

## **Seedinglose Messung der Wärmefreisetzungsrates und Geschwindigkeit in drall-stabilisierten Flammen mittels kamerabasierter Laser-Vibrometrie**

### **Seedingless measurement of the heat release rate and the velocity in swirl-stabilized flames using camera-based laser-vibrometry**

**Johannes Gürtler<sup>1</sup>, Felix Greiffenhagen<sup>2</sup>, Johannes Peterleithner<sup>2</sup>, Jakob Woisetschläger<sup>2</sup>, Daniel Haufe<sup>1</sup>, Andreas Fischer<sup>1</sup>, Jürgen Czarske<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik  
Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden, E-mail: johannes.guertler@tu-dresden.de

<sup>2</sup>Technische Universität Graz, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik  
Inffeldgasse 25A, 8010 Graz, Österreich

Interferometrie, Hochgeschwindigkeitskamera, Thermoakustik  
interferometry, high-speed camera, thermoacoustics

### **Zusammenfassung**

In modernen Flugzeugtriebwerken oder Gasturbinen kommen drall-stabilisierte Flammen zum Einsatz, die eine hohe Effizienz und geringe Schadstoffemission aufweisen, jedoch zu instabilen Oszillationen neigen. Aus diesem Grund ist bereits bei der Entwicklung der Verbrennungsmaschinen eine Charakterisierung der Flamme mittels der Flammentransferfunktion entscheidend, was die Messung der Wärmefreisetzungsrates und Strömungsgeschwindigkeit innerhalb eines Flammenvolumens erforderlich macht. Beide Größen können durch den Einsatz mehrerer Laser-Vibrometer punktförmig detektiert werden. Zwecks flächenhafter Erfassung bedarf es jedoch einer mehrfachen Traversierung, woraus ein hoher Zeitbedarf resultiert. Deshalb präsentieren wir das Konzept für ein kamerabasiertes Laser-Vibrometer, das die simultane, seedinglose Detektion der Wärmefreisetzungsrates und Geschwindigkeit sowie deren Fluktuationen innerhalb des gesamten Flammenvolumens eines Drallstrombrenners ermöglicht. Gezeigt wird die erstmalige Implementierung eines bildgebenden Vibrometers sowie der erfolgreiche Einsatz des Messsystems für die planare Bestimmung einer mechanischen Vibration. Zudem erfolgen erste Untersuchungen an einer drall-stabilisierten Flamme.

### **Einleitung**

Zum Schutz der Umwelt wird bei der Entwicklung moderner Flugzeugtriebwerke und Gasturbinen zur Stromerzeugung die Reduktion der umweltbelastenden Schadstoffemissionen gefordert (European Commission 2011). Dieses Ziel soll durch den Einsatz von Verbrennungsmaschinen mit magerer Verbrennung, d.h. geringem Treibstoff-Luft-Verhältnis erreicht werden. Beispielsweise werden dafür Brenner mit drall-stabilisierten Flammen eingesetzt. Derartige Verbrennungen weisen neben geringer Emission von Stickoxiden die typische hohe Verbrennungseffizienz auf, neigen jedoch zu Oszillationen der Flamme aufgrund der thermoakustischen Kopplung von Schwankungen des Drucks und der Wärmefreisetzungsrates (Rayleigh 1878). Diese Oszillationen führen zur Instabilität der Flamme bis hin zum Erlöschen und sind daher im Betrieb auszuschließen. Deshalb ist eine Charakterisierung der Flamme bereits während der Entwicklung der Verbrennungsmaschinen von entscheidender Bedeutung. Ein typi-

sches Mittel dabei ist die Bestimmung der Flammentransferfunktion (FTF), die den von der Frequenz  $f$  abhängigen Zusammenhang

$$\frac{\dot{Q}'(f)}{\bar{Q}} = FTF(f) \cdot \frac{v'(f)}{\bar{v}} \quad (1)$$

zwischen der globalen Fluktuation der Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}'$  in der Flamme und den Fluktuationen der Geschwindigkeit  $v'$  am Ausgang des Brenners herstellt (Candel et al. 2014).

