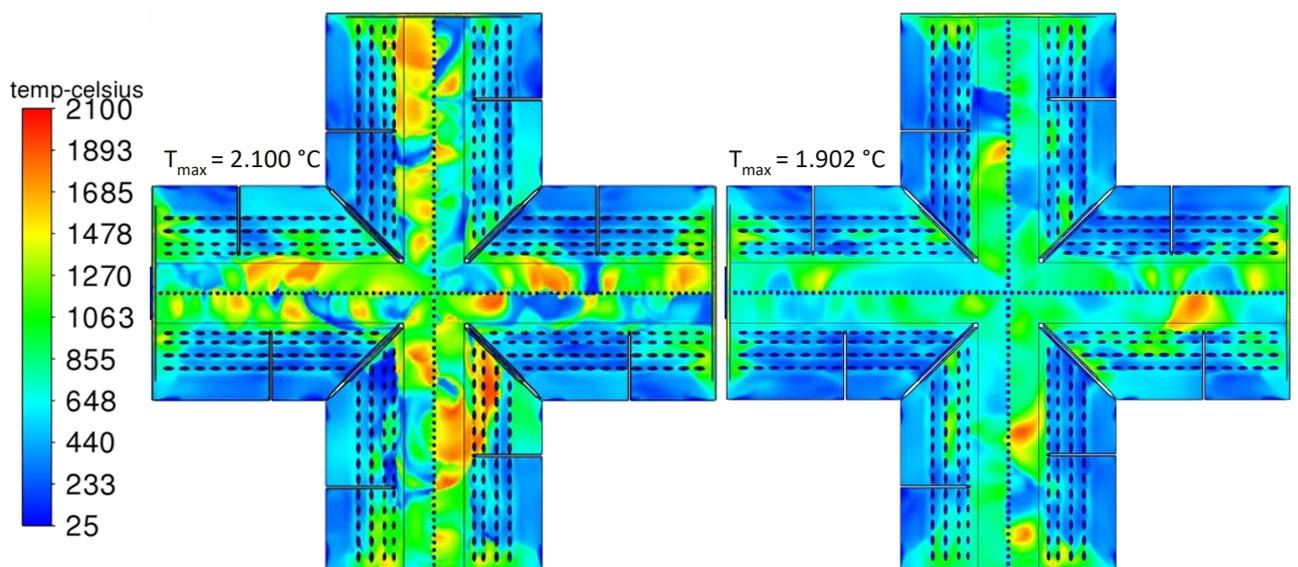


Abbildung 4.2.2.6 Wandtemperatur Brenner, Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff, Düsendurchmesser links 2,2 mm, rechts 2,4 mm

Abbildung 4.2.34 zeigt die NO_x-Konzentrationen in der Messebene für den Brennstoff Erdgas H. Oben sind die Ergebnisse für die Düsendurchmesser 2,2 mm und unten für 2,4 mm dargestellt.

Abbildung 4.2.35 zeigt die NO_x-Konzentrationen in der Messebene für den Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff. Auch hier sind oben die Ergebnisse für die Düsendurchmesser 2,2 mm und unten für 2,4 mm dargestellt. Nach dem Aufbohren der Düsendurchmesser ist für beide Brennstoffe eine deutliche Herabsetzung der NO_x-Werte erkennbar. Dies wird auch anhand der Kaminwerte deutlich, die in **Tabelle 4.2.2.6** für den Brennstoff Erdgas H und in

Tabelle 4.2.2.6 für den Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff für beide Düsendurchmesser zusammengestellt sind.

Die NO_x-Werte sinken nach Erweiterung der Düsendurchmesser auf ca. ein Drittel des ursprünglichen Wertes.

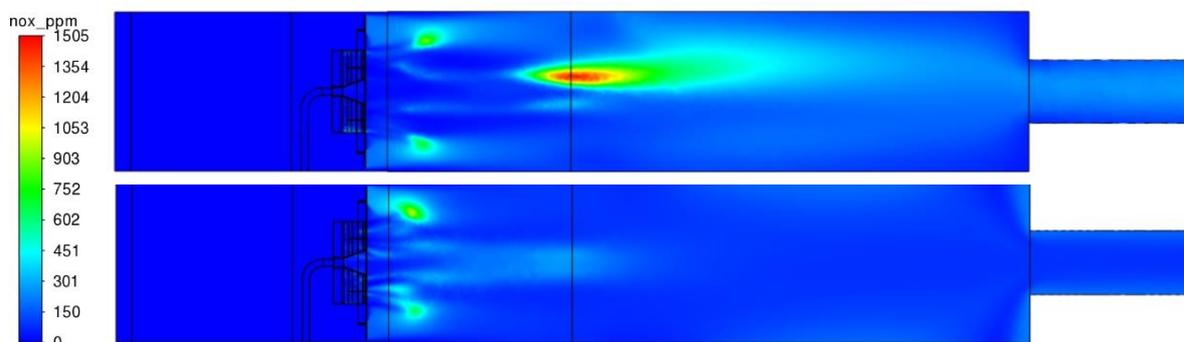


Abbildung 4.2.2.6 NO_x-Konzentration in [ppm] trocken, Brennstoff Erdgas H, Düsendurchmesser 2,2 mm oben und 2,4 mm unten

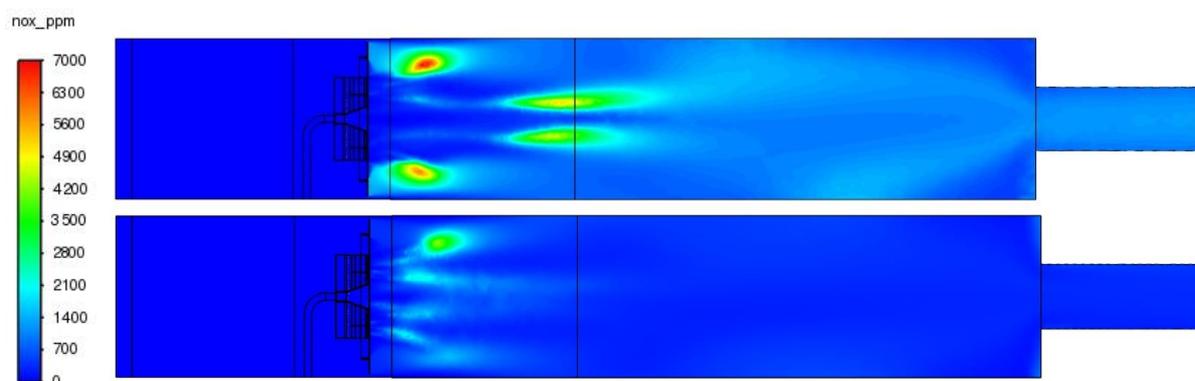


Abbildung 4.2.2.6 NO_x-Konzentration in [ppm] trocken, Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff, Düsendurchmesser 2,2 mm oben und 2,4 mm unten

Tabelle 4.2.2.6 Kaminwerte NO_x Brennstoff Erdgas H

Brennstoff Erdgas H	Düsendurchmesser [mm]	Düsendurchmesser [mm]
	2,2	2,4
NO _x [ppm] _{trocken}	267	114
NO _x [mg/m ³ _N] @17% O ₂	600	286

NO _x [mg/MJ]	644,2	277,8
-------------------------	-------	-------

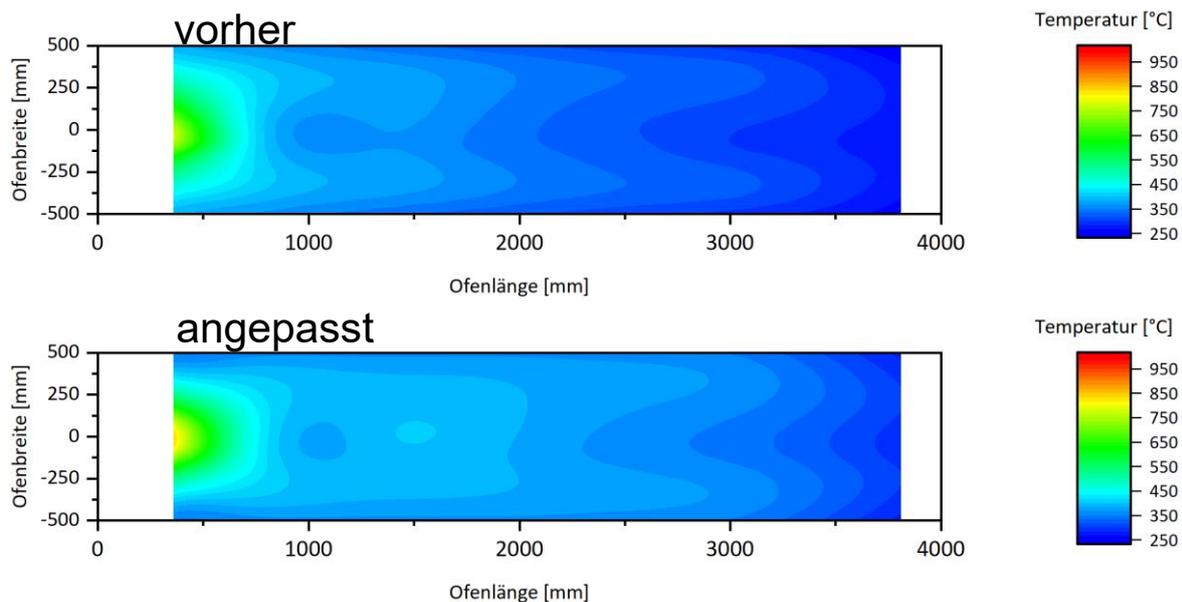
Tabelle 4.2.2.6 Kaminwerte NO_x Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff

