

## DETEKTION VON FLAMMENINSTABILITÄTEN MITTELS MEHRPUNKTMESSUNG VON STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSSPEKTREN

### DETECTION OF FLAME INSTABILITIES BY MEASURING FLOW VELOCITY SPECTRA AT MULTIPLE POINTS

**Andreas Fischer, Jörg König, Lars Büttner, Jürgen Czarske,  
Thomas Leitgeb\*, Jakob Woisetschläger\***

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik  
Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden  
E-Mail: [andreas.fischer2@tu-dresden.de](mailto:andreas.fischer2@tu-dresden.de)

\*Technische Universität Graz, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik,  
Inffeldgasse 25/A, A-8010 Graz  
E-Mail: [jakob.woisetschlaeger@tugraz.at](mailto:jakob.woisetschlaeger@tugraz.at)

Drallstabilisierte Verbrennung, Flamme, Strömungsmessungen mit hoher Messrate  
Swirl-stabilized combustion, flame, flow measurements with high measurement rate

#### **Kurzfassung**

Um eine stabile und effiziente Verbrennung bei reduziertem Massenstrom in neuartigen Triebwerken zu ermöglichen, sind Untersuchungen zur Stabilität der Flammenströmung erforderlich. Da Verbrennungsprozesse in Kombination mit Strömungsphänomenen nur schwer zu simulieren sind, besteht ein erheblicher Bedarf an Messtechnik, um beispielsweise Strömungssoszillationen im Kilohertzbereich optisch erfassen zu können. Zudem muss sich die Messtechnik als robust gegenüber dem störenden Flammenleuchten erweisen. Hierfür bietet sich die frequenzmodulierte Doppler Global Velocimetry (FM-DGV) an, da durch die Auswertung modulierter Signale das Messsignal vom Flammenleuchten effizient entkoppelt wird. Zudem erreicht man mit FM-DGV prinzipiell hohe Messraten bis 100 kHz. Mit einem optimierten FM-DGV-Messsystem konnten Geschwindigkeitsspektren bis 2,5 kHz in einer Flamme aufgelöst werden. In einer verdrallten Flammenströmung wurden Strömungssoszillationen bei 255 Hz detektiert, die mit der Verbrennung in Verbindung stehen. Letzteres konnte durch zusätzliche Messung der Dichtefluktuationen mittels Laser Interferometric Vibrometry belegt werden. Somit eignet sich FM-DGV für die Analyse von Strömungssoszillationen in Flammenströmungen und kann wichtige Beiträge zur Stabilisierung und Optimierung von Verbrennungsprozessen liefern.

#### **Einleitung**

Zukünftige Triebwerkskonzepte basieren im Vergleich zu konventionellen Triebwerken auf einem stark reduzierten Luftmassenstrom der Kernströmung um 30 %, siehe Lundblad et al. 2007. Um dennoch eine effiziente und vor allem stabile Verbrennung von Treibstoff zu erreichen, müssen die Betriebsparameter des Brenners auf die neue Betriebssituation eingestellt werden. Wegen der Reduzierung des Luftmassenstroms besteht dabei die erhöhte

Gefahr, dass Oszillationen in der Strömung auftreten, die die Flamme auslöschten. Um die Ursachen solcher Flammeninstabilitäten identifizieren und erforschen zu können, wird eine Messung von Strömungsgeschwindigkeitsspektren in Flammenströmungen benötigt. Bei optischen Mehrpunktmessungen in Flammen besteht jedoch bislang die messtechnische Herausforderung, die Störung der optischen Signale durch das Flammenleuchten zu beseitigen. Das Flammenleuchten mindert das Signal-Rausch-Verhältnis und erschwert so das Erreichen einer geringen Messunsicherheit in Verbindung mit einer hohen Messrate, die für die Auflösung der Strömungsozillationen im Bereich von einigen mm/s bis typ. 1 kHz in der Flamme erforderlich sind.

Hierfür sind zwei messtechnische Ansätze bekannt. Beide beruhen auf einer flächigen Beleuchtung der Strömung mit einer Folge von kurzen Laserpulsen, da durch die hohe Intensität der Laserpulse die Intensität des an Seedingpartikeln gestreuten Lichts signifikant größer als die des kontinuierlichen Flammenleuchtens ist. Dies ermöglicht Strömungsmessungen in Flammen. Einerseits kann man die Bewegung der Seedingpartikel abbilden und Bildausschnitte aufeinanderfolgender Bilder korrelieren, so dass man gemäß dem Prinzip der Particle Image Velocimetry (PIV) Strömungsgeschwindigkeitsbilder der In-plane-Komponenten erhält. Die Out-of-plane-Komponente wird messbar, wenn man stereoskopisches PIV (SPIV) mit einer zusätzlichen Beobachtungsrichtung und Kamera betreibt. Durch den Einsatz von schnellen CMOS-Kameras und der Auswertung eines eingeschränkten Bildausschnitts gelangen Boxx et al. 2012 schließlich Messungen mit 10 kHz Messrate, wobei Geschwindigkeitsspektren bis 1 kHz in einer verdrallten Flammenströmung aufgelöst wurden.

