

# Schlussbericht vom 30.09.2024

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21479 BG

## Thema

Entwicklung eines optischen Detektionssystems für die Anwendung der 3D-Chemilumineszenz-Tomographie in industriellen Hochtemperatur-Prozessen (Tomo-Pro)

## Berichtszeitraum

01.11.2020 bis 31.03.2024

## Forschungsvereinigung

Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

FSt. 1: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)

FSt. 2: DBI Gastechnologisches Institut gGmbH (DBI)

FSt. 3: Institut für Energie- und Material-Prozesse - Universität Duisburg-Essen (EMPI)

Gefördert durch:

# Gliederung

---

1	Einleitung .....	4
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung .....	5
2.1	Anlass für das Vorhaben und Ausgangssituation .....	5
2.2	Stand der Forschung und Entwicklung .....	6
2.2.1	Monitoring von Verbrennungsvorgängen .....	6
2.2.2	Bildgebende Messtechnik in Hochtemperaturanwendungen .....	6
2.2.3	Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC) .....	7
3	Forschungsziel / Forschungsergebnisse / Lösungsweg .....	8
3.1	Forschungsziel .....	8
3.2	Forschungsergebnisse .....	10
3.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse .....	10
3.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse .....	11
3.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	11
4	Entwicklung des Messkonzepts .....	16
4.1	Definition der Testfälle .....	16
4.2	Designstudie für die optische Sonde .....	19
4.3	Anpassung der CTC-Methode und Algorithmen.....	20
4.3.1	Auswahl, Modifizierung und Charakterisierung geeigneter Bildsensoren.....	20
4.3.2	Untersuchung verschiedener Kameraanordnungen mit Hilfe von Phantomstudien .....	24
5	Entwicklung des Mehrkameranystems .....	27
5.1	Auslegung des Kühlmoduls und Design des Mehrkameranystems.....	27
5.2	Implementierung der Sonde in die Versuchsumgebungen .....	30
5.3	Optimierung der optischen Anordnung mit Hilfe von Phantomstudien .....	31
5.4	Charakterisierung und Erprobung unter Laborbedingungen .....	34
6	Erprobung der CTC an Feuerungen industriellen Maßstabs.....	37
6.1	Erprobung des Kühlmoduls .....	37
6.2	Erprobung des Mehrkameranystems im Versuchsofen bis 160 kW – Fall 1 .....	40
6.3	Erprobung des Mehrkameranystems im Versuchsofen bis 300 kW – Fall 2 .....	41
7	Ergebnisse der CTC und Vergleich mit CFD-Simulationen .....	44
7.1	Kalibration und Bildkorrektur .....	44
7.2	Rekonstruktionsergebnisse und Vergleich mit CFD-Simulationen .....	46
8	Messstrategien für reale industrielle Anwendungen .....	52
9	Ausblick.....	54
10	Projektplan .....	55
11	Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen .....	58
12	Nutzen der Forschungsergebnisse .....	59
12.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen .....	60
12.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU .....	61
12.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	61
13	Veröffentlichungen.....	63
	Danksagung.....	64
	Abbildungsverzeichnis.....	65

Tabellenverzeichnis..... 68  
Literaturverzeichnis..... 69

## 1 Einleitung

Für die Bereitstellung von Prozesswärme in industriellen Hochtemperatur(HT)-Prozessen, wie beispielsweise das Schmelzen von Glas, ist die technische Verbrennung nach wie vor unverzichtbar. Die Verschärfung klimapolitischer Ziele der Bundesregierung für die Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Steigerung der Effizienz erfordern allerdings die stetige technologische Weiterentwicklung der Verbrennungsprozesse. Effizienzmaßnahmen wie z. B. die Wärmerückgewinnung aus Verbrennungsabgasen zählen bereits heute zum Stand der Technik. Die zukünftig größere Relevanz von erneuerbaren Brennstoffen wie beispielsweise Wasserstoff und die Brennstoffflexibilisierung der Systeme stellt allerdings eine Vielzahl neuer Herausforderungen an den Betrieb von Thermoprozessen und die MSR-Technik. Insbesondere KMU sind in diesem Zusammenhang auf den Einsatz von neuen technischen Lösungen mit möglichst geringen Investitions- und Betriebskosten angewiesen.

Das Vorhaben „Tomo-Pro“ zielt auf zwei wesentliche Aspekte für den wirtschaftlichen Betrieb von Thermoprozessanlagen ab: Die Schaffung eines Monitoring-Tools, das durch detaillierte Abbildung der Verbrennungszustände eine Steigerung der Effizienz und Reduzierung der Bildung von Schadstoffemissionen (z. B. NO<sub>x</sub>) von HT-Feuerungen zulässt, sowie die Entwicklung einer Validierungsmethode für die computergestützte Modellierung und Simulation von Thermoprozessen. Beides soll mit Hilfe eines bildgebenden, tomographischen Detektionsverfahrens ermöglicht werden, das in der Lage ist, instantane Zustandsdaten mit einem deutlich höheren Informationsgehalt und höherer Informationsdichte zu ermitteln, als das mit Methoden des derzeitigen Stands der Technik möglich ist. Darüber hinaus sollen auch Schnittstellen für Industrie 4.0 Anwendungen geschaffen werden, denen zukünftig für KMU und den Industriestandort Deutschland größte Bedeutung zugemessen wird [1].

Zu diesem Zweck wird im Rahmen von „Tomo-Pro“ eine optischen Sonde auf Basis kostengünstiger industrieller Kamerasysteme für die Anwendung der 3D-Chemilumineszenz-Tomographie (engl.: Computed Tomography of Chemiluminescence, kurz CTC) in HT-Umgebungen entwickelt. Mit Hilfe der Sonde soll erstmalig ein 3D tomographisches Verfahren für die Verbrennungsdiagnostik in Thermoprozessen eingesetzt werden, das es ermöglicht, durch den Einsatz eines Mehrkamerasystems instantane orts aufgelöste Informationen aus dem Verbrennungsprozess zu erhalten. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zielen darauf ab, die technischen Grundlagen für den Einsatz tomographischer Messverfahren für die Verbrennungsdiagnostik in HT-Umgebungen zu erarbeiten. Die 3D-Daten können neben dem reinen Prozessmonitoring zukünftig auch zur Einführung und Weiterentwicklung von mathematischen Modellen und deren experimenteller Validierung im Zuge der Auslegung und Optimierung von Thermoprozessen mittels CFD eingesetzt werden.

Aus Sicht der Forschungsstellen und des projektbegleitenden Ausschusses konnten die im Antrag formulierten wissenschaftlich-technischen Projektziele erreicht werden.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde vollständig erreicht.**

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung

### 2.1 Anlass für das Vorhaben und Ausgangssituation

Einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der THG- und Schadstoffemissionen sowie der Effizienz von Thermoprozessen können zukünftig verstärkt Industrie 4.0-Konzepte leisten [2,3]. Das Monitoring der Verbrennungsvorgänge sollte dabei einen zentralen Baustein für industrielle HT-Prozesse darstellen. Bislang beschränken sich die angewandten Messtechniken zur direkten Charakterisierung der Verbrennungsvorgänge in industriellen HT-Feuerungen im Wesentlichen auf den Einsatz invasiver Messtechniken, wie die Ermittlung von lokalen Temperaturen oder Gaszusammensetzungen mit Hilfe von Absaugpyrometern. Berührungslose bildgebende Verfahren, wie die kamerabasierte Prozessüberwachung oder Thermographie, stellen bislang Ausnahmen dar. Moderne bildgebende Verfahren bieten allerdings durch die Erzeugung digitaler Daten für die Optimierung und Automatisierung der Prozessführung großes Potential, das bereits in vielen anderen Anwendungsbereichen erschlossen wird, ein Beispiel stellt der Einsatz von MachineVision-Technologien in der maschinellen Fertigungstechnik dar. Für die Optimierung von Verbrennungsprozessen hinsichtlich der Effizienz, oder auch der Schadstoffbildung ist eine möglichst genaue Kenntnis nicht nur der Ausdehnung und Lage der Reaktionszone, sondern auch von Zustandsgrößen wie der lokalen Wärmefreisetzung, lokalen Luftverhältnissen oder Strömungseigenschaften erforderlich. Die Größen sind sowohl für das Monitoring innerhalb einer Prozessregelung als auch für die Beschreibung der Vorgänge mit Hilfe mathematischer Modelle und der numerischen Simulation mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) relevant. Eine Methode Informationen über die Ausdehnung, Lage und Struktur der Reaktionszone sowie auch Zustandsgrößen aus dieser zu bestimmen, ist die bildgebende Detektion des Flammeneigenleuchtens (Chemilumineszenz), die durch elektronisch angeregte Moleküle in der Reaktionszone bzw. der Flammenfront hervorgerufen wird [4]. Bei der bildgebenden Detektion der Chemilumineszenz mit einer Kamera (2D-Sensor) werden die Lichtintensitäten räumlich entlang der Blickrichtung integriert, 3D tomographische Verfahren bieten durch den Einsatz von Mehrkamerasystemen hingegen die Möglichkeit instantane orts aufgelöste Informationen zu erhalten.

Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen speziell für Thermoprozesse liegen dabei in der Entwicklung einer geeigneten kamerabasierten Messtechnik für die multidirektionale Detektion der Chemilumineszenz innerhalb einer HT-Umgebung mit einer ausreichenden Anzahl an Sensoren bzw. Ansichten. Die Implementierung in HT-Umgebungen erfolgt in der Regel mit Hilfe von gekühlten optischen Sonden, die je nach Prozessumgebung zudem die Auswahl temperatur- und chemisch beständiger Materialien erfordern. Für die Detektion der Chemilumineszenz müssen die spektralen Strahlungsverhältnisse im heißen Feuerungsraum bekannt sein, hier spielt insbesondere die überlagerte Wärmestrahlung von heißen Wänden eine Rolle. Darüber hinaus müssen die zu betrachtenden spektralen Banden der einzelnen chemilumineszenten Spezies sinnvoll ausgewählt werden. Die reaktionskinetischen Bildungspfade hängen u. a. vom eingesetzten Brenngas oder auch lokalen Luftverhältnissen ab. Beides, die Strahlungscharakteristik des Feuerungsraums, als auch die der Chemilumineszenz, erfordert eine sorgfältige Auswahl des

spektralen Detektionsbereichs. Die optischen und optoelektronischen Bauteile müssen auf den angestrebten Detektionsbereich abgestimmt und in der Lage sein, eine ausreichende Signalintensität und -qualität für die Bestimmung von 3D-Intensitätsverteilungen mit Hilfe tomographischer Algorithmen liefern zu können. Für die Ermittlung von instantanen Verbrennungszuständen muss neben einer ausreichenden räumlichen, auch eine hohe zeitliche Auflösung erreicht werden, die es erlaubt momentane Zustände innerhalb von Zeitskalen im Bereich von wenigen Millisekunden bis in den Mikrosekundenbereich zu erfassen. Neben den rein hardwaretechnischen Aspekten müssen die tomographischen Algorithmen für die Anwendung angepasst und validiert werden, dazu gehört u. a. die Implementierung einer räumlichen Positionsbestimmung der Kameraansichten innerhalb der Thermoprozessumgebung.

## 2.2 Stand der Forschung und Entwicklung

### 2.2.1 Monitoring von Verbrennungsvorgängen

Das detaillierte Monitoring von industriellen HT-Thermoprozessen beschränkt sich bislang im Wesentlichen auf die Materialströme. In Bezug auf die Wärmebereitstellung bzw. die Verbrennungsvorgänge sind die Maßnahmen auf die punktuelle Messung von Temperaturen oder Gaszusammensetzungen beschränkt. Ein kontinuierliches Monitoring erfolgt in der Regel indirekt durch die Erfassung der Stoffströme und Zustände am Ein- und Austritt des Prozesses.

Die Detektion der Chemilumineszenz ist im Gegensatz dazu ein Messverfahren, das es ermöglicht, die Verbrennungsvorgänge direkt im Feuerungsraum zu untersuchen. Die Methode gilt für die Visualisierung von Verbrennungsvorgängen im Zuge der Auslegung von Brennern bzw. technischen Feuerungen im Allgemeinen als etabliert. Aus den mit Hilfe von spektral aufgelösten Messungen erhaltenen Intensitätsverhältnissen einzelner Emissionsbanden lassen sich beispielsweise lokale Luftverhältnisse ableiten [5], oder auch Rückschlüsse auf eine veränderte Brenngaszusammensetzungen schließen [6]. Die Anwendungen erstrecken sich angefangen von Grundlagenuntersuchungen bis hin zur Untersuchung des industriellen Versuchsmaßstabs oder auch von realen industriellen Thermoprozessanlagen [7].

### 2.2.2 Bildgebende Messtechnik in Hochtemperaturanwendungen

Für die Untersuchung der Verbrennung in serienreifen Gasturbinenbrennkammern oder Verbrennungsmotoren kommen häufig glasfasergekoppelte Endoskope zum Einsatz, die eine minimalinvasive Diagnostik unter realen Betriebsbedingungen erlauben [8]. In der Regel erfolgt die Einkopplung durch Bohrungen in der Brennkammerwand, in speziellen Anwendungen auch über modifizierte Anbauteile, beispielsweise mit Optik ausgestatteten Injektoren oder Zündkerzen für den motorischen Anwendungsbereich [9].

Für HT-Anwendungen existieren bereits zahlreiche kommerziell vertriebene Kamerasonden, deren Einsatzzweck allerdings primär in der visuellen Überwachung der Produktionsprozesse liegt, z. B. zur Füllstandbeobachtung von Glasschmelzwannen [10]. Darüber hinaus werden thermographische Verfahren für die Ermittlung beispielsweise von oberflächlichen Schmelzgut- oder Ofenraumtemperaturen eingesetzt [11,12].

### 2.2.3 Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC)

Unter den tomographischen Abbildungsverfahren existieren verschiedene Techniken, die auf Lichtabsorption (Absorptionsspektroskopie) [13], Schlieren-Aufnahmen [14] oder der Detektion der Chemilumineszenz [15-18] beruhen. Die CTC ist ein abbildendes Messverfahren, das eine räumlich und zeitlich aufgelöste Darstellung von Flammen durch bildgebende Detektion der Chemilumineszenz ermöglicht. Chemilumineszenz tritt in der Reaktionszone auf und kann daher als sehr gute Näherung für die Bestimmung der Position der Flammenfront herangezogen werden. Bei der CTC wird die Chemilumineszenz aus mehreren Blickwinkeln erfasst. Die Einzelperspektiven werden computergestützt mit Hilfe eines tomographischen Verfahrens weiterverarbeitet. Das vorgesehene Verfahren zur tomographischen Rekonstruktion wurde speziell für den Einsatz kostengünstiger industrieller Sensoren entwickelt und bereits an Laborflammen [15,19] sowie an einer optisch offen zugänglichen industriellen Flamme erprobt [20-22]. Mit dem Verfahren ist es prinzipiell möglich, turbulente Strömungsphänomene wie die Wirbelablösung und -zerfall, die Krümmung turbulenter Strukturen oder auch Strömungsdrall und Rezirkulation zu erfassen. Durch die Auswertung der 3D-Informationen können qualitative, aber auch quantitative Aussagen wie z. B. zur Flammenkrümmung bei turbulenten Strömungsereignissen getroffen werden [23].

### 3 Forschungsziel / Forschungsergebnisse / Lösungsweg

#### 3.1 Forschungsziel

Ziel des Vorhabens „Tomo-Pro“ ist die Entwicklung einer optischen Sonde auf Basis kostengünstiger industrieller Kamerasysteme zur Anwendung der CTC in HT-Umgebungen. Mit Hilfe der Sonde soll erstmalig ein 3D tomographisches Verfahren für die Verbrennungsdiagnostik in Thermoprozessen eingesetzt werden. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zielen darauf ab, die technischen Grundlagen für den Einsatz tomographischer Messverfahren für die Verbrennungsdiagnostik in HT-Umgebungen zu erarbeiten. Die 3D-Daten können neben dem reinen Prozessmonitoring zukünftig auch zur Einführung und Weiterentwicklung von mathematischen Modellen und deren experimenteller Validierung im Zuge der Auslegung und Optimierung von Thermoprozessen mittels CFD eingesetzt werden. Folgende wissenschaftlicher Aspekte wurden als wesentlich für die Umsetzung der CTC in HT-Umgebungen identifiziert:

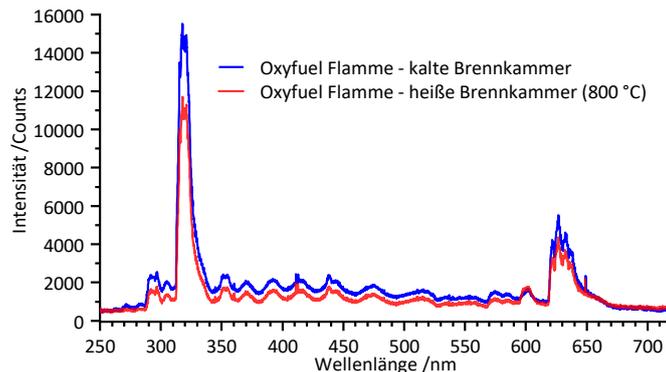
##### Entwicklung von CTC-Algorithmen für die industrielle Anwendung

Die industrielle Anwendung der CTC stellt große Herausforderungen hinsichtlich der optischen Zugänglichkeit des zu untersuchenden Volumens dar. Die Qualität der tomographischen Rekonstruktion steigt, wenn die verschiedenen Ansichten aus einem großen Fächerwinkel um das Beobachtungsvolumen herum generiert werden. Im Gegensatz zur Laboranwendung, bei der in der Regel viele Kameras in einer Ebene auf einem Halbkreis um die Flamme platziert sind, ist dies in einer industriellen Anwendung in der Regel nicht möglich. Daher muss die Kamerakalibrierungsmethode auf ihre Genauigkeit überprüft werden und es müssen die vollständigen Kameraparameter in die CTC einbezogen werden (derzeit werden nur zwei Winkel für die Ausrichtung und den Abstand zum Drehpunkt im Beobachtungsvolumen jeder Ansicht berücksichtigt). Es sollen geeignete Formen von a-priori Informationen (Priors) für die mathematischen Berechnung verwendet werden, die in Anbetracht der begrenzten Anzahl der im industriellen Szenario erfassbaren Ansichten zu möglichst genauen Rekonstruktionen führen. Darüber hinaus wurden bei der Detektion der Chemilumineszenz bisher keine Emissionen berücksichtigt, die signifikant Einflüssen von Reabsorptionseffekten unterliegen, wie z. B. bei der Chemilumineszenz von  $\text{OH}^*$  [24]. Die Reabsorption soll innerhalb der CTC modelliert werden, um die Genauigkeit zu verbessern.

##### Temperatur und Strahlungsbedingungen in der HT-Umgebung

Die CTC soll erstmalig die 3D-Erfassung der Flammenfront bzw. des Wärmefreisetzungsfeldes in einem Feuerungsraum industriellen Maßstabs ermöglichen. Dazu muss die spektrale Beschaffenheit der Chemilumineszenz berücksichtigt werden, die von der ablaufenden Reaktionskinetik abhängig ist und sich in molekulspezifischen Emissionsbanden darstellt, die vom UV- bis in den IR-Bereich auftreten. Deren Vorkommen und Ausprägung wird u. a. beeinflusst durch die Edukte, d. h. Brennstoff und Oxidator sowie lokale Verbrennungsluftverhältnisse, Temperaturen und Drücke. Häufig werden zur Lokalisierung der Flammenfront die Emissionsbanden des  $\text{OH}^*$ - bei 308 nm sowie des  $\text{CH}^*$ -Radikals bei 431 nm herangezogen. Durch eine breitbandige Detektion kann mit Hilfe der Gesamtemission eine allgemeine Aussage über

die räumliche Verteilung der Wärmefreisetzung getroffen werden, da die chemilumineszenten Moleküle in der Flammenfront gebildet werden. Bei deren räumlicher Detektion müssen allerdings Effekte, wie Dichteunterschiede im Medium (Beam-Steering) [25], Reabsorptionseffekte [24], vor allem aber überlagerte Strahlungseinflüsse wie Reflektionen und die Schwarzkörperstrahlung von heißen Ofenraumwänden berücksichtigt werden [26], die schon bei relativ niedrigen Temperaturen von 800 °C zu messbaren Effekten führen, siehe **Abbildung 3.1**. Eine Detektion im UV-Bereich (OH\*) ermöglicht es bei hohen Prozesstemperaturen überlagernde Strahlungseinflüsse zu vermeiden, dies erfordert allerdings den Einsatz geeigneter Bildsensoren oder spezieller Sensorenbeschichtungen (Lumigen) [27].



*Abbildung 3.1: Hintergrundbereinigte UV-VIS-Spektren einer Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung (Oxy-Fuel) gemessen im kalten Ofenraum (rot) bzw. bei 800 °C Ofenraumtemperatur (blau); Messung am GWI-Versuchssofen. (Quelle: GWI)*

### Zeitliche und räumliche Skalen / Validierung von CFD-Simulationen mittels CTC

Die Modellierung von Verbrennungsprozessen mit Hilfe numerischer Strömungssimulationen ist eine gängige Vorgehensweise in der thermischen Verfahrenstechnik bei der Untersuchung von Betriebszuständen. Durch den Einsatz computergestützter Entwicklungs- und Optimierungsverfahren können die Effizienz und die Schadstoffentstehung industrieller Feuerungen und Thermoprozesse untersucht und stetig verbessert werden. Der Einsatzbereich erstreckt sich dabei von Niedertemperaturanwendungen wie z. B. Kesselfeuerungen bis in den Hochtemperaturbereich wie z. B. Wärmebehandlungs- und Schmelzöfen. In der Vergangenheit waren die Rechenkapazitäten der verfügbaren Computertechnik der limitierende Faktor für den Einsatz detaillierter numerischer Simulationen zur Abbildung zeitlich veränderlicher Vorgänge. Stetig steigende Rechenleistungen moderner Computersysteme erlauben aber bereits heute deutlich detailliertere Betrachtungen, z. B. für die Modellierung von Verbrennungsvorgängen in turbulenten Strömungen für die Optimierung industrieller Feuerungen und Thermoprozesse. Durch einen höheren Detaillierungsgrad können die Gültigkeitsbereiche der Simulationen für die gegebenen Aufgabenstellungen deutlich erweitert werden. Dazu existiert eine Vielzahl an Modellen zur Beschreibung der chemischen und physikalischen Zusammenhänge [28]. Chemische Reaktionen laufen je nach Mechanismus typischerweise in einem weiten Zeitbereich von 0,1 ns bis zu 1 s ab, physikalische Prozesse wie Strömung und Transport hingegen in einem relativ kleinen Zeitintervall zwischen 100 µs und 10 ms. Schnelle chemische Prozesse, wie die Reaktionen in partiellen Gleichgewichten oder Spezies in quasistationären Zuständen, entsprechen Gleichgewichtseinstellungen und lassen sich von anderen Prozessen entkoppeln. Die Entkopplung stellt eine Vereinfachung dar, die für die Modellierung reaktiver Strömungen ein wichtiges Kriterium ist. Umgekehrt lässt sich für langsame Reaktionen diese Entkopplung, beispielsweise innerhalb von Zeitskalen

turbulenter Strömungsvorgänge, nicht ohne weiteres vornehmen. Zu den vergleichsweise langsamen Verbrennungsreaktionen zählen z. B. understöchiometrische Verbrennungsvorgänge während der Vergasung sowie Fackelverbrennungen oder auch ausgedehnte Diffusionsflammen in Schmelzprozessen, wie sie etwa für die industrielle Glaserzeugung eingesetzt werden. Für diese Verbrennungsvorgänge ist die Entkopplung der chemischen Reaktionen von den turbulenten Strömungsbedingungen problematisch. Ein weiteres Anwendungsbeispiel sind Drallflammen bzw. Flammen mit hohen Rezirkulationsraten z. B. die flammenlose Oxidation, bei denen sich der Einfluss der turbulenten Strömung direkt auf die Schadstoffbildung auswirkt. Bei der flammenlosen Oxidation wird durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten und die in der Folge entstehende ausgeprägte Rezirkulation von heißem Abgas zurück in die Reaktionszone, die chemische Reaktion derart beeinflusst, dass sich keine räumlich scharf abgegrenzte Flammenfront ausbilden kann. Das Verständnis dieser Vorgänge erfordert eine gute Abbildung der turbulenten Vorgänge, die die chemischen, reaktionskinetischen Vorgänge beeinflussen und umgekehrt. Turbulente Strömungsvorgänge lassen sich allerdings mit den herkömmlich angewandten, zeitlich mittelnden Modellen wie RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) nicht darstellen. Mit zunehmend steigenden Computerressourcen können dafür zukünftig Eddy Simulation (LES) zur Berechnung turbulenter Strömungen herangezogen werden, die eine zeitlich aufgelöste Betrachtung erlauben. Auf dem Markt erscheinen zunehmend kommerzielle CFD-Codes mit LES-Fähigkeit, sodass der Einzug in die industrielle Anwendung stetig voranschreitet. In diesem Zusammenhang kann der Einsatz der CTC zur Validierung der numerischen Methoden beitragen, da bei diesem Verfahren eine 3D-Abbildung der Reaktionszone erfolgt, durch die es zukünftig möglich werden kann, turbulente Verbrennungseignisse zeitlich und räumlich aufzulösen. Die Methode kann maßgeblich zum Verständnis und der Beschreibung von turbulenten Verbrennungsvorgängen beitragen. Gesamtziel ist es die angeführten Aspekte wissenschaftlich zu untersuchen und die Erkenntnisse in einem Funktionsmuster umzusetzen. Zu diesem Zweck soll eine gekühlte optische Sonde auf Basis industrieller Bildsensoren entwickelt werden, die die zeitgleiche Aufnahme von mindestens 10 Ansichten der Chemilumineszenz eines technischen Verbrennungsvorgangs innerhalb der heißen Verbrennungsumgebung bei Temperaturen von bis zu 1.800 °C und Atmosphärendruck ermöglicht. Mit Hilfe der Sonde soll erstmalig die CTC innerhalb zweier industrieller HT-Feuerungen unter Versuchsbedingungen angewandt werden. Zu diesem Zweck werden bestehende tomographische Algorithmen für die industrielle Nutzung angepasst und weiterentwickelt.

## 3.2 Forschungsergebnisse

### 3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Es werden die folgenden Forschungsergebnisse angestrebt:

- Entwicklung von tomographischen Algorithmen für die industrielle HT-Anwendung,
- Entwicklung eines optischen SONDENSYSTEMS mit 10 Bildsensoren (UV-sensitiv, z. B. durch Lumigen [29]) für die Anwendung der CTC in einem HT-Versuchsumfeld bei Temperaturen in der Gasphase von bis zu 1.800 °C und atmosphärischen Druckverhältnissen,

- Erprobung der CTC-Sonde an einem Hochgeschwindigkeitsbrenner und einer Underport-Feuerung in einem HT-Versuchsofen und Auswertung von Form-, Lage- und Strukturdaten der Chemilumineszenz (CL),
- Erprobung des Messverfahrens für die Validierung von CFD-Simulationen (RANS),
- Erstellung von Messkonzepten für die Anwendung der 3D-Chemilumineszenz-Tomographie in realen industriellen HT-Umgebungen.

### 3.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Das tomographische Messverfahren stellt für industrielle Thermoprozesse eine innovative Neuerung dar. Mit der 3D-Chemilumineszenz-Tomographie kann erstmals ein digitales 3D-Abbild der Verbrennungsreaktionszone in einer HT-Anwendung erzeugt werden. Die digitalen 3D-Daten können sowohl Informationen für die Prozessüberwachung in Echtzeit liefern als auch zur Validierung von CFD-Simulationen im Zuge der Auslegung und Optimierung von Feuerungen dienen.

### 3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die Projektinhalte sind nur durch die Zusammenarbeit der involvierten Forschungsstellen sowie durch die im projektbegleitenden Ausschuss mitarbeitenden Industriepartner fachkundig und branchenübergreifend zu realisieren. Das GWI hat durch die langjährigen Erfahrungen im Bereich Feuerungs-, Brenner- und Prozesstechnik speziell auch der Simulation von industriellen Verbrennungssystemen mittels CFD, das Knowhow, um fundierte Untersuchungen zu den oben genannten Schwerpunkten durchzuführen. Die Arbeitsgruppe Tomographie des EMPI befasst sich mit dem Einsatz und der konzeptionellen Entwicklung von neuartigen tomographischen Methoden für die Anwendung im energie- und prozesstechnologischen Sektor. Die Tomographiegruppe hat Erfahrung sowohl in der numerischen Entwicklung als auch in der experimentellen Umsetzung verschiedener tomographischer Methoden. Das DBI bringt das technische Knowhow bei der Konstruktion von minimalinvasiven und HT-beständigen Kamerasystemen mit ein. Das primäre Ziel des DBI ist es, die Hardware für das Messsystem zu entwickeln und herzustellen. Durch jahrelange Erfahrungen sowohl bei der Entwicklung solcher Kamerasysteme als auch beim Betrieb und der Analyse von industriellen Thermoprozessanlagen kann das DBI das hier beantragte Projekt im Bereich der Messgeräteentwicklung umfangreich unterstützen. Durch die Synergie der Kompetenzen der Institute und die Einbindung von Brennerherstellern, Herstellern von Thermoprozessanlagen und Betreibern können die Aufgaben des Projektes umfassend, kompetent und zielführend bearbeitet werden. Die Inhalte der Forschungsarbeiten sind nachfolgend erläutert:

#### Entwicklung tomographischer Algorithmen mit Hilfe von Phantomstudien

Im Prinzip kann jedes beliebige Phantomfeld numerisch erzeugt werden. Die EMPI-Tomographiegruppe verwendet jedoch realistische, auf CFD-Simulationen basierende Felder, um sicherzustellen, dass die in der Studie verwendete synthetische Szene die Komplexität der tatsächlichen Felder repräsentiert, die aus einem Experiment rekonstruiert werden sollen. Als Phantome werden eine LES-Simulation einer hochturbulenten wirbelstabilisierten Flamme aus [18], sowie eine Simulation eines relevanten Ofengehäuses

verwendet. Die Projektionen des Phantoms werden auf der Grundlage der gleichen Kameraanordnung, die im Experiment erwartet wird, erzeugt. Um die beugungsbegrenzte Abbildung durch die Kameras zu simulieren, wird den Projektionen ein 3 %iges Aufnahmeauschen zusätzlich zu einer Gaußschen-Unschärfe mit einer Standardabweichung von 0,85 Pixeln hinzugefügt. Die synthetischen Projektionen werden dann zur Rekonstruktion des Feldes verwendet, so dass die ursprünglichen und rekonstruierten Phantome verglichen werden können, um eine quantitative Darstellung der berechneten Ergebnisse zu erhalten. Dies wird für eine Population von Phantomen, d. h. verschiedene Zeitschritte der Simulationsergebnisse, durchgeführt, um statistische Daten zu erhalten.

Messtrategien für die Anwendung der CTC im HT-Umfeld

Eine Messung (in Form von Kamerabildern) wird aus verschiedenen Blickrichtungen um die Flamme herum durchgeführt, **Abbildung 3.2**. Ein Kamerabild setzt sich aus  $N_p$  Projektionen (die Anzahl der Pixel des Kamerasensors), welche unter einer definierten Blickrichtung aufgenommen werden, zusammen.

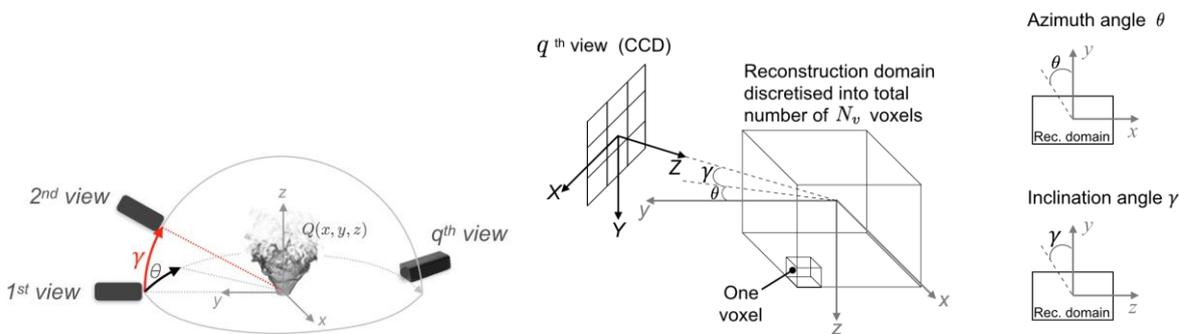


Abbildung 3.2: Sensororientierung und 3D-Rekonstruktionsdomäne zur tomografischen Rekonstruktion [18].

Die Messdaten werden von einem tomographischen Algorithmus kompiliert, um das 3D-Feld abzuschätzen, das bei der Verwendung von Emissionsdaten die Beleuchtungsquelle umfasst. Es gibt verschiedene Arten von Algorithmen, z. B. die eher konventionelle Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART), oder die Evolutionäre Rekonstruktionstechnik (ERT). Die Tomographie-Gruppe am EMPI hat eigene Codes sowohl für ART als auch für ERT entwickelt, in diesem Projekt wurde ein ERT-Algorithmus verwendet. Der verwendete ERT-Algorithmus [30,31] ist ein inselbasierter genetischer Algorithmus (IGA), der in CUDA C++ implementiert wurde und ist in der Vergangenheit an verschiedenen turbulenten Flammen erprobt worden [32,33], **Abbildung 3.3** zeigt das zugehörige Ablaufschema.

