

## Untersuchungen zum Flammenrückschlag in drallerzeugenden Vormischbrennern

**D. Wendig, H. Kröger, N. Kornev, E. Hassel**

Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik,  
Universität Rostock

Schlagworte: Wirbelaufplatzen, Flammenrückschlag, Flammenfront, LDA, PIV, OH-LIF

### Zusammenfassung

Um die Erscheinungen des verbrennungsinduziertes Wirbelaufplatzens (CIVB) zielgerichtet untersuchen zu können, wird momentan ein Forschungsprojekt "Flammenrückschlag durch verbrennungsinduziertes Wirbelaufplatzen in freien Wirbelröhren" bearbeitet. Die Geschwindigkeitsfelder wurden durch LDA- (Laser Doppler Anemometrie) und PIV- (Particle Image Velocimetry) Messungen bestimmt. Um den Flammenrückschlag durch CIVB zu belegen, wurden entsprechende Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera vorgenommen. Besondere Bedeutung haben natürlich die Aufnahmen während des Flammenrückschlags. OH-LIF-Untersuchungen (Laser induzierte Fluoreszenz) sind durchgeführt worden, um Aufschlüsse über die Entwicklung der Flammenfront zu bekommen. Weiterhin wurden numerische Simulationen mit Hilfe der Grobstruktursimulation (LES - Large Eddy Simulation) durchgeführt. Der Flammenrückschlag tritt auf, wenn die Drallzahl einen Grenzwert bei konstantem Verbrennungsluftverhältnis übersteigt. Die Berechnungen bestätigen, dass ein Flammenrückschlag in freien Wirbelröhren auftritt.

### Einleitung

In der Gasturbinentechnik wird auf Grund einer Reihe von Vorteilen mit vorgemischten und verdrallten Flammen gearbeitet. Die Luftmenge übersteigt dabei den notwendigen Anteil welcher für die vollständige Verbrennung des Brennstoffes notwendig wäre. Auf diese Weise werden niedrige Verbrennungstemperaturen unter 1800 K erreicht, die die Bildung thermischer Stickoxide (NO<sub>x</sub>) weitgehend verhindern. Anstrengungen den NO<sub>x</sub>-Ausstoß zu reduzieren sind aus ökologischen Überlegungen heraus zwingend nötig um u. a. den sauren Regen und den photochemischen Smog zu verringern. Der mageren Vormischverbrennung kommt daher bereits heute, insbesondere bei der Erdgasverbrennung in stationären Gasturbinen, eine große Bedeutung zu. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass es bei diesen Brennerkonfigurationen zu Flammenrückschlägen kommen kann. Dieser Störfall, der zur thermischen Überlastung der Bauteile führt, muss in jedem Fall vermieden werden. Die physikalische Erscheinung Flammenrückschlag wurde hauptsächlich für die in einem Strömungskanal geschlossenen Wirbel untersucht. Im Gegensatz zu den bekannten Veröffentlichungen ([1], [2], [3]) finden in dieser Arbeit Untersuchungen für einen turbulenten nicht eingeschlossenen geraden Wirbel statt. Diese Wirbelkonfiguration ist theoretisch und experimentell einfach modellierbar und repräsentiert alle wichtigen Mechanismen des verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzens. Die zu untersuchende Wirbelbewegung ist stationär, während sich die in der Literatur bekannten Arbeiten mit nicht stationären in der Richtung quer zur Achse bewegenden Wirbeln befassen, die oft an der Grenze zwischen laminarem und turbulentem Zustand balancieren. Dies erschwert die Messungen und die Prüfung der Allgemeingültigkeit der Schlussfolgerungen. Die Untersuchungen haben das Ziel, nähere Aufschlüsse über die Bedingungen des verbrennungsinduzierten

## 31.2

Flammenrückschlags zu bekommen. Zu Beginn der Untersuchungen wurden LDA-Messungen an der isothermen Strömung vorgenommen, die zum Vergleich herangezogen werden [4].

### Experimenteller Aufbau

Da der Drall eine wichtige Einflussgröße auf das Brennverhalten darstellt, wurde in unserem Fachbereich ein Brenner gebaut, bei dem der Drall variiert werden kann. Es handelt sich um einen Nachbau des so genannten "Moveable Block"- Brenners. Bild 1 zeigt diesen Brenner, bei dem der Drall über einen Hebel (im Bild rechts) eingestellt werden kann. Ein Schnitt durch die Drallerzeugungseinheit ist im rechten Bild zu sehen. Durch Drehung der Hälfte der dreieckigen Formteile wird eine Änderung des Strömungsquerschnitts in axialer oder radialer Richtung erreicht und somit ein unterschiedlicher Drall erzeugt.