Paschereit et al. 2002 führten Messungen der globalen FTF mittels akustischer Anregung der Flamme und einer Multi-Mikrofon-Methode durch. Jedoch sind somit lediglich Aussagen über die globale Flammencharakteristik möglich. Untersuchungen innerhalb des Flammenvolumens mittels Chemilumineszenz von Hydroxiden als Maß für die Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  wurden beispielsweise von Lauer und Sattelmayer 2010 durchgeführt. Allerdings ist dieses Verfahren nur für adiabatische Bedingungen innerhalb der Flamme möglich und somit nicht für die Untersuchung technischer Verbrennungssysteme geeignet. Messungen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit können gemäß Schlüßler et al. 2015 mit etablierten Verfahren wie der Particle-Image-Velocimetry oder Doppler-Global-Velocimetry durchgeführt werden. Die für diese Verfahren benötigten Streuteilchen innerhalb der Flamme können jedoch die thermodynamischen Eigenschaften der Strömung beeinflussen und daher sollen diese Verfahren im vorliegenden Beitrag nicht näher betrachtet werden.

Die nicht-invasive, lokale Messung sowohl der Wärmefreisetzungsrate als auch der Strömungsgeschwindigkeit ohne den Einsatz von Streuteilchen erreichten Leitgeb et al. 2013 durch die Nutzung mehrerer Laser-Doppler-Vibrometer (LDV). Bei der Messung wird der proportionale Zusammenhang zwischen der Fluktuation der Wärmefreisetzungsrate und der zeitlichen Änderung der Dichte in einem Flammenvolumen ausgenutzt. Durch die Korrelation der Messdaten aus zwei LDV deren Strahlen übereinander gekreuzt oder parallel angeordnet sind, ist außerdem die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit möglich (Köberl et al. 2010). Dabei ergibt sich die Geschwindigkeit aus dem bekannten Abstand zweier Messpositionen und dem Phasengangunterschied der beiden Signale. Dieser Zusammenhang basiert auf lokalen Dichtestrukturen, die der Strömung folgend zuerst Messposition eins und anschließend Messposition zwei durchtreten.

Die lokale Messung mittels mehrerer LDV erfordert jedoch einen hohen Traversier- und somit Zeitaufwand, was ein stabiles Verhalten der Flamme voraussetzt. Um die Untersuchung instationärer Strömungsphänomene zu ermöglichen ist die Messdauer entsprechend zu verkürzen. Zu diesem Zweck wird im vorliegenden Beitrag ein bildgebendes LDV unter Nutzung einer Hochgeschwindigkeitskamera vorgeschlagen, wobei jedes Pixel die integrale Erfassung der Wärmefreisetzungsrate ermöglicht. Die Korrelation der Signale mehrerer Pixel erlaubt zudem die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit.

## **Messprinzip und -aufbau**

Ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) ist ein interferometrisches Messgerät, das beispielsweise als Mach-Zehnder-Interferometer ausgeführt wird. Ein solcher Aufbau ist in Abb. 1 für die Messung der Wärmefreisetzungsrate sowie deren Fluktuation innerhalb einer Flamme schematisch dargestellt.

Der Laserstrahl wird in Mess- (1) und Referenzarm (2) aufgeteilt und nach der Frequenzverschiebung durch die Fluktuation des Brechungsindex im Messvolumen bzw. durch den akusto-