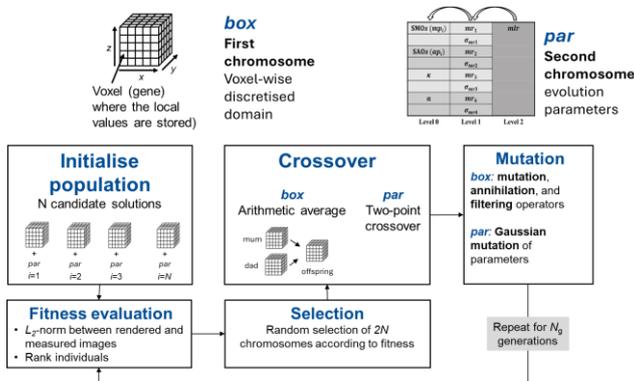


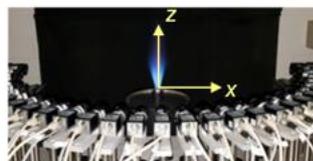
Abbildung 3.3: Ablaufschema für den verwendeten ERT-Algorithmus [30,31].

Der ERT initiiert in einem ersten Schritt eine Population von Individuen, die potenzielle Lösungskandidaten des Rekonstruktionsproblems sind. Die Individuen bestehen aus zwei Chromosomen, in denen die Gene Gleitkommawerte kodieren. Das erste Chromosom ist mit der diskretisierten 3D-Domäne verbunden, die das resultierende Feld darstellt, zum Beispiel die Chemilumineszenz-Intensität, die an diskreten Punkten berechnet wird. Das zweite Chromosom ist mit selbstanpassenden Raten verbunden, bei denen hierarchische genetische Operatoren (wie Mutation, Annihilation und Filterung) angewendet werden. Die Individuen sind auf Inseln verteilt und entwickeln sich über viele Generationen, bevor eine Lösung gefunden wird. Bei jeder Generation werden die genetischen Operatoren automatisch angepasst und auf der Grundlage des Metropolis-Algorithmus [34] stichprobenweise angewendet. Die Qualität eines Individuums wird auf der Grundlage des L2-Norm-Fehlerabstands zwischen den gemessenen Bildern und den aus der aktuellen Schätzung gerenderten Bildern bewertet. Die Bilder werden mit einem Ray-Tracing-Verfahren gerendert, das auf dem Lochblendenmodell mit Linsenverzerrungen basiert. Das am besten angepasste Individuum bei der letzten Generierung liefert das rekonstruierte 3D-Feld. Sowohl beim ART- als auch ERT-Algorithmus werden mindestens der Azimut- und Inklinationwinkel sowie die Distanz zur Flamme benötigt, um die Position der Kamera zu definieren. Die Rekonstruktion der Flamme, die durch ein skalares 3D-Feld  $Q(x, y, z)$  beschrieben werden kann, wird mit einer Anzahl von  $N_q$  Bildern erzielt (**Abbildung 3.2**). Die spektrale Intensität, die durch einen Pixel des Kamerasensors gemessen wird, entspricht hierbei dem Integral der emittierten Lichtintensität entlang eines Strahls durch das Rekonstruktionsvolumen. Dies kann aus einer fundamentalen Gleichung zum Strahlungstransport abgeleitet werden (radiative transfer equation, RTE). Die RTE setzt die Strahlungsintensität entlang eines Strahlenganges in Beziehung zur lokalen Absorption und der Emission in einem entsprechenden Volumen. Im vorliegenden Fall wird die RTE dadurch vereinfacht, dass Streuung und Reabsorption vernachlässigt werden. Das Integral wird durch die Summation entlang eines Strahlenweges durch das gesamte, durch Voxel diskretisierte, Volumen angenähert. Dies führt zu einem linearen Gleichungssystem der Form  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ . Die Matrix  $\mathbf{A}$  fasst den Beitrag jedes Voxels entlang eines Strahls zusammen und die Vektoren  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{b}$  repräsentieren das unbekannte Feld, bzw. die Messdaten.

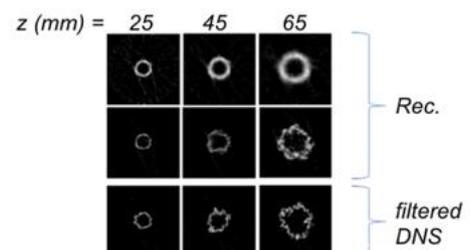
#### Cambridge-Sandia stratified flame SwB1

$$\phi_{\text{inner}} = \phi_{\text{outer}} = 0.75$$

$$t_{\text{exp}} = 0.3 \text{ ms}$$



At EMPI - collaboration with Cambridge



#### Premixed nat. gas/air flame in industry

$$83 \text{ kW thermal power}$$

$$\phi = 0.79$$

$$t_{\text{exp}} = 0.1 \text{ ms}$$

$$Re_D = 40,000$$



At Gas und Wärme Institut, Essen

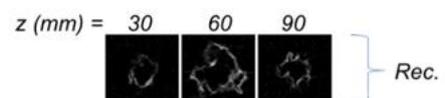
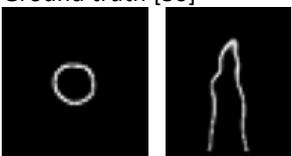
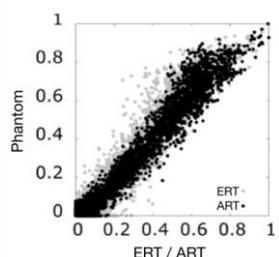
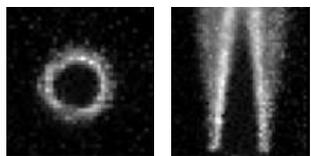
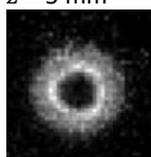
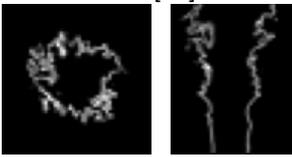
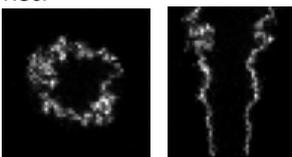
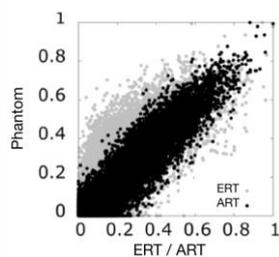
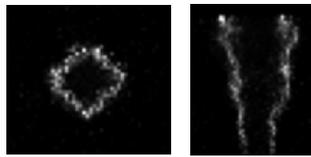
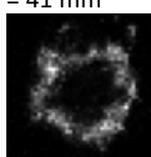


Abbildung 3.4: Beispiele für CTC-Rekonstruktionen turbulenter Flammen. Horizontale Schnitte der Domäne für verschiedene Distanzen  $z$  über dem Brenner. Die DNS-Daten stammen aus [35].  $\phi$  = Äquivalenzverhältnis,  $t_{\text{exp}}$  = Sensorbelichtungszeit,  $Re_D$  = Reynoldszahl der kalten Strömung basierend auf dem Durchmesser des Brenneraustritts.

Die Auflösung des Gleichungssystem nach  $\mathbf{x}$  stellt ein inverses Problem dar, welches in den meisten Fällen unterbestimmt ist, da die Anzahl der unbekannt Variablen (Voxel) die Anzahl der Bekannten (gemessene Projektionen) übersteigt. Um sinnvolle Rekonstruktionen zu erhalten, muss deshalb auf Regularisierungstechniken und die Verwendung von a-priori Information, sofern vorhanden, zurückgegriffen werden [36]. Die projektive Messung der Intensität  $I_{qp}$  wird durch eine Summation in der Form  $I_{qp} = \sum_{v=1}^{N_{vox}} w_{qp v} Q_v$  genähert. Hierbei entspricht  $N_{vox}$  der Gesamtzahl der Voxel im diskretisierten Volumen,  $w_{qp v}$  beschreibt den Beitrag jedes Voxels  $v$  der Projektion  $p$  des Bildes  $q$  und  $Q_v(x, y, z)$  ist das gesuchte Feld. Bis heute verwendet das EMPI für die Anwendung der Methode handelsübliche, kostengünstige CCD-Kameras. Dies ermöglichte den kostengünstigen Aufbau eines Multi-Kamerasystems, um eine hohe Qualität der Rekonstruktionen zu erreichen (die Rekonstruktionsqualität steigt üblicherweise mit der Anzahl an projektiven Messungen) oder um simultan mehrere Messungen durchzuführen, z. B. in verschiedenen Spektralbereichen. Die CTC-Methode kam bereits verschiedenerorts zum Einsatz [18,22] um das CL-Feld unterschiedlichster turbulenter Flammen zu rekonstruieren, siehe **Abbildung 3.4**. Die ERT-Methode wurde mit dem ART-Algorithmus verglichen, indem unterschiedliche Flammentypen, beispielsweise eine Bunsen-, turbulente Wirbel- und eine stratifizierte Flamme [30], rekonstruiert wurden. Der Vergleich erfolgte sowohl experimentell als auch in Phantomstudien. Ein Beispiel zum Vergleich beider Techniken ist in **Abbildung 3.5** gegeben.

	Phantom study		Experiments
Flame	Horizontal and vertical slices	Scatter plot	Rec. horizontal and vertical slices
Bunsen	Ground truth [30]  Rec.  $z = 16 \text{ mm}$	 ART correlation = 0.986 ERT correlation = 0.979	 $z = 5 \text{ mm}$  $z = 18 \text{ mm}$
SwB1	Ground truth [35]  Rec.  $z = 73 \text{ mm}$	 ART correlation = 0.969 ERT correlation = 0.901	 $z = 41 \text{ mm}$  $z = 65 \text{ mm}$

*Abbildung 3.5: Beispiele für Rekonstruktionen von turbulenten Flammen mit dem ERT-Algorithmus [30]. Horizontale Schnitte der Domäne für verschiedene Distanzen  $z$  über dem Brenner und vertikale Schnitte durch die Mittelachse des Brenners. Die Streudiagramme zeigen einen Vergleich zwischen ERT- und ART-basierter CTC, sowie die Korrelationen mit den Phantomdaten.*

### Entwicklung einer optischen Sonde

Mit dem vorhandenen technischen Knowhow und den gesammelten Erfahrungen in der Entwicklung von optischen Messsystemen, stellen die Projektpartner zuerst ein Lastenheft zusammen, welches die wichtigsten Eigenschaften des neuen Systems zusammenfasst. Dieses wird unter anderem beinhalten: geplante Einsatztemperaturen und Exposition in korrosiven Atmosphären (z. B. halogenhaltige Atmosphären), optisches Spektrum bzw. Filter, Kameragröße, Optik und die notwendige geometrische Anordnung der Kameras. Auf Basis des Lastenhefts werden Eigenschaften definiert, welche das System mitbringen muss. Anhand dieser Eigenschaften werden erste Prototypen im Rapid-Prototyping erstellt, um die Durchführbarkeit und Platzverhältnisse von Kameras, Kabeln und Optiken zu untersuchen sowie im Kaltversuch das Handling des Gesamtsystems zu testen. Anschließend wird der Demonstrator des Messsystems fertig entwickelt, gefertigt und ersten Druckproben sowie Kaltversuchen unterzogen.

### Experimentelle Erprobung und Vergleich der CTC-Daten mit CFD-Simulationen

Die praktische Erprobung der CTC erfolgt für zwei industrielle Anwendungsfälle:

- Fall 1: Hohe Strömungsgeschwindigkeit und ausgeprägte Rezirkulation bzw. Rückströmung von heißem Abgas, in der Folge wechselseitige Beeinflussung von Turbulenz und reaktionskinetischen Vorgängen. Exemplarisch kommt ein nicht-vorgemischter Hochgeschwindigkeitsbrenner im GWI-Versuchsofen zum Einsatz, wie er z. B. in metallurgischen Anwendungen Verwendung findet.
- Fall 2: Niedrige Strömungsgeschwindigkeit mit Zeitskalen im Bereich der ablaufenden Verbrennungsreaktion, in denen eine Interaktion von chemischer Reaktion und turbulenter Strömung möglich ist. Z. B. in einer Underport-Feuerung, wie sie häufig in Glasschmelzprozessen vorzufinden ist. Für die Erprobung der CTC an diesem Anwendungsfall wird eine Underport-Feuerung in den HT-Versuchsofen des GWI implementiert.

### Experimentelle Erprobung und Vergleich der CTC-Daten mit CFD-Simulationen

Auf Basis der gesammelten Messdaten und Erfahrungen werden Strategien entwickelt für die Übertragung der CTC auf reale industrielle Thermoprozesse. Dabei werden u. a. folgende Aspekte betrachtet:

- Zugänglichkeit des Feuerungsraums und technische Implementierung,
- Ausdehnung und Beschaffenheit von Feuerungen und relevante Beobachtungsvolumen,
- Anordnung der Sensorik zur Erzeugung von Ansichten mit ausreichendem Detailgrad in den zu beobachtenden Volumina,
- Anforderungen an die Optik und Sensorik,
- erforderliche thermische und chemische Materialbeständigkeit in der heißen Atmosphäre.

Konkret soll ein Konzept für den Einsatz der CTC für Feuerungen in Glasschmelzprozessen abgeleitet werden. Da die Erprobung an einer realen Thermopropzessanlage den angestrebten Projektrahmen übersteigt, beschränken sich die Forschungsstellen hier auf theoretische Betrachtungen.

## 4 Entwicklung des Messkonzepts

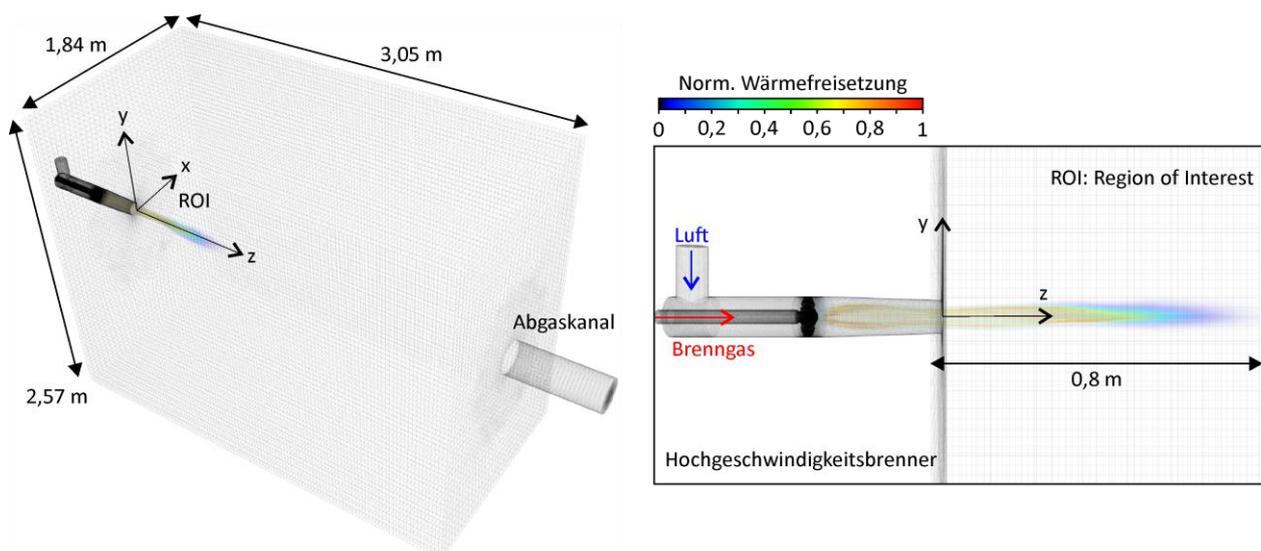
### 4.1 Definition der Testfälle

Eine große Herausforderung für die industrielle Anwendung der CTC ist die optische Zugänglichkeit des Feuerungsraums. Die Qualität der Rekonstruktionen hängt allerdings wesentlich von der Anzahl der Ansichten ab, die idealerweise einen großen Winkelbereich um das zu erfassende Volumen herum abdecken sollten. Im Gegensatz zur Laboranwendung der CTC, bei der die ideale tomografische Anordnung für die Abbildung relativ kleiner, hohturbulenter Flammen die Platzierung vieler Kameras in einer Ebene auf einem Halbkreis um das Objekt ist [18], ist diese Detektionsanordnung in industriellen Prozessen in der Regel nicht realisierbar. Die CTC wird in dieser Arbeit erstmalig auf Verbrennungsprozesse im industriellen Maßstab angewendet, bei denen die Detektion innerhalb der heißen Ofenraumatmosfera erfolgt. Die experimentelle Erprobung erfolgt an zwei unterschiedlichen Feuerungen bei atmosphärischen Druckverhältnissen. Die beiden Fälle werden nachfolgend näher beschrieben.

#### Fall 1 – Hochgeschwindigkeitsbrenner

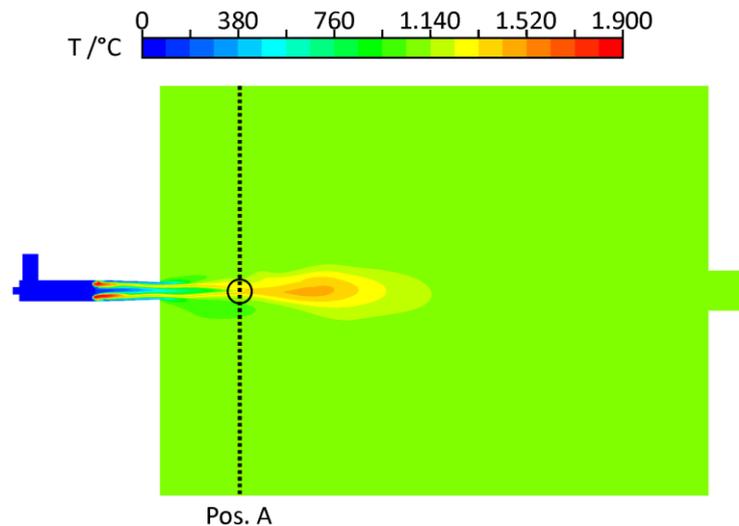
Charakteristik: Hohe Strömungsgeschwindigkeit und ausgeprägte Rezirkulation bzw. Rückströmung des heißen Abgases mit einer in der Folge gegenseitigen Beeinflussung von Turbulenz und reaktionskinetischen Vorgängen. Exemplarisch wurde eine Feuerung im 300-kW-Versuchsofen des GWI mit einem nicht-vorgemischten Hochgeschwindigkeitsbrenner ausgewählt, der häufig beispielsweise in metallurgischen Prozessen zum Einsatz kommt.

Es wird ein industrieller, nicht-vorgemischter Erdgasbrenner mit einer maximalen thermischen Leistung von 160 kW im temperaturgeregelten 300-kW-Versuchsofen des GWI in horizontaler Feuerungsrichtung betrachtet. Die Ofenraumgeometrie und -abmessungen sind in **Abbildung 4.1** dargestellt.



**Abbildung 4.1:** Fall 1 – CFD-Berechnungsgitter und simuliertes 3D-Feld der Wärmefreisetzung (RANS) für eine nicht-vorgemischte 120 kW Erdgas/Luft-Flamme bei  $\lambda = 1,1$  im GWI-Versuchsofen.

Der Brenner ist modular aufgebaut und mit einer keramischen Düse ausgestattet, die einen Austrittsdurchmesser von  $D = 65 \text{ mm}$  und eine Länge von  $L = 300 \text{ mm}$  besitzt. Das Brenngas strömt durch eine zentrale Mehrlochdüse ein. Die Verbrennungsluft wird durch eine diese umgebende Drallscheibe zugeführt. In der **Abbildung 4.1** ist das simulierte 3D-Feld (RANS) der normalisierten Wärmefreisetzung für eine Erdgas/Luft-Flamme bei einem Luftverhältnis von  $\lambda = 1,1$  und einer thermischen Leistung von  $120 \text{ kW}$  mit dem der Berechnung zugrundeliegenden Gitter dargestellt. Die Flamme breitet sich entlang der Brennerachse aus und erreicht eine Länge von  $0,8 \text{ m}$ , gemessen von der Austrittsöffnung der Keramikdüse (**Abbildung 4.1**, Pos.  $x = 0$ ). Das angestrebte Mehrkameranystem sollte in diesem Fall idealerweise in der Lage sein, die gesamte Flammenlänge zu erfassen. Der Abstand des optischen Systems zur Flamme liegt in diesem Szenario zwischen  $0,5$  und  $0,75 \text{ m}$  und erfordert für diese relativ kurze Entfernung zum Objekt die Verwendung von Weitwinkelobjektiven. Das simulierte Feld der Wärmefreisetzung wurde nachfolgend im Rahmen von Phantomstudien für die Optimierung der optischen Anordnung der 10 Kameras verwendet. Der Ofen ist im Bodenbereich mit vier Heizstrahlrohren und im Deckenbereich mit vier Kühlrohren (Luft) ausgestattet, die eine Regelung der Ofenraumtemperatur ermöglichen. Die mittels CFD berechnete vertikale Temperaturverteilung in der Mitte des Ofens ist in **Abbildung 4.2** dargestellt.



*Abbildung 4.2: Fall 1 – Simulierte vertikale 2D-Temperaturverteilung in der Ofenraummitte.*

In diesem Fall wurde eine Ofenraumtemperatur von  $800 \text{ °C}$  zugrunde gelegt. Die Linie "Pos. A" markiert die geplante Einbauposition der optischen Sonde. In dieser Position erfolgt die Installation durch einen Ofenraumzugang in der Seitenwand, durch den die Kühlwasserversorgung des Sondenkörpers sowie die Spannungsversorgung und ein Herausführen der Datenkabel möglich ist. Die simulierten Flammentemperaturen in diesem Bereich erreichen bis zu  $1.500 \text{ °C}$ . Die begrenzte optische Zugänglichkeit und die Dicke der Seitenwände von  $0,3 \text{ m}$  erfordern eine vollständige Integration der Kameras mit Hilfe des Sondenkörpers in die heiße Ofenraumatmosfera.

#### Fall 2 – Underport-Feuerung

Charakteristik: Niedrige Strömungsgeschwindigkeit mit Zeitskalen im Bereich der laufenden Verbrennungsreaktion, wobei eine Wechselwirkung zwischen den chemischen Reaktionen und der turbulenten Strömung möglich ist. Als Beispiel dient eine Underport-Feuerung, wie sie in Glasschmelzöfen zum Einsatz

kommt. Für die Erprobung wird eine Underport-Feuerung am Hochtemperaturversuchsofen des GWI etabliert.

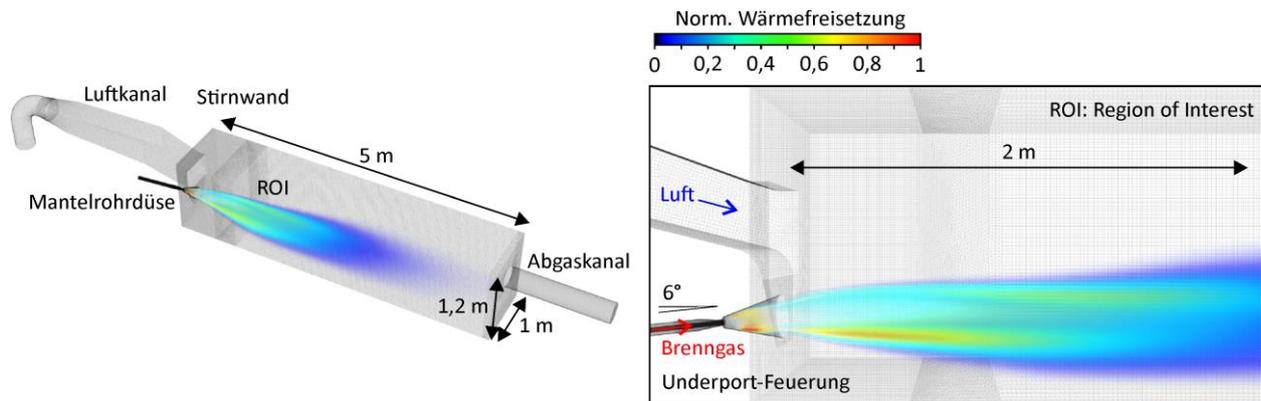


Abbildung 4.3: Fall 2 – CFD-Berechnungsgitter und simuliertes 3D-Feld der Wärmefreisetzung (RANS) für eine 500 kW Erdgas/Luft Underport-Feuerung bei  $\lambda = 1,15$ .

Im zweiten Fall wird eine Underport-Feuerung (Erdgas/Luft, nicht-vorgemischt) im 1,2-MW-Hochtemperaturofen des GWI untersucht. Die Innenabmessungen des Ofenraums sind in **Abbildung 4.3** dargestellt. Die Ofenstirnwand ist austauschbar und kann für die Untersuchung unterschiedlicher Feuerungssysteme angepasst werden. Die Stirnwand der in diesem Fall eingesetzten Underport-Feuerung besitzt eine Mantelrohrdüse in Bodennähe, die das Brenngas in einem Winkel von  $6^\circ$  in die Brennkammer eindüst. Die Mantelrohrdüse erlaubt durch die getrennte Beaufschlagung des inneren und äußeren Austrittsquerschnitts die Beeinflussung der Flammenlänge sowie der Mischung mit der Verbrennungsluft. Die Verbrennungsluft wird durch einen rechteckigen Kanal oberhalb der Brennstoffdüse zugeführt. Optional kann die Luft auf bis zu  $1.250^\circ\text{C}$  vorgewärmt werden. **Abbildung 4.3** zeigt das CFD-Berechnungsgitter und das simulierte 3D-Feld der Wärmefreisetzung (RANS) für den Betrieb mit 500 kW thermischer Leistung bei  $\lambda = 1,15$  mit nicht-vorgewärmter Luft. Die Flamme breitet sich über die gesamte Ofenlänge von 5 m in der Nähe der Bodenwand aus. Daher müssen bei der Positionierung der Kameras die nicht-zentrische Lage der Flamme im Ofenraumquerschnitt sowie die im Vergleich zu Fall 1 deutlich größere Ausdehnung der Reaktionszone berücksichtigt werden. Die ersten 2 m in Ausbreitungsrichtung (**Abbildung 4.3 - rechts**), in denen die Reaktionszone von der Mischung von Brennstoff und Luft dominiert wird, sind für die Anwendung der tomographischen Rekonstruktion besonders interessant. **Abbildung 4.4** zeigt die simulierte vertikale Temperaturverteilung in der Mitte des Ofens. "Pos. A" und "Pos. B" markieren die Lage der Öffnungen in der Ofenseitenwand, die für die Installation des Kamerasystems genutzt werden können.

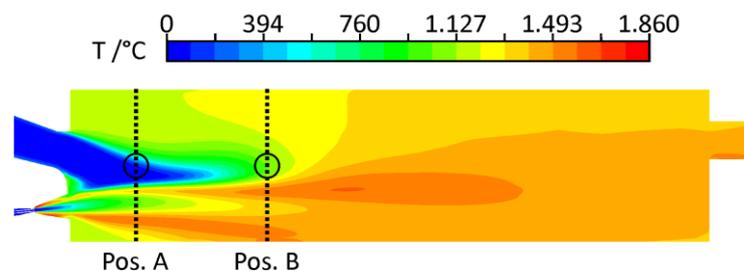
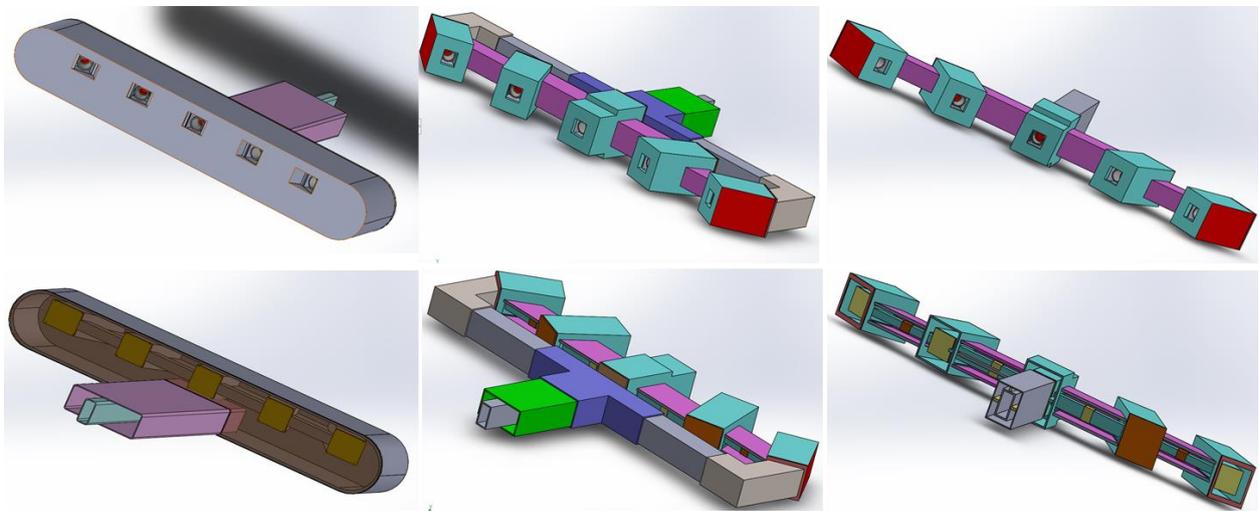


Abbildung 4.4: Fall 2 – CFD-Berechnungsgitter und simuliertes 3D-Feld der Wärmefreisetzung (RANS) für eine 500 kW Erdgas/Luft Underport-Feuerung bei  $\lambda = 1,15$ .

Die relativ hohen lokalen Temperaturen von 1.700 °C im Bodenbereich, die durch die tiefe Flammenposition zustande kommen, müssen bei der Auslegung der Kamerasonde berücksichtigt werden. Eine andauernde Berührung der Flamme mit der Kamerasonde muss vermieden werden.

## 4.2 Designstudie für die optische Sonde

Um besser bewerten zu können, welche Gehäusekonzepte geeignet sind, sowohl die optischen Bedingungen zu erfüllen als auch zu gewährleisten, dass das Kühlmodul nicht zu viel Wärme aus der Anlage abführt und die Fertigung in Edelstahl möglich ist, wurden verschiedene Konzepte erstellt. Zusätzliche Bedingung für das Layout war, dass das Kamerakühlmodul in alle Versuchsanlagen am DBI und GWI integriert werden kann. In **Abbildung 4.5** sind verschiedene Entwürfe für Kühlmodule zu sehen, welche 5 Kameras integrieren können.



*Abbildung 4.5: CAD-Studie zur Integration der Kameras und Optimierung der Wärmeabfuhr aus der Ofenanlage.*

Das linke Modell zeichnet sich durch eine relativ gute Fertigbarkeit aus, führt aber rund 130 kW Wärme aus der Ofenanlage über den Kühlwasserstrom ab. Die weiteren Modelle konnten zwar die Wärmeabfuhr bei gleicher Kühlleistung reduzieren, wurden aber zunehmend komplex in Bezug auf die Fertigung. In **Abbildung 4.6** sind die Einbauposition der Kameras und die Blickwinkel auf die Flamme eingezeichnet. Alle Kameras fokussieren auf das gleiche Zentrum in 450 mm Abstand, was den geometrischen Bedingungen im Versuchsofen entspricht. Auf Grund der Zugänglichkeiten zu den Ofenanlagen wurden die Modelle zusätzlich bewertet. Folgende Punkte wurden hierbei festgestellt: Zum einen sind die Einbaubedingungen an einem der Öfen zu beengt, um zwei Kühlmodule mit je 5 Kameras zu integrieren, zum anderen wurde festgestellt, dass eine Anordnung von Kameras und Objektiven quer zum Kühlmodul sehr viel Platz für Bauteile und Kabelbiegeradien benötigt.

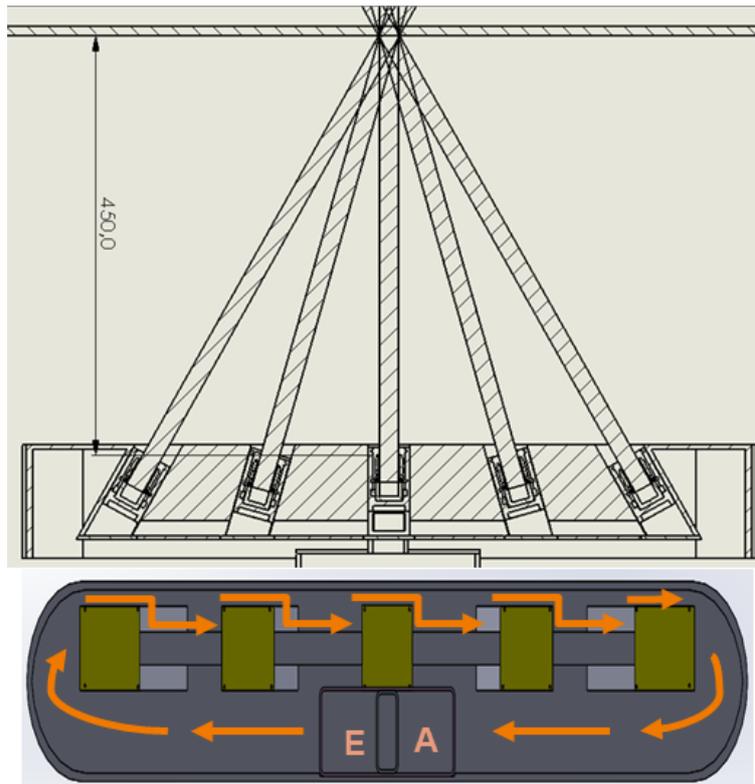


Abbildung 4.6: Einbaupositionen der Kamera und Strömungsrichtung des Kühlwassers.