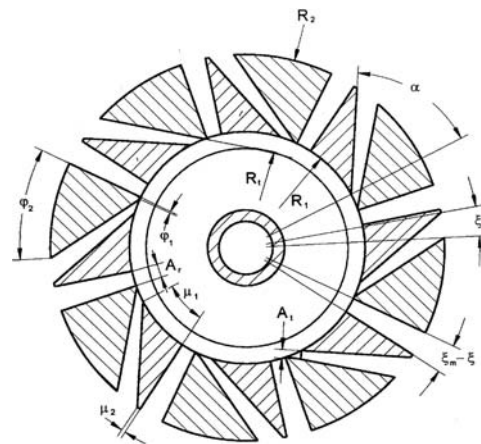


Bild 1: „Movable-Block“ - Brenner und Schnittebene in der Drallerzeugungseinheit

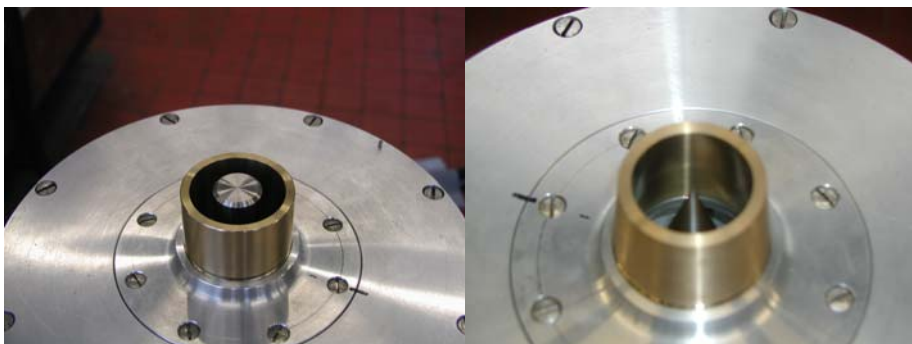


Bild 2: Düsenaustrittsform des Brenners in Zylinder- und Kegelform

Um hohe Strömungsgeschwindigkeiten gerade auf der Düsenachse zu erreichen, ist zu der Düsenstandardvariante Zylindereinsatz auch die Variante Kegeleinsatz gewählt worden. Bild 2 zeigt diese beiden Varianten. Dieser Brenner fügt sich in einen entsprechenden Versuchsaufbau ein, der als Schema in Bild 3 dargestellt ist. Für die PIV-Aufnahmen wird ein ND-YAG Laser mit Doppelpulsfunktion und einer Wellenlänge von 532 nm verwendet. Das Laserlicht wird in einer Lichtschnittoptik aufgeweitet, und mit einer CCD-Kamera werden dann die PIV-Bilder aufgenommen. Parallel dazu sind auch LIF-Aufnahmen mit einer

weiteren CCD-Kamera aufgenommen worden. Hierzu wird ein durchstimmbarer Excimer-Laser verwendet. Da der instationäre Vorgang des verbrennungsinduzierten Flammenrückschlags untersucht wird, muss die Technik entsprechend getriggert werden. Das Startsignal wird durch ein aus Photodioden bestehenden Flammensensor erzeugt. In den Bildern ist auch der Rostocker Ringbrenner als Flammenhalter zu sehen, von dem die Flamme auf die Brennerdüse zurückschlägt.

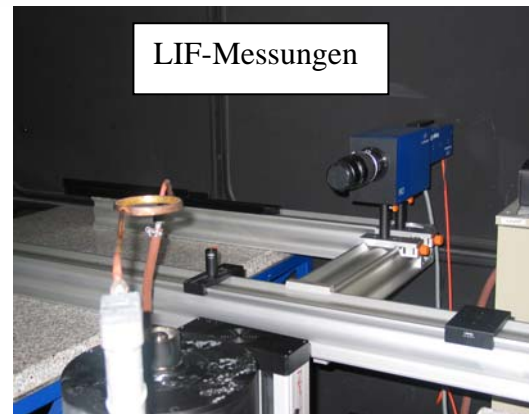
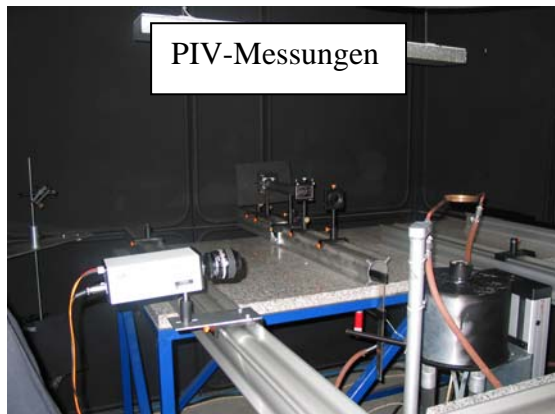
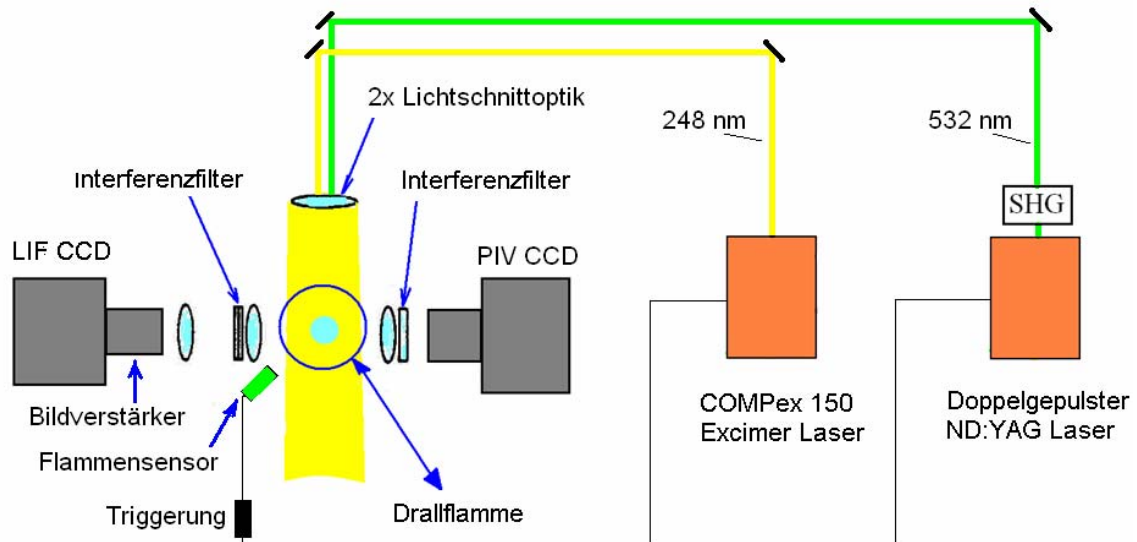


