

Bildgebende und zeitlich hochauflösende Messungen von instationären Strömungsphänomenen mittels FM-DGV und einem Mikroscoannerspiegel

Imaging and high temporal resolved Measurement of transient Flow Phenomena with FM-DGV and a Micro Scanner Mirror

Ulrich Wilke, Jürgen Czarske, Thilo Sandner*, Andreas Fischer

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

* Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS,
Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden,
E-Mail: thilo.sandner@ipms.fraunhofer.de

Geschwindigkeitsfeldmessung, hohe Messrate, Mikrospiegelscanner, transiente Vorgänge
Flow field measurement, high measurement rate, micro scanner, transient processes

Kurzfassung

Für die Untersuchung von komplexen, transienten Strömungsphänomenen, wie Einspritzvorgängen oder der Analyse von Turbulenzspektren werden Messverfahren benötigt, die in der Lage sind flächige Messungen der Strömungsgeschwindigkeit mit Messraten im Kilohertzbereich durchzuführen. Ein Ansatz zum Erreichen dieser hohen Messraten stellt die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Frequenzmodulation dar. Damit lassen sich 25 entlang einer Linie angeordnete Messpunkte simultan mit einer Messrate von 100 kHz erfassen. Durch den Einsatz eines modernen Mikroscoannerspiegels konnte der Messbereich um eine Dimension erweitert und erstmals quasimultane Strömungsgeschwindigkeitsmessungen mit 100 x 25 Messpunkten und einer Messrate im Kilohertzbereich demonstriert werden. Damit war die Messung transientser Strömungsphänomene möglich und wurde am Beispiel der Partikelausbreitung vor einer Spraydüse mit einer Zeitauflösung von 1 ms demonstriert. Zusätzlich wurden stationäre Strömungen volumetrisch erfasst und flächige Messungen an quasistationären Strömungen durchgeführt. Es konnten Strömungszillationen bis 500 Hz aufgelöst werden.

Einleitung

Für das Verständnis komplexer technischer Strömungen werden Messtechniken benötigt, die in der Lage sind, Strömungsgeschwindigkeiten flächig mit einer hohen Messrate zu erfassen. Müller et al. 2010 gelang mithilfe von PIV Messungen die zeitaufgelöste Untersuchung des Strömungsfeldes in einem Verbrennungsmotor mit Messraten bis 6 kHz. Durch den Einsatz des von Fischer et al. 2007 vorgestellten von Doppler-Global-Velozimeters mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) sind Messraten bis zu 100 kHz möglich. Damit konnten

2012 die von Fischer et al. durchgeführten Untersuchungen von Flammeninstabilitäten erfolgen, wobei charakteristische Strömungsgeschwindigkeitsspektren bis 2,5 kHz in drallstabilisierten Verbrennungsprozessen aufgelöst wurden. Die Messung erfolgte simultan an 25 entlang einer Linie angeordneten Messpunkten. Flächige und volumetrische Messungen bedürfen jedoch einer zeitaufwändigen Traversierung des Messsystems, sodass dann lediglich stationäre bzw. quasistationäre (periodische) Strömungsphänomene untersucht werden können. Gesucht wird somit eine Erweiterung der FM-DGV-Messtechnik, um bildgebende Messungen im Kilohertzbereich zu ermöglichen. Mit dem Einsatz von Kameratechnik ist zwar eine bildgebende Messung, wie von Müller et al 2009 demonstriert, möglich, jedoch haben die wegen ihrer hohen Lichtempfindlichkeit eingesetzten CCD-Kameras mit max. 10 Hz eine unzureichende Bildrate. Hingegen sind mit CMOS-Kameras Bildraten im Kilohertzbereich möglich, aber diese Kameras weisen ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis auf, wodurch sich höhere Messunsicherheiten ergeben.

Im Gegensatz zur Kameratechnik stellt die Scantechnik ein kostengünstigeres Verfahren dar, um flächenhafte Messungen mit Bildraten im Kilohertzbereich zu erreichen. Während des Scanvorgangs wird mit dem FM-DGV kontinuierlich gemessen, sodass trotz der linienhaften Photodetektion (Detektorarray) eine Strömungsebene erfasst wird. Dabei kann die flächenhafte Messung als quasisimultan betrachtet werden, wenn die Scanperiodendauer gegenüber dem Strömungszeitverhalten hinreichend klein ist. Die anvisierten Scanfrequenzen im Kilohertzbereich lassen sich aktuell mit resonanten Mikroscoannerspiegeln und Polygoradscannern erzielen, die hinreichend große Aperturen von mehr als 3 mm bieten, siehe Frauenhofer 2012 und Ruck et al. 1986. Die große Apertur ist zur Führung des kollimierten Laserstrahls nötig. Mikroscoannerspiegel haben gegenüber Polygonradscannern den Vorteil eines geringeren Formfaktors (aktuelle Baugröße 20 mm x 14 mm x 6 mm), sowie eines geringeren Aufwandes bei gleichzeitig erhöhter Zuverlässigkeit für hohe Scanfrequenzen, siehe Chu et al. 2010, Tortschanoff et al. 2010 und Sandner et al. 2012. Ihre geringe Größe gestatten Anwendungen auch an schwer zugänglichen Orten zum Beispiel in Kombination mit einem Endoskop, siehe Wolter et al. 2005.

