

Messunsicherheit von PIV-Messungen durch Brechungsindexfelder in Flammen

Measurement uncertainty for PIV measurements by refractive index fields in flames

Christoph Vanselow¹, Dirk Stöbener^{1,3}, Johannes Kiefer^{2,3}, Andreas Fischer^{1,3}

¹Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str. 13 28359 Bremen

²Universität Bremen, Technische Thermodynamik, Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen

³Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes

Particle Image Velocimetry, Brechungsindex, Messunsicherheit, Flammenströmungen
Particle Image Velocimetry, refractive index, measurement uncertainty, flame flows

Zusammenfassung

Optische Messungen in reaktiven Strömungen werden oft durch Brechungsindexfelder gestört, z. B. durch hohe Dichtegradienten in Flammen. Obwohl resultierende Messabweichungen durch Lichtbrechung für bestimmte Anwendungen der Particle Image Velocimetrie (PIV) ein bekanntes Problem sind, wurde bisher nur eine qualitative Analyse der resultierenden Messunsicherheit innerhalb von Flammenströmung durchgeführt. Daher wird eine experimentelle Methode vorgeschlagen, die brechungsindexbedingte Messabweichungen innerhalb von Flammenströmungen quantifiziert. Die experimentelle Methode wird exemplarisch an einer vorgemischten Propanflamme durchgeführt. Die Unsicherheitsanalyse basiert auf der Bestimmung von auftretenden Partikelpositionsabweichungen durch Lichtbrechung innerhalb der Flamme. Das Geschwindigkeitsfeld der Flamme wird mittels PIV gemessen und die Partikelpositionsabweichungen experimentell bestimmt. In der untersuchten Strömung betragen die Positionsabweichungen bis 14 μm und ergeben signifikante systematische Geschwindigkeitsabweichungen von maximal 4,5% und zufällige Geschwindigkeitsabweichungen von 5,5%.

Einleitung

Die Particle Image Velocimetrie (PIV) ermöglicht optische Messungen von Strömungsgeschwindigkeitsfeldern, die für die Verbrennungsdiagnostik unerlässlich sind [10, 4]. Die typische PIV-Messunsicherheit liegt bei ca. 1-2% [14, 13] und wird zum Beispiel durch Photonenstreuung [3] und andere Intensitätsschwankungen der Partikelbilder [6] verursacht. Insbesondere bei PIV-Messungen in Verbrennungsprozessen wird die Messung zusätzlich durch inhomogene Brechungsindexfelder gestört, die Lichtstrahlableitungen im Beleuchtungspfad und im Streulichtpfad vom Partikel zur Kamera verursachen. Dies führt zu Partikelbildverzerrungen und damit zu Messabweichungen im Allgemeinen.

Brechungsindexfelder hängen von der Dichteverteilung der optischen Medien ab, welche durch Temperatur- und Druckfelder beeinflusst wird. Darüber hinaus hängt das Brechungsindexfeld bei Messungen in reaktiven oder mehrphasigen Fluiden (z.B. Flammen, Aerosole und Sprays) auch von der Verteilung und dem Aggregatzustand der einzelnen Fluide ab. Da das Brechungsindexfeld von mehreren Parametern abhängt, ist eine Messung des Brechungsindexfeldes selbst oder die daraus resultierende Lichtbrechung oft die Methode der Wahl für eine Quantifizierung der resultierenden PIV-Messunsicherheit.

Eine indirekte Messung des Brechungsindexfeldes einer heißen Düsenströmung kann durch eine Temperaturfeldmessung erreicht werden, wie kürzlich mit einem Thermoelement gezeigt wurde [12]. Die resultierende PIV-Messunsicherheit innerhalb der Strömung wurde durch die Bestimmung der resultierenden Partikelpositionsabweichung innerhalb der Strömung mittels Ray-Tracing-Simulationen abgeschätzt. Weiterhin wurde die Abhängigkeit von der Kameraperspektive und der daraus resultierenden Triangulationsabweichung analysiert, um die Messabweichungen auch für stereoskopische und tomographische PIV abzuschätzen. Die Geschwindigkeitsabweichung im mittleren Strömungsfeld der untersuchten, heißen Düsenströmung mit einer maximalen Temperatur von 191 °C führt nicht zu einer signifikanten Messunsicherheit, jedoch können die Temperaturen in Flammen um eine Größenordnung höher sein. Somit sind innerhalb von Flammenströmungen höhere Messabweichungen zu erwarten.

Eine indirekte Messung der resultierenden Partikelpositionsabweichungen innerhalb einer Überschallströmung wurde mit der Background Oriented Schlieren (BOS)-Technik unter der Annahme eines konstanten Gradienten des Brechungsindexfeldes in Beobachtungsrichtung der Kamera durchgeführt, um die resultierende PIV-Messabweichung von etwa 2-3% zu korrigieren [2]. Die BOS-Technik ist ein Sichtlinienverfahren, bei dem die resultierende Lichtablenkung entlang des optischen Pfades durch das Brechungsindexfeld integriert wird. Daher ist die Standard BOS-Technik nur auf symmetrische Brechungsindexfelder anwendbar und hat Schwierigkeiten mit asymmetrischen und turbulenten Strömungen.