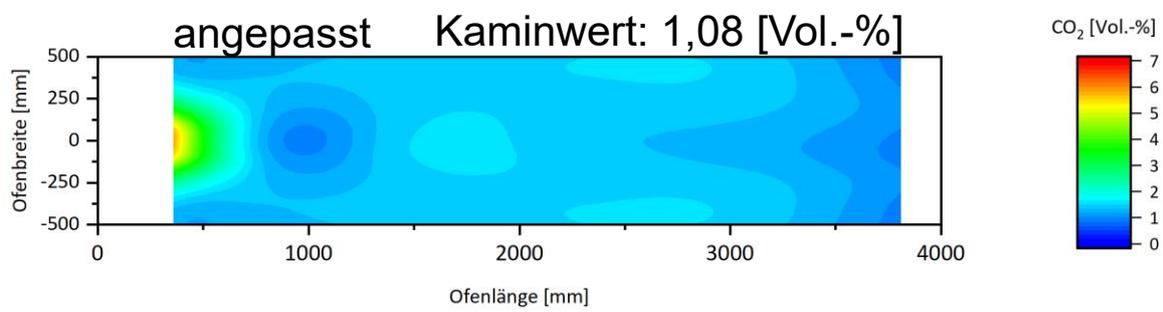
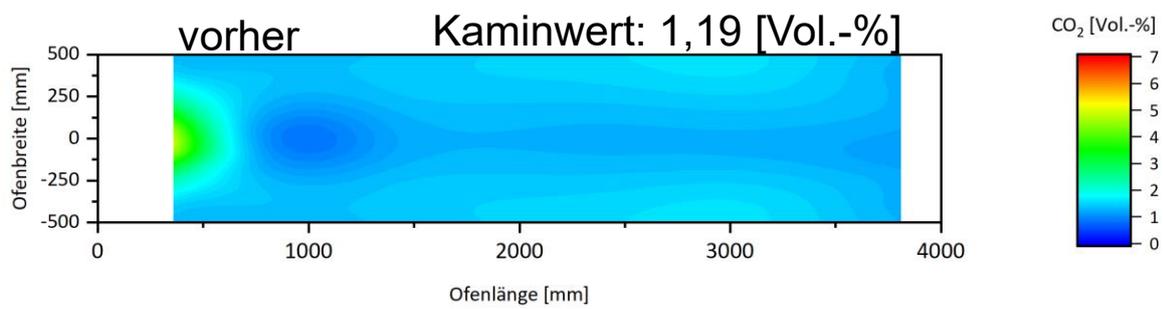
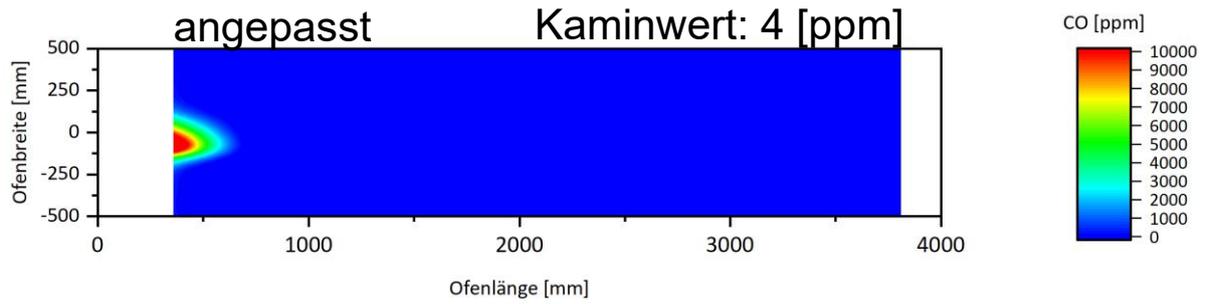
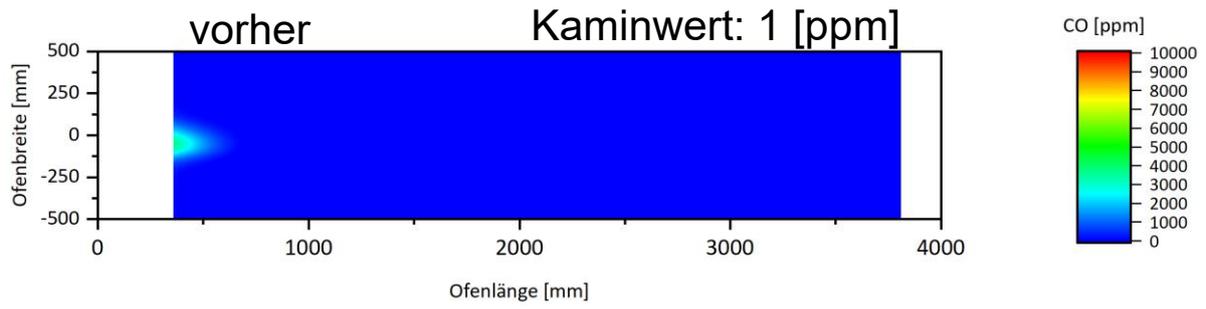
Brennstoff 100 Vol.-% Wasserstoff	Düsendurchmesser [mm]	Düsendurchmesser [mm]
	2,2	2,4
NO _x [ppm] _{trocken}	1267	416
NO _x [mg/m ³ _N] @17% O ₂	3330	1146
NO _x [mg/MJ]	3015	955

4.3 Fertigung des Brennermodells

4.3.1 Versuchsergebnisse und Beurteilung

Aufgrund der Ergebnisse der CFD-Simulationen (vgl. 4.2.2) wurde eine Vergrößerung der Brennstoffdüsen von 2,2 mm auf 2,4 mm vorgenommen. Die Absenkung der maximal auftretenden Temperatur und der Wandtemperaturen erscheint als die Maßnahme mit dem größten Potential zur Reduzierung der Stickoxid-Emissionsbildung. **Abbildung 4.3.1.** zeigt die Messergebnisse für eine reine Erdgasverbrennung für die Ausgangssituation mit einem Brennstoffdüsendurchmesser von 2,2 mm und das angepasste Brennermodell mit einem Düsendurchmesser von 2,4 mm. Wie in der CFD-Simulation berechnet, geht mit der Vergrößerung des Brennstoffdüsendurchmessers eine messbare Reduktion der Stickoxidemissionen einher





