

**Fachlicher Abschlussbericht
Forschungsvorhaben 0327715N**

COORETEC - turbo

Teilverbundprojekt „Verbrennung“
Vorhabensgruppe 2.1: Innovative Brennerkonzepte

Vorhaben - Nr. 2.1.6

**Flexibles Verbrennungssystem für
wasserstoffhaltige Brennstoffe**

(Laufzeit: 01.03.2007 bis 31.12.2010)

Autoren:

Stefano Bernero (Alstom)
Thierry Lachaux (Alstom)

Janine Sangl (TUM)
Christoph Mayer (TUM)
Thomas Sattelmayer (TUM)

Alstom Power

Technische Universität München

Datum: 20.06.2011

*Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund
eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.*

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Vorwort, Danksagung

Der Projektleiter bedankt sich im Namen des Industriepartners ALSTOM Power beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie bei der AG Turbo für die hervorragende Zusammenarbeit und die erzielten Ergebnisse in diesem Projekt.

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen	5
1.3 Planung und Verlauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher Stand	7
1.5 Zusammenarbeit mit Anderen	9
2. Ergebnisse	10
2.1 Designkonzept	10
2.2 Isotherme Untersuchung skaliertener Brennergeometrien	11
2.3 Atmosphärische Verbrennung mit skaliertem Brennerkonzept	18
2.4 Verbrennungsversuche mit skaliertem Brennerkonzept unter erhöhtem Druck ...	29
2.5 Entwicklung und Validierung des gasturbinenkompatiblen Brennerprototyps	32
3. Zusammenfassung	41
4. Literaturverzeichnis	43

1 Hintergrund

1.1 Aufgabenstellung

Das Teilverbundprojekt "Verbrennung" widmet sich der schwierigen Aufgabe im „sauberen“ Kraftwerk der Zukunft eine stabile schadstoffarme Verbrennung trotz deutlich erweiterter Brennstoffflexibilität sicherzustellen. Die aktuellen Problemstellungen ergeben sich aus den spezifischen Anforderungen an das Verbrennungssystem hoch effizienter, sowie CO₂-freier Kraftwerke:

- Die Vorbehandlung von Brennstoff und/oder Luft ändert das Brennkammerkennfeld.
- Die künftige Nutzung unterschiedlichster Ressourcen erweitert die Brennstoffspezifikation erheblich.
- Der Prozesswirkungsgrad muss zur Erleichterung des CO₂-Abscheidungsprozesses signifikant gesteigert werden.
- NO_x-Emissionen müssen weiterhin brennkammertechnisch beherrscht und möglichst gemindert werden.
- Geänderte Brennstoffspezifikationen, Wirkungsgradsteigerung und Schadstoffminimierung führen zu Einschränkungen bei der Betriebssicherheit.

Für eine zielgerichtete und effiziente Umsetzung der Ziele ist das Verbundprojekt in zwei Vorhabensgruppen zusammengefasst worden:

- Innovative Brennerkonzepte.
- Thermoakustik und Stabilität bei Teillast.

Das hier bearbeitete Projekt gehörte zur ersten Vorhabensgruppe und hatte als Hauptziel die Entwicklung eines flexiblen Verbrennungssystems für wasserstoffhaltige Brennstoffe.

Das Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung ist eine der vielversprechenden zukunftsweisenden Technologien zur Minderung der CO₂-Emissionen kohlebefeuerter Kraftwerke. Dazu wird die Minderung zum einen durch die Steigerung des Anlagenwirkungsgrades, zum anderen durch die Abscheidung des Kohlenstoffanteils aus dem Brenngas vor der Verbrennung in der Gasturbine ermöglicht. Letztere Maßnahme erfordert insbesondere maßgebliche Entwicklungsanstrengungen bei der Verstromung wasserstoffhaltiger Gase in modernen Gasturbinen.

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Kohlevergasung ist die Anpassung der Brennkammer, die das Kohlegas verbrennen soll. Nach der CO₂-Abtrennung muss H₂-reiches Gas verbrannt werden, welches eine wesentliche höhere Reaktivität aber einen niedrigeren Brennwert im Vergleich zu Erdgas aufweist. Daher muss ein Brenner für aus Kohle gewonnene Synthesegase speziell ausgelegt werden. Dabei ist die Betriebssicherheit (das Vermeiden von Instabilitäten und Überhitzung), sowie die Einhaltung niedriger NO_x und CO- Emissionen zu beachten.

Im Vorhaben soll ein flexibles Verbrennungssystem für wasserstoffhaltige Brennstoffe entwickelt werden. Neben den grundlegenden Herausforderungen für rückschlagsfreie und emissionsarme Verbrennung von Wasserstoffgasen gilt es insbesondere, flexibel auf Änderungen in der Brennstoffzusammensetzung reagieren zu können. Drei Themenbereiche sollen in diesem Zusammenhang durch grundlegende Arbeiten beleuchtet werden: Brennstoff-Luft-Mischung in Drallbrennern mit Wasserstoffgasen, Einfluss von großen Brennstoffvolumenströmen auf die Brenneraerodynamik, sowie Brennersysteme mit Mehrfachbrennstoffen wie Synthese- und Erdgasen.

1.2 Voraussetzungen

Alstom Power gehört zu den Marktführern in der Entwicklung von Großgasturbinen zur Stromerzeugung in Kraftwerken und besitzt eine große Erfahrung in der Auslegung und Anwendung von emissionsarmen Gasturbinenbrennersystemen mit hoher Betriebsflexibilität. Im Bezug auf Brennstoffflexibilität, für CO₂-Abtrennung vor der Verbrennung ist es nötig, Brennstoffe mit hohem Wasserstoffanteil effizient zu verbrennen, d.h. mit weniger Verdünnung als bei den verfügbaren Technologien. Dazu soll die Gasturbine auch mit einem Standard-Brennstoff wie Erdgas betrieben werden können, der deutlich verschiedene Ansprüche am Brennerströmungsfeld und Brennstoffeindüsung hat. Dies bedeutet, dass neuartige Brennerkonzepte entwickelt werden müssen, die mit den verschiedenen Brennstoffen sowohl betriebssicher als auch emissionsarm betrieben werden können. Um zu diesem Ziel zu gelangen, ist es zuerst notwendig, die experimentelle Infrastruktur auf den hohen Wasserstoffinhalt der Brennstoffzusammensetzung anzupassen, sowie die Kenntnisse über Strömungsfeld, Wirbeldynamik, und über den daraus resultierenden Einfluss der Brennstoffeindüsung durch Grundlagenuntersuchungen zu erweitern. Mit diesen Grundlagen und den ersten Ideen für innovative Brennerkonzepte, kann ein Syngasbrennerprototyp durch iterative numerische sowie experimentelle Untersuchungen bis zur Validierung bei gasturbinennahen Betriebsbedingungen entwickelt werden. Dadurch kann es Alstom Power gelingen, neue Produkte auf den Markt zu bringen und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

1.3 Planung und Verlauf des Vorhabens

Der in der Projektbeschreibung definierte Arbeitsplan war die Grundlage für die Bearbeitung der verschiedenen Arbeitspakete:

1. Versuchseinrichtung und Infrastruktur
 - 1.1. Versuchseinrichtung und Infrastruktur: Wasserkanal
 - 1.2. Versuchseinrichtung und Infrastruktur: Verbrennung
2. Grundlageuntersuchungen zur Definition der Auslegungsregeln
 - 2.1. 3D CFD Studie zum Strömungsfeld
 - 2.2. 2D CFD Studie zur Brennstoffeindüsung
 - 2.3. Wasserkanalversuche
 - 2.4. Atmosphärische Verbrennungstests
3. Entwicklung eines skalierten Syngasbrennerkonzeptes und Skalierungsregeln
 - 3.1 Wasserkanalversuche mit Skalierung
 - 3.2 Atmosphärische Verbrennungstests mit Skalierung
 - 3.3 Hochdrucktests
 - 3.4 Brennergeometrie in Originalgröße
 - 3.5 CFD Validierung der Ergebnisse
4. Entwicklung eines gasturbinenkompatiblen Syngasbrennerprototyps
 - 4.1 CFD Simulation
 - 4.2 Wasserkanaltests
 - 4.3 Atmosphärische Tests
5. Validierung des Syngasbrennerprototyps unter gasturbinennahen Betriebsbedingungen
6. Erstellen des Abschlussberichts

Entwicklung und Validierung, sowohl des skalierten Syngasbrennerkonzeptes durch die TUM als auch des gasturbinenkompatiblen Syngasbrennerprototyps von Alstom und dem DLR in Köln erfolgten nach der in Abbildung 1.3.1 dargestellten Vorgehensweise. Die Aufteilung der Arbeitsschwerpunkte zwischen den Projektpartnern laut Vorhabensbeschreibung [1] ist in Abbildung 1.3.2 graphisch dargestellt.

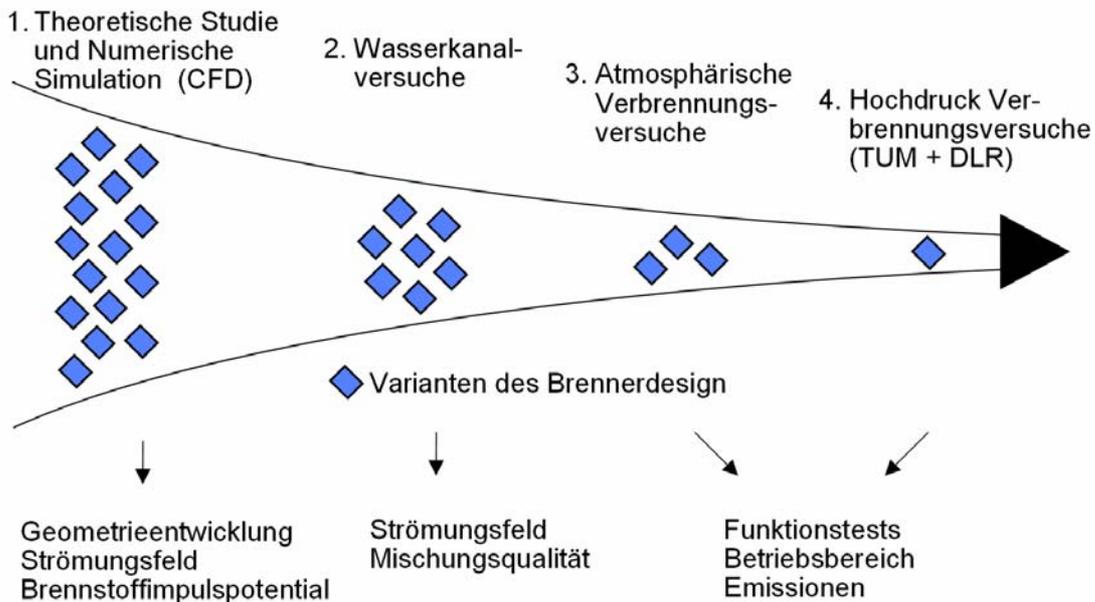


Abbildung 1.3.1: Vorgehensweise

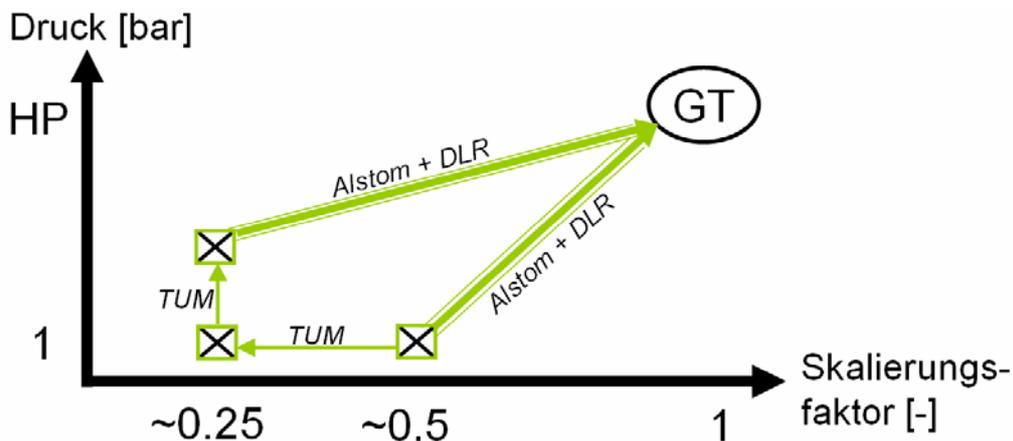


Abbildung 1.3.2: Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern

1.4 Wissenschaftlicher Stand

Aufgrund des niedrigeren Brennwertes der Synthesegase bzw. der verdünnten H₂-Mischungen muss bei gleicher Feuerungstemperatur die 5-10-fache Brennstoffmenge im Vergleich zu Erdgas eingedüst werden. Dies, sowie die erhöhte Reaktivität des Wasserstoffs, machen eine grundlegend neue Auslegung des Brenners erforderlich.

Eine denkbare Lösung ist, den hochreaktiven Brennstoff mit inertem Gas (z. B. N₂ oder H₂O) zu verdünnen und somit die Reaktivität des Gemisches sowie die maximal erreichbare adiabatische Flammentemperatur herabzusetzen. In diesem Fall wird der Brenner faktisch als Diffusionsbrenner mit großem Brennstoffmassenstrom und erniedrigter Flammentemperatur betrieben.

Eine solche Lösung ist der Alstom MBTU Brenner, welcher auf der bekannten EV-Brennertechnologie basierend in einer GT13E2 eingebaut ist [27]. Um das Emissionslimit von 25 ppm NO_x einzuhalten, ist eine Verdünnung von mit 55 % N₂ notwendig. Mit Hilfe dieser Technologie kann sogenanntes Ölgas (45% H₂, 48%CO 7% CO₂) verbrannt werden.

Der nächste Schritt der Entwicklung wird ein Vormischbrenner sein, der Luft und Brennstoff vor der Verbrennung mischt und daher im mageren Bereich bei relativ niedrigen Spitzentemperaturen die NO_x- Emissionslimits einhält. Diese Technologie hat sich für Erdgasbrenner bewährt und wird seit Jahren eingesetzt [28], [29], [30]. Sie ermöglicht es im Prinzip mit niedriger Verdünnung auszukommen, was dem Gesamtwirkungsgrad zugute kommt und zu niedrigen Emissionen führt.

Hierzu sind bereits Vorarbeiten im Rahmen des EU-geförderten (Enhanced CO₂ capture) ENCAP - Projektes durchgeführt worden, die im nächsten Abschnitt skizziert werden.

Die Patentrecherchen zu dem beantragten Vorhaben haben keine Hinweise ergeben, die auf eine Beeinträchtigung der Verwertung der Projektergebnisse durch entgegenstehende Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen schließen lassen.

Um das Problem der erhöhten Reaktivität zu definieren sind im Rahmen einer Vorstudie laminare Flammgeschwindigkeiten und Zündzeiten bestimmt worden. Der Einfluss auf die turbulente Brenngeschwindigkeit ist noch zu klären. Es ist zu bemerken, dass die Flammgeschwindigkeit durch die erhöhte adiabatische Temperatur sowie durch die erhöhten Transporteigenschaften des deutlich leichteren H₂-Moleküls höher ist als für Erdgas. Die Verdünnung des Brennstoffes führt zum Absenken der Temperatur und damit zu einer Reduktion der Flammgeschwindigkeit. Des Weiteren ist das Maximum, anders als bei Erdgas, bei den H₂-haltigen Flammen bei fetten Bedingungen ($\lambda < 1$) zu finden. Auch im Bezug auf Zündzeiten sind H₂-haltige Gase viel reaktiver (ca. 5-10 mal reaktiver als Erdgas).

Im Rahmen des EU – geförderten ENCAP (Enhanced CO₂ Capture) Projektes wurde bereits an einer Erweiterung des EV-MBTU Brenners gearbeitet. Hier wurde versucht den Übergang von Diffusionsflamme (hoch verdünnt und fast stöchiometrische Verbrennung) auf eine Vormischflamme im Sinne des EV-Brenners mit einem Minimum an Verdünnung zu bewerkstelligen.

Ausgehend von einer Vielzahl atmosphärischer Tests sind hier Brennervarianten ausgewählt worden, die dann auch unter Gasturbinenbedingungen im Hochdruckteststand getestet wurden. Mit zunehmender Verdünnung werden die Emissionen besser.

Bei reinem H_2 musste das Experiment abgebrochen werden, da der Brenner hohe Pulsationen zeigte, obwohl noch kein Flammenrückschlag auftrat. Überraschenderweise nimmt die Rückschlaggefahr mit zunehmender Verdünnung wieder zu. Dieses Phänomen ist nicht völlig verstanden und bedarf weiterer Untersuchung.

Hochdrucktests mit einer modifizierten Brennervariante wurden durchgeführt, wobei der Brennstoff ausgehend von Erdgas durch Zumischung von reinem Wasserstoff variiert wurde bis Rückschlag auftritt. Für reinen H_2 konnte eine Temperatur von 1800 K noch nicht erreicht werden.

Am Lehrstuhl für Thermodynamik ist eine fast zwanzigjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Gasturbinenverbrennung vorhanden [31]. Zum Themenbereich Brennerentwicklung (Brenner für Erdgas [32], [33], Brenner für Syngas [34] - [36]) und Brennkammerentwicklung [37] sowie zur NO-Bildung in Flammen [20], [38], [39] liegen diverse Publikationen vor. Zur Zeit bearbeiten zwei der vier Arbeitsgruppen des Lehrstuhls Verbrennungsprobleme (Literaturliste aller Publikationen unter [40]). Von besonderem Interesse im aktuellen Kontext sind die Arbeiten des Lehrstuhls zum verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzen [4], [5], [21], [22], [41], [42], und die ausführlichen kinetischen Studien zur Selbstzündung in Gasturbinenbrennern [43]-[46].

Die experimentellen Arbeiten am Lehrstuhl sind mit den verfügbaren laseroptischen und spektroskopischen Messtechniken durchgeführt worden; die relevanten Methoden wurden teilweise schon in [4], [5], [21], [22], [41], [42] beschrieben. Der neulich am Lehrstuhl aufgebauter Hochdruckversuchsstand [48] stand für die Messungen am skalierten Brennerkonzept unter Hochdruckbedingungen zur Verfügung.

Alstom setzt seit über 25 Jahren einen bedeutenden Schwerpunkt der F&E Tätigkeiten auf die Entwicklung von emissionsarmer, brennstoffflexibler Gasturbinenbrennertechnologie [28]. Der erreichte wissenschaftliche Stand, sowohl bei der Auslegung vom EV-Brenner für Erdgas- und Ölbetrieb [49], wie auch explizit in Richtung Brennstoffflexibilität und hohen Wasserstoffanteilen [50, 27] lag einer soliden Brennerentwicklung im Rahmend dieses Vorhabens zugrunde. Diese wird durch grundlegende numerische Simulationen der Brennerströmungs- und Mischungsfelder, sowie deren Validierung in Strömungskanälen unterstützt. Weitere experimentelle Einrichtungen für die Untersuchung von Brennerprototypen im Originalmaßstab bei atmosphärischem Druck sind vorhanden. Die Hochdruckversuche bei gasturbinenähnlichen Bedingungen bis zu einem Druck von 30 bar werden seit Jahren erfolgreich am Einzelbrennerteststand am Institut für Antriebstechnik, DLR Köln, durchgeführt. Diese Experimente stellen den letzten und wichtigsten Schritt in der Entwicklung vor dem Test an der Gasturbine dar [49].

1.5 Zusammenarbeit mit Anderen

Alstom ist in mehreren internationalen Forschungsprojekten zum Thema CO₂-freie, fossilbrennstoffgefeuerte Kraftwerke stark involviert, sowohl bei den Lösungen, bei denen CO₂-Abscheidung vor als auch nach der Verbrennung stattfindet (Pre- und Postcombustion Sequestration).

Bei der letzteren Option ist z.B. das COORETEC - Vorhaben 2.1.5 momentan am laufen, das die Vormischverbrennung bei reduziertem Sauerstoffpartialdruck zum Thema hat, die im Fall einer hypothetischen Gasturbine mit Abgasrückführung zu beherrschen wäre. Die Abgasrückführungstechnologie bietet dabei den Vorteil, dass die bedeutenden Abgasmassenströme, die bei einer Postcombustion - Anwendung zur CO₂-Abtrennung zu behandeln sind, deutlich reduziert werden können, wobei der Abscheidungsprozess wirtschaftlich vorteilhafter wird. Diese Alternativtechnologie bietet eine gute Ergänzung zur in diesem Vorhaben verfolgten Strategie.

Weitere Projekte im Europäischen Forschungsrahmen sind dem Thema Precombustion Capture gewidmet, wie z.B. BIGCCS, BIGCO₂, BIGH₂, ENCAP, und DECARBit. Alstom, und zum Teil auch der Lehrstuhl für Thermodynamik und das DLR, sind an diesen Initiativen beteiligt. Diese lieferten, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, Vorarbeiten zum jetzigen Vorhaben, sowie die Möglichkeit zum Informationsaustausch und zur Nutzung von Synergien bei den laufenden Tätigkeiten.

Da bei der Entwicklung von neuen Brennertechnologien einer der Hauptschwerpunkte die Betriebsstabilität ist und einer der Hauptbestandteile des Produktentwicklungsprozesses die thermoakustische Analyse ist, sind auch frühere Forschungsprojekte zum Thema Thermoakustik von Bedeutung für das jetzige Vorhaben. Einige Grundlagen sind aus den AG Turbo Projekten COOREFF-T Vorhaben 2.1.1 und 2.1.2 sowie aus verschiedenen Projekte im Rahmen der KW21-Forschungsinitiative der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern zu gewinnen. Im Detail, sind Kenntnisse im Bereich des thermoakustischen Verhalten bei gestuften Vormischbrennersystemen aus dem COOREFF-T Vorhaben 2.1.2 vorhanden, sowie Infrastruktur und Messmethodik aus dem COOREFF-T Vorhaben 2.1.1 und dem KW21 Projekt GV4 „Ringbrennkammer-schwingungen“ verfügbar. Weiterer Informationsaustausch zum Thema Thermoakustik bestand mit dem derzeit laufenden KW21 II Projekt BY15 zum Einfluss neuer brennstoffflexibler Vormischbrenner auf die thermoakustischen Eigenschaften von Ringbrennkammern.

