Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"
7.–9. September 2021, Bremen

Systematischer Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf stereo- und tomo-PIV in Flammen

Systematic influence of inhomogeneous refractive index fields on stereo- and tomo-PIV in flames

C. Vanselow[1], D. Stöbener[1,2], A. Fischer[1,2]
[1]Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen
[2]Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes

PIV, Messunsicherheit, Brechungsindex
PIV, measurement uncertainty, refractive index

Zusammenfassung

Particle Image Velocimetry (PIV)-Messungen in reaktiven Strömungen werden durch inhomogene Brechungsindexfelder gestört, die aufgrund von Lichtbrechungen Abweichungen bei der für die Geschwindigkeitsbestimmung erforderlichen Messung der Partikelpositionen verursachen. In diesem Artikel werden die resultierenden Geschwindigkeitsabweichungen für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen in ausgewählten, vorgemischten Propanflammen quantifiziert. Die Quantifizierung erfolgt über die Messung der zeitgemittelten inhomogenen Brechungsindexfelder mit der Background-Oriented-Schlieren (BOS)-Technik und die anschließende Bestimmung der resultierenden Positionsabweichungen für die Kamerabilder von PIV-Messungen mittels Ray-Tracing. Die Positionsabweichungen verursachen signifikante stereoskopische PIV-Messabweichungen von 3 % für die in-plane Geschwindigkeitskomponente und 13 % für die out-of-plane-Komponente. Für tomographische Messungen werden resultierende Messabweichungen durch die volumetrische Selbstkalibrierung auf ein nicht relevantes Maß reduziert.

Einleitung

Optische Strömungsfeldmessungen sind unverzichtbar für die Verbrennungsdiagnostik und ermöglichen eine effiziente Auslegung von technischen Verbrennungsprozessen im Hinblick auf eine Reduzierung des Brennstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen, siehe Ruan et al. 2019, Docquier und Candel 2002. PIV-Messungen werden jedoch durch Lichtbrechungen gestört, die durch inhomogene Brechungsindexfelder von Verbrennungsströmungen verursacht werden, siehe Raffel und Kost 1998.

Die Messabweichungen aufgrund von inhomogenen Brechungsindexfeldern wurden für monoskopische, stereoskopische und tomographische PIV-Messungen theoretisch untersucht, siehe Vanselow und Fischer 2018. Darauf fußende Abschätzungen für das gemessene inhomogene Brechungsindexfeld einer heißen Düsenströmung zeigten höhere Messabweichungen für stereoskopisches und tomografisches PIV im Vergleich zu monoskopischen Messungen. Allerdings wurde hierbei der Einfluss der volumetrischen Selbstkalibrierungsmethode noch nicht berücksichtigt. Bei der Untersuchung von Flammenströmungen erfolgte von

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Stella et al. 2001 eine erste qualitative Abschätzung der resultierenden PIV-Messabweichungen. Zum einen treten Ablenkungen des Laserlichtschnitts auf, was aber in Flammenströmungen im Labormaßstab vernachlässigbar ist. Darüber hinaus resultieren Messabweichungen der Partikelpositionen durch verzerrte und unscharfe Partikelabbildungen. Der Einfluss von Partikelpositionsabweichungen kann vernachlässigt werden, wenn die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Laserpulsen kürzer als die charakteristische Zeit für eine signifikante Flammenfrontänderung ist. Der Einfluss der Partikelbewegung innerhalb des gekrümmten Brechungsindexfeldes der Flamme wurde hierbei nicht berücksichtigt. Von Schlüßler et al. 2014 wurde dann der Einfluss fluktuierender Brechungsindexfelder am Beispiel einer turbulenten Flamme und eines mit Öltropfen kontaminierten Fensters auf die PIV-Messung einer Düsenströmung analysiert. Allerdings wurde dabei lediglich der Störeinfluss im optischen Pfad zwischen Kamera und Düsenströmung untersucht, weshalb die Ergebnisse nicht auf Messungen mit einer Messebene innerhalb der Flamme übertragen werden können. Die erste direkte Quantifizierung der Messabweichungen bei monoskopischem PIV aufgrund von Lichtbrechung in einer Verbrennungsströmung wurde von Vanselow et al. 2019 mit einem Messansatz durchgeführt, der auf der Einbringung eines Referenzobjekts basiert. Innerhalb einer Propanflamme mit einem Äquivalenzverhältnis von 2,4 ergaben sich eine maximale systematische Messabweichung von 4 % und eine zufällige Abweichung mit einer Standardabweichung von 6 %. Die quantifizierten Messabweichungen sind jedoch spezifisch für die untersuchte Flammenkonfiguration, und die Quantifizierung der brechungsindexinduzierten Messabweichung für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen in Flammenströmungen ist weiterhin offen.