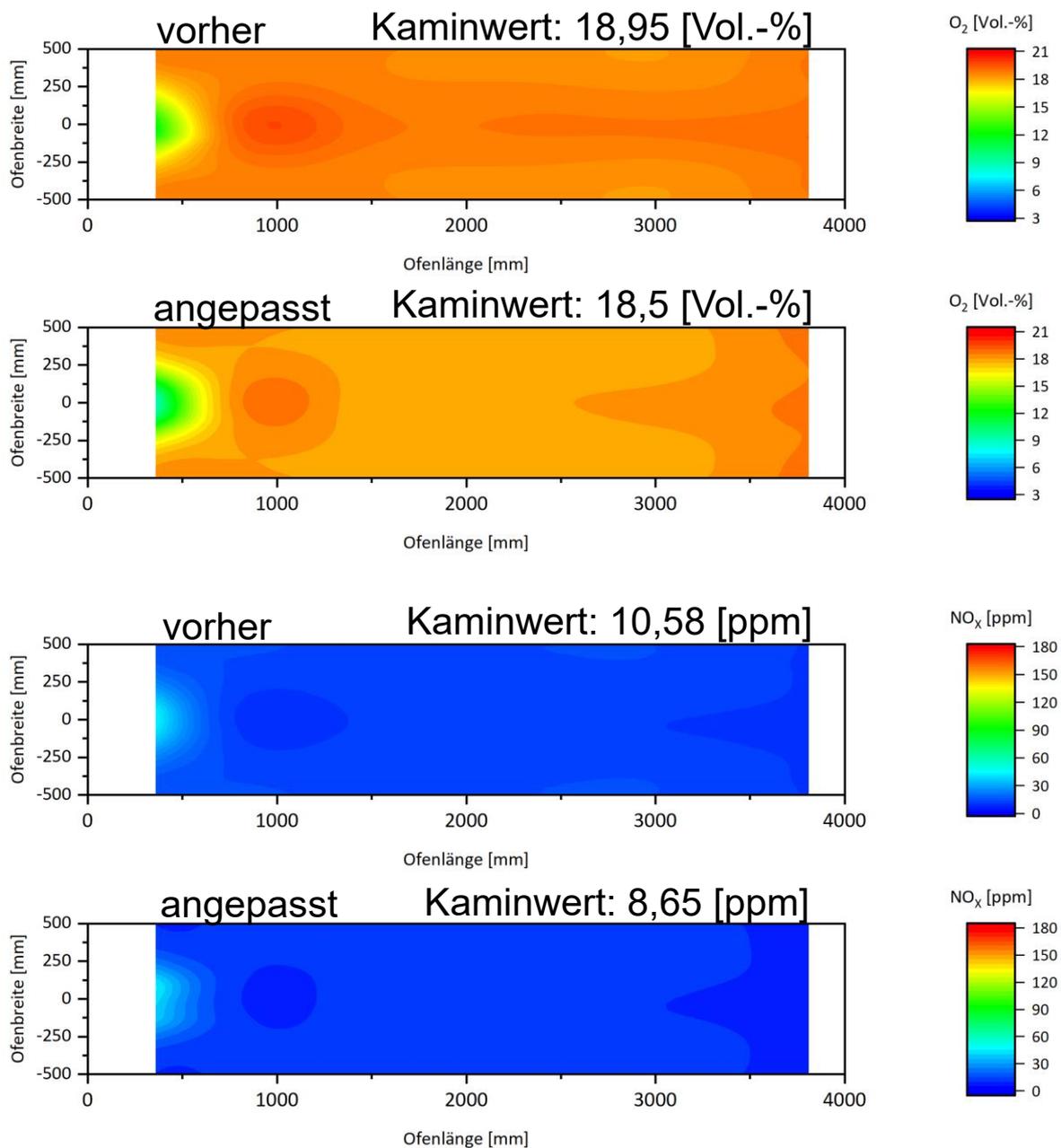
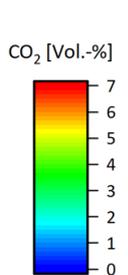
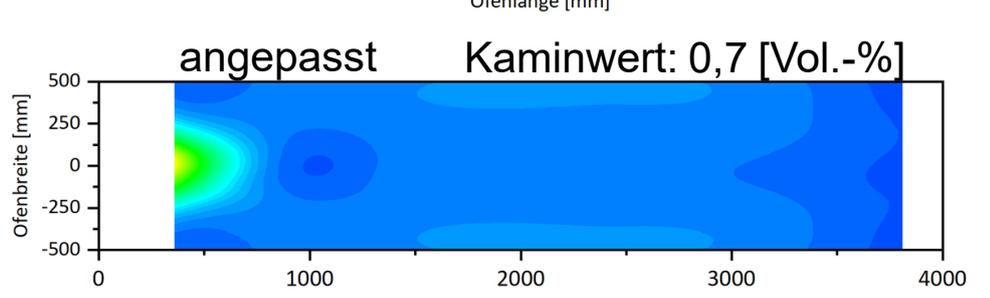
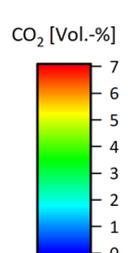
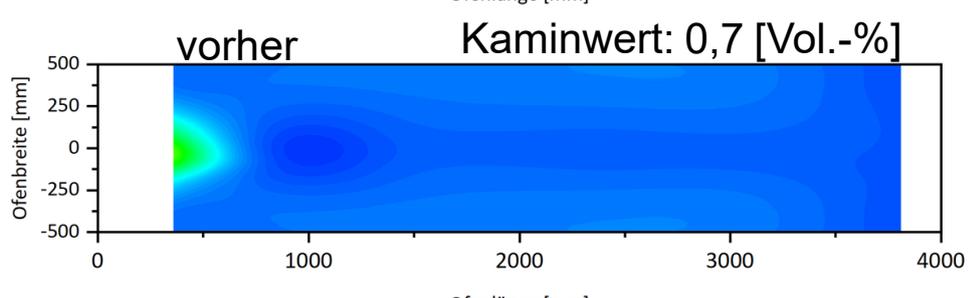
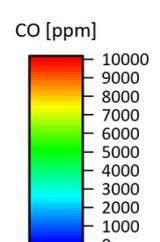
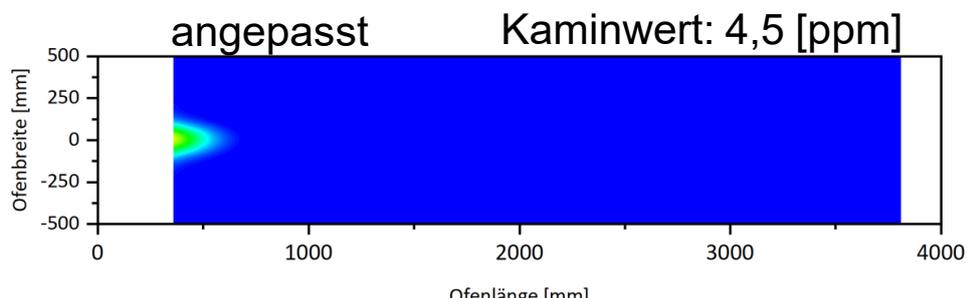
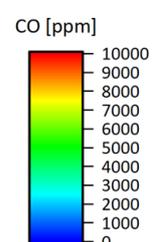
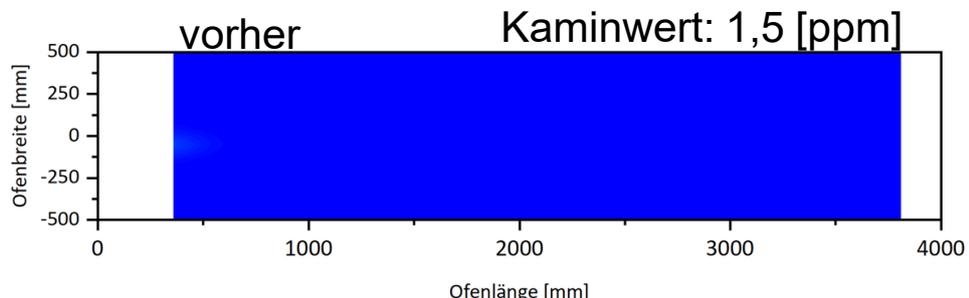
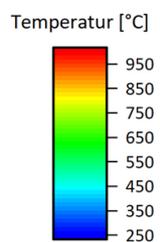
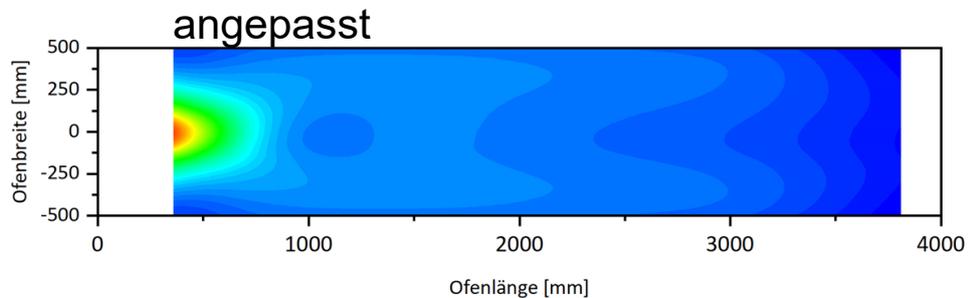
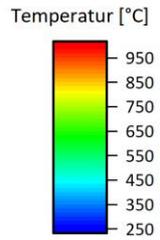
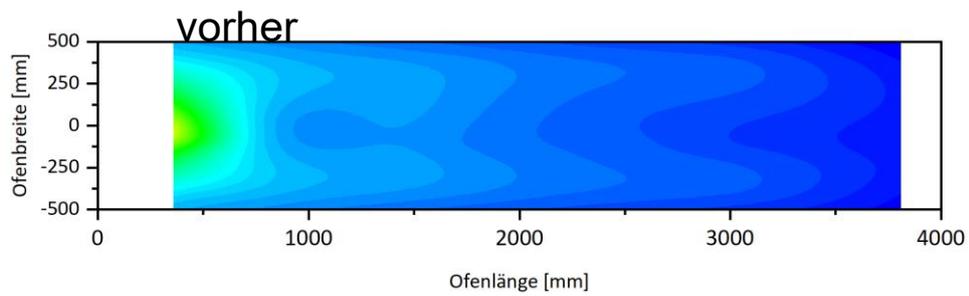