Willert et al. zeigten 2006, dass trotz temperaturbedingter Änderungen des Brechungsindex und der darauf sich ergebenden Verschmierung der Partikelbilder PIV-Messungen in Brennkammern mit atmosphärischem Druck möglich sind. Gleichzeitig schlugen sie speziell für den Einsatz in Brennkammern mit hohem Druck aber auch den Einsatz der Doppler Global Velocimetry (DGV) vor, die vermutlich weniger durch Brechungsindexschwankungen gestört wird. Dabei wird nicht die Partikelposition, sondern die Frequenzverschiebung des Streulichts zur Geschwindigkeitsmessung gemäß dem optischen Doppler-Effekt genutzt. DGV gestattet ebenso dreikomponentige Messungen, oder lässt sich mit PIV kombinieren, um die Out-of-plane-Komponente zu bestimmen. Ein solches Messsystem wurde zum Beispiel von Willert et al. 2006 für die Strömungsmessung in der Brennkammer einer Turbine bei Überdruck erfolgreich eingesetzt. Um hohe Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) zu erhalten werden jedoch stets CCD-Kameras zur Lichtdetektion bei DGV-Messungen eingesetzt. Zwar lässt sich bei geringen Lichtintensitäten so ein höheres SNR erreichen als mit CMOS-Kamera, aber die maximal erreichbaren Messraten liegen infolgedessen bei einigen Hertz.

Um mit der DGV-Messtechnik hohe Messraten im Kilohertzbereich zu erreichen, wird anstelle der pulsformigen Beleuchtung der Strömung hier der Ansatz einer kontinuierlichen Beleuchtung verfolgt. Zur Steigerung des SNRs wird einerseits die Beleuchtung fokussiert und somit die Lichtintensität maximiert. Zusätzlich wird das an Seedingpartikeln gestreute Laserlicht (Nutzlicht) von dem Flammenleuchten (Störlicht) wie folgt getrennt: Durch die Anwendung der von Fischer et al. 2007 vorgestellten frequenzmodulierten DGV (FM-DGV) werden lediglich die Amplituden zweier Harmonischer aus dem Streulichtsignal ermittelt, so dass das Störlicht (nicht moduliert) vom Nutzlicht (moduliert) effizient entkoppelt wird. Fischer et al. 2009a+b zeigten, dass mit FM-DGV in nicht-reaktiven Strömungen Geschwindigkeitsspektren bis 10 kHz aufgelöst werden können. Die Optimierung und die Erforschung der Eignung des FM-DGVs für die Detektion von Strömungsozillationen in Flammen ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

Hierfür wird zunächst der Brenner für die Erzeugung einer verdrallten Flammenströmung vorgestellt, an welchem die Experimente durchgeführt wurden. Daran schließt sich eine Beschreibung der eingesetzten Messtechniken ein. Neben der Auslegung des FM-DGV-

Systems werden hierbei auch das zu Validierungszwecken eingesetzte SPIV-System und die hier genutzte Laser Interferometric Vibrometry (LIV) beschrieben. Anschließend werden die Messergebnisse diskutiert und im abschließenden Abschnitt zusammengefasst.

### Brenner zur Erzeugung einer verdrehten Flammenströmung

Der Aufbau des Brenners ist in Abb. 1a dargestellt, der im Auslegungspunkt eine von der Frontplatte abgehobene, drallstabilisierte Flamme erzeugt. Um den Arbeitspunkt einstellen zu können, besitzt der Brenner eine variable Geometrie. Hierbei können Drallstärke und Massenstrom wie folgt variiert werden: Die Drallstärke lässt sich durch das Verhältnis von tangentialem und axialem Luftzustrom verändern. Der kumulative Luftmassenstrom wird durch den mit einem axial verschiebbaren Prallkörper veränderlichen Querschnitt der Austrittsöffnung eingestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Brenners stellt Giuliani 2012 vor. Der Brenner wurde stets in vertikaler Aufstellung und bei atmosphärischem Druck betrieben. Das für die Messungen eingeführte Koordinatensystem ist in Abb. 1b angegeben.

Eingestellt wurde das Verhältnis von tangentialem und axialem Massenstrom auf 0,7 und der kumulative Luftmassenstrom (Berücksichtigung der Mach-Ähnlichkeit) auf  $21,1 \text{ g/s} \cdot (T/K)^{-1/2} \cdot (p/\text{bar})$  mit  $p$  als Luftdruck und  $T$  als Temperatur. Zur Verbrennung wurde ein Methan-Luft-Gemisch mit einem Äquivalenzverhältnis von 0,81 benutzt, was gemäß Warnatz et al. 2001 den folgenden Stoffmengenanteilen entspricht: 7,8 % Methan und 92,2 % Luft. Demnach lag eine magere Verbrennung vor, d.h. es gab weniger Brennstoff als Oxidationsmittel. Die thermische Leistung betrug 4,3 kW.

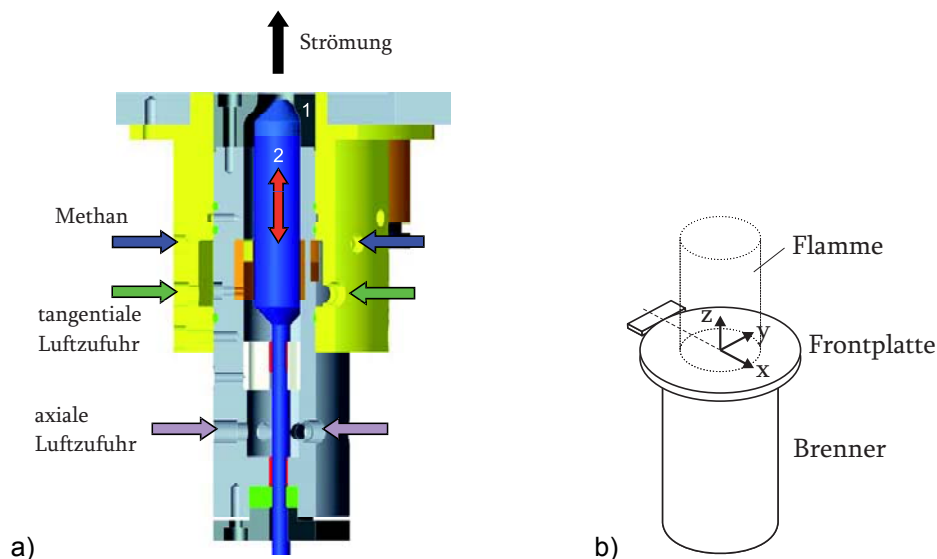


Abb. 1: a) Layout des Brenneraufbaus und b) das für die Messungen genutzte Koordinatensystem mit dem Ursprung im Zentrum der Austrittsöffnung.