Deshalb sollen im vorliegenden Artikel die durch Lichtbrechung verursachten Messabweichungen in Verbrennungsströmungen mit unterschiedlicher Reynoldszahl für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen quantifiziert werden. Zur Messung des inhomogenen Brechungsindexfelds innerhalb der Flammen wird das Background-Oriented-Schlieren (BOS)-Verfahren verwendet und die resultierenden systematischen Partikelpositionsabweichungen werden mittels Ray-Tracing-Simulationen berechnet. Dabei wird auch die volumetrische Selbstkalibrierungsmethode hinsichtlich verbleibender Positionsabweichungen bei der tomographischen Rekonstruktion untersucht. Basierend auf den Positionsabweichungen und den mittels stereoskopischer PIV gemessenen Geschwindigkeitsfeldern innerhalb der Flammenströmungen werden die resultierenden systematischen Geschwindigkeitsmessabweichungen berechnet.

Messansatz

Um die brechungsindexinduzierten PIV-Messabweichungen zu quantifizieren, werden zunächst die Positionsabweichungen in den Partikelbildern durch die Messung der zeitgemittelten Brechungsindexfelder der Flammen mittels BOS und anschließenden Ray-Tracing-Simulationen bestimmt. Die BOS-Technik misst die Ablenkung von Lichtstrahlen, die sich durch das inhomogene Brechungsindexfeld des Messobjekts ausbreiten. Da es sich um eine Sichtlinienmessung handelt, ist die Rekonstruktion des dreidimensionalen Brechungsindexfeldes mit einer Kamerablickrichtung nur mit Symmetrieannahmen möglich. Daher findet ein achsensymmetrischer Brenner Verwendung, um eine achsensymmetrische Verteilung der zeitgemittelten Brechungsindexfelder zu erhalten. Die Abel-Inversion, in der diskreten Formulierung von Ma et al. 2008, wird dann angewendet, um die dreidimensionalen Brechungsindexfelder der Flammenströme zu rekonstruieren.

Basierend auf den zeitgemittelten inhomogenen Brechungsindexfeldern werden mittels Ray-Tracing die resultierenden systematischen Partikelpositionsabweichungen $\vec{\xi}$ für die einzelnen

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry

GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Kameras simuliert. Die simulierten Positionsabweichungen für die Kameras werden dann auf die Geschwindigkeitsabweichung von stereoskopischen PIV-Messungen fortgepflanzt.