Abbildung 4.3.1.: Visualisierung Messergebnisse bei reiner Erdgasverbrennung

In **Abbildung 4.3.2** sind die Messergebnisse für die Referenzmessungen mit Koksofengas und die Verbrennungen von Koksofengas mit dem angepassten Brennermodell grafisch dargestellt. Das neue Feuerungssystem wirkt sich sehr negativ auf die Stickoxidbildung bei der Koksofengasfeuerung aus. Die in **Abbildung 4.3.2** dargestellten, gemessenen Emissionen bleiben unverändert, jedoch gibt es eine Differenz in dem gemessenen Restsauerstoff. Abbildung 4.3.1.5 zeigt die Auswirkungen des neuen Brennersystems auf die Stickoxidbildung bei einem Bezugswert von 17 Vol.-% Restsauerstoff.



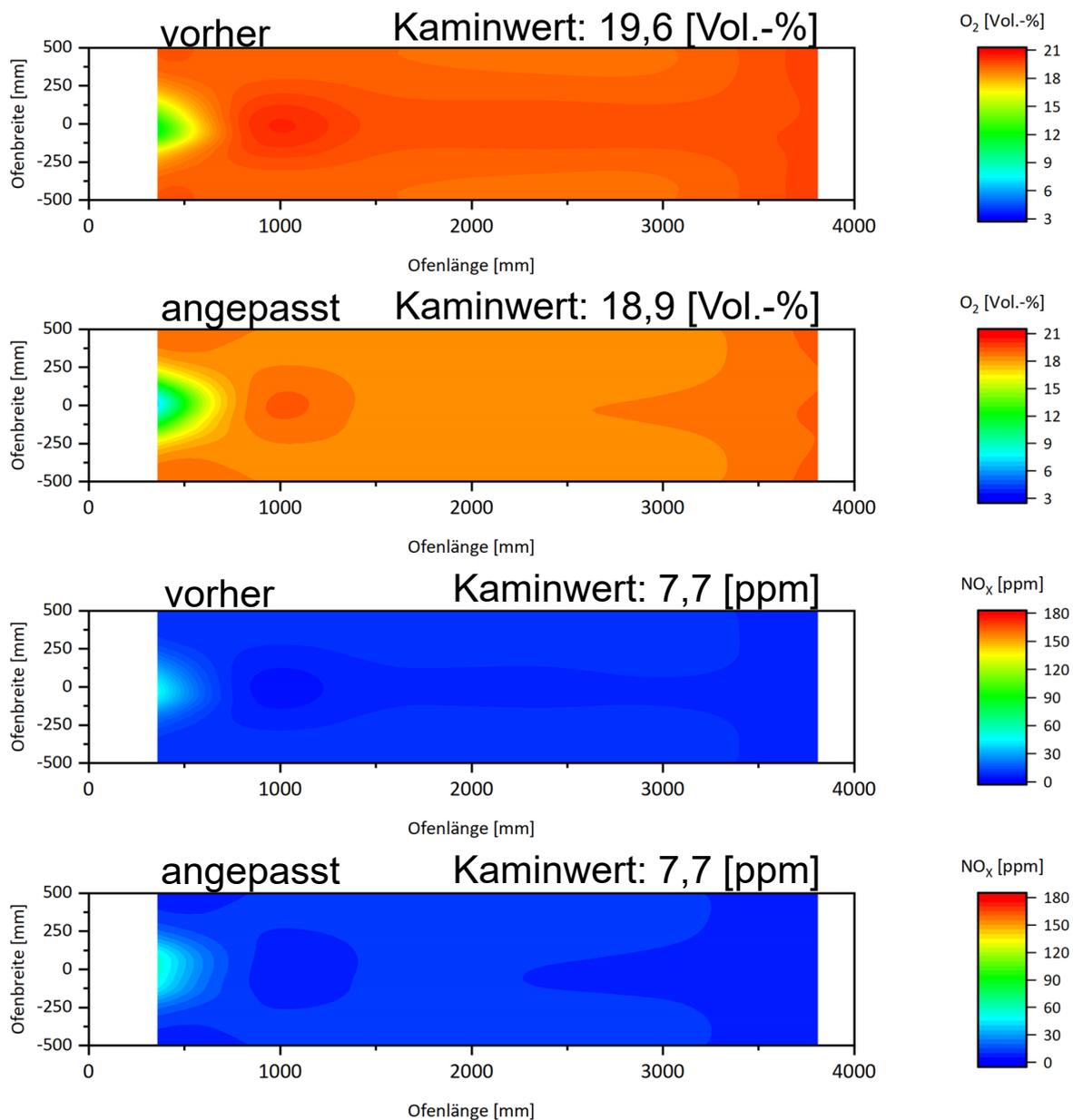
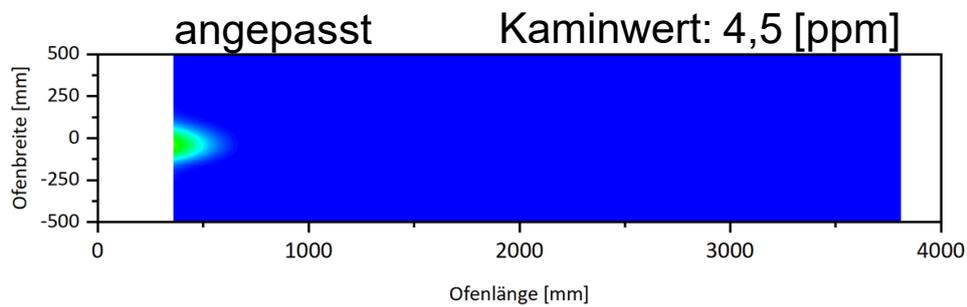
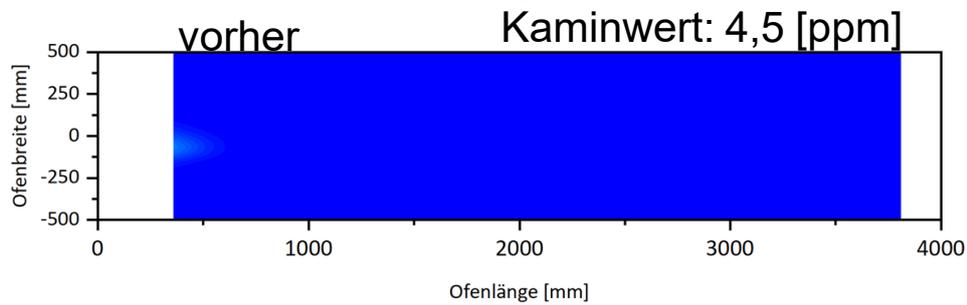
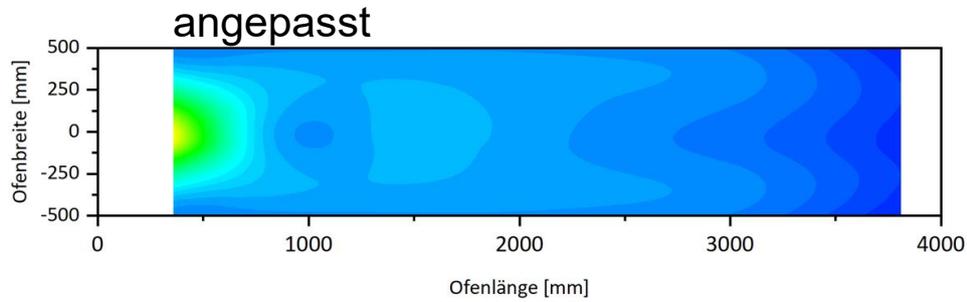
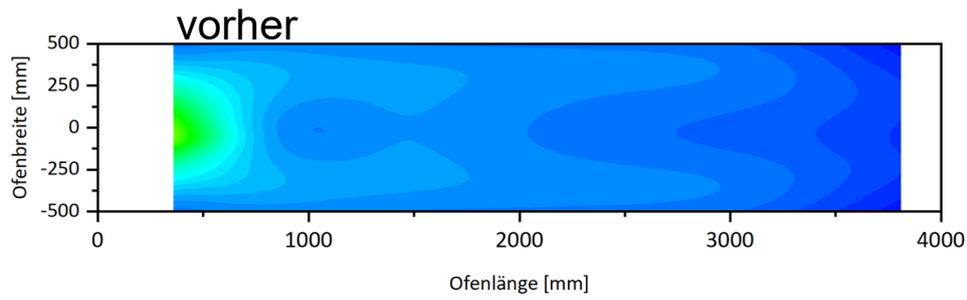
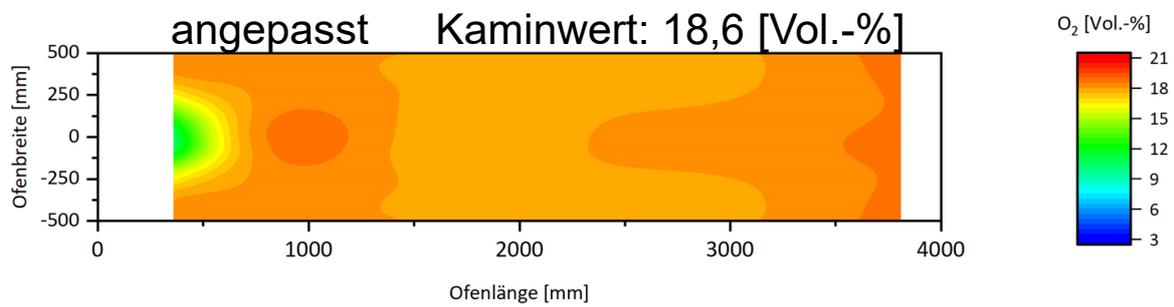
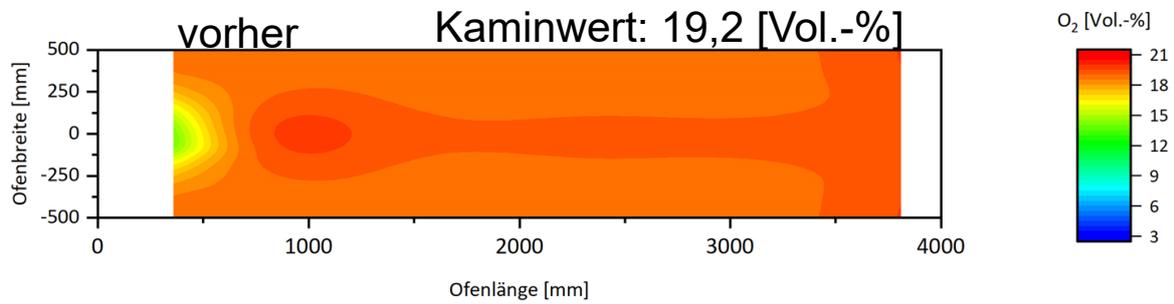
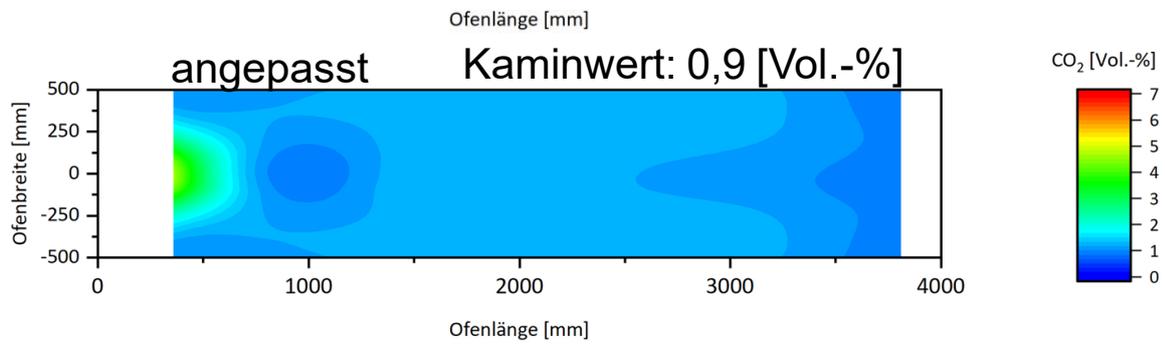
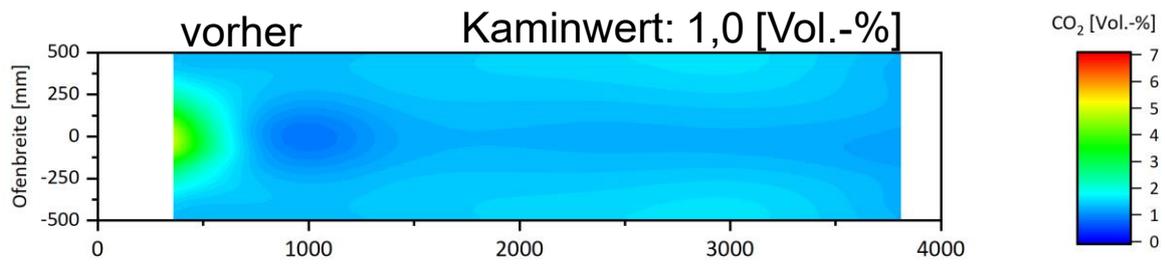