Aus den Designstudien wurden verschiedene Bedingungen abgeleitet, welche anschließend in das Detail-Engineering übernommen wurden:

- Rotation der Kameras um 90° zur Sichtachse und Integration von Spiegeln um die Tiefe des Kühlmoduls zu reduzieren und damit die Wärmeabfuhr zu minimieren,
- L-förmiges Profil, um insgesamt 10 Kameras mit jeweils 5 pro Achse zu integrieren,
- doppelwandiges Design, um Wasserkühlung der gesamten Elektronik zu ermöglichen,
- Anschlussstück für das Durchdringen der Ofenwand und gekühlte Kabelführung in den Ofen,
- Wärmeschutzgläser mit ausreichendem Durchmesser für Weitwinkelkameras.

## 4.3 Anpassung der CTC-Methode und Algorithmen

### 4.3.1 Auswahl, Modifizierung und Charakterisierung geeigneter Bildsensoren

Der Kamera- und Objektivtyp für die tomografische Abbildung der Flammen wurde auf der Basis der inneren Geometrie der Öfen, der ungefähren Größe der abzubildenden Flamme und den Sensoreigenschaften wie Pixeldichte und -größe ausgewählt, die die Qualität der Bilder maßgeblich beeinflussen. Beispielsweise erfassen größere Sensorpixel mehr Licht, so dass das Signal-Rausch-Verhältnis steigt, oder eine größere Anzahl von Pixeln liefert eine höhere Auflösung für die tomografische Rekonstruktion. Beide Aspekte sind sehr wichtig für die Qualität der Rekonstruktionen. Die Bandpassfilterung ermöglicht die Erkennung spezifischer angeregter Spezies aus den Zwischenreaktionen in der Flamme, die wiederum verschiedene Regionen wie die Reaktionszone repräsentieren, die durch die CH\*- (VIS) oder OH\*- (UV) Signale

detektierbar sind. Die für die Erfassung des CH\*-Signals erforderlicheameratechnik und Optik ist kostengünstiger, da hier auf die (für die OH\*-Detektion benötigte) UV-Tauglichkeit verzichtet werden kann. Es wurde jedoch erwartet, dass das Strahlungssignal von den heißen Ofenraumwänden die Detektion des CH\*-Signals überlagern und somit erschweren könnte. Aus diesem Grunde wurden Möglichkeiten geprüft herkömmliche, nicht UV-sensitive Kameras zu modifizieren, sodass OH\* auch mit relativ kostengünstiger Messtechnik nachgewiesen werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine FLIR Blackfly BFS U3-51S5M mit 2.448 × 2.048-Pixel-Sensor und 3,45 µm Pixelgröße in Kombination mit einem Kowa Weitwinkelobjektiv (Modell LM6JC) mit 6 mm-Brennweite ausgewählt. Die Kamera besitzt einen Global Shutter.

Eine Lumigen-Beschichtung [29] des Kamerasensors wurde als kostengünstige Lösung zur Erweiterung der spektralen Sensitivität in den UV-Bereich erprobt. Das Funktionsprinzip der Beschichtung zeigt **Abbildung 4.7**.

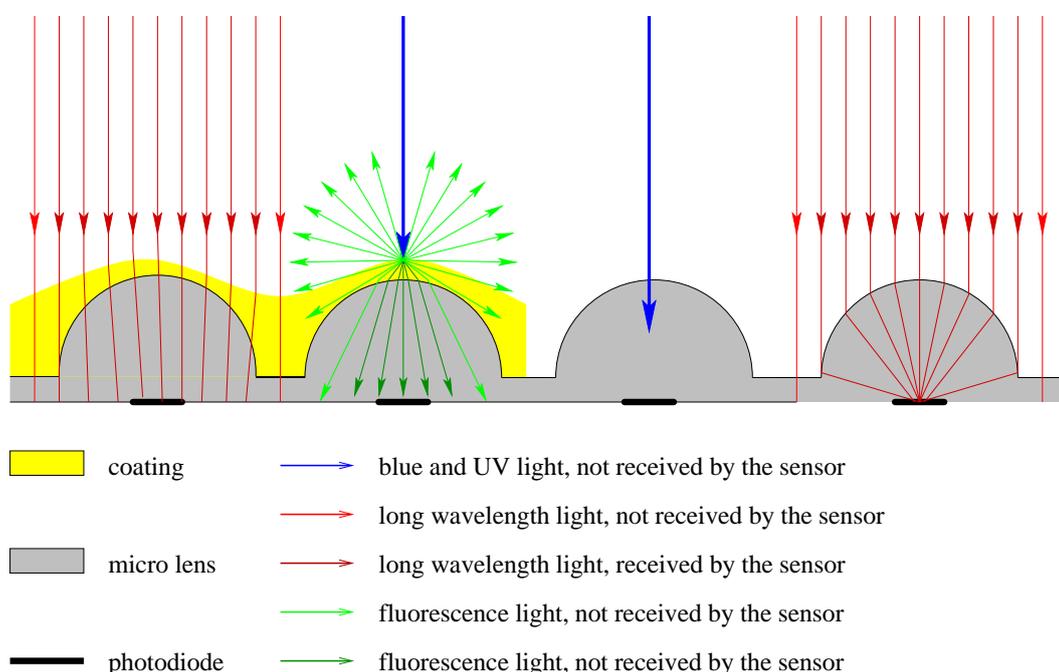


Abbildung 4.7: Funktionsprinzip der Lumigen-Beschichtung (gelb) [29].

Die Wirksamkeit der Beschichtung wurde an der Flamme eines Cambridge-Sandia-Brenners am EMPI im Laborversuch bewertet. Die Flamme besteht aus zwei konzentrischen Düsen aus denen ein vorgemischtes Brennstoff/Oxidator-Gemisch austritt, das durch einen Luft-Co-Flow eingekapselt wird. In den Tests wurden Durchflussraten von 4 l<sub>s</sub>/min CH<sub>4</sub> und 20 l<sub>s</sub>/min Luft verwendet sowie 400 l<sub>s</sub>/min für den Luft-Co-Flow. Für die Detektion der CH\*- bzw. OH\*-Chemilumineszenz wurden Bandpassfilter (AHF BrightLine HC) zur Erfassung bei 433 nm (24 nm FWHM) im VIS- und 320 nm (40 nm FWHM) im UV-Bereich eingesetzt. Für einen Vergleich der Bildqualität wurden zeitlich gemittelte Aufnahmen von der Flamme herangezogen. Verglichen wurden Flammenaufnahmen mit einer Kamera nach Entfernung des Sensordeckglases (nicht UV-durchlässig) sowie anschließend erfolgter Lumigen-Beschichtung mit einem nicht-modifizierten Sensor. Die Aufnahmen sind in **Abbildung 4.8** gegenübergestellt. Um die Flamme sichtbar zu machen, wurde die Verstärkung angepasst. Die OH\*-Aufnahmen erfolgten mit der maximalen Verstärkung.

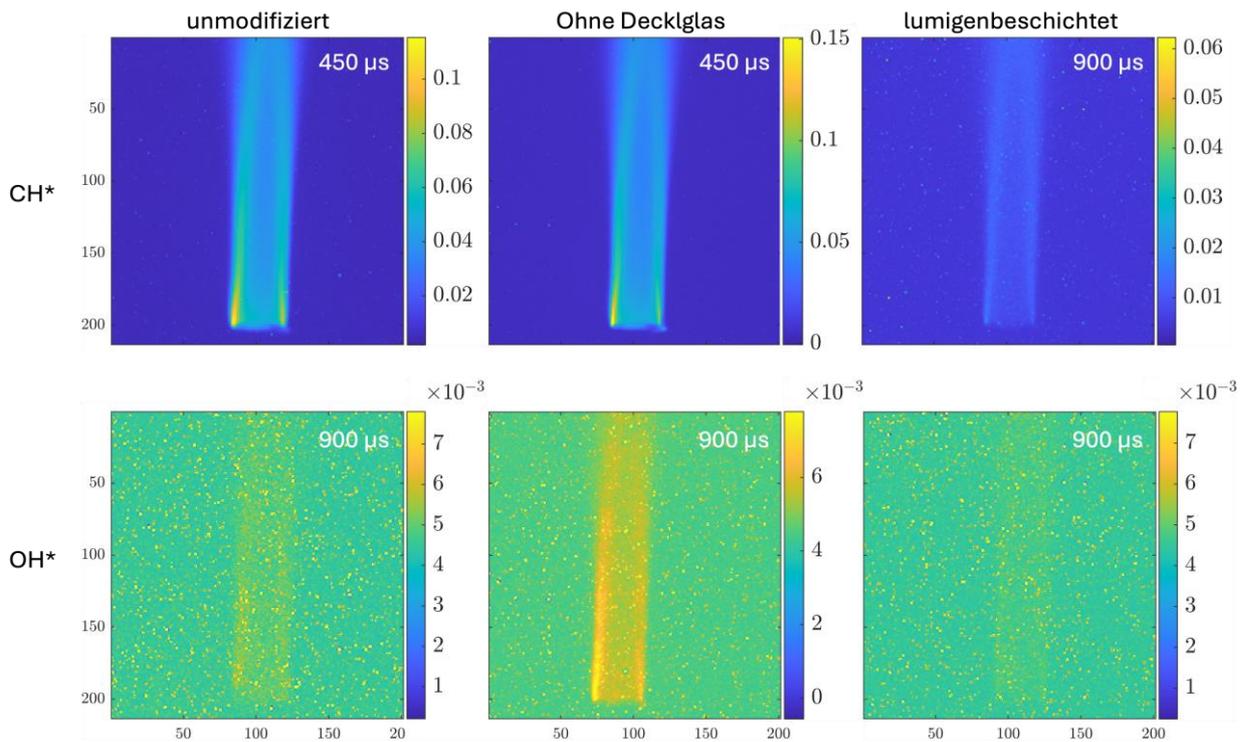


Abbildung 4.8: Vergleich der Signalqualität bei der Detektion der CH\*- (obere Reihe) und OH\*-Chemilumineszenz (untere Reihe) einer vorgemischten CH<sub>4</sub>-Luft-Flamme. Nicht-modifizierter Sensor (linke Spalte), Sensor ohne Deckglas (mittlere Spalte) und Lumigen-beschichteter Sensor (rechte Spalte), aufgenommen mit 450 bzw. 900 µs Belichtungszeit.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Lumigen-beschichteten Kamerasensors fielen negativ aus, sodass die ursprünglich geplante Messstrategie auf der Basis der Erfassung der Emission des OH\*-Flammenradikals sich als nicht zielführend herausstellte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beschichtung die Effektivität der Mikrolinsen auf dem Sensor erheblich negativ beeinflusst. Die Detektion des OH\*-Signals erforderte zudem relativ lange Belichtungszeiten von mehr als 900 µs, die in der angestrebten Anwendung zu einer zu starken Bewegungsunschärfe führen würde und somit die Detektion kleiner turbulenter Strukturen in der Reaktionszone nicht zulassen würde. Im Gegensatz dazu konnte bei gleicher Belichtungszeit ein deutlich stärkeres CH\*-Signal erfasst werden, ohne dass eine Anpassung des Kamerasensors erforderlich ist, da die Emission im Wellenlängenbereich nahe der höchsten Empfindlichkeit des Sensors detektiert wird. Daher wurde die Messstrategie entsprechend geändert und die Verwendung einer Lumigen-Beschichtung der Sensoren im weiteren Verlauf des Projekts nicht weiterverfolgt. Im Falle einer zu starken Beeinflussung der Bildqualität durch den Strahlungshintergrund im sichtbaren Wellenlängenbereich bei sehr hohen Temperaturen (> 1.000 °C), z. B. ausgehend von den Ofenwänden, sollte durch eine angepasste Versuchsführung eine entsprechende Begrenzung der Ofenraumtemperatur erfolgen, um die tomographische Messtechnik entwickeln und zunächst unter moderaten Bedingungen erstmalig im industriellen Maßstab anwenden zu können.

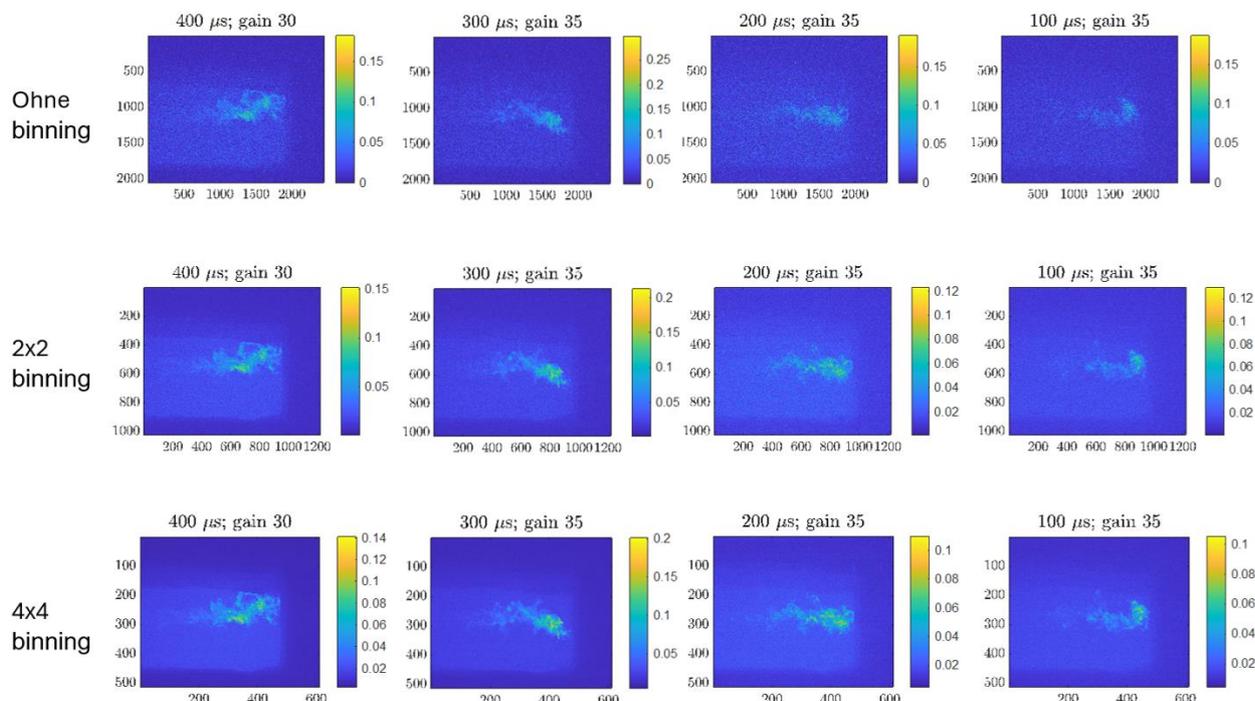
Die ausgewählte Kombination aus FLIR-Kamera, Kowa-Objektiv und CH\*-Bandpassfilter wurde zunächst an einer 150 kW-Erdgas/Luft-Flamme am „Nassheuer“-Ofen des GWI erprobt. Die Flamme wurde durch das geöffnete Ofenraumfenster detektiert. Der Test diente einer ersten Charakterisierung der Signalqualität bei der Detektion der CH\*-Chemilumineszenz im dem heißen Ofenraum. Die mittlere Ofenraumtemperatur betrug während des Test 1.140 °C, sodass ein signifikanter Strahlungshintergrund zu erwarten war.

Für den Versuch wurde die Kamera mit einem Kowa-Objektiv mit 35 mm Brennweite ausgestattet, um dem größeren Abstand der Kamera zur Flamme von etwa 4 m Rechnung zu tragen. Die Blendenöffnung betrug f/8, der Bandpassfilter wurde direkt vor das Objektiv montiert. Die Anordnung zeigt **Abbildung 4.9**.



*Abbildung 4.9: Erfassung der CH\*-Chemilumineszenz einer 150-kW-Flamme durch die geöffnete Kammerklappe des „Nassheuer“-Ofens bei einer mittleren Ofenraumtemperatur von 1.140 °C.*

Es wurden Bilder mit Belichtungszeiten von 100 bis 400  $\mu\text{s}$  und einer angepassten Signalverstärkung der Kamera aufgenommen. Die Bilder wurden hintergrundbereinigt (Hintergrund = Strahlung unmittelbar nach Ausschalten der Flamme) und im Anschluss auf das Ergebnis ein  $2 \times 2$  bzw.  $4 \times 4$  Pixel-Binning (Software-Binning bzw. im Post-Processing) angewendet. Die resultierenden Bilder sind in **Abbildung 5.7** dargestellt. Das Pixel-Binning führt, insbesondere bei den Aufnahmen mit geringen Belichtungszeiten, zu einer signifikanten Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Es konnte festgestellt werden, dass der ausgewählte Kamerasensor mit relativ kleinen Pixeln ( $3,45 \mu\text{m}$ ) bei Belichtungszeiten unter einer Millisekunde für das Erzielen eines ausreichenden Signal-Rauschverhältnisses ein Binning erforderlich macht.

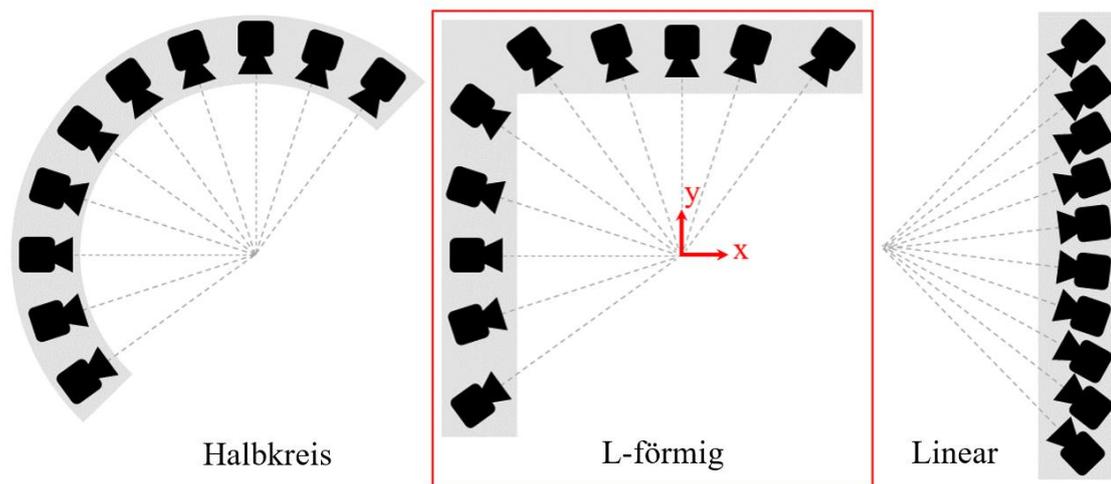


*Abbildung 4.10: Kameraaufnahmen von einer der 150-kW-Erdgas/Luft-Flamme im Versuchsofen mit Belichtungszeiten von 400, 300, 200 und 100  $\mu\text{s}$  (Spalten von links nach rechts); Ohne Pixel-Binning (obere Reihe),  $2 \times 2$  Binning (mittlere Reihe) und  $4 \times 4$  Binning (untere Reihe) im Vergleich.*

#### 4.3.2 Untersuchung verschiedener Kameraanordnungen mit Hilfe von Phantomstudien

Die Anordnung der Kameras spielt für die Gewinnung der tomografischen Daten eine entscheidende Rolle und ist maßgeblich für die Qualität der Rekonstruktionen verantwortlich. Für die Flammen-Tomographie in Laboranwendungen wird idealerweise eine gleichmäßig verteilte Anordnung der Kameras auf einem Halbkreis in einer Ebene gewählt, die orthogonal zur Hauptströmungsrichtung liegt [18], da auf diese Weise für den Rekonstruktionsprozess unvorteilhafte, stark überlappende oder entgegengesetzte Ansichten bestmöglich vermieden werden können. Ziel bei der Anordnung der Kameras ist es, die Anzahl an unabhängigen Informationen möglichst zu maximieren. In der Ofenumgebung ist in der Regel weder diese bevorzugte Art der Anordnung noch die Gesamtzahl der üblicherweise in Laboranwendungen verwendeten Kameras (12 und mehr) realisierbar, da für Einsatz in der heißen Ofenraumatmosfera die Herstellung einer gekühlten Sonde mit entsprechender Geometrie eine hohe Herausforderung darstellt. Daher wurde die Auswahl einer geeigneten optischen Anordnung stets unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit einer entsprechenden Sondengeometrie getroffen. Die Auswahl erfolgte anhand von Phantomstudien unter Berücksichtigung der Beschränkungen durch die inneren Ofenraumgeometrien. Die Phantome der Flammen wurde auf Basis der zeitlich gemittelten Verteilung der Wärmefreisetzung der generiert, die mit Hilfe von RANS-Simulationen (stetig) einer turbulenten, nicht vorgemischten 120-kW-Erdgas/Luft-Flamme ( $\lambda = 1,1$ ) berechnet wurde. Die Simulation wurde in ANSYS Fluent 2021 R1 unter Verwendung des sst k-omega Turbulenzmodells und eines nicht-adiabatischen PDF-Gleichgewichtsmodells durchgeführt, siehe 4.1. Das Phantom repräsentiert die Flamme im zeitlichen Mittel, die nachfolgend im Rahmen der Ofenversuche experimentell untersucht werden soll.

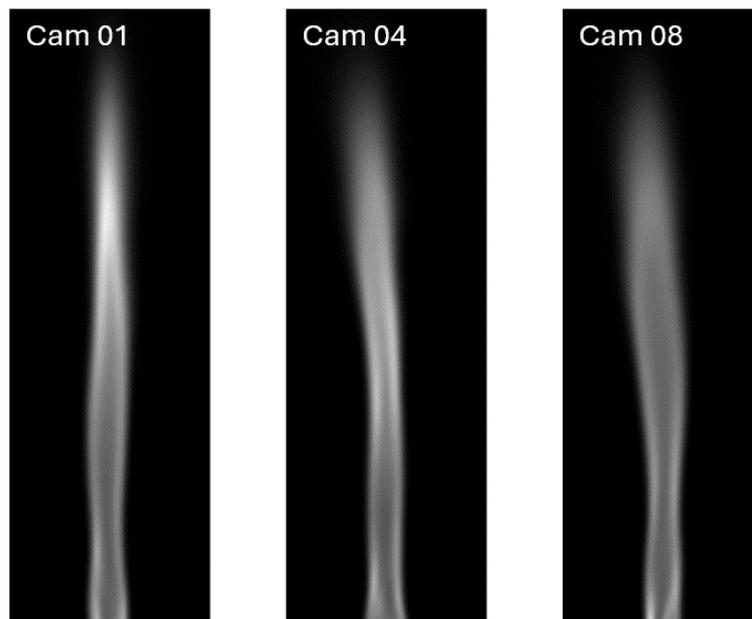
Im Rahmen der Phantomstudien wurden drei verschiedene komplanare Kameraanordnungen numerisch untersucht. Die Anordnungen sind schematisch in **Abbildung 4.11** dargestellt.



*Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Halbkreis-, L-förmigen und linearen Kameraanordnung, die in den Phantomstudien untersucht wurden.*

Die Anzahl der Ansichten bzw. Kameras wurde auf 10 festgelegt, da diese aufgrund der Erfahrungen aus den Laboranwendungen einen guten Kompromiss zwischen Rekonstruktionsqualität und -aufwand sowie auch dem beanspruchten Bauraum in der Kamerasonde darstellt. Die zu erwartende Flammenlänge von

ca. 800 mm für Fall 1 (siehe **4.1**) und der benötigte Abstand zwischen Kamera und Flamme zwischen 500 und 750 mm, der zu größeren Distanzen begrenzt ist durch die innere Geometrie der Versuchsöfen, machte die Verwendung von Weitwinkelobjektiven erforderlich, um eine möglichst vollständige Abbildung der Flamme erreichen zu können. Die synthetisch erzeugten Szenarien wurden unter Berücksichtigung einer in der Versuchsumgebung maximal zur Verfügung stehenden Querschnittshöhe bzw. -breite von 1.000 mm erzeugt. Die Parameter wurden an die realen Versuchsbedingungen angepasst und dabei 6 mm Weitwinkelobjektive berücksichtigt. Für die drei zu untersuchenden Kameraanordnungen wurden synthetische Szenen für das Flammenphantom im „Nassheuer“-Ofen erzeugt. Beispiele für daraus abgeleitete Kameraansichten zeigt **Abbildung 4.12**.



*Abbildung 4.12: Beispiele für synthetisch generierte Bilder, die aus drei verschiedenen Ansichten der L-förmige Kameraanordnung gerendert wurden.*

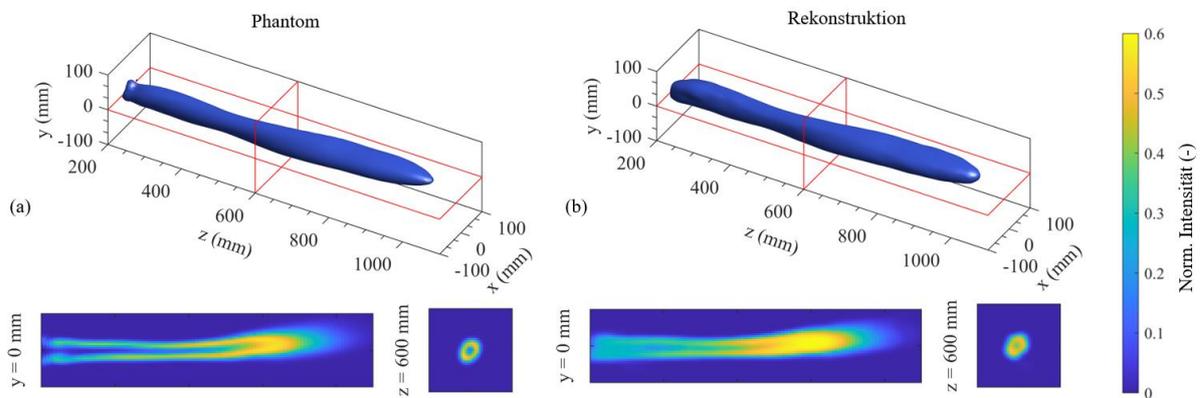
Anhand der für alle drei Kamerakonfigurationen berechneten synthetischen Ansichten wurde das Flammenphantom mit Hilfe des ERT-Algorithmus [30,31] rekonstruiert, dessen Funktionsweise unter **3.3** näher erläutert ist. Die Rekonstruktionen basierten auf einer Population von 48 Individuen, die gleichmäßig auf 4 Inseln verteilt sind und sich über  $4 \times 10^5$  Generationen entwickelt haben. Der Rekonstruktionsbereich wurde mit  $51 \times 51 \times 101$  Voxel ( $x \times y \times z$ ) mit einer Auflösung von 5,4 mm/Voxel entlang der x- und y-Achse und 9,18 mm/Voxel entlang z-Achse diskretisiert. Die synthetischen Bilder haben eine Größe von  $1.224 \times 1.024$  Pixeln (Breite  $\times$  Höhe), wurden jedoch um den Faktor 0,2 verkleinert und im Anschluss auf einen Ausschnitt bzw. die Region of Interest (ROI) von  $80 \times 245$  Pixeln zugeschnitten, bevor sie vom ERT-Algorithmus zur Berechnung des Phantomfeldes verarbeitet wurden. Die Analogie zwischen dem ursprünglichen Flammenphantom (Grundwahrheit) und der Rekonstruktion wurde für alle drei Kameraanordnungen mit Hilfe des relativen L2-Norm-Fehlerabstands ( $\epsilon$ ), des Pearson-Korrelationskoeffizienten ( $\rho$ ) und des strukturellen Ähnlichkeitsindexmaßes (SSIM) [37] quantifiziert. Die berechneten Werte sind in **Tabelle 4.1** aufgeführt. Die in der **Tabelle 4.1** aufgeführten Ergebnisse basieren auf dem Ensemble-Durchschnitt von 5 Rekonstruktionen, um repräsentative Werte zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der

L-förmigen Kameraanordnung, im Vergleich zur idealen Anordnung im Halbkreis, trotz der ungünstigeren Kamerapositionierung nach wie vor eine sehr gute Rekonstruktionsqualität erzielt werden kann.

*Tabelle 4.1: Ergebnisse der Bewertung der Rekonstruktionsqualität für die untersuchten Kameraanordnungen; L2-Norm-Fehlerabstand  $\epsilon$ , Pearson-Korrelationskoeffizient  $\rho$  und struktureller Ähnlichkeitsindex SSIM.*

	$\epsilon$	$\rho$	SSIM
<b>Halbkreis</b>	0,551	0,900	0,954
<b>L-förmig</b>	0,617	0,902	0,948
<b>Linear</b>	0,607	0,888	0,927

**Abbildung 4.13** zeigt einen Vergleich der Rekonstruktion mit dem zugrundeliegenden Flammenphantom für die L-förmige Kameraanordnung. Es wurden zunächst jeweils Iso-Flächen bei 20 % des Maximalwertes und im Anschluss jeweils ein vertikaler ( $y = 0$  mm) sowie ein horizontaler ( $z = 600$  mm) Schnitt berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die geometrischen Details der Flamme mit hoher Genauigkeit wiedergegeben werden können. Bei der Rekonstruktion ist eine leichte Glättung zu beobachten, die hauptsächlich auf die begrenzte Anzahl von Kameras (10) und die Diskretisierung der ROI zurückzuführen ist. Bei der Rekonstruktion der instantanen Daten aus den geplanten Versuchen ist eine ausgeprägtere Glättung als bei den Simulationen, die ein zeitliches Mittel abbilden, zu erwarten, da diese zusätzlich die turbulente Struktur der Flamme beinhalten. Die L-förmige Kameraanordnung stellt einen guten Kompromiss aus hoher Rekonstruktionsqualität und Fertigungsaufwand für die benötigte Sonde dar, sodass diese im Weiteren für das Design zugrunde gelegt wurde.

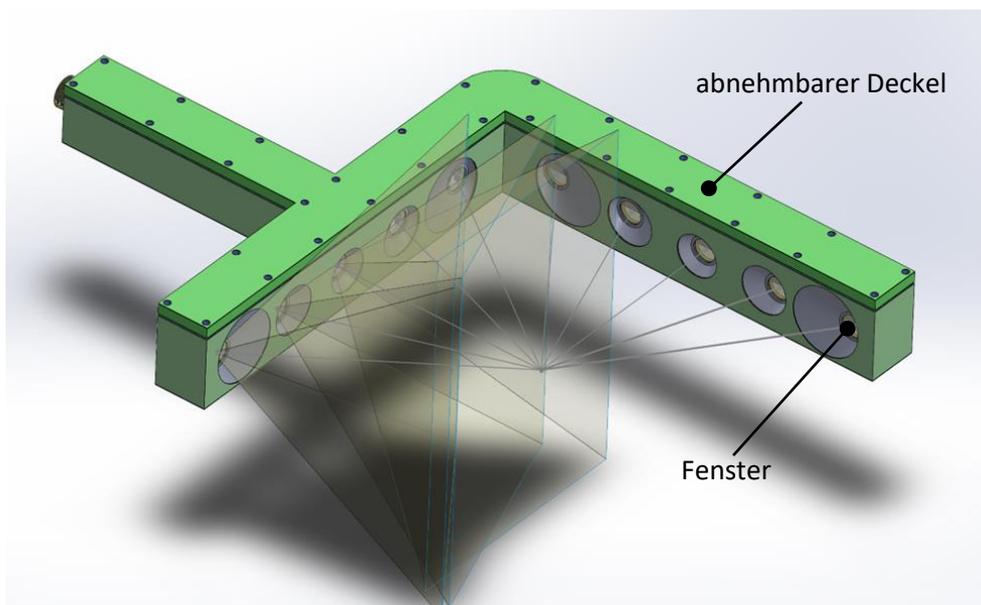


*Abbildung 4.13: (a) 3D-Phantom auf der Grundlage des Wärmefreisetzungsfeldes einer simulierten, nicht vorgemischten Erdgas/Luft-Flamme bei 120 kW und einem Luftverhältnis  $\lambda = 1,1$ ; und (b) Rekonstruktion des Phantoms unter Verwendung der L-förmigen Kameraanordnung.*

## 5 Entwicklung des Mehrkameranystems

### 5.1 Auslegung des Kühlmoduls und Design des Mehrkameranystems

Für die Konstruktion des Kamera-Kühlmoduls mussten diverse konstruktive Vorgaben beachtet werden. So war unter anderem zu beachten, dass sowohl feste Abstände zwischen den Kameras liegen als auch die Blickwinkel auf ein gemeinsames Zentrum ausgerichtet werden. Auf Grund der Verwendung von Weitwinkelobjektiven mussten zudem große optische Eintrittsöffnungen vorgesehen werden. Die räumlichen Bedingungen an den Versuchsofen führten zudem dazu, dass alle Kameras in ein Kühlmodul in zwei L-Förmig zueinander angeordneten, gleichlangen Schenkeln untergebracht werden mussten. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Kühlleistung optimiert wird, um nicht zu viel Wärme aus der Ofenanlage und der Flamme über das Kamerasystem abzuführen. In **Abbildung 5.1** ist das Layout des Kameramoduls mit den optischen Öffnungen und den Kamerablickwinkeln dargestellt. Im L-Profil sind die 10 Kameras inklusive der optischen Komponenten untergebracht. Diese sind genauer in **Abbildung 5.4** beschrieben.