Bild 3: Schema und Bilder in der Versuchskabine des Versuchsaufbaus für die Untersuchung

Weil der Lichtschnitt nur eine Höhe von rund 40 mm besitzt müssen mehrere Aufnahmen in verschiedenen Höhen aufgenommen werden. Bei einem Abstand von 180 mm des Flammenhalters von der Brennerdüse sind fünf Lichtschnitte in unterschiedlicher Höhe notwendig, um den gesamten Bereich auswerten zu können. Die gesamte Optik ist fest installiert. Nur der Brenner ist durch eine Traversiereinrichtung beweglich gehalten. In Bild 4 ist dieser Zusammenhang noch einmal anschaulich dargestellt. Aus den fünf Einzelbildern wird dann ein Gesamtbild erzeugt, wie in den Bildern 6 und 7 dargestellt.

# 31.4

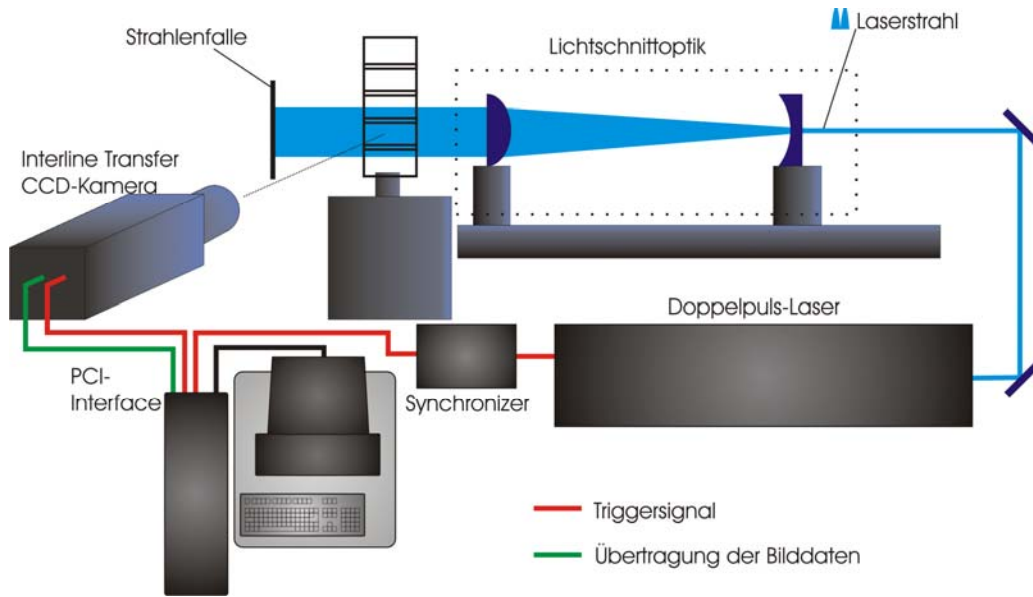


Bild 4: Schema zur Veranschaulichung der fünf übereinander angeordneten Teillichtschnitte

## Ergebnisse

Die ersten laseroptischen Untersuchungen waren LDA- Messungen an der isothermen Strömung. Sie sind durchgeführt worden, um die Richtigkeit der PIV- Messungen belegen zu können. In Bild 5 ist der Vergleich einer LDA-Messung mit der entsprechenden PIV-Messung dargestellt. Es ist gut zu sehen, dass sich die Geschwindigkeitsfelder gleichen. Die Abweichung direkt über der Düsenöffnung im unteren Teil der Bilder ist dadurch begründet, dass die Tracer-Partikel bei der LDA-Messung erst direkt auf Höhe der Düsenmündung von außen zugeführt worden sind.