Abbildung 4.3.2: Gegenüberstellung der Messergebnisse bei der Verbrennung von Koksofengas für das originale Brennsystem und dem angepassten Brennsystem

In **Abbildung 4.3.3** sind die Messergebnisse für eine Zumischung von 30 Vol.-% Wasserstoff zu Erdgas grafisch dargestellt. Wie mit der CFD-Simulation berechnet, wird die Stickoxidbildung durch die Absenkung der maximalen Temperatur reduziert. Die Auswirkungen auf die Stickoxidbildung sind in diesem Anwendungsfall am stärksten ausgeprägt, wie **Abbildung 4.3.5** zeigt.





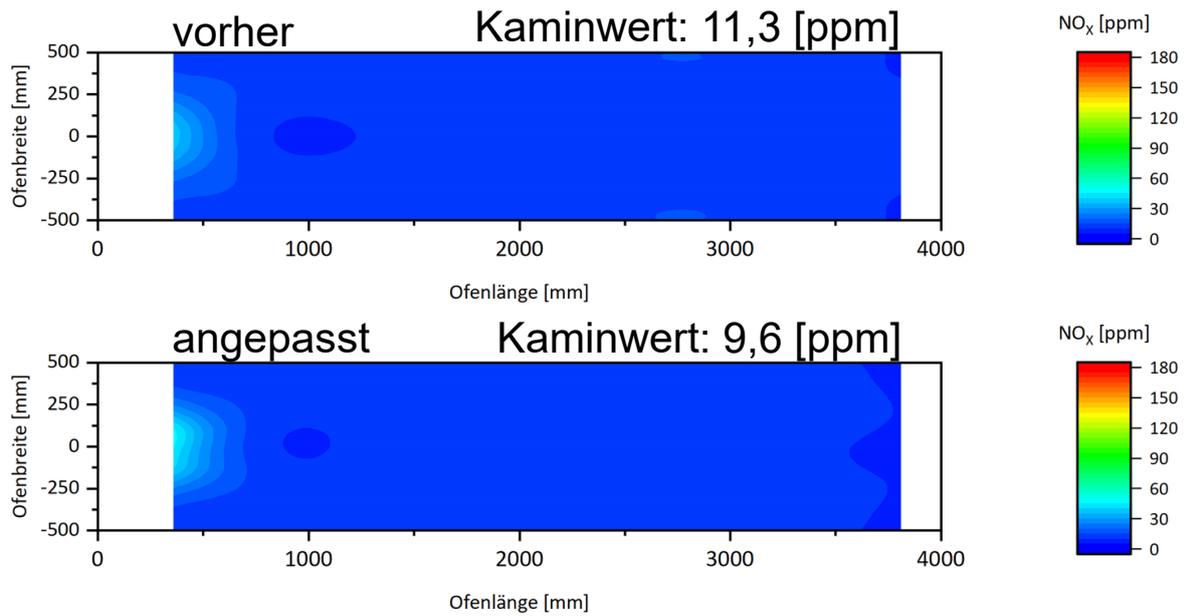
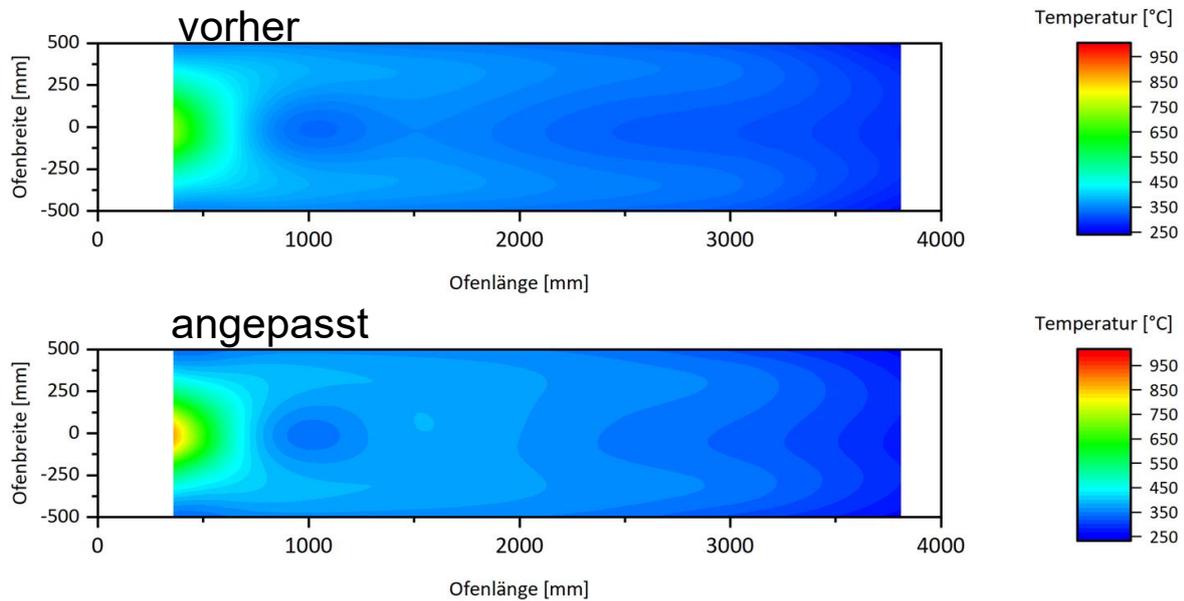


Abbildung 4.3.3: Gegenüberstellung der Messergebnisse bei der Verbrennung von 30 Vol.-% Wasserstoff für das originale Brennsystem und dem angepassten Brennsystem

Abbildung 4.3.4 zeigt die Messergebnisse für den Referenzbrenner und das neue Brennermodell bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff. Auch hier konnte eine Reduktion der Stickoxidemissionen erreicht werden. Auf die Darstellung der Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenstoffdioxidverteilung wird aufgrund des nicht vorhandenen Kohlenstoffs auf der Brenngasseite verzichtet.



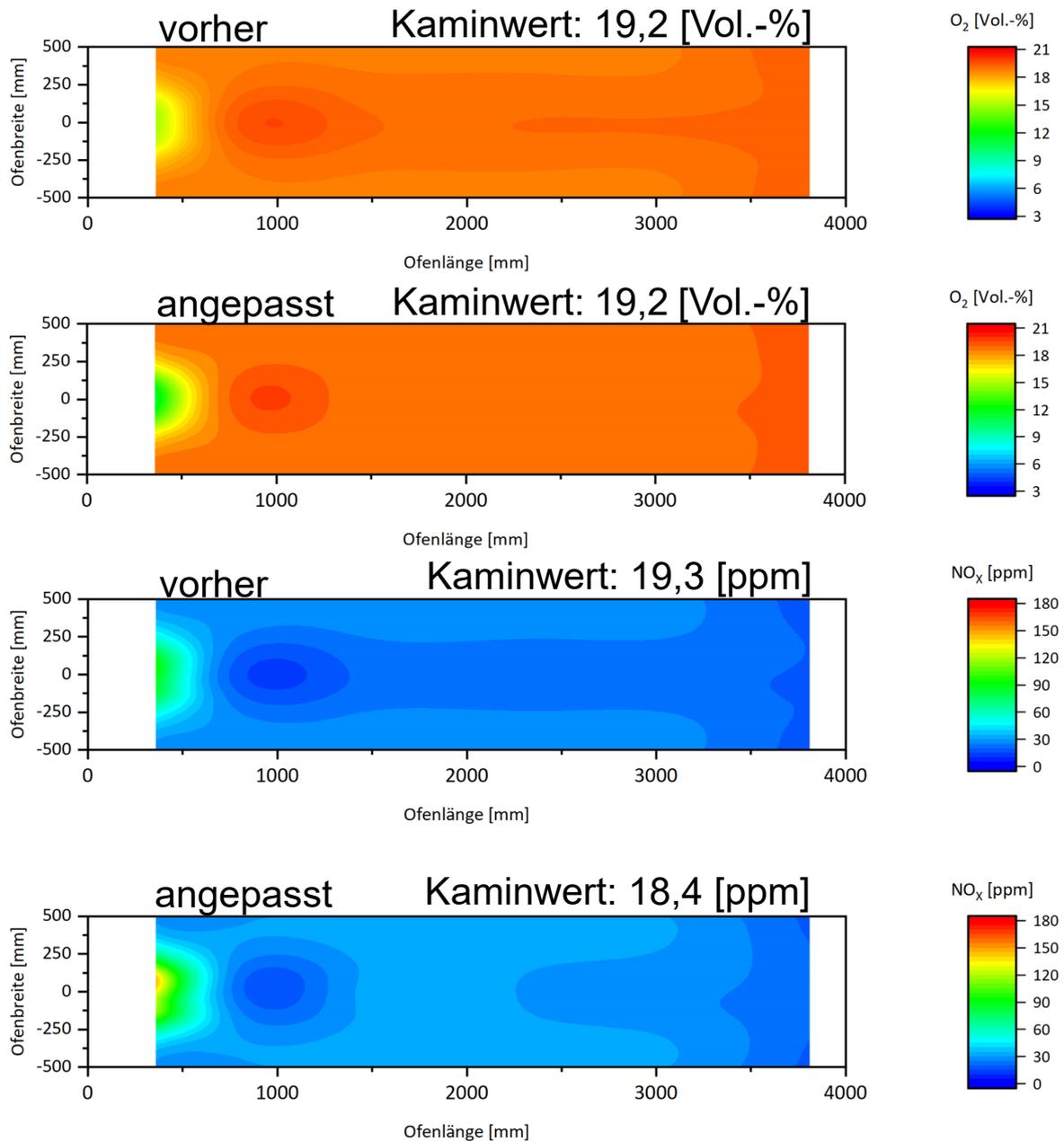


Abbildung 4.3.4: Gegenüberstellung der Messergebnisse bei einer reinen Wasserstoffverbrennung von dem Originalbrennersystem und dem angepassten Brennersystem

Abbildung 4.3.5 gibt einen Überblick über die Stickoxidemissionen auf 17 Vol.-% Restsauerstoff bezogen in Abhängigkeit von den getesteten Gaszusammensetzungen. Es zeigt sich, dass bei allen getesteten Gasgemischen eine Verbesserung der Stickoxidemissionen erreicht wurde. Die stärksten Verbesserungen wurden bei Koksofengas und 30 Vol.-% Wasserstoff erreicht.