Das Ziel der Kombination der hohen Messrate des FM-DGVs mit einer flächigen Detektion ist neben der Messung von stationären und quasistationären Strömungen auch die erstmalige flächige Erfassung transientser Strömungsphänomene mit Messraten im Kilohertzbereich. Dafür wird zunächst auf die verwendete Messtechnik mit dem Aufbau und der Charakterisierung des Messsystems eingegangen, anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen stationärer, quasistationärer und transientser Strömungen vorgestellt.

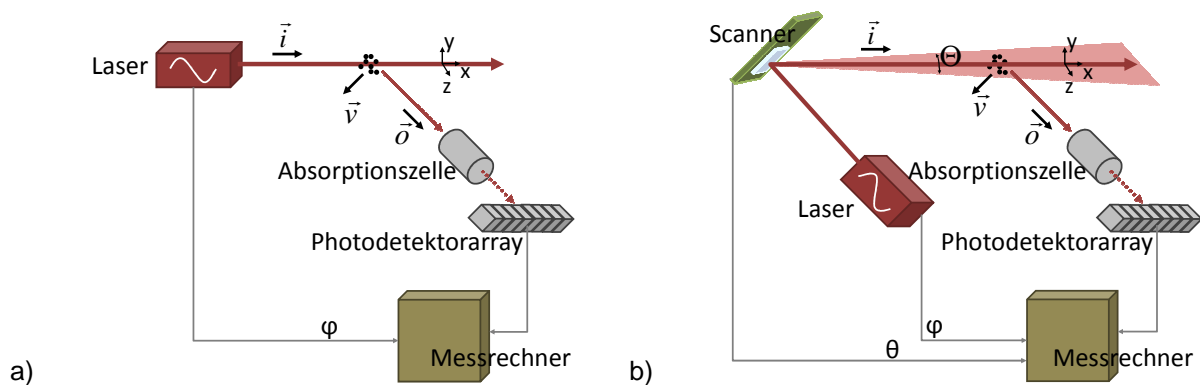
Messtechnik

Messprinzip

Die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation basiert auf der spektroskopischen Auswertung des Streulichtsignals einer beleuchteten Strömung. Dazu wird die Frequenz des Lasers sinusförmig moduliert und das Streulicht durch eine molekulare Absorptionszelle mit einer nichtlinearen Kennlinie beobachtet. Die Geschwindigkeit der Strömung führt zur Doppler-Frequenzverschiebung des Streulichts, welche von der Absorptionszelle in eine Intensitätsänderung überführt und von einem Photodetektor erfasst wird. Durch die Auswertung der ersten und zweiten Harmonischen des Detektorsignals kann auf die Doppler-Frequenzverschiebung und somit auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Das Messprinzip ist ausführlich in Fischer et al. 2007 dargestellt.

Aufbau

Der Übergang vom linienhaft messenden FM-DGV zu einem flächig messenden System mit Scanner ist in Abb. 1 gezeigt. Dabei kommt bei der eindimensionalen Messung als Photodetektor ein Array mit 25 Lawinenphotodioden (APD) zum Einsatz. Die in Abb. 1b dargestellte Erweiterung mit einem Mikros scannerspiegel ermöglicht die Traversierung der Laserlinie in z-Richtung. Somit wird dem Messbereich eine räumliche Dimension hinzugefügt, wodurch die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Tiefe möglich ist. Das Detektorarray erfasst dabei weiterhin die Strömungsgeschwindigkeitsinformation linienhaft in lateraler Richtung, während die Scanbewegung den Messbereich in radialer Richtung abrastert. Somit empfängt das Detektorarray die Tiefeninformation der Strömungsgeschwindigkeit mit einem zeitlichen Multiplexing.



IAbb. 1: a) Aufbau des FM-DGV zur eindimensionalen Strömungsgeschwindigkeitsmessung. b) Erweiterung des Messsystems mit einem Mikros scannerspiegel zur mehrdimensionalen Messung.