Für Strömungsmessung mittels FM-DGV (und auch für SPIV) werden Seedingpartikel benötigt. Deshalb wurden Seedingpartikel aus Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) mit einem Generator des Typs PivSolid 3 der Firma PivTec GmbH erzeugt. Die Seedingpartikel, deren Größe laut Datenblatt zwischen  $0,5 \mu\text{m}$  und  $1 \mu\text{m}$  beträgt, wurden der Axialluftzufuhr beigegeben. Nach Albrecht et al. 2003 ist der Schlupf von sphärischen Partikeln aus  $\text{TiO}_2$  mit beispielsweise  $1 \mu\text{m}$  Durchmesser kleiner als 1 % bis Strömungsszillationen mit 1,6 kHz. Dies wurde für das durchzuführende Experiment als ausreichend erachtet, um Strömungsszillationen bis zu einigen Kilohertz detektieren zu können.

## Messtechniken

### *Doppler-Global-Velocimetry mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV)*

Das Messprinzip und der Aufbau eines FM-DGVs kann zum Beispiel aus Fischer et al. 2007, 2009a und 2009b entnommen werden. Hierbei wird der Anstieg der spektralen Transmission einer mit einem Cäsiumgas gefüllten Absorptionszelle genutzt, um die geschwindigkeitsbedingte Frequenzänderung von an Seedingpartikeln gestreutem Laserlicht in eine messbare Intensitätsänderung zu überführen. Zur Beleuchtung der Strömung wird ein sinusförmig frequenzmodulierter Laser genutzt, so dass die zu messende Mittenfrequenz des Laserlichts aufgrund der Nichtlinearität der Transmissionskennlinie über die Auswertung des Verhältnisses der Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen der transmittierten Intensität bestimmt werden kann.

Das Laserlicht wurde zu einem Strahl mit ca. 1 mm Durchmesser kollimiert und das Streulicht mit einem fasergekoppelten linearen Array bestehend aus 24 Lawinenphotodioden entlang des Laserstrahls gemessen. Die Anordnung des Laserstrahls und der Lichtempfangseinheit am Brenner ist beispielhaft in Abb. 2a dargestellt. Die laterale Ortsauflösung betrug in Abstimmung mit dem Laserstrahldurchmesser ca. 1 mm, was ebenso dem Abstand zweier Messpunkte entspricht. Durch eine Traversierung des Brenners in Schritten von 2 mm wurden schließlich Geschwindigkeitsfelder bei den Höhen  $z = 25$  mm und  $z = 35$  mm gemessen. Durch 3 verschiedene Kombinationen von Lichteinfalls- und Beobachtungsrichtungen wurden alle 3 Geschwindigkeitskomponenten erfasst.

Um ein hohes SNR und eine hohe Messrate zu erreichen, wurde zudem ein Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) Lasersystem mit Faserkopplung der Firma Toptica Photonics als frequenzmodulierbare, schmalbandige Lichtquelle eingesetzt. Die Ausgangsleistung beträgt 0,5 W. Die Laserwellenlänge von 895 nm entspricht einer Resonanz von Cäsiumgas, der Cäsium-D<sub>1</sub>-Linie, was folglich als Absorbergas in der Absorptionszelle gemäß dem FM-DGV-Messprinzip Verwendung findet.

Ein weiteres Instrument zur Steigerung des SNRs war ein optischer Bandpassfilter mit 20 nm Bandbreite um 895 nm, der in die Empfangseinheit eingebaut wurde, um weite spektrale Anteile des Flammenleuchtens zu blockieren. In Abb. 2b ist beispielhaft ein Detektorsignal mit und ohne Bandpassfilter gezeigt. Im Ergebnis wurden im Mittel 92 % des vom Flammenleuchten herrührenden Lichts blockiert.

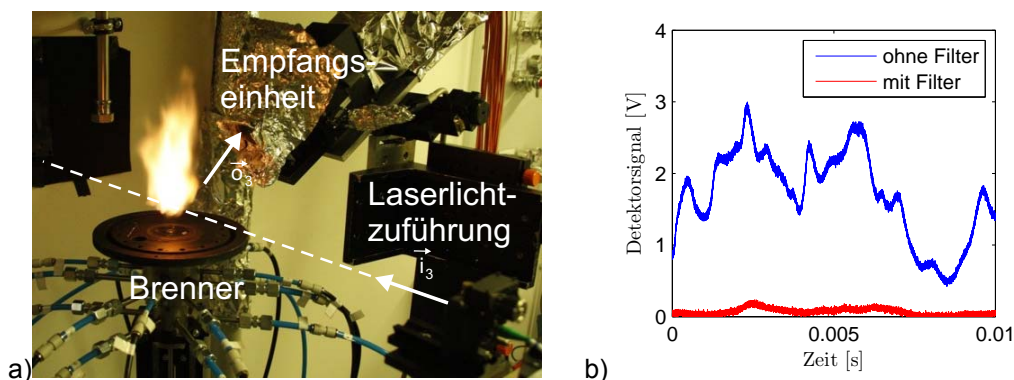


Abb. 2: a) Experimenteller Aufbau des FM-DGV-Messsystems zur Strömungsmessung in einer Flamme, b) Detektorsignale ohne und mit Bandpassfilter zur Blockung des Flammenleuchtens.