*Abbildung 5.1: Kameramodul mit Blickwinkeln und den dazugehörigen Sichtachsen der Kameras auf einen gemeinsamen Bildmittelpunkt.*

Im Anschlussarm liegen die Strom- und Datenkabel für die Kamerasteuerung und Bildübertragung. Außerdem sind hier die Versorgungskanäle für Kühlwasservor- und -rücklauf, sowie die Druckluftkapselung. Hierfür wird ein geringer Luftüberdruck auf das System aufgegeben. Die Auflageflächen der Wärmeschutzgläser lassen eine geringe Leckage zu, sodass ein permanenter Sperrluftstrom über die Fensterberandung austreten kann. In **Abbildung 5.2** sind die äußeren Abmessungen des Systems dargestellt. Die L-Schenkel haben eine Länge von jeweils 900 mm. Die Kameras sind gleichmäßig in Abständen von 160 mm gemessen vom Bildmittelpunkt voneinander entfernt. Der Anschlussarm hat eine Länge von 650 mm, um durch die Ofenwände aus den Versuchsanlagen herausgeführt werden zu können. Die Kühlleistung des Systems beträgt bei 1,5 m<sup>3</sup>/h Spülleistung und 20 °C Vorlauftemperatur rund 100 kW.

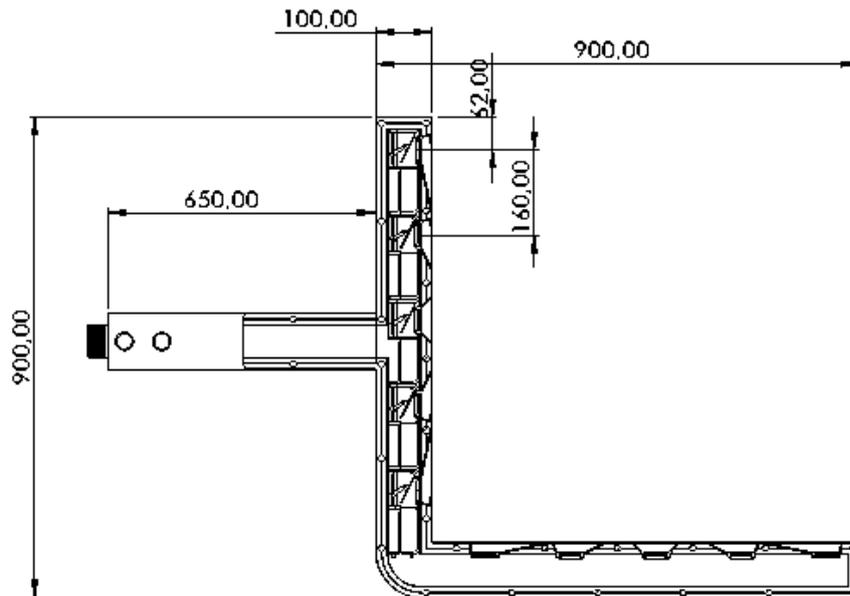


Abbildung 5.2: Abmessungen des Kameramoduls.

In **Abbildung 5.3** ist der optische Aufbau des Systems zu erkennen. Die Kamera ist orthogonal zur Schauöffnung angeordnet und blickt durch einen Filter auf einen über ein Drehgelenk einstellbaren Spiegel durch das Wärmeschutzglas. Dieses ist mit einer Kunststoffüberwurfmutter mit dem Metallkörper verschraubt. Die Mutter ist gelocht ausgeführt, um ein Durchströmen der Sperrluft zu gewährleisten.

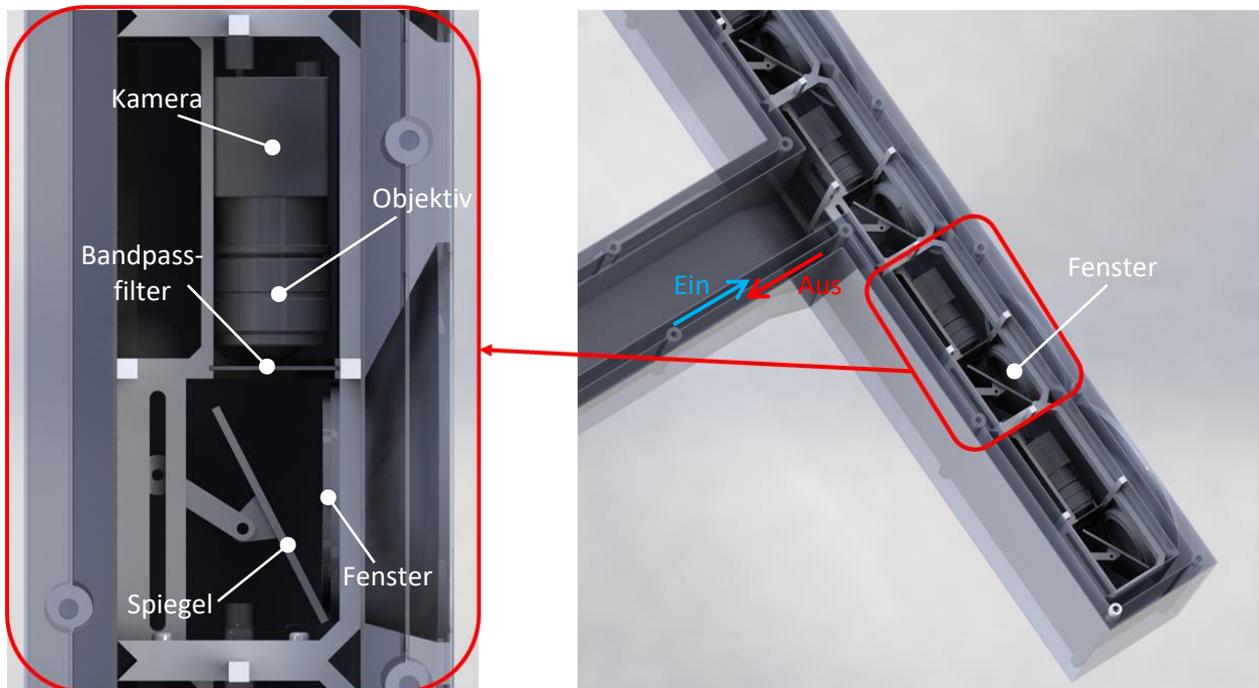


Abbildung 5.3: Innenansicht des Kameramoduls mit Kamera, Objektiv, Spiegel und Schauglas.

In **Abbildung 5.4** ist zur besseren Veranschaulichung ein Querschnitt durch das System dargestellt. Gut zu erkennen ist der Aufbau mit mehreren Kammern von außen nach innen.



*Abbildung 5.4: Links ist der schematische Aufbau und Zusammenbau des Kameramoduls zu sehen. Rechts ist der finale Aufbau zu sehen, wie er zehnmal in das Kühlmodul eingesetzt wird.*

In der äußeren Kammer (grün) wird der Kühlwasserrücklauf geführt, die mittlere Kammer (rot) führt den Kühlwasservorlauf. Jede Kammer ist mit einem verschraubten Deckel ausgestattet. Die innere Kammer (beige) enthält 10 Kameraträger (schwarz). An der rechten Seite ist die Sichtöffnung in grau zu sehen. In dieser Sichtöffnung wird das Wärmeschutzglas (Calflex 3000 SP) mit einer Überwurfmutter (gelb) geklemmt. Die Sichtöffnungen sind je nach Platzierung unterschiedlich in Größe und Anstellwinkel und werden additiv in Edelstahl gefertigt und anschließend im Gehäuse verschweißt.

Nach der Fertigung wurden am DBI im Versuchsofen erste Heißversuche ohne integrierte Elektronik mit einer umfangreichen Ausstattung an Thermoelementen durchgeführt. Hierbei wurde die thermische Beständigkeit des Systems bis 900 °C Anlagentemperatur erprobt. In mehreren Probeläufen wurden die Temperaturen stückweise erhöht und im inneren des Systems Referenztemperaturen gemessen. Die Testläufe erwiesen sich als erfolgreich und das System konnte im Anschluss an das GWI versendet werden, um die Elektronik zu montieren und die Versuchsreihen zu starten.

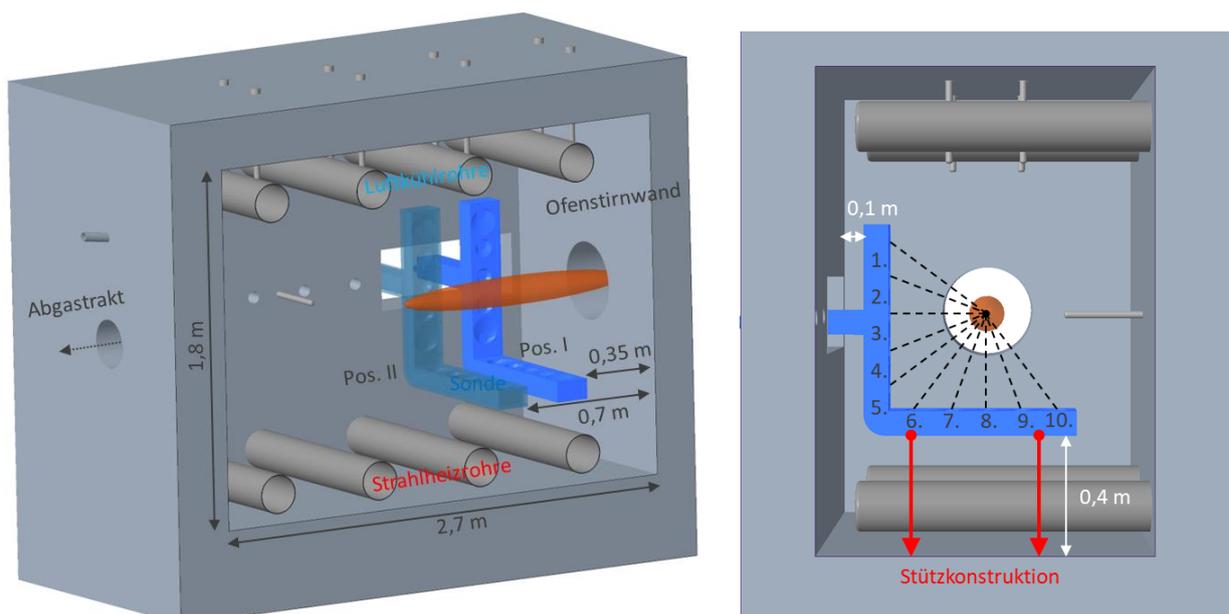


*Abbildung 5.5: Ausstattung des leeren Kühlmoduls mit Thermoelementen für erste Testläufe im DBI-Ofen. Zu sehen ist die Deckeldichtung (schwarz, gelocht) welche den Doppelwandigen Deckel und die Wasserkammern gegen die Elektronik abdichtet.*

## 5.2 Implementierung der Sonde in die Versuchsumgebungen

Die Implementierung der Kamerasonde in die Versuchsofen des GWI für die Untersuchung der in **4.1** definierten Fälle wurde mit Hilfe von 3D-CAD-Modellen simuliert und die Position gegenüber den zu untersuchenden Flammen optimiert. Die seitens des DBI entwickelte Sonden-Geometrie wurde iterativ im Hinblick auf die zu untersuchenden Feuerungen optimiert und der Einbau in die Versuchsofen abschließend validiert.

**Abbildung 5.6** zeigt die Positionierung im Versuchsofen „Nassheuer“ für die Untersuchung der Flamme eines Hochgeschwindigkeitsbrenners bzw. Fall 1 (siehe **4.1**). Der Einbau in den Ofenraum erfolgt in diesem Fall durch das Ofenster. Der Blickmittelpunkt des Kamerasystems fällt mit Feuerungsachse zusammen. Das System wird im Feuerungsraum auf einer Stützkonstruktion aus Stahl und Feuerfestmaterial oberhalb des ersten Strahlheizrohres getragen, sodass das Querprofil der Sonde fest aufliegt.



*Abbildung 5.6: Integration der Kamerasonde in den „Nassheuer“-Hochtemperaturversuchsofen des GWI im 3D-CAD-Modell.*

Eine Vorkonditionierung des Ofenraums kann bei Bedarf über die hinteren Strahlheizrohre erfolgen. Die Positionierung in Feuerungsrichtung ist variabel in bis zu 0,7 m Abstand von der Ofensterwand möglich.

**Abbildung 5.7** zeigt die Positionierung im „roten“-Ofen für die Untersuchung der Flamme einer Underport-Feuerung.

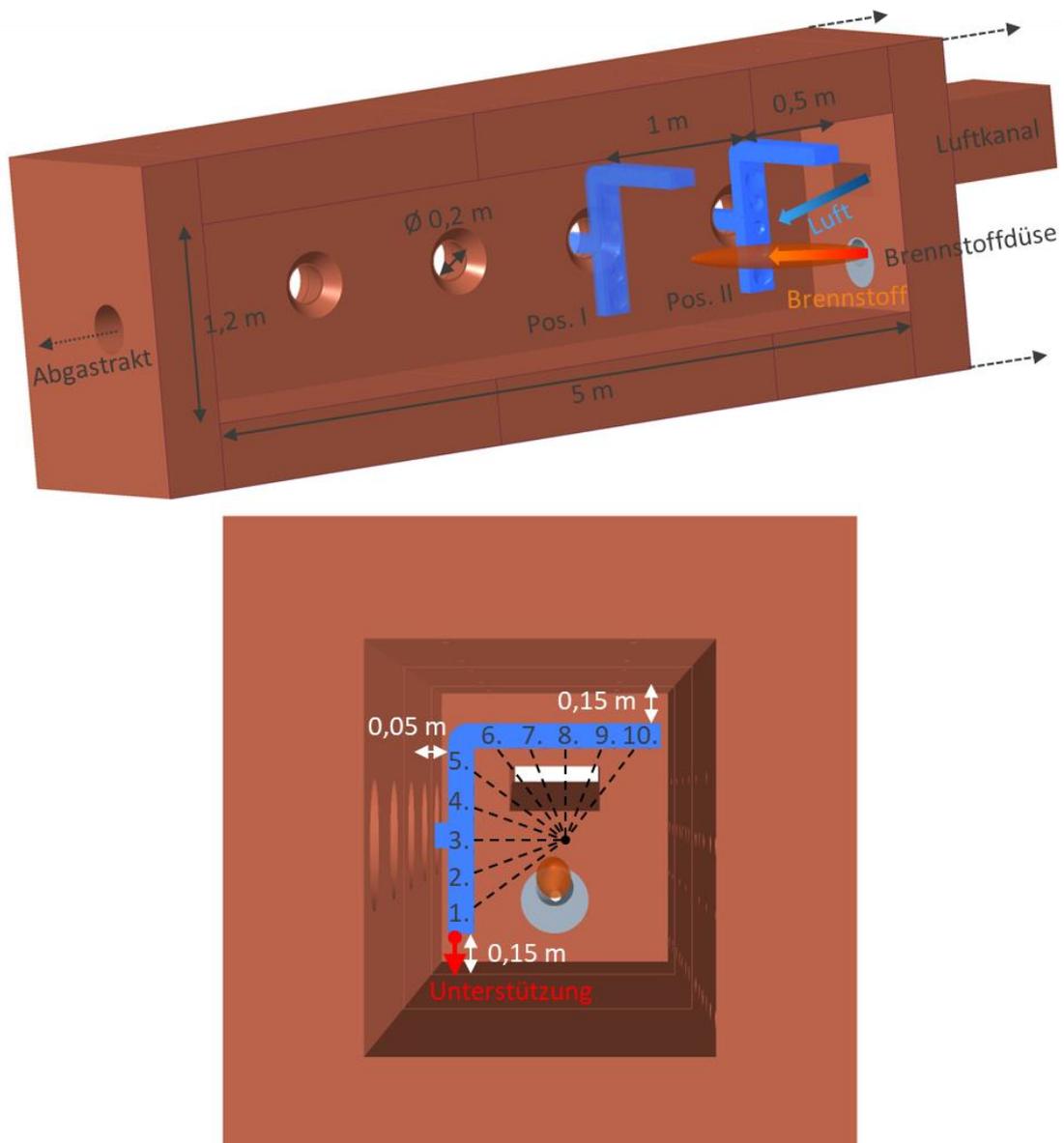


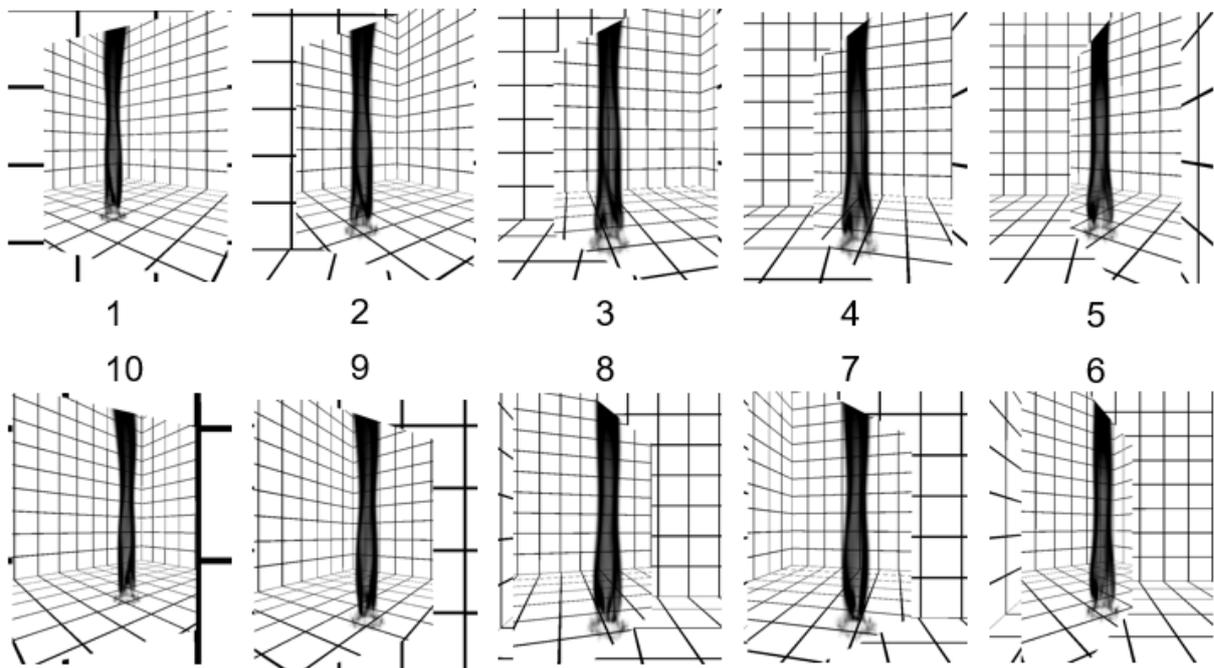
Abbildung 5.7: Integration der Kamerasonde in den Hochtemperaturversuchsofen („Roter“-Ofen) des GWI im 3D-CAD-Modell.

Der Einbau erfolgt in diesem Fall um 180° gedreht bei geöffneter Stirnwand, sodass das Querprofil entlang der Ofenraumdecke verläuft. Die Flammenausbreitung verläuft in einer geringen Winkelanstellung von unten nach oben. Durch die Anordnung kann ein direkter Kontakt der Sonde mit der Flamme verhindert werden. Der Blickmittelpunkt des Kamerasystems zur Ofenraummitte ist geringfügig seitlich versetzt. Das aufrechte Profil an der Wandseite wird mit Feuerfestmaterial unterstützt. Der Einbau kann prinzipiell in allen Ofenfensterpositionen auf diese Weise erfolgen. Die optische Anordnung konnte anhand der Modelle erfolgreich validiert werden.

### 5.3 Optimierung der optischen Anordnung mit Hilfe von Phantomstudien

Das Sondenkonzept sieht eine Positionierung der Kameras mit einer 90°-Blickrichtung zur Flamme vor und den Einsatz von Umlenkspiegeln, die es ermöglichen alle Kamerasichtachsen auf einen gemeinsamen Schnittpunkt im Ofenraum auszurichten, siehe 5.1. Die Bewertung und Optimierung des optischen

Aufbaus wurde mit Hilfe eines vom EMPI entwickelten Ray-Tracing-Algorithmus im Rahmen von Phantomstudien durchgeführt. Der Algorithmus basiert auf einem Lochkameramodell, das das Sichtfeld der Kameras als Funktion der Brennweite (oder des Lochkameraabstands zum Sensor), der Sensorgröße, der Auflösung und der angenommenen Bildverzerrung schätzt. Eine Flammensimulation (RANS) des GWI diente als Phantom für das Ray-Tracing des Szenarios. Das Ray-Tracing berücksichtigt die Reflexion des Strahlenwegs an den Umlenkspiegeln vor den Kameras sowie die vorgesehenen Weitwinkelobjektive (siehe 4.3.2). **Abbildung 5.8** zeigt alle 10 Kameraansichten aus der synthetischen Szene für die endgültige Kameraanordnung in der Sonde und verdeutlicht, dass die Kamera- und Spiegelkonfiguration die Abbildung der Flamme über die gesamte Ausdehnung in radialer Richtung zulässt. Das Sichtfeld jeder Kamera deckt hierbei die Flamme über einen ausreichend großen Bereich in Ausbreitungsrichtung ab.



*Abbildung 5.8: Ray-Tracing der Kameraansichten unter der Berücksichtigung der durch die Sondenkonstruktion vorgegebenen Kamerapositionen, -orientierungen und Reflexionen an den Umlenkspiegeln.*

Die Phantomstudien wurden experimentell für eine nicht-vorgemischte turbulente Flamme im Labormaßstab validiert. Dazu wurde ein Versuchsaufbau bestehend aus einer Kamera mit 6-mm-Objektiv ( $f/2.8$ ) und einem Umlenkspiegel in einer geometrischen Anordnung analog zu der in der Sonde und bei vergleichbarem Arbeitsabstand zur Flamme verwendet (**Abbildung 5.9, (a)**). Die damit generierten Bilder wurden verglichen mit Aufnahmen, die ohne eine Spiegelumlenkung erzeugt wurden. **Abbildung 5.9** zeigt, dass eine Abbildung der Flamme über den Umlenkspiegel (**(b)**) bei akzeptabler Einschränkung des Sichtfeldes im Vergleich zu dem Fall ohne Umlenkung (**(c)**) möglich ist.

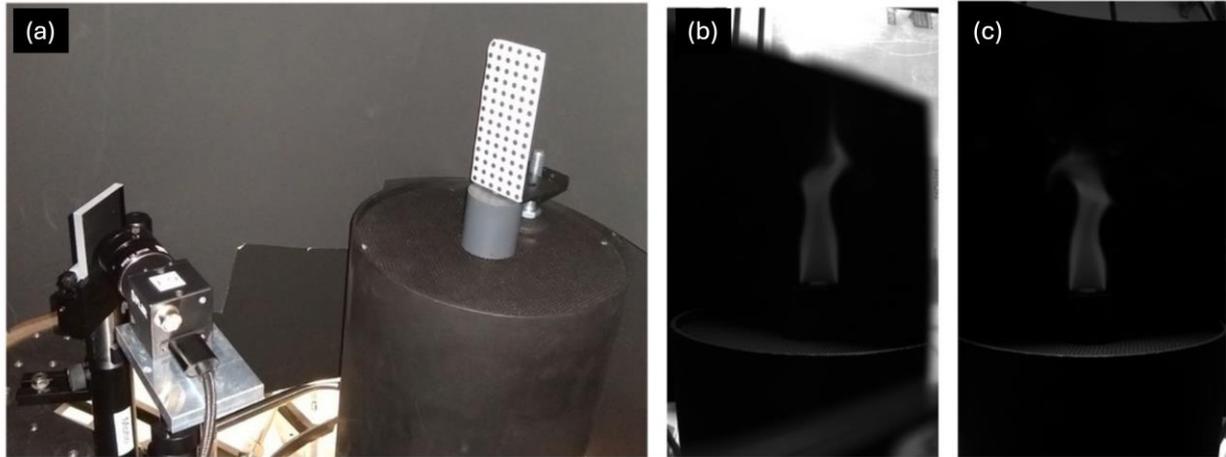


Abbildung 5.9: (a) Versuchsaufbau zur Erprobung der optischen Anordnung. (b) Aufnahmen mit und (c) ohne Umlenkspiegel von einer nicht-vorgemischten turbulenten Flamme im Labormaßstab.

In einem weiteren Versuch an einem Zylinder mit einem Durchmesser, der vergleichbar mit den zu erwartenden größten Flammendurchmessern in den realen Ofenexperimenten ist, wurde überprüft, ob die gesamte Flammenbreite durch die Kameraanordnung abgebildet werden kann. Dies ist entscheidend für die Qualität der Rekonstruktion, da die Flammenränder im Idealfall in den Bildern vollständig enthalten sein müssen. Der Versuchsaufbau ist in **Abbildung 5.10** dargestellt.

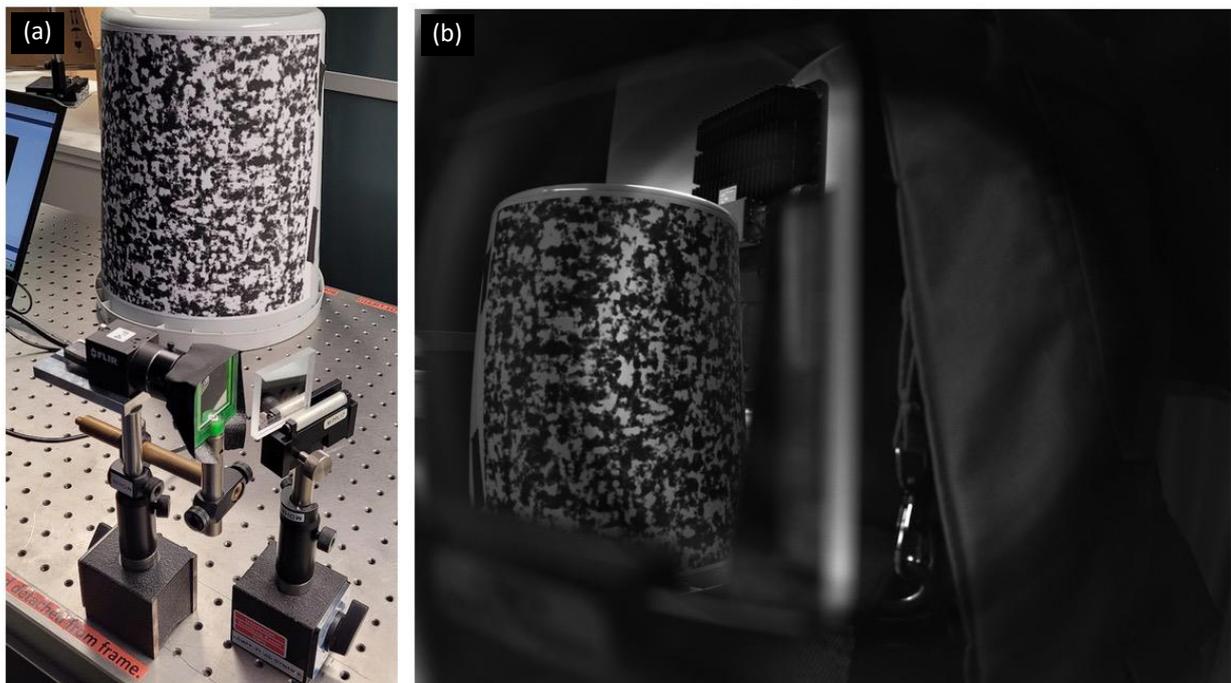


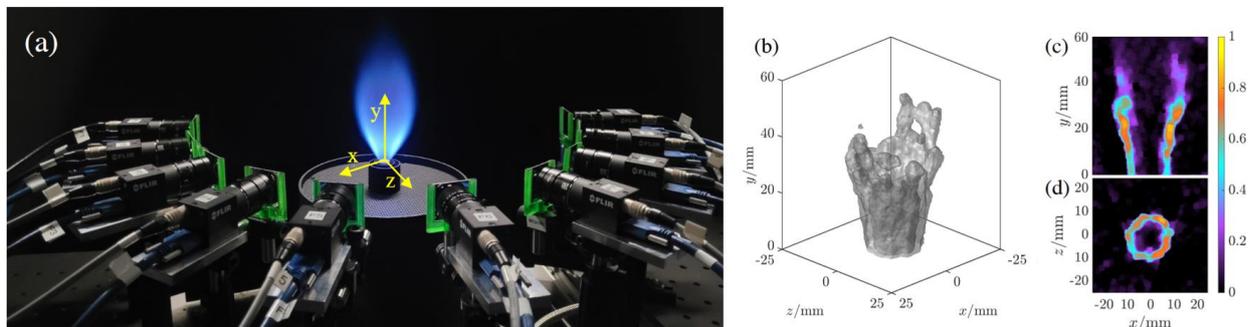
Abbildung 5.10: (a) Versuchsaufbau zur Erprobung der optischen Anordnung. Abbildung eines zylindrischen, schwarz-weiß-gemusterten Testobjekts mit einem Durchmesser in der zu erwartenden Flammenbreite. (b) Aufnahme mit Umlenkspiegel.

Der Zylinder ist zur besseren Sichtbarkeit mit einem Schwarz-Weiß-Muster bedeckt, das die Flammenregion repräsentiert. Die Anordnung aus Kamera und Umlenkspiegel wurde in der im Ofenversuch zu erwarteten Entfernung zur Flamme vor dem Zylinder positioniert. Es konnte für alle in der optischen

Anordnung der Kamerasonde auftretenden Umlenkwinkel gezeigt werden, dass der Zylinder in seiner gesamten Breite abgebildet werden kann.

#### 5.4 Charakterisierung und Erprobung unter Laborbedingungen

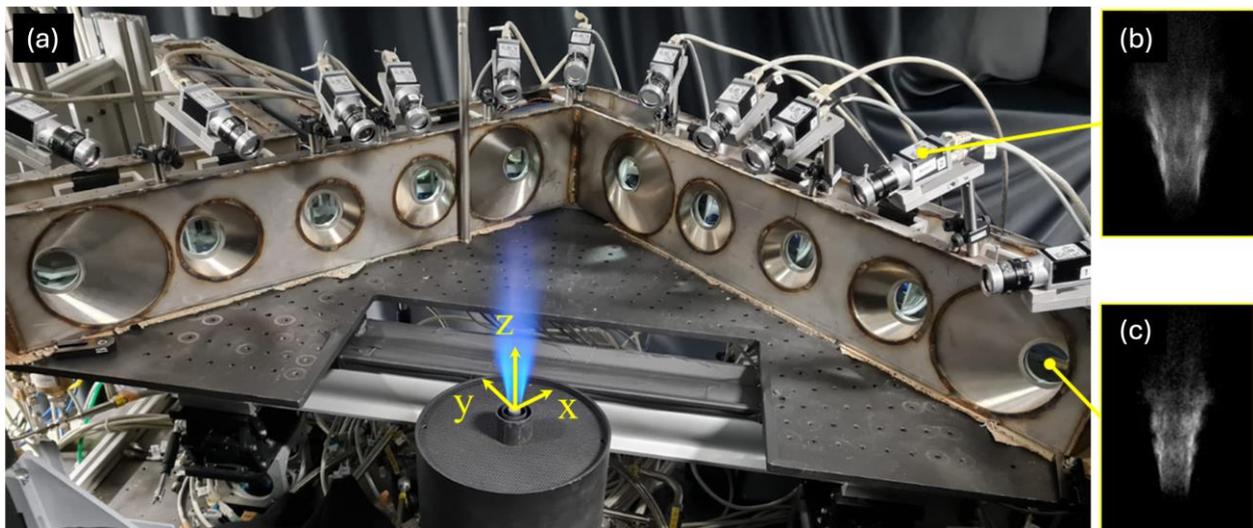
Der optische Aufbau der Kamerasonde wurde zunächst in mehreren Vorversuchen an einer hochturbulenten Flamme unter Laborbedingungen erprobt. Die mit 6-mm-Kowa-Objektiven ausgestatteten 10 FLIR-Kameras, wurden hierfür zunächst auf einem Halbkreis um einen „Cambridge-Sandia-Stratified“-Drallbrenner angeordnet und eine vorgemischte  $\text{CH}_4/\text{Luft}$ -Flamme (SwB5) betrachtet, siehe **Abbildung 5.11 (a)**. Für die Detektion der  $\text{CH}^*$ -Chemilumineszenz wurden Bandpassfilter bei 431 nm (28 nm FWHM) wurden mit Hilfe von 3D-gedruckten Haltern vor die Kameras montiert und eine Blendenzahl von 2,8 am Objektiv eingestellt. Da der verwendete Bandpassfilter eine signifikante Transmission im nahen Infrarotbereich besitzt, wurden zudem die in der Kamerasonde für den Ofenbetrieb vorgesehenen Wärmeschutzgläser (Calflex 3000 SP) vorgeschaltet, die diesen Wellenlängenbereich effizient blocken. Ein synchrones Triggern der Kameras wurde sichergestellt. Die Flammenbilder wurden mit einer Belichtungszeit von 500  $\mu\text{s}$  aufgenommen und im Anschluss eine tomographische Rekonstruktion mit dem unter **3.3** beschriebenen ERT-Algorithmus durchgeführt. Die resultierenden 3D-Rekonstruktionen besitzen eine Voxel-Auflösung von 0,5 mm. **Abbildung 5.11** zeigt die berechnete Isofläche **(b)** und einen vertikalen **(c)** und horizontalen **(d)** 2D-Schnitt für einen aus den 10 Kameraansichten tomographisch rekonstruierten instantanen Zustand der Flamme. Die Rekonstruktionen zeigen einen im vertikalen Schnitt ringförmig erscheinenden Flammenkonus, wie er für die Flamme bei diesem Brennertyp zu erwarten ist [38].