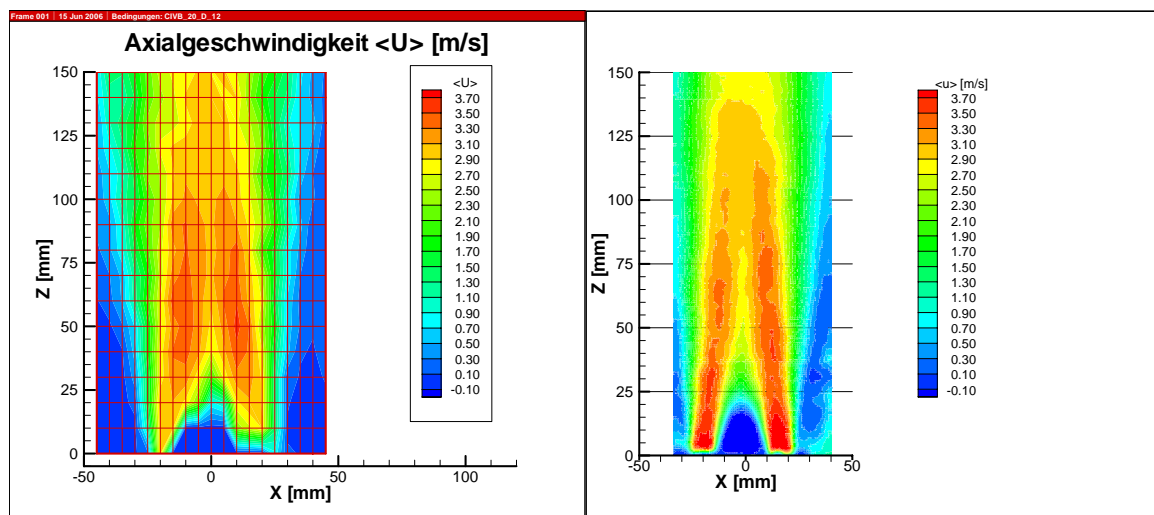


Bild 5: Vergleich von LDA-Messungen links mit PIV-Messungen rechts

Die ersten PIV-Untersuchungen wurden ebenfalls an der isothermen Strömung vorgenommen. Sie sind durchgeführt worden, um Aussagen über das dann bestehende Geschwindigkeitsfeld über dem Düsenaustritt zu bekommen Die Bilder 6 und 7 zeigen

Auswertungen von PIV-Messungen bei unterschiedlichen Drallzahlen  $S$  einmal für die Kegelvariante bei einem Volumenstrom von  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  und zum Anderen für die Zylindervariante von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Drallzahl  $S=0$  entspricht der unverdrallten Strömung. Jeweils das rechte Teilbild bei  $S=0,53$  zeigt das Geschwindigkeitsfeld bei einem größeren Drall. Diese Einstellungen können nicht für die Untersuchungen verwendet werden, weil der Flammenrückschlag in diesem Fall nicht durch Verbrennung sondern durch reine hydrodynamische Effekte verursacht wird. Die maximal erreichbare Drallzahl beträgt  $2,3$ . Das mittlere Teilbild mit  $S=0,26$  in Bild 7 zeigt das Geschwindigkeitsfeld, bei dem es zum Flammenrückschlag kommt. Es ist zu sehen, dass die Geschwindigkeiten um die Strahlachse herum positiv sind und dass sie mindestens einen Betrag von  $2,5 \text{ m/s}$  haben. Das kleine Rückstromgebiet in der Mitte direkt über Düsenöffnung sei hiervon ausgenommen. Die Berechnung der turbulenten Brenngeschwindigkeit ergab einen Wert von  $1,17 \text{ m/s}$ . Da dieser Wert kleiner als die gemessene Ausströmgeschwindigkeit ist, dürfte die Flamme eigentlich nicht gegen die Strömung weiter voran schreiten. Dies kann nur geschehen, weil durch die Verbrennung eine gegen die Strömung gerichtete Geschwindigkeit induziert wird, so dass die resultierende axiale Geschwindigkeitskomponente negativ wird.

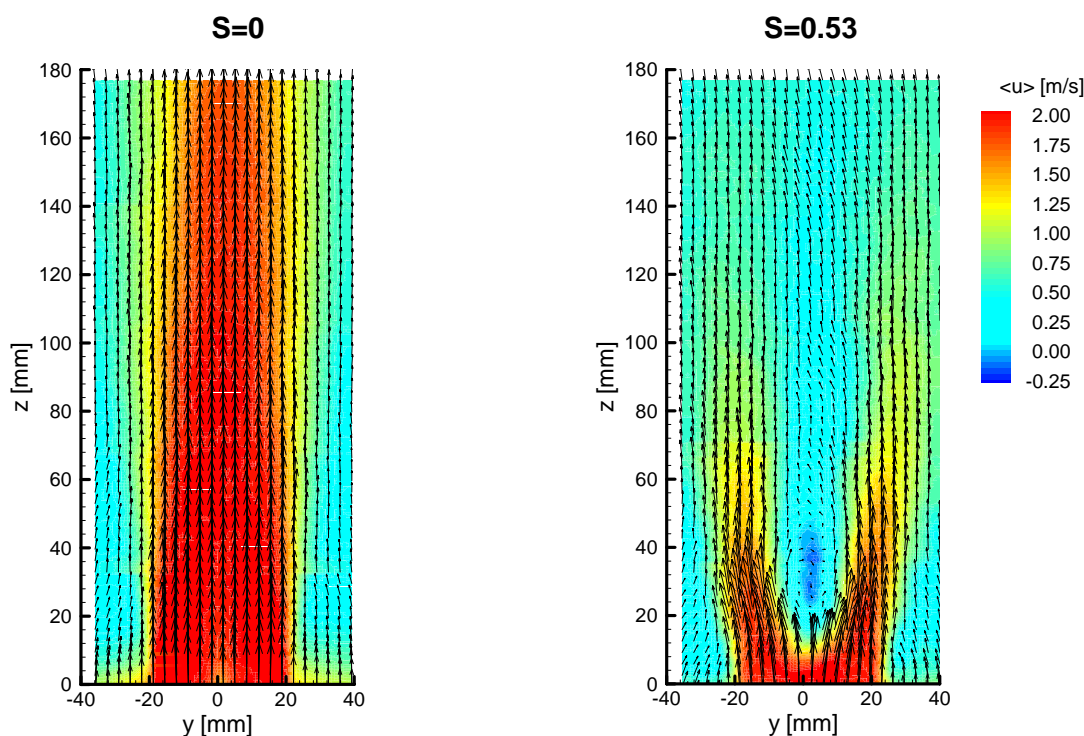


Bild 6: gewonnene Geschwindigkeitsfelder durch PIV-Aufnahmen bei einem Volumenstrom von  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  und unterschiedlichen Drallzahlen  $S$  für die Kegelvariante

Durch Variation des Dralls wurde versucht einen Flammenrückschlag herbeizuführen. Hierbei wanderte die Flamme plötzlich vom Flammenhalter stromauf zum Brennerdüsenaustritt. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurden die erzeugten Flammenrückschläge aufgenommen und ein Flammenrückschlag ist in Bild 8 aufgezeigt. Die Flamme propagiert zur Düsenöffnung, obwohl die Geschwindigkeiten im gemessenen Strömungsfeld größer sind als die turbulente Brenngeschwindigkeit.