Die Modulationsfrequenz der Laserfrequenzmodulation betrug 100 kHz. Als Messrate wurde 5 kHz gewählt (Mittelung über jeweils 20 Modulationsperioden), um zusätzlich zu den Geschwindigkeitsmittelwerten auch Geschwindigkeitsspektren bis 2,5 kHz auflösen zu können. Für ein Spektrum wurden 5000 Geschwindigkeitswerte aufgezeichnet, so dass eine Fre-

quenzauflösung von 1 Hz resultiert. Da die Flammenströmung als stationär betrachtet wird, wurde zwecks Verbesserung der statistischen Konfidenz über jeweils 50 Spektren gemittelt.

#### *Stereoskopische Particle Image Velocimetry (SPIV)*

Um mit FM-DGV gemessenen mittleren Geschwindigkeiten zu validieren und zu ergänzen, wurden mittels SPIV dreikomponentige Messungen in der Ebene  $y = 0$  durchgeführt. Als Lichtquelle kam ein gepulster Nd:YAG Laser (532 nm) des Typs New Wave GEMINI zum Einsatz. Die Repetitionsrate der 3 ns bis 5 ns langen Laserpulse mit 120 mJ betrug 15 Hz. Die mittels zwei separater Resonatoren erzeugten Doppelpulse haben einen Zeitversatz von 100  $\mu$ s. Der Lichtschnitt wurde bei  $y = 0$  erzeugt und hatte eine Dicke von ca. 2 mm. Als Kamera wurde eine 80C60HiSense von Dantec Dynamics eingesetzt. Sie hat 1280 x 1024 Pixel und eine vertikale Auflösung von 12 Bit. Die für die PIV-Auswertung gewählte Fenstergröße war 32 x 32 Pixel, was einer Ortsauflösung von 1,25 mm entspricht. Zur Dämpfung des Flammenleuchtens kam ein optischer Bandpassfilter mit 10 nm Bandbreite zum Einsatz.

#### *Laser Interferometric Vibrometry (LIV)*

Zur Ergänzung der mit FM-DGV gemessenen Strömungsgeschwindigkeitsoszillationen wurden Dichtefluktuationsmittelungen mittels LIV gemessen. Gemäß Hampel et al. 2006 wird hierbei eine Ensemble-Mittelung der Korrelation der Signale zweier Laservibrometer genutzt, deren Laserstrahlen sich in einem Messpunkt senkrecht kreuzen. Dadurch extrahiert man aus der integralen Dichtefluktuationsmittelung entlang des optischen Weges die in beiden Signalen enthaltene lokale Dichtefluktuationsmittelung im Kreuzungspunkt. Das Verfahren wurde bereits von Giuliani et al. 2010 und Köberl et al. 2010 erfolgreich für die Messung von Dichtespektren in turbulenten Flammenströmungen eingesetzt, da sich mit LIV hohe Messraten bis 250 kHz erreichen lassen.

Als Laservibrometer wurden die Modelle OFV-353 der Firma Polytec genutzt. Wie bei den FM-DGV-Messungen wurde in den zwei Höhen  $z = 25$  mm und  $z = 35$  mm gemessen. Durch Traversierung des Brenners in der  $x$ - $y$ -Ebene wurden die Strömungsebenen im Bereich  $|x| < 15$  mm und  $|y| < 15$  mm in Schritten von 2,5 mm vermessen. Bei jedem Messpunkt wurde über 384 aufgezeichnete Spektren gemittelt. Die Grenzfrequenz beträgt 8,192 kHz und die Frequenzauflösung 8 Hz.

## **Messergebnisse**

### *Mittlere Strömungsgeschwindigkeit*

Die mittels FM-DGV gemessenen Felder der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sind für  $z = 25$  mm und  $z = 35$  mm in Abb. 3a und 3b dargestellt. Die Ergebnisse der mit SPIV durchgeführten Vergleichsmessungen bei  $y = 0$  sind komponentenweise in den Abb. 4a-4c dargestellt. Beide Messergebnisse weisen eine sehr gute qualitative Übereinstimmung auf. So findet man in beiden Resultaten den erwarteten Strömungsdrall mit einer Orientierung im mathematisch positiven Sinn, welcher das wesentliche Strömungsphänomen darstellt. Zudem ist übereinstimmend  $v_z$  im Zentrum des Dralls bei  $z = 25$  mm kleiner als bei  $z = 35$  mm.