**Abbildung 5.11:** (a) Versuchsaufbau für die tomografische Rekonstruktion der Chemilumineszenz einer vorgemischten  $\text{CH}_4/\text{Luft}$ -Flamme eines Cambridge-Sandia-Brenners (SwB5) im EMPI-Labor; (b) berechnete Isofläche sowie (c) vertikale und (d) horizontale 2D-Schnitte [41].

Für die Beurteilung der Rekonstruktionsqualität wurden die mit Hilfe der entwickelten Kamerasonde rekonstruierten Chemilumineszenz-Felder einer turbulenten 20-kW-Flamme des Cambridge-Sandia-Brenners (SwB9) mit den aus simultanen Aufnahmen eines Referenz-Tomographieaufbaus erzeugten Rekonstruktionen verglichen. Der Referenzaufbau besitzt im Vergleich zur Sonde eine ideale Kameraanordnung auf einem Halbkreis und besteht aus 11 Kameras. Die SwB9-Betriebsbedingungen sind definiert als ein innerer vorgemischter  $\text{CH}_4/\text{Luft}$ -Volumenstrom mit 9,3  $\text{m}^3/\text{h}$  und einem Äquivalenzverhältnis  $\phi = 0,89$  in Kombination mit einem äußeren vorgemischten Volumenstrom mit 29,9  $\text{m}^3/\text{h}$  und  $\phi = 2,67$  bei 295 K und atmosphärischen Druckbedingungen. Die Flamme wird von einem Co-Flow aus 19,4  $\text{m}^3/\text{h}$  Luft und 12,9  $\text{m}^3/\text{h}$  Stickstoff eingeschlossen. Die resultierenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten betragen

8,3 m/s für den inneren und 18,7 m/s für den äußeren  $\text{CH}_4$ /Luft-Volumenstrom sowie 0,3 m/s für den Co-Flow. Die SwB9-Flamme wurde in zahlreichen Forschungsprojekten detailliert charakterisiert [38-40] und eignet sich daher hervorragend für Validierungszwecke. **Abbildung 5.12 (a)** zeigt den Versuchsaufbau. Die Kamerasonde wurde horizontal positioniert, sodass der Schnittpunkt der optischen Achsen der Kameras mit der Brennermitte zusammenfällt. Aufgrund von Restriktionen durch die innere Sondenkonstruktion konnten in den Validierungsversuchen zunächst lediglich 9 Kameras eingesetzt werden. Im späteren Projektverlauf konnte durch konstruktive Änderungen mit der geplanten Anzahl von 10 Kameras gearbeitet werden. Der tomografische Referenzaufbau bestand aus 11 CCD-Monochromkameras (Basler acA645-100gm,  $659 \times 494$  Pixel,  $9,9 \mu\text{m}$  Pixelgröße), die am EMPI bereits zahlreichen Versuchen für die Detektion der Flammenemission eingesetzt wurden. Die Basler-Kameras wurden mit 12 mm-Objektiven (Kowa LM12JC) ausgestattet, die Blendenöffnung betrug  $f/1.4$ . Für die Detektion der  $\text{CH}^*$ -Chemilumineszenz wurden Bandpassfilter (IDEX / Semrock) mit einer zentralen Wellenlänge von 433 nm und einer Halbwertsbreite von 24 nm verwendet. Die Basler Kameras wurden auf der Kamerasonde in einer halbkreisförmigen Anordnung auf dem Sondengehäuse befestigt und für die Beobachtung der Flamme leicht nach unten geneigt. Da die Sondenoptik für die größerskaligen Ofenraumfeuerungen optimiert wurde, fiel die Auflösung der SwB9-Flamme in den Aufnahmen entsprechend geringer aus. Das Basler-Referenzsystem ermöglichte aufgrund der optischen Charakteristik eine deutlich höhere Auflösung der Flamme und beinhaltet zudem zwei zusätzliche Kameras, sodass mit diesem System auch eine deutlich höhere Qualität der Rekonstruktion zu erwarten war. Das damit ermittelte 3D-Feld eignete sich daher für die Validierung als Referenz-Chemilumineszenz-Feld bzw. als experimentell ermitteltes Quasi-Ground-Truth Feld (vgl. **Abbildung 3.5**). Beide Kamerasysteme wurden simultan ausgelöst. Die Bilder wurden mit einer Belichtungszeit von  $600 \mu\text{s}$  aufgenommen, die einen guten Kompromiss zwischen einer geringen Bewegungsunschärfe und einem akzeptablen Signal-Rausch-Verhältnis des  $\text{CH}^*$ -Chemilumineszenz-Signals darstellt.



*Abbildung 5.12: (a) Experimenteller Vergleich zwischen der entwickelten Kamerasonde und einem Referenzsystem (geneigte Kameras) für die tomographische Rekonstruktion einer turbulenten Cambridge-Sandia-Flamme. (b) Exemplarische Einzelaufnahme der Referenzsystems und (c) der Sonde.*

**Abbildung 5.13** zeigt die rekonstruierten instantanen 3D-Felder der  $\text{CH}^*$ -Chemilumineszenz, die mit beiden Versuchsanordnungen gewonnen wurden im Vergleich. Dazu wurden Isoflächen bei 30 % der

Maximalintensität sowie vertikale ( $y = 0$  mm) und horizontale ( $z = 25$  mm) 2D-Schnitte erzeugt. Die Felder sind zu Visualisierungszwecken auf die Flammenregion beschnitten. Die Rekonstruktionen weisen bei qualitativer Betrachtung eine deutliche Ähnlichkeit der Form, Lage und Struktur auf. Die Ähnlichkeit stellt sich durch einen L2-Norm-Fehlerabstand von  $\epsilon = 0,42$ , einen Person-Korrelationskoeffizienten von  $\rho = 0,91$  sowie einen strukturellen Ähnlichkeitsindex SSIM = 0,91 auch quantitativ dar. Größere Flammenstrukturen werden in den Rekonstruktionen abgebildet. Die mit der Kamerasonde erhaltenen Ergebnisse weisen ein geringfügig schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis und mehr Rekonstruktionsartefakte auf (z. B. mehr Störlinien in den horizontalen Schnitten), was sich auf die niedrigere Auflösung und Kameraanzahl zurückführen lässt. Durch ein geeignetes Post-Processing lässt sich allerdings auch im Falle eines stärkeren Bildrauschens der Einfluss auf die tomographische Rekonstruktion noch deutlich verringern. Das dazu in den Ofenversuchen eingesetzte Verfahren wird unter **7.1** näher erläutert.

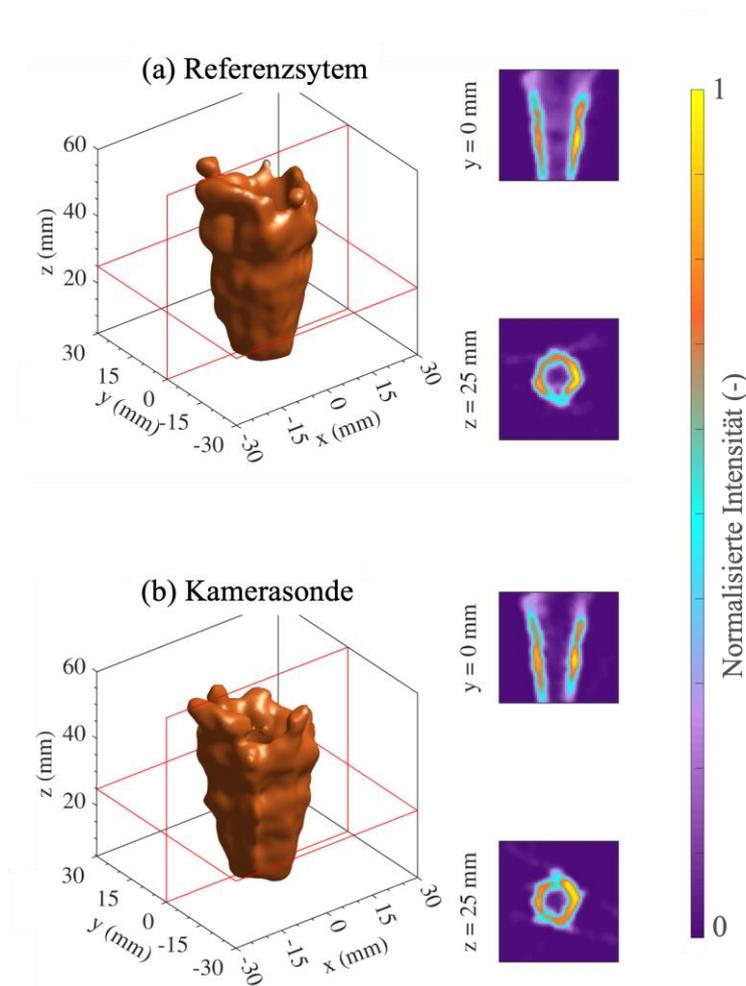
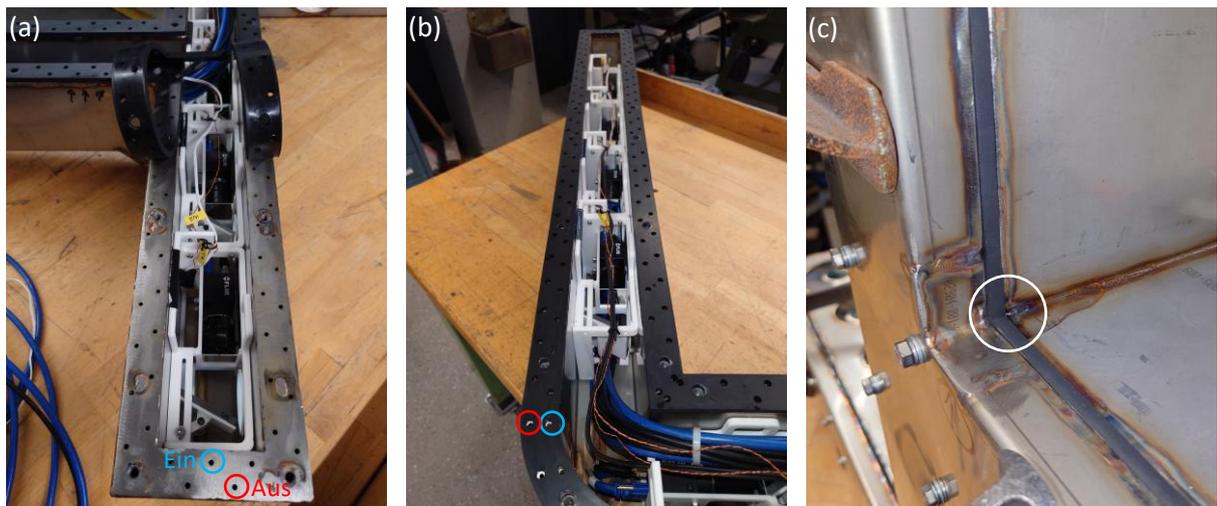


Abbildung 5.13: 3D-Rekonstruktionen der  $CH^*$ -Chemilumineszenz einer turbulenten SwB9-Flamme mit Hilfe (a) des Referenzsystems und (b) der Kamerasonde sowie zugehörige horizontale und vertikale 2D-Schnitte im Vergleich.

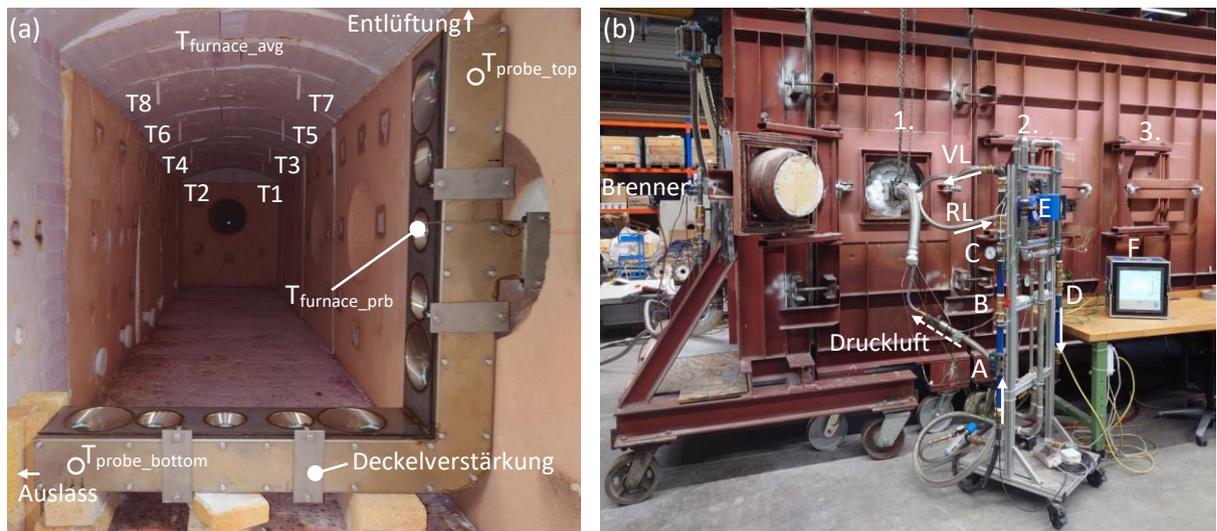
## 6 Erprobung der CTC an Feuerungen industriellen Maßstabs

### 6.1 Erprobung des Kühlmoduls

Vor der Integration der Optik und Kameratechnik wurde der Kühlkörper zunächst mit 1 bar Wasserdruck (statisch) abgedrückt. Das Dichtkonzept mit einer umlaufenden EPDM-Dichtung zwischen dem Gehäuse und dem Deckel (**Abbildung 6.1 (a) und (b)**) erwies sich dabei im Hinblick auf den korrekten Sitz der Dichtung sowie die Montage des Deckels und die Anzugsmomente der Befestigungsschrauben als empfindlich.



**Abbildung 6.1:** Erprobung der Wasserkühlung und des Dichtkonzepts. (a), (b) Umlaufende EPDM-Dichtung der Deckelkonstruktion mit Bohrungen für den Kühlwasservor- (rot) und -rücklauf (blau); (c) Undichtigkeit am Deckel während des Drucktests.



**Abbildung 6.2:** (a) Kamerasonde im „Roten“-Ofen mit Deckenthermoelementen (T9 – T12 nicht im Bild) und sondennahe Temperaturmessstelle. (b) Versuchsaufbau zur Erprobung der Wasserkühlung (A: Durchflussmesser, B: Absperrventil, C: Manometer, D: Drosselventil, VL: Vorlauf, RL: Rücklauf, E: Durchflussmesser Druckluft, F: Datenlogger).

Insbesondere an den Ecken und Positionen zwischen den Deckelverschraubungen traten vereinzelt, sowohl innen als auch außen, kleinere Leckagen auf (**Abbildung 6.1 (c)**). Durch eine Verstärkung der

Deckelkonstruktion an den kritischen Positionen (**Abbildung 6.2 (a)**) und einen optimierten Montagevorgang mit definierten Schraubenanzugsmomenten konnte eine akzeptable Dichtigkeit bis 1 bar Überdruck über einen Zeitraum von 24 Stunden gewährleistet werden. Zur vollständigen Entlüftung des Kühlkörpers wurden zwei Öffnungen mit Klemmringverschraubungen an den Enden der beiden Sondenschenkel vorgesehen (**Abbildung 6.2 (a)**), sodass je nach Position im Ofen, siehe **5.2**, die Entlüftung an der höchstgelegenen Fläche während des Befüllvorgangs erfolgen konnte. Die zweite, untere Verschraubung ermöglicht das Entleeren des Kühlkörpers mit Hilfe eines Ablaufschlauches vor dem Entfernen der Sonde aus dem Ofen.

In Vorversuchen am „Roten“-Ofen wurde die Leistungsfähigkeit des Kühlkörpers erprobt, den Versuchsaufbau zeigt **Abbildung 6.2**. Die Versuche erfolgten mit dem für Fall 1 vorgesehenen nicht-vormischenden Drallbrenner mit einer Nennleistung von 160 kW. Der Kühlkörper wurde dazu mit den vorgesehenen Calflex-Wärmeschutzgläsern sowie mit zwei Temperaturmessstellen im Inneren ( $T_{\text{probe\_bottom}}$ ,  $T_{\text{probe\_top}}$ ), an Kameraposition 1 und 10 (**Abbildung 6.2 (a)**, vgl. **5.2**), ausgestattet. Der Kühlwasservolumenstrom wurde in der Zuleitung zur Sonde mittels Ultraschallmessung (Keyence, FD-H32) sowie die Kühlwasserein- und -auslasstemperaturen in der Zuleitung bzw. im Rücklauf bestimmt. Die Temperatur der Ofenraumtemperatur wurde mit Hilfe von 12 integrierten Deckenthermoelementen bestimmt und kontinuierlich eine mittlere Ofenraumtemperatur über alle Messwerte berechnet. Zusätzlich erfolgte eine Messung der Atmosphärentemperatur in unmittelbarer Sondenumgebung seitlich der Kameraöffnung von Position 3 (**Abbildung 6.2 (a)**, vgl. **5.2**). In Feuerungsversuchen wurde die Leistungsfähigkeit des Kühlkörpers bis zu einer mittleren Ofenraumtemperatur von 500 °C untersucht. Es erfolgte eine kontinuierliche Feuerung über ca. 6,5 Stunden unter schrittweiser Erhöhung der Brennerleistung. Der Kühlwasserdurchfluss durch die Sonde wurde auf 30 l/min eingestellt sowie über ein Drosselventil am Austritt ein leichter Überdruck von 0,7 bar. Durch den Kühlwasserüberdruck wurde sichergestellt, dass nach dem Entlüften der Sonde keine Luft aus dem Rücklauf in das System zurück gelangen konnte und der Kühlkörper während der Versuche vollständig mit Wasser gefüllt blieb. Der Innenbereich der Sonde wurde über den Anschlussarm mit 30 m<sup>3</sup>/h Druckluft zur Spülung der Fenster beaufschlagt. Ein Teil der Druckluft strömt dabei über den Anschlussarm ab und sorgt für die Kühlung der Kabeldurchführung. Die aufgezeichneten Temperaturen sind in **Abbildung 6.3** über die Versuchsdauer dargestellt. Die Kühlwassertemperatur im Rücklauf lag etwa 6 °C über Einlauftemperatur bei einer mittleren Ofenraumtemperatur von 500 °C. An der Messtelle unmittelbar am Kühlkörper (**Abbildung 6.2 (a)**) wurden etwa 440 °C ( $T_{\text{furnace\_prb}}$ ) erreicht. Die Temperaturen im Inneren der Sonde ( $T_{\text{probe\_bottom}}$ ,  $T_{\text{probe\_top}}$ ) erreichten im Maximum 26 °C. Die obere zulässige Betriebstemperatur der Kamertechnik von 50 °C wurde somit im Inneren der Sonde deutlich unterschritten. **Abbildung 6.4** zeigt die Verläufe der Brennerleistung und die aus der Differenz von Wasserein- und -austrittstemperatur berechnete Kühlleistung der Sonde. Bei einer mittleren Ofenraumtemperatur von 500 °C betrug die Kühlleistung 12 kW. Somit wurden in diesem Betriebszustand ca. 6 % der eingebrachten thermischen Leistung über den Kühlkörper abgeführt, was einen akzeptablen Verlust darstellt, der auf die kompakte Bauweise mit einer geringen Oberfläche zurückgeführt werden kann. Für den Einsatz im Hochtemperaturbereich besteht die Möglichkeit durch das Aufbringen einer Isolierung, z. B. einer Feuerfestfasermatte, auf die Edelstahloberfläche, die Wärmebelastung und somit die Verluste über den Kühlkörper weiter zu

verringern. Zudem können der Kühlwasser- und Spülluftdurchsatz weiter erhöht werden. Die Grenze der Leistungsfähigkeit des Kühlkörpers wurde somit in den Versuchen nicht vollständig ausgeschöpft.

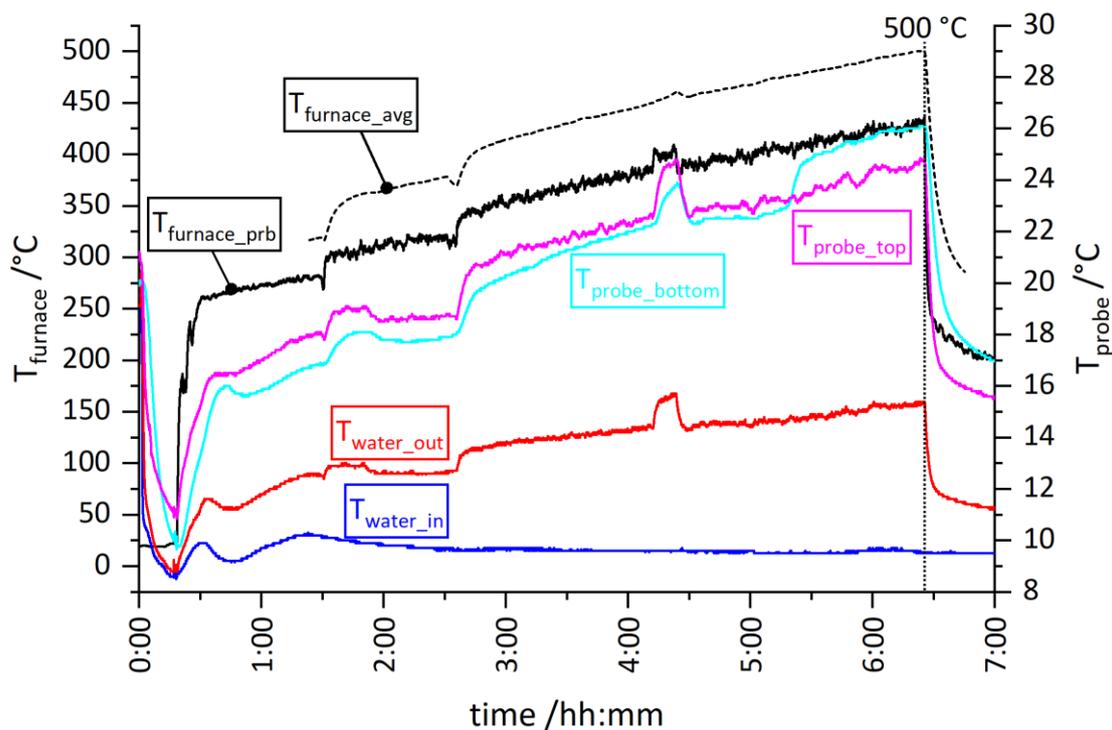


Abbildung 6.3: Gemessene Temperaturverläufe während der Erprobung des Kühlkörpers bis zu einer mittleren Ofenraumtemperatur von 500 °C.

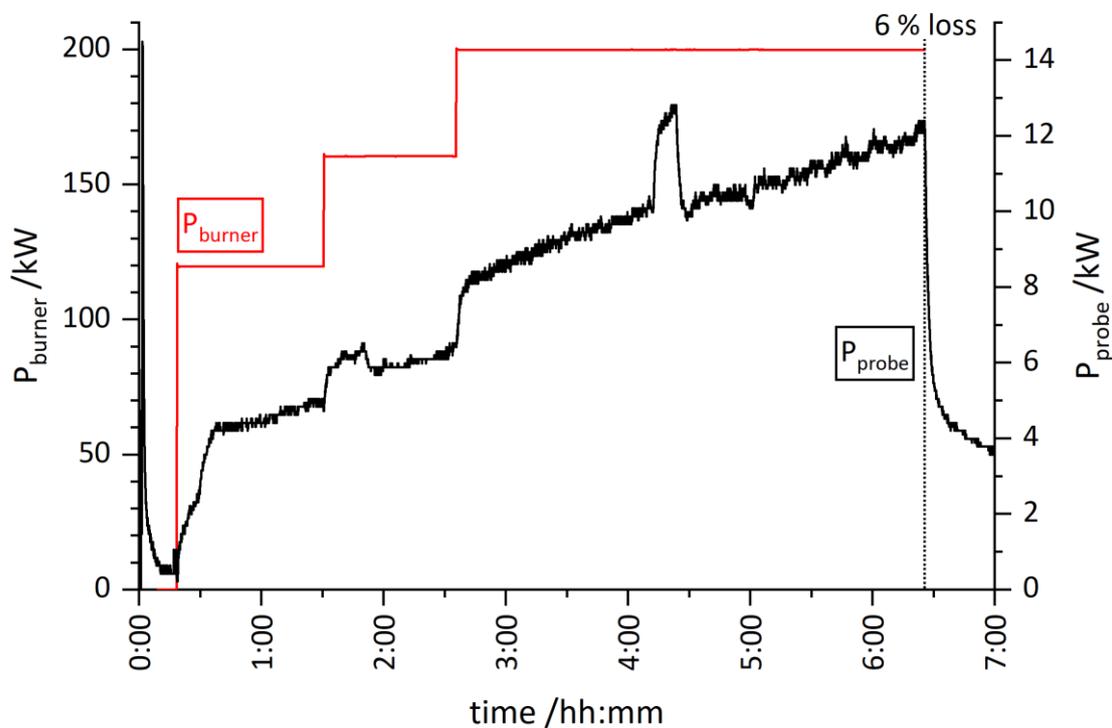


Abbildung 6.4: Brennerleistung und ermittelte Kühlleistung der Sonde aufgetragen über die Versuchsdauer.

Aufgrund der mit dem Dichtungskonzept gesammelten Erfahrungen wurde von einer höheren thermischen Belastung in den Öfen abgesehen und die Einsatztemperatur aus Sicherheitsgründen auf maximal

500 °C begrenzt. Der Einsatz bei deutlich höheren Umgebungstemperaturen kann zukünftig durch eine Überarbeitung der Deckelkonstruktion z. B. in Form von zwei separaten, in sich geschlossenen Kühlkörpern (Gehäuse und Deckel) und den Verzicht auf die umlaufende EPDM-Dichtung für das Kühlwasser ermöglicht werden. Der Spülluftstrom, der ebenfalls zur Kühlung der optischen und elektronischen Komponenten beiträgt und über die Fensterberandung abströmt, zeigte sich teilweise als sehr gering und ungleichmäßig über den Fensterumfang, sodass auch hier noch Optimierungspotential besteht und ggf. durch den Einsatz von Dichtringen mit eingelassenen Luftkanälen ein definiertes Ausströmen gewährleistet werden kann.

## 6.2 Erprobung des Mehrkameranystems im Versuchsofen bis 160 kW – Fall 1

Die erste Erprobung der Kamerasonde in der Ofenumgebung erfolgte im „Nassheuer“-Versuchsofen des GWI an einem nicht-vormischenden Hochgeschwindigkeits-Drallbrenner mit 160 kW Nennleistung. Die Versuche erfolgten mit Erdgas, die Verbrennungsluft wurde über ein Gebläse bereitgestellt. Der Versuchsaufbau ist in **Abbildung 6.5** dargestellt. Das Ofenfenster wurde nach der Integration der Sonde mit feuerfester Faser zugestellt, um den Wärmeaustrag bei geöffneter Klappe zu minimieren. Der Kühlwasserdurchfluss durch die Sonde wurde auf ca. 20 l/min und der Spülluftvolumenstrom auf ca. 70 m<sup>3</sup>/h eingestellt. Die Kühlwasserein- und -austrittstemperatur sowie die Temperaturen im Inneren der Sonde wurde mit Hilfe eines Datenloggers aufgezeichnet.



*Abbildung 6.5: Versuchsaufbau für die Erprobung der Kamerasonde im „Nassheuer“-Ofen – Fall 1. A: Kühlwasserdurchflussmesser, B: Druckluftversorgung, C: Temperatur-Logger, D: Pulsgeber, E: Verteilerbox Trigger-Puls, F: PC für Kamerasteuerung und Bilddatenspeicherung.*

Die maximal erreichte mittlere Ofenraumtemperatur betrug während der Feuerungsphasen ca. 400 °C. Die Feuerungsdauer wurde in den ersten Versuchen mit integrierter Optik und Kamertechnik geringgehalten und auf wenige Minuten mit anschließender Abkühlphase beschränkt, um zunächst Erfahrungen mit dem Kamerasystem und dessen Kühlung im inneren der Sonde zu sammeln. Eine Aufnahme von der

integrierten Ofenraumkamera mit Blick von der Ofendecke auf die Kamerasonde während des Brennerbetrieb für den unter **4.1** definierten Fall 1 zeigt **Abbildung 6.6**.



Abbildung 6.6: Kamerasonde im Einsatz an einer nicht-vormischenden Erdgas/Luft-Feuerung bei einer Leistung von 120 kW,  $\lambda = 1,1$  im „Nassheuer“-Ofen. Aufgenommen durch die integrierte Ofenraumkamera – Deckenansicht.

Durch eine Änderung der Brennstoffleistung und des Luftverhältnisses wurden die Strömungsbedingungen und Flammenlängen variiert. Die untersuchten Betriebsbedingungen sind in **Tabelle 6.1** aufgeführt.

Tabelle 6.1: Betriebsbedingungen für die Erprobung am „Nassheuer“-Ofen; Thermische Leistung  $P$ , Luftverhältnis  $\lambda$ , Brennstoffvolumenstrom (Erdgas)  $V_B$ , Luftvolumenstrom  $V_L$ , Reynolds-Zahl (kalte Strömung)  $Re_D$ .

Bez.	P /kW	$\lambda$	$V_B /m^3h^{-1}$	$V_L /m^3h^{-1}$	$Re_D$
NF1	80	1,1	8,0	84,1	37.140
NF2		1,4	8,0	107,0	46.482
NF3	100	1,1	10,0	105,1	46.425
NF4	120	1,1	12,0	126,1	55.710
NF5		1,4	12,0	160,5	69.723
NF6	160	1,1	16,0	168,1	74.280
NF7		1,4	16,0	214,0	92.964

### 6.3 Erprobung des Mehrkamarasystems im Versuchsofen bis 300 kW – Fall 2

Aufgrund der auf 500 °C festgelegten Begrenzung der maximalen Umgebungstemperatur (Erläuterung dazu unter **6.1**) wurde auf den Einsatz der Underport-Feuerung im „Roten“-Ofen verzichtet, da bei dieser auch im Betrieb an der unteren Leistungsgrenze, bei der gerade noch eine stabile Verbrennung etabliert werden kann, in direkter Sondenumgebung ein deutlich höheres Temperaturniveau erreicht wird. Stattdessen wurde der bereits zuvor im Fall 1 eingesetzte nicht-vormischende Hochgeschwindigkeitsbrenner verwendet. Die Ausrichtung des Kamerasystems gegenüber dem Brenner erfolgte analog zu Fall 1, siehe **5.2**. Die Anordnung im „Roten“-Ofen zeigt **Abbildung 6.7**.

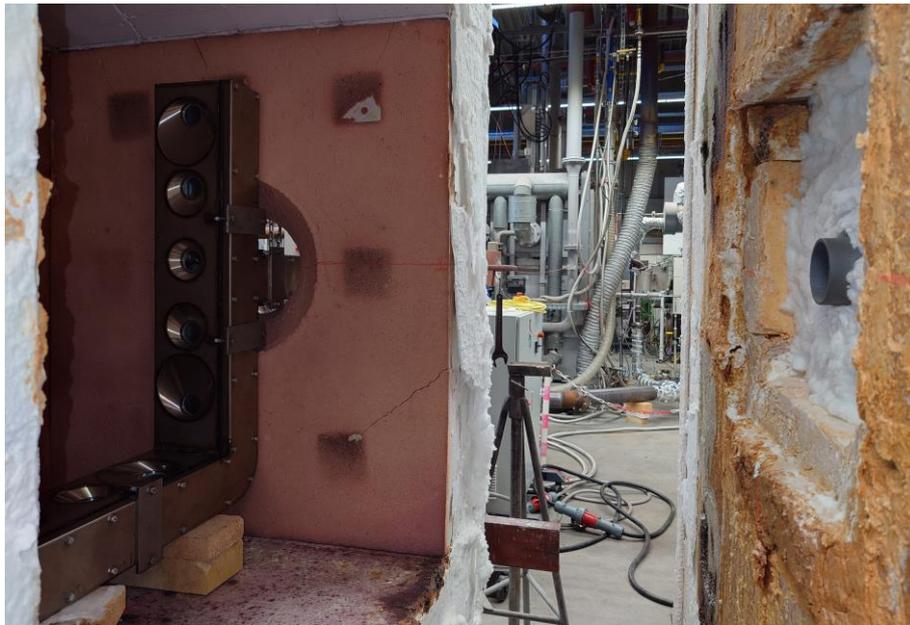


Abbildung 6.7: Innenansicht des „Roten“-Ofens bei geöffneter Stirnwand mit Blick auf die Kamerasonde und die Brennerdüse.