Über den zeitlichen Verlauf des Auslenkwinkels $\theta(t)$ des Mikrospeiegelscanners bzw. die daraus folgende Position des Laserstrahls $z(t)$ im Messvolumen kann mit dem zeitlichen Verlauf des Detektorsignals $v(t)$ das Geschwindigkeitsfeld $v(x, z)$ durch Gleichsetzen des Parameters t , wie in Abb. 2 dargestellt, bestimmt werden.

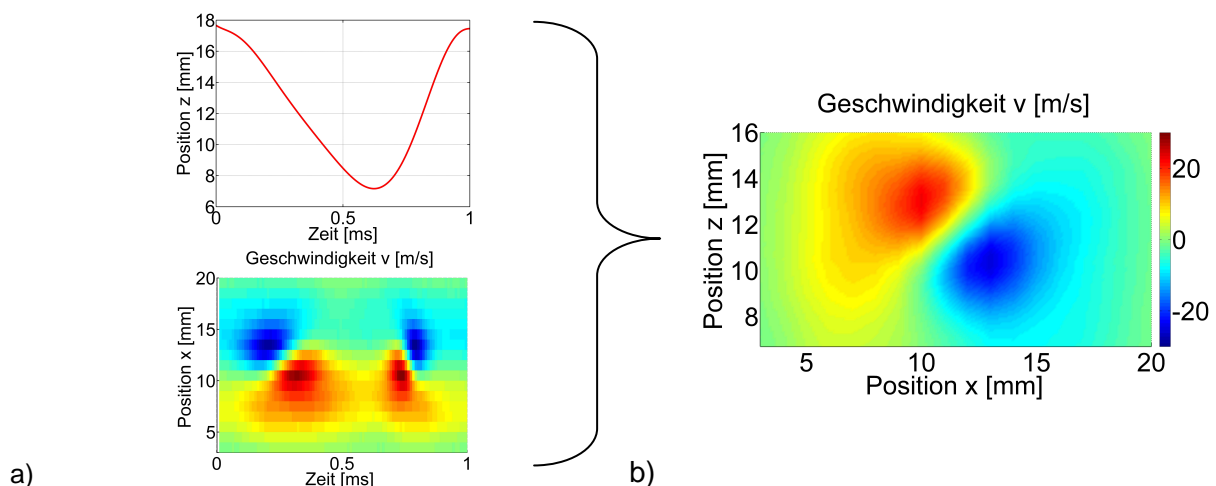


Abb. 2: b) Erzeugung einer flächigen Messung aus a) der Position des Scanners und dem Zeitverlauf am Detektorarray.

Charakterisierung

Der Scanvorgang mit einer Scanfrequenz von 1 kHz führt zu einer Unschärferelation zwischen Messpunkteanzahl und Messrate, wobei die Datenrate mit 2,5 MPixel/s konstant

bleibt. Im Vergleich zum linienhaft messenden FM-DGV steigt die Messpunktanzahl von 1×25 auf 100×25 Messpunkt, gleichzeitig sinkt die Messrate von 100 kHz auf 1 kHz . Die Messbereichsgröße ist in lateraler Richtung über die Größe des Detektorarrays und die optische Abbildung festgelegt, sie beträgt 24 mm . In radialer Richtung hängt die Messbereichsgröße vom Auslenkwinkel θ des Scanners sowie dem Abstand zwischen Scanner und Messvolumen ab und beträgt bei der gewählten Anordnung 11 mm .

Die Betrachtung der minimal erreichbaren zufälligen Unsicherheit im Rahmen der Charakterisierung des Messsystems am Freistrah einer Düse zeigt, dass der Scanvorgang bei gleicher Messzeit zu einer höheren Standardabweichung der Geschwindigkeit σ_v führt, siehe Abb. 3a. Die höhere Standardabweichung resultiert aus der geringeren Belichtungszeit, bei einer um den Faktor 100 reduzierten Messrate. Ein Vergleich der Standardabweichung der Geschwindigkeit bei gleicher Belichtungszeit verdeutlicht, dass der Scanvorgang selbst keinen Einfluss auf die zufällige Unsicherheit der Geschwindigkeitsmessung hat, siehe Abb. 3b.