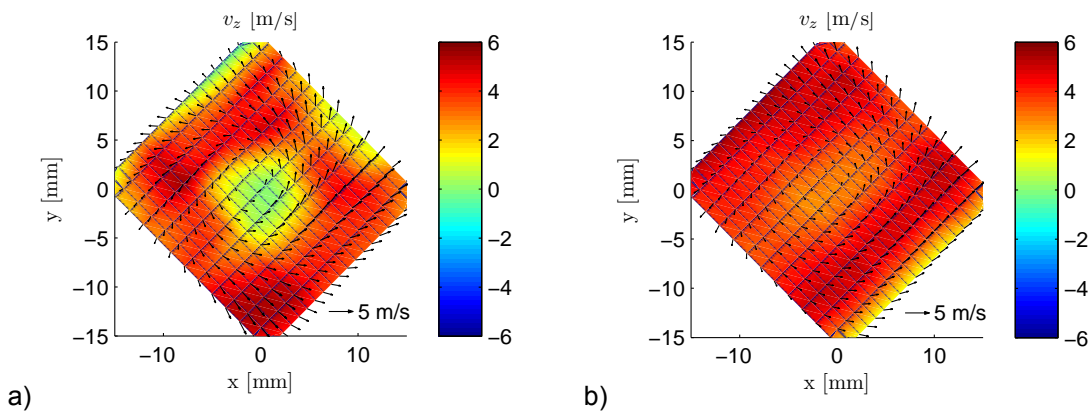


Abb. 3: Ergebnisse der dreikomponentigen FM-DGV-Geschwindigkeitsmessung (mittlere Strömungsgeschwindigkeit) bei a)  $z = 25$  mm und b)  $z = 35$  mm.

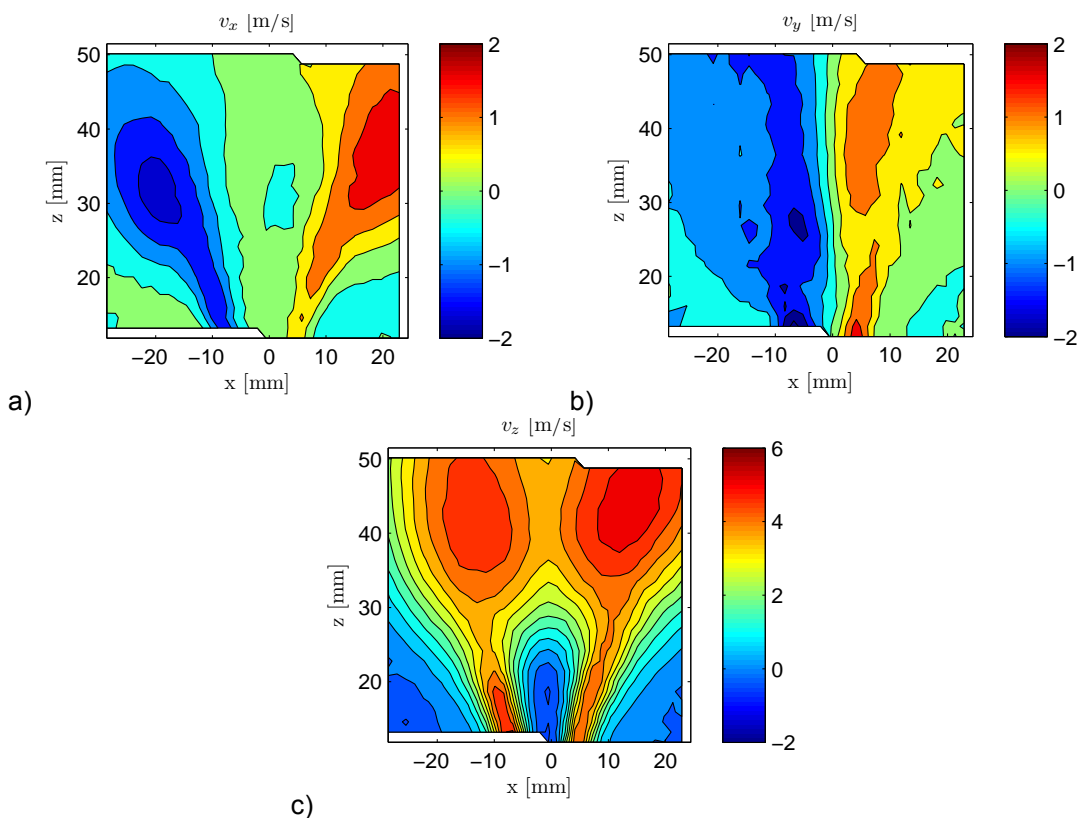


Abb. 4: a)-c) SPIV-Messergebnisse der mittleren Geschwindigkeitskomponenten  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  bei  $y = 0$ .

Für einen quantitativen Vergleich zwischen den Messergebnissen von FM-DGV und SPIV sind in Abb. 5a und 5b die gemessenen Strömungsprofile entlang der  $x$ -Achse für  $v_x$  als Beispiel gegenüber gestellt. Für  $v_x$  zeigen sich betragsmäßige Abweichungen kleiner als 0,9 m/s. Auffallend ist jedoch, dass die Abweichungen nicht zufälliger Natur sind, sondern die mit FM-DGV gemessenen Profile einen Offset aufzuweisen scheinen. Vermutet wird, dass eine systematische Abweichung existiert, zumal diese Abweichung in einem für DGV-Messtechniken typischen Bereich liegt. Letztlich ist diese systematische Messabweichung jedoch unerheblich für die Auswertung von Geschwindigkeitsfluktuationen (Schwankung um den Mittelwert), was den Schwerpunkt des Beitrags zur Detektion von Strömungsszillationen in Flammen darstellt.