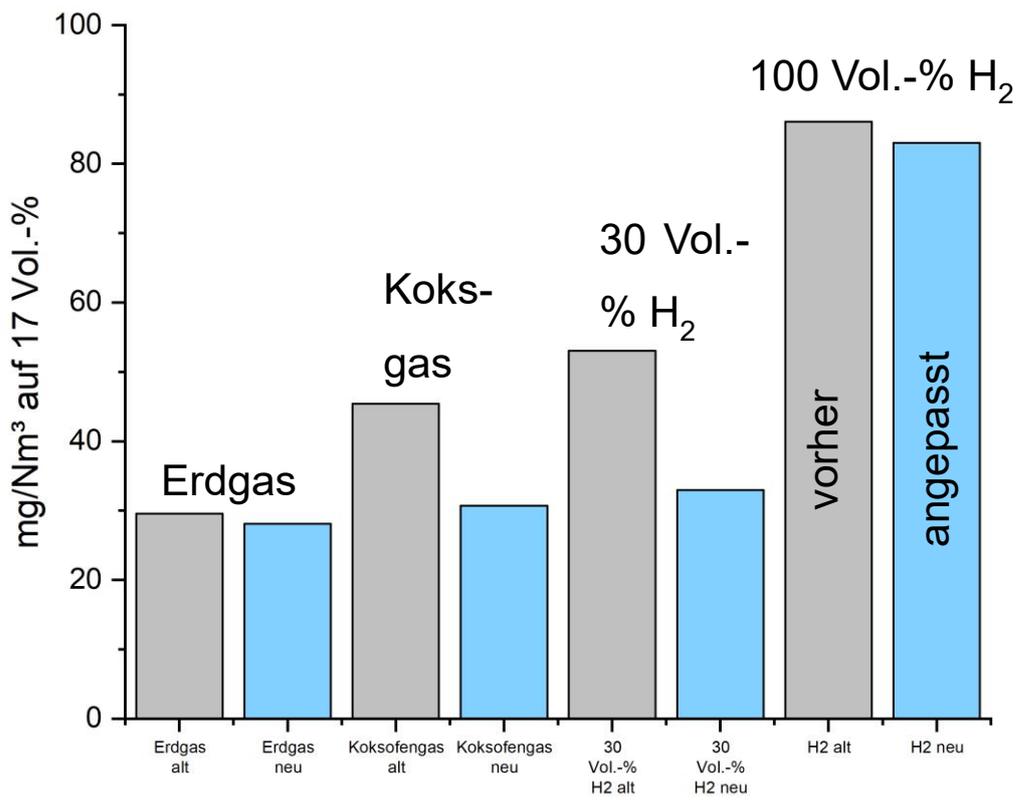


Abbildung 4.3.5: Vergleich der Brennersysteme (vorher/grau angepasst/blau) und den erzeugten Stickoxidemissionen bezogen auf 17 Vol.-% Restsauerstoff in mg/m³

5 Ausblick

In den kommenden Jahren wird sich die Art und Weise, wie in Deutschland Energie erzeugt und umgewandelt wird, grundlegend ändern. Das Ziel der Bundesregierung, bis 2035 CO₂-neutral zu werden, erfordert eine umfassende und zügige Energiewende. Das bedeutet, dass die bisherigen Methoden der Energiebereitstellung grundlegend überdacht und ersetzt werden müssen. Um eine flächendeckende Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien zu realisieren, sind innovative Denkweisen und neue Energiekonzepte erforderlich. Die Entwicklung und Umsetzung effizienter und fortschrittlicher Technologien wird dabei eine zentrale Rolle spielen.

Derzeit wird die Nutzung von Wasserstoff in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen vor allem durch den Einsatz von Erdgas ermöglicht. Der Einsatz von grünem Wasserstoff als erneuerbarer Energieträger bietet jedoch eine vielversprechende Möglichkeit, die CO₂-Neutralität in diesem Industriesektor weiter voranzutreiben. Grüner Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird, kann eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von CO₂-Emissionen spielen.

Die Verbrennung von Wasserstoff ist jedoch technisch anspruchsvoll, da sie aufgrund der hohen adiabaten Flammentemperatur mit hohen Stickoxidemissionen (NO_x) verbunden ist. Diese Emissionen stellen eine Herausforderung dar, da sie gesundheitsschädlich und umweltbelastend sind. Wie die Erfahrungen aus dem aktuellen Forschungsprojekt zeigen, kann der Einsatz von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gasgemischen durch eine angepasste Feuerungstechnik effizient und umweltschonend gestaltet werden. Trotz der in diesem Forschungsprojekt erzielten Fortschritte besteht bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff noch Optimierungsbedarf. Die technischen Ansätze müssen weiter verfeinert werden, um die Emissionen zu minimieren und die Effizienz der Verbrennungsprozesse zu maximieren. Dies erfordert kontinuierliche Forschung und Entwicklung sowie eine enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Industrie und Politik.

Insgesamt zeigt sich, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien und die damit verbundene Nutzung von grünem Wasserstoff erhebliche Potenziale bietet, um die Ziele der CO₂-Neutralität zu erreichen. Mit den richtigen technologischen Lösungen und einem klaren Fokus auf Innovation kann eine nachhaltige und umweltfreundliche Energieversorgung für die Zukunft sichergestellt werden.

6 Gegenüberstellung von Forschungszielen und Forschungsergebnissen

Tabelle 6.1: Forschungsziele und erzielte Ergebnisse

Forschungsziel	Erzieltes Ergebnis
Entwicklung flexibler Flächenbrennersysteme zur Integration von Prozessgasen und Wasserstoff in energieintensiven Industrieprozessen	Es wurden im Rahmen dieses Vorhabens ein Flächenbrennerkonzept für die flexible Nutzung von diversen Brennstoffen entwickelt.
Implementierung von Wasserstoff in relevante Verbrennungsprozesse verschiedener industrieller Zweige zur Dekarbonisierung	Flächenbrennerkonzept die u.a. Nutzung von reinem Wasserstoff wurde im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt.
Entwicklung eines Verbrennungsmodells für spezifische Prozessparameter auf Basis der Messdaten	Verbrennungsmodell wurde anhand der Messdaten für spezifische Prozessparameter entwickelt.

7 Nutzen der Forschungsergebnisse

7.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens konnten umfassende Möglichkeiten zur Bereitstellung eines einfachen, aber gleichzeitig effizienten Brennersystems aufgezeigt werden. Dieses System ermöglicht es, eine signifikante Reduzierung der Stickoxidemissionen bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe wie Erdgas, Wasserstoff, Koksofengas und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen zu erzielen.

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Verbrennung von Wasserstoff liegt in dessen höherem Volumenstrom und der geringeren Dichte im Vergleich zu Erdgas. Diese Eigenschaften führen zu einer Veränderung des Impulses am Brenner. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wurden spezifische Anpassungen am Durchmesser der Brennstoffdüsen vorgenommen. Durch diese Anpassungen konnte die maximale Flammentemperatur effektiv gesenkt werden.

Die Reduzierung der Flammentemperatur spielt eine entscheidende Rolle, da die NO_x -Bildung stark von der Temperatur abhängt. Indem die Flammentemperatur gesenkt wird, wird der primäre Einflussfaktor für die NO_x -Bildung direkt adressiert. Folglich konnte durch diese Maßnahmen eine erhebliche Reduktion der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung der verschiedenen untersuchten Brennstoffe erreicht werden. Insgesamt leistet das Forschungsvorhaben einen bedeutenden wissenschaftlichen und technischen Beitrag zur Weiterentwicklung des aktuellen Stands der Technik. Insbesondere im Hinblick auf eine stickoxidärmere Verbrennung von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gemischen für industrielle Prozesse oder speziell für Kanalbrenner bietet diese Forschung wertvolle Erkenntnisse. Darüber hinaus ermöglicht das entwickelte Brennersystem eine flexible Verbrennung unterschiedlicher Brennstoffe, was zu einer verbesserten Anpassungsfähigkeit in verschiedenen industriellen Anwendungen führt.

7.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Im Rahmen dieses umfassenden Forschungsvorhabens wurden eine Vielzahl von numerischen, experimentellen und praktischen Untersuchungen an einem Kanalbrenner durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, die energetische Nutzung verschiedener Brennstoffe, darunter Erdgas, Koksofengas, Raffineriegas mit einem Wasserstoffanteil von 30 Volumenprozent und reiner Wasserstoff, mit einem einzigen, vielseitigen Brennersystem zu demonstrieren.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungsergebnisse haben innovative Ansätze für die Brennerhersteller hervorgebracht. Diese Ansätze sind besonders wertvoll, da sie die Möglichkeit bieten, neue Marktsegmente im Bereich der erneuerbaren Energien zu erschließen. Durch die erfolgreiche Demonstration der effizienten Nutzung verschiedener Brennstoffe in einem einzigen Brennersystem wird aufgezeigt, wie flexibel und anpassungsfähig moderne Brennersysteme gestaltet werden können.

Ein bedeutender Aspekt dieser Forschung ist die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) im Brennerherstellungssektor. Die entwickelten innovativen Ansätze bieten diesen Unternehmen die Gelegenheit, ihre Produktpalette zu erweitern und sich in neuen, aufstrebenden Märkten der erneuerbaren Energien zu positionieren. Dies kann dazu beitragen, ihre Marktstellung zu festigen und auszubauen.