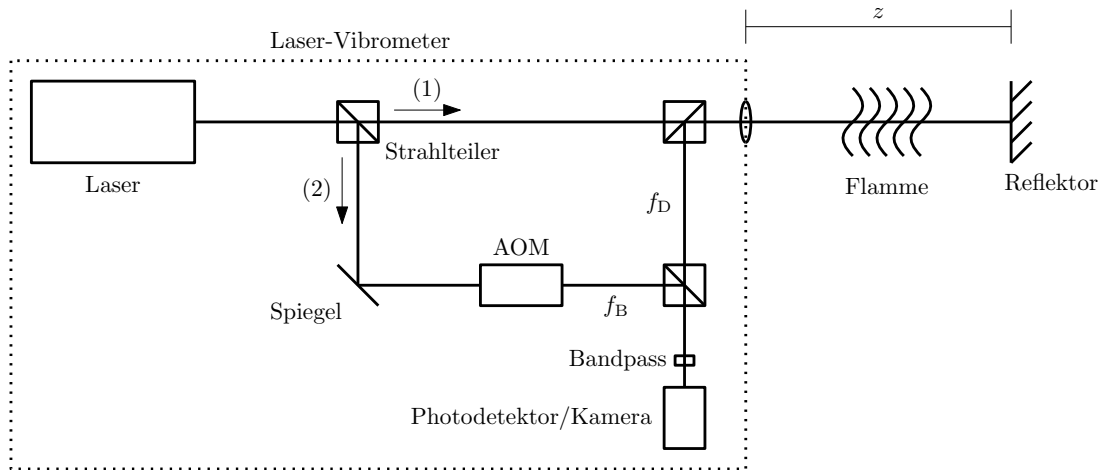


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Laser-Doppler-Vibrometers (LDV): der Laserstrahl ( $\lambda = 532\text{nm}$ ) wird aufgeteilt in Mess- (1) und Referenzstrahl (2). Über einen akusto-optischen Modulator (AOM) wird die Frequenz des Referenzstrahls um  $f_B$  verschoben. Die Frequenz des Messstrahls erfährt eine Dopplerfrequenzverschiebung  $f_D$  basierend auf der zeitlichen Änderung der optischen Weglänge  $L = \int_z n(z,t)dl$  aufgrund von Fluktuationen des Brechungsindex  $n$  innerhalb der Flamme. Beide Strahlen interferieren auf dem Detektor wobei sich ein modulierte Intensitätssignal mit der Frequenz  $(f_B - f_D)$  ergibt.

optischen Modulator (AOM) im Referenzarm auf dem Sensor der Kamera überlagert. Dabei ergibt sich das modulierte Intensitätssignal

$$I \sim [1 + V \cos(\Delta\varphi)] \quad (0 \leq V \leq 1) \quad (2)$$

mit dem Interferenzkontrast  $V$  und dem Phasenunterschied

$$\Delta\varphi = 2\pi f_B t + \frac{2\pi}{\lambda} 2L(t) \quad (3)$$

mit dem Frequenzhub  $f_B$  im Referenzarm, der Laserwellenlänge  $\lambda$  und der mit der Zeit  $t$  veränderlichen optischen Weglänge  $L$  zwischen dem LDV und dem Reflektor. Daraus ergibt sich die Frequenz des Intensitätssignals

$$f_I = \frac{\partial \Delta\varphi}{2\pi \partial t} = f_B + \frac{2}{\lambda} \dot{L}(t) = f_B - f_D(t) \quad (4)$$

mit der Dopplerfrequenz  $f_D$ . Unter der Voraussetzung, dass der geometrische Weg  $z$  zwischen LDV und Reflektor konstant ist, gilt für die optische Weglänge

$$L = \int_z n(z,t)dl \quad (5)$$

mit dem Brechungsindex  $n$  entlang des Weges  $z$ . Dabei besteht nach Gladstone und Dale zwischen dem Brechungsindex und der Massendichte  $\rho$  des Fluids der Zusammenhang

$$n - 1 = G\rho \quad (6)$$

mit der stoffabhängigen Gladstone-Dale-Konstante  $G$ . Somit ist es möglich die zeitliche Dichteänderung  $\dot{\rho}$  integral entlang des Weges  $z$  aus dem detektierten Intensitätssignal gemäß Gl. (2) zu ermitteln. Weiterhin gilt zwischen der Dichteänderung, der Druckänderung  $\dot{p}$  und der lo-

kalen Wärmefreisetzungsrate  $\dot{q}$  innerhalb eines infinitesimalen Volumenelements der Zusammenhang

$$\dot{\rho} = \frac{1}{c^2} \dot{p} - \frac{\kappa - 1}{c^2} \dot{q} \quad (7)$$

mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  und dem Adiabatenexponent  $\kappa$  (Dowling und Morgans 2005). Da in Flammen der Beitrag der Druckänderung zur Änderung der Dichte vernachlässigbar ist, ergibt sich aus Gl. 7 ein linearer Zusammenhang von  $\dot{\rho}$  und  $\dot{q}$  und es gilt

$$f_D(t) = \frac{2G(1 - \kappa)}{\lambda c^2} \int_z \dot{q}(z, t) dl. \quad (8)$$