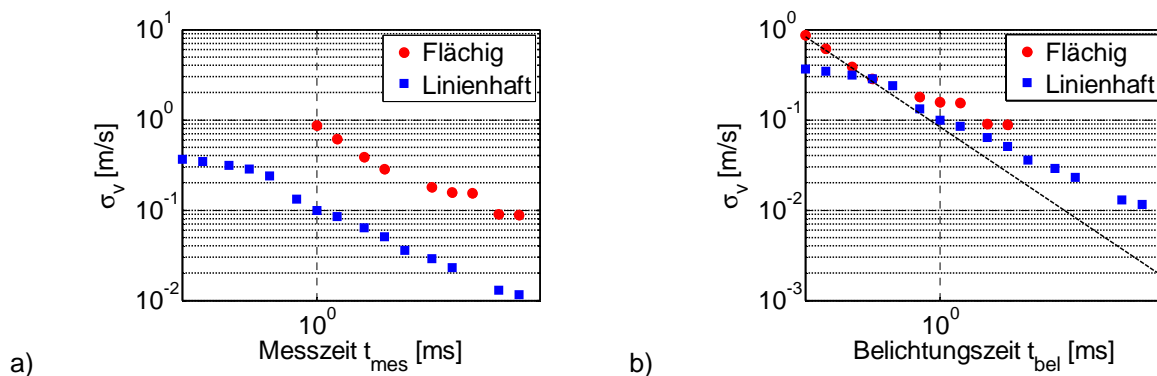


Abb. 3: a) Darstellung der zufälligen Messabweichung der Geschwindigkeit σ_v über der Gesamtmesszeit t_{mes} b) und der Belichtungszeit t_{bel} .

Der Scanner hat zwei Effekte auf die Beleuchtung und somit auf die am Detektor wahrgenommene Doppler-Frequenzverschiebung f_D . Zum einen führt die Kippung des Spiegels, wie in Abb. 4 gezeigt, zu einer Änderung der Beleuchtungsrichtung \vec{i} und somit zu einer Änderung des Sensitivitätsvektor $(\vec{o} - \vec{i})$. Dabei beschreibt der Index *Cal* den Zustand während der Kalibrierung mit ruhendem Spiegel. Zum anderen existiert eine Geschwindigkeit der bewegten Laserlinie \vec{v}_{Scan} . Folglich ergibt sich die Doppler-Frequenz am Detektor zu

$$f_D = \frac{(\vec{o} - \vec{i}) \cdot \vec{v}_{oi}}{\lambda} - \frac{\vec{i} \cdot \vec{v}_{Scan}}{\lambda} \quad (1)$$

Da \vec{v}_{Scan} jedoch für jeden Winkel orthogonal zu \vec{i} steht, ist das Skalarprodukt der beiden null.

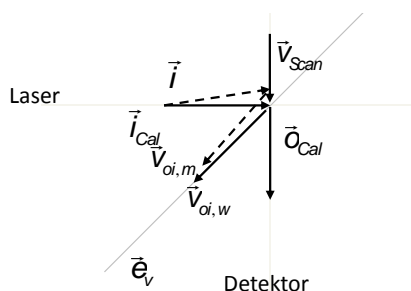


Abb. 4: Systematischer Fehler resultierend aus der Änderung der Beleuchtungsrichtung während des Scanvorgangs.

Somit enthält die resultierende systematische Abweichung der Geschwindigkeit Δv nur einen Anteil aus der Änderung der Beleuchtungsrichtung und ergibt sich zu $\Delta v = \hat{v}_{oi,m} - \hat{v}_{oi,w}$ mit $\hat{v}_{oi,m} = \frac{(\vec{o}_{cal} - \vec{i}) \cdot \vec{v}}{|\vec{o}_{cal} - \vec{i}_{cal}|}$ und $\hat{v}_{oi,w} = \frac{(\vec{o}_{cal} - \vec{i}_{cal}) \cdot \vec{v}}{|\vec{o}_{cal} - \vec{i}_{cal}|}$. Dabei beschreibt $\hat{v}_{oi,w}$ den Zustand während der Kalibrierung und $\hat{v}_{oi,m}$ den gemessenen Wert. Dieser Zusammenhang konnte in der Simulation gezeigt werden. Allerdings liegen die aus der Spiegelbewegung resultierenden systematischen Abweichungen aufgrund des geringen Auslenkwinkels θ von ca. 1° in der Größen-

ordnung von 1 mm/s. Deswegen sind sie für die Messung vernachlässigbar.