Insgesamt zeigt dieses Forschungsvorhaben, wie durch gezielte Forschung und Entwicklung technische Innovationen entstehen, die sowohl die Effizienz als auch die Umweltverträglichkeit von Verbrennungsprozessen verbessern. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung kontinuierlicher Innovation in der Brennertechnologie und bieten wertvolle Impulse für zukünftige Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien.

8 Plan zum Ergebnistransfer

Durch die Einbindung von Brennerherstellern, Anlagenbauern und Anlagenbetreibern sowie von Verbänden im projektbegleitenden Ausschuss wird ein direkter Kenntnistransfer in die relevanten Industriezweige und eine Umsetzung der Ergebnisse realisiert. Das GWI ist seit Jahren ein etabliertes Mitglied der Gaswirtschaft und Veranstalter von Kursen, Seminaren und Kolloquien zu aktuellen Themen zur Nutzung von Gas. Des Weiteren werden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht. Damit ist insgesamt ein schneller und direkter Transfer der Ergebnisse in die Industrie gewährleistet.

	Zeitraum/ Termin	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
Während der Projektlaufzeit	Halbjährlich Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	- Kick-off-Meeting: 06.05.2021 - 1. PbA-Sitzung: 22.03.2022 - 2. PbA-Sitzung: 27.10.2022 - Abschlussmeeting: 21.12.2023	Einbeziehung der Industrie in die Forschungsaktivitäten, Know-how-Transfer in und aus der Industrie
	jährlich	Zwischenbericht	Bericht über den geplanten und erzielten Projektfortschritt
	jährlich	Tätigkeitsbericht des GWI, April 2023	Bericht über den Fortschritt öffentlich geförderter Projekte am Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
	jährlich	Veröffentlichung der erzielten Projektergebnisse auf der Homepage der RWTH Aachen – Institut für Technische Verbrennung	Schnelle und aktuelle Bekanntmachung der Ergebnisse
	jährlich	Veröffentlichung der erzielten Projektergebnisse auf der Homepage des GWI	Schnelle und aktuelle Bekanntmachung der Ergebnisse
	Quartalsweise	Newsletter des Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.	Regelmäßiges Update der Ergebnisse
	laufend	Diplom-, Master- oder Bachelorarbeit	Anfertigung einer oder mehrerer Arbeiten im Rahmen dieses Projektes
Nach Projektende	Ende des Projektes	Abschlussbericht	Zusammenstellung der Ergebnisse und Bereitstellung für PbA und interessierte KMU, Veröffentlichung auf der GWI-Homepage
	Ende des Projektes	Fachzeitschrift Prozesswärme	Veröffentlichung der erzielten Projektergebnisse
	Alle 2 Jahre	Deutscher Flammentag, Aachener Industrie- und Ofenbaukolloquium	Vorstellung der erzielten Ergebnisse

9 Projektplan

Der Zeitplan für das Projekt „Entwicklung flexibler Flächenbrennersysteme zur Integration von Prozessgasen und Wasserstoff in energieintensive Industrieprozesse“ (siehe **Abbildung 39**) sah eine Projektlaufzeit vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2023 vor. Dieser Zeitplan wurde eingehalten.

Tabelle 9.1: Personaleinsatz im Projektzeitraum, ITV

	HPA A	HPA C	HPA F
2021	16,5 PM	6 PM	20 PM
2022	6 PM	0 PM	1 PM
2023	10,2 PM	0 PM	13 PM
Summe	32,7 PM	6 PM	34 PM

Tabelle 9.2: Personaleinsatz im Projektzeitraum, GWI

	HPA-A	HPA-C	HPA-F
	Ingenieur	Techniker	HiWi
Gesamt 2023	8,84	4,11	6,29
Gesamt 2021 - 2023	21,23	15,13	13,13

10 Danksagungen

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei den Projektpartnern, durch deren Mitarbeit und Unterstützung das Projekt erfolgreich durchgeführt werden konnte. Der Dank gilt auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle Unterstützung durch Haushaltsmittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

11 Literaturverzeichnis

- [Ber18] Berger, L., Kleinheinz, K., Attili, A., Pitsch, H., "Characteristic patterns of thermodynamically unstable premixed lean hydrogen flames", Proc. Comb. Inst., 2018
- [Bue24] <https://www.buettner-energy-dryer.com/de/brenner/gas-flaechenbrenner/> (01.07.2024)
- [Der07] Derudi, M., Villani, A., Rota, R., "The Influence of Hydrogen-Containing Fuels on Mild Combustion Sustainability", gehalten auf der 3rd European Combustion Meeting ECM, Chania, Griechenland, 2007, [Online]. Verfügbar unter: /Literatur/H2/21-9.pdf.
- [Fiv24] <https://www.fives-pillard.de/02/02-06-00d.php>
(01.07.2024)
- [G262] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., „Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung“, Technisches Arbeitsblatt G 262, 2011
- [IBS24] <https://www.ibs-brenner.de/kanalbrenner-gridfire.php>
(01.07.2024)
- [Ihm08] Ihme, M., Pitsch, H., "Modeling of radiation and nitric oxide formation in turbulent non-premixed flames using a flamelet/progress variable formulation", Phys. Fluids, Vol. 20, 2008
- [Iav19] Iavarone, S., Cafiero, M., Ferrarotti, M., Contino, F., Parente, A., "A multiscale combustion model formulation for NO_x predictions in hydrogen enriched jet flames", International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 44, S. 23436–23457, 2019.
- [Knu09] Knudsen, E., Pitsch, H., "A general flamelet transformation useful for distinguishing between premixed and non-premixed modes of combustion", Combustion and Flame, Vol. 156, 2009.
- [Knu12] Knudsen, E., Pitsch, H., "Capabilities and limitations of multi-regime flamelet combustion models", Combustion and Flame, Vol. 159, 2012.
- [Kon09] Konnov, A.A., Riemeijer, R., de Goey, L.P.H., "Adiabatic laminar burning velocities of CH₄+H₂+air flames at low pressures", gehalten auf der European Combustion Meeting, Wien, Österreich, 2009, [Online]. Verfügbar unter: http://combustion.org.uk/ECM_2009/P810118.pdf.
- [Kös04] Kösters, M., Kliemt, C.: „Theoretische und experimentelle Untersuchungen einer Zusatzfeuerung in gasturbinengestützten KWK-Prozessen für eine Optimierung hinsichtlich Flammenstabilität und Ausbrandverhalten“, AiF-Abschlussbericht 13117 N, 2004
- [Lei18] Leicher, J., Nowakowski, T., Giese, A., Görner, K., "Hydrogen in natural gas: how does it impact industrial end users?", gehalten auf der World Gas Conference 2018, Washington DC, USA, 2018.
- [Max24] <https://de.maxoncorp.com/products/naturalgasburnerline/apx-burner-line-burners/?back=product> (01.07.2024)
- [Nor24] <https://www.nordluft.com/heizen/prozesswaerme/flaechenbrenner-twtvmp-gas.html>
(01.07.2024)
- [Now17] Nowakowski, T., Leicher, J., Giese, A., "Untersuchung der Auswirkung von Wasserstoff-Zumischung ins Erdgasnetz auf industrielle Feuerungsprozesse in thermoprozesstechnischen

Anlagen (H₂-Substitution)”, Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 18518 N, 2017.

- [Par08] Parente, A., Cresci, E., Galletti, C., Schiavetti, M., Riccardi, J., Tognotti, L., “Effect of H₂ Content in the Fuel on the Flameless Combustion in Industrial Burners”, gehalten auf der 31st Meeting on Combustion, Turin, Italien, 2008, [Online]. Verfügbar unter: /Literatur/H₂/XII-7.pdf.
- [Reg13] Regele, J., Knudsen, E., Pitsch, H., Blanquart, G., “A two-equation model for non-unity Lewis number differential diffusion in lean premixed laminar flames”, *Combustion and Flame*, Vol. 160, 2013.
- [Sch14] Schaffert, J., Senner, J., Tali, E., Burmeister, F., Görner, K., “The influence of power-to-gas on natural gas quality & applications”, gehalten auf der International Gas Union Research Conference (IGRC), Kopenhagen, Dänemark, 2014.
- [Tom02] Tomczak, H.-J., Benelli, G., Carrai, L., Cecchini, D., “Investigations of a gas turbine combustion system fired with mixtures of natural gas and hydrogen”, *Industrial Combustion - Journal of the International Flame Research Foundation*, S. Article Number 200207, 2002.
- [Zha19] Y. Zhao, V. McDonell, und S. Samuelsen, “Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 44, Nr. 47, S. 26049–26062, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.011