Entsprechend ermöglicht das LDV die Messung der Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  integral entlang des Weges  $z$ , der das Flammenvolumen vollständig durchquert. Die Messung der lokalen Wärmefreisetzungsrate  $\dot{q}$  innerhalb des Flammenvolumens ist durch die Nutzung von tomografischer Rekonstruktion oder eines zweiten LDV und die Korrelation der Vibrometersignale möglich (Hampel und Woisetschläger 2006; Leitgeb et al. 2013). Jedoch ist eine zeitaufwändige Traversierung durch das gesamte Volumen notwendig, wobei ein stationäres Verhalten der Flamme vorausgesetzt wird. Um die Messzeit zu reduzieren und instationäres Verhalten der Flamme zu erfassen, soll eine instantane planare Messung der Wärmefreisetzungsrate durch den Aufbau eines kamerabasierten Laser-Vibrometers realisiert werden. Unter der Annahme einer Rotationssymmetrie der Flamme genügt dafür die Messung in einer Hälfte des Flammenvolumens (hier: Breite: 50 mm, Höhe: 80 mm). Weiterhin soll eine Ortsauflösung von 1 mm erreicht werden, woraus die minimale Bildauflösung der Kamera von  $50 \times 80$  px resultiert.

Neben der Anforderung an die örtliche Auflösung, ergeben sich Forderungen an die Messrate des Systems. Gemäß Gl. (8) resultiert die Fluktuation der Wärmefreisetzungsrate in einer Fluktuation der Dopplerfrequenz. Diese Frequenzfluktuation kann aus dem Zeitsignal der von einem Kamerapixel gemessenen Intensität gewonnen werden. Dabei ist die maximal mögliche Messrate von der Bildrate  $f_K$  der Kamera begrenzt, da das Intensitätssignal gemäß dem Nyquist-Theorem abgetastet werden muss und es gilt

$$f_K > 2(f_B + f_D). \quad (9)$$

Zusätzlich ist die Wahl des Frequenzhubs  $f_B$  zu berücksichtigen, da dieser den Messbereich für die Dopplerfrequenz festlegt (Selbach et al. 1992). Basierend auf früheren Messungen an der zu untersuchenden Flamme sind Oszillationen von  $f_D$  mit Frequenzen von wenigen kHz und Amplituden bis 15 kHz zu erwarten (Peterleithner und Woisetschläger 2015). Jedoch wird für den vorliegenden Aufbau ein Frequenzhub  $f_B = 100$  kHz gewählt, um bereits für weiterführende Untersuchungen einen erweiterten Messbereich ( $|f_D| = 100$  kHz) zu erreichen.

Der Aufbau des kamerabasierten LDV ist in Abb. 2 skizziert. Der Frequenzhub wird durch die Reihenschaltung zweier parallel angeordneter AOM realisiert, wobei die Abhängigkeit der Frequenzverschiebung von der Einfallsrichtung des Laserstrahls ausgenutzt wird. AOM 1 wird mit der Grundfrequenz  $F = 80$  MHz betrieben und AOM 2 mit der Frequenz  $(F - f_B)$ , so dass sich nach durchlaufen beider AOM der Frequenzhub aus der Differenzfrequenz  $(F - F + f_B)$  ergibt (siehe Abb. 2). Für die Abtastung des Intensitätssignals wird eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Phantom v1610 der Fa. Vision Research genutzt. Die Kamera bietet eine maximale Bildrate von 1 MHz bei einer Auflösung von  $128 \times 16$  px und einer Pixelgröße von  $28 \mu\text{m}$ . Um die gestellte Anforderung an die örtliche Auflösung zu erfüllen, wird eine Kameraauflösung von  $128 \times 64$  px genutzt, was zu einer reduzierten Bildrate von maximal 500 kHz führt, wobei Gl. (9) für den gesamten Messbereich erfüllt ist. Zusätzlich soll das Messsignal vom emittierten Flam-

menleuchten getrennt werden. Zu diesem Zweck wird ein schmalbandiger Laser (Fa. Cobolt) mit der Wellenlänge  $\lambda = 532 \text{ nm}$  sowie ein Bandpassfilter vor der Kamera genutzt. Der von der Kamera detektierte Intensitätsverlauf wird anschließend für jedes Pixel ausgewertet und die Dopplerfrequenz mittels Quadratur-Demodulations-Technik (QDT) ermittelt.