Typischerweise wird für tomographische PIV-Messungen die volumetrische Selbstkalibrierungsmethode angewendet und muss daher für die tomographische Rekonstruktion der Partikelverteilung berücksichtigt werden. Für diese tomographische Rekonstruktion ist ein Schnittpunkt der Sichtlinien aus den Partikelabbildungen notwendig. Die auftretende Lichtbrechung führt zu gekrümmten Sichtlinien und damit zu Positionsabweichungen der Partikelabbildungen. Daraus resultieren Unsicherheiten der rekonstruierten Partikelpositionen oder sogar eine Verhinderung von sich schneidenden Linien. Disparitäten sind ein Maß für verbleibende Abweichungen bei der Partikelpositionsrekonstruktion aufgrund nicht exakt schneidender Sichtlinien, und damit ein Maß für die Rekonstruktionsgüte. Sie nehmen bei Messungen unter dem Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern zu, siehe Boxx et al. 2014. Die tomographische Selbstkalibrierungsmethode adressiert dieses Problem, indem die Kalibrierungsparameter für genaue Schnittpunkte bei der Rekonstruktion optimiert werden. Dazu werden simultan aufgenommene Partikelbilder verwendet und die Disparitätskarten $\vec{d}_i(\vec{r})$ für die Kameras $i = 1,2,\ldots,N_\mathrm{K}$ durch die Minimierung der Summe der Positionsabweichungen $\vec{\xi}_i$ einzelner Partikel für die unterschiedlichen Kameraperspektiven $\sum_{i=1}^{N_\mathrm{K}} |\vec{\xi}_i|$ bestimmt. Dabei ist N_K die Anzahl der verwendeten Kameras. Um verbleibende Positionsabweichungen für tomographische PIV-Messungen zu bestimmen, werden für das Minimierungsproblem die Positionsabweichungen für die Kameraperspektiven mittels Ray-Tracing simuliert und die verbleibende systematische Positionsabweichungen $\vec{\xi}_\mathrm{tomo}$ quantifiziert.

Mittels Fortpflanzungsrechnung werden anschließend die durch die Positionsabweichungen resultierenden Geschwindigkeitsabweichungen für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen innerhalb der untersuchten Flammenströmungen ermittelt. Dafür ist die Kenntnis des Strömungsgeschwindigkeitsfelds $\vec{v}$ notwendig, welches mittels stereoskopischer PIV-Messungen bestimmt wird. Die verursachten Geschwindigkeitsabweichungen Δv_i in Richtung $i = x, y$ werden nach Elsinga et al. 2005 bestimmt durch

$$\Delta v_i = (\nabla_\mathrm{i} \xi_\mathrm{i}) v_i - (\nabla_\mathrm{i} \mathrm{v}_\mathrm{i}) \xi_i. \qquad (1)$$

Diese Gleichung lässt sich direkt für die Berechnung der tomographischen PIV-Abweichungen auf Basis der Positionsabweichungen $\vec{\xi}_\mathrm{tomo}$ verwenden. Die Gleichung (1) berechnet ebenfalls die Geschwindigkeitsabweichungen $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ für die beiden Kameraperspektiven bei stereoskopischen Messungen, wobei dafür die jeweiligen mittels Ray-Tracing bestimmten Positionsabweichungen für die jeweilige Kamerablickrichtung verwendet werden. Basierend auf den geometrischen Beziehungen berechnen sich die resultierenden stereoskopischen Messabweichungen gemäß

$$\Delta v_x = s_{x,1} \Delta v_{x,1} + s_{x,2} \Delta v_{x,2} \qquad (2)$$
$$\Delta v_y = s_{y,1} \Delta v_{y,1} + s_{y,2} \Delta v_{y,2} \qquad (3)$$
$$\Delta v_z = s_{z,1} \Delta v_{x,1} + s_{z,2} \Delta v_{x,2}, \qquad (4)$$

wobei $\vec{s}_x = \left(\frac{-\tan\alpha_2}{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2}, \frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2}\right)$, $\vec{s}_y = \left(\frac{-\tan\beta_2}{\tan\beta_1 - \tan\beta_2}, \frac{\tan\beta_1}{\tan\beta_1 - \tan\beta_2}\right)$ und $\vec{s}_z = \left(\frac{-1}{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2}, \frac{1}{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2}\right)$ die Sensitivitätsfaktoren für die Geschwindigkeitsabweichungen für die einzelnen Kameraperspektiven sind, siehe Vanselow und Fischer 2018. Die Symbole $\alpha_{1,2}$ und $\beta_{1,2}$ kennzeichnen die Beobachtungswinkel zwischen den Blickrichtungen der Kameras und der Normalen der Messebene in der z, x-Ebene bzw. der z, y-Ebene. Die Indizes 1 und 2 bezeichnen die Kamera 1 und die Kamera 2 des stereoskopischen PIV-Aufbaus.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Somit lassen sich mit Gleichung (1) die Geschwindigkeitsabweichungen für tomographisches PIV und mit Gleichungen (2) bis (4) für stereoskopisches PIV quantifizieren.