Weitere unterstützende Messungen wurden im Rahmen des KW21-Programms in dem Projekt: GV2 „Zünd- und Löschverhalten von Erdgasen in modernen Gasturbinenbrennkammern“ mit EnBW und dem Institut für Verbrennungstechnik, DLR Stuttgart durchgeführt, wobei die Kinetik der Synthesegasverbrennung an Stoßrohrexperimenten experimentell validiert wurde.

2 Ergebnisse

In diesem Vorhaben [1] wurde das Potential des Brennstoffimpulses zur Anpassung der Flammenstabilisierung an die Verbrennungseigenschaften unterschiedlich reaktiver Brennstoffe anhand eines drallstabilisierten Vormischbrenners untersucht. Ziel war die Entwicklung eines brennstoffflexiblen Verbrennungssystems für H₂-haltige Brennstoffe. Die Ergebnisse theoretischer, numerischer sowie experimenteller Forschungsarbeiten (Wasserkanal, atm. Verbrennungs- und Hockdruckversuche) werden in diesem Kapitel vorgestellt.

2.1 Designkonzept

Nach Beleuchtung der verschiedenen Vor- und Nachteile bereits existierender Verbrennungssysteme wie z.B. des Alstom EV Brenners (Vorhaben 2.1.2) und des TD1 Brenners des Lehrstuhls für Thermodynamik, wurde für dieses Vorhaben eine bereits zuvor vom Antragsteller patentierte, aber nicht weiterverfolgte Basisgeometrie [2] gewählt. Der Drallerzeuger basiert auf einem dickwandigen, hohlen Kegelstumpf mit vier, symmetrisch über den Umfang angeordneten, direkt in die Kegelwand eingefrästen tangentialen Schlitzten. Der Großteil der Verbrennungsluft strömt in tangentialer Richtung durch die Schlitzten in den Drallerzeuger. Die in axialer Richtung im Mischrohr folgende Reduzierung des Strömungsquerschnitts hat durch die Erhöhung der axialen Geschwindigkeitskomponente einen starken, vor allem homogenisierenden Einfluss auf das Strömungsfeld [2]. Neben einer kleiner werdenden Drallzahl generiert das Mischrohr aber auch zusätzliche Mischlänge und lässt somit eine bessere Feinmischung am Brenneraustritt und somit niedrige Emissionen erwarten.

Durch den plötzlichen Querschnittsprung am Übergang vom Mischrohr in die Brennkammer wird das Wirbelaufplatzen unmittelbar nach dem Brenneraustritt induziert. Die Position der Rückströmblase kann durch eine unverdrallte Kernströmung optimiert werden. Der verbleibende Teil der Verbrennungsluft strömt dafür durch einen Ringspalt an der stumpfen Kegelspitze. Am Brenneraustritt kann optional noch ein Diffusor angebracht werden. Dieser soll Beeinflussungen des Strömungsfelds durch im Maschinenbetrieb vorhandene Nachbarbrenner auf die Flammenspitze minimieren und damit die Stabilität erhöhen.

Die auf zwei unterschiedlichen Konzepten beruhende Strategie zur Brennstoffeindüsung ist ebenfalls in Abbildung 2.1.1 dargestellt. Der erste Teil des Konzepts besteht aus einer Eindüsung durch kleine Bohrungen entlang der inneren, scharfen Kante der

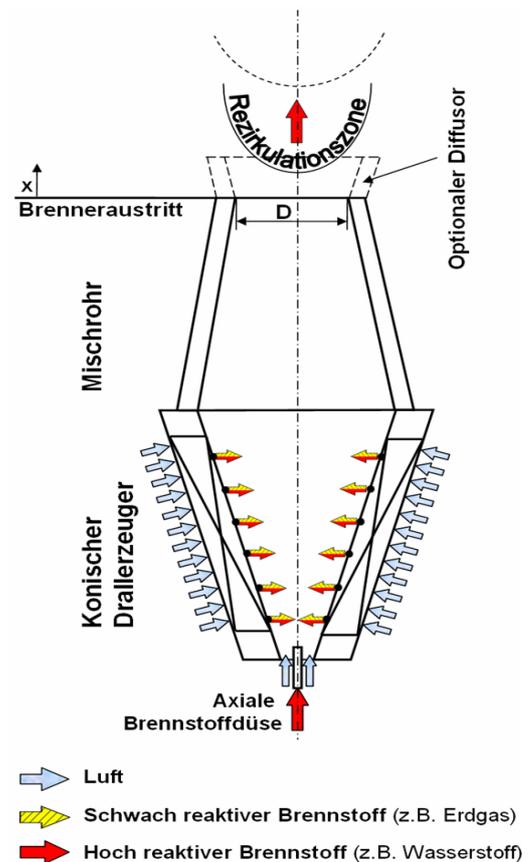


Abbildung 2.1.1: Brennergeometrie und Brennstoffeindüsungskonzept

tangentialen Schlitze, die im Folgenden Schlitzeindüsung genannt wird. Mit dieser Eindüsungsmethode soll das Hauptströmungsfeld der Verbrennungsluft so wenig wie möglich beeinflusst werden. Dahinter verbirgt sich der Gedanke, zunächst ein für die Erdgasverbrennung optimiertes Verbrennungssystem inklusive der entsprechenden Aerodynamik zu entwickeln und darauf aufbauend durch, aus Sicht der Flammenstabilisierung günstige Beeinflussung der Aerodynamik die Brennstoffflexibilität zu ermöglichen. Bisherige Forschungsarbeiten zeigen, dass Erdgasflammen bzw. Flammen schwach reaktiver Brennstoffe sich besonders gut mit Hilfe einer großen, starken Rückströmzone und dem dafür notwendigen hohem Drall stabilisieren lassen. Andererseits lassen sich Syngas- und Wasserstoffflammen bzw. Flammen hoch reaktiver Brennstoffe besser mit weniger Drall und einem in Strömungsrichtung späteren bzw. gar keinem Wirbelaufplatzen, also einem verdrallten Freistrahle in die Brennkammer stabilisieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Schlitzeindüsung ist die Vermeidung der Ausbildung von Stauzonen und Scherschichten mit hoher Turbulenz, da diese in der Nähe der Brennstoffstrahlen als Flammenhalter wirken könnten. Die Brennstoffeindüsung zwischen die durch die Schlitze einströmende Luft und die, die bereits im Drallerzeuger rotiert, führt zu einer hohen Sicherheit gegen die unerwünschte Flammenstabilisierung nahe der Brennstoffbohrungen im Brenner. Dieser Aspekt ist besonders für die Eindüsung der hoch reaktiven Brennstoffe relevant, auch wenn die Schlitzeindüsung für schwach reaktive Brennstoffe konzipiert ist. Größe und Anzahl der Brennstoffbohrungen wurden entsprechend dem, aus der Erdgasverbrennung resultierenden Brennstoffvolumenstrom ausgelegt. Der Idee dieses Vorhabens folgend kann daher nur der Anteil des hoch reaktiven Brennstoffvolumenstroms entlang der Schlitze eingedüst werden, der den selben Impuls generiert wie der schwach reaktive Brennstoffvolumenstrom. Dies eröffnet die Möglichkeit die Wirbeldynamik des Brenners mit dem zusätzlich verfügbaren Impuls des verbleibenden hoch reaktiven Brennstoffs zu beeinflussen.

Der verbleibende hoch reaktive Brennstoff wird dazu durch eine Düse in der Mitte des axialen Einlasses eingedüst. Das eingedüste Syngas bzw. der eingedüste Wasserstoff generiert einen zusätzlichen axialen Impuls, welcher eine Verschiebung der Rückströmzone nach stromab ermöglicht oder in extremen Fällen sogar nur einen turbulenten Drallstrahl ohne Rückströmzone in der Brennkammer generiert. Ein wichtiger, für die Betriebssicherheit des Brenners relevanter Aspekt ist, dass die Drallzahl reduziert wird und der Totaldruck auf der Brennerachse erhöht wird. Beide Punkte haben sich als essentiell erwiesen, um Flammenrückschlag durch Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB) zu vermeiden [3, 4, 5, 6, 7]. Die Mischungsqualität und damit die späteren NO_x Emissionen betreffend, muss wohl ein Kompromiss gefunden werden zwischen genügend Impuls zur Anpassung des Strömungsfelds in einem für die Flammenstabilisierung günstigen Rahmen und der Ausbildung eines fetten Wirbelkerns. Durch die lange Mischstrecke und die Interaktion zwischen der verdrallten Strömung durch die Schlitze und der unverdrallten Kernströmung besteht allerdings ein hohes Potential, dass eine gute Mischungsqualität und damit niedrige NO_x -Emissionen erreicht werden können.

2.2 Isotherme Untersuchung skaliertener Brennergeometrien

Zur Überprüfung des erarbeiteten Designkonzepts und zur Bestimmung der Dimensionen der gerade beschriebenen Brennergeometrie sind in einem ersten Schritt 3D CFD Simulationen durchgeführt worden. Mit Hilfe dieser Berechnungen wurde eine Referenzgeometrie definiert, welche als Basis für die anschließenden Wasserkanalexperi-

mente diene. Das Erzielen einer für das Vorhaben geeigneten Brenneraerodynamik und eine hohe Mischungseffizienz stellen die zwei Hauptziele der folgenden nichtreaktiven, experimentellen Untersuchungen dar. Für diese Experimente kam der, am Lehrstuhl für Thermodynamik, während dieses Projekts neu installierte Wasserkanal zum Einsatz. Die berührungslosen, laseroptischen Messtechniken particle image velocimetry (PIV) und Laser Induced Fluorescence (LIF) sind sehr flexible, effiziente, zuverlässige und allgemein in Forschung und Industrie eingesetzte experimentelle Methoden und wurden daher auch hier eingesetzt.

2.2.1 Bestimmung der Referenzgeometrie (Numerische Untersuchung)

Die Dimensionen der einzelnen Geometrieparameter wie z.B. Drallerzeugetlänge, Schlitzbreite, Mischrohrlänge und Durchmesser des Axialeinlasses haben einen beträchtlichen Einfluss auf das resultierende Strömungsfeld des Verbrennungssystems. Um einen Rahmen für diese Größen vor der Fertigung eines ersten Brennermodells zur Generierung eines für die Erdgasverbrennung optimierten Systems festzulegen, wurden zunächst 3D CFD Simulationen durchgeführt. In Abbildung 2.2.1 ist das verwendete 3D Modell inklusive der verwendeten Randbedingungen abgebildet. Die Durchmesser der Verbrennungsluftspeisekammer, im Folgenden Plenum genannt, und der Brennkammer, sind dabei an den atmosphärischen Verbrennungsprüfstand am Lehrstuhl für Thermodynamik angepasst. Um den Einfluss der unverdrallten Kernströmung zu simulieren, wurde ein sog. Porous-Jump als Randbedingung im axialen Einlass des Drallerzeuers gewählt.

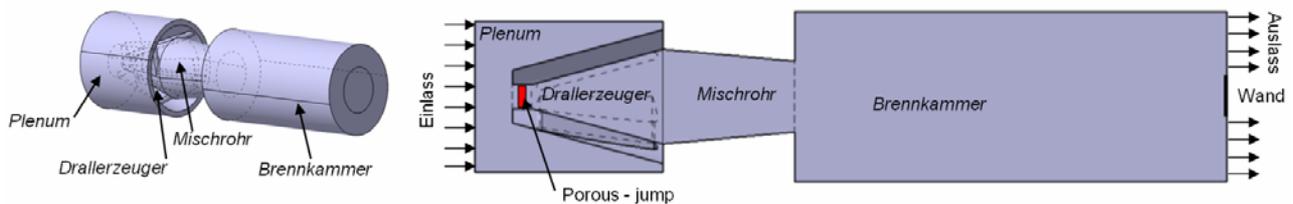


Abbildung 2.2.1: 3D CFD Modell des Verbrennungssystems

Auf Basis dieser 3D/CFD/RMS/URANS Simulationen mit zahlreichen Parametervariationen konnte der erste Rahmen für die Dimensionen der Brennergeometrie, welche die für eine gute Flammenstabilisierung notwendigen Kriterien an die Aerodynamik erfüllt, gefunden werden. Diese Geometrie stellt die Basis für die, in den nachfolgenden Experimenten genutzten Brennermodelle dar. In Abbildung 2.2.2 sind die entsprechenden Geschwindigkeitsfelder normiert auf die mittlere Brenneraustrittsgeschwindigkeit dargestellt.

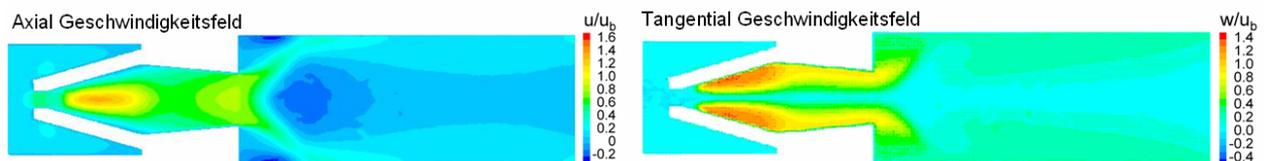


Abbildung 2.2.2: 3D CFD Geschwindigkeitsfelder

Das axiale Geschwindigkeitsfeld zeigt eine hohe axiale Geschwindigkeit auf der Achse des Drallerzeuers. Bis zum Übergang zum Mischrohr wird diese bis zum größten Querschnitt zunächst etwas verzögert, bevor sie in Richtung Brenneraustritt durch das konische Mischrohr wieder beschleunigt wird. Das Mischrohr hat eine homogenisierende Wirkung auf das Geschwindigkeitsprofil, welches sich von einem eher parabelförmigen, spitzigen Profil am Drallerzeugetaustritt bzw. Mischrohereintritt, zu einem deutlich in

Richtung Blockprofil abgeflachten Profil am Brenneraustritt verändert. Das Wirbelaufplatzen mit starker Rückströmung tritt wie gewünscht stromab des Brenneraustritts auf und hat somit ausreichen Abstand zum kleinsten, kritischen Querschnitt des Mischrohrs. Durch den relativ kleinen Querschnittsprung zwischen Brenneraustritt und Brennkammer bildet sich in der Simulation das sog. Wall-jet-regime [8, 9, 10], mit innerer und äußerer Rezirkulationszone aus. Die tangential Geschwindigkeitskomponente ist an den Schlitzeinlässen am höchsten und zeigt über die gesamte Mischrohlänge, bis zum Brenneraustritt einen bemerkenswert großen Wirbelkernradius verglichen mit dem EV oder TD1 Brenner.

2.2.2 Versuchsanlage

Der Wasserkanal des Lehrstuhls für Thermodynamik ist in Abbildung 2.2.3 schematisch dargestellt und stellt das Herzstück des im Rahmen dieses Projekts errichteten Wasserlabors dar [12]. Der Wasserkanal wird senkrecht von unten nach oben mit Wasser durchströmt und kann im wesentlichen in drei Bereiche unterteilt werden: Zulauf, Messstrecke und Ablauf. Zwei getrennt regelbare Wasserpumpen versorgen den Kanal für PIV Messungen mit Seeding versetztem Wasser oder für LIF Messungen einmal mit klarem Wasser (die Luftströmung repräsentierend) und einmal mit eingefärbten Wasser (die Brennstoffströmung repräsentierend) und ermöglichen einen Gesamtvolumenstrom von ca. $10\text{m}^3/\text{h}$ - $50\text{m}^3/\text{h}$. Dies ermöglichte eine Reynoldszahl-Variation von 90.000 bis 120.000 für die hier durchgeführten Experimente. Vier transparente Seitenscheiben und eine weitere am stromab liegenden Ende des Wasserkanals ermöglichen nahezu voll-ständigen optischen Zugang zu dem 1,5m langen, rechteckigen Messbereich (Querschnitt: 380mm x 410mm). Mit Hilfe von zwei Trennplatten wird der Basisbrenner bestehend aus einem transparenten Drallerzeuger und Mischrohr im Wasserkanal montiert.

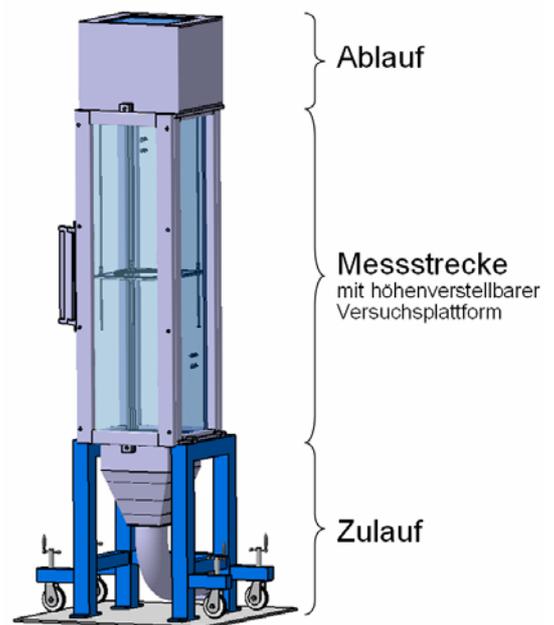


Abbildung 2.2.3: Wasserkanal (TUM)

Damit ergibt sich der gleiche Aufbau wie er auch in den meisten Verbrennungsprüfständen und später in der Maschine zu finden ist - in Strömungsrichtung: Plenum, Drallerzeuger, Mischrohr und Brennkammer. Um die Ähnlichkeit zu den nachfolgenden Verbrennungsversuchen, also zwischen der isothermen turbulenten Strömung im Wasserkanal und der Betriebspunkte in den Verbrennungsprüfständen zu gewährleisten wurden neben der geometrischen Ähnlichkeit, die Reynoldszahlen und Impuls-Stromdichteverhältnisse an die entsprechenden Betriebspunkte angepasst.

2.2.3 Messtechnik

Als Messtechnik für die Geschwindigkeitsfelder wurde ein PIV System mit einem Nd:YAG Doppelpulslaser mit 2 "cavities" (Wellenlänge: 523 nm) verwendet. Der mit Hilfe eines Laserarms und einer Optik aufgespannte Lichtschnitt, konnte bequem auf die jeweiligen Messebenen justiert werden. Als Seeding wurden dem Wasser runde Polyamid Partikel zugemischt. Das gestreute Laserlicht wird mit einer 80C60 HiSense MK1 CCD Kamera aufgenommen. Die Kamera erlaubt eine räumliche Auflösung von 1280 x 1024 Pixel. Die Geschwindigkeitsfelder wurden über 500 Bildpaare gemittelt.

Wegen der Symmetrie zur Brennerachse wird in diesem Bericht nur die Hälfte der jeweiligen Messebene präsentiert.

Für die Messung der Konzentrationsfelder, zur Bestimmung der Mischungsqualität wurde die Messmethode der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) im Wasserkanal angewendet. Ein Argon-Ionen Laser im "multi-line" Betrieb regt das dem Brennstoffvolumenstrom repräsentierenden Wasserstrom beigefügte Uranin an, welches unter diesen Bedingungen sein Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von 560 nm hat. Der mit Hilfe von zwei Zylinderlinsen aufgespannte Lichtschnitt beleuchtet die entsprechende Messebene. Mit einer senkrecht zur jeweiligen Messebene montierten APX I² Kamera wird durch einen Sperrfilter (Transmission von 539nm bis 1200nm) je Messreihe 2048 Bilder mit einer Aufnahmerate von 250fps und einer Auflösung von 1024x1024Pixel aufgenommen. Um möglichst exakte Information des Fluoreszenzsignals zu gewinnen, müssen die aufgenommenen Bilder nachbearbeitet und korrigiert werden. Unter anderem ist eine Hintergrund-, Lichtschnitt- und Absorptionskorrektur, als auch eine Konzentrationskalibrierung durchgeführt worden.

2.2.4 Versuchskonfigurationen

Nach einer hier nicht aufgeführten, umfangreichen Optimierung der Grund-aerodynamik des Referenzbrenners aus der numerischen Studie für die Erdgasverbrennung wurde der Einfluss der verschiedenen Brennstoffeindüsungsmethoden sowie deren zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten auf diese Grund-aerodynamik detailliert untersucht. In Tabelle 2.2.1 sind die untersuchten Eindüsungsmethoden aufgelistet und für mehr Klarheit in der nachfolgenden Beschreibung in Spalte 1 durchnummeriert.

Nr.	Brennstoffanteil durch		Anzahl Schlitze (* obere Hälfte)	Brennstoff- volumenstrom- anteil [%]
	Axial Ein- düsung [%]	Schlitzein- düsung [%]		
Referenz	0	0	0	0
1 (a,b,c)	0	100	4	5; 7,5; 10
2 (a,b,c)	0	100	2	5; 7,5; 10
3 (a,b,c)	100	0	0	5; 7,5; 10
4 (a,b,c)	25	75	4	5; 7,5; 10
5 (a,b,c)	25	75	2	5; 7,5; 10
6 (a,b,c)	50	50	4	5; 7,5; 10
7 (a,b,c)	50	50	2	5; 7,5; 10
8 (a,b,c)	75	25	4	5; 7,5; 10
9 (a,b,c)	75	25	2	5; 7,5; 10
10 (a,b,c)	0	100	4*	5; 7,5; 10
11 (a,b,c)	0	100	2*	5; 7,5; 10
12 (a,b,c)	25	75	4*	5; 7,5; 10
13 (a,b,c)	25	75	2*	5; 7,5; 10
14 (a,b,c)	50	50	4*	5; 7,5; 10
15 (a,b,c)	50	50	2*	5; 7,5; 10
16 (a,b,c)	75	25	4*	5; 7,5; 10
17 (a,b,c)	75	25	2*	5; 7,5; 10

Tabelle 2.2.1: Untersuchte Eindüsungsmethoden

Die Aufteilung des den Brennstoff repräsentierenden Volumenstroms auf die beiden vorgestellten Eindüsungsmethoden ist in den Spalten 2 und 3 definiert. Dabei zeigt Spalte 2 den Anteil des Brennstoffvolumenstroms, der für die axiale Eindüsung und Spalte 3 den Anteil, der für die Schlitzeindüsung verwendet wurde. Bei der Schlitzeindüsung konnte zusätzlich noch zwischen der Eindüsung entlang aller vier Schlitze oder zweier gegenüberliegender Schlitze gewählt werden, sowie der Eindüsung über die gesamte Länge der Schlitze oder nur über die stromab gelegene Hälfte (durch * gekennzeichnet). Dies ist in Spalte 4 definiert. Spalte 5 zeigt die gewählten Verhältnisse zwischen dem, den Brennstoffvolumenstrom repräsentierenden, eingefärbten Volumen-

strom und dem Gesamtvolumenstrom, um die aus den verschiedenen Brennstoffen resultierenden Impulsstromdichteverhältnisse zu realisieren (a, b, c hinter der Versuchsnummern aus Spalte 1 kennzeichnet dies entsprechend).