Messergebnisse

Die hohe Messrate und die Robustheit gegen das Flammenleuchten in der Strömung qualifizieren das FM-DGV für Messungen in Flammen, siehe Fischer et al. 2007 und 2012 und zur Untersuchung von Verbrennungsprozessen, siehe Dingel et al. 2006 und Menzel et al. 2006. Dennoch forderten diese Untersuchungen bisher stationäre oder quasistationäre Prozesse, wenn eine komplette Strömungsebene erfasst werden sollte. Die Kombination mit einem Mikroscoannerspiegel führt dazu, dass auch die flächige Untersuchung transients Vorgänge möglich ist. Die folgenden abgebildeten Anwendungen sind nach ihrem Zeitverhalten in stationäre (a), quasistationäre (b_1 , b_2) und transiente Vorgänge (c) gegliedert und geben einen Überblick über die perspektivischen Einsatzgebiete des scannenden FM-DGV-Messsystems.

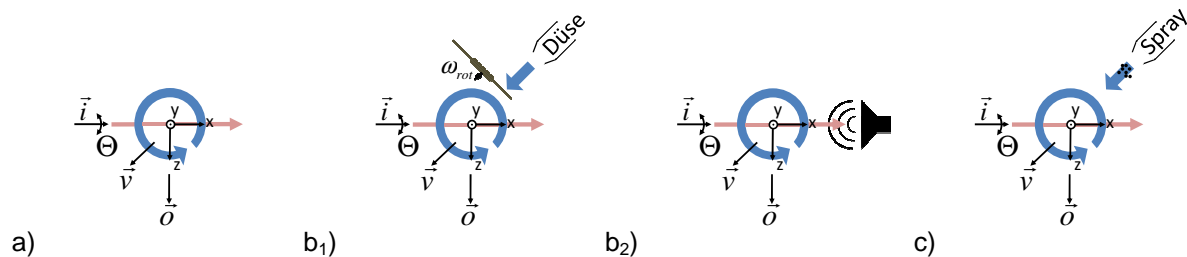


Abb. 5: Schematischer Aufbau Versuche.

Stationäre Strömungen

Bei der Untersuchung stationärer Prozesse, wie der flächigen und volumetrischen Vermessung einer Drallströmung liegt der Vorteil in der gleichzeitigen Erfassung einer Strömungsebene, wodurch sich der Traversieraufwand verringert und somit auch der Zeitaufwand im Vergleich zu einer konventionellen linienhaften Messung mit zusätzlicher mechanischer Traversierung. Beispielhaft für eine solche Messung ist die in Abb. 6 dargestellte räumliche Ausbreitung einer stationären Drallströmung. Dabei erzeugt ein Drallgenerator, der von einer Düse angeströmt wird, eine sich entlang der negativen y-Achse ausprägende Drallströmung (siehe Abb. 5a). Mit der sequenziellen Messung in 20 Höhen ist es möglich das einkomponentige volumetrische Strömungsfeld in Abb. 6a darzustellen. Mit zunehmendem Abstand von der Düse nimmt die Geschwindigkeit des Wirbels ab, was anhand der Verjüngung der Isoflächen in Abb. 6b deutlich erkennbar ist. Die Messzeit pro Ebene betrug 8 s, was zu einer Standardabweichung der Geschwindigkeit von 0,1 m/s führt (siehe Abb. 3).

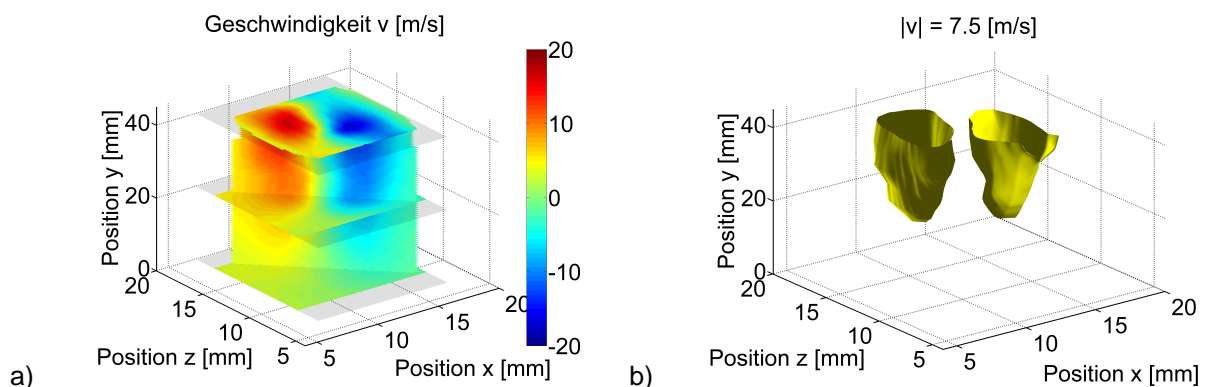


Abb. 6: Stationäre Drallströmung in a) verschiedenen Entfernungen von der Darstellung der Düse und b) als Isofläche für eine Geschwindigkeit von 7,5 m/s.