Messaufbau

Die BOS- und stereoskopischen PIV-Messungen werden auf verschiedene vorgemischte Propanflammen angewendet. Für die Erzeugung der Flammen wird ein achsensymmetrischer Brenner verwendet, um im Mittel achsensymmetrische Flammen zu erzeugen. Die Mischkammer des Brenners ist mit Kugeln gefüllt, um ein homogenes Gemisch zu erhalten. Der Auslass wird durch ein Rohr mit einem Durchmesser von 41,8 mm und einer Länge von 300 mm gebildet. Die verwendeten Volumenströme und die daraus resultierenden Reynoldszahlen sind für ein Äquivalenzverhältnis von $\phi = 2{,}4$ in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Luft- und Propan-Volumenströme in L/min und die Reynoldszahlen für die untersuchten Flammenkonfigurationen.

Luft	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0
Propan	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0
Re	100	200	300	500	700	1000

BOS-Messung: Die BOS-Messung wird mit einer sCMOS-Kamera (5,5 Mpx) und einem 50 mm Brennweitenobjektiv mit einer Blendenzahl von f/16 durchgeführt. Das Hintergrundbild befindet sich z_{HG} =75,1 cm hinter dem Brenner und der Abstand zwischen der Kamera und dem Brenner beträgt 98,6 cm, woraus eine räumliche Auflösung von 280 µm resultiert. Das Hintergrundmuster wird mit dem Partikelbildgenerator der Software PIVlab erzeugt und von acht Hochleistungs-LEDs mit einer mittleren Wellenlänge von 532 nm beleuchtet. Die Kamerabilder werden mit einer Belichtungszeit von 10 ms aufgenommen.

PIV-Messung: Die zeitgemittelten Geschwindigkeitsfelder der Flammen werden mit stereoskopischen PIV-Messungen ermittelt. Der Lichtschnitt (Dicke ca. 1,5 mm) wird mit einem gepulsten Laser mit einer Pulslänge von 10 ns und einer Pulsenergie von 200 mJ erzeugt. Die sCMOS-Kameras (5.5 Mpx) messen die Partikelbewegung innerhalb der Lichtschnittebene bei $z = 0$ mit Beobachtungswinkeln von $\alpha_{1,2} = \pm 32\,°$. Für die Kameras werden Objektive mit einer Brennweite von 50 mm und einer Blendenzahl von f/16 verwendet. Die resultierende projizierte Pixelgröße beträgt 48 µm. Die Abbildung der verwendeten Titandioxid-Seeding-Partikel mit einem Durchmesser von 0,4 µm führt zu einer beugungsbegrenzten Partikelbildgröße von 3,5 px.

Messergebnisse

Für die untersuchten Flammen werden die Partikelpositionsabweichungen durch BOS und Ray-Tracing bestimmt, was im Abschnitt *Positionsabweichung* gezeigt wird. Hier wird auch die Performance der volumetrischen Selbstkalibrierungsmethode hinsichtlich der verbleibenden Positionsabweichung für die tomographische Rekonstruktion analysiert. Die resultierenden systematischen stereoskopischen und tomographischen PIV-Messabweichungen, die durch die Positionsabweichungen verursacht werden, werden im Abschnitt *Geschwindigkeitsabweichung* abgeschätzt.

Positionsabweichung

Basierend auf den rekonstruierten Brechungsindexfeldern werden Ray-Tracing-Simulationen durchgeführt, um die durch Bildverzerrungen verursachten Positionsabweichungen für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen zu quantifizieren. Die simulierten Positionsabweichungen für den stereoskopischen PIV-Aufbau sind in Abb. 1a gezeigt. Dabei sind nur die Positionsabweichungen einer Kamerablickrichtung dargestellt, da die Positionsab-

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry

GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

weichungen für die zweite Kamerablickrichtung abgesehen vom Vorzeichen qualitativ achsensymmetrisch zur y-Achse sind. Die Beträge der maximalen Positionsabweichungen befinden sich im Bereich der Reaktionszone bei $x/D \approx \pm 0{,}5$ und nehmen bei größeren Reynoldszahlen zu. Der maximale Betrag der Positionsabweichungen für den stereoskopischen Aufbau beträgt 34 µm. Die geneigte Blickrichtung des stereoskopischen Aufbaus führt zu asymmetrischen Positionsabweichungen bezüglich der y-Achse.