Um den Rahmen dieses Berichts nicht zu sprengen wird im Folgenden nur auf die Einzeleindüsungsmethoden und den Referenzfall ohne Brennstoffeindüsung eingegangen. Gemessen wurde auf verschiedenen Messebenen. Für die Charakterisierung der Aerodynamik wurde primär die senkrechte Mittelebene stromab des Brenneraustritts herangezogen. Für Drallzahlbestimmungen und Informationen im Mischrohr wurde u.a. auch der Brenneraustrittsquerschnitt, senkrecht zur Brennerachse vermessen und die senkrechte Mittelebene im Mischrohr. Für die Konzentrationsverteilungen wurde primär der Brenneraustrittsquerschnitt betrachtet, aber auch Messungen in der Mischrohrmittelebene durchgeführt.

2.2.5 Aerodynamik

Bevor die Ergebnisse der Brennstoffeindüsung präsentiert werden, werden zunächst die aerodynamischen Eigenschaften des Brenners ohne Brennstoffeindüsung vorgestellt. Das resultierende Strömungsfeld im Brennkammermittelschnitt ist in Abbildung 2.2.4 links, unter dem Namen Referenz dargestellt. Der Staupunkt liegt nahe am Brenneraustritt bei ungefähr $0.2 x/D$ ($x=0$ am Brenneraustritt). Die nachfolgende Rückströmzone hat einen Öffnungswinkel von ca. 15° und endet bei ca. $1.3 x/D$. Die, hier nicht präsentierten, RM-Werte zeigen eine relativ stabile Position des Staupunkts der Rückströmzone. Diese Eigenschaften deuten auf ein für die Erdgasverbrennung gut geeignetes Strömungsfeld hin, wie später in den Verbrennungsversuchen bestätigt wird.

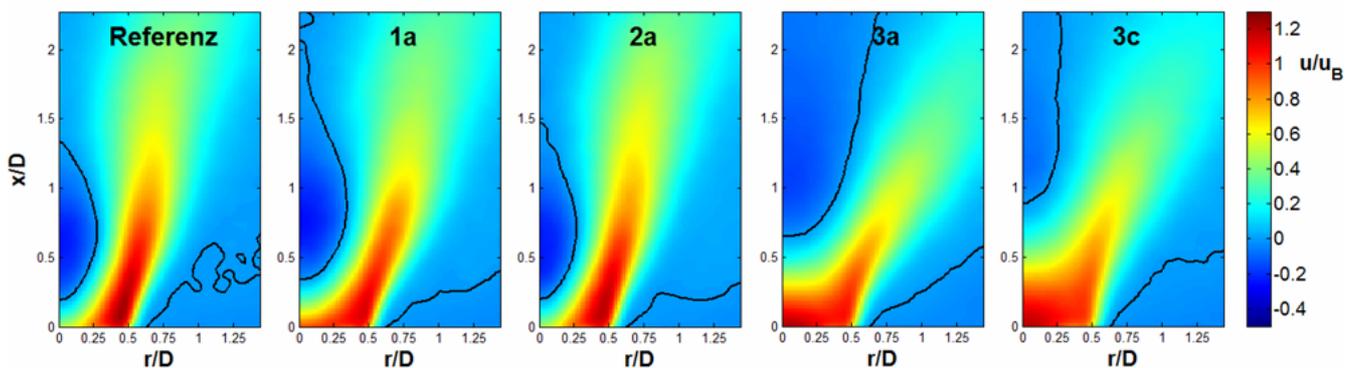


Abbildung 2.2.4: PIV Ergebnisse, Brennkammermittelschnitt, axiales Strömungsfeld

Die Konfiguration Nr. 1a und 2a in Abbildung 2.2.4 zeigen die Ergebnisse der PIV Messung mit den zwei Varianten der Schlitzdüsung (1: Schlitzdüsung entlang aller 4 Schlitze; 2: Schlitzdüsung entlang zweier gegenüberliegender Schlitze); jeweils mit 5% Brennstoffvolumenstromanteil (a) zur Repräsentation der Erdgasverbrennung. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Strömungsfeld der Konfiguration 2a der Referenzgeometrie am ähnlichsten ist. Aber auch die Aerodynamik von Konfiguration 1a wird kaum von der Brennstoffeindüsung beeinflusst. Der Drall ist hoch und die resultierende Rückströmzone ist nahe dem Brenneraustritt. Die geringere Drallzahl der Konfiguration 1 erklärt sich durch die niedrigere Eindüsungsgeschwindigkeit (gleicher Brennstoffvolumenstrom, aber doppelt so viele Brennstoffbohrungen). Dies führt zu einer leicht nach stromab verschobenen Rückströmzone und einer länglicheren Rückströmzone. Die beobachteten, geringen Veränderungen beider Strömungsfelder weisen alle notwendigen Eigenschaften für eine Flammenstabilisierung schwach reaktiver Brennstoffe auf.

Das Strömungsfeld der axialen Brennstoffeindüsung durch eine Düse in der Mitte des axialen Einlasses (ohne Schlitzdüse) ist unter der Nr. 3 in Abbildung 2.2.4 zu sehen. Diese Versuche waren durchgeführt worden, um das Potential der axialen Brennstoffeindüsung zur Beeinflussung der Wirbeldynamik und der Mischung (nachfolgender Abschnitt) zu ermitteln. In Nr. 3a wurden 5% Brennstoff und in Nr. 3c wurden 10% Brennstoff eingedüst. Im Vergleich zum Referenzfeld wird die Rückströmzone weit nach stromab verschoben, zu $0.7 \times D$ für 5% und zu $0.9 \times D$ für 10% Brennstoff. Mit weiterer Erhöhung des Brennstoffvolumenstroms (hier nicht gezeigt) kann die Rückströmzone komplett vernichtet werden, so dass ein rotierender Freistrahler ohne Wirbelauftreten in der Brennkammer entsteht. Das bestätigt das hohe Potential des Brennstoffimpulses und die Möglichkeit, durch den zusätzlich verfügbaren Impuls der hoch reaktiven Brennstoffe die Brenneraerodynamik positiv zu beeinflussen. Ebenso klar erkennbar ist eine Veränderung in der Form der Rückströmzone. Diese ist jetzt größer und hat eine parabolische Form im Messbereich. Der Öffnungswinkel der Parabel wird mit steigendem axialem Impuls kleiner, bis diese schließlich komplett zerstört wird. Dies deutet auf die erwartete Reduktion der Drallzahl hin. In Kombination mit dem höheren Totaldruck auf der Brennerachse sollte auf diese Weise die Resistenz des Brenners gegen CIVB deutlich erhöht werden können. Diese Veränderungen versprechen eine für die Verbrennung von hoch reaktiven Brennstoffen geeignete Flammenstabilisierung.

Die hier nicht vorgestellten Kombinationen der einzelnen Eindüsungsmethoden zeigen prinzipiell die sich mittels Addition der nach ihrem Brennstoffanteil gewichteten Strömungsfelder der einzelnen Eindüsungsmethoden. Die aus den verschiedenen Kombinationen und Brennstoffanteilen resultierenden Impulse können einzelne Effekte allerdings verstärken oder auch abschwächen.

2.2.6 Mischung

Nach den aerodynamischen Untersuchungen ist der zweite wichtige zu überprüfende und zu optimierende Aspekt die aus der jeweiligen Brennstoffeindüsung resultierende Konzentrationsverteilung bzw. die Mischungsqualität, um eine Abschätzung der später zu erwartenden Emissionen zu ermöglichen.

Die, aus den LIF Messungen gewonnene radiale Konzentrationsverteilung am Brenneraustritt sowie die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung an fünf ausgewählten Positionen sind für die einzelnen Eindüsungsmethoden in Abbildung 2.2.5 bzw. 2.2.6 dargestellt. Für die 4 Schlitzdüse (1) bzw. die 2 Schlitzdüse (2) zeigt sich für alle Brennstoffvolumenstromanteile, dass auf der Achse leichter Brennstoffmangel und auf hohen Radien eher ein Brennstoffüberschuss zu erwarten ist. Diese Konzentrationsverteilung begünstigt die Rückschlagssicherheit des Brenners, da der Einfluss der Flamme im Bereich der sensiblen Flammenspitze auf der Brennerachse durch die mageren Bedingungen verringert wird [3, 18]. Die zusätzliche Analyse der instantanen Messbilder zeigte, dass die Mischungsfluktuationen für die 4 Schlitzdüse nur leicht besser sind als die der 2 Schlitzdüse. Das deutet darauf hin, dass im Fall der zwei Schlitzdüsen die Luft der 2 nicht mit Brennstoff versorgten Schlitze sich im Mischrohr nahezu vollständig mit der Brennstoff-Luft Mischung aus den zwei anderen Schlitzen vermischt. Obwohl in beiden Konfigurationen kein Brennstoff auf der Achse eingedüst wurde, konnte kein gravierendes Brennstoffdefizit auf der Brennerachse, am Brenneraustritt und in der Mischstrecke festgestellt werden. Die lokalen Standardabweichungen zeigten Mischungsfluktuationen zwischen 4% und 8%. Das für eine optimale Mischung zu erreichende Ziel von 5% konnte daher nicht ganz erreicht werden. Die folgenden Verbrennungsversuche zeigten allerdings, dass die tatsächlichen Emissionen

trotzdem einer extern vorgemischten und damit bestmöglichen Mischungsqualität entsprechen.

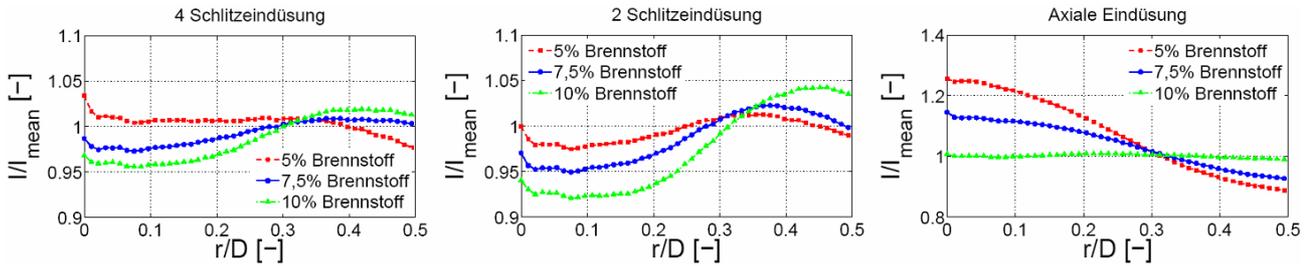


Abbildung 2.2.5: LIF Ergebnisse, radiale Konzentrationsverteilung Brenneraustritt

Die Ergebnisse der Mischungsexperimente für die axiale Eindüsung (ebenfalls Abbildung 2.2.5 und 2.2.6) zeigen die erwartete Charakteristik, mit mageren Bedingungen auf höheren Radien und Brennstoffüberschuss im Zentrum der Strömung (Skalierung y-Achse beachten). Sehr wahrscheinlich wird durch die stärkere Interaktionen zwischen der unverdrallten Kernströmung und der verdrallten Hauptströmung durch die Schlitze, die radiale Konzentrationsverteilung homogener mit steigendem Brennstoffvolumenstrom bzw. Brennstoffimpuls. Etwas unerwartet war dagegen, dass sogar magerere Brennstoff-Luft Mischungen auf der Achse und fettere Bedingungen auf hohem Radius erzielt werden konnten. Lokale Standardabweichungen und zeitliche Analysen zeigten jedoch sehr hohe Fluktuationen, welche zu hohen Ungemischtheiten und höheren NO_x Emissionen führen können.

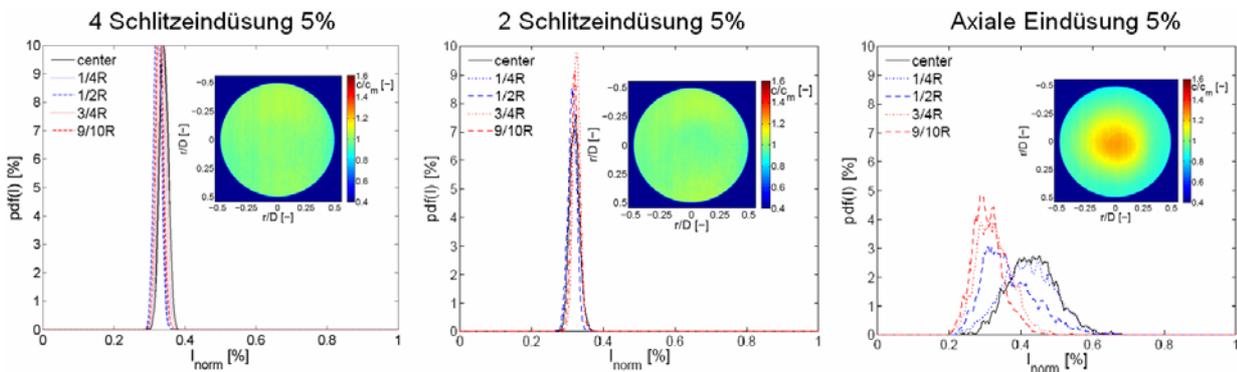
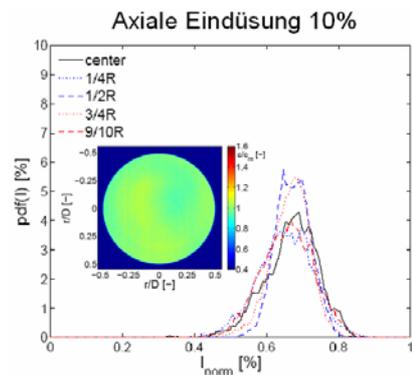


Abbildung 2.2.6: LIF Ergebnisse, Mischungs-PDF's und Mittelwertbilder

Der zur Brennstoffeindüsung erarbeiteten Strategie folgend, soll nur der Anteil des hoch reaktiven Brennstoffs entlang der Schlitze eingedüst werden, der den gleichen Impuls zur Verfügung stellt wie das Erdgas. Der zur Erzielung der gleichen Leistung verbleibende hoch reaktive Brennstoffvolumen soll axial eingedüst und zur Manipulation der Aerodynamik verwendet werden. Daher wurden auch hier alle oben genannten Kombinationen (Tabelle 2.2.1) untersucht. Die Versuche zeigten, dass Kombinationen aus 25% bis 50% durch die Schlitzeindüsung und 50% bis 75% durch die axiale Eindüsung durchaus eine gute Konzentrationsverteilung, mit geringen Fluktuationen und für die Syngas- bzw. Wasserstoffverbrennung günstige Strömungseigenschaften aufweisen, so dass die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte möglich erscheint.



2.3 Atmosphärische Verbrennung mit skaliertem Brennerkonzept

2.3.1 Prüfstand, Messtechnik und Versuchsprozeduren

Die atmosphärischen Verbrennungsversuche wurden an einem Prüfstand mit 400kW thermischer Leistung durchgeführt (Abbildung 2.3.1). Der Prüfstand wird über einen Kompressor mit Luft versorgt, die in drei Vorheizern auf bis zu 500°C erhitzt werden kann. In den hier durchgeführten Versuchen wurde eine Vorheiztemperatur von 400°C gewählt. Die Brennstoffversorgung erfolgt entweder perfekt vorgemischt (1), oder wie zuvor bereits beschrieben, direkt am Brenner (2a: axiale Brennstoffeindüsung auf der Achse; 2b: Brennstoffeindüsung entlang der Schlitz).

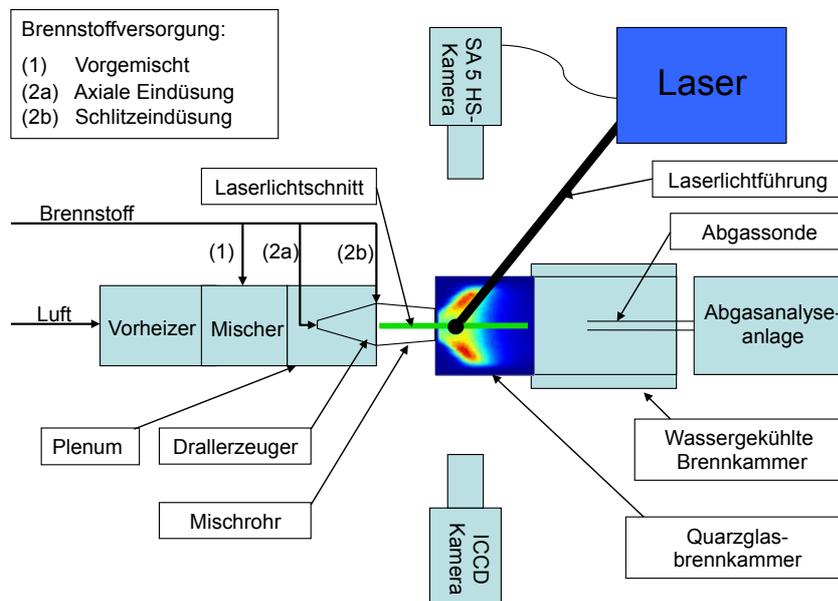


Abbildung 2.3.1: Atmosphärischer Verbrennungsprüfstand

Stromab dieser Medienversorgung befindet sich das Kernstück des Prüfstands. Hier sind der zuvor vorgestellte Drallerzeuger als auch Mischrohr und Brennkammer angebracht. Das Mischrohr sowie die Brennkammer sind aus Quarzglas (QG) gefertigt und erlauben somit eine vollständige optische Zugänglichkeit. Im Anschluss an die QG-Brennkammer befindet sich eine wassergekühlte und mit Keramiken isolierte Brennkammer, in der sich eine Abgassonde befindet.

Neben der Abgasmessung, wurden hier OH* Chemilumineszenz Aufnahmen, HS-PIV Messungen, aber auch Messungen mit Ionisationsdetektoren durchgeführt. Zur Messung des OH* Signals wurden zwei bildverstärkte Kamerasysteme eingesetzt. Für zeitlich hochauflösende Aufnahmen kam die Kamera APX I² der Firma Photron zum Einsatz und für alle anderen Messungen die Kamera Streakstar der Firma LA VISION. In beiden Fällen wurde ein UV Filter zur OH* Signal Filterung eingesetzt. Die Kamera wurde jeweils senkrecht zur Brennkammer bzw. zum Mischrohr aufgestellt. Die HS-PIV Messungen wurden mit der HS-Kamera SA5 der Firma Photron, welche mit einem New Wave Pegasus Nd:Ylf Laser gekoppelt wurde, durchgeführt. Als Seedingpartikel wurde hier TiO₂ benutzt, welches zwischen dem Vorheizer und dem Mischer eingebracht wurde. Bei den Ionisationsdetektoren handelt es sich um eine Eigenentwicklung, welche am Lehrstuhl durchgeführt wurde. Das Funktionsprinzip kann in [17] nachgelesen werden.

Sowohl an diesem wie auch am Hochdruckprüfstand (s.u.) wurden ähnliche Versuchsprozeduren angewandt: Zur Ermittlung der Stabilitätsgrenzen wurde jeweils ausgehend von einem stabilen Betriebspunkt der Luftmassenstrom konstant gehalten und die Luftzahl entweder erhöht oder verkleinert, bis das magere Flammenlöschen bzw. Flammenrückschlag detektiert wurde. Bei rückschlagsresistenten Konfigurationen wurden die Versuche mit Erreichen der Stöchiometrie abgebrochen.

2.3.2 Erdgas Verbrennung

Eine Voraussetzung für die Untersuchungen mit Wasserstoff ist, dass der im Wasserkanal optimierte Brenner auch für den Betrieb mit Erdgas eine geeignete Flammenstabilisierung, Rückschlagssicherheit, magere Löschgrenze, aber auch niedrige Emissionswerte aufweist.

Zu diesem Zweck wurden entsprechende Untersuchungen im vorgemischten Betrieb durchgeführt, bei denen gezeigt werden konnte, dass der Brenner auch bei sehr geringen Re-Zahlen ($Re=25000$) rückschlagsfrei bleibt. Die magere Löschgrenze wurde bei einer Flammentemperatur von 1550K erreicht, was ein typischer Wert für vorgemischte betriebene Brenner ist.

Neben den vorgemischten Versuchen wurden auch zwei verschiedene Brennstoffeindüsungskonzepte untersucht. Da ein zusätzlicher Axialimpuls zur Verbrennung von Erdgas nicht notwendig ist, wurde der Brennstoff in diesen Versuchen, wie zuvor beschrieben, entlang der Schlitze eingebracht, um gute Mischung zu erreichen. In einer ersten Versuchsreihe (Konfiguration 1) wurde die Eindüsung entlang aller Schlitze vorgenommen und in einer zweiten Konfiguration nur die Hälfte der Schlitze mit Brennstoff versorgt.