Die Integration der Sonde erfolgte am 1. Ofenfenster, alle weiteren Öffnungen stromabwärts spielten aufgrund der zu erwartenden Flammenlängen bis zu einem Meter für die Erprobung der Sonde keine Rolle. Der Versuchsaufbau am Ofen ist in **Abbildung 6.8** dargestellt.

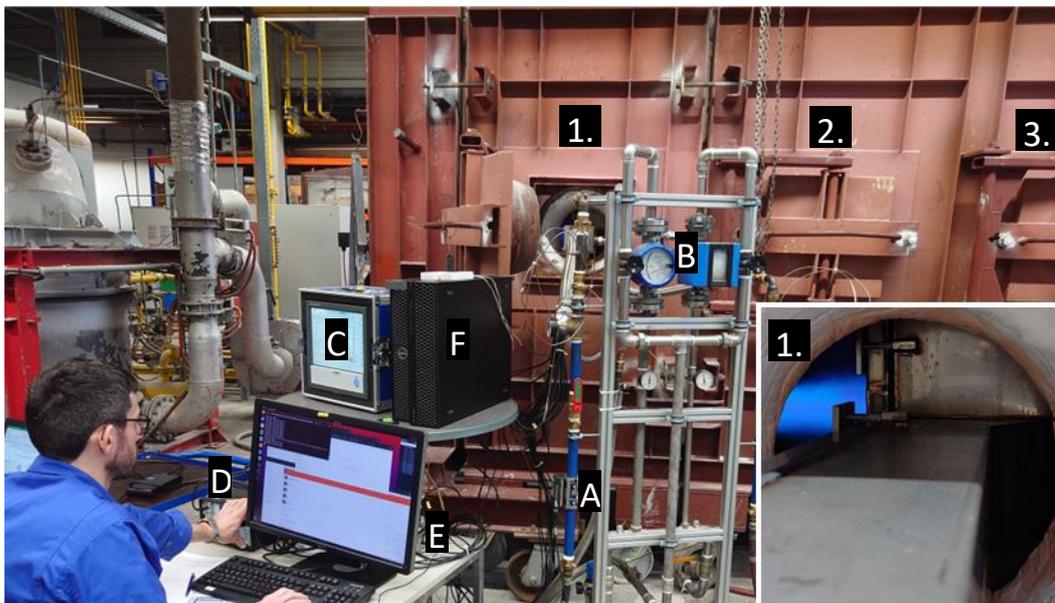


Abbildung 6.8: Versuchsaufbau für die Erprobung der Kamerasonde im „Roten“-Ofen – Fall 2. A: Kühlwasserdurchflussmesser, B: Druckluftversorgung, C: Temperatur-Logger, D: Pulsgeber, E: Verteilerbox Trigger-Puls, F: PC für Kamerasteuerung und Bildatenspeicherung.

In den Feuerungsversuchen wurde die Kamerasonde mit einem Kühlwasservolumenstrom von 30 l/min und einem Spülluftvolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h betrieben. Über ein Drosselventil am Kühlwasseraustritt der Sonde wurde nach dem Entlüften ein Überdruck von 0,7 bar im System gehalten, um das Eindringen von Luft aus dem Rücklauf zu verhindern. Die Kühlwasserein- und -austrittstemperatur sowie die Temperaturen im Inneren der Sonde wurde mit Hilfe eines Datenloggers aufgezeichnet. In **Tabelle 6.2** sind die

untersuchten Betriebsbedingungen aufgeführt. Die Dauer der Feuerungsintervalle wurde derart gewählt, dass eine maximale mittlere Ofenraumtemperatur von 500 °C nicht überschritten wurde.

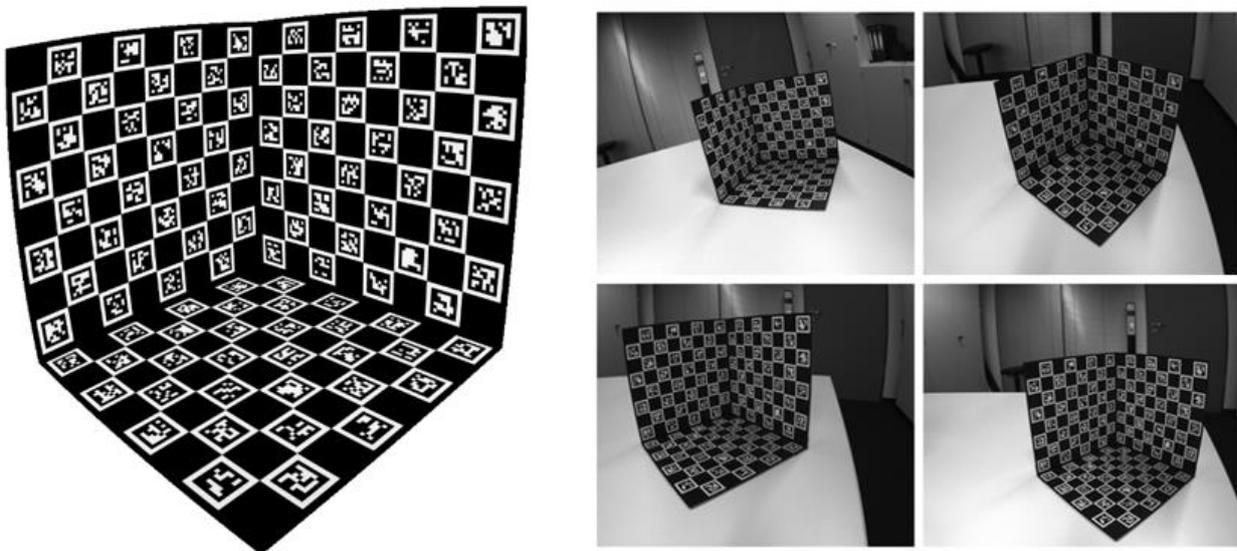
*Tabelle 6.2: Betriebsbedingungen für die Erprobung am „Roten“-Ofen; Thermische Leistung P, Luftverhältnis  $\lambda$ , Brennstoffvolumenstrom (Erdgas)  $V_B$ , Luftvolumenstrom  $V_L$ , Reynolds-Zahl (kalte Strömung)  $Re_D$ .*

<b>Bez.</b>	<b>P /kW</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>V_B /m^3h^{-1}</math></b>	<b><math>V_L /m^3h^{-1}</math></b>	<b><math>Re_D</math></b>
RF1	200	1,1	20,1	210,1	92.850
RF2	240	1,1	24,1	252,2	111.420
RF3	280	1,1	28,1	294,2	129.990
RF4	300	1,1	30,1	315,2	139.275

## 7 Ergebnisse der CTC und Vergleich mit CFD-Simulationen

### 7.1 Kalibration und Bildkorrektur

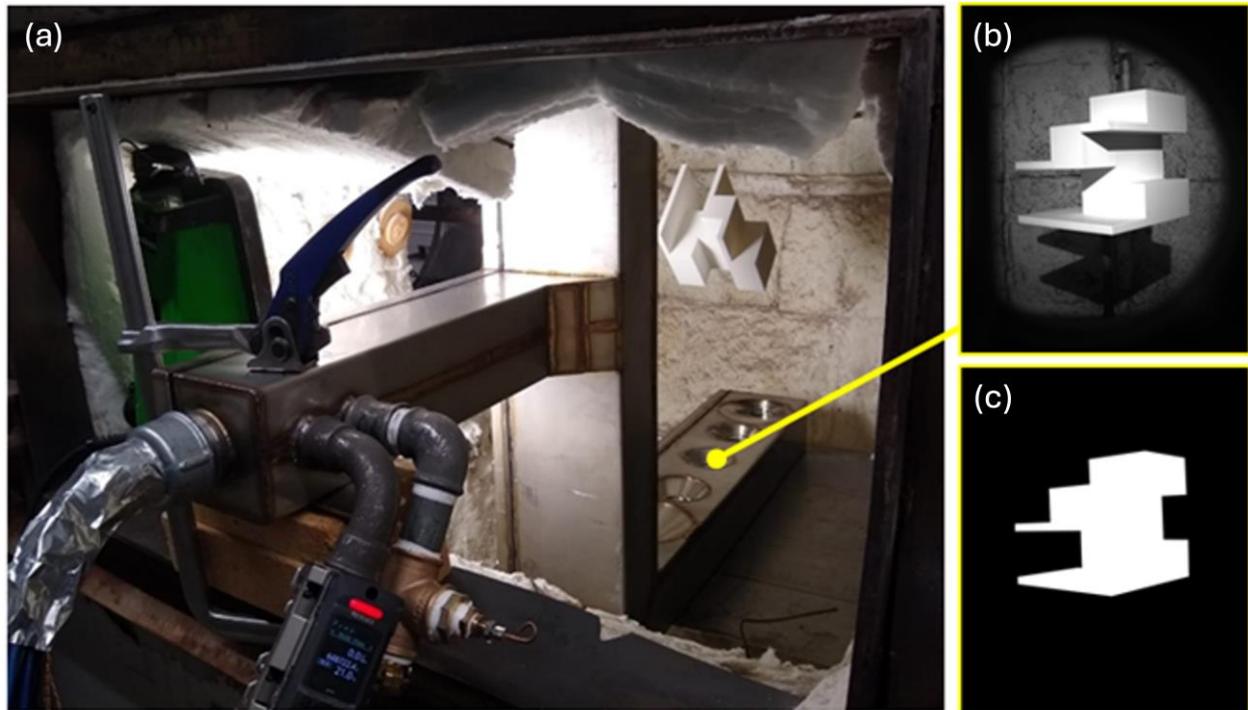
Eine genaue Kamerakalibrierung ist für den tomographischen Inversionsprozess unerlässlich, da sie die Beziehung zwischen dem Punkt im 3-dimensionalen Raum und dem Punkt auf der 2-dimensionalen Bildebene herstellt. Die Kameras der Sonde wurden mit einer internen Kalibrierungssoftware kalibriert, die auf am EMPI entwickelten genetischen Algorithmen basiert [42] und für die Verwendung mit Weitwinkelobjektiven innerhalb dieses Projekts weiterentwickelt wurde [41]. In einem ersten Schritt wurden die intrinsischen Parameter (Brennweite und optisches Zentrum) und die Parameter der Linsenverzerrung (zwei radiale und zwei tangentielle Koeffizienten) berechnet. Zu diesem Zweck wurden mehrere Bilder eines 3D-ChArUco-Platten-Targets verwendet. Der Algorithmus, mit dem die inversen Parameter berechnet werden, verwendet ein Lochkameramodell, das zusätzlich ein Modell für die Linsenverzerrung enthält. Aufnahmen des Targets sind in **Abbildung 7.1** dargestellt. Die berechneten intrinsischen Parameter wurden im Laborversuch zur Rekonstruktion der SwB5-Flamme des Cambridge-Sandia-Brenners erprobt, wie in **5.4** erläutert. Die Rekonstruktionen des Chemilumineszenz-Feldes der Flamme bei Messungen mit Objektiven größerer Brennweite, und damit geringerer Linsenverzerrung, und mit Weitwinkelobjektiven sind vergleichbar (siehe **Abbildung 5.13**), was darauf hindeutet, dass die intrinsischen Kalibrierungsparameter adäquat bestimmt wurden.



*Abbildung 7.1: (Links) Detailliertes Rendering des 3D-ChArUco- Plattentargets, das für die Berechnung der intrinsischen und Linsenverzerrungsparameter verwendet wurde. (Rechts) Exemplarische Aufnahmen des 3D-ChArUco-Plattentargets aus unterschiedlichen Perspektiven [41].*

Die extrinsischen Parameter (Kameraposition in Bezug auf das Weltkoordinatensystem) werden im Anschluss mit Hilfe von Aufnahmen eines speziell entwickelten würfelförmigen 3D-Targets ("MagiCal") kalibriert, das eine Vielzahl von Kanten aufweist [42]. Dieser Kalibrierungsschritt wurde vor jedem Ofenversuch durchgeführt, um in den Rekonstruktionen die exakte Sondenposition innerhalb der

Versuchsumgebung berücksichtigen zu können. Für die Ofenversuche wurde eigens ein Target mit größeren Abmessungen (Kantenlängen 150 x 150 x 150 mm) aus weißem, gut reflektierendem PLA-Kunststoff im 3D-Druckverfahren hergestellt. Die in den Laborversuchen eingesetzten Versionen haben in der Regel deutlich kleinere Abmessungen. Für die Erstellung der Aufnahmen im Ofenraum wurde das Target in der zu beobachtenden Flammenregion positioniert und möglichst homogen mit hellen LED-Lichtquellen ausgeleuchtet, siehe **Abbildung 7.2**. Vor der Ausführung der Kalibrierung werden die Aufnahmen maskiert, um im Hintergrund sichtbare Merkmale zu eliminieren und die Kanten des Targets hervorzuheben (**Abbildung 7.2 (b) und (c)**).



*Abbildung 7.2: (a) Kalibrierung der extrinsischen Parameter mit Hilfe eines 3D-Targets (MagiCal) im „Nassheuer“-Ofen. (b) Exemplarische Aufnahme des 3D-Targets und (c) Ergebnis nach Maskierung.*

Aufgrund des Strahlungshintergrunds in den Öfen sowie auch erhöhtem thermischen Rauschen auf den Kamerasensoren wiesen die Aufnahmen in den Ofenversuchen ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis auf als in den Laborversuchen und wurden daher vor der 3D-Rekonstruktion einem Pre-Processing unterzogen. Die Rohdaten wurden zunächst durch ein  $5 \times 5$  Binning um den Faktor 0,2 verkleinert und auf einen Bereich von  $180 \times 285$  Pixel zugeschnitten. Anschließend wurde eine Hintergrundsubtraktion (Strahlungshintergrund ohne Flamme) und eine Flachfeldkorrektur (FFC) durchgeführt. Die FFC stellt sicher, dass eine mögliche Inhomogenität der Pixelempfindlichkeit, die Transmission der optischen Komponenten und Vignettierungseffekte kompensiert werden. In weiteren Verarbeitungsschritten wird ein Blockmatching und eine 3D-Filterung (BM3D) [43] auf die Aufnahmen angewandt. BM3D gilt als robust und basiert auf einem Wiener-Filter, der Bildrauschen reduziert und gleichzeitig einheitliche Bereiche, Texturen, scharfe Kanten und Singularitäten bewahrt. Bei Silhouetting handelt es sich um einen Maskierungsfiler, der eine binäre Maske durch die Anwendung von Dilatations- und Erodierungsoperationen erstellt wird, wobei der Bereich des Flammenbildes erhalten bleibt, während die Umgebung auf Null gesetzt wird. Dadurch wird der Einfluss von Hintergrundrauschen reduziert, der zu Fehlern im Rekonstruktionsprozess beiträgt.

**Abbildung 7.3** zeigt die Ergebnisse der Pre-Processing-Schritte anhand von Einzelaufnahmen der Kamerasonde von einer 80-kW- (NF2) und 280-kW-Flamme (RF3) im „Nassheuer“- bzw. „Roten“-Ofen. Das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) wird berechnet, indem die durchschnittliche Intensität im Flammenbereich (innerhalb der Silhouette) durch die Standardabweichung des Hintergrundsignals (Dunkelbild) dividiert wird. In beiden Fällen, NF2 und RF3, führt die Anwendung des BM3D-Filters und anschließende Silhouettierung zu einer deutlichen Verbesserung des S/N, wobei die Flammenstrukturen erhalten bleiben. Dies gilt insbesondere für die Flamme RF3, bei der das Originalbild ein besonders schwaches Signal aufweist, da hier nur die Flammenspitze erfasst wird, das zudem aufgrund der vorherrschenden Ofenraumtemperatur signifikant von thermischem Rauschen überlagert wird.

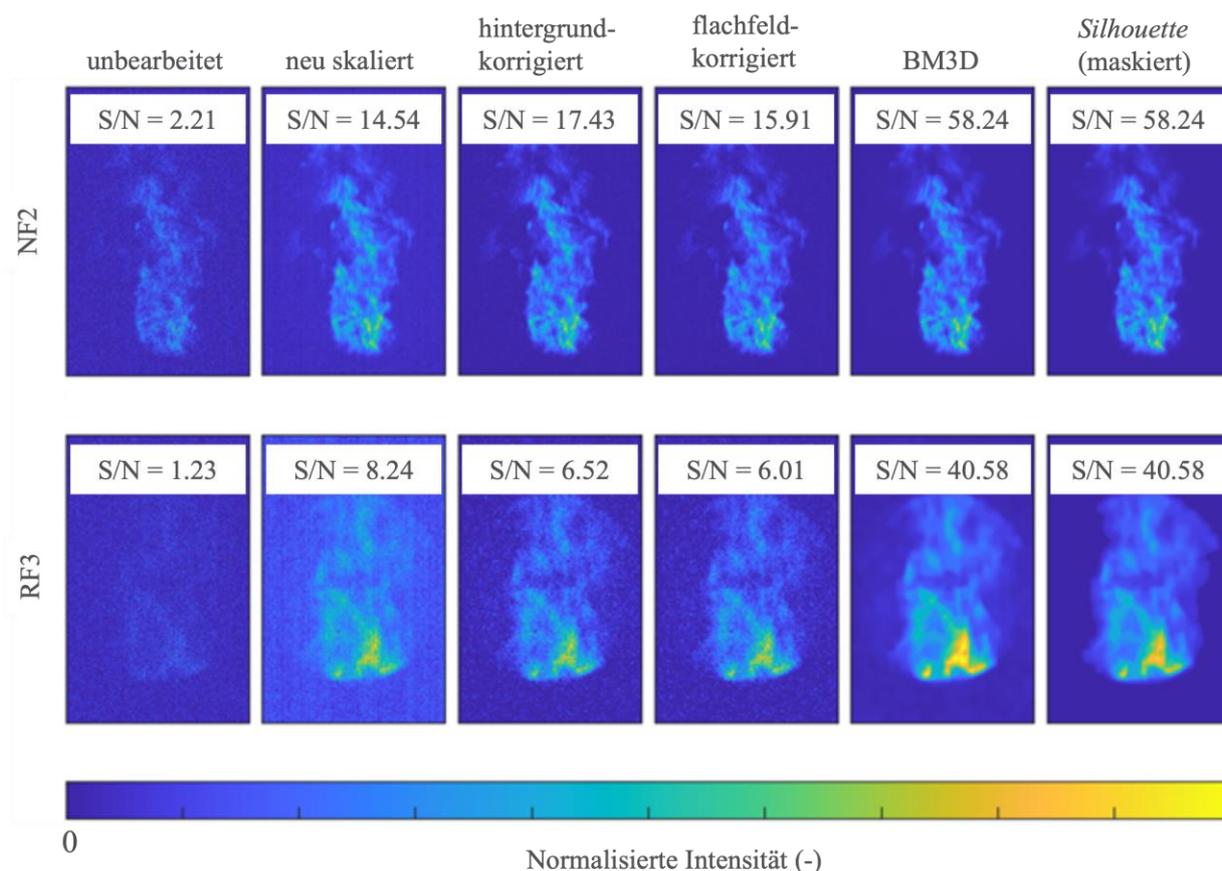


Abbildung 7.3: Pre-Processing-Schritte (von links nach rechts), die auf Einzelaufnahmen (ROI) der Flammen F1 (obere Reihe) und F3 (untere Reihe) angewandt wurden und resultierende Signal-Rausch-Verhältnisse (S/N).

## 7.2 Rekonstruktionsergebnisse und Vergleich mit CFD-Simulationen

Die erste Erprobung der Kamerasonde erfolgte im „Nassheuer“-Ofen (Fall 1). Weitere Versuche bei höheren Brennerleistungen wurden im „Roten“-Ofen durchgeführt (Fall 2). Im ersten Versuch (Fall 1) wurden die Bildgebungsparameter wie Kameraeinstellungen (Belichtungszeit, Verstärkung, Fokus und Sichtfeld), das Kalibrierungsverfahren (Montage und Demontage des 3D-Kalibrierungs-Targets), die Wirksamkeit der Sondenkühlung im Betrieb und andere praktische Aspekte der tomografischen Bildgebung in der realen Umgebung getestet und optimiert. Die Erprobung der Kamerasonde erfolgte bei 7 verschiedenen Betriebsbedingungen (NF1 – NF7), die in **Tabelle 6.1** aufgeführt sind. Der Abstand der Kameraebene von der

Brennerdüse betrug im „Nassheuer“-Ofen 225 mm. Exemplarische Flammenbilder für diese Bedingungen bei Verwendung unterschiedlicher Kamerabelichtungszeiten im Bereich von 120 – 1000  $\mu\text{s}$  sind in **Abbildung 7.4** dargestellt.

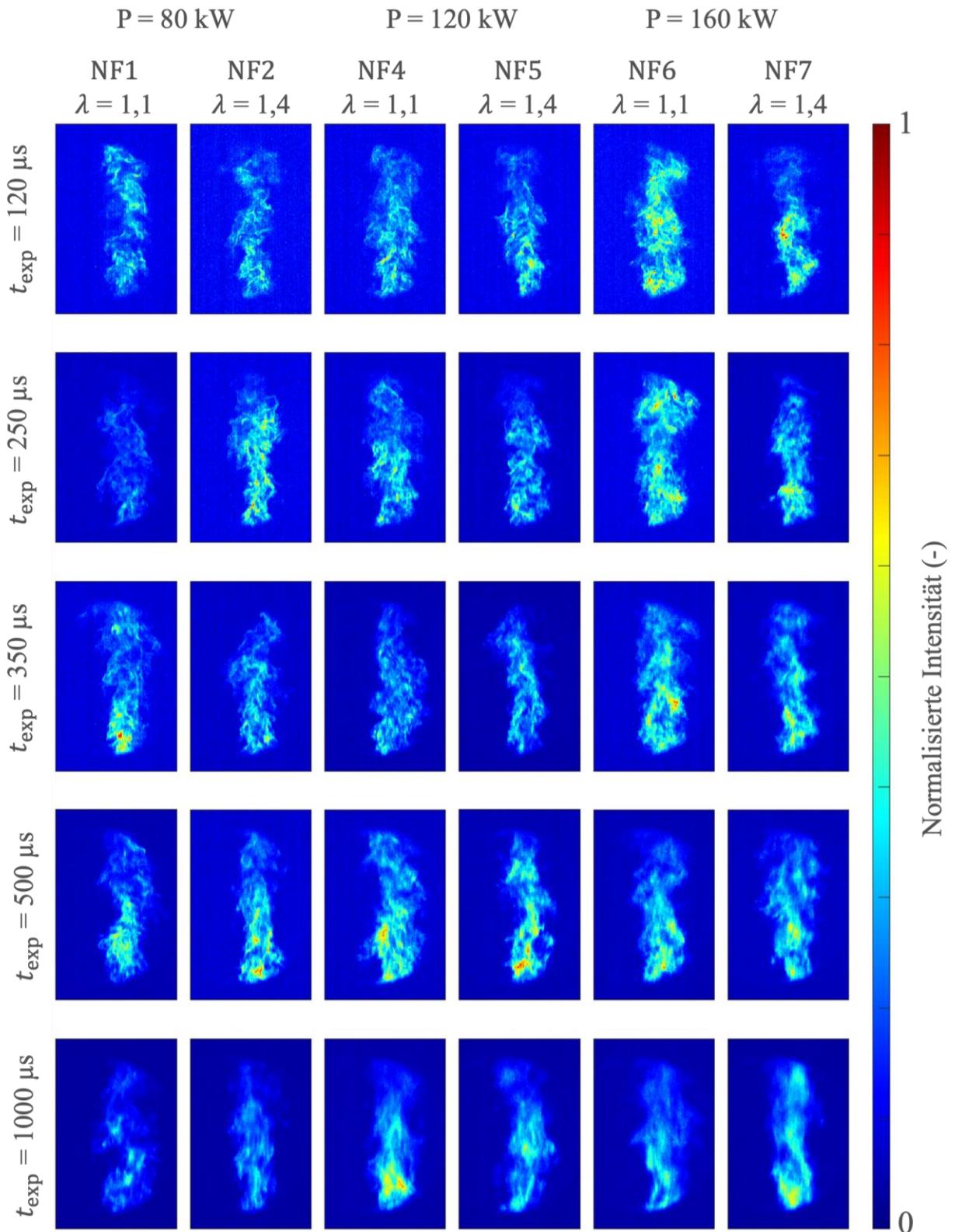
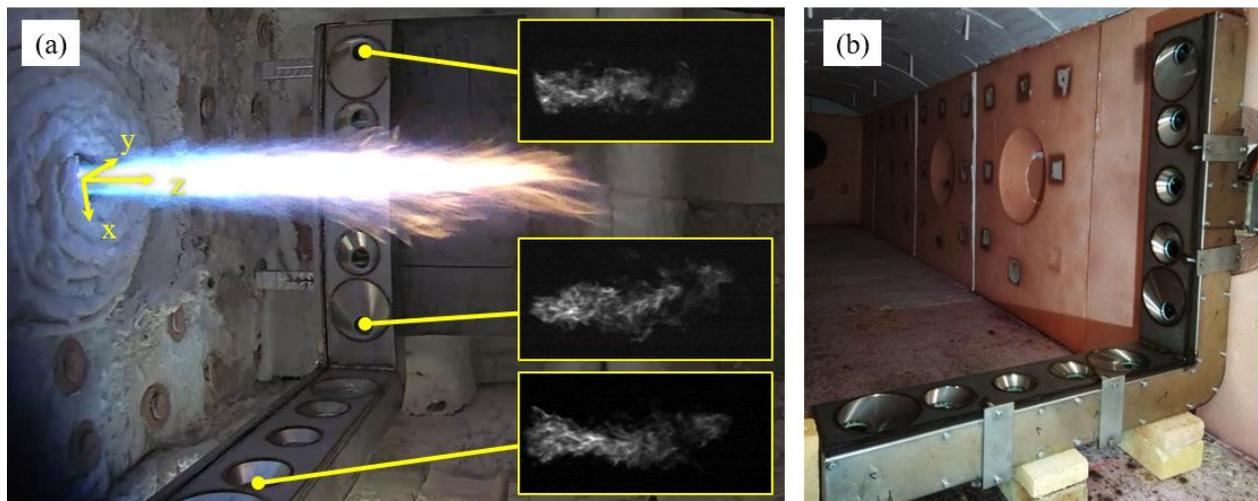


Abbildung 7.4: Exemplarische Flammenbilder für unterschiedliche Betriebsbedingungen im „Nassheuer“-Ofen bei veränderten Belichtungszeiten und konstanter Kameraverstärkung; Intensität normalisiert auf die Maximalwerte.

Die Aufnahmen wiesen eine zunehmende Bewegungsunschärfe mit zunehmender Belichtungszeit auf. Der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei längeren Belichtungszeiten steht ein geringerer Detailgrad an kleinskaligen Flammenstrukturen gegenüber. Die räumliche Ausdehnung der Flamme ist jedoch in allen Fällen erkennbar. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Kamerabelichtungszeiten im Bereich von 400 – 500  $\mu$ s die Flammenstrukturen mit hohem Detailgrad auflöst werden können und gleichzeitig ein akzeptables Signal-Rausch-Verhältnis resultiert. Die Auswahl der Belichtungszeit muss für jede Betriebsbedingung individuell erfolgen und hängt maßgeblich von der Intensität der Chemilumineszenz sowie der in der ROI vorherrschenden Strömungscharakteristik bzw. der Geschwindigkeit der reaktiven Strömung ab.

Weitere Versuche bei höheren Brennerleistungen wurden im „Roten“-Ofen durchgeführt. Die Betriebsbedingungen (RF1 – RF4), sind in **Tabelle 6.2** aufgeführt. Aufgrund von Restriktionen durch die innere Sondenkonstruktion konnten in den Versuchen am „Nassheuer“-Ofen lediglich 9 Kameras eingesetzt werden. In den Versuchen am „Roten“-Ofen konnte nach Anpassung der Konstruktion mit der vollen Anzahl von 10 Kameras gearbeitet werden. **Abbildung 7.5** zeigt die Position der Kamerasonde in den Versuchöfen. Die Kameraebene liegt in beiden Anordnungen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Flamme (z-Achse). Der Abstand der Kameraebene von der Brennerdüse betrug im „Roten“-Ofen 454 mm. Drei exemplarische Aufnahmen einer hochturbulenten Flamme im „Nassheuer“-Ofen aus verschiedenen Kameraperspektiven sind in **Abbildung 7.5 (a)** zu sehen.



*Abbildung 7.5: (a) Die tomographische Sonde im „Nassheuer“-Ofen sowie drei beispielhafte Einzelaufnahmen einer hochturbulenten Flamme. (b) Sonde im „Roten“-Ofen.*

### Ergebnisse der tomographischen 3D-Rekonstruktion

Die tomographischen 3D-Rekonstruktionen wurden mit dem unter **3.3** beschriebenen ERT-Algorithmus durchgeführt. Die Rekonstruktionen basierten auf einer Population von 48 Individuen, die gleichmäßig auf 4 Inseln verteilt sind und sich über  $4 \times 10^5$  Generationen entwickelt haben. Der Rekonstruktionsbereich wurde in  $90 \times 90 \times 150$  Voxel (in x-, y- und z-Richtung) unterteilt. Die resultierende räumliche Auflösung beträgt 2 mm/Voxel. In **Abbildung 7.6** sind die tomographischen 3D-Rekonstruktionen der instantanen CH\*-Chemilumineszenz, der in den beiden Öfen untersuchten Flammen dargestellt. Die Flammen werden durch Isoflächen repräsentiert, die bei 20 % des maximalen Intensitätswerts berechnet wurden.

Die rekonstruierten Intensitätsfelder weisen eine gute Qualität mit vernachlässigbaren Linienartefakten auf. Dies deutet darauf hin, dass die Kalibration und das Pre-Processing wirksam sind. Vertikale und horizontale 2D-Schnitte verdeutlichen die in den 3D-Daten enthaltene innere Geometrie und Struktur der Flammen, die mit einer rein 2-dimensionalen, räumlich integrierenden Detektion nicht erfasst werden kann.