# 31.6

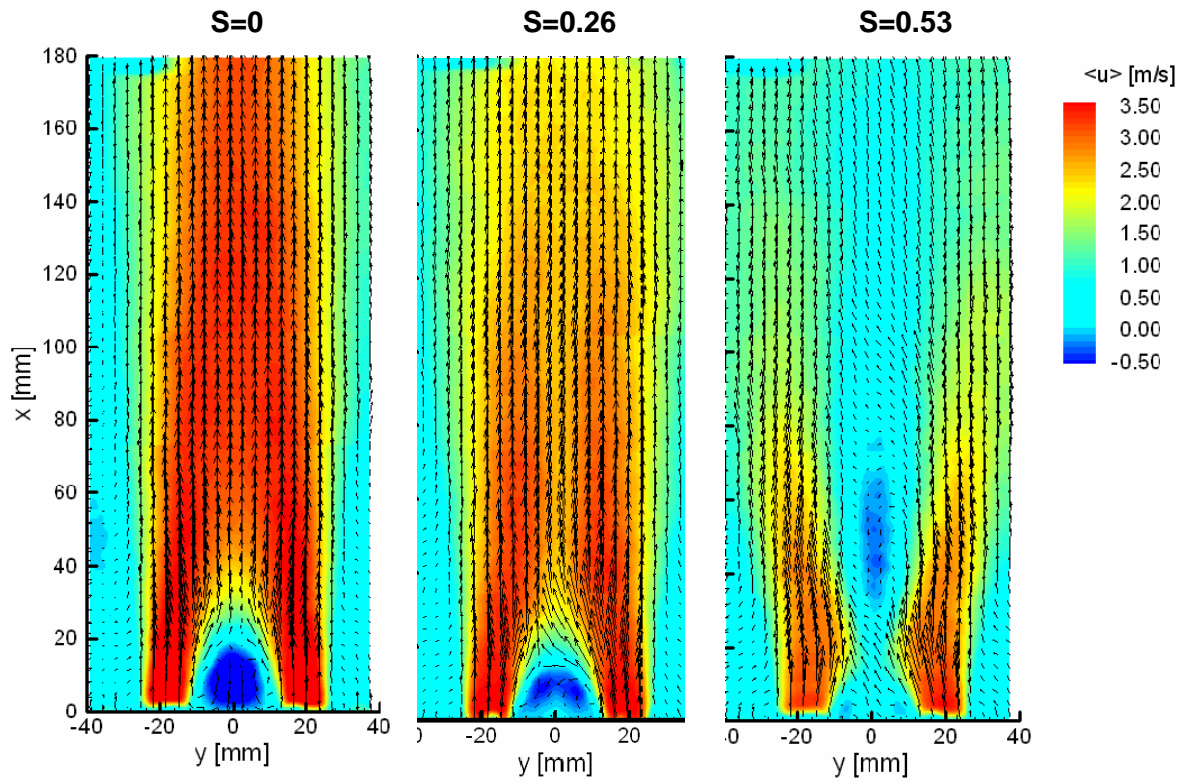


Bild 7: gewonnene Geschwindigkeitsfelder durch PIV-Aufnahmen bei einem Volumenstrom von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  und unterschiedlichen Drallzahlen  $S$  für die Zylindervariante