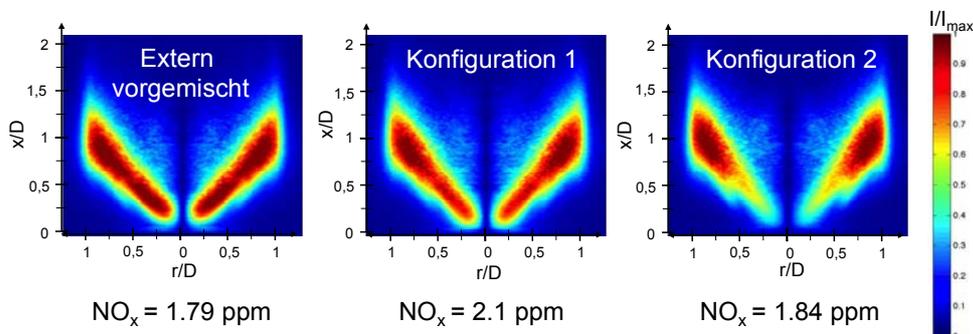


Abbildung 2.3.2: Einfluss der Brennstoffeindüsung auf OH* Signal

Als Vergleich wurde hier die extern vorgemischte Konfiguration herangezogen. Wie bei den Wasserkanal Ergebnissen sieht man auch in Abbildung 2.3.2 keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen. Aufgrund der im Wasserkanal gezeigten höheren Brennstoffkonzentrationen auf den äußeren Radien bei Konfiguration 1 und 2 folgt bei den Verbrennungsversuchen eine leichte Verlagerung der Flamme nach außen. Zur Quantifizierung der Mischungsgüte wurden jeweils NO_x Messungen bei einer adiabaten Flammentemperatur von 1770K und bei einer Leistung von 220kW durchgeführt. Die Ergebnisse für diese Untersuchung liegen in einem sehr guten Bereich verglichen mit den Werten, die man für vollkommen vorgemischte Systeme mit moderater Verweilzeit erwarten würde [20]. Die Tatsache, dass Konfiguration 2 sogar etwas besser ist als Konfiguration 1 kann damit erklärt werden, dass die Wandwärmeverluste aufgrund der verzögerten Reaktion vergrößert werden und somit die Temperatur in der Flamme sinkt.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen mit Erdgas eine hervorragende Rückschlagsstabilität, eine geeignete magere Löschgrenze und NO_x Emissionen für zwei Eindüsenkonfigurationen, die nahe am theoretisch möglichen Minimum liegen.

2.3.3 Wasserstoff Verbrennung

2.3.3.1 Charakterisierung des Flammenrückschlags

Ein essenzieller Punkt bei der Optimierung des Brenners und der Anpassung der Brennstoffeindüsung zur Vermeidung von Flammenrückschlägen ist eine genaue Charakterisierung der auftretenden Rückschlagsmechanismen, da die Gegenmaßnahmen bei Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB) und dem Rückschlag durch die Wandgrenzschicht (WRS) gänzlich andere sind. Alle Experimente in diesem Teil wurden bei einer mittleren Brenneraustrittsgeschwindigkeit von 21 m/s, mit reinem Wasserstoff und im extern vorgemischten Betrieb durchgeführt, letzteres um Einflüsse durch Mischungsgradienten auszuschließen. Die Experimente wurden auch bei höheren und niedrigeren Massenströmen durchgeführt, zeigten aber analoge Ergebnisse, weshalb hier nur die Ergebnisse für den einen Durchsatz dargestellt werden.

Es wurden zwei Konfigurationen untersucht, eine **mit Diffusor** am Mischrohrende und eine ohne. Die beobachteten Phänomene unterscheiden sich stark und werden im Folgenden beschrieben. Bei angeflanschem Diffusor beobachtet man reinen WRS, wobei dem WRS ein Wechsel in der Flammenstabilisierung vorhergeht, wie in Abbildung 2.3.3 dargestellt.

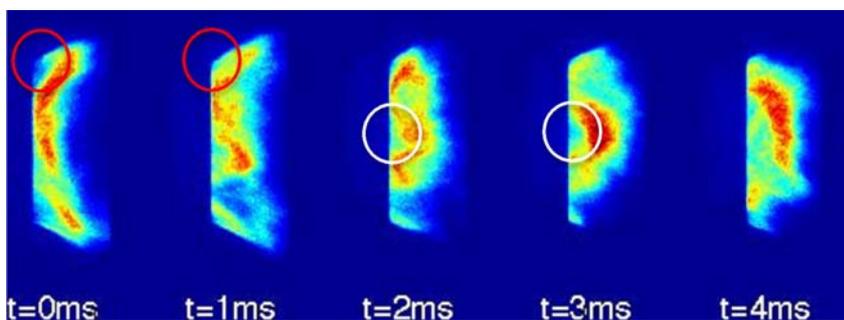


Abbildung 2.3.3: Wechsel der Flammen stabilisierungsform

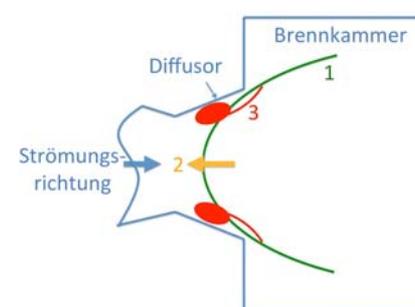


Abbildung 2.3.4: Schema der Flammenstabilisierung

Am OH^* Chemilumineszenzsignal wird deutlich, dass die Flamme anfangs noch hauptsächlich in der inneren Rezirkulationszone (RZZ) sitzt ($t=0\text{ms}$) und nur leichte Tendenzen aufweist in der äußeren Scherschicht brennen zu wollen. Beim weiteren Absenken der Luftzahl vollzieht sich dann ein Wechsel zu einer Flamme die nur noch in der äußeren Scherschicht stabilisiert.

Die schematische Skizze in Abbildung 2.3.4 versucht die Mechanismen, die dem zugrunde liegen, darzustellen. In grün dargestellt sieht man die Flamme vor dem Wechsel in der inneren RZZ sitzen. Beim Absenken der Luftzahl rutscht diese dann näher zum Brenneraustritt (2), was zur Folge hat, dass es der Flamme gelingt, in Diffusorwandnähe zu stabilisieren (3). Dies wiederum verdrängt die Hauptströmung und beschleunigt sie in Achsnähe. Dadurch wird die innere RZZ weiter in die Brennkammer geschoben. Aus den tiefenintegrierten OH^* Bildern kann man schließen, dass die Flamme nach diesem Vorgang in der äußeren Scherschicht brennt, was der Situation in einem Rohrbrenner ohne Drall sehr ähnlich ist. Aus dieser Situation heraus findet nun der WRS statt. In Abbildung 2.3.5 kann anhand des Chemilumineszenzsignals die Propagation der Flamme nachvollzogen werden. Zum Zeitpunkt $t=0\text{ms}$ sieht man die

Flamme zum ersten Mal im Mischrohr brennen. Wie durch die roten Pfeile dargestellt, rotiert sie dann gegen den Uhrzeigersinn entlang der dem Betrachter zugewandten Seite herunter bevor sie bei $t=7\text{ms}$ eine halbe Rotation abgeschlossen hat und wieder nach oben propagiert.

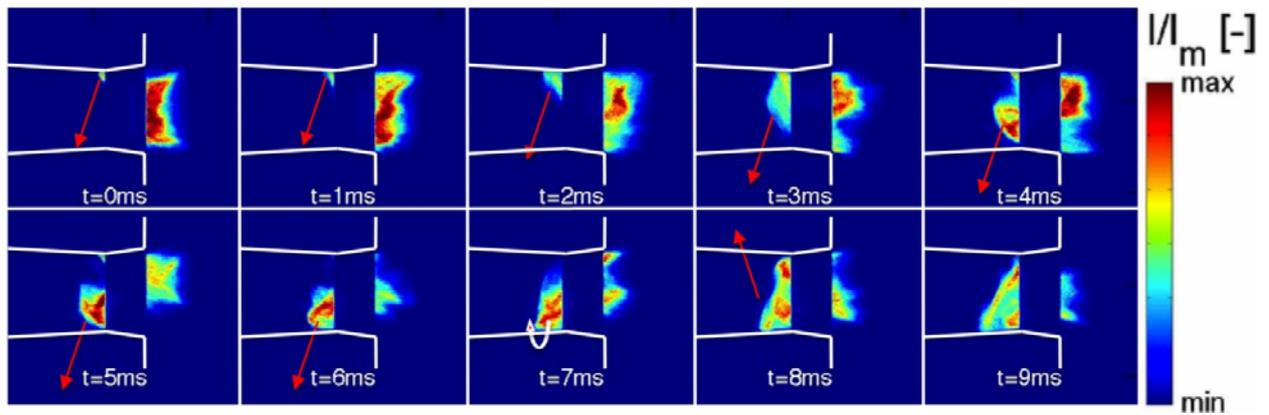


Abbildung 2.3.5: OH* Signal des Rückschlags durch die Wandgrenzschicht

Dieser Prozess setzt sich fort, bis die Flamme den Drallerzeuger erreicht. Die beobachtete Rotationsrichtung zeigt, dass dieser Effekt dem Drall des Brennstoffluftgemischs geschuldet ist.

Da die Bilder allerdings tiefenintegriert sind, ist es schwierig die dreidimensionale Flammenpropagation richtig sichtbar zu machen. Um dies dennoch zu erreichen wurde das Quarzglasmischrohr durch ein Mischrohr aus Edelstahl ersetzt, in das 24 Ionisationsdetektoren in Wandnähe eingeschraubt wurden. Diese Detektoren reagieren auf die Ionisation der Flamme und ermöglichen es, die Flamme während des WRS zu detektieren. Die Detektoren wurden in vier Reihen angeordnet und in jeder Reihe jeweils sechs Detektoren gleichmäßig um den Umfang verteilt (Abbildung 2.3.6). Die erste Reihe wurde stromauf des Brenneraustritts bei $x=-0.2 D$ platziert. Die drei weiteren Reihen wurden jeweils um $0.4 D$ weiter stromauf der vorherigen Reihe angebracht. Die Aufnahme rate lag bei 10kHz .

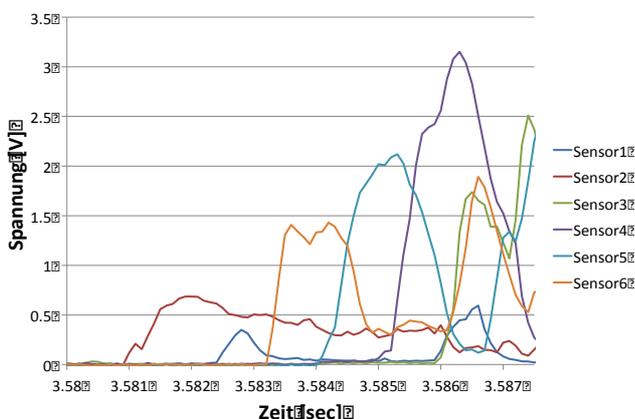


Abbildung 2.3.6a: Ionisationssignal der ersten Reihe während WRS

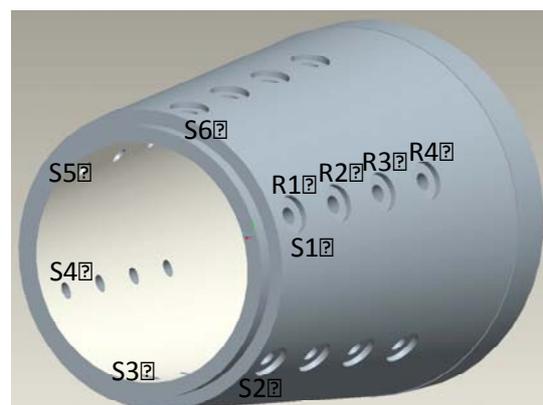


Abbildung 2.3.6: Anordnung der Sensoren am Mischrohr

Das gemessene Signal zeigt deutlich, dass es sich bei dem beobachteten Phänomen um WRS handelt. Die Flamme tritt bei Sensor 2 ein, rotiert dann weiter zu Sensor 1, 6,5,4,3. Mit Ausnahme des Detektors 1 (Herstellungstoleranzen) kann an den Signalen

neben der Rotation auch die Propagation stromauf beobachtet werden. Das Signal wird von Sensor zu Sensor stärker, was der höheren Ionisationsrate der Flamme aufgrund einer Dickenzunahme geschuldet ist, die wiederum aus der Propagation stromauf resultiert.

Nachdem der Flammenrückschlag für die Konfiguration mit Diffusor dargestellt wurde, gilt es nun, die Konfiguration **ohne Diffusor** zu untersuchen. Interessanterweise wurden hier drei aufeinander folgende Flammenpropagationsphänomene beobachtet. Zu Beginn propagiert die Flamme durch das Zentrum in das Mischrohr. Die Flammenform ist dabei konisch und entspricht dem in zurückliegenden Arbeiten beschriebenen CIVB [21][22]. Abbildung 2.3.7 zeigt diese Phase in den ersten 5 ms.

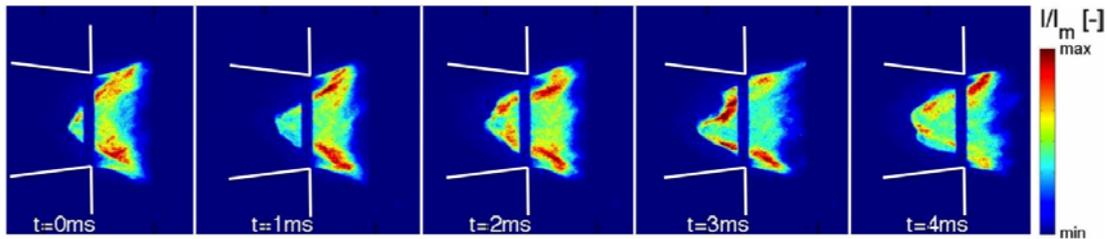


Abbildung 2.3.7: Phase 1 des Flammenrückschlags

Die Flamme bleibt in dieser Position bis zum Zeitschritt $t=17\text{ms}$. Die Flammenform ändert sich von einem relativ spitzen Konus zu einer flacheren Form, bevor Sie dann weiter stromauf propagiert wie in Abbildung 2.3.8 dargestellt.

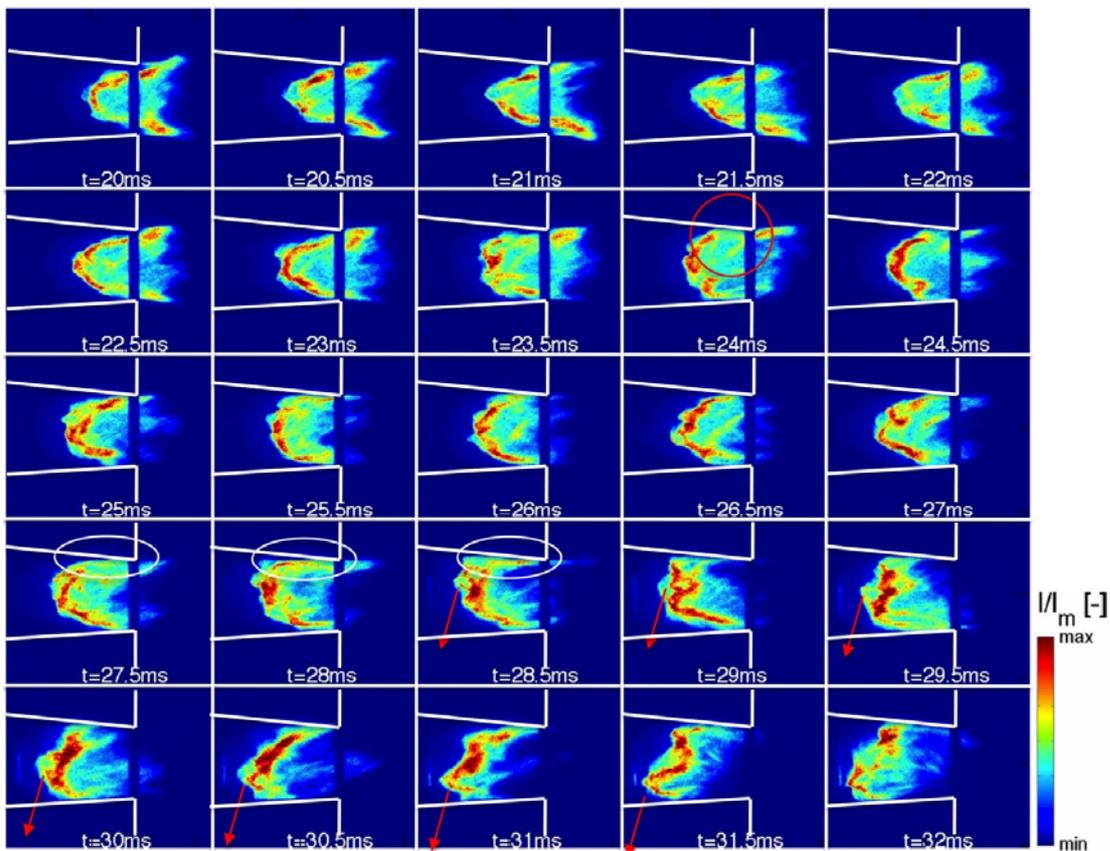


Abbildung 2.3.8: Phase 2 und 3 der Flammenpropagation

Von $t=20\text{ms}$ bis $t=24\text{ms}$ oszilliert die Flamme zwischen der spitzen und der eher stumpfen Konusform, was darauf hindeutet, dass die Flammenpropagation durchs Zentrum beendet ist und sie nun schnell genug ist um die Wand des Mischrohrs zu errei-

chen. Letzteres ist der hohen turbulenten Flammengeschwindigkeit (Grüne Kurve in Abbildung 2.3.14) geschuldet, die ähnlich groß ist, wie die Strömungsgeschwindigkeiten vor der Flamme, da die Versuche bei einem Bruchteil der Geschwindigkeiten durchgeführt wurden, wie man sie bei Maschinenbetrieb vorfindet. Bei $t=24\text{ms}$ erreicht die Reaktion die Wand, allerdings scheinen bis $t=26.5\text{ms}$ die Geschwindigkeitsgradienten noch zu hoch zu sein, um eine weitere Propagation zu ermöglichen. Nachdem allerdings die Flamme nochmals etwas abflacht, erreicht die Reaktion Bereiche an der Wand, an denen eine weitere Propagation möglich ist. Ab da erfolgt nun WRS wie er bereits zuvor beschrieben wurde. Um hier wiederum zu bestätigen, dass die drei in den tiefenintegrierten Bildern beobachteten Phasen richtig beschrieben sind, wurden im Zuge der Untersuchungen noch HS-Miestreuaufnahmen gemacht. Durch diese war es möglich, die Flammenfront in der Mittelebene des Mischrohrs zu lokalisieren und zu verfolgen. Diese Messungen bestätigen die zuvor gemachten Beobachtungen bringen aber keinen weiteren Informationsgehalt, weshalb sie hier nicht weiter ausgeführt werden.

2.3.3.2 Einfluss der axialen Brennstoffeindüsung

Die Untersuchungen an der Konfiguration ohne Diffusor wurden weiter geführt, um den Einfluss axialer Brennstoffeindüsung am Brennerkopf auf die Rückschlagsstabilität zu quantifizieren. Dazu wurden in einem ersten Schritt verschiedene Verhältnisse aus axialer Eindüsung und der Eindüsung entlang aller Schlitze untersucht, wobei auch hier reiner Wasserstoff zum Einsatz kam. Es wurden zwei verschiedene Düsen am axialen Einlass eingesetzt, wobei die eine einen großen Durchmesser hat (N1, niedriger Impuls) und die andere einen kleinen (N2, hoher Impuls).

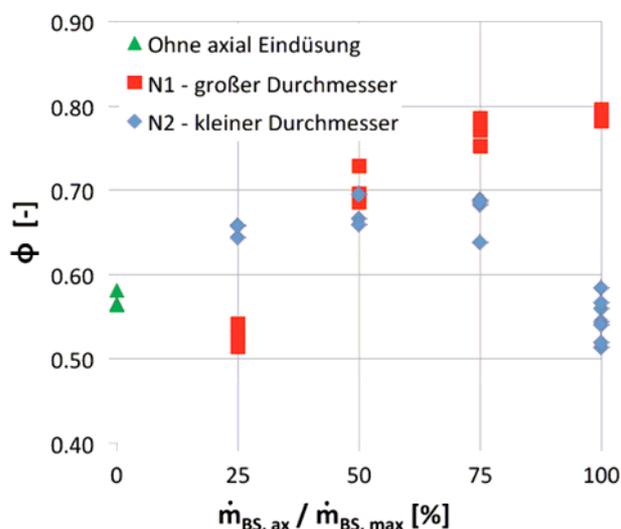


Abbildung 2.3.9: Einfluss der axialen Brennstoffeindüsung ($\phi=1/\lambda$)

Wie erwartet verbessert sich das Rückschlagsverhalten bei korrekter Anwendung der axialen Eindüsung erheblich (Abbildung 2.3.9). Zur Interpretation der Ergebnisse sollte man sich allerdings bewusst sein, dass hier zwei Einflussgrößen einander überlagern. Zum einen ist da der erhöhte Axialimpuls, der die eigentliche Verbesserung bringt, allerdings muss auch der Einfluss der Brennstoffmischung und der resultierenden radialen Mischungsprofile berücksichtigt werden.

Deutlich wird das für die Düse N1 bei 25% axialer Eindüsung. Der Impuls auf der Achse wird erhöht, allerdings verschlechtert sich das Rückschlagverhalten aufgrund der schlechten Mischungsqualität. Die daraus resultierenden hohen Flammgeschwindigkeiten in den brennstoffreichen Zonen überwiegen gegenüber dem Einfluss des erhöh-

ten Axialimpulses. Für höhere axiale Eindüsungsverhältnisse wächst der Einfluss des Axialimpulses, was zu einer Verbesserung der Rückschlagswerte führt. Allerdings zeigen die Ergebnisse für die Düse N2, dass auch dies nur bis zu einem gewissen Punkt gilt. Für rein axiale Eindüsung des H₂ wird das Rückschlagsverhalten wieder schlechter, was damit zusammenhängt, dass durch den hohen Axialimpuls die Scherung zwischen Luft und Brennstoff zunimmt und damit die makroskopische Mischung besser wird. Dieser Effekt wurde bereits im Rahmen der Wasserkanaluntersuchungen gezeigt. Der verstärkte Brennstofftransport zu höheren Radien führt zu höheren Flammgeschwindigkeiten in Wandnähe und damit zur Flammenpropagation gegen die Hauptströmung in diesen Bereichen mit niedrigerer Strömungsgeschwindigkeit.