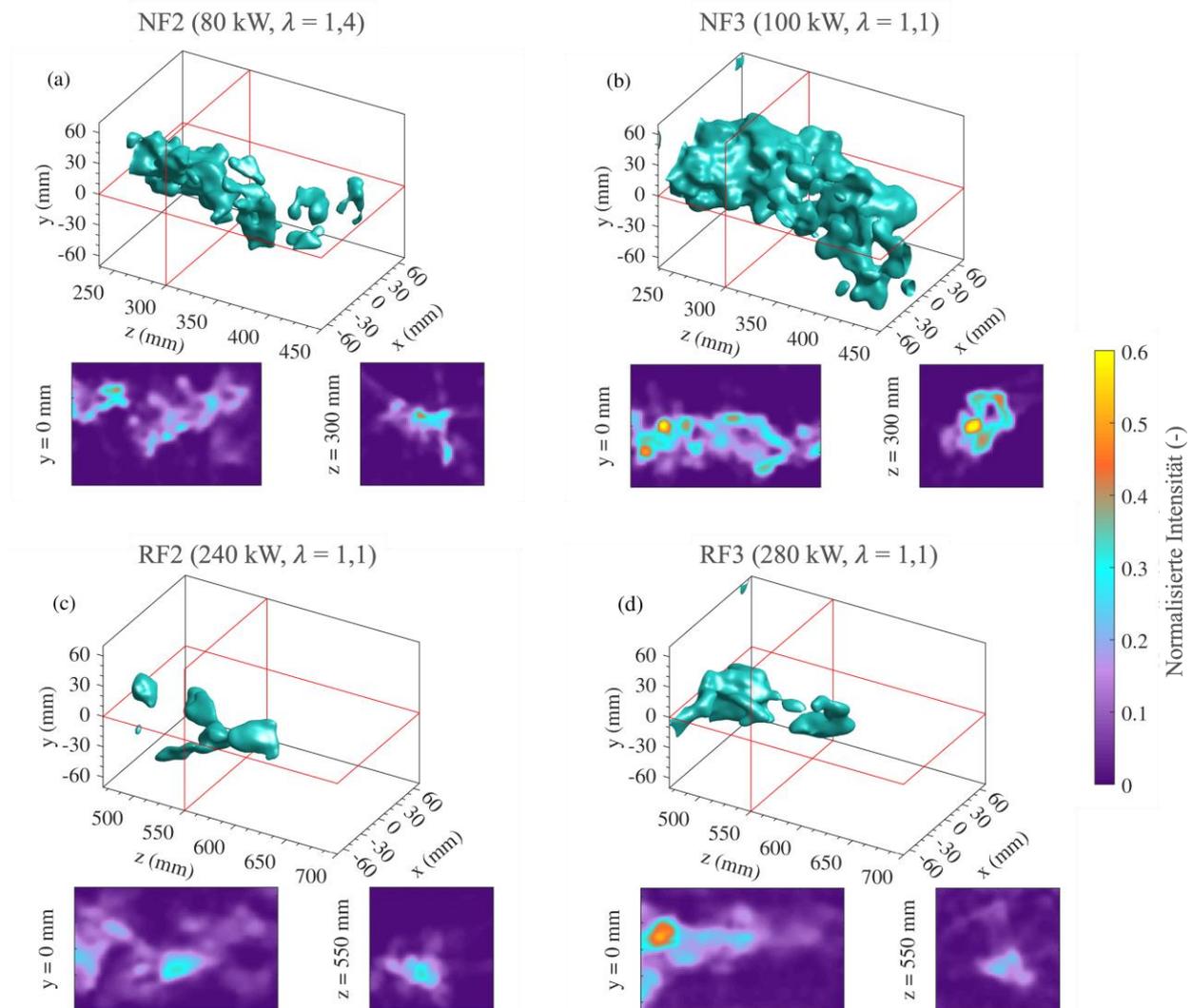


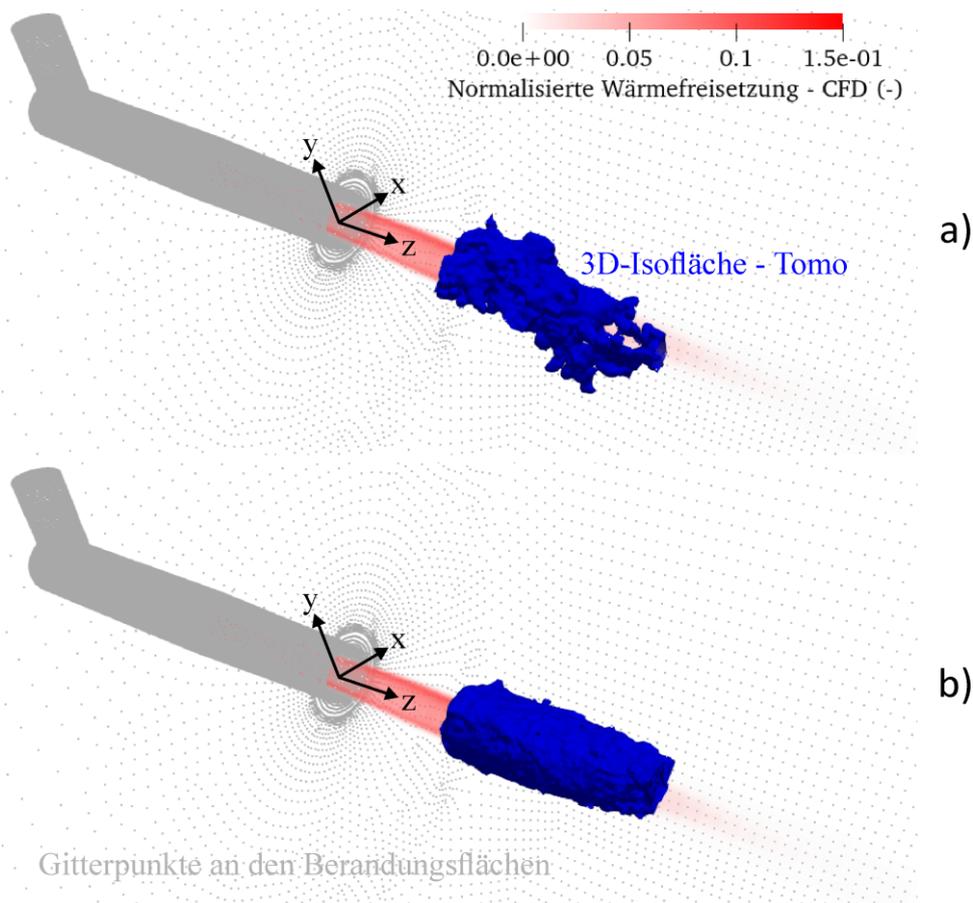
Abbildung 7.6: 3D-Isoflächen (bei 0,2 der maximalen Intensität) und Schnitte der Rekonstruktionen bei den Betriebsbedingungen (a) F1, (b) F2 und (c) F3.

Die rekonstruierten Felder weisen eine gute Qualität mit wenigen Linienartefakten auf. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von kostengünstigen Kamerasensoren die tomografische Abbildung von Flammen industriellen Maßstabs möglich ist und die Abbildungseigenschaften der Sensoren für diesen Zweck geeignet sind. Die 3D-Felder enthüllen strukturelle Details und den inneren Bereich der Flammen, die in den von den Kameras aufgenommenen räumlich integrierenden 2D-Aufnahmen der Chemilumineszenz zunächst verborgen sind. Die Flammen zeigen asymmetrische, hochturbulente Strukturen mit komplexer Faltenbildung. Darüber hinaus ist eine ausgezeichnete Gasmischung zu beobachten, da in den horizontalen Schnitten bereits 225 mm vom Brenneraustritt für alle untersuchten Flammen sehr wenige zentrale Hohlräume, in denen keine Reaktion stattfindet, zu erkennen sind (siehe Schnitte in **Abbildung 7.6**).

Diese Informationen werden erst durch die 3D-Rekonstruktion zugänglich und durch 2D-Schnitte der Intensitätsfelder in verschiedenen Orientierungen sichtbar. Die Flammen mit höherer Leistung weisen sowohl für Fall 1 als auch Fall 2 größere Reaktionsbereiche auf, die aufgrund der größeren Ausprägung der Flammen zu erwarten sind. Dies ist bei den Ergebnissen für Fall 1 deutlicher zu erkennen, bei denen die tomografische Abbildung näher am Brenneraustritt erfolgte. Die Flammenstrukturen sind im NF3-Fall breiter verteilt als im NF2-Fall.

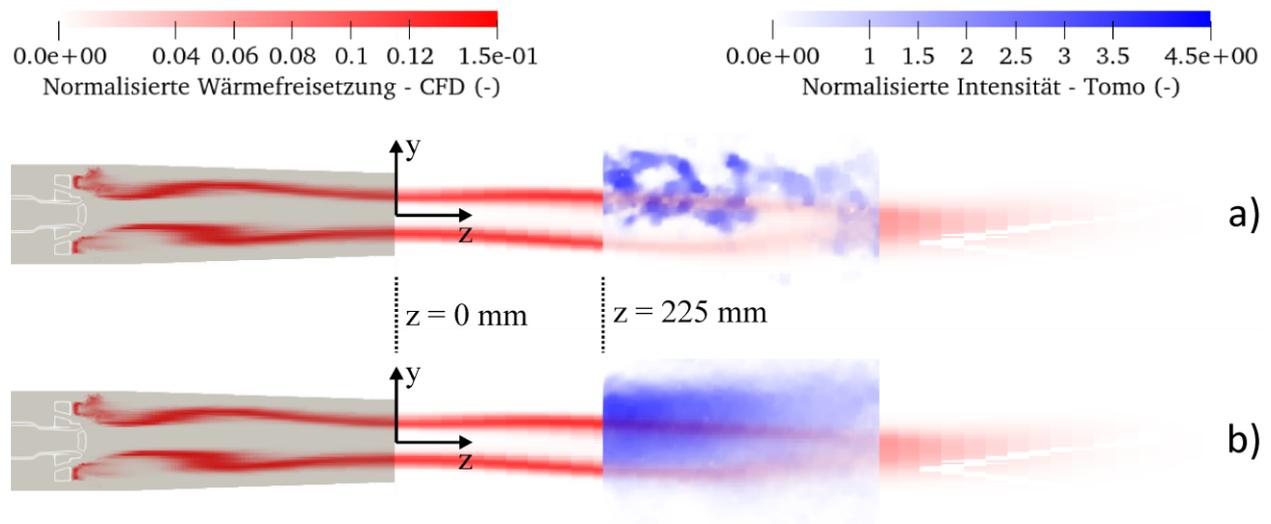
#### Vergleich mit CFD-Daten

Für Fall 1 wurde ein Vergleich zwischen dem mit Hilfe der CTC ermitteltem 3D-Chemilumineszenz-Feld und dem berechnetem Wärmefreisetzungsfeld aus der CFD-Simulation (siehe 4.1) angestellt. Die  $\text{CH}^*$ -Chemilumineszenz eignet sich dabei bei Erdgasflammen als guter Marker für die Wärmefreisetzung [4]. **Abbildung 7.7** zeigt die Überlagerung des Wärmefreisetzungsfeldes der 120 kW Flamme (NF4) mit einem exemplarisch ausgewählten instantanen **a)** sowie zeitlich über 100 Einzelaufnahmen gemittelten **b)** Chemilumineszenz-Feld, bei 100 kW (NF3) bzw. 160 kW (NF6). Die CL-Aufnahmen für NF4 erwiesen sich aufgrund von Verschmutzungen der Sondenfenster als ungeeignet für die tomographische Rekonstruktion und konnten daher für den Vergleich nicht herangezogen werden. Die Chemilumineszenz-Felder werden durch 3D-Isoflächen repräsentiert, die bei 20 % des maximalen Intensitätswertes erzeugt wurden.



**Abbildung 7.7:** Vergleich eines tomographisch rekonstruierten instantanen **a)** (NF3) und gemittelten **b)** (NF6) 3D-Chemilumineszenz-Feldes (blaue Isoflächen) mit dem mittels CFD (RANS) berechneten Feld der Wärmefreisetzung (jeweils NF4).

Der Vergleich der Daten zeigt eine grundsätzlich gute Übereinstimmung von Position und Lage der Reaktionszone. Die im instantanen CL-Feld sichtbare turbulente Struktur der Flamme kann durch die Simulation (stetig, RANS) nicht wiedergegeben werden. Dazu sind rechenaufwendigere Verfahren wie z. B. Large Eddy Simulationen (LES) erforderlich. Zu Verdeutlichung sind in **Abbildung 7.8** horizontale Schnitte durch die 3D-Felder in der Mittelebene dargestellt. Die tomographischen Daten wurden zu Illustrationszwecken mit einer 20-prozentigen Transparenz versehen.



*Abbildung 7.8: Vertikale 2D-Schnitte durch das tomographisch rekonstruierte instantane a) (NF3) und gemittelte b) (NF6) 3D-Chemilumineszenz-Feld sowie das mittels CFD (RANS) berechnete Feld der Wärmefreisetzung (jeweils NF4) im Vergleich.*

In **Abbildung 7.8 a)** wird die turbulente Struktur im Inneren der Flamme erkennbar. Die CL-Intensitätsverteilung erstreckt sich über den Bereich der berechneten Wärmefreisetzung. Die zeitlich gemittelten CL-Daten in **Abbildung 7.8 b)** zeigen, dass die Form der Reaktionszone in dem beobachteten Ausschnitt durch die Simulation nicht exakt wiedergegeben werden kann. Die tomographischen Daten geben somit nicht nur Aufschluss über den momentanen Zustand der Flamme, sondern lassen auch Vergleiche mit Simulationsdaten zu, anhand derer sich die Eignung von zugrundeliegenden Annahmen und Modellen überprüfen lassen.

## 8 Messstrategien für reale industrielle Anwendungen

### Technische Bewertung der Kamerasonde

Mit der entwickelten Kamerasonde konnte ein Werkzeug zur Erprobung und Weiterentwicklung der CTC-Messtechnik und darauf aufbauender Messtechniken (z. B. Background Oriented Schlieren, BOS [44,45]) für den Einsatz in industriellen Hochtemperatur-Prozessen geschaffen werden. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der CTC 3-dimensionale orts aufgelöste Daten von instantanen Zuständen der Flamme in Hochtemperaturfeuerungen gewonnen werden können. Aus der Entwicklung und Erprobung der Sonde ergaben sich folgende technische Problemstellungen:

- Um den Wärmeverlust aus dem Ofen über den Kühlkörper weiter zu verringern, sollte eine Isolierung der Kühlkörperoberfläche mit Feuerfestmaterial erfolgen.
- Das Deckelkonzept des Kühlkörpers mit (EPDM)-Dichtungen erwies sich als anfällig für Leckagen. Für den Einsatz bei Temperaturen  $> 500\text{ °C}$  sollte die Deckelkonstruktion angepasst und auf eine umlaufende Dichtung verzichtet werden.
- Partikelablagerungen speziell von Feuerfestmaterialien auf den Fenstern: Eine Optimierung der Fensterspülung mit definiertem Luftaustritt über den Umfang ist erforderlich z. B. mit Hilfe von Fensterdichtringen mit eingelassenen Luftkanälen.
- Der Einsatz von Umlenkspiegeln im optischen Strahlengang ermöglichte eine kompakte Bauweise der Sonde und minimierte das Einwirken direkter Wärmestrahlung auf die Kameras, gestaltete allerdings die Auslegung und Justage der Optiken deutlich schwieriger und resultierte in Einbußen bei der realisierbaren Größe des Sichtfeldes.
- Erwärmung der Kamerasensoren und Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis: Durch eine optimierte Luftspülung des Sondeninneren sollte einem Wärmestau an der Elektronik entgegengewirkt werden, um thermisches Rauschen auf den Bildsensoren zu verringern.
- Durch Einsatz von (Calflex)-Wärmeschutzgläsern konnte das Eindringen von Wärmestrahlung in das Sondeninnere effektiv verringert werden. Die Gläser eignen sich aufgrund ihrer Transmissionscharakteristik allerdings nur für die Detektion im sichtbaren Wellenlängenbereich und nicht für den UV-Bereich.
- Die Kameraaufnahmen beinhalten im Vergleich zu den Laborbedingungen ein deutlich stärkeres Rauschsignal. Dies erfordert ein Pre-Processing der Aufnahmen, bevor die tomographischen Algorithmen zur Anwendung kommen können.
- Das Verfahren zur Kamerakalibrierung basiert auf der Erkennung der Kanten eines 3D-Targets. Strukturelle Details an den Wänden hinter dem abgebildeten Objekt erschweren die Erkennung. Um den Hintergrund zu entfernen und die Target-Kanten deutlicher sichtbar zu machen, war die Implementierung eines Maskierungsverfahrens erforderlich.

### Bewertung des Messtrategie im Hinblick auf reale industrielle Anwendungen

Im Hinblick auf den Einsatz von CTC in realen industriellen Anwendungen ist die entwickelte Messtrategie mit der gewählten L-förmigen Anordnung der Sensoren zielführend, da diese sich zur Integration in Decken- oder Seitenwände von Öfen eignet. In realen Anwendungen käme dazu der Einsatz von Einzelsensoren in Kombination mit bereits verfügbarerer Sondentechnik [46-48] mit Wasserkühlung und Fensterspülung in Frage.

### Handlungsempfehlungen

Der Umsetzung an realen Anlagen sollte eine detaillierte Auslegung und Analyse mit Hilfe von CFD-Simulationen und Phantomstudien vorangehen. Zur Weiterentwicklung der Messtechnik können Phantomstudien für beispielhafte Anlagen beitragen, in denen die Detektionsanordnungen zunächst theoretisch anhand von Flammenphantomen aus der CFD untersucht und geeignete Parameter für die Optik und Sensoren gefunden werden können. Die Studien dienen als Basis für die Auswahl geeigneter Sensoren und die Auslegung der Optik. Zudem ist die Weiterentwicklung der tomographischen Algorithmen notwendig um z. B. Bildrauschen, vor allem bei schwachen Flammensignalen oder ausgeprägtem Strahlungshintergrund entgegenzuwirken. Im Hinblick auf die Umsetzung an mit regenerativen Brennstoffen wie Wasserstoff oder Ammoniak befeuerten Anlagen, sollte der Einsatz neuentwickelter UV-sensitiver CMOS-Bildsensoren [49] in Erwägung gezogen werden, da die Detektion im sichtbaren Wellenlängenbereich schwierig umzusetzen, bzw. und insbesondere im Hochtemperaturbereich nachteilig ist. Aufgrund der zu erwartenden zunehmenden Nachfrage nach UV-sensitiven CMOS-Sensoren aus der Halbleiterindustrie [49], sind zudem weitere Fortentwicklungen und sinkende Marktpreise zu erwarten. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse sollte die Applikation weiterer tomographischer Messtechniken z. B. zur Erfassung der Temperatur mittels BOS [31,44,45] erprobt werden. Die Temperaturverteilung im Ofenraum spielt eine entscheidende Rolle für den Wärmeeintrag in das Gut, aber auch die Bildung von Schadstoffen wie  $\text{NO}_x$ . Insbesondere zur ortaufgelösten Erfassung von problematischen Temperaturspitzen bietet BOS großes Potential [50-53].

## 9 Ausblick

Hersteller von Thermoprozessanlagen, Komponenten und industrieller Brennertechnologien sind größtenteils kleine und mittlere Unternehmen. Auch eine Vielzahl von Betreibern industrieller Thermoprozessanlagen z. B. in der Glasindustrie zählen zu den KMU. Im internationalen Wettbewerb sind diese auf die ständige Entwicklung neuer innovativer Produkte sowie effizienter und wirtschaftlicher Herstellungsverfahren angewiesen. Gerade im Bereich von HT-Anwendungen besitzen die Verfahren lange Betriebs- und Entwicklungszyklen, diese bieten großes Potential in Bezug auf Effizienzsteigerung und die Verbesserung ökologischer Bilanzen. Da für Feuerungen in der Regel Erdgas als fossiler Brennstoff zum Einsatz kommt, gehen ökonomische mit ökologischen Aspekten, hier insbesondere die Reduzierung von THG bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen, einher. Die im Projekt erhaltenen Ergebnisse können nach ihrer Überführung in die Marktreife in der Industrie in großem Maße zur Verbrennungsoptimierung beitragen. Daraus resultieren eine Reduzierung des Brennstoffeinsatzes und der Schadstoffbildung sowie ein optimierter Produktionsprozess, welche wiederum zu einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Die Voraussetzungen für eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse stehen nach heutigem Erkenntnisstand günstig. Steigende Energiepreise und der politische Wille THG-Emissionen zu reduzieren, fördern den Einsatz von modernster Messtechnik in industriellen Großfeuerungen für die Auslegung, die Optimierung und das Monitoring im Betrieb. Darüber erfordern steigende Anforderungen an die Produkte und somit auch an die Herstellungsprozesse von Glas oder auch metallischen Erzeugnissen immer detailliertere Betrachtungen der Thermoprozesse. Es wird angestrebt, im Anschluss an das FuE-Vorhaben schrittweise eine industrielle Umsetzung des Messverfahrens zu realisieren. Nach derzeitigem Stand ist damit zu rechnen, in einem Zeithorizont von ca. 2 Jahren nach Projektabschluss ein marktfähiges Messverfahren entwickeln zu können, mit großem Anschlusspotential für die Entwicklung weiterer auf dem messtechnischen Grundprinzip aufbauender Verfahren z. B. zur Bestimmung Temperaturverteilungen in der Gasphase mittels Schlieren-Tomographie (Background-Oriented-Schlieren, kurz BOS). In diesem Zusammenhang wäre auch die Visualisierung von Mischungsvorgängen (z. B. von Oxidator und Brennstoff) mit Hilfe lumineszenter Salze sowie von Temperaturverteilungen durch den Einsatz thermographischer Phosphore, die in die Gasströmung injiziert werden, denkbar.

## 10 Projektplan

Nachfolgend sind die Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals gemäß Beleg über Beschäftigungszeiten (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans), für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) für die beiden Forschungseinrichtungen aufgeführt.

*Tabelle 10.1: Personaleinsatz im Projektzeitraum, GWI.*

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

	2020	2021	2022	2023	2024	gesamt
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-A	0,5	4,05	3,99	3,21	1,05	12,8
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-B	1,3	7,1	2,03	-	-	10,43
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-C	0,7	4,68	3,91	1,2	-	10,49

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - keine

*Tabelle 10.2: Personaleinsatz im Projektzeitraum, DBI.*

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

	2020	2021	2022	2023	2024	gesamt
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-A	2,91	14,06	3,9	2,03	-	22,9
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-B	-	-	4,9	-	-	4,9

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Es wurde ein Kamera-Kühlmodul im Wert von 23.378,74 € gemäß Einzelfinanzierungsplan beschafft.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - keine

*Tabelle 10.3: Personaleinsatz im Projektzeitraum, EMPI.*

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

	2020	2021	2022	2023	2024	gesamt
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA-A	1	13,62	12,6	1,6	-	28,82

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Es wurde ein Multikamerasystem im Wert von 29.442,84 € gemäß Einzelfinanzierungsplan beschafft.

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - keine

Nachfolgend ist der Projektplan dargestellt. Das Projekt hatte eine Laufzeit von ursprünglich 24 Monaten. Diese wurde kostenneutral auf 41 Monate verlängert (11/2020 bis 03/2024), um das Projekt in vollem Umfang erfolgreich abzuschließen.



## 11 Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen

Forschungsziel	Erzieltes Ergebnis
Entwicklung von tomographischen Algorithmen für die industrielle HT-Anwendung	Ein ERT-Algorithmus wurde für die angestrebte Anwendung optimiert und erfolgreich eingesetzt. Algorithmen zur Bestimmung der Kameraposition und Bildkorrektur wurden implementiert und erfolgreich erprobt.
Entwicklung eines optischen Sondensystems mit 10 Bildsensoren für die Anwendung der CTC in einem HT-Versuchsumfeld bei Temperaturen in der Gasphase von bis zu 1.800 °C und atmosphärischen Druckverhältnissen	Ein wassergekühltes Mehrkamerasystem mit 10 Bildsensoren für den Einsatz in HT-Versuchsöfen wurde entwickelt. Das System wurde für die Detektion der CH*-Chemilumineszenz bei 431 nm optimiert.
Erprobung der CTC-Sonde an einem Hochgeschwindigkeitsbrenner und einer Underport-Feuerung in einem HT-Versuchsöfen und Auswertung von Form-, Lage- und Strukturdaten der Chemilumineszenz (CL)	Das entwickelte Mehrkamerasystem wurde in zwei Versuchsöfen des GWI unter verschiedenen Versuchsbedingungen bei Feuerungsleistungen bis zu 300 kW und Umgebungstemperaturen bis zu 500 °C erfolgreich eingesetzt.
Erprobung des Messverfahrens für die Validierung von CFD-Simulationen (RANS)	Die tomographische Rekonstruktion von Flammen industriellen Maßstabs mittels CTC anhand der CH*-Chemilumineszenz konnte für die untersuchten Feuerungen erfolgreich demonstriert werden.
Erstellung von Messkonzepten für die Anwendung der 3D-Chemilumineszenz-Tomographie in realen industriellen HT-Umgebungen	Anhand der Ergebnisse und Erfahrungen aus der experimentellen Erprobung der CTC wurden Konzepte für die Umsetzung an realen industriellen HT-Umgebungen abgeleitet. Weitere notwendige Entwicklungsschritte für die Umsetzung an realen Anlagen wurden vorgeschlagen.

## 12 Nutzen der Forschungsergebnisse

Durch die umfangreiche Expertise in den Themenbereichen Thermoprozesstechnik und optischer Messtechnik wurde durch die Zusammenarbeit der Forschungsstellen das Ziel des Vorhabens vollständig erreicht und die technische Umsetzbarkeit der CTC in HT-Umgebungen demonstriert. Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben stehen der Entwicklung neuer Lösungen für die Diagnostik in industriellen Verbrennungsprozessen zur Verfügung. Es wurden zahlreichen Maßnahmen zum Transfer der erzielten Ergebnisse in die Wirtschaft vorgenommen.

### Bisherige und im Jahr 2024 geplante Tätigkeiten zum Ergebnistransfer:

*Tabelle 12.1: Durchgeführte Transfermaßnahmen.*

Zeitraum / Termin	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
- Kick-off-Meeting: 16.12.2020 - 1. PbA-Sitzung: 09.12.2021 - 2. PbA-Sitzung: 13.12.2022 - 3. PbA-Sitzung: 26.03.2024	Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Einbeziehung der Industrie in die Forschungsaktivitäten, Ergebnis und Wissensaustausch mit Industrie
Projektbeginn	Website (Steckbrief)	Information einer breiten Öffentlichkeit
Nach Vorliegen erster Ergebnisse	Pressemitteilungen	Bekanntmachung des Forschungsprojekts; Online, Zeitschriften
Jährlich	Tätigkeitsbericht; eigene Publikation, Website	Berichte über öffentlich geförderte Projekte des GWI und DBI
Jährlich	Fachbeirat; GWI, DBI, VDEh, DVGW, HVG-DGG, VDMA, FOGI	Wissenstransfer an Fachpublikum
Jährlich	Veröffentlichung der erzielten Projektergebnisse im Rahmen der Internetpräsenz des GWI und DBI	Schnelle und aktuelle Bekanntmachung der Ergebnisse
Alle 1 - 2 Jahre	Teilnahme an Fachmessen; GAT, E-world, Thermprocess, Aluminium, Glasstec	Wissenstransfer an Fachpublikum
April 2023	11 <sup>th</sup> European Combustion Meeting	Poster und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)
September 2023	31. Deutscher Flammentag	Vortrag und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)

April 2024	14 <sup>th</sup> European Conference on Industrial Boilers and Furnaces	Vortrag und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)
Ende des Projektes	Abschlussbericht	Zusammenfassung der Ergebnisse; Veröffentlichung auf der GWI- und DBI-Homepage

Über das Projekt wurde im Rahmen der jährlichen Tätigkeitsberichte sowie der Internetpräsenzen der beteiligten Forschungsinstitute berichtet. Die Aufsichtsgremien des GWI und des DBI sowie der technische Beirat wurden regelmäßig über das laufende Projekt informiert. Darüber hinaus ist die Bereitstellung des Abschlussberichtes im Downloadbereich der Internetpräsenzen der beteiligten Forschungsinstitute geplant.

### 12.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Die 3D-Daten aus der Tomographie können mit Hilfe moderner Rechenkapazitäten in Echtzeit verarbeitet und zukünftig zum einen für das Online Monitoring von Thermoprozessen eingesetzt und zum anderen für die Validierung von CFD-Simulationen, zukünftig auch LES, im Zuge der Auslegung oder Optimierung dienen. Weiterhin können die Daten zukünftig auch für den Einsatz von selbstlernenden Algorithmen (KI) zur Prozessoptimierung verwendet werden.

Das Verständnis der Interaktion der chemisch-physikalischen Vorgänge bietet ein großes Potential für die Weiterentwicklung und Optimierung von industriellen Gasfeuerungen. Die Etablierung genauerer Validierungswerkzeuge für die CFD-Simulation erlaubt zukünftig eine detailliertere Betrachtung der Verbrennungsvorgänge und eröffnet neue Möglichkeiten Fragestellungen zu Effizienz und Schadstoffentwicklung zu beantworten. Der potenzielle Nutzerkreis umfasst die gesamte Thermoprozessindustrie. Betreiber von Thermoprosessanlagen in allen Branchen sind meist klein- und mittel-ständische Unternehmen, aber auch viele Zulieferbetriebe z. B. Ofenbauer, Brenner- und Komponentenhersteller sind KMU. Vor dem Hintergrund steigender Ansprüche in Bezug auf Effizienz und der Notwendigkeit den Schadstoffausstoß von industriellen Thermoprozessen zu senken, ist eine Verbesserung des Verständnisses der Bildungsvorgänge und der Einflussfaktoren zwingend erforderlich. Dies ist die Grundvoraussetzung für die Weiterentwicklung und den Einsatz detaillierterer mathematischer Modellierungsmethoden in industriellen Anwendungen wie der LES. Damit einhergehend müssen geeignete Messmethoden zur Verfügung gestellt werden, die die Modelle stützen können.

Die Umsetzung der computertomographischen Chemilumineszenz-Detektion erfolgte auf Basis von kostengünstigen industriellen Bildsensoren und einer Datenerfassungslösung mit geringer Komplexität, die dadurch im Vergleich zu gängigen Versuchs- und Messinfrastrukturen, z. B. für die Analyse von Brenngasen oder Verbrennungsabgasen, geringe Investitionskosten erfordert. Auch für die Validierung von CFD-Simulationen im Rahmen der Auslegung oder Optimierung von Thermoprozessen sind die notwendigen Investitionskosten im Vergleich zu bisherigen Methoden als gering, bei ungleich höherem Informationsgehalt. Das Messverfahren kann zukünftig zu einem verbesserten Verständnis der Verbrennungsvorgänge

beitragen und somit eine Steigerung der Effizienz, Reduzierung der Schadstoffemissionen und Senkung der Betriebskosten von Thermoprozessen ermöglichen.

## 12.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

KMU bekommen mit diesem System ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das einerseits eine technische Lösung für eine räumlich aufgelöste Flammvisualisierung bei geringen Investitionskosten bietet und es zum anderen erlaubt Änderungen im Verbrennungsverhalten, z. B. verursacht durch Änderungen der Brenngasbeschaffenheit infolge einer Wasserstoffzumischung in das Erdgasnetz, instantan zu erfassen. Zudem trägt das System gewinnbringend zur Digitalisierung der Produktion bei und ermöglicht unmittelbare Eingriffe in den Thermoprozess zur Verbesserung der Produktqualität bei gleichzeitiger Minderung der THG- und Schadstoffemissionen sowie der Gewährleistung gleichbleibender Betriebszustände. Vor allem im Hinblick auf die aktuelle Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) [54] und die geforderte Dekarbonisierung der Industrie, haben gerade KMU selten die Möglichkeit den immer schneller steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Die vollumfängliche Ausstattung der Anlagen mit Messtechnik zur Prozessoptimierung ist für KMU selten realisierbar. Das hier zu entwickelnde Werkzeug bietet KMU die Möglichkeit Daten direkt aus der Verbrennungszone für die Prozessoptimierung zu erfassen, wogegen bisherige Methoden nur örtlich stark begrenzt Zustände ermitteln können, oder lediglich indirekt Rückschlüsse auf die Zustände in der Reaktionszone zulassen. Aus dem tomographischen Verfahren ergeben sich verbesserte Hinweise auf die optimale Ausrichtung der Flamme im Prozess und für die Ableitung optimierter Betriebspunkte, um mit geringeren Betriebskosten zu operieren. Die technische Komplexität des Lösungsansatzes (Chemilumineszenz) und die zu erwartenden Investitionskosten sind zudem wesentlich geringer als zum Beispiel bei laserbasierten Systemen, die ebenfalls für die Visualisierung der Reaktionszone eingesetzt werden können. Dies macht das Verfahren für KMU im Einsatz innerhalb der Prozessregelung attraktiver und leichter umsetzbar. Nur durch die stetige Optimierung der industriellen Thermoprozesstechnik und dessen Kernbestandteil, der Energieumwandlung mit Hilfe technischer Verbrennung, wird es möglich sein, im internationalen Wettbewerb wirtschaftlich und ökologisch nachhaltig zu produzieren. Darüber hinaus besteht eine hohe Übertragbarkeit für die CTC auf andere industrielle Anwendungsfelder. Neben der Thermoprozesstechnik werden Anwendungspotentiale in den Bereichen der chemischen Verfahrenstechnik (reaktive Fluide, Nanomaterialsynthese) für die Prozessüberwachung und -optimierung gesehen. Darüber hinaus kann ein Wissens- und Technologietransfer in Bezug auf bildgebende Sensorik und Optik auch auf MachineVision-Anwendungen der maschinellen Fertigungstechnik erfolgen.

## 12.3 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Industrielle HT-Prozesse sind nach wie vor auf die technische Verbrennung angewiesen. Sowohl das Bestreben nach einer Steigerung der Effizienz verbunden mit gleichzeitiger Reduzierung der Schadstoffemissionen (z. B.  $\text{NO}_x$ ), als auch der zukünftig vermehrte Einsatz regenerativer Brennstoffe, wie beispielsweise Wasserstoff, als Beitrag zur Dekarbonisierung werden den Einsatz von neuen Messverfahren gerade für sensible Thermoprozesse wie die Glasproduktion fördern. Der Bedarf nach neuen Messverfahren, die detaillierte Betrachtungen der Verbrennungsvorgänge zulassen, wird sowohl für die Überwachung und

Regelung der Prozesse als auch die Validierung von mathematischen Modellen zunehmen. Im Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung der Produktion kann das Messverfahren in intelligente Prozessführungen im Rahmen von Industrie 4.0-Anwendungen eingesetzt werden und weitere Innovationen nach sich ziehen. Die im Laufe des Projektes erzielten Teilergebnisse (z. B. zum Einsatz von Optik und Bildsensoren) können direkt in die industrielle Praxis übertragen werden. Direkte Anwender sind Ofenbauer, Betreiber von Thermoprozessanlagen und Komponentenhersteller (z. B. Brenner und Messgeräte). Von den angestrebten Forschungsergebnissen profitieren KMUs aus den Wirtschaftszweigen chemische Industrie, Glas- und Keramikindustrie, Kraftwerkstechnik, Metallurgie sowie die Fachgebiete Verfahrenstechnik, Thermoprozesstechnik, Mess- und Mikrosystemtechnik.

Die Nutzung der FuE-Ergebnisse kann branchenübergreifend erfolgen und vor allem folgenden Nutzergruppen technische und wirtschaftliche Vorteile bringen:

- Durch die Einbindung von zahlreicher Industriebranchen und Fachverbänden in den projektbegleitenden Ausschuss, kann die Nutzung der Ergebnisse von verschiedenen Seiten erfolgen. Zum einen durch die direkte Anwendung der Methoden durch die Hersteller von Industriebrennern und Thermoprozessanlagen zum anderen können Anlagenbetreiber die Betriebszustände ihrer Anlagen überprüfen und optimieren. Gerade für sensible HT-Prozesse wie das Schmelzen von Glas ist das Messverfahren von großem Interesse für die Prozessoptimierung.
- Herstellern von MSR-Technik für industrielle Feuerungen wird erstmals ein 3D-Messverfahren für die Verbrennungsdiagnostik in industriellen HT-Feuerungen zugänglich gemacht.
- Für die Betreiber prozesstechnischer Anlagen werden neue Möglichkeiten eröffnet, die Fahrweisen ihrer Anlagen zu optimieren. Durch die räumliche und zeitliche Auflösung des Messverfahrens können zukünftig instationäre Verbrennungsvorgänge und deren Einfluss auf den Thermoprozess detailliert messtechnisch untersucht werden.
- Das Verfahren kann zukünftig Betreibern und Entwicklern von Thermoprozessen als Validierungsmethode für numerische Simulationen dienen und zur Etablierung neuer Methoden wie beispielsweise die Large Eddy Simulation (LES) für industrielle Anwendungen führen. Das Verfahren kann z. B. dazu beitragen, ein verbessertes Verständnis der Interaktion von turbulenter Strömung mit der Verbrennungsreaktion zu erhalten und somit neue Möglichkeiten bieten, das Schadstoffverhalten von industriellen Thermoprozessen zu untersuchen und zu optimieren.