Quasistationäre Strömungen

Im Rahmen der Untersuchung periodischer Prozesse wurden die Oszillationen der Geschwindigkeit einer zyklisch-unterbrochenen Freistrahlsströmung, wie in Abb. 5b₁ dargestellt, erfasst. Dabei beeinflusst ein mit 16 Schaufeln bestückter Rotor bei einer Drehrate von 10 Hz die Strömung. Die erwartete Oszillation mit einer Frequenz von 160 Hz konnte mit ihren Oberwellen für Frequenzen bis 500 Hz aufgelöst werden. In Abb. 7 ist das zugehörige Amplitudenspektrum dargestellt.

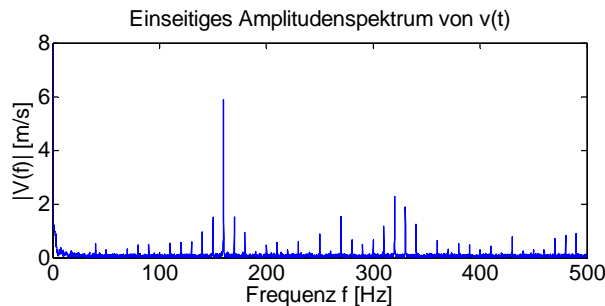


Abb. 7: Amplitudenspektrum der Geschwindigkeit für eine angeregte Strömungsozillation mit 160 Hz.

Ausgehend von der Kenntnis Strömungsozillationen mit Amplituden ab 0,1 m/s auflösen zu können (siehe Abb. 3), wurde die Wirkung von Schall auf eine Drallströmung untersucht. Haufe et al 2012 zeigten, dass die optische Messung der Schallschnelle mittels FM-DVG möglich ist. Die Amplituden der Oszillation liegen dabei jedoch in der Größenordnung 1 mm/s. Mithilfe des scannenden FM-DGV konnten schallangeregte Strömungsozillationen erfasst werden, deren Amplituden in der Größenordnung 0,1 m/s liegen. Dabei wurden Oszillationen in einer Drallströmung mittels Schall eingebracht (siehe Abb. 5b₂) und für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten der Strömung erfasst. Die Schallanregung erfolgte mit 200 Hz. In Abb. 8 ist die flächige Messung der mittleren Geschwindigkeit des Dralls und der gemessenen Oszillationsamplitude bei der Anregungsfrequenz dargestellt.

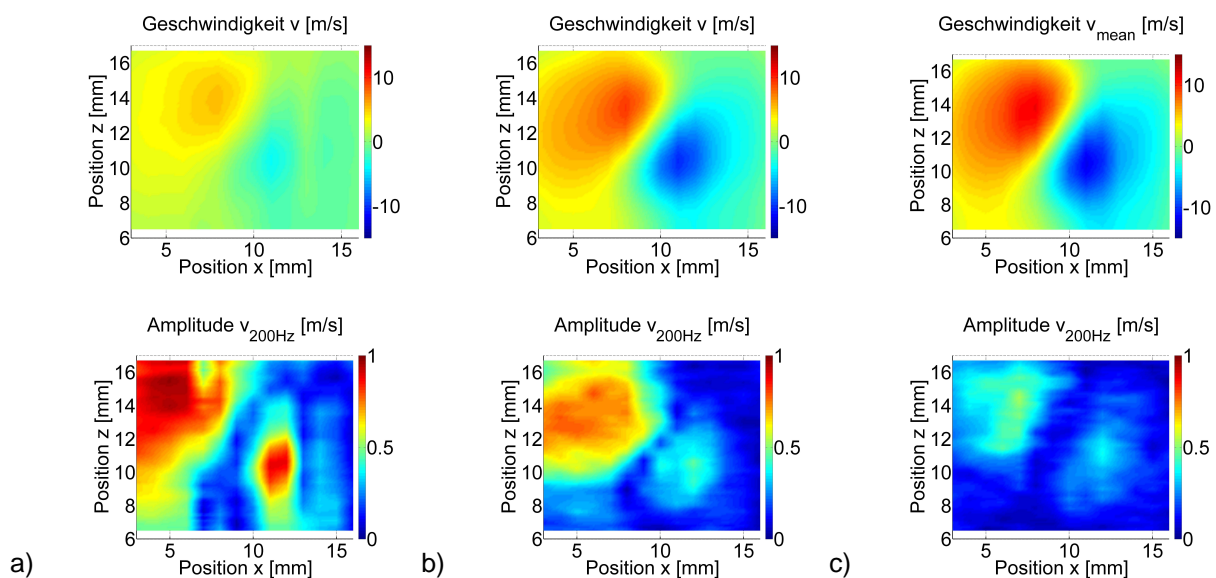


Abb. 8: Darstellung der mittleren Geschwindigkeit einer Drallströmung (oben) und der Amplitude der schallinduzierten Strömungsozillation (unten) für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten des Drallgenerators.