Um die verbleibenden Positionsabweichungen für tomographische PIV-Messungen in den untersuchten Flammenströmungen zu quantifizieren, werden vier Kameras mit Beobachtungswinkeln von -22,5°; -7,5°; 7,5° und 22,5° sowie perfekte Kalibrierungsparameter für den ungestörten Fall ohne Brechungsindexfeld angenommen. Für jede Kameraperspektive werden die resultierenden Positionsabweichungen aufgrund von Lichtbrechung durch Ray-Tracing simuliert und die entsprechenden Disparitätskarten mit dem Minimierungsverfahren der Selbstkalibrierungsmethode berechnet. Die verbleibenden Positionsabweichungen ξ_x in x-Richtung und ξ_z in z-Richtung der tomographischen Rekonstruktion für die Messebene bei y =3.9 cm oberhalb des Brennerauslasses sind in Abb. 1b und 1c gezeigt. Die Strukturen der verbleibenden Positionsabweichungen sind komplex und die Positionsabweichungen in ξ_x in x-Richtung sind um den Faktor zwei größer als in z-Richtung. In der Hauptblickrichtung der Kameras nehmen die verbleibenden Positionsabweichungen generell mit der Reynoldszahl zu. Insgesamt verbessert die volumetrische Selbstkalibrierungsmethode die Partikelrekonstruktion durch die Minimierung der Disparitäten. Beim Vergleich zwischen den Positionsabweichungen für die einzelne Kamerablickrichtung aus Abb. 1a) und den verbleibenden Positionsabweichungen nach der volumetrischen Selbstkalibrierung aus Abb. 1b) und c) wird eine Reduktion der verbleibenden Positionsabweichungen bei tomographischen Messungen deutlich. Für eine ideale Korrektur der Brechungsindexeinflüsse muss jedoch bei der Partikelrekonstruktion das inhomogene Brechungsindexfeld berücksichtigt werden.