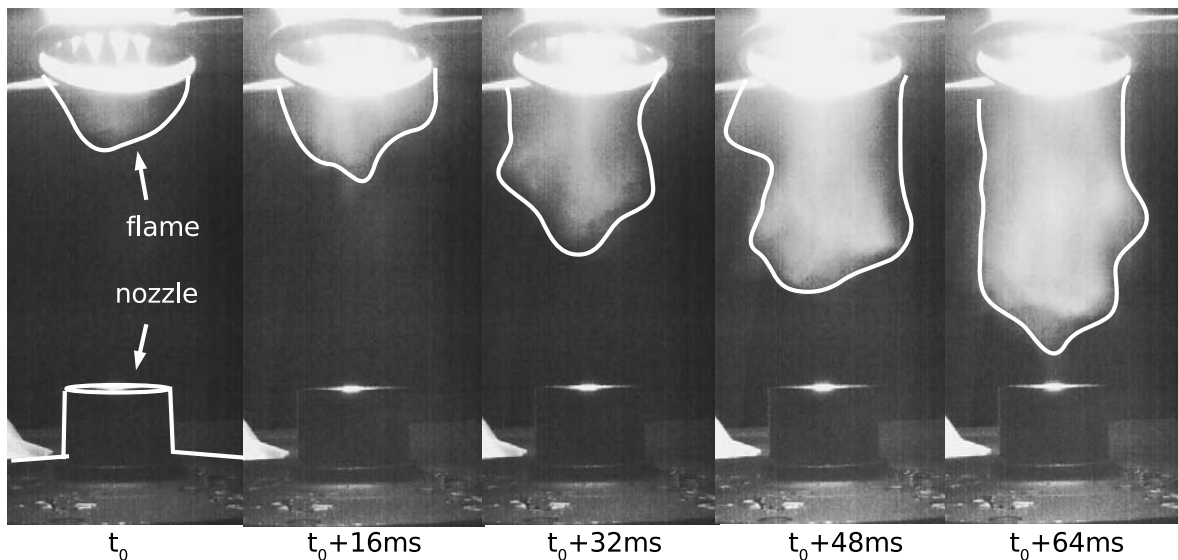


Bild 8: experimenteller Nachweis des verbrennungsinduzierten Flammenrückschlags

Im Weiteren wurden LIF-Untersuchungen vorgenommen. Nachdem erste Aufnahmen an der stationären Flamme gemacht worden sind, siehe Bild 9, ging es darum, die Triggerung so einzustellen, dass zum Zeitpunkt des Flammenrückschlags der Laser gestartet wird und die Kamera empfangsbereit ist. In den oberen Teilbildern des Bildes 10 sind OH-LIF-Aufnahmen vom Flammenrückschlag zu sehen. Die Aufnahme erfolgte zum richtigen Zeitpunkt. Die

vom Flammenrückschlag zu sehen. Die Aufnahme erfolgte zum richtigen Zeitpunkt. Die unteren Aufnahmen zeigen die Flammenstruktur zu einem etwas späteren Zeitpunkt. Hier ist die Flamme schon am Düsenaustritt angekommen. Im unteren Bereich der Bilder ist die Düsenöffnung des Brenners angedeutet.