Um den Einfluss der Eindüsung auf die Mischung zu quantifizieren wurden NO_x Messungen bei einer Leistung von 200kW und einer adiabaten Flammentemperatur von ca. 1800K durchgeführt. In Abbildung 2.3.10 sind die zeitlich gemittelten OH* Aufnahmen (oben), deren Abel transformierte [23] Pendanten (unten), als auch die gemessenen NO_x Werte (@ 15% O₂) bei Nutzung der Düse N1 dargestellt. Wie auch bei der Erdgasverbrennung zeigt hier die Schlitzdüse ein sehr gutes Verhalten, da sowohl die Flammenkontur, als auch die NO_x Werte im Vergleich zur extern vorgemischten Variante nahezu gleich sind. Bei axialer Eindüsung kommt es zu einer Veränderung der Wärmefreisetzung. Wie erwartet wird die RZZ weiter herausgedrückt und die Wärmefreisetzung im Zentrum konzentriert. Dies führt auch zu einem starken Anstieg der NO_x Werte.

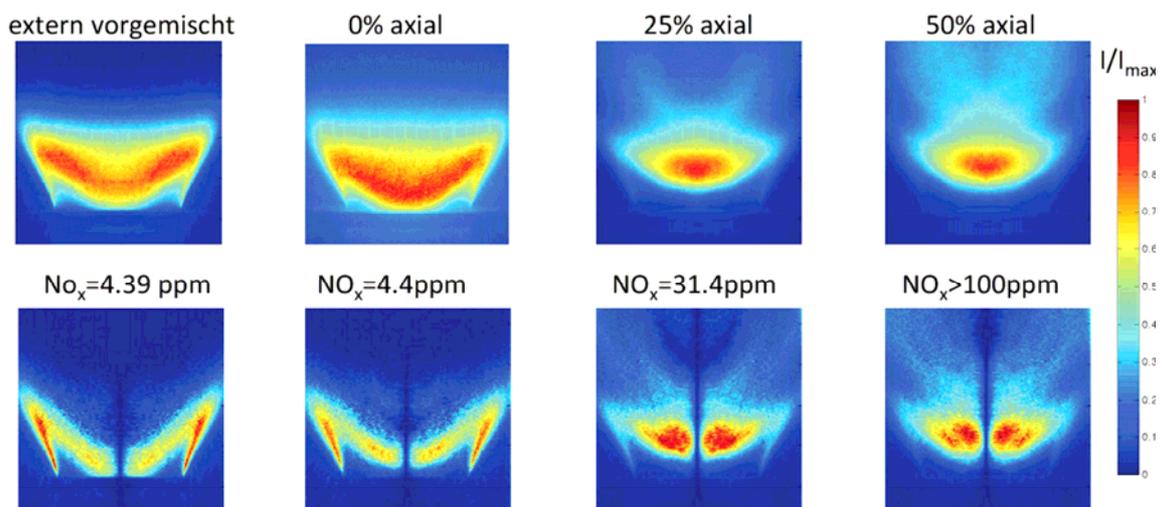


Abbildung 2.3.10: OH* Chemilumineszenz Signal und NO_x Werte

Man sollte an dieser Stelle allerdings nicht vergessen, dass hier unverdünnter Wasserstoff benutzt wurde und dass das Potential mit MBTU oder sogar LBTU Syngasen aufgrund des höheren Axialimpulses sehr viel größer ist. Wie in den Wasserkanal Daten gezeigt, können für solche Brennstoffe deutlich bessere Mischungs- und Emissionswerte erwartet werden.

2.3.3.3 Rückschlagsgrenzen bei Schlitzeindüsung

Da die Konfiguration mit Schlitzeindüsung bereits NO_x Werte nahezu gleich den Werten bei externer Vormischung erreicht hat, wird diese im Folgenden weiter auf Ihre Rückschlagssicherheit untersucht. Die Rückschlagswerte der Konfigurationen mit und ohne Diffusor werden mit Daten und Modellen aus der Literatur verglichen.

Für die Konfiguration **ohne Diffusor** wurde gezeigt, dass der Rückschlag durch CIVB initiiert wird. Deshalb wurden die gemessenen Rückschlagsdaten mit dem Modell von Konle [24] verglichen. Dieses Modell basiert auf einem Vergleich des turbulenten und chemischen Zeitmaßes und ermöglicht das Rückschlagsverhalten eines Brenners zu anderen Betriebspunkten hin zu skalieren, mit nur einem einzigen gemessenen Referenzpunkt. Das Modell wurde für moderat turbulente Flammen eingeführt, wie sie auch in den hier gezeigten Versuchen vorzufinden sind. Das Modell kann auf folgende Gleichung bei einem spezifischen Brenner, Brennstoff, Druck und einer Vorheiztemperatur reduziert werden:

$$\frac{\bar{u}}{s_l} = C_b \quad . \quad (1)$$

Nach diesem Modell muss C_b für alle gemessenen Rückschlagspunkte konstant sein. In Abbildung 2.3.11 ist ein Vergleich der Daten der extern vorgemischten und der Schlitzeindüsung, aber auch des Konle Modells dargestellt. Interessanterweise ist die Konfiguration mit Schlitzeindüsung etwas stabiler, als die extern vorgemischte Konfiguration, was allerdings anhand der Anordnung der Brennstoffzufuhrbohrungen an der Hinterkante des Schlitzes erklärt werden kann. Die LIF - Mischungsuntersuchungen im Wasserkanal zeigen, dass der Kern der Strömung ca. 11% magerer ist verglichen mit der extern vorgemischten Konfiguration [12]. Dieser magere Kern führt zu geringeren Flammengeschwindigkeiten im Zentrum und damit zu einem besseren Rückschlagsverhalten. Neben den Messwerten beinhaltet das Diagramm auch die Voraussagen des Konle Modells. Betrachtet man die vorgemischten Daten (rote Linie), so passen Messwerte und Modell sehr gut zueinander.

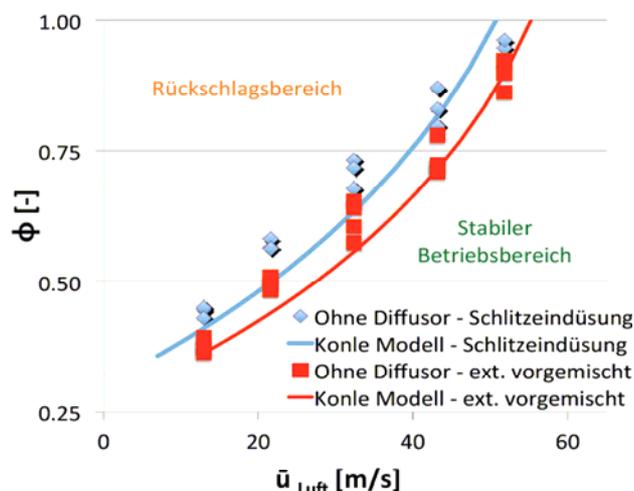


Abbildung 2.3.11: Rückschlagspunkte und Konle Modell

Zur Vorhersage der Werte bei Schlitzzündung wurde das Konle Modell angepasst in dem die Konstante C_b der vorgemischten Daten bei $\bar{u}=43\text{m/s}$ benutzt wurde und die Luftzahl um 11% reduziert wurde. Die gute Übereinstimmung der Daten bestätigt die Annahme, dass der magere Kern für die besseren Rückschlagswerte der Schlitzzündung verantwortlich ist.

Da bei der Konfiguration **mit Diffusor** reiner WRS detektiert wurde, wurden die Rückschlagsdaten dieser Konfiguration mit den Literaturdaten von Kithrin [16] verglichen. Dazu wurde der kritische Wandgeschwindigkeitsgradient nach dem Rohrreibungskonzept nach Blasius [25] für voll ausgebildete turbulente Strömungen an den entsprechenden Rückschlagspunkten berechnet:

$$g = 0.03955 \cdot \bar{u}^7 \cdot D^{-\frac{1}{4}} \cdot \eta^{-\frac{3}{4}} \cdot \rho^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

Da die Daten aus der Arbeit von Kithrin ohne Vorheizung bei atmosphärischen Bedingungen gemessen wurden, muss vor dem Vergleich eine Temperaturkorrektur unserer Daten auf eben diese Bedingungen erfolgen. Dazu wurde von Fine [9] folgende Korrektur vorgestellt:

$$g_{krit}^* = g_{krit} \cdot \left(\frac{T_{atm}}{T_{exp}} \right)^{1.52} \quad (3)$$

In Abbildung 2.3.12 stellen die roten Datenpunkte die gemessenen Daten dar und die anderen die Literaturdaten.

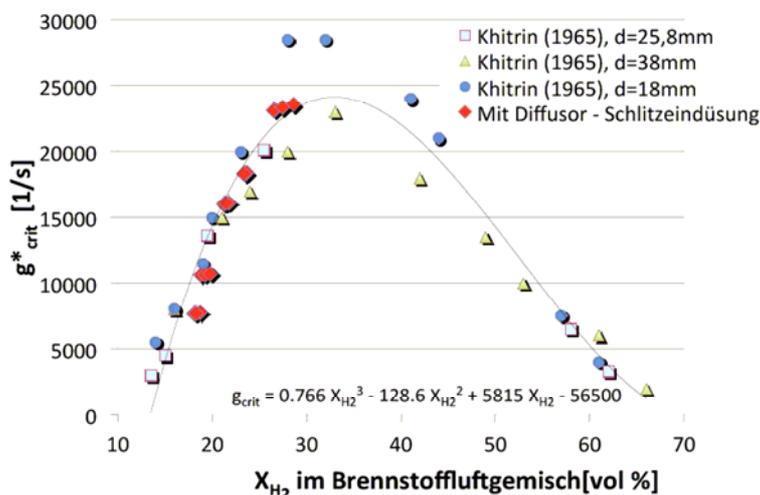


Abbildung 2.3.12: Vergleich der kritischen Wandgeschwindigkeitsgradienten

Der Vergleich macht deutlich, dass, obwohl die Strömung im entwickelten Brenner rotiert und die Reynoldszahlen höher sind als bei Kithrin, die Literaturdaten das Rückschlagsverhalten des Brenners sehr gut vorhersagen. Um die WRS Daten mit den Daten beim CIVB getriebenen Rückschlag vergleichen zu können, wurde eine Trendlinie auf Basis aller verfügbaren WRS Daten erzeugt. Mit einer Polynomfunktion dritter Ordnung wurde der Zusammenhang zwischen dem H_2 Gehalt im Brennstoffluftgemisch und dem kritischen Gradienten beschrieben. Diese Funktion gekoppelt mit den zuvor eingeführten Gleichungen für den WRS führen zu der roten Kurve in Abbildung 2.3.13, die den Zusammenhang zwischen Brennstoffluftverhältnis und Brenneraustrittsgeschwindigkeit darstellt.

In Abbildung 2.3.13 sind neben dieser Kurve auch die Rückschlagspunkte für den extern vorgemischten Fall und die Schlitzzeindüsung dargestellt. Mit Diffusor scheint nun die extern vorgemischte Variante sicherer zu sein. Durch die Skalierung der Achse scheint der Effekt nicht so stark zu sein, wie bei der Konfiguration ohne Diffusor, was allerdings nicht der Fall ist. Der Unterschied ist nahezu gleich groß und der Grund dafür wiederum das radiale Brennstoffprofil nur mit umgekehrter Konsequenz. Der brennstoffärmere Kern führt automatisch zu höheren Brennstoffkonzentrationen auf großen Radien und damit zu einer Verschlechterung des Rückschlagsverhaltens.

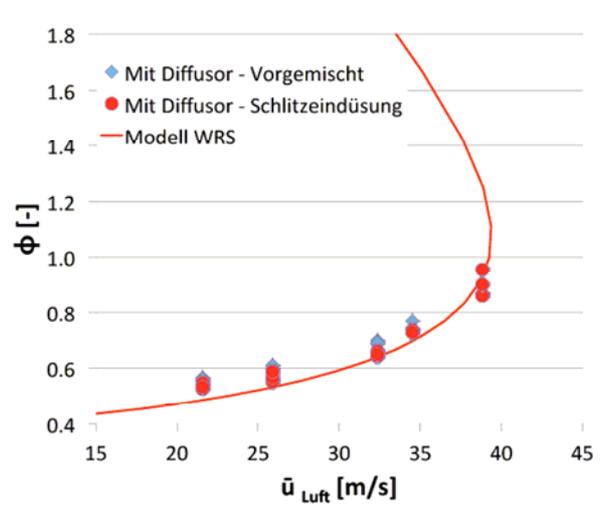


Abbildung 2.3.13: Vergleich gemessene Rückschlagsdaten zum Modell

Vergleicht man nun die beiden Konfigurationen mit und ohne Diffusor (Abbildung 2.3.14), so sieht man, dass die Rückschlagsgrenzen in beiden Fällen sehr ähnlich sind. Das ist nicht weiter erstaunlich, da auch bei der Konfiguration ohne Diffusor der Rückschlag seinen Weg vom Zentrum an die Wand findet und somit die Bedingungen im Brenner ähnlich sein müssen.

Die grüne Kurve stellt die turbulente Flammengeschwindigkeit ($s_t = s_l + u'$) bei einer angenommenen turbulenten Schwankung von 10% dar. Die laminare Flammgeschwindigkeit wurde mit Chemkin und dem GRI 3.0 Mechanismus bestimmt. Diese Linie zeigt, dass gerade bei geringen Durchsätzen die Flammengeschwindigkeit relativ zur Strömungsgeschwindigkeit hoch ist. Diese hohen Flammengeschwindigkeiten sind es, die eine radiale Propagation der Flamme in einem steilen Winkel zur axialen Strömungsrichtung erlauben. Dies zeigt, dass die Flammenpropagation vom Zentrum an die Wand, wie in der Konfiguration ohne Diffusor beobachtet, der turbulenten Flammenpropagation geschuldet sein kann.

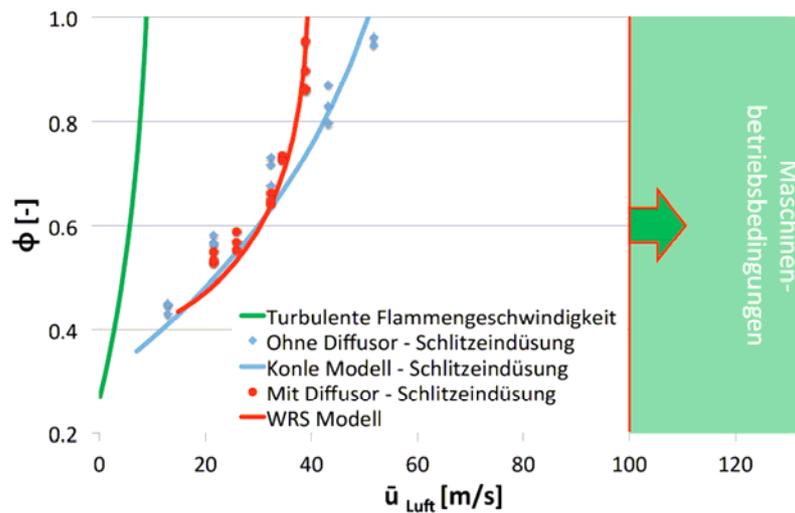


Abbildung 2.3.14: Vergleich der Rückschlagsgrenzen

Bei einem Äquivalenzverhältnis von $\phi=0.5$, was einem typischen Betriebspunkt unter Maschinenbedingungen bei Vollast entspricht, ist die Strömungsgeschwindigkeit um einen Rückschlag zu provozieren vier mal kleiner als unter Maschinenbedingungen. Allerdings muss an dieser Stelle noch der Druckeinfluss untersucht werden, bevor Sicherheitsfaktoren bestimmt werden können.

2.4 Verbrennungsversuche mit skaliertem Brennerkonzept unter erhöhtem Druck

Um Information über den Einfluss des Drucks auf die Flammenkontur und den Betriebsbereich des Brenners zu erhalten, wurden zusätzliche Verbrennungsexperimente unter erhöhtem Druck mit einem kleiner skalierten Brennermodell (Faktor 2,3) mit Diffusor aber ohne Schlitzzündung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde die OH*- Chemilumineszenz der Flamme in der Brennkammer gemessen und die Stabilitätsgrenzen (Rückschlag- und Verlöschgrenze) bestimmt, sowie Ionisationsdetektoren zur besseren Charakterisierung der Rückschlagsart eingesetzt.

2.4.1 Versuchsanlage und messtechnische Realisierung

Abbildung 2.4.1 gibt einen Überblick über den eingesetzten Hochdruckprüfstand am Lehrstuhl für Thermodynamik. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [11, 13]. Dieser Versuchstand erlaubt eine Untersuchung der Brenneigenschaften bis zu einem Druck von ca. 7bar bei 150°C Luftvorheizung (Standardeinstellung) und einem Brennerdruckverlust zwischen 1% und 3%.

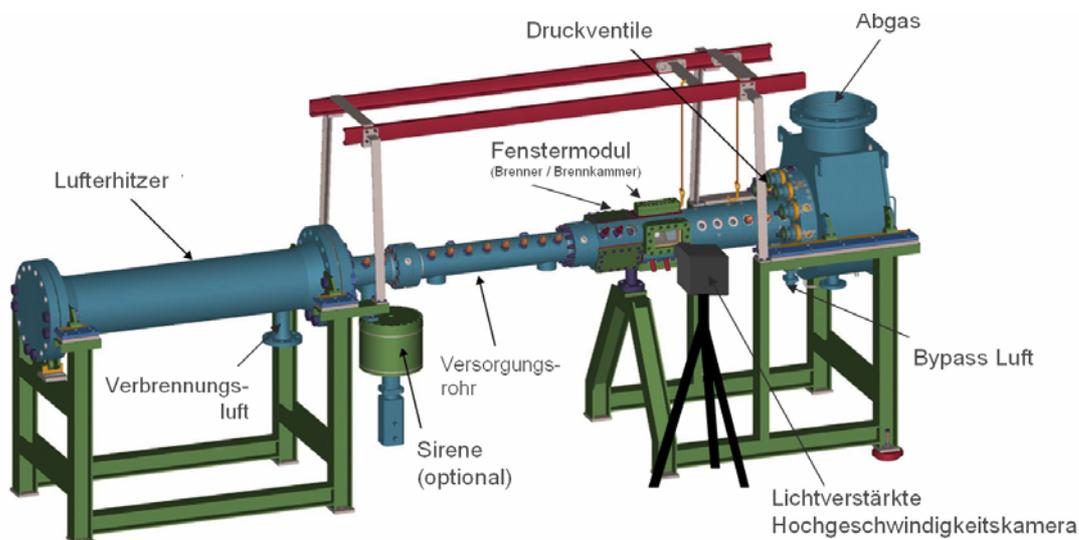


Abbildung 2.4.1: Hochdruckversuchstand (TUM)

Die Versuchsdurchführung wurde der im atmosphärischen Prüfstand angewandten Vorgehensweise angepasst und Rückschlag- sowie Verlöschgrenze für die Stabilitätskarten wurden identisch definiert. Für OH*- Chemilumineszenz Messungen wurde wie schon in den vorangegangenen Versuchen eine APX I² Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Diese wurde senkrecht zur Messebene und stromab des Brenneraustritts montiert und erlaubt Aufnahmen der unteren Hälfte der Flamme (ca. 2,5D x 5D) durch ein Seitenfenster in der Brennkammer. Die Bilder wurden gemittelt, bevor eine Abel-Transformation durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden, wie in den atmosphärischen Versuchen, auch hier zur besseren Charakterisierung der Rückschlagsart, vier Ionisationsdetektoren in die Mischrohrwand integriert [17].

2.4.2 Stabilitätskarten

Zum einfachen Vergleich des Betriebsverhalten des skalierten Brenners unter erhöhtem Druck und als Referenzgröße wurden zunächst Messungen unter extern vorgemischten Bedingungen mit Erdgas durchgeführt. In einem Druckbereich von 1bar bis 7bar konnte für Erdgasverbrennung kein Rückschlag beobachtet werden, die magere Verlöschgrenze lag bei einer adiabaten Flammentemperatur von ca. 1700K. Dieses Ergebnis bestätigt die gute Stabilität des Brenners aus den atmosphärischen Verbrennungsexperimenten. Wie erwartet konnte auch bei einer Variation des Brennerdruckverlustes kein Einfluss auf die Stabilitätsgrenzen festgestellt werden.

Extern vorgemischte Versuche mit CH₄-H₂ Mischung und reinem H₂ wurden bei Drücken von 1,5bar, 3bar und 5bar durchgeführt. Abbildung 2.4.2 links zeigt die Rückschlagsgrenzen (gefüllte Symbole) und die mageren Verlöschgrenzen (leere Symbole) für verschiedene CH₄-H₂ Mischungen (volumetrisch) und reinem H₂ für die jeweiligen Drücke und einem Brennerdruckverlust von 1%, extern vorgemischt.

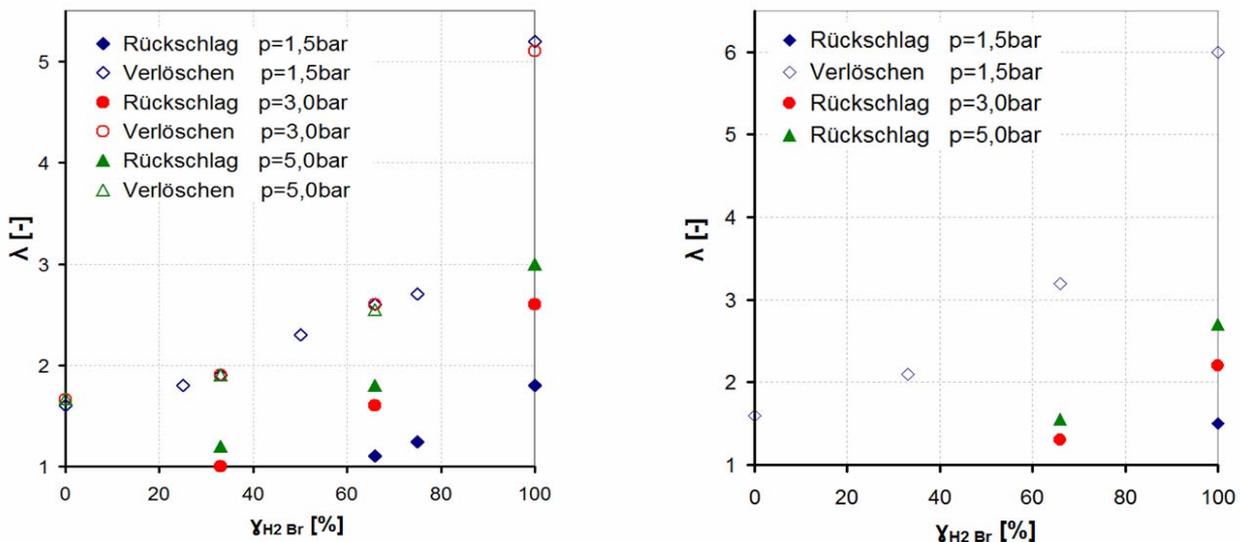


Abbildung 2.4.2: Stabilitätskarten: extern vorgemischt (links) und mit axialer H₂ Eindüsung (rechts)

Der Einfluss der axialen Wasserstoffeindüsung auf das Betriebsfenster bei Drücken von 1,5 bar, 3 bar und 5 bar ist in Abbildung 2.4.2 rechts zu sehen. Dabei wurde der jeweilige CH₄ Anteil weiterhin extern vorgemischt, der jeweilige Wasserstoffanteil aber komplett durch eine Düse in der Mitte des axialen Einlasses eingedüst. Um Wasserstoff zu sparen und wegen des geringen Unterschieds der Ergebnisse aus der externen Vormischung wurde die magere Verlöschgrenze nur für 1,5bar vermessen.