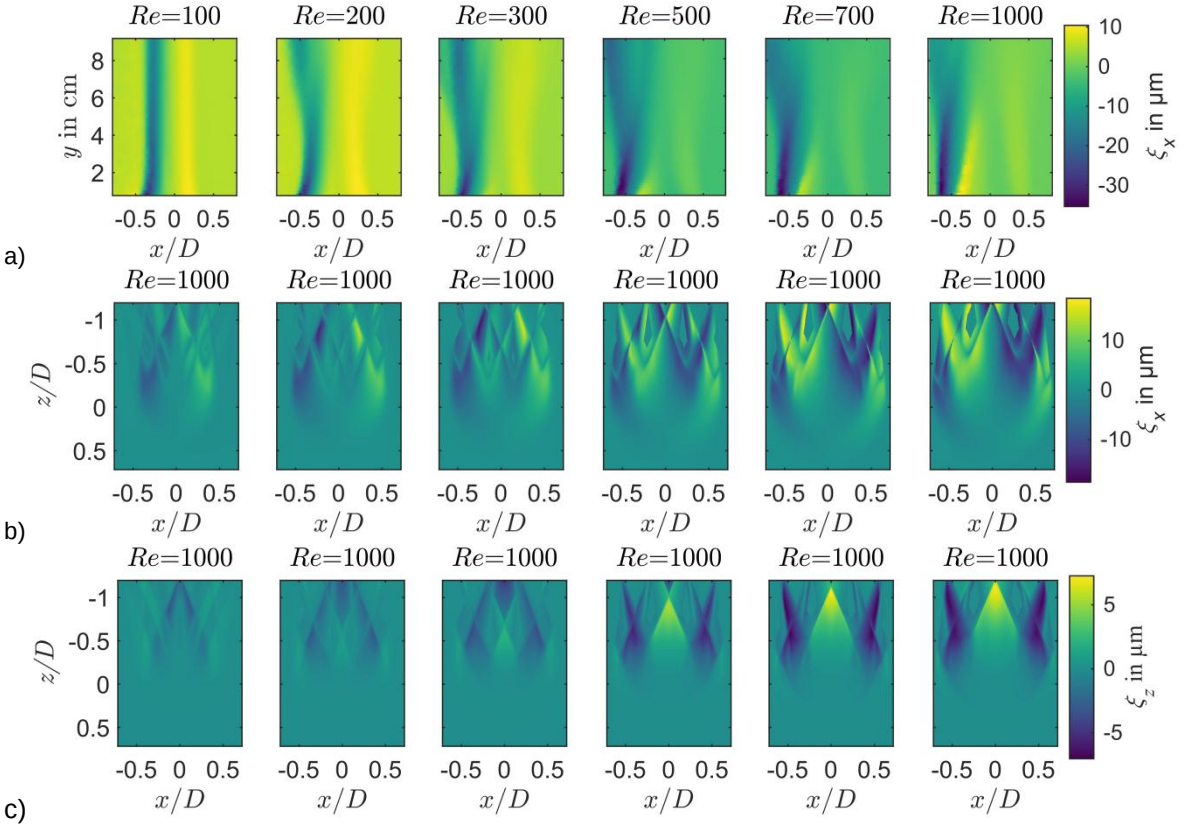

Abbildung 1: Positionsabweichung in x-Richtung für a) stereoskopische und b) tomographische PIV-Messungen und c) in z-Richtung für tomographische PIV-Messungen.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Geschwindigkeitsabweichung

Die ermittelten Positionsabweichungen der Partikel verursachen Messabweichungen der gemessenen Geschwindigkeitsfelder. Die Geschwindigkeitsabweichungen, wie sie im Abschnitt *Messansatz* beschrieben sind, hängen auch vom gemessenen Geschwindigkeitsfeld ab. Die drei Komponenten der mittels stereoskopischer PIV gemessenen zeitgemittelten Strömungsfelder sind in Abb. 2 gezeigt, wobei die x- und y-Komponenten als Pfeile und die z-Komponente farbskaliert dargestellt sind. Die Strömungsfelder basieren auf 500 Einzelmessungen, die durch einen kommerziellen iterativen PIV-Auswertealgorithmus mit einer adaptiven Auswertefenstergröße ausgewertet werden. Die minimale Auswertefenstergröße ist auf 32x32 px² mit einer Schrittweite von 16 px festgelegt. Um den Einfluss der Lichtemissionen der Flamme zu reduzieren, wird ein gleitendes Minimum von den Partikel-Rohbildern subtrahiert. Die Validierung des Geschwindigkeitsvektors erfolgt durch Anwendung eines minimalen Korrelationsmaximumsverhältnisses zwischen den beiden höchsten Korrelationsmaxima von mindestens 1,4 und eines Filters mit gleitendem Mittelwert auf die ermittelten Geschwindigkeitsfelder. Die Partikelbilder wurden mit einer Wiederholrate von 15 Hz und einem zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Laserpulsen von 100 ms aufgenommen. Die out-of-plane-Geschwindigkeitskomponente v_z ist im Vergleich zu den in-plane-Komponenten geringer, da die Messebene durch die Symmetrieachse der Strömung ohne Drall verläuft.