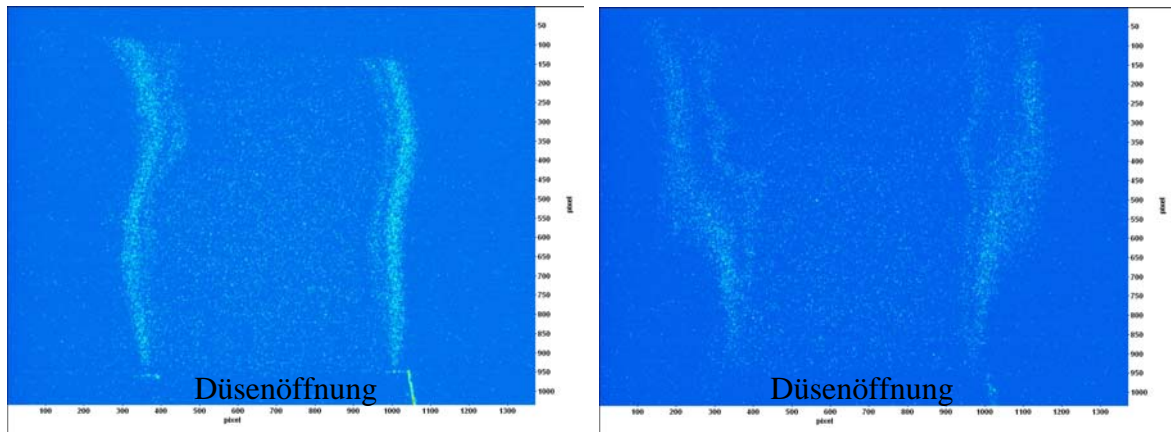


Bild 9: OH-LIF-Aufnahmen stationären Flammen

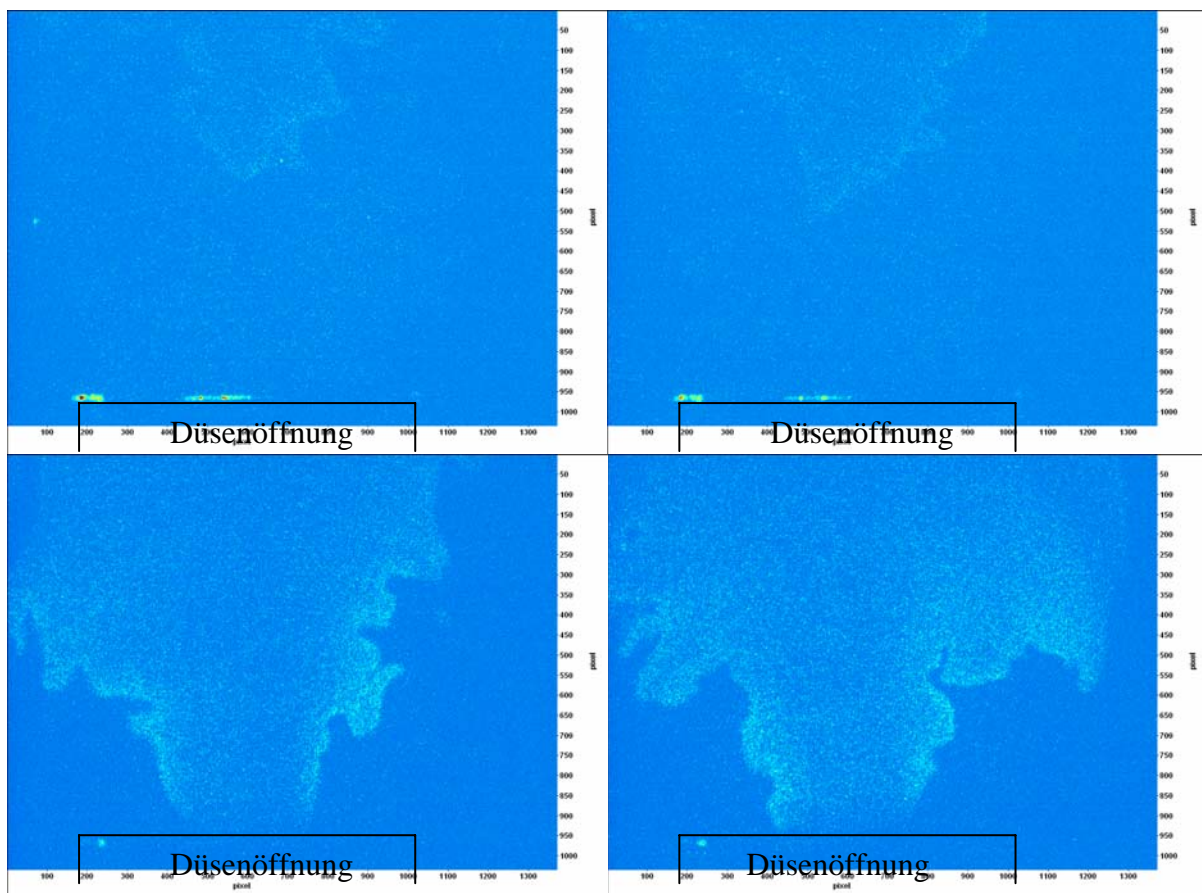


Bild 10: OH-LIF-Aufnahmen des Flammenrückschlags bei richtiger Triggerung sowie zu einem etwas späteren Zeitpunkt unten

Um die Struktur der Flammenfront etwas genauer zu sehen, sind von den OH-LIF-Aufnahmen des Flammenrückschlags Vergrößerungen hergestellt worden. Zwei

# 31.8

Vergrößerungen sind in Bild 11 zu sehen. Die turbulente Struktur der Flammenfront geht aus diesen Bildern deutlich hervor.

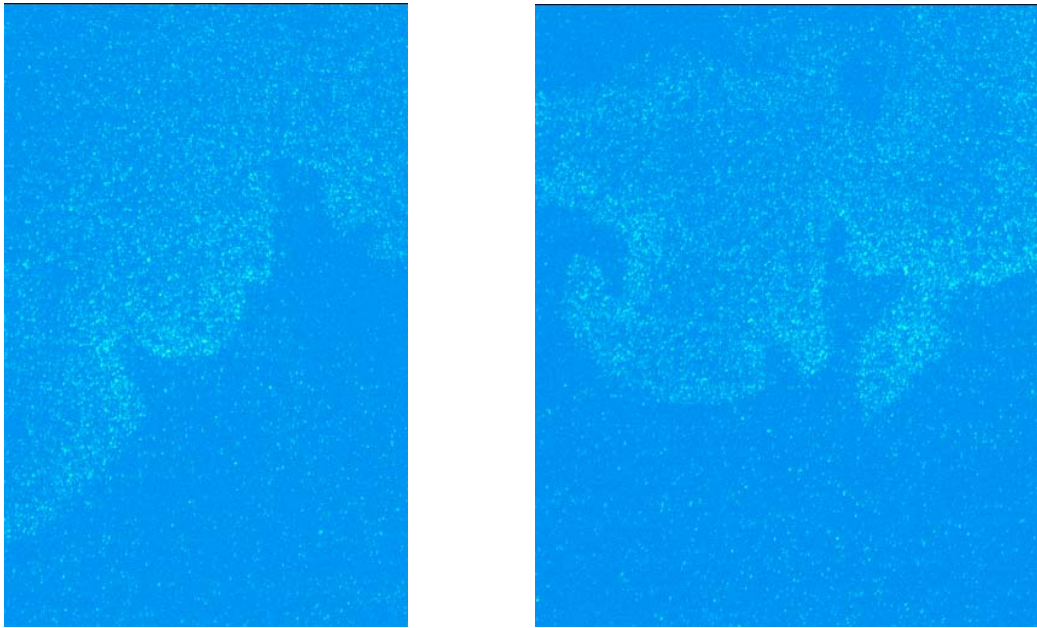


Bild 11: Detailbilder von den obigen LIF- Aufnahmen

Weiterhin wurden numerische Simulationen mit CFD-Verfahren (hier LES) durchgeführt [5]. Für die Berechnungen wurde die Software OpenFOAM verwendet. Ein Vergleich zwischen Experiment und numerischer Simulation ist in Bild 12 dargestellt. In rechten Teil der Abbildungen des Bildes 12 ist das Ergebnis der Berechnung dargestellt. Dieser Berechnung sind die Ergebnisse aus der Messung im linken Teil der Abbildungen gegenüber gestellt. In der linken Abbildung handelt es sich um eine RANS-Berechnung und in der rechten Abbildung um eine LES-Berechnung. Die Werte gelten für einen Volumenstrom von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  und einer Drallzahl von 0,26. Die Übereinstimmung mit den Beträgen der Axialgeschwindigkeit ist recht gut, allerdings stimmt die Geschwindigkeit in Achsnähe bei der RANS-Rechnung nicht gut überein. Hier sind die Geschwindigkeiten in Achsnähe zu klein. Bei LES-Berechnung ist die Übereinstimmung bedeutend besser. Die gewonnenen Messdaten dienen ebenfalls zur Validierung der numerischen Berechnungen. .