Die Messung zeigt, dass eine höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Wirbel die Strömung stabilisiert und somit die Amplitude der Oszillation dämpft. Ebenfalls ist es denkbar, dass sich bei höheren mittleren Strömungsgeschwindigkeiten die Oszillationen erst mit größerem Abstand von der Düse ausprägen.

Transiente Strömungen

Neuartig ist die Möglichkeit Strömungen flächig mit einer Messrate von 1 kHz zu erfassen und somit transiente Vorgänge zu vermessen. Dadurch eignet sich das Messverfahren für die Analyse von Prozessen, die nur begrenzt oder gar nicht wiederholbar sind, wie zum Beispiel Einspritzvorgänge und zufällige Strömungsphänomene. Beispielhaft dafür wurde das Strömungsgeschwindigkeitsprofil einer handelsüblichen Deo-Spraydose während eines Sprühstoßes zeitaufgelöst vermessen (Abb. 5c). Dabei konnten Schwankungen der Geschwindigkeit während des Sprühvorgangs und der Geschwindigkeitsabfall am Ende des Sprühstoßes mit einer Messrate von 1 kHz und einer Zeitauflösung von 1 ms vermessen werden. Die Messung erfolgte in einer Zweiphasenströmung direkt an den Tröpfchen des Sprays und ohne Hinzufügen zusätzlicher Seeding-Partikel. In Abb. 9 wird der Verlauf der mittleren Geschwindigkeit des rot markierten Bereichs sowie das Geschwindigkeitsfeld zu drei Zeitpunkten des Sprühvorgangs dargestellt. Während des Sprühstoßes schwankt die Geschwindigkeit um einen Mittelwert von 22 m/s bevor sie am Ende des Sprühvorgangs linear mit ca. -730 m/s^2 abfällt. Damit ist gezeigt, dass das scannende FM-DGV in der Lage ist transiente Strömungsphänomene zu erfassen.

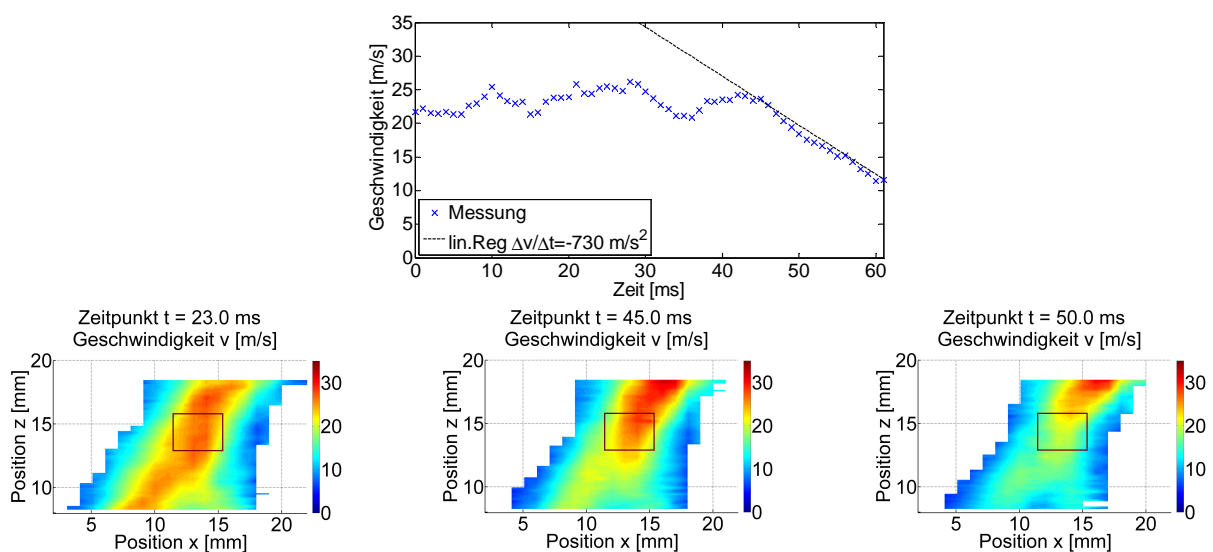


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der mittleren Geschwindigkeit vor einer Sprühdose (oben) und Momentaufnahmen des Geschwindigkeitsfelds zu ausgewählten Zeitpunkten (unten).