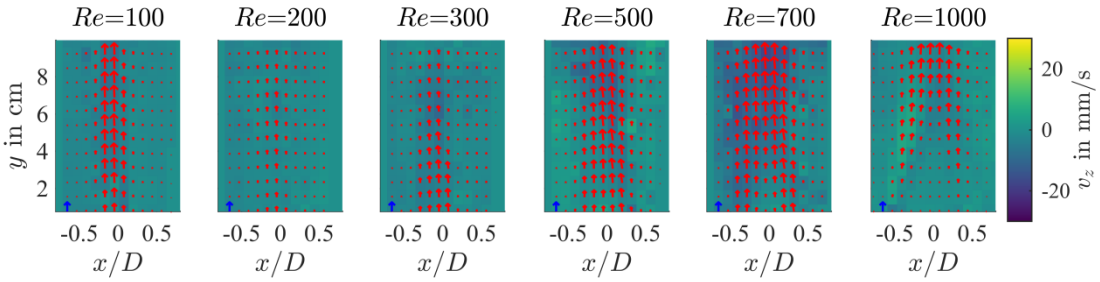

Abbildung 2: Mittels stereoskopischer PIV gemessene Geschwindigkeitsfelder in den untersuchten Flammenströmungen. Die blauen Pfeile repräsentieren eine Geschwindigkeit von 0,2 m/s.

In Abb. 3a und 3b sind die berechneten Geschwindigkeitsabweichungen für die stereoskopische PIV-Konfiguration gezeigt. Die Geschwindigkeitsabweichungen in y-Richtung sind nicht dargestellt, da diese vergleichsweise klein und damit nicht relevant sind. Der PIV-Auswertealgorithmus basiert auf Auswertefenstern mit einer Größe von 32x32 px², was prinzipiell zu einem Mittelungseffekt des Einflusses der ermittelten Positionsabweichungen der Partikel führt. Jedoch resultiert durch die örtliche Auflösung der BOS-Messung eine höhere Mittelung der simulierten Positionsabweichungen, was zu einer Überkompensierung dieses Effektes führt. Die maximalen Geschwindigkeitsabweichungsbeträge für die stereoskopischen PIV-Messungen befinden sich im Bereich der Flammenfront. In diesem Bereich sind auch die Positionsabweichungen maximal. Die Geschwindigkeitsabweichungen betragen bis zu 0,7 mm/s für die x-Richtung und 0,9 mm/s für die z-Richtung. Die Ergebnisse zeigen, dass die stereoskopischen PIV-Messabweichungen für die out-of-plane Geschwindigkeitskomponente höher sind als für die in-plane-Komponente, was durch die unterschiedlichen Empfindlichkeitskoeffizienten von $\vec{s}_x$ =(0,5;0,5) und $\vec{s}_z$ =(-0,8;0,8) bedingt ist. Der Unterschied zwischen den Empfindlichkeitskoeffizienten hängt von den Blickrichtungen der Kameras ab. Vernachlässigt man Geschwindigkeitswerte in x- und z-Richtung unterhalb von 0,5 cm/s, beträgt die maximale relative Geschwindigkeitsabweichung 3 % in x-Richtung und 13 % in z-Richtung. Der Trend zu größeren Positionsabweichungen bei größeren Volumenströmen gilt auch für die Geschwindigkeitsabweichungen. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den typischen Messabweichungen für stereoskopisches PIV von etwa 1 % bis 2 % für die

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

in-plane und 3 % bis 4 % für die out-of-plane Komponente, siehe Lawson und Wu 1997, können die resultierenden Messabweichungen, die durch Lichtbrechung innerhalb von Flammenströmungen verursacht werden, den dominanten Beitrag zum Budget der Messunsicherheit liefern.

Um die verbleibenden tomographischen PIV-Messabweichungen nach Anwendung der volumetrischen Selbstkalibrierung abzuschätzen, wird ein zylindersymmetrisches Geschwindigkeitsfeld angenommen und in der Messebene bei y = 3,9 cm oberhalb des Brenneraus-lasses mittels radialsymmetrischer Verteilung der im Lichtschnitt gemessenen x-Komponente angenähert. Zusammen mit den verbleibenden Positionsabweichungen lassen sich nach Gleichung (1) die resultierenden tomographischen PIV-Messabweichungen berechnen, welche in Abb. 3c und 3d gezeigt sind. Mit steigender Reynoldszahl ergeben sich höhere Messabweichungen, die für die x-Komponente eine Größenordnung höher ausfallen als für die z-Komponente. Als relative Abweichung verbleiben dabei 1-2 % für die x- und 0,2 % für die z-Komponente, was für die untersuchten Strömungen als nicht relevant eingestuft wird.