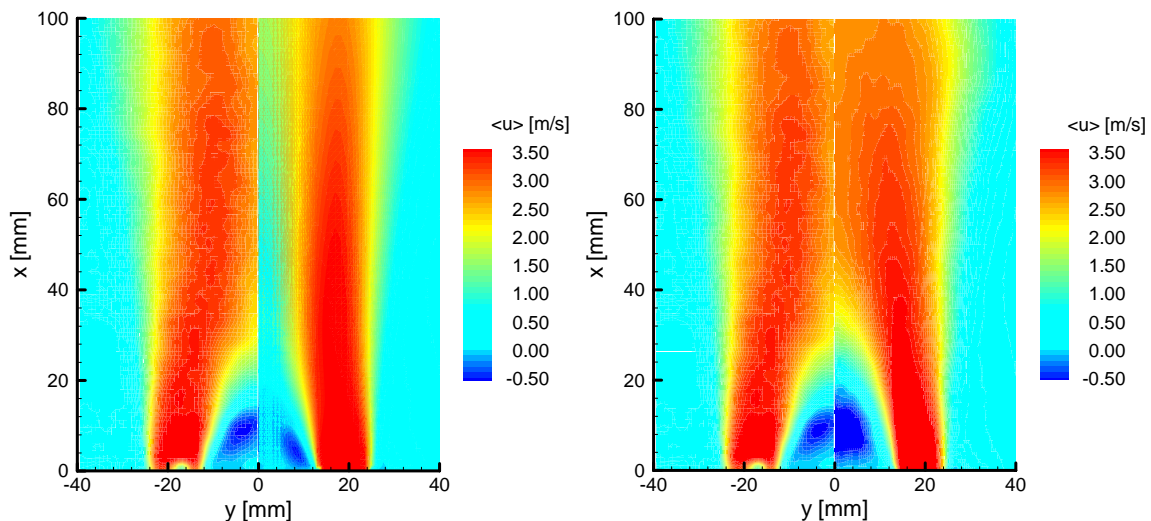


Bild 12: Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit den numerischen Berechnungen Links mit RANS- Berechnungen und rechts mit LES- Berechnungen



Bei einigen Berechnungen wurde die Simulation des Flammenrückschlags mit LES und einem Flame-Surface-Wrinkling Modell vorgenommen. Das Ergebnis der Berechnungen, das in Bild 13 dargestellt ist, bestätigt, dass ein Flammenrückschlag in freien Wirbelröhren auftritt. Durch die Auswertung der Simulationsergebnisse konnte ein erster Einblick in den Mechanismus des CIVB in freien Wirbelröhren gewonnen werden. Es scheint, dass dieses Wirbelaufplatzen hauptsächlich durch die Aufweitung der Stromröhre angetrieben wird.

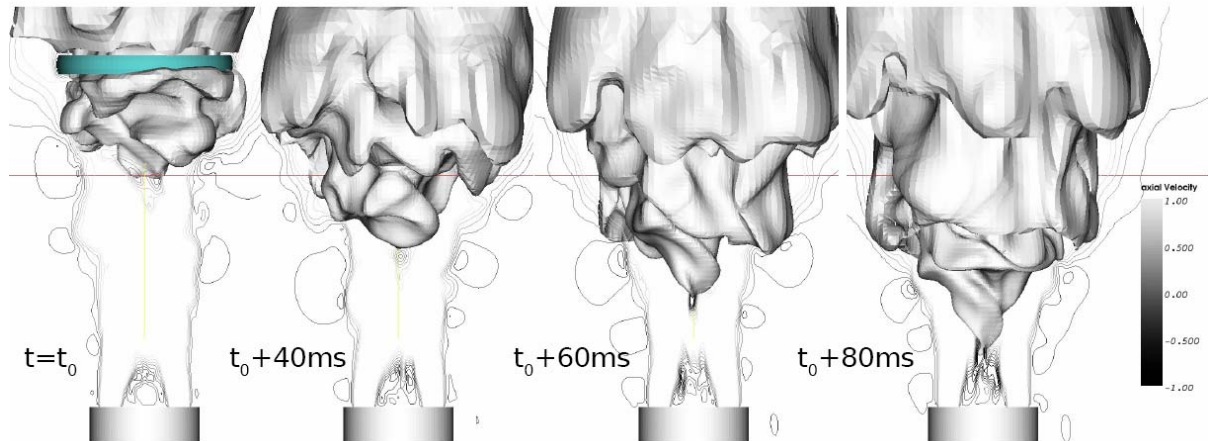


Bild 13: numerische Simulation des verbrennungsinduzierten Flammenrückschlags

### Ausblick

Nachdem die Untersuchungen für die separaten LIF- und PIV-Messungen abgeschlossen sind, wird es das Ziel sein, der Versuchsaufbau so zu ändern, dass die LIF- und PIV-Messungen simultan durchgeführt werden können. Dies ist mit einem hohen Koordinierungsaufwand verbunden.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Bereitstellung finanzieller Mittel zur Bearbeitung dieses Forschungsthemas.

### Literatur

- [1] Hasegawa, T., Nishikado N.: Effect of density ratio on flame propagation along a vortex tube. 26th Symposium (Int.) on Combustion, pp. 291-297, 1996
- [2] Ishizuka, S., Koumura, K., Hasegawa, R.: Enhancement of flame speed in vortex rings of rich hydrogen/air mixtures in air. Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 1949-1956, 2000
- [3] Hasegawa, T., Michikami, S., Nomura, T.: Flame development along a straight vortex. Combustion and Flame, Vol. 129, pp. 294-304, 2002
- [4] Wendig, D., Hassel, E., Kornev, N.: Untersuchungen an einem Verbrennungsprüfstand mit Hilfe der PIV- Messtechnik. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 14. Fachtagung GALA. Braunschweig: 2006.
- [5] Kröger, H., Kornev, N., Wendig, D., Hassel E.: Premixed Flame Propagation in Free Straight Vortex. Forschung im Ingenieurwesen, angenommen 2006