Der Vergleich der extern vorgemischten Experimente mit den Experimenten zur axialen Wasserstoffeindüsung zeigt, dass der Stabilitätsbereich vergrößert werden konnte. Die Rückschlagsgrenze verschiebt sich zu kleineren Luftzahlen und die magere Verlöschgrenze zu höheren Luftzahlen. Für 33vol.% Wasserstoff konnte kein Rückschlag mehr provoziert werden. Für höhere Wasserstoffanteile wurde die Rückschlaggrenze der axialen H₂-Eindüsung zu ca. 10% kleineren Luftzahlen im Vergleich zum extern vorgemischtem Fall hin verschoben. Zwischen der axialen und extern vorgemischten Variante konnte außerdem ein deutlicher Unterschied in der Flammenkontur festgestellt werden, welcher auf die veränderte Aerodynamik, wie die Entstehung eines verdrallten Strahls ohne Wirbelaufplatzen in der Brennkammer zurückzuführen ist und die Ergebnisse aus dem Wasserkanal bestätigt. Trotzdem ist die Verbesserung der Rückschlagsgrenzen durch die axiale Eindüsung nicht so stark verbessert worden wie erhofft. We-

gen der Kürze und den im Vergleich zu den atmosphärischen Versuchen und zur Literatur [19] sehr ähnlichen Ergebnissen wurden die OH*- Chemilumineszenz und Ionisationsensor Messungen hier nicht gezeigt. Die Ergebnisse und die Verwendung des Diffusors, deuteten allerdings darauf hin, dass es sich auch bei dem Rückschlagsmechanismus im Hochdruckversuchsstand um Wandrückschlag handelt. Ebenfalls dafür sprechen die Mischungsergebnisse aus dem Wasserkanal, welche für die axiale Eindüsung einen Brennstoffüberschuss auf der Achse und einen Brennstoffmangel auf höheren Radien ergaben. Im Vergleich zu der gleichmäßigen Brennstoffverteilung und damit höheren Brennstoffkonzentrationen auf höheren Radien (im Vergleich zur axialen Eindüsung) im extern vorgemischten Fall, erklärt dies die leichte Verbesserung der Stabilitätsgrenze.

2.4.3 Einfluss des Drucks auf das Rückschlagsverhalten (Skalierung)

Aus den Beobachtungen in den atmosphärischen und den Hochdruckversuchen kann geschlossen werden, dass der WRS der kritischere der beiden Rückschlagsmechanismen ist. Zum Vergleich mit den atmosphärischen Versuchen wurde auch bei den Hochdruckversuchen der kritische Wandgradient (Gleichung 2) ermittelt. Hier konnten allerdings nur die Ergebnisse für die reine Wasserstoffverbrennung verglichen werden. Dazu musste neben der Temperaturkorrektur (Gleichung 3) auch noch eine Druckkorrektur analog folgender von Fine in [14, 15] definierter Korrelation durchgeführt werden.

$$g_{krit}^{**} = g_{krit}^* \left(\frac{p_{atm}}{p_{exp}} \right)^{1.35} \quad (4)$$

Diese Korrelation sagt voraus, dass der kritische Wandgradient beim Erhöhen des Drucks von atmosphärischen auf Maschinenbedingungen um einen Faktor von fast 60 zunimmt. Abbildung 2.4.3 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs.

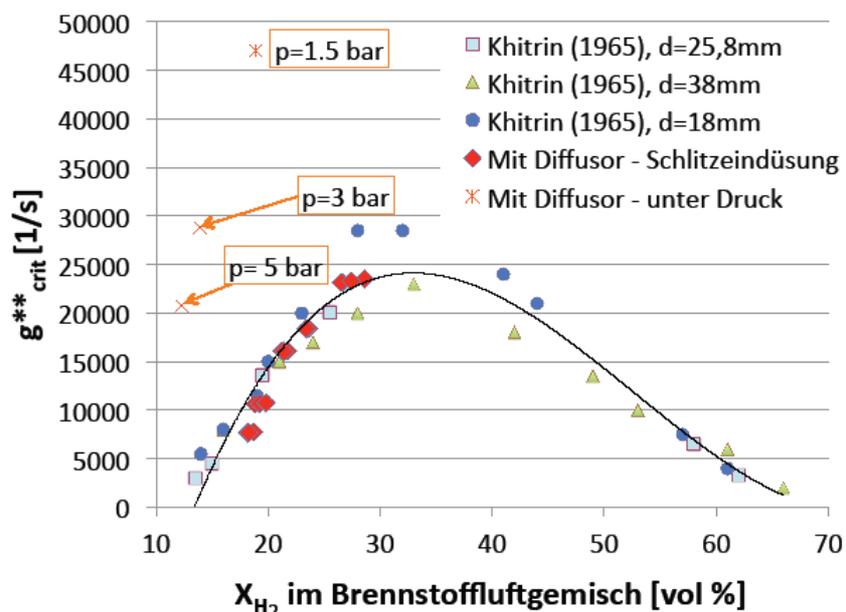


Abbildung 2.4.3: Vergleich kritischer Wandgradient

Für die Hochdruckversuche führt die Temperatur- und Druckkorrektur demnach zu sehr viel höheren kritischen Gradienten, als die atmosphärischen Versuche. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckkorrektur weder genaue noch konservative Ergebnisse für

die Skalierung der Daten liefert. Daraus folgt, dass bei Maschinenbedingungen sogar noch schlechtere Bedingungen erwartet werden müssen.

Zusätzlich zeigen Eichler und Baumgartner in [26], dass der benötigte kritische Gradient um Flammenpropagation im Brenner zu unterbinden, um ca. eine Größenordnung höher ist, als der Gradient, um das Eindringen der Flamme von der Brennkammer in den Brenner zu verhindern, wie er in diesem Projekt untersucht wurde. Daraus folgt, dass es deutlich schwieriger ist die Flamme wieder aus dem Brenner zu spülen, wenn sie erst einmal eingedrungen ist, als das Eindringen selbst zu verhindern. Dieses Projekt und die Arbeit aus [26] zeigen, dass sicherer Maschinenbetrieb in Bezug auf WRS sehr schwer zu erreichen ist, auch wenn in atmosphärischen Versuchen sehr hohe Wandrückschlagssicherheit erreicht wird. Daraus folgt, dass für Maschinenbrenner ein Abmagern der Wandbereiche zu sehr hohen Luftzahlen nötig ist um auch bei hochreaktiven Brennstoffen, wie Wasserstoff, WRS sicher zu vermeiden.

2.5 Entwicklung und Validierung des gasturbinenkompatiblen Brennerprototyps

Parallel zur in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Entwicklung des skalierten Brennerkonzeptes, wurden auf einem Brenner im Originalmaßstab Eindüsungsuntersuchungen zur Optimierung der Rückschlagssicherheit bei Eindüsung von wasserstoffhaltigen Brennstoffe durchgeführt. Aus den Ergebnissen der beiden Tätigkeiten konnte dann ein gasturbinenkompatibler Brennerprototyp entwickelt und nach erster Optimierung bei Hochdruckbedingungen validiert werden. Beide Tätigkeiten wurden, wie im Kapitel 1.3 beschrieben, durch numerische und experimentelle Strömungsuntersuchungen, sowie durch Verbrennungsversuche bei atmosphärischen und gasturbinenähnlichem Druck unterstützt.

2.5.1 Optimierung der Brennstoffeindüsung

Aus den Vorarbeiten zu diesem Vorhaben (s. Kapitel 1.4) war bekannt, dass bei erhöhtem Wasserstoffanteil im Brennstoff die Flammgeschwindigkeiten steigen, sowie dass deren Maximalwerte in die Richtung von brennstoffreichen Mischungen verschoben werden, im Vergleich zu herkömmlichen Erdgasen. Für die Entwicklung eines emissionsarmen und betriebssicheren Gasturbinenbrenners ist daher eine der Hauptaufgaben die Entwicklung einer passenden Brennstoffeindüsung. Diese soll sicherstellen, dass die brennstoffreiche Mischung mit entsprechend hohen Flammgeschwindigkeiten in der Nähe der Eindüsung zu keinem Flammenrückschlagsrisiko führt.

Erste numerische und experimentelle Untersuchungen wurden deswegen der Optimierung der Geometrie eines quer zur Hauptrichtung der Verbrennungsluft eingedüsten Strahles gewidmet. Eine Prinzipskizze der untersuchten Geometrien ist in Abb. 2.5.1 gezeigt. Aus der Wand eines Strömungskanals, der die Mischstrecke des Gasturbinenbrenners darstellt, wird quer zur Hauptströmung mit verschiedenen Geometrien und Geschwindigkeiten eingedüst, und die resultierende Mischung mittels CFD und Wasserkanalexperimenten untersucht.

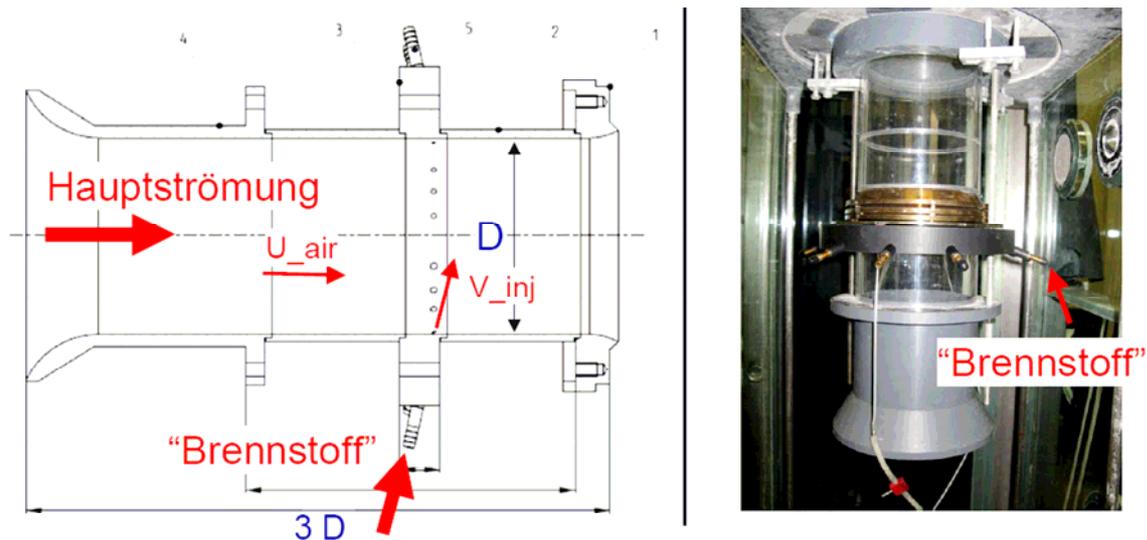


Abbildung 2.5.1: Prinzip und Versuchsaufbau für die Untersuchung von einer quer zur Hauptströmung gerichteten Brennstoffeindüsung.

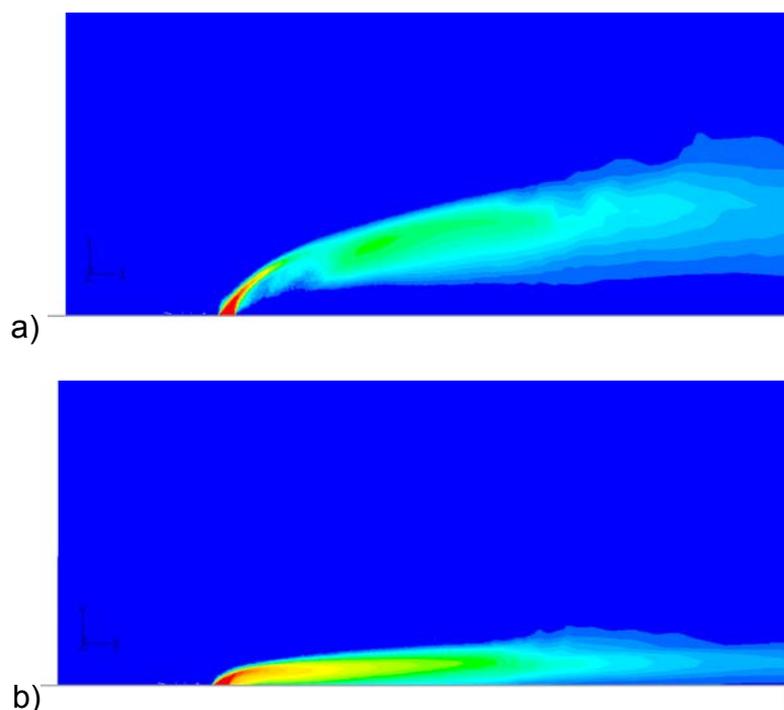


Abbildung 2.5.2: Strömungssimulation von einer quer zur Hauptströmung gerichteten Brennstoffeindüsung mit a) hoher und b) niedriger Eindüsungsgeschwindigkeit: Brennstoffkonzentrationswerte entlang eines Längsschnittes.

Anzahl und Geometrie der Eindüsuungsöffnungen beeinflussen wesentlich die resultierende Eindüsuungsgeschwindigkeit und das Mischungsverhalten vom Brennstoff. Die Brennstoffkonzentrationsverteilungen aus Abb. 2.5.2 verdeutlichen den Einfluss der Eindüsuungsgeschwindigkeit als wichtigen Parameter. Mit höheren Geschwindigkeiten lässt sich ein brennstofffreies und deshalb rückschlagsrisikofreier Bereich in Wandnähe erzeugen. Darüber hinaus kann der Brennstoff tiefer in die Hauptströmung eindringen, was zu einer verbesserten Brennstoffverteilung als Grundlage für niedrige Emissionen führt. Hohe Eindüsuungsgeschwindigkeiten führen aber gleichzeitig zu höheren brennstoffseitigen Druckverlustwerten, insbesondere bei den niedrigen Heizwerten verdünn-

ter wasserstoffhaltiger Brennstoffe, was wiederum zu einer Verschlechterung des Anlagenwirkungsgrades führt. Eine Optimierung der Eindüsungsgeometrie unter Berücksichtigung dieser beiden entgegengesetzten Faktoren wurde deswegen durchgeführt.

Als weiteres Ergebnis der Eindüsungsuntersuchungen konnten die Strömungs- und Mischungsstrukturen im Detail analysiert werden. Wie am Beispiel von Abb. 2.5.3 zu erkennen ist, sind Sekundärströmungen und – wirbel maßgebend für die Verteilung vom Brennstoff über den Querschnitt, was vorteilhaft für eine gleichförmige Mischung ist. Ein weiterer Effekt derselben Strömungsstrukturen ist aber auch die Gefahr, dass sich in Bereichen niedriger Geschwindigkeit, wie z.B. im Nachlauf des Eindüsungsstrahles selbst, zündfähiges Brennstoff-Luftgemisch bilden kann, mit entsprechendem Flammrückschlagsrisiko.

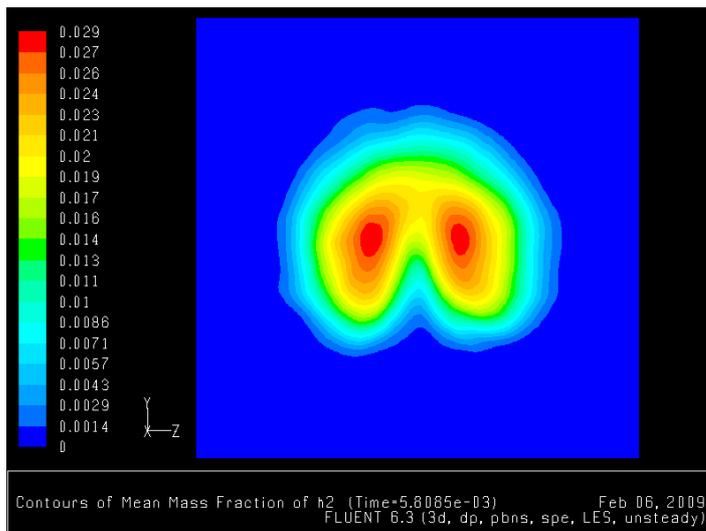


Abbildung 2.5.3: Strömungssimulation von einer quer zur Hauptströmung gerichteten Brennstoffeindüsung: Brennstoffkonzentrationswerte entlang eines Querschnittes.

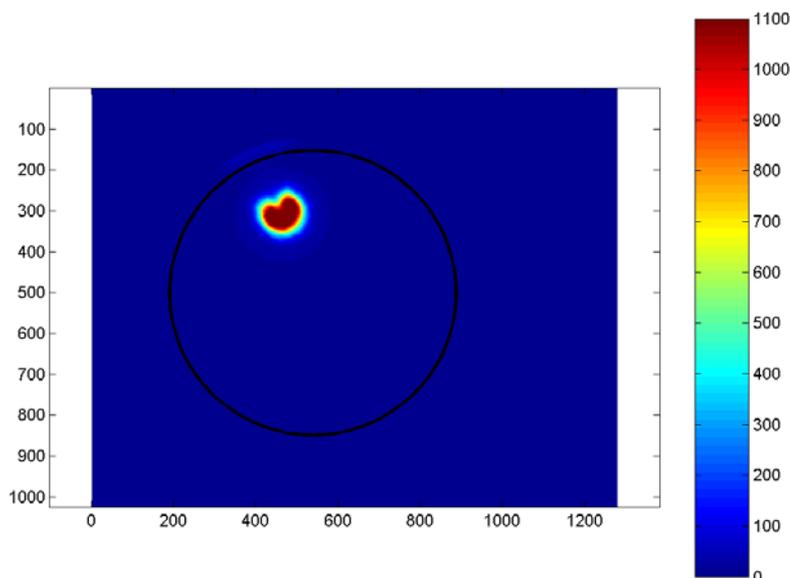


Abbildung 2.5.4: Wasserkanalversuch von einer quer zur Hauptströmung gerichteten Brennstoffeindüsung: Brennstoffkonzentrationswerte entlang eines Querschnittes.

Die oben beschriebene Strömungssimulationen wurden durch Wasserkanalversuche validiert (s. Abb. 2.5.4). Die Versuche wurden mit ähnlicher Infrastruktur und Messmethoden wie in Kapiteln 2.2.2 und 2.2.6 beschrieben durchgeführt und ermöglichten die Vorauswahl der vielversprechendsten Eindüsungskonfigurationen für die weiteren Flammenrückschlagsuntersuchungen mit Verbrennung, die in den folgenden Absätzen beschrieben sind.

Hauptziel der Verbrennungsversuche war es, die Rückschlagssicherheit der verschiedenen Eindüsungsoptionen quantitativ zu vergleichen, indem man die Fähigkeit der verschiedenen Eindüsungskonfigurationen quantifizierte, eine bereits zurückgeschlagene Flamme zu halten. Der dafür ausgelegte Versuchsaufbau ist in Abb. 2.5.5 skizziert und wurde wie folgt betrieben: Brennstoffzufuhr gestartet, Zündfackel an für 5 s, Zündfackel aus, Wartezeit 10s, Überprüfung ob Flamme noch brennt, Brennstoffzufuhr gestoppt. Für jede Randbedingung wurde der Versuch dreimal wiederholt, und die minimale sichere Eindüsungsgeschwindigkeit wurde dann bestimmt als die Geschwindigkeit bei der die Flamme bei jeder der drei Wiederholungen nach dem Entfernen der Zündquelle löscht.

Der Versuch wurde für verschiedene Geometrien und verschiedene Betriebsbedingungen wiederholt, um eine Rückschlagssicherheitsmatrix zu bilden. Einige der untersuchten Parameter und Ergebnisse sind in Abb. 2.5.5 bis 2.5.8 dargestellt und lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Das Flammenrückschlagsrisiko nimmt mit dem Druck zu
- Das Flammenrückschlagsrisiko nimmt mit der Hauptströmungsgeschwindigkeit ab
- Das Flammenrückschlagsrisiko nimmt mit dem Wasserstoffanteil zu
- Das Flammenrückschlagsrisiko nimmt bei mehreren nebeneinander angeordneten Injektoren zu

Die Quantifizierung dieser und weiterer Abhängigkeiten erlaubte, die Rückschlagssicherheitsmatrix zu bilden und dadurch die Auslegung von geeigneten Brennstoffeindüsungsgemetrien für die folgende Injektorenoptimierung mit dem kompletten Brennerprototyp.