## 13 Veröffentlichungen

Das Projekt wurde während seiner Laufzeit auf internationalen Konferenzen vorgestellt und es wurden Artikel in Fachzeitschriften publiziert. Nachfolgend sind die aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen einschließlich der abgeschlossenen studentischen Arbeiten in chronologischer Reihenfolge aufgeführt:

- Röder, M., Pietsch, P., Unterberger, A., Martins, F. J. W. A., Giese, A., Mohri, K.: „Multi-Camera System for 3D Tomographic Reconstruction of Chemiluminescence in Industrial-Scale High-Temperature Combustion Processes“, 11<sup>th</sup> European Combustion Meeting, 26. - 28. April 2023, Rouen, Frankreich.
- Röder, M., Pietsch, P., Unterberger, A., Martins, F. J. W. A., Giese, A., Mohri, K.: „Tomographische 3D-Rekonstruktion der Chemilumineszenz von industriellen Hochtemperatur-Verbrennungsprozessen“, 31. Deutscher Flammentag, 27. - 28. September 2023, TU Berlin.
- Röder, M., Pietsch, P., Unterberger, A., Martins, F. J. W. A., Foo, C. T., Giese, A., Mohri, K.: „3D Tomographic Reconstruction of Industrial High-Temperature Combustion Processes“, 14<sup>th</sup> European Conference on Industrial Boilers and Furnaces, INFUB-14, 2. - 5. April 2024, Algarve, Portugal.
- Foo, C. T., Martins, F. J. W. A., Unterberger, A., Röder, M., Pietsch, P., Giese, A., Mohri, K.: „Tomographic camera probe for 3D emission measurements in high-temperature industrial-scale furnaces“, 40<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 21 - 26 Juli 2024, Mailand, Italien.
- Unterberger, A., Foo, C. T., Emuang, Z. A., Martins, F. J. W. A., Mohri, K.: Metaheuristic camera calibration for optical tomographic imaging in industrial environments, 2024 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2024.
- Martins, F. J. W. A., Foo, C. T., Unterberger, A., Röder, M., Pietsch, P., Mohri, K.: „Multi-Camera Tomographic Probe for 3D Emission Measurements in Industrial-Scale High-Temperature Combustion Processes“, Applied Thermal Engineering, Manuskript zur Begutachtung eingereicht, August 2024.

## **Danksagung**

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses für deren Mitarbeit und unentgeltliche Bereitstellung von Material, Personal sowie technischer und fachlicher Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Bereitstellung der finanziellen Mittel aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Die durchführenden Forschungsstellen bedanken sich bei der EURECA Messtechnik GmbH sowie der HEYDO Apparatebau GmbH für die Unterstützung während der Entwicklung und Umsetzung des optischen SONDENSYSTEMS.

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 3.1: HINTERGRUNDBEREINIGTE UV-VIS-SPEKTREN EINER ERDGAS-SAUERSTOFF-VERBRENNUNG (OXY-FUEL) GEMESSEN IM KALTEN OFENRAUM (ROT) BZW. BEI 800 °C OFENRAUMTEMPERATUR (BLAU); MESSUNG AM GWI-VERSUCHSOFFEN. (QUELLE: GWI) .....	9
ABBILDUNG 3.2: SENSORORIENTIERUNG UND 3D-REKONSTRUKTIONSDOMÄNE ZUR TOMOGRAFISCHEN REKONSTRUKTION [18]. .....	12
ABBILDUNG 3.3: ABLAUFSCHEMA FÜR DEN VERWENDETEN ERT-ALGORITHMUS [30,31].....	12
ABBILDUNG 3.4: BEISPIELE FÜR CTC-REKONSTRUKTIONEN TURBULENTER FLAMMEN. HORIZONTALE SCHNITTE DER DOMÄNE FÜR VERSCHIEDENE DISTANZEN Z ÜBER DEM BRENNER. DIE DNS-DATEN STAMMEN AUS [35]. $\phi$ = ÄQUIVALENZVERHÄLTNIS, $T_{EXP}$ = SENSORBELICHTUNGSZEIT, $Re_D$ = REYNOLDSZAHL DER KALTEN STRÖMUNG BASIEREND AUF DEM DURCHMESSER DES BRENNERAUSTRITTS.....	13
ABBILDUNG 3.5: BEISPIELE FÜR REKONSTRUKTIONEN VON TURBULENTEN FLAMMEN MIT DEM ERT-ALGORITHMUS [30]. HORIZONTALE SCHNITTE DER DOMÄNE FÜR VERSCHIEDENE DISTANZEN Z ÜBER DEM BRENNER UND VERTIKALE SCHNITTE DURCH DIE MITTELACHSE DES BRENNERS. DIE STREUDIAGRAMME ZEIGEN EINEN VERGLEICH ZWISCHEN ERT- UND ART-BASIERTER CTC, SOWIE DIE KORRELATIONEN MIT DEN PHANTOMDATEN.....	14
ABBILDUNG 4.1: FALL 1 – CFD-BERECHNUNGSGITTER UND SIMULIERTES 3D-FELD DER WÄRMEFREISETZUNG (RANS) FÜR EINE NICHT-VORGEMISCHTE 120 kW ERDGAS/LUFT-FLAMME BEI $\lambda = 1,1$ IM GWI-VERSUCHSOFFEN. ....	16
ABBILDUNG 4.2: FALL 1 – SIMULIERTE VERTIKALE 2D-TEMPERATURVERTEILUNG IN DER OFENRAUMMITTE. ....	17
ABBILDUNG 4.3: FALL 2 – CFD-BERECHNUNGSGITTER UND SIMULIERTES 3D-FELD DER WÄRMEFREISETZUNG (RANS) FÜR EINE 500 kW ERDGAS/LUFT UNDERPORT-FEUERUNG BEI $\lambda = 1,15$ . ....	18
ABBILDUNG 4.4: FALL 2 – CFD-BERECHNUNGSGITTER UND SIMULIERTES 3D-FELD DER WÄRMEFREISETZUNG (RANS) FÜR EINE 500 kW ERDGAS/LUFT UNDERPORT-FEUERUNG BEI $\lambda = 1,15$ . ....	18
ABBILDUNG 4.5: CAD-STUDIE ZUR INTEGRATION DER KAMERAS UND OPTIMIERUNG DER WÄRMEABFUHR AUS DER OFENANLAGE. ....	19
ABBILDUNG 4.6: EINBAUPOSITIONEN DER KAMERA UND STRÖMUNGSRICHTUNG DES KÜHLWASSERS. ....	20
ABBILDUNG 4.7: FUNKTIONSPRINZIP DER LUMIGEN-BESCHICHTUNG (GELB) [29].....	21
ABBILDUNG 4.8: VERGLEICH DER SIGNALQUALITÄT BEI DER DETEKTION DER CH*- (OBERE REIHE) UND OH*-CHEMILUMINESZENZ (UNTERE REIHE) EINER VORGEMISCHTEN CH <sub>4</sub> -LUFT-FLAMME. NICHT-MODIFIZIERTER SENSOR (LINKE SPALTE), SENSOR OHNE DECKGLAS (MITTLERE SPALTE) UND LUMIGEN-BESCHICHTETER SENSOR (RECHTE SPALTE), AUFGENOMMEN MIT 450 BZW. 900 $\mu$ S BELICHTUNGSZEIT. ....	22
ABBILDUNG 4.9: ERFASSUNG DER CH*-CHEMILUMINESZENZ EINER 150-kW-FLAMME DURCH DIE GEÖFFNETE KAMMERKLAPPE DES „NASSHEUER“-OFENS BEI EINER MITTLEREN OFENRAUMTEMPERATUR VON 1.140 °C. ....	23
ABBILDUNG 4.10: KAMERAUFNAHMEN VON EINER DER 150-kW-ERDGAS/LUFT-FLAMME IM VERSUCHSOFFEN MIT BELICHTUNGSZEITEN VON 400, 300, 200 UND 100 MS (SPALTEN VON LINKS NACH RECHTS); OHNE PIXEL-BINNING (OBERE REIHE), 2 x 2 BINNING (MITTLERE REIHE) UND 4 x 4 BINNING (UNTERE REIHE) IM VERGLEICH. ....	23
ABBILDUNG 4.11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER HALBKREIS-, L-FÖRMIGEN UND LINEAREN KAMERAANORDNUNG, DIE IN DEN PHANTOMSTUDIEN UNTERSUCHT WURDEN. ....	24
ABBILDUNG 4.12: BEISPIELE FÜR SYNTHETISCH GENERIERTE BILDER, DIE AUS DREI VERSCHIEDENEN ANSICHTEN DER L-FÖRMIGE KAMERAANORDNUNG GERENDERT WURDEN. ....	25
ABBILDUNG 4.13: (A) 3D-PHANTOM AUF DER GRUNDLAGE DES WÄRMEFREISETZUNGSFELDES EINER SIMULIERTEN, NICHT VORGEMISCHTEN ERDGAS/LUFT-FLAMME BEI 120 kW UND EINEM LUFTVERHÄLTNIS $\lambda = 1,1$ ; UND (B) REKONSTRUKTION DES PHANTOMS UNTER VERWENDUNG DER L-FÖRMIGEN KAMERAANORDNUNG. ....	26
ABBILDUNG 5.1: KAMERAMODUL MIT BLICKWINKELN UND DEN DAZUGEHÖRIGEN SICHTACHSEN DER KAMERAS AUF EINEN GEMEINSAMEN BILDMITTELPUNKT. ....	27
ABBILDUNG 5.2: ABMESSUNGEN DES KAMERAMODULS. ....	28
ABBILDUNG 5.3: INNENANSICHT DES KAMERAMODULS MIT KAMERA, OBJEKTIV, SPIEGEL UND SCHAUGLAS.....	28
ABBILDUNG 5.4: LINKS IST DER SCHEMATISCHE AUFBAU UND ZUSAMMENBAU DES KAMERAMODULS ZU SEHEN. RECHTS IST DER FINALE AUFBAU ZU SEHEN, WIE ER ZEHNMAL IN DAS KÜHLMODUL EINGESETZT WIRD. ....	29

ABBILDUNG 5.5: AUSSTATTUNG DES LEEREN KÜHLMODULS MIT THERMOELEMENTEN FÜR ERSTE TESTLÄUFE IM DBI-OFEN. ZU SEHEN IST DIE DECKELDICHTUNG (SCHWARZ, GELOCHT) WELCHE DEN DOPPELWANDIGEN DECKEL UND DIE WASSERKAMMERN GEGEN DIE ELEKTRONIK ABDICHTET. ....	29
ABBILDUNG 5.6: INTEGRATION DER KAMERASONDE IN DEN „NASSHEUER“-HOCHTEMPERATURVERSUCHSOFFEN DES GWI IM 3D-CAD-MODELL. ....	30
ABBILDUNG 5.7: INTEGRATION DER KAMERASONDE IN DEN HOCHTEMPERATURVERSUCHSOFFEN („ROT“-OFEN) DES GWI IM 3D-CAD-MODELL. ....	31
ABBILDUNG 5.8: RAY-TRACING DER KAMERAANSICHTEN UNTER DER BERÜCKSICHTIGUNG DER DURCH DIE SONDENKONSTRUKTION VORGEgebenEN KAMERAPOSITIONEN, -ORIENTIERUNGEN UND REFLEKTIONEN AN DEN UMLENKSPIEGELN. ....	32
ABBILDUNG 5.9: (A) VERSUCHSAUFBAU ZUR ERPROBUNG DER OPTISCHEN ANORDNUNG. (B) AUFNAHMEN MIT UND (C) OHNE UMLENKSPIEGEL VON EINER NICHT-VORGEMISCHTEN TURBULENTEN FLAMME IM LABORMAßSTAB. ....	33
ABBILDUNG 5.10: (A) VERSUCHSAUFBAU ZUR ERPROBUNG DER OPTISCHEN ANORDNUNG. ABBILDUNG EINES ZYLINDRISCHEN, SCHWARZ-WEIß-GEMUSTERTEN TESTOBJEKTS MIT EINEM DURCHMESSER IN DER ZU ERWARTENDEN FLAMMENBREITE. (B) AUFNAHME MIT UMLENKSPIEGEL. ....	33
ABBILDUNG 5.11: (A) VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE TOMOGRAFISCHE REKONSTRUKTION DER CHEMILUMINESZENZ EINER VORGEMISCHTEN CH <sub>4</sub> /LUFT-FLAMME EINES CAMBRIDGE-SANDIA-BRENNERS (SWB5) IM EMPI-LABOR; (B) BERECHNETE ISOFLÄCHE SOWIE (C) VERTIKALE UND (D) HORIZONTALE 2D-SCHNITTE [41]. ....	34
ABBILDUNG 5.12: (A) EXPERIMENTELLER VERGLEICH ZWISCHEN DER ENTWICKELTE KAMERASONDE UND EINEM REFERENZSYSTEM (GENEIGTE KAMERAS) FÜR DIE TOMOGRAPHISCHEN REKONSTRUKTION EINER TURBULENTEN CAMBRIDGE-SANDIA-FLAMME. (B) EXEMPLARISCHE EINZELAUFNAHME DER REFERENZSYSTEMS UND (C) DER SONDE. ....	35
ABBILDUNG 5.13: 3D-REKONSTRUKTIONEN DER CH*-CHEMILUMINESZENZ EINER TURBULENTEN SWB9-FLAMME MIT HILFE (A) DES REFERENZSYSTEMS UND (B) DER KAMERASONDE SOWIE ZUGEHÖRIGE HORIZONTALE UND VERTIKALE 2D-SCHNITTE IM VERGLEICH. ....	36
ABBILDUNG 6.1: ERPROBUNG DER WASSERKÜHLUNG UND DES DICHTUNGSKONZEPTS. (A), (B) UMLAUFEINDE EPDM-DICHTUNG DER DECKELKONSTRUKTION MIT BOHRUNGEN FÜR DEN KÜHLWASSERVOR- (ROT) UND -RÜCKLAUF (BLAU); (C) UNDICHTIGKEIT AM DECKEL WÄHREND DES DRUCKTESTS. ....	37
ABBILDUNG 6.2: (A) KAMERASONDE IM „ROTEN“-OFEN MIT DECKENTHERMOELEMENTEN (T9 – T12 NICHT IM BILD) UND SONDENNAHER TEMPERATURMESSSTELLE. (B) VERSUCHSAUFBAU ZUR ERPROBUNG DER WASSERKÜHLUNG (A: DURCHFLUSSMESSER, B: ABSPERRVENTIL, C: MANOMETER, D: DROSSELVENTIL, VL: VORLAUF, RL: RÜCKLAUF, E: DURCHFLUSSMESSER DRUCKLUFT, F: DATENLOGGER). ....	37
ABBILDUNG 6.3: GEMESSENE TEMPERATURVERLÄUFE WÄHREND DER ERPROBUNG DES KÜHLKÖRPERS BIS ZU EINER MITTLEREN OFENRAUMTEMPERATUR VON 500 °C. ....	39
ABBILDUNG 6.4: BRENNERLEISTUNG UND ERMITTELTE KÜHLEISTUNG DER SONDE AUFGETRAGEN ÜBER DIE VERSUCHSDAUER. ....	39
ABBILDUNG 6.5: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE ERPROBUNG DER KAMERASONDE IM „NASSHEUER“-OFEN – FALL 1. A: KÜHLWASSERDURCHFLUSSMESSER, B: DRUCKLUFTVERSORGUNG, C: TEMPERATUR-LOGGER, D: PULSGEBER, E: VERTEILERBOX TRIGGER-PULS, F: PC FÜR KAMERASTEuerung UND BILDDATENSPEICHERUNG. ....	40
ABBILDUNG 6.6: KAMERASONDE IM EINSATZ AN EINER NICHT-VORMISCHENDEN ERDGAS/LUFT-FEuerung BEI EINER LEISTUNG VON 120 kW, $\lambda = 1,1$ IM „NASSHEUER“-OFEN. AUFGENOMMEN DURCH DIE INTEGRIERTE OFENRAUMKAMERA – DECKENANSICHT. .	41
ABBILDUNG 6.7: INNENANSICHT DES „ROTEN“-OFENS BEI GEÖFFNETER STIRNWAND MIT BLICK AUF DIE KAMERASONDE UND DIE BRENNERDÜSE. ....	42
ABBILDUNG 6.8: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE ERPROBUNG DER KAMERASONDE IM „ROTEN“-OFEN – FALL 2. A: KÜHLWASSERDURCHFLUSSMESSER, B: DRUCKLUFTVERSORGUNG, C: TEMPERATUR-LOGGER, D: PULSGEBER, E: VERTEILERBOX TRIGGER-PULS, F: PC FÜR KAMERASTEuerung UND BILDDATENSPEICHERUNG. ....	42
ABBILDUNG 7.1: (LINKS) DETAILLIERTES RENDERING DES 3D-CHARUCO- PLATTENTARGETS, DAS FÜR DIE BERECHNUNG DER INTRINSISCHEN UND LINSENVERZERRUNGSPARAMETER VERWENDET WURDE. (RECHTS) EXEMPLARISCHE AUFNAHMEN DES 3D-CHARUCO-PLATTENTARGETS AUS UNTERSCHIEDLICHEN PERSPEKTIVEN [41]. ....	44
ABBILDUNG 7.2: (A) KALIBRIERUNG DER EXTRINSISCHEN PARAMETER MIT HILFE EINES 3D-TARGETS (MAGICAL) IM „NASSHEUER“-OFEN. (B) EXEMPLARISCHE AUFNAHME DES 3D-TARGETS UND (C) ERGEBNIS NACH MASKIERUNG. ....	45

ABBILDUNG 7.3: PRE-PROCESSING-SCHRITTE (VON LINKS NACH RECHTS), DIE AUF EINZELAUFNAHMEN (ROI) DER FLAMMEN F1 (OBERE REIHE) UND F3 (UNTERE REIHE) ANGEWANDT WURDEN UND RESULTIERENDE SIGNAL-RAUSCH-VERHÄLTNISSE (S/N). .....	46
ABBILDUNG 7.4: EXEMPLARISCHE FLAMMENBILDER FÜR UNTERSCHIEDLICHE BETRIEBSBEDINGUNGEN IM „NASSHEUER“-OFEN BEI VERÄNDERTEN BELICHTUNGSZEITEN UND KONstanTER KAMERAVERSTÄRKUNG; INTENSITÄT NORMALISIERT AUF DIE MAXIMALWERTE. ....	47
ABBILDUNG 7.5: (A) DIE TOMOGRAPHISCHE SONDE IM „NASSHEUER“-OFEN SOWIE DREI BEISPIELHAFT E INZELAUFNAHMEN EINER HOCHTURBULENTEN FLAMME. (B) SONDE IM „ROTEN“-OFEN. ....	48
ABBILDUNG 7.6: 3D-ISOFLÄCHEN (BEI 0,2 DER MAXIMALEN INTENSITÄT) UND SCHNITTE DER REKONSTRUKTIONEN BEI DEN BETRIEBSBEDINGUNGEN (A) F1, (B) F2 UND (C) F3. ....	49
ABBILDUNG 7.7: VERGLEICH EINES TOMOGRAPHISCH REKONSTRUIERTEN INSTANTANEN A) (NF3) UND GEMITTELTEN B) (NF6) 3D-CHEMILUMINESZENZ-FELDES (BLAUE ISOFLÄCHEN) MIT DEM MITTELS CFD (RANS) BERECHNETEN FELD DER WÄRMEFREISETZUNG (JEWELNS NF4). ....	50
ABBILDUNG 7.8: VERTIKALE 2D-SCHNITTE DURCH DAS TOMOGRAPHISCH REKONSTRUIERTE INSTANTANE A) (NF3) UND GEMITTELTE B) (NF6) 3D-CHEMILUMINESZENZ-FELD SOWIE DAS MITTELS CFD (RANS) BERECHNETE FELD DER WÄRMEFREISETZUNG (JEWELNS NF4) IM VERGLEICH. ....	51
ABBILDUNG 10.1: ZEITPLAN DES PROJEKTES "TOMO-PRO". ....	57

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 4.1: ERGEBNISSE DER BEWERTUNG DER REKONSTRUKTIONSQUALITÄT FÜR DIE UNTERSUCHTEN KAMERAANORDNUNGEN; L2-NORM-FEHLERABSTAND $e$ , PEARSON-KORRELATIONSKOEFFIZIENT $p$ UND STRUKTURELLER ÄHNLICHKEITSINDEX $SSIM$ . ....	26
TABELLE 6.1: BETRIEBSBEDINGUNGEN FÜR DIE ERPROBUNG AM „NASSHEUER“-OFEN; THERMISCHE LEISTUNG $P$ , LUFTVERHÄLTNIS $\lambda$ , BRENNSTOFFVOLUMENSTROM (ERDGAS) $V_B$ , LUFTVOLUMENSTROM $V_L$ , REYNOLDS-ZAHL (KALTE STRÖMUNG) $Re_D$ .....	41
TABELLE 6.2: BETRIEBSBEDINGUNGEN FÜR DIE ERPROBUNG AM „ROTEN“-OFEN; THERMISCHE LEISTUNG $P$ , LUFTVERHÄLTNIS $\lambda$ , BRENNSTOFFVOLUMENSTROM (ERDGAS) $V_B$ , LUFTVOLUMENSTROM $V_L$ , REYNOLDS-ZAHL (KALTE STRÖMUNG) $Re_D$ .....	43
TABELLE 10.1: PERSONALEINSATZ IM PROJEKTZEITRAUM, $GW$ I.....	55
TABELLE 10.2: PERSONALEINSATZ IM PROJEKTZEITRAUM, $DB$ I.....	55
TABELLE 10.3: PERSONALEINSATZ IM PROJEKTZEITRAUM, $EM$ PI.....	55
TABELLE 12.1: DURCHGEFÜHRTE TRANSFERMAßNAHMEN. ....	59

## Literaturverzeichnis

- [1] Bischoff, J. et al.: „Erschließen der Potentiale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand“, Studie im Auftrag des BMWi, agiplan GmbH / Fraunhofer IML / ZENIT GmbH, Juni 2015.
- [2] DIHK-Eckpunktepapier „Künstliche Intelligenz“: „Datenökonomie, Künstliche Intelligenz Blockchain - Vorschläge für ein konzentriertes Zusammenspiel von Wirtschaft, Politik und Forschung“, Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V., 2018.
- [3] Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., Ganschar, O.: „Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potential für Deutschland“, Studie, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. / Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2014.
- [4] Gaydon, A. G., Wolfhard H. G.: „Flames: Their Structure, Radiation and Temperature“, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [5] Docquier, N., Lacas, F., Candel, S., Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp. 139–145, 2002.
- [6] Ding, Y., Durox, D., Darabiha, N., Schuller, T.: Effect of fuel composition on the flame chemiluminescence. Proceedings of the European Combustion Meeting, 18-21 April 2017, Dubrovnik, Croatia.
- [7] Ballester, J., García-Armingol, T, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 36, pp. 375–411, 2010.
- [8] Witzel, B. et al.: Application of Endoscopic OH\*-Chemiluminescence Measurements at a Full-Scale High-Pressure Gas Turbine Combustion Test Rig. Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68965, June 11-15, 2012, Copenhagen, Denmark.
- [9] Goschütz, M. R.: Endoskopische Brennraumdiagnostik im seriennahen Ottomotor durch Chemilumineszenz und laserinduzierte Fluoreszenz. Dissertation, Universität Duisburg-Essen (2018).
- [10] <http://www.intechonline.de/index.php/technik/prozesskamas/glaswanne-fuellstand>, INTECH Industrietechnik GmbH (06.09.2024).
- [11] <https://www.dbi-gut.de/opto-akustische-sondensysteme.html> , DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (06.09.2024).
- [12] <https://www.advancedenergy.com/de/>, Advanced Energy Industries GmbH (06.09.2024).
- [13] Wang, F., et al.: Measurement Science and Technology, 2010. 21(045301).
- [14] Agrawal, A.K., et al.: Applied optics, 1998. 37(3): p. 479-485.
- [15] Floyd, J., P. Geipel, and A.M. Kempf. Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC): Instantaneous 3D measurements and Phantom studies of a turbulent opposed jet flame. Combustion and Flame, 2011. 158(2): p. 376-391.
- [16] Worth, N.A. and J.R. Dawson. Measurement Science and Technology, 2013. 24(2): p. 024013.
- [17] Hossain, M.M., et al.: Measurement Science and Technology, 2013. 24(7): p. 074010.

- [18] Mohri, K., Goers, S., Schoeler, J., Dreier, T., Schulz, C., Kempf, A.: Instantaneous 3D-imaging of highly turbulent flames using computed tomography of chemiluminescence (CTC) , *Appl. Opt.*, 2017. **56**(26): p. 7385-7395.
- [19] Floyd, J. and A.M. Kempf. Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC): High resolution and instantaneous 3-D measurements of a Matrix burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011. **33**(1): p. 751-758.
- [20] Mohri, K., Röder, M., Giese, A., Al-Halbouni, A., Kempf, A.: Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC): reconstructing turbulent laboratory and industrial flames 28. Deutscher Flammentag, Poster, Verbrennung und Feuerung, TU Darmstadt, 06.-07. September 2017.
- [21] Mohri, K., Röder, M., Giese, A., Al-Halbouni, A., Kempf, A.: 3D instantaneous reconstruction of a turbulent industrial burner flame using Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC), SMARTCATs 3<sup>rd</sup> General Meeting & Workshop on Smart Energy Carriers in Industry, Vortrag, Technische Universität Prag, Tschechien, 25.-27. Oktober 2017.
- [22] Unterberger, A., Röder, M., Giese, A., Al-Halbouni, A., Kempf, A., Mohri, K.: 3D Reconstruction of Turbulent industrial Flames Computed Tomography of Chemiluminescence (CTC), *Journal of Combustion* (2018).
- [23] Cifuentes, L., Dopazo, C., Sandeep, A., Chakraborty, N., Kempf, A.: Analysis of flame curvature evolution in a turbulent premixed bluff body burner. *Phys. Fluids*, 2018. **30**.
- [24] Sadanandan, R., Meier, W., Heinze, J.: Experimental study of signal trapping of OH laser induced fluorescence and chemiluminescence in flames. *Appl Phys B* (2012) **106**:717-724.
- [25] Ertem, C. K., Janicka, J., Dreizler, A.: Ray tracing of chemiluminescence in an unconfined non-premixed turbulent jet flame using large-eddy simulation. *Appl Phys B* (2012) **107**:603-610.
- [26] Guethe, F., Guyot, D., Singla, G., Noiray, N., Schuermans, B.: Chemiluminescence as diagnostic tool in the development of gas turbines. *Appl Phys B* (2012) **107**:619-636.
- [27] „Empfindsame Schichten - UV-Sensitivierung mittels Lumigen“, *Elektronik Informationen*, Ausgabe 5, 48. Jahrgang, S. 60-61 (2016).
- [28] Smith, J. D., et al.: Use of RANS and LES Turbulence Models in CFD Predictions for Industrial Gas-fired Combustion Applications, *Industrial Combustion, Journal of the Flame Research Foundation*, Article number 201607, December 2017, ISSN 2075-3071.
- [29] [https://www.eureca.de/files/uv-beschichtung\\_2019-09-24.pdf](https://www.eureca.de/files/uv-beschichtung_2019-09-24.pdf), EURECA Messtechnik GmbH (06.09.2024).
- [30] Unterberger, A., Kempf, A., Mohri, K.: 3D Evolutionary Reconstruction of Scalar Fields in the Gas-Phase, *Energies* 2019. **12**, 2075.
- [31] Unterberger, A., Mohri, K.: Evolutionary background-oriented schlieren tomography with self-adaptive parameter heuristics, *Optics Express*, 2022. **30** (6): p. 8592-8614.
- [32] Foo, C. T., Unterberger, A., Martins, F. J. W. A., Prenting, M. M., Schulz, C., Mohri, K.: Investigating spray flames for nanoparticle synthesis via tomographic imaging using multi-simultaneous measurements (TIMes) of emission, *Optics Express*, 2022. **30** (9): p. 15524-15545.

- [33] Martins, F. J. W. A., Unterberger, A., Mohri, K.: Tomographic imaging using multi-simultaneous measurements (TIMes) of emission and refractive index 3D fields in turbulent flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023. **39** (1): p. 1405-1413.
- [34] Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., Teller, E: Equation of state calculations by fast computing machines, *The journal of chemical physics*, 1953. **21** (6): p. 1087-1092.
- [35] Proch, F., Domingo, P., Vervisch, L., Kempf, A.: Flame resolved simulation of a turbulent premixed bluff-body burner experiment. Part I: Analysis of the reaction zone dynamics with tabulated chemistry. *Combustion and Flame*, 2017. **180**: p. 321-339.
- [36] Daun, K. J., Grauer, S. J., Hadwin, P. J.: Chemical species tomography of turbulent flows: discrete ill-posed and rank deficient problems and the use of prior information. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2016. **172**: p. 58-74.
- [37] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004. **13** (4): p. 600-612.
- [38] Sweeney, M. S., Hochgreb, S., Dunn, M.J., Barlow, R. S.: The structure of turbulent stratified and premixed methane/air flames I: Non-swirling flows, *Combustion and Flame*, 2012. **159** (9): p. 2896-2911.
- [39] Kamal, M. M., Barlow, R. S., Hochgreb, S.: Conditional analysis of turbulent premixed and stratified flames on local equivalence ratio and progress of reaction, *Combustion and Flame*, 2015. **162** (10): p. 3896-3913.
- [40] Proch, F., Kempf, A. M.: Numerical analysis of the Cambridge stratified flame series using artificial thickened flame LES with tabulated premixed flame chemistry, *Combustion and Flame*, 2014. **161** (10): p. 2627-2646.
- [41] Unterberger, A., Foo, C. T., Emuang, Z. A., Martins, F. J. W. A., Mohri, K.: Metaheuristic camera calibration for optical tomographic imaging in industrial environments, *2024 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2024.
- [42] Unterberger, A., Menser, J., Kempf, A., Mohri, K.: Evolutionary Camera Pose Estimation of a Multi-Camera Setup for Computed Tomography, *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Taipei, Taiwan, 2019, pp. 464-468., doi: 10.1109/ICIP.2019.8804398.
- [43] Dabov, K., Foi, A., Katkovnik, V., Egiazarian, K.: Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering, *IEEE Transactions on image processing*, 2007. **16** (8): p. 2080-2095.
- [44] Grauer, S. J, Unterberger, A., Rittler, A., Daun, K.J., Kempf, A.M., Mohri, K.: Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography, *Combustion and Flame*, Volume 196, 2018, Pages 284-299.
- [45] Grauer, S. J., Unterberger, A., Daun, K. J., Mohri, K.: Demonstration of instantaneous 3D flame reconstruction by background-oriented schlieren tomography. in *Proceedings of the Combustion Institute - Canadian section Spring technical meeting*. 2018. Toronto, Canada.
- [46] Abschlussbericht, AiF-Projekt, IGF-Förderkennzeichen 15890 BG: „Optisches, Minimal-Invasives Analysesystem für die UV-Flammen-Diagnose in Thermoprozessanalagen“ (2012).

- [47] „Entwicklung eines Verfahrens zur opto-akustischen Inspektion, Bewertung und Einstufung schwingungsbelasteter industrieller Thermoprozessanlagen“, VIBESIT, ZIM FKZ: KF2614905WD3, 2012.
- [48] „Optisches IR-Thermographiesystem zur Prozessvisualisierung von Hochtemperaturanlagen, IR-Gichtvisualisierung“, Inno Watt IW091021, 2011.
- [49] <https://www.sony.de/presscentre/sony-prasentiert-uv-wellenlangen-kompatiblen-cmos-bildsensor-mit-global-shutter-funktion-und-der-branchenweit-hochsten-effektiven-pixelzahl-von-ca-813-megapixeln>, Sony Europe B.V. (06.09.2024).
- [50] Goldhahn, E., Seume, J.: the background orientated schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to three-dimensional density field, Experiments and Fluids, Volume 3, 2007, Pages 241-249.
- [51] Schwarz, A.: Multi-tomographic flame analysis with a schlieren apparatus, Measurement Science and Technology, Volume 7, 1996, Pages 406-413.
- [52] Hartmann, U., Adamczuk, R., Seume, J. R.: Tomographic background orientated schlieren applications for turbomachinery, AIAA SciTech, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015, Florida.
- [53] Lang, H. M, Oberleithner, K., Paschereit, C. O., Sieber, M.: Measurement of the fluctuating temperature field in a heated swirling jet with BOS tomography, Experiments in Fluids, Volume 58, 2017, Pages 88.
- [54] Strategiepapier „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.