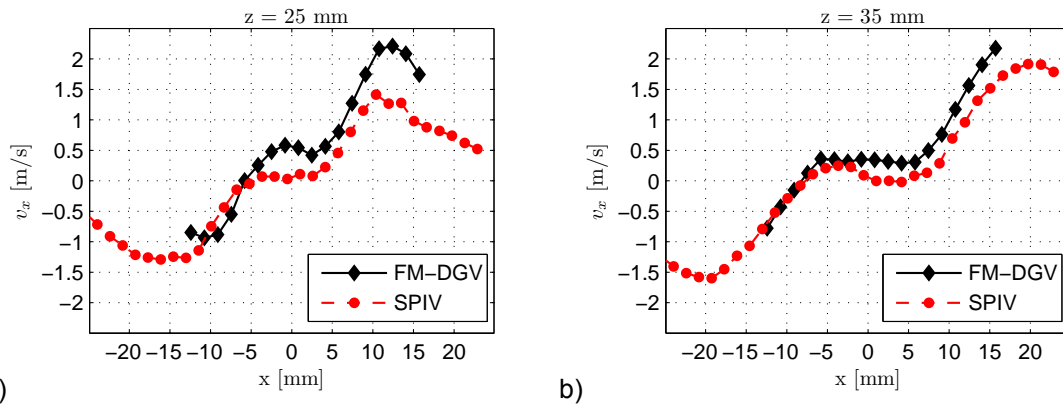


Abb. 5: Vergleich der mit FM-DGV und SPIV gemessenen Strömungsprofile der Komponente  $v_x$  bei a)  $z = 25$  mm und b)  $z = 35$  mm.

### Strömungsgeschwindigkeits- und Dichtespektren

Als Beispiel für mit FM-DGV gemessene Geschwindigkeitsspektren von  $v_x$  sind in Abb. 6a und 6b das Amplitudenspektrum im Zentrum und bei einem radialen Abstand zur Brennerachse von 8 mm für  $z = 25$  mm gegeben. Während im Zentrum ein Maximum bei ca. 60 Hz vorliegt und flach abfällt, findet man abseits der Brennerachse eine Oszillation bei ca. 255 Hz mit steiler abfallenden Flanken. Betrachtet man zudem das Dichtespektrum in Abb. 7b, welches als Beispiel 7 mm radial von der Brennerachse entfernt gemessen wurde, so findet man übereinstimmend ein Maximum bei ca. 260 Hz. Da Dichteänderungen mit der Verbrennung und der damit verbundenen Wärmezufuhr verknüpft sind, findet hier offensichtlich eine Interaktion zwischen Verbrennung und Strömung statt, die es gelang aufzudecken.

Betrachtet man ferner die Dichtefluktuationen bei der Brennerachse in Abb. 7a, so findet man nicht die im Geschwindigkeitsspektrum charakteristische breite Resonanzüberhöhung bei 60 Hz. Stattdessen sind zwischen 20 Hz und 60 Hz mehrere erhöhte Amplitudenwerte zu erkennen. Dies zeigt, dass der Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Dichte nicht stets ersichtlich ist. Dies folgt einerseits aus der Nichtlinearität der Navier-Stokes-Gleichung, aber auch weil, wie beispielsweise in Joos 2006 beschrieben, bei reaktiven Strömungen z.B. zusätzlich die Reaktionskinetik und Temperaturänderungen berücksichtigt werden müssen. Wegen der Wärmezufuhr durch die Verbrennung kommt es einerseits zu einer Dichteabnahme und zu einer Beschleunigung der Strömung. Gleichzeitig treten durch die bei Verbrennungsvorgängen immer vorhandenen turbulenten Schwankungen Umsatzschwankungen bei der Verbrennung auf, die sich über eine akustische Rückkopplung aufschaukeln können. Wegen der Komplexität dieser Phänomene sind sowohl Messungen der Geschwindigkeit als auch der Dichte zum Verständnis von Flammenströmungen erforderlich, was für die Realisierung einer stabilen Verbrennung benötigt wird.

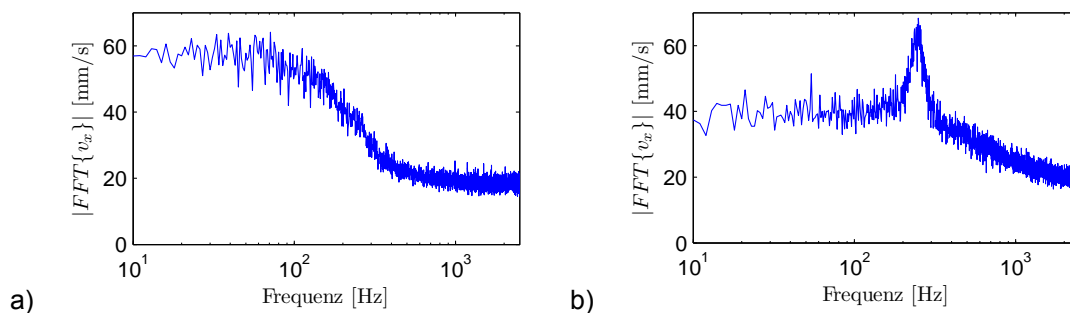


Abb. 6: Amplitudenspektrum der Geschwindigkeit  $v_x$  bei  $z = 25$  mm a) im Zentrum des Brenners und b) bei einem radialen Abstand von 8 mm zur Brennerachse. FM-DGV-Messungen (Messrate 5 kHz).