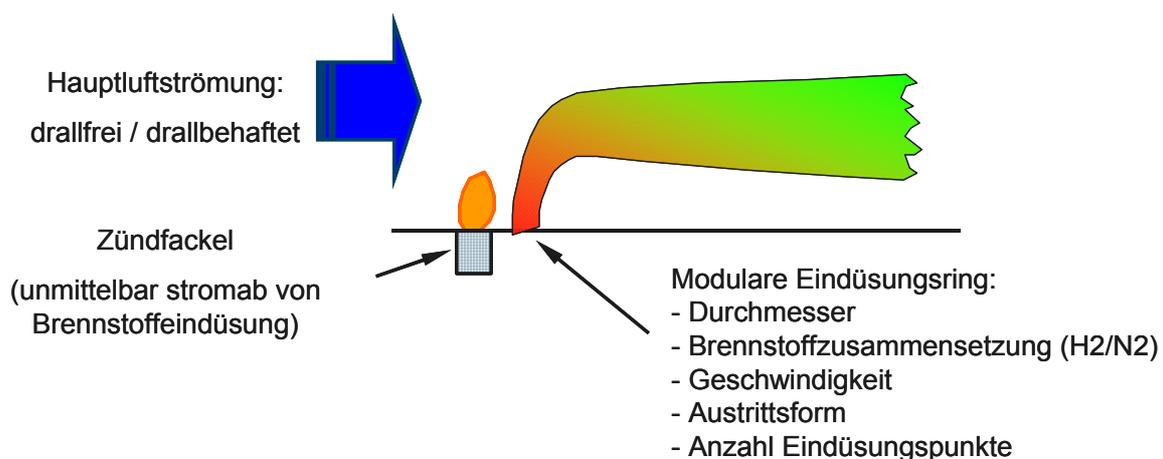


Abbildung 2.5.5: Versuchsaufbauprinzip für die Verbrennungsversuche zur Optimierung einer quer zur Hauptströmung gerichteten Brennstoffeindüsung.

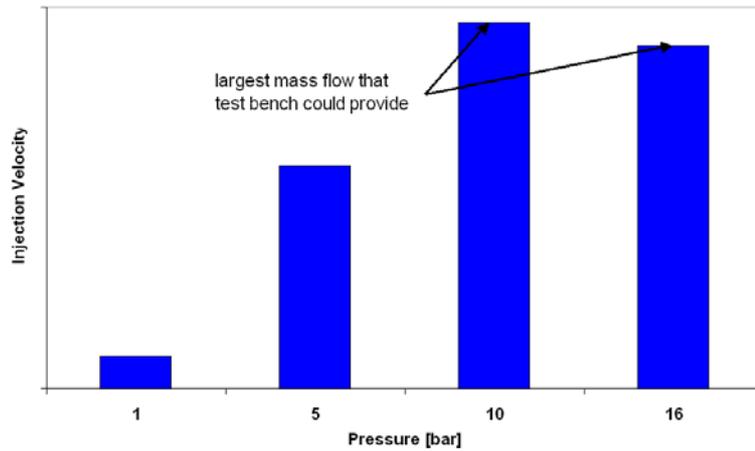


Abbildung 2.5.6: Ergebnisse der Verbrennungsversuche zur Optimierung der Brennstoffeindüsung: Effekt von Brennkammerdruck.

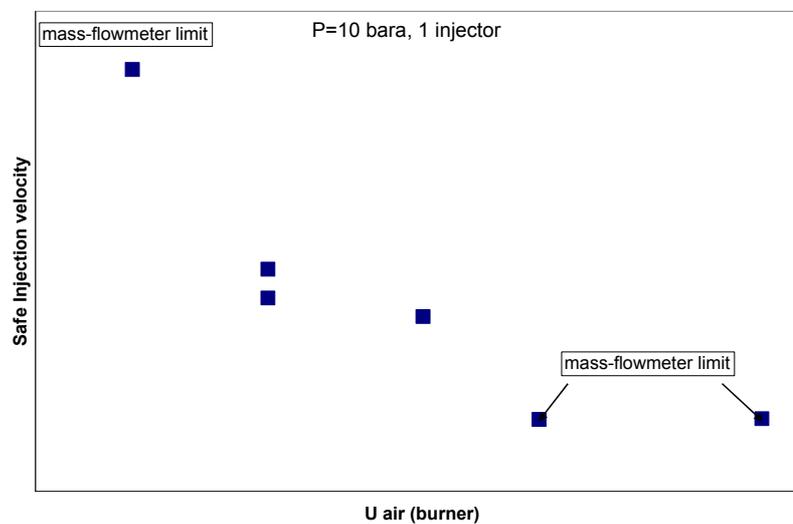


Abbildung 2.5.7: Ergebnisse der Verbrennungsversuche zur Optimierung der Brennstoffeindüsung: Effekt von Hauptströmungsgeschwindigkeit.

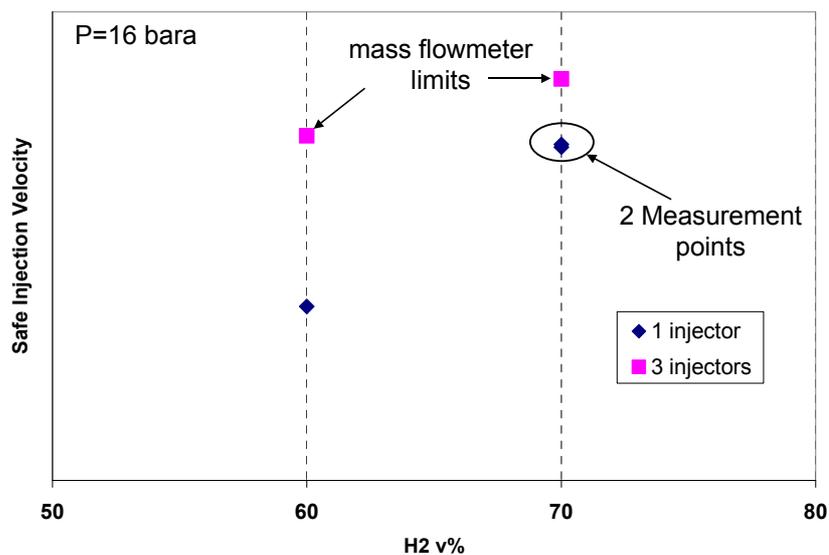


Abbildung 2.5.8: Ergebnisse der Verbrennungsversuche zur Optimierung der Brennstoffeindüsung: Effekt von Wasserstoffanteil und Injektorenanzahl.

2.5.2 Entwicklung des Gasturbinenbrennerprototyps in Originalmaßstab

Basierend auf den im Kapitel 1.4 beschriebenen, bestehenden wissenschaftlichen Kenntnissen und Brennerentwicklungserfahrungen, sowie auf den neu gewonnenen Ergebnissen, die in Kapiteln 2.1 bis 2.5.1 eben dargestellt worden sind, wurde einen Gasturbinenbrennerprototyp entwickelt, mit dem Ziel, folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- Originalmaßstab und Auslegung für Originalbedingungen bei Gasturbinenvolllast
- Ausreichende mechanische Festigkeit für mindestens eine Reihe Verbrennungsversuche bei gasturbinenähnlichen Hochdruckbedingungen
- Hohe Betriebssicherheit im Bezug auf Flammenstabilität und Flammenrückschlag
- Niedrige Schadstoffemissionen mit minimaler Brennstoffverdünnung
- Fähigkeit, die angestrebten Emissionen und Betriebssicherheitsziele über einen breiten Bereich von Betriebsbedingungen, sowohl im Betrieb mit wasserstoffhaltigen Brennstoffen als auch bei Erdgasbetrieb

Auch bei dieser Aufgabe wurde, wie schon im Kapitel 1.3 beschrieben, in sequenzielle Schritten vorgegangen, durch Strömungs- und Verbrennungsuntersuchungen mit zunehmender Komplexität und Realitätstreue und abnehmender Anzahl von optimierten Brennervarianten bis zu den Hochdruckversuchen.

Ähnlich zur im Kapitel 2.2 beschriebenen Prozedur zur Entwicklung vom skalierten Brennerkonzept wurden verschiedene Varianten zuerst numerisch untersucht, mit Fokus auf Brenneraerodynamik sowie Flammenform und -position. Wie Abb. 2.5.9 zeigt, lassen sich in Abhängigkeit von kritischen Brennerdesignparametern zwei grundsätzlich verschiedene Fälle mit verschiedenen Eigenschaften erreichen.

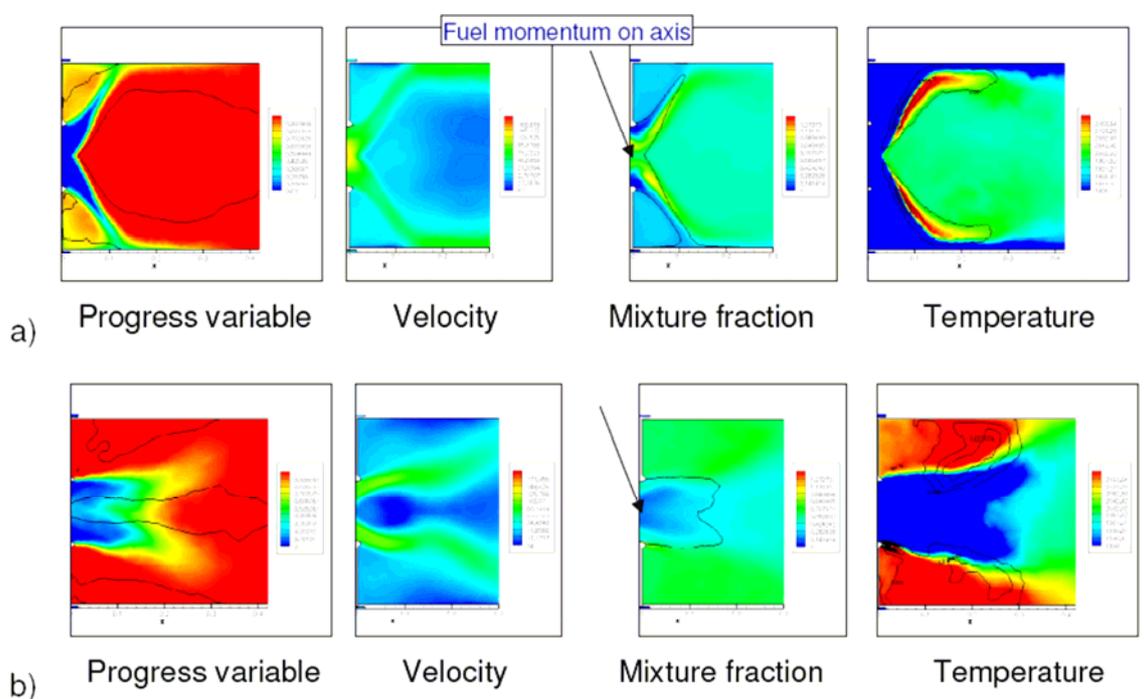


Abbildung 2.5.9: Brennerprototyp: Strömungssimulation mit Verbrennung:
a) Breite Rezirkulationszone - fetter Kernbereich;
b) Schmale Rezirkulationszone - magerer Kernbereich

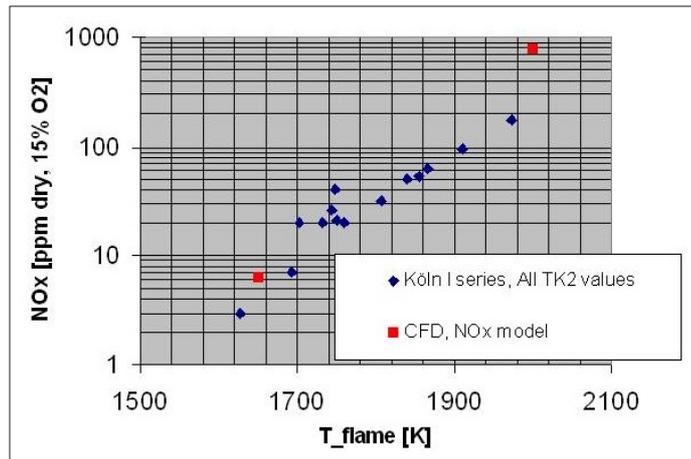


Abbildung 2.5.10: Brennerprototyp: NO_x - Emissionsvorhersage basierend auf Strömungssimulation mit Verbrennung, validiert anhand von DLR Hochdruckversuche.

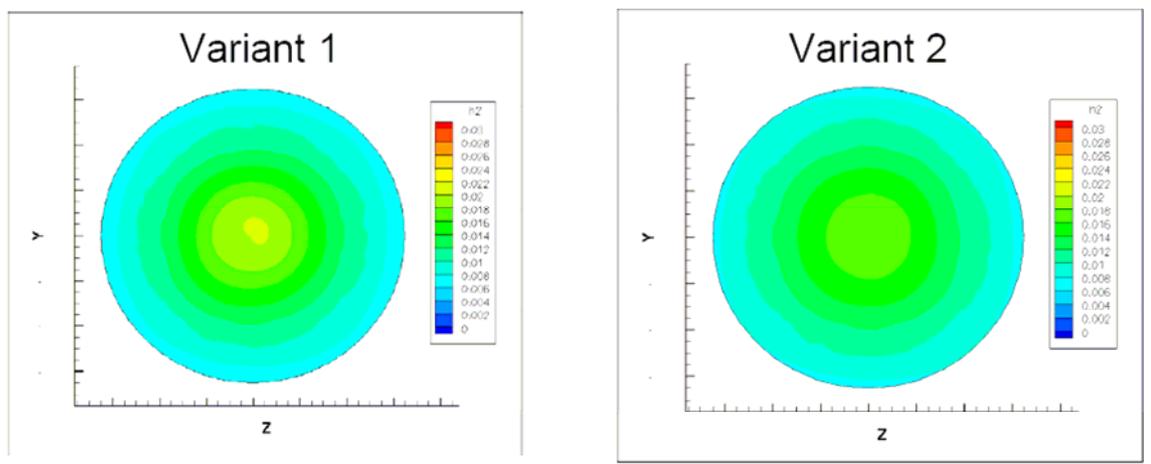


Abbildung 2.5.11: Brennerprototyp: Mischungsfelder am Brenneraustritt aus Strömungssimulation zur Optimierung der Brennstoffeindüsung.

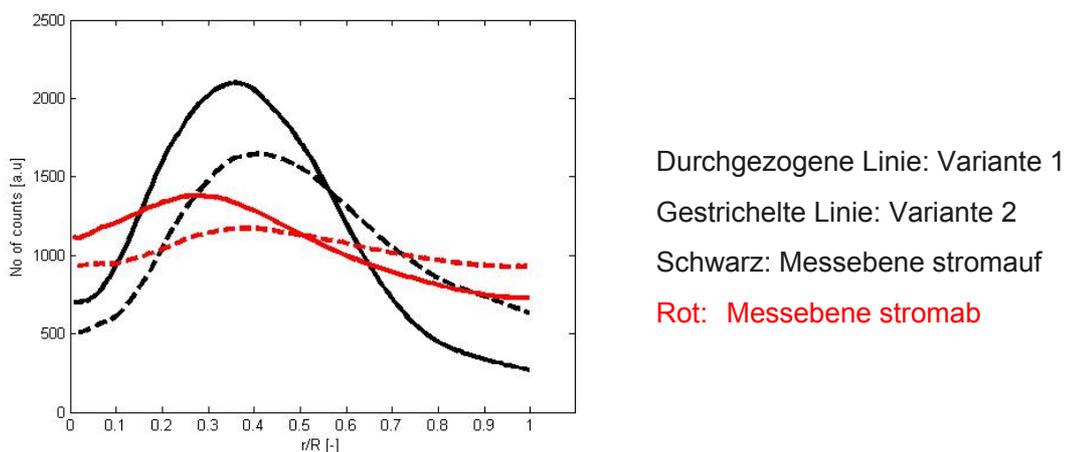


Abbildung 2.5.12: Brennerprototyp: Mischungsfelder an zwei verschiedenen Messebenen aus LIF - Konzentrationsmessungen im Wasserkanalmodell.

Einige der Hauptmerkmale sind, dass sich im Fall eines breiten Rezirkulationszone, auch die Flamme weit ausbreiten kann, und eher unempfindlich auf Lastvariationen oder turbulente Flammengeschwindigkeit reagiert. Einzig die Ausbildung von post-flame

NO_x steigt mit steigender Last. Der Vorteil beim Fall mit schmalen Rezirkulationszone ist stattdessen die verbesserte Mischung. In diesem Fall entsteht der wesentliche Beitrag zum post-flame NO_x eher aus dem großen Reaktionsvolumen.

Diese Aussagen über NO_x-Emissionen wurden bei der numerischen Untersuchung durch die Anwendung eines speziell für wasserstoffhaltige Brennstoffe entwickelten NO_x-Vorhersagemodells ermöglicht. Dieses Modell wurde zur Validierung auch mit gemessenen NO_x-Werten aus Verbrennungsversuchen mit dem Gasturbinenbrennerprototyp unter Hochdruckbedingungen verglichen. Wie in Abb. 2.5.10 zu sehen ist, konnte das Modell die gemessenen Werte gut wiedergeben.

Nach Festlegung der Brenneraerodynamik wurde mittels numerischen sowie experimentellen Mischungsuntersuchungen die Brennstoffeindüsung optimiert. Aus der Entwicklung resultierten zwei vielversprechende Varianten, die für die folgende Weiterentwicklung, als auch die folgenden Verbrennungsversuche ausgewählt wurden.

Dargestellt in Abb. 2.5.11 und 2.5.12 sind die Ergebnisse der Strömungssimulation bzw. von LIF- Konzentrationsmessungen im Wasserkanal. Beide Methoden stimmen gut überein und zeigen, dass Variante 1 ein gutes Brennstoffkonzentrationsprofil im Bezug auf Wandrückschlag besitzt, da es entlang der Wand relativ mager ist. Variante 2 ist stattdessen ein guter Kandidat für tiefe Emissionen, da sie eine sehr gleichmäßige Brennstoffverteilung erzeugt.

In Abb. 2.5.12 ist auch der deutliche Einfluss der verfügbaren Mischlänge zwischen Brennstoff - Eindüsungsort und Flammenposition zu beachten, was wiederum ein Optimierungsparameter zwischen Rückschlagssicherheit und niedrigen Emissionswerten ist.

2.5.3 Validierung unter gasturbinenähnlichen Bedingungen

Nach Vorversuchen im atmosphärischen Verbrennungsprüfstand, wurden die zwei ausgewählten Gasturbinenbrennerprototypen zur Validierung bei Gasturbinenbedingungen am Hochdruckversuchsstand des DLR in Köln zur Validierung getestet.

Die Validierungsergebnisse bestätigen während der Entwicklung identifizierter Merkmale der beiden Varianten und erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Das neuentwickelte Brennerkonzept erlaubt eine deutliche Reduktion der NO_x-Emissionen im Vergleich zur existierenden Brennertechnologie bei der Zieltemperatur und mit 70% Wasserstoffanteil im Brennstoff. Mit dem neuen Brennerprototyp konnten die Emissionswerte um ein Drittel und teilweise um die Hälfte reduziert werden.
- Variante 1 gilt als rückschlagssicher auch bei Flammentemperaturen über dem Zielwert und zeigte außerdem einen stabilen Betriebsbereich in Richtung tieferer Flammentemperaturen.
- Variante 2 kann bei der Zieltemperatur und mit 70% Wasserstoff ohne Flammenrückschlag und bei NO_x-Emissionen unter dem Zielwert betrieben werden.
- Variante 2 kann bei der Zieltemperatur ohne Flammenrückschlag bis 80% Wasserstoff betrieben werden. Dabei steigen die NO_x-Emissionen, bleiben aber deutlich unter dem mit existierender Technologie erreichbaren Wert.
- Mit Variante 2 ist wegen des Flammenrückschlagrisikos keine Erweiterung des Betriebsbereichs in Richtung höhere Flammentemperaturen möglich.

Zusammenfassend, hat das neue Brennerkonzept bei den Validierungsversuchen das hohe Potential im Vergleich zu herkömmliche Technologie bestätigt und dient als vielversprechenden ersten Technologieschritt für die Entwicklung eines brennstoffflexiblen, drallstabilisierten Verbrennungssystems. Die erzielten Projektergebnisse haben aber auch gezeigt, dass eine weitere Optimierung zwischen niedrigen Emissionen und breitem Stabilitätsbereich (Flammenrückschlaggrenze) nötig ist.

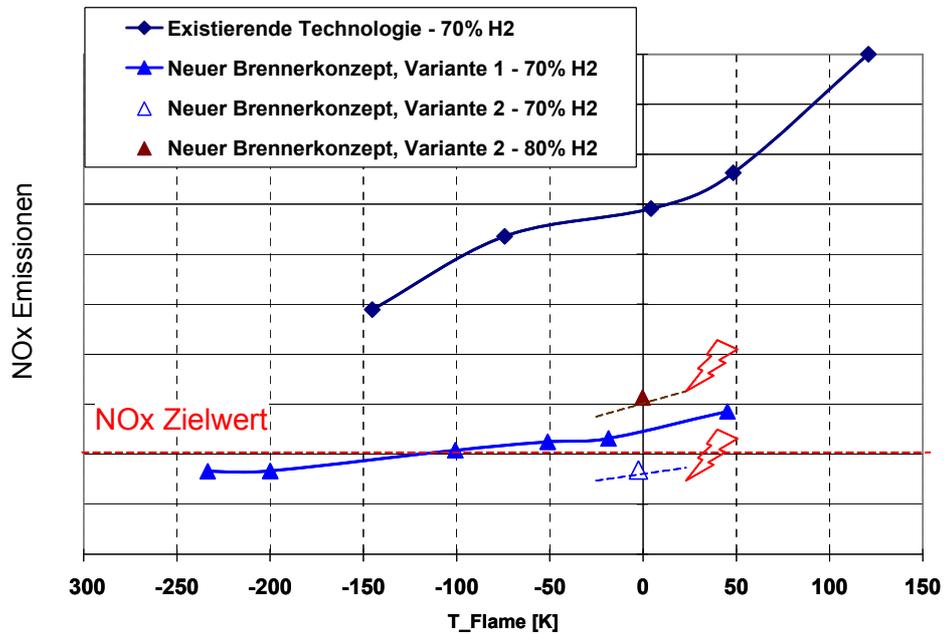


Abbildung 2.5.13: Ergebnisse der Verbrennungsversuche bei Gasturbinenbedingungen im Hochdruck-Einzelbrennerprüfstand zur Validierung des Brennerprototyps.

3 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes ist es gelungen, in verschiedenen Entwicklungsstadien ein Brennersystem zu entwickeln und zu optimieren, das viel versprechende Eigenschaften aufweist.