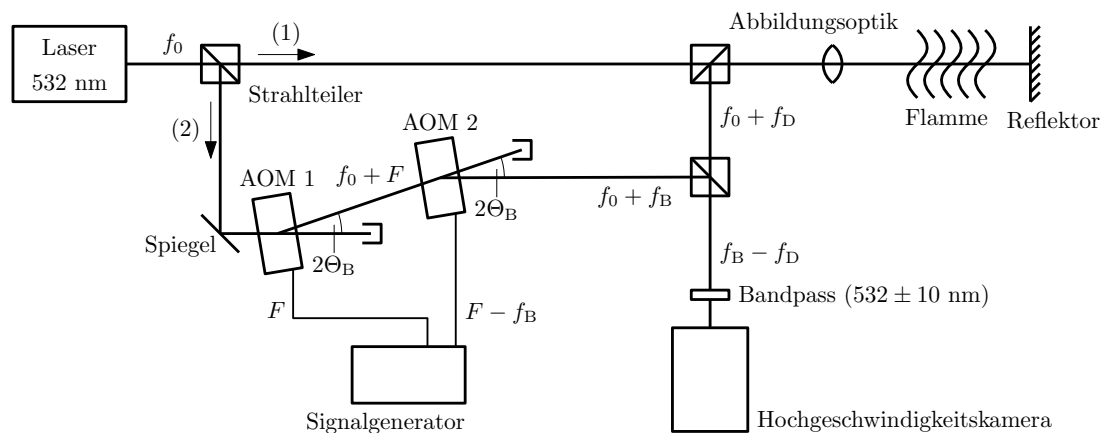


Abb. 2: Skizze des Messaufbaus: Der Laserstrahl mit der Frequenz  $f_0$  wird in Mess- (1) und Referenzarm (2) aufgeteilt. Im Referenzarm wird der Laser durch zwei AOM mit der Frequenz  $F$  und  $(F - f_B)$  geführt, wobei sich aufgrund der Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Laserstrahls der Frequenzhub ( $F - F + f_B$ ) ergibt. Im Messarm erfährt die Frequenz des Lichts eine Dopplerverschiebung, so dass mit der Kamera die Überlagerung beider Strahlen als moduliertes Intensitätssignal mit der Frequenz ( $f_B - f_D$ ) detektiert wird.

## Ergebnisse

Für die Validierung des kamerabasierten LDV werden erste Testmessungen an einer kontinuierlich schwingenden Oberfläche durchgeführt, da die Änderung des geometrischen Weges stärkere Signalamplituden gewährleistet als die Änderung des optischen Weges durch den Brechungsindex. Weiterhin wird der Einfluss von Brechungsindexgradienten innerhalb des Flammenvolumens auf die Ablenkung des Messstrahls untersucht.

### Messung mechanischer Vibration

Die Validierung des Messsystems erfolgt mittels der Messung einer mechanischen Schwingung der Wand einer Lautsprecherbox. An der seitlichen Holzwand der Box ist ein Spiegel montiert, der als Reflektor dient und entsprechend bewegt wird (vgl. Abb. 1). Diese Änderung der geometrischen Weglänge wurde gewählt, um eine größere Signalamplitude im Vergleich zu Oszillationen des Brechungsindex zu erhalten. Zunächst wird das LDV ohne AOM im Referenzarm betrieben, so dass  $f_B = 0$  gilt. Entsprechend kann lediglich der Betrag der Dopplerfrequenz detektiert werden. Auf der Kamera entsteht so das in Abb. 3a dargestellte Interferenzmuster zum Zeitpunkt  $t = 0$ .