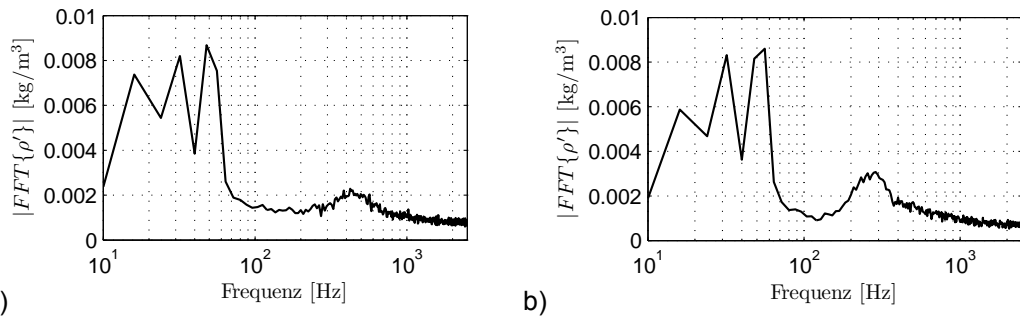


Abb. 7: Amplitudenspektrum der Dichte bei  $z = 25$  mm a) im Zentrum des Brenners ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ) und b) bei einem radialen Abstand von 7 mm zur Brennerachse ( $x = -5$  mm,  $y = -5$  mm). LIV-Messungen (Messrate 16,384 kHz).

Um die Struktur der Strömungszusammenhänge bei 60 Hz und 255 Hz zu visualisieren, sind in der Abb. 8a bzw. 8b die gemittelten spektralen Amplituden der Frequenzbereiche 50 Hz – 80 Hz und 230 Hz – 280 Hz in der Ebene  $z = 25$  mm für die Komponente  $v_x$  als Beispiel dargestellt. Im niederfrequenten Bereich existiert im Zentrum der Flamme ein Maximum für die Amplitude der Strömungszusammenhänge. In einem radialen Abstand von ca. 8 mm von der Brennerachse ist die Amplitude hingegen minimal. Vergleicht man dies mit den Dichtezusammenhänge in selbigem Frequenzbereich, die in Abb. 9a dargestellt sind, so verhalten sich die Dichteschwankungen komplementär dazu. Hier findet man ein Maximum im Zentrum der Flamme, welches dann radial abfällt. Zudem sind vier Maxima an den Rändern des Messbereichs, jeweils in einem Winkel von  $90^\circ$  angeordnet. Das letztgenannte Phänomen ist noch nicht abschließend geklärt. Es wird jedoch vermutet, dass es mit der Luft- bzw. Methanzufuhr im Brenner im Zusammenhang steht, die ebenso rechtwinklig angeordnet ist.

Die mittlere Amplitude der Dichtefluktuations für den Frequenzbereich 230 Hz – 280 Hz ist in Abb. 9b dargestellt. Hier findet man in einem Radius von ca. 7 mm maximale Amplitudenwerte, was eine erhöhte Fluktuation der Verbrennung anzeigt. Die Geschwindigkeitskomponente  $v_x$  (s. Abb. 8b) weist keine ringförmige Struktur auf, aber es befinden sich Maxima auf einem Ring mit ungefähr 8 mm Radius. Die Strömungszusammenhänge sind im Gegensatz zu den Dichtezusammenhänge gerichtet und treten offensichtlich bei  $v_x$  nicht entlang des gesamten Rings auf. Das Experiment hat somit gezeigt, dass das FM-DGV-Messsystem für die Detektion von Strömungszusammenhänge in Flammen eingesetzt werden kann und einen wichtigen Beitrag zur Erforschung reaktiver Strömungen leisten kann.

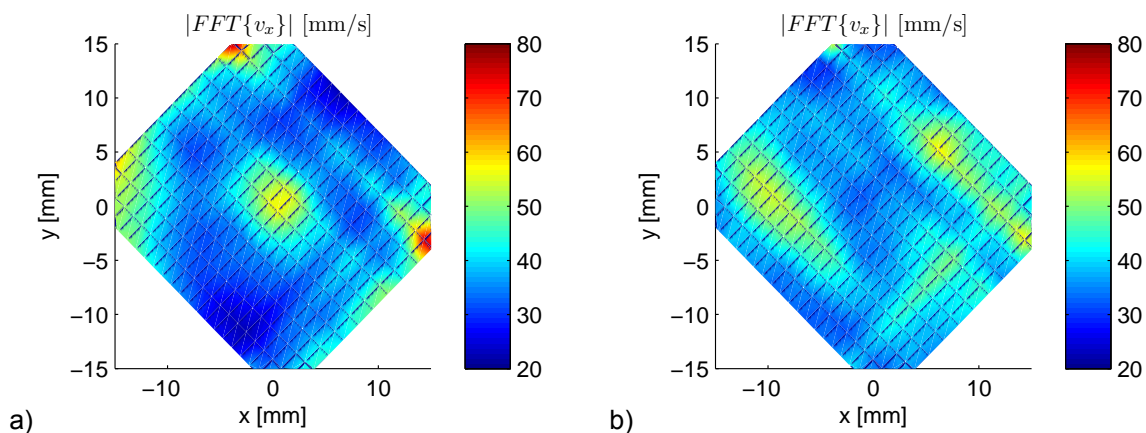


Abb. 8: Mittlere Amplitude im Amplitudenspektrum von  $v_x$  im Frequenzbereich a) 50 Hz - 80 Hz und b) 230 Hz - 280 Hz bei  $z = 25$  mm, gemessen mit FM-DGV.