Im Rahmen einer ersten CFD- Studie wurde das Strömungsfeld des Brenners charakterisiert. Schon zu diesem frühen Zeitpunkt wurde das hohe Potential der Grundaerodynamik sichtbar, da am Austritt nahezu ein Festkörperwirbel und ein axiales Blockgeschwindigkeitsprofil vorherrschen. Wie in [3] beschrieben, sind damit große Vorteile in bezug auf die CIVB Rückschlagsneigung verbunden.

Basierend auf diesen Ergebnissen, wurde der sehr einfach herzustellende Brenner im Wasserkanal untersucht. Hier konnten die Ergebnisse aus der CFD Studie mittels PIV bestätigt bzw. erweitert und auch bezüglich der Mischung im Brenner mittels LIF quantitative Aussagen getroffen werden. Verschiedene Brennstoffeindüsungsvarianten wurden getestet und ihr Einfluss auf die Mischungsgüte, aber auch auf das Strömungsfeld untersucht. Mittels Eindüsung großer Volumenströme durch die axiale Brennstoffdüse konnte gezeigt werden, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, das Strömungsfeld durch den hohen zur Verfügung stehenden Brennstoffimpuls zu beeinflussen. Konkret bedeutet das, dass durch diese Totaldruckerhöhung auf der Achse die RZZ weiter stromab in die Brennkammer verlagert bzw. zerstört werden kann. Dies führt im Verbrennungsfall wiederum zu einem verbesserten CIVB Rückschlagsverhalten. Auch die Mischung für diesen Fall wurde untersucht, mit dem Ergebnis, dass bei sehr hohem Impulseintrag die Mischungsgüte am Brenneraustritt vernünftig erscheint. Neben der rein axialen Eindüsung wurde auch die Eindüsung von Brennstoff entlang der Schlitze untersucht. Der Einfluss auf das Strömungsfeld ist wie erwartet gering und auch die Mischungsgüte dieser Konfigurationen ist viel versprechend.

In den atmosphärischen Verbrennungsuntersuchungen wurde der Brenner auf sein Stabilitätsverhalten, aber auch in bezug auf die NO_x -Emissionen untersucht. In einer ersten Versuchsreihe wurde der Brenner mit Erdgas betrieben. Die zuvor bereits beschriebenen Vorteile der Strömungsführung führten hier zu einem sehr stabilen Rückschlagsverhalten. Auch bei sehr geringen Durchsätzen (weit unter Maschinenbedingungen) konnte kein Rückschlag erzwungen werden. Die Eindüsung des Brennstoffs entlang der Schlitze führte, wie erwartet, zu sehr geringen NO_x Werten, was auf gute Mischung schließen lässt.

Um nun den Brenner und die Brennstoffeindüsung auf Tauglichkeit bezüglich der Synthesegasverbrennung zu untersuchen, wurden im weiteren Versuchsreihen mit reinem Wasserstoff durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass durch axiale Brennstoffeindüsung die CIVB Sicherheit des Brenners erheblich gesteigert werden kann. Da hier mit reinem Wasserstoff gearbeitet wurde, konnten die guten Mischungsergebnisse aus dem Wasserkanal nicht direkt bestätigt werden, da im Vergleich zu MBTU und LBTU Synthesegasen bei Wasserstoff der verfügbare Brennstoffimpuls nicht hoch genug ist und somit eine worst case Betrachtung darstellt. Beim Einsatz der Schlitzeindüsung allerdings war es möglich, die vorhergesagte gute Mischungsgüte mittels NO_x -Messungen zu bestätigen.

Außerdem wurde für beide Eindüsungsszenarien, aber auch bei externer Brennstoffmischung, eine detaillierte Untersuchung des Rückschlagverhaltens und der Rück-

schlagsphänomene vorgenommen. Hier konnte auch für Wasserstoff ein ausgezeichnetes Rückschlagsverhalten erreicht werden. Bei Betriebsbereichen wie sie in Gasturbinen üblich sind konnte kein Rückschlag detektiert werden, erst ein massives Absenken des Durchsatzes führte zum Rückschlag. Eine genauere Untersuchung der Flammenpropagation während des Rückschlags führte zu der Einsicht, dass mit der vorgeschlagenen Konfiguration und dem resultierenden Strömungsfeld CIVB gut kontrollierbar ist und nun WRS als kritischer erscheint. Diese Einsicht wurde auch durch die Hochdruckversuche bestätigt.

Im Rahmen dieser letzten Untersuchungen wurde neben dem Einfluss des Drucks auf die Flamme mittels OH* Chemilumineszenz, im Rahmen von Rückschlagsversuchen auch der Einfluss der Drucks auf die Betriebssicherheit quantifiziert. Auch hier konnte mit Erdgas ein rückschlagsfreier Betrieb erreicht werden. Mit Wasserstoff allerdings wurde wieder WRS detektiert. Durch Modelle und Korrelationen war es möglich, die atmosphärischen und die Hochdruckversuche miteinander zu vergleichen, wobei die Hochdruckdaten weit schlechter waren als die Vorhersage. Das Ergebnis dieses Prozesses ist, dass es bei Maschinendruck allgemein sehr schwierig sein dürfte einen Brenner ohne Abmagerung der Wandbereiche sicher mit reinem Wasserstoff zu betreiben.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass Rückschlag aufgrund von CIVB mit dem hier entwickelten Brenner, bei Einsatz verschiedenster Brennstoffe, sehr gut unter Kontrolle gebracht wurde. Allgemein ist der Brenner sehr stabil, brennstoffflexibel und dank guter Mischung können sehr gute Emissionswerte erreicht werden. Die Phänomene (Strömungsfeld, Mischung und Rückschlag) im Brenner und dessen Verhalten unter verschiedensten Betriebsbedingungen sind sehr gut erforscht und verstanden worden.

Basierend auf den Ergebnissen des skalierten Brennerkonzeptes und auf weiteren Eindüsungsuntersuchungen an einem Brenner im Originalmaßstab zur Optimierung der Rückschlagssicherheit bei Eindüsung von wasserstoffhaltigen Brennstoffe, konnte einen gasturbinenkompatiblen Brennerprototyp entwickelt werden.

Nach erster Optimierung durch numerische und experimentelle Strömungsuntersuchungen, sowie durch Verbrennungsversuche bei atmosphärischen Druck, wurde der gasturbinenkompatiblen Brennerprototyp zusätzlich durch Verbrennungsversuche bei Hochdruckbedingungen validiert.

Als Hauptergebnisse der Validierung ließen sich die NO_x-Emissionswerte um ca. ein Drittel bzw. 50% im Vergleich zu existierender Brennertechnologie reduzieren und Wasserstoffanteile im Brennstoff bis zu 80% ohne Flammenrückschlag erreichen.

Die erzielten Projektergebnisse haben gezeigt, dass das vorgeschlagene, neue Brennerkonzept, als vielversprechenden ersten Technologieschritt für die Entwicklung eines brennstoffflexiblen, drallstabilisierten Verbrennungssystems gilt, aber auch, dass eine weitere Optimierung zwischen niedrigen Emissionen und breitem Stabilitätsbereich nötig ist. Für die weitere Planung zusätzlich zu beachten sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die durch die zukünftige Gesetzgebung und Regelungen bezüglich CO₂-Emissionen zu erwarten sind. Eine Weiterentwicklung ist basierend auf die jetzt vorhandenen Erkenntnisse möglich, und als nächster Schritt soll das weitere Vorgehen basierend auf technologischen und kommerziellen Aspekten im Detail spezifiziert werden.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Vorhabensbeschreibung; COORETEC Turbo Vorhaben 2.1.6; *Flexibles Verbrennungssystem für wasserstoffhaltige Brennstoffe*; Technische Universität München/ALSTOM Power Generation AG; April; 2006.
- [2] Alstom; *DE19545310B4*; Deutsches Patent- und Markenamt; Paris; Frankreich; Juni 2008.
- [3] Burmberger, S.; *Optimierung der Aerodynamischen Flammenstabilisierung für brennstoffflexible vorgemischte Gasturbinenbrenner*; Technische Universität München; Diss; 2009.
- [4] Burmberger, S., Hirsch, C., Sattelmayer, T.; *Design rules for the velocity field of vortex breakdown swirl burners*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2006-90495; Barcelona; Spain; 2006.
- [5] Burmberger, S., Hirsch, C., Sattelmayer, T.; *Designing a radial swirler vortex breakdown burner*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2006-90497; Barcelona; Spain; 2006.
- [6] Kröner, M.; *Einfluss lokaler Löschvorgänge auf den Flammenrückschlag durch verbrennungsinduziertes Wirbelaufplatzen*; Technische Universität München; Diss; 2003.
- [7] Konle, M.; *Verbrennungsinduziertes Wirbelaufplatzen in moderat turbulenten Drallströmungen*; Technische Universität München; Diss; 2010.
- [8] Fanaca, D., Alemela, P.R., Hirsch, C., Sattelmayer, T.; *Comparison of the flow field of a swirl stabilised premixed burner in an annular and a single burner combustion chamber*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2009-59884; Orlando; USA; 2009.
- [9] Fu, Y., Cai, J., Jeng, S.-M., Mongia, H.; *Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2005-68622; Reno-Tahoe; USA; 2005.
- [10] Fu, Y., Jeng, S.-M., Tacina, R.; *Characteristics of the swirling flow generated by an axial swirler*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2005-68728; Reno-Tahoe; USA; 2005.
- [11] Freitag, E.; *On the measurement and Modelling of Flame Transfer Functions at Elevated Pressure*; Technische Universität München; Diss; 2009.
- [12] Sangl, J., Mayer, C., Sattelmayer, T.; *Dynamic Adaptation of Aerodynamic Flame Stabilization of a Premixed Swirl Burner to Fuel Reactivity using fuel momentum*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2010-22340; Glasgow; Schottland; 2010.
- [13] Mayer, C., Sangl, J., C., Sattelmayer, T., Lachaux, T., Bernero, S.; *Study on the Operational Window of a Swirl Stabilized Syngas Burner under Atmospheric and High Pressure Conditions*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2011-45125; Vancouver; Kanada; 2011.
- [14] Fine, B.; *The Flashback of Laminar and Turbulent Burner Flames at Reduced Pressure*; Combustion and Flame; Vol. 2, No. 3, pp. 253-266; 1958.

- [15] Fine, B.; *Effect of Initial Temperature on Flashback of Laminar and Turbulent Burner Flames*; Industrial and Engineering Chemistry; Vol. 51, No. 4, pp. 564-566; 1959.
- [16] Khittrin, L.N.; *Peculiarities of laminar and turbulent flame flashback*; 10th Symposium (Int.) on Combustion; pp. 1285-1291; 1965.
- [17] Zu, H.; Laker, J.R.; Mastorakos, E.; Vafidis, C.; Xu, H.M.; *The development and application of a fast-response DC-coupled flame ionization current sensor*, Experiments in Fluids 14; S.316-320; 1993.
- [18] Konle, M., Sattelmayer, T.; *Interaction of heat release and vortex breakdown in swirling flames*; 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics; Lissabon; Portugal; 2008.
- [19] Siewert, P.; *Flame front characteristics of turbulent lean premixed methane/air flames at high-pressure*; ETH Zürich; Diss; 2006.
- [20] Sattelmayer, T., Polifke, W., Winkler, D., Döbbeling, K.; *NO_x-Abatement Potential of Lean-Premixed GT-Combustors*; Transactions of the ASME, J. of Engineering for Gas Turbine and Power; Vol. 120, pp. 48-59; 1998.
- [21] Fritz, J., Kröner, M., Sattelmayer, T.; *Flashback in a Swirl Burner with Cylindrical Premixing Zone*; Journal of Engineering for Gas Turbines and Power; Vol. 126, No. 2, pp. 276-283; 2004.
- [22] Kröner, M., Fritz, J., Sattelmayer, T.; *Flashback Limits for Combustion Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power; Vol. 125, No. 3, pp. 693-700; 2003.
- [23] Dibinski, V., Ossadtchi, A., Mandelshtam, V., Reisler, H.; *Reconstruction of Able-Transformable Images: The Basis-St Expansion Abel Transform Method*; Rev. SCI. Instrum.; Vol. 73, No. 7, pp. 2635-2643; 2002.
- [24] Konle, M., Sattelmayer, T.; *Time scale model for the prediction of the onset of flame flashback driven by Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB)*; Journal of Engineering for Gas Turbines and Power; Vol. 132, No. 4, pp. 041503; 2010.
- [25] Schlichting, H.; *Grenzschicht-Theorie*; Verlag G. Braun; 1982.
- [26] Eichler, C., Baumgartner, G., Sattelmayer, T.; *Experimental Investigation of Turbulent Boundary Layer Flashback Limits for Premixed Hydrogen-Air Flames Confined in Ducts*; ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air; No. GT2011-45362; Vancouver; Kanada; 2011.
- [27] Reiss, F., Griffin, T., Reyser, K., "The ALSTOM GT13E2 Medium Btu Gas Turbine," ASME2002, Amsterdam, June 2002.
- [28] Döbbeling, K. et al.: „25 Years of BBC/ABB/ALSTOM Lean Premix Combustion Technologies”, ASME Turbo Expo 2005, GT2005-68269
- [29] Sattelmayer, T. et al.: „Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Burner Development and Tests at Atmospheric Pressure“, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Jan. 1992, Vol. 114
- [30] Aigner, M. et al.: „Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Test under full engine conditions“, ASME Turbo Expo 1990, 90-GT-308

- [31] Sattelmayer, T., Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen, Springer Verlag, In 'Stationäre Gasturbinen' by Lechner, C., Seume, J., pages 385-445, 2003.
- [32] Sattelmayer, T., Knöpfel, H.P., Jansohn, P., Ruck, T., Steinbach, C., Development of the Advanced EV Burner for the ABB GTX100 Gas Turbine, ASME Asia 97, pages 97-AA-139, Singapore, 1997.
- [33] Sattelmayer, T., Felchlin, M.P., Haumann, J., Hellat, J., Styner, D., Second-Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Burner Development and Tests at Atmospheric Pressure, Transaction of the ASME, J. of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 114, pages 118-125, 1992.
- [34] Döbbeling, K., Eroglu, A., Winkler, D., Sattelmayer, T., Keppel, W., Low NOx Premixed Combustion of MBTU-Fuels in a Research Burner, 41th ASME Int'l Gas Turbine + Aeroengine Congress and Exposition, No. 96-GT-126, Birmingham, UK, 1996.
- [35] Döbbeling, K., Knöpfel, H.P., Polifke, W., Winkler, D., Steinbach, C., Sattelmayer, T., Low NOx Premixed Combustion of MBTU-Fuels Using the ABB Double Cone Burner (EV-Burner), ASME 94-GT-394, J. of Engineering for Gas and Aeroengine Congress & Exposition, Birmingham, UK, 1994.
- [36] Sattelmayer, T., Döbbeling, K., Knöpfel, H.P., Müller, P., Reyser, K., ABB's Medium BTU EV Burner for Syngas-Application - Test Results and GCC Integration Concept, Twelfth EPRI Conf. on Gasification Power Plants, San Francisco, 1993.
- [37] Sattelmayer, T., Polifke, W., Lutum, E., Senior, P., Combustion Technology of the ABB GT13E2 Annular Combustor, 20th Int'l Congress on Combustion Engines, No. Paper G22, London, UK, 1993.
- [38] Polifke, W., Döbbeling, K., Sattelmayer, T., Nicol, D.G., Malte, P.C., A NOx Prediction Scheme for Lean-Premixed Gas Turbine Combustion Based on Detailed Chemical Kinetics, J. of Eng. for Gas Turbines 1996, Originally presented at the Int'l Gas and Aeroengine Congress & Exposition, No. ASME 95-GT-108, pages 765-772, Birmingham, UK, 1995.
- [39] Sattelmayer, T., Polifke, W., Döbbeling, K., Nicol, D.G., Malte, P.C., A NOx Prediction Scheme for Lean-Premixed Gas Turbine Combustion Based on Detailed Chemical Kinetics, ASME-GT-108, Int'l Gas and Aeroengine Congress & Exposition, pages 765-772, Birmingham, UK, 1995
- [40] http://www.td.mw.tum.de/tum-td/de/forschung/pub/index_html2/
- [41] Kiesewetter, F., Hirsch, C., Fritz, J., Kröner, M., Sattelmayer, T., Two-Dimensional Flashback Simulation in Strongly Swirling Flows, IGTI Turbo Expo, ASME-GT-2003-38395, Atlanta, USA, 2003.
- [42] Fritz, J., Kröner, M., Sattelmayer, T., Simultaner Einsatz optischer Messmethoden zur Untersuchung der Flammenausbreitung in verdrallten Rohrströmungen, Tagungsbericht GALA 2000, Freising, Germany, 2000.
- [43] Brückner-Kalb, J.R., Hirsch, C., Sattelmayer, T., Operation Characteristics of a Premixed Sub-ppm NOx Burner With Periodical Recirculation of Combustion Products, ASME Turbo Expo, Power for Land, Sea, and Air, GT2006-90072, Barcelona, Spain, 2006.
- [44] Kalb, J.R., Sattelmayer, T., Lean Blowout Limit and NOx Production of a Premixed Sub-ppm NOx Burner With Periodic Recirculation of Combustion Products, ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 128, 2006.

- [45] Kalb, J.R., Sattelmayer, T., Operation Characteristics of a Premixed Sub-ppm NOx Burner with Cyclic Periodical Recirculation of Combustion Products, VDI Verlag GmbH, VDI-Berichte 1888, VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2005.
- [46] Kalb, J.R., Sattelmayer, T., Lean Blowout Limit and NOx-Production of a Premixed Sub-ppm NOx Burner with Periodic Flue Gas Recirculation, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53410, Vienna, Austria, 2004.
- [47] Freitag, Ewald, Konle, Holger, Lauer, Martin, Hirsch, Christoph, Sattelmayer, Thomas, Pressure Influence on the Flame Transfer Function of a Premixed Swirling Flame, ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, GT2006-90540, Barcelona, Spain, 2006.
- [48] Zajadatz M., Lachner R., Bernero S., Motz C., Duckers J., Flohr P. (2007), Development and Design of ALSTOM's Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NOx Reduction, ASME GT2007-27730, ASME TurboExpo, Montreal, Canada
- [49] Pennel D., Hiddemann M., Flohr P., Alstom Fuel Flexibility for today's and future market requirements, Power-Gen Europe, June 2010, Amsterdam, The Netherlands

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN BMW	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts AG TURBO Verbundvorhaben COORETEC-Turbo - Teilvorhaben 2.1.6 „Flexibles Verbrennungssystem für wasserstoffhaltige Brennstoffe“	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Bernero, Stefano ; Lachaux, Thierry (Alstom Power) Sattelmayer, Thomas; Mayer, Christoph; Sangl, Janine (TUM)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2010
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum 20.06.2011
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alstom Power Systems GmbH Boveristr. 22 D-68309 Mannheim Technische Universität München (TUM) Lehrstuhl für Thermodynamik Boltzmannstr. 15 D-85747 München	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0327715N
	11a. Seitenzahl Bericht 46
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben 49
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 40
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel dieser Untersuchung war die Entwicklung eines neuen Vormischbrennerkonzeptes für den Betrieb von Gasturbinen mit wasserstoffhaltigen Brennstoffen. Die Entwicklung einer solcher Technologie ist eine Voraussetzung für die verbesserte Wirtschaftlichkeit von Kombikraftwerke mit integrierter Vergasung zur Minderung der CO2-Emissionen durch Abscheidung des Kohlenstoffanteils aus dem Brenngas vor der Verbrennung in der Gasturbine. Im Vorhaben wurden grundlegende Untersuchungen zur Brennstoff-Luft-Mischung in Drallbrennern mit Wasserstoffgasen, zum Einfluss von großen Brennstoffvolumenströmen auf die Brenneraerodynamik, sowie zu Brennersysteme mit Mehrfachbrennstoffen wie Synthese- und Erdgasen durchgeführt. Mithilfe detaillierter Simulationen und Strömungs- sowie Verbrennungsversuchen mit Labormodellen und den daraus gewonnenen Auslegungs- und Skalierungsregeln, wurde dann ein erster Prototyp eines Gasturbinenbrenners für wasserstoffhaltige Brennstoffe entwickelt und bei Maschinenbedingungen getestet.	
19. Schlagwörter Gasturbine, Vormischbrenner, Wasserstoff, Synthesegas, CFD-Studie	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN BMW	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title AG TURBO Joint Research Project COORETEC-Turbo – Sub-Project 2.1.6 “Flexible combustion system for hydrogen-rich fuels”	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Bernero, Stefano ; Lachaux, Thierry (Alstom Power) Sattelmayer, Thomas; Mayer, Christoph; Sangl, Janine (TUM)	5. End of Project 31.12.2010
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date 20.06.2011
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Alstom Power Systems GmbH Boveristr. 22 D-68309 Mannheim Technische Universität München (TUM) Lehrstuhl für Thermodynamik Boltzmannstr. 15 D-85747 München	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Originator's Report No.
16. Supplementary Notes	10. Reference No. 0327715N
17. Presented at (Title, Place, Date)	11a. No. of Pages Report 46
18. Abstract Target of this investigation is the development of a new premix burner concept for gas turbine operation with hydrogen-rich fuels. The development of such a technology is a pre-condition to improve the economic feasibility of combined cycle power plants with integrated gasification, which allow to reduce CO2 emissions from power generation with carbon-based fuels by pre-combustion carbon capture. In the current project basic investigations were carried out on fuel-air mixing in swirl-stabilized burners with H2-rich fuels, on the influence of large fuel volume flows on burner aerodynamics, as well as on combustion systems for multi-fuel operation, e.g. for syngas and natural gas. Detailed simulations and model testing in flow and combustion rigs provided the basis for the determination of layout and scaling rules. These allowed the development of a first prototype of a gas turbine burner for H2-rich fuels, which was then tested at full engine conditions.	11b. No. of Pages Publication
19. Keywords Gas turbine, premix burner, hydrogen, Syngas, CFD study, pre-combustion carbon capture;	12. No. of References 49
20. Publisher	14. No. of Tables 1
21. Price	15. No. of Figures/Enclosures 40