Abbildung 3: Systematische PIV-Messabweichung für a) die x-Komponente und b) die z-Komponente bei stereoskopischen und c) die x-Komponente und d) die z-Komponente bei tomographischen PIV-Messungen

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Zusammenfassung

Die auftretenden Lichtbrechungen bei stereoskopischen und tomographischen PIV-Messungen wurden mithilfe von Ray-Tracing basierend auf dem mittels BOS gemessenen zeitgemittelten Brechungsindexfeld bestimmt. Durch die Fortpflanzung der resultierenden Positionsabweichungen auf die gemessenen Geschwindigkeiten wurden die verursachten systematischen PIV-Messabweichungen abgeschätzt. Bei den untersuchten Flammenströmungen mit Reynoldszahlen zwischen 100 und 1000 treten bei stereoskopischen PIV-Messungen Messabweichungen von 3 % für die in-plane und 13 % für die out-of-plane Geschwindigkeitskomponente auf. Durch die Anwendung der volumetrischen Selbstkalibrierungsmethode können die Positionsabweichungen bei der tomographischen PIV besonders in Hauptblickrichtung der Kameras reduziert werden. Die verbleibenden Geschwindigkeitsabweichungen erreichen 1-2 % und 0,2 % für die Komponenten senkrecht zur und in Hauptblickrichtung der Kameras. Somit ist, im Gegensatz zu tomographischen PIV-Messungen, bei stereoskopischen PIV-Messungen in vergleichbaren Flammenströmungen mit dominanten systematischen Messabweichungen aufgrund der inhomogenen Brechungsindexfelder zu rechnen.

Dankesworte

Die wissenschaftliche Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit der Projektnummer Fi.1989/4-1.

Literatur

Boxx, I., Carter, C. D., Meier, W. 2014: “On the feasibility of tomographic-PIV with low pulse energy illumination in a lifted turbulent jet flame”, Experiments in Fluids, 55(8).

Docquier, N., Candel, S. 2002: “Combustion control and sensors: a review”, Progress in Energy and Combustion Science, 28(2):107–150.

Elsinga, G. E., van Oudheusden, B. W., Scarano, F. 2005: “Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV”, Experiments in Fluids, 39(2):246–256.

Lawson, N. J. and Wu, J. 1997: “Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system”, Measurement Science and Technology, 8(12):1455–1464.

Ma, S., Gao, H., Wu, L. 2008: “Modified Fourier-Hankel method based on analysis of errors in Abel inversion using Fourier transform techniques”, Applied Optics, 47(9):1350.

Raffel, M., Kost, F. 1998: “Investigation of aerodynamic effects of coolant ejection at the trailing edge of a turbine blade model by PIV and pressure measurements”, Experiments in Fluids, 24(5-6):447–461.

Ruan, C., Chen, F., Cai, W., Qian, Y., Yu, L., Lu, X. 2019: “Principles of non-intrusive diagnostic techniques and their applications for fundamental studies of combustion instabilities in gas turbine combustors: A brief review”, Aerospace Science and Technology, 84:585–603.

Schlüßler, R., Czarske, J., Fischer, A. 2014: “Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations”, Optics and Lasers in Engineering, 54:93–104.

Sharma, A., Kumar, D. V., Ghatak, A. K. 1982: “Tracing rays through graded-index media: a new method”, Applied Optics, 21(6):984–987.

Stella, A., Guj, G., Kompenhans, J., Raffel, M., Richard, H. 2001: „Application of particle image velocimetry to combusting flows: design considerations and uncertainty assessment”, Experiments in Fluids, 30(2):167–180.

Vanselow, C., Fischer, A. 2018: “Influence of inhomogeneous refractive index fields on particle image velocimetry”; Optics and Lasers in Engineering, 107:221–230.

Vanselow, C., Stöbener, D., Kiefer, J., Fischer, A. 2019: “Particle image velocimetry in refractive index fields of combustion flows”, Experiments in Fluids, 60(10):149.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1