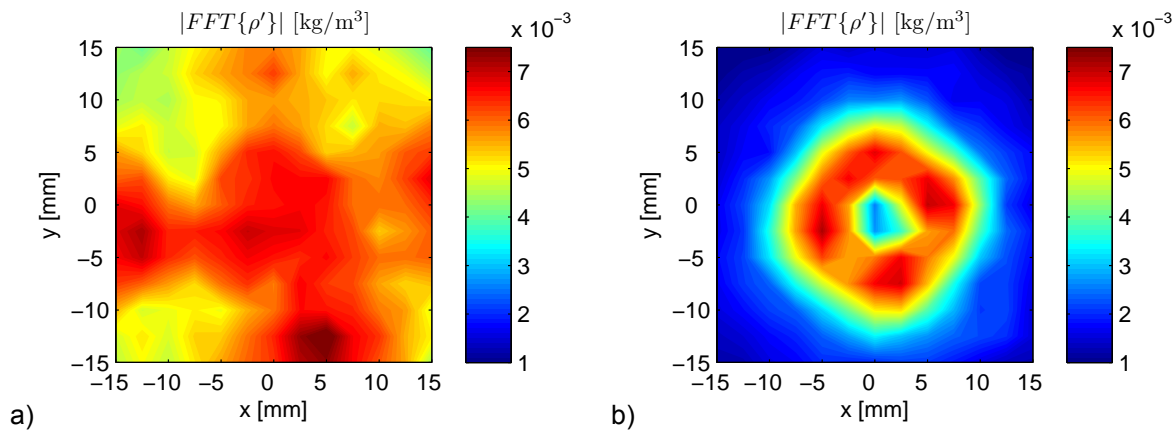


Abb. 9: Mittlere Amplitude im Amplitudenspektrum der Dichtefluktuationen im Frequenzbereich a) 50Hz - 80Hz und b) 230Hz - 280Hz bei  $z = 25$  mm, gemessen mit LIV.

## Zusammenfassung

Es wurde ein FM-DGV-Messsystem mit einem fasergekoppelten Diodenlasersystem, einer mit Cäsiumgas gefüllten Absorptionszelle und einem linearen 24-elementigen fasergekoppelten Lawinenphotodiodenarray zur Mehrpunktmessung von Geschwindigkeitsspektren in einer verdrallten Flammenströmung erfolgreich eingesetzt. Durch Traversierung bzw. Rotation des Brenners wurden flächige Messungen aller drei Geschwindigkeitskomponenten vorgenommen. Im Ergebnis konnten Amplitudenspektren mit Frequenzschritten von 1 Hz bis 2,5 kHz aufgelöst und in der Drallströmung eine dominierende Fluktuation bei 255 Hz festgestellt werden. Das gemessene mittlere Strömungsgeschwindigkeitsfeld wurde durch Vergleichsmessungen mit stereoskopischer Particle Image Velocimetry validiert. Die gemessenen Strömungszillationen sind konsistent mit den ebenfalls gemessenen Dichtefluktuationen. Letztere wurden mittels Laser Interferometric Vibrometry erfasst. Da der Zusammenhang zwischen Dichteschwankungen und Strömungsfluktuationen nicht stets ersichtlich und nur schwer zu berechnen ist, ergänzen sich beide Messungen und vervollständigen so die Erkenntnisse zum Verhalten der Flammenströmung. Die FM-DGV-Messtechnik liefert hierbei wichtige Beiträge für die Analyse von Flammeninstabilitäten.

## Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) für die Finanzierung der Forschungsarbeiten DFG-Cz55/22-1 und FWF-24096-N24.

## Literatur

- Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C., 2003: "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Boxx, I., Arndt, C. M., Carter, C. D., Meier, W., 2012: "High-speed laser diagnostics for the study of flame dynamics in a lean premixed gas turbine model combustor", *Experiments in Fluids* 52:555–567
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Grosche, G., Müller, H., 2007: "Investigation of time-resolved single detector Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation", *Measurement Science and Technology* 18:2529–2545
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009a: „Measurements of velocity spectra using time-resolving Doppler global velocimetry with laser frequency modulation and a detector array“, *Exp. Fluids*, DOI 10.1007/s00348-009-0640-7 (13 S.)
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009b: „Array Doppler Global Velocimeter with Laser Frequency Modulation for Turbulent Flow Analysis – Sensor Investigation and Application“, in „Imaging Measurement Methods for Flow Analysis“ (Hrsg.: W. Nitzsche, C. Dobriloff), S. 31-41, Berlin, Springer, ISBN 978-3-642-01105-4
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Gottschall, M., Mailach, R., Vogeler, K., 2012: "Investigation of the tip clearance flow in a compressor cascade using a novel laser measurement technique with high temporal resolution", *Journal of Turbomachinery* 134:051004 (9 S.)
- Giuliani, F., Woisetschläger, J., Leitgeb, T., 2012: "Design and Validation of a Burner with Variable Geometry for Extended Combustion Range. ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, GT2012-68236
- Giuliani, F., Leitgeb, T., Lang, A., Woisetschläger, J., 2010: "Mapping the Density Fluctuations in a Pulsed Air-Methane Flame Using Laser-Vibrometry". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 132:0316031 (8 S.)
- Hampel, B., Woisetschläger, J., 2006: "Frequency- and space-resolved measurement of local density fluctuations in air by laser vibrometry", *Meas. Sci. Technol.* 17:2835–2842
- Joos, F., 2006: "Technische Verbrennung", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Köberl, S., Fontaneto, F., Giuliani, F., Woisetschläger, J., 2010: "Frequency-resolved interferometric measurement of local density fluctuations for turbulent combustion analysis", *Meas. Sci. Technol.* 21:035302 (10 S.)
- Lundbladh, A., Avellán, R., 2007: "Potential of Variable Cycle Engines for Subsonic Air Transport", 18th International Symposium on Air Breathing Engines, Peking, ISABE-2007-1156
- Warnatz, J., Mass, U., Dibble, R. W., 2001: "Verbrennung", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Willert, C., Hassa, C., Stockhausen, G., Jarius, M., Voges, M., Klinner, J., 2006: "Combined PIV and DGV applied to a pressurized gas turbine combustion facility", *Meas. Sci. Technol.* 17:1670–167