Der Lautsprecher wird mit einem Sinuston bei einer Frequenz von 82 Hz betrieben. Da kein Frequenzhub genutzt wird und lediglich die Dopplerfrequenz detektiert werden muss, wird die Bildrate der Kamera auf 30 kHz reduziert. Somit kann ein vergrößerter Bildausschnitt von  $100 \times 100 \text{ px}$  genutzt werden. Die Messdauer betrug 1 s. Aus diesem Aufbau resultiert der in Abb. 3b beispielhaft für ein zentrales Pixel (Position: (1.4, 1.4) mm) dargestellte Intensitätsverlauf. Gut zu erkennen ist die Änderung der Signalfrequenz. Über das gesamte Zeitsignal erfolgt die Bestimmung der Frequenz mittels QDT. Aus dieser Auswertung resultiert für die dargestellte Messposition die in Abb. 3c dargestellte Oszillation der Dopplerfrequenz. Zu beachten ist dabei, dass Frequenzen nahe 0 Hz konzeptbedingt nicht detektiert werden können. Weiterhin ist die Detektion negativer Frequenzen nicht möglich, weshalb nur der Betrag der oszillieren-

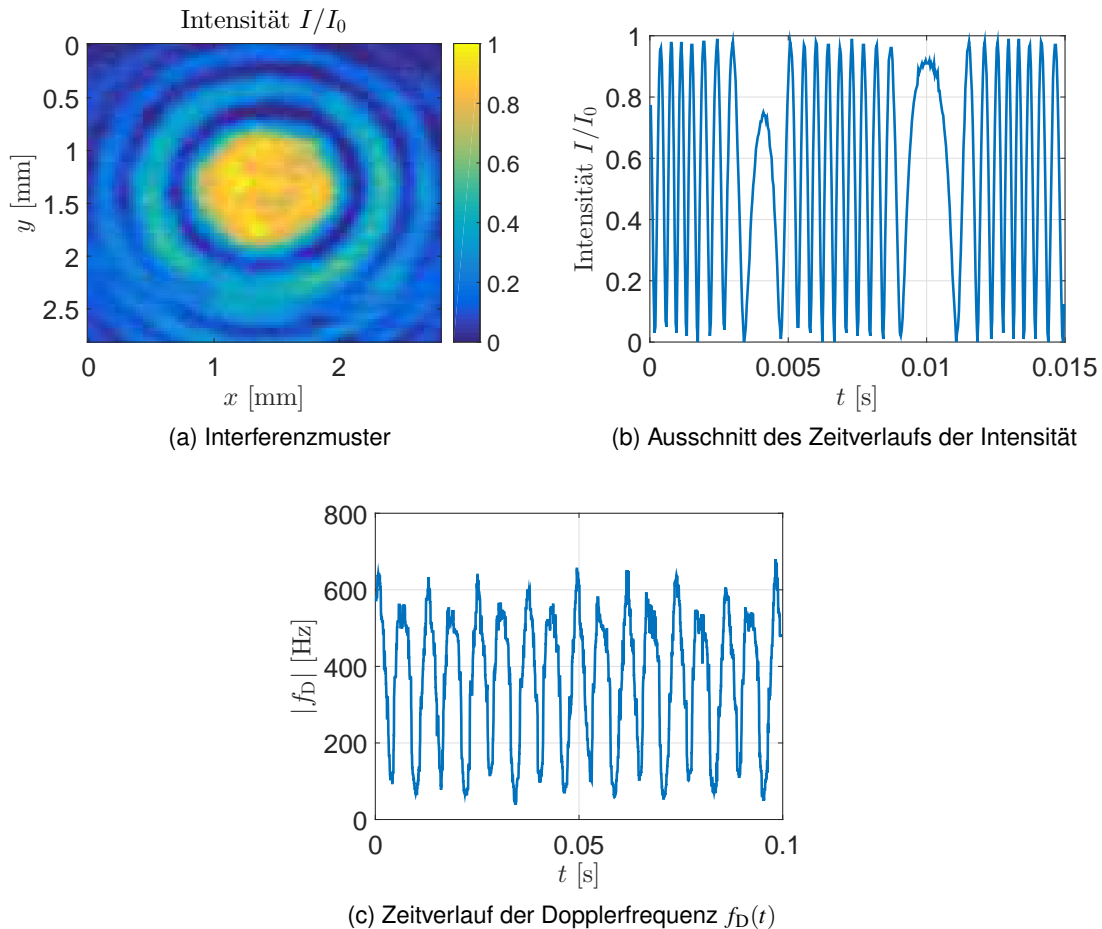


Abb. 3: Ergebnisse der Validierungsmessung am Lautsprecher: (a) mit der Kamera detektiertes Interferenzmuster, (b) Ausschnitt des Zeitverlaufs der von einem Pixel detektierten Intensität, (c) Zeitverlauf des Betrags der Dopplerfrequenz ermittelt durch die Quadratur-Demodulations-Technik (QDT).