Zusammenfassung

Durch die Kombination von FM-DGV und einem Mikrospiegelscanner konnte unter Beibehaltung der Datenrate von 2,5 MPixel/s der Messbereich um eine räumliche Dimension erweitert werden (1d \rightarrow 2d). Die Messpunkanzahl vergrößerte sich von 1 x 25 auf 100 x 25, wobei die Messrate von 100 kHz auf 1 kHz sank. Die Messunsicherheit bleibt bei gleicher Belichtungszeit unverändert. Mit diesen Eigenschaften ist das scannende FM-DGV in Lage neben den bekannten Anwendungsgebieten der Vermessung stationärer und quasistationärer Prozesse auch transiente Vorgänge quasisimultan in einer Ebene zu erfassen. Beispielhaft für zukünftige Anwendungen, wie der flächigen Untersuchung von Einspritzvorgängen oder der

Messung der Schallschnelle, wurden schallinduzierte Strömungszusammenbrüche sowie die Partikelverbreitung vor einer Spraydose untersucht. Dank der geringen Größe des Mikrospeigelscanners (aktuell 20 mm x 14 mm x 6 mm) bietet der Einsatz des scannenden FM-DGV-Messverfahrens auch an schwer zugänglichen Orten zum Beispiel mittels eines Endoskops in einem Motor zur Untersuchung von Einspritzvorgängen vielversprechende Perspektiven.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Forschungsarbeit DFG-Cz55/22-1.

Literatur

Chu, H. M., Tokuda, T., Kimata, M., Hane, K., 2010: "Compact Low-Voltage Operation Micromirror Based on High-Vacuum Seal Technology Using Metal Can", IEEE J. MEMS, Vol.19, No. 4, pp. 927-935

Dingel, O., Seidel, T., Steuker, H., 2006: "Strömungsmessung während der Kompression mit Doppler Global Velocimetry", MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Vol. 67, No. 5, pp. 368-374

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, pp. 2529–2545

Fischer, A., König, J., Büttner, L., Czarske, J., Leitgeb, T., Woiseschläger, J., 2012: "Detektion von Flammeninstabilitäten mittels Mehrpunktmessung von Strömungsgeschwindigkeitsspektren", in Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Vol. 20, No. 44, pp. 1–10, Rostock

Fraunhofer IPMS, 2012: "USER MANUAL VarioS-Microscanner-Demonstrators"

Haufe, D., Schlüsler, R., Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., 2012: "Optical multi-point measurement of the acoustic particle velocity in a superposed flow using a spectroscopic laser technique", Measurement Science and Technology, 23, 085306 (8pp)

Menzel, F., Seidel, T., Schmidt, W., Pape, J., Stiegler, L., 2006: "Der IAV-Einzylindermotor als Werkzeug zur Entwicklung neuer Brennverfahren", MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Vol. 67, No. 3, pp. 168-173

Müller, H., Eggert, M., Czarske, J., Büttner, L., Fischer, A., 2007: "Single-camera Doppler global velocimetry based on frequency modulation techniques", Experiments in Fluids, 43, pp. 223-232

Müller, S. H. R., Böhm, B., Gleißner, M., Grzeszik, R., Arndt, S., Dreizler, A., 2010: "Flow field measurements in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV", Exp. Fluids, DOI 10.1007/s00348-009-0742-2, 48, pp. 281–290

Ruck, B., Schmitt, F., 1986: "Laserlichtschnittverfahren zur qualitativen Strömungsanalyse", Laser und Optoelektronik, Vol. 2, 1986.

Sandner, T., Schenk, H., Drabe C., 2011: "Application specific Micro Scanning Mirrors", in Fachtagung "SENSOR+TEST Conferences 2011", Proceedings SENSOR 2011, B7 – Actuators, pp. 337 – 342, Nürnberg

Tortschanoff, A., Lenzhofer, M., Frank, A., Wildenhain, M., Sandner, T., Schenk, H., Scherf, W., Kenda, A., 2010: "Position encoding and phase control of resonant MOEMS mirrors", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 162, No. 2, pp 235-240

Wolter, A.; Hsu, S.-T.; Schenk, H.; Lakner, H. K., 2005: "Applications and requirements for MEMS scanner mirrors", in Fachtagung "MOEMS and Miniaturized Systems V", Proceedings SPIE 2005, 5719, pp. 64-75