den Dopplerfrequenz erfasst werden kann. Folglich ergibt sich die Oszillationfrequenz aus zwei Perioden des in Abb. 3c gezeigten Verlaufs zu rund 82 Hz und entspricht somit der Anregungsfrequenz des Lautsprechers. Der Mittelwert der Oszillationsfrequenz für alle Messpositionen des gezeigten Ausschnitts beträgt rund 81 Hz bei einer Standardabweichung von 1.5 Hz. Entsprechend ist es gelungen die Vibration des Lautsprechers mittels des kamerabasierten LDV zu erfassen und somit wurde erstmals ein bildgebendes Vibrometer implementiert. Die genutzte Bildauflösung entspricht dabei den Anforderungen an die Messung im Flammenvolumen.

Jedoch werden bei der Messung an der Flamme zusätzliche Probleme durch die Ablenkung des Laserstrahls erwartet. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Betrachtung dieser Störung.

#### *Strahlablenkung im Flammenvolumen*

Die Ablenkung des Laserstrahls aufgrund lokaler Änderungen des Brechungsindex innerhalb der Flamme kann zu einem Übersprechen benachbarter Pixel und damit zu einer reduzierten Ortsauflösung des Messsystems führen. Zur Quantifizierung dieser Ablenkung wurde ein kollimierter Laserstrahl mit einem Durchmesser von 1 mm durch die stabilisierte Flamme eines Drallstrombrenners hindurch mit der Kamera detektiert. Dabei wurde ein veränderter Aufbau genutzt, bei dem der Laserstrahl das Flammenvolumen nur einmal durchläuft. In Abb. 4 ist die Streuung des Intensitätsmaximums des detektierten Strahlprofils dargestellt. Aus der Untersuchung ergibt sich eine maximale Ablenkung des Laserstrahls um rund 2 mm in negativer

$x$ -Richtung und um rund 1.5 mm in negativer  $y$ -Richtung. Somit tritt bei der geforderten Ortsauflösung von 1 mm ein Übersprechen aufgrund der Ablenkung auf.

Um dies zu verhindern, könnte beispielsweise ein Retroreflektor hinter dem Flammenvolumen platziert werden, da die Flamme dabei zweifach durchquert und die Ablenkung egalisiert wird. Weiterhin könnte eine Korrektur der Störung durch die Flamme mittels adaptiver Optik, wie zum Beispiel eines phasenkonjugierenden Spiegels erfolgen. Entsprechend ist die Reduzierung der Strahlablenkung Bestandteil weiterer Untersuchungen.

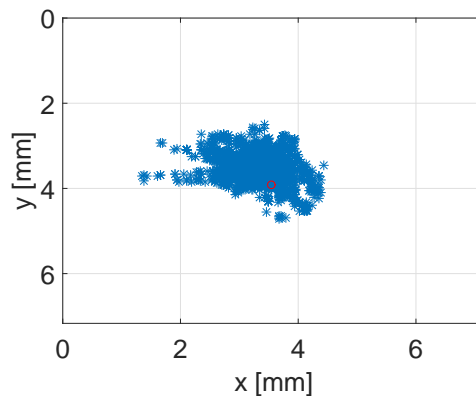


Abb. 4: Streuung des Intensitätsmaximums eines durch die stabilisierte Flamme eines Drallstrombrenners detektierten kollimierten Laserstrahl: rot: Detektion ohne Flamme, blau: Detektion durch Flamme. Der Betrag der maximale Auslenkung relativ zum ungestörten Fall ist 2 mm in  $x$ -Richtung und 1.5 mm in  $y$ -Richtung.

## Abschlussdiskussion

Für die Entwicklung effizienterer Flugzeugturbinen werden drall-stabilisierte Flammen genutzt, für deren Charakterisierung mittels der Flammentransferfunktion (FTF) Messungen der Wärmefreisetzungsrate sowie der Strömungsgeschwindigkeit notwendig sind. Zu diesem Zweck wurde im vorliegenden Beitrag das Konzept eines kamerabasierten Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) vorgestellt, welches die integrale Messung der Wärmefreisetzungsrate mit jedem Pixel ermöglicht. Die Korrelation der Signale mehrerer Pixel ermöglicht zudem die Bestimmung der Geschwindigkeit und somit die instantane Bestimmung der FTF. Erstmals wurde ein solches planares LDV mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgebaut und erfolgreich bei Validierungsmessungen eingesetzt. Dabei gelang die Detektion der mechanischen Vibration eines Lautsprechers bei einer Bildauflösung von  $100 \times 100$  px. Weiterhin erfolgten Untersuchungen zur Ablenkung des zur Messung genutzten Laserstrahls durch die Brechungsindexgradienten in der Flamme. Dabei zeigte sich, dass die Ablenkung bis zu 2 mm beträgt und somit bei der gewünschten Ortsauflösung von 1 mm ein Übersprechend auftreten würde. Deshalb sind weitere Untersuchungen zur Reduktion der Strahlablenkung notwendig.

Für weitere Experimente soll ein Frequenzhub im Referenzarm des Vibrometers ergänzt werden, um eine Richtungserkennung bei Messung der Dopplerfrequenz zu erhalten. Herausfordernd ist dabei die benötigte hohe Bildrate des für die Abtastung des Intensitätssignals, weshalb die Nutzung einer Hochgeschwindigkeitskamera notwendig ist. Zudem sollen erste Messungen an einer drall-stabilisierten Flamme durchgeführt werden mit dem Ziel die FTF zu bestimmen.

## Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) und dem Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) für die finanzielle Unterstützung der Projekte Cz55/33-1 sowie I2544-N30 und Ludwig Burmeister für die Unterstützung bei den Experimenten.

## Literatur

- Candel, S., Durox, D., Schuller, T., Bourgoquin, J.F., Moeck, J.P., 2014:** “Dynamics of swirling flames”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 46, pp. 147–173
- Dowling, A., Morgans, A., 2005:** “Feedback Control of Combustion Oscillations”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 37, No. 1, pp. 151–182
- European Commission, 2011:** “Flightpath 2050. Europe’s Vision for Aviation. Report of the High Level Group on Aviation Research”
- Hampel, B., Woisetschläger, J., 2006:** “Frequency- and space-resolved measurement of local density fluctuations in air by laser vibrometry”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 10, pp. 2835–2842
- Köberl, S., Fontaneto, F., Giuliani, F., Woisetschläger, J., 2010:** “Frequency-resolved interferometric measurement of local density fluctuations for turbulent combustion analysis”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 3, p. 035302 (10 pp.)
- Lauer, M., Sattelmayer, T., 2010:** “On the Adequacy of Chemiluminescence as a Measure for Heat Release in Turbulent Flames With Mixture Gradients”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 132, No. June 2010, p. 061502 (8 pp)
- Leitgeb, T., Schuller, T., Durox, D., Giuliani, F., Köberl, S., Woisetschläger, J., 2013:** “Interferometric determination of heat release rate in a pulsated flame”, *Combust. Flame*, Vol. 160, No. 3, pp. 589–600
- Paschereit, C.O., Schuermans, B., Polifke, W., Mattson, O., 2002:** “Measurement of Transfer Matrices and Source Terms of Premixed Flames”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 124, No. 2, pp. 239–247
- Peterleithner, J., Woisetschläger, J., 2015:** “Laser Vibrometry for Combustion Diagnostics in Thermoacoustic Research”, *Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, 1, pp. 1–8, Dresden
- Rayleigh, J.W.S.B., 1878:** “The Explanation of Certain Acoustical Phenomena”, *Nature*, Vol. 18, No. 455, pp. 319–321
- Schlüßler, R., Bermuske, M., Czarske, J., Fischer, A., 2015:** “Simultaneous three-component velocity measurements in a swirl-stabilized flame”, *Exp. Fluids*, Vol. 56, No. 10, p. 183 (13pp)
- Selbach, H., Lewin, A.C., Roth, V., 1992:** “Laser Doppler Vibrometer for applications in the automotive industry”, *25th ISATA Silver Jubil. Int. Symp. Automot. Technol. Autom.*, pp. 217–224, Florence