Eine qualitative Messunsicherheitsanalyse innerhalb von Flammenströmung wurde in [11] durchgeführt, indem die Ablenkung eines sich durch die Flamme ausbreitenden Lichtstrahls gemessen und daraus die resultierende Bildverzerrung abgeschätzt wurde. Die Ablenkung der Lichtstrahlen findet hauptsächlich in der Flammenfront statt, wo sich die höchsten Temperatur- und damit Brechungsindexgradienten befinden. Die Ablenkung des Lichtschnittes führt zu einer gekrümmten Messebene, aber bei Verbrennungsströmung im Labormaßstab kann die resultierende PIV-Messunsicherheit vernachlässigt werden. Die durch die Partikelbildverzerrung verursachte Messunsicherheit hängt vom Zeitabstand zwischen den Laserpulsen ab. Es wurden jedoch keine quantitativen Informationen angegeben. Es wurde angenommen, dass Messabweichungen nur dann auftreten, wenn sich die Flammenfront zwischen den zeitlich separierten Partikelbildern signifikant verändert. Allerdings wurde weder die Bewegung der Partikel innerhalb des gekrümmten Brechungsindexfeldes noch der Einfluss der räumlichen Verschiebung zwischen dem gemessenen Geschwindigkeitsfeld und dem realen Geschwindigkeitsfeld durch die Lichtablenkung diskutiert.

Außer den beschriebenen Methoden zur Unsicherheitsanalyse kann auch der Vergleich mit Referenzströmungsfeldmessungen zur Quantifizierung der Messabweichung aufgrund von Brechungsindexfeldern genutzt werden, wie sie für den Einfluss einer turbulenten Propangasflamme und einer mit Öltröpfen kontaminierten Glasplatte durchgeführt wurde [9]. Bei PIV-Messungen in Flammen konnten jedoch nur qualitative Informationen über die resultierende Messunsicherheit gewonnen werden, da das Messobjekt eine Luftströmung war, welche durch das störende Brechungsindexfeld beobachtet wurde.

Da bisher nur qualitative Unsicherheitsabschätzungen für PIV-Messungen in Verbrennungsströmungen durchgeführt wurden, stellt dieser Beitrag eine Messtechnik zur Quantifizierung der resultierenden PIV-Messabweichungen innerhalb von Flammenströmung vor. Sie basiert auf einer direkten Messung der resultierenden Positionsabweichungen in den PIV-Bildern. Dafür wird die Position einer in die Flamme eingebrachten Glasstabspitze gemessen und die Differenz zwischen der bekannten Position der Spitze und der gemessenen Position wird näherungsweise als die Partikelpositionsabweichung angenommen. Mithilfe der Unsicherheitsfortpflanzung lässt auf die resultierende PIV-Messabweichung innerhalb der Flamme schließen. Diese Methode wird exemplarisch auf eine vorgemischte Propanflamme angewendet. Dafür werden zunächst das Messprinzip und der experimentelle Aufbau beschrieben. Anschließend folgen die Messergebnisse der durchgeführten PIV-Messungen innerhalb der Flammenströmung und die abgeschätzten systematischen und zufälligen Geschwindigkeitsabweichungen.

Messprinzip

PIV-Messungen in Verbrennungsströmungen werden durch ein im Allgemeinen zeitabhängiges inhomogenes Brechungsindexfeld $n(\vec{r}, t)$ mit $r = (x, y, z)^T$ gestört, was zu Bildunschärfe und Messabweichungen der Partikelpositionen führt. Die Lichtablenkung des gestreuten Lichts auf dem Weg vom Partikel zur Kamera führt zur Detektion eines Partikels an der Position $\vec{r}_{p'} = (x_{p'}, y_{p'}, z_{p'})^T$ mit der tatsächlichen Position $\vec{r}_p = (x_p, y_p, z_p)^T$ innerhalb der Lichtschnittebene (x, y, z_p) . In vorgemischten Flammen wird die resultierende Partikelpositionsabweichung $\vec{\xi} = \vec{r}_{p'} - \vec{r}_p$ hauptsächlich durch Temperaturgradienten verursacht, die sich im Bereich der Flammenfront befinden [11]. Um die Partikelpositionsabweichung $\vec{\xi}$ zu bestimmen, wird eine direkte Messung der Lichtablenkungen durchgeführt, wobei die bekannte Position einer Glasstabspitze innerhalb einer Flamme mit einer Kamera gemessen wird. Der Unterschied zwischen der gemessenen Position der Glasspitze $\vec{r}_{G'}$ und der bekannten Position \vec{r}_G entspricht ungefähr der Partikelpositionsabweichung $\vec{\xi} = \vec{r}_{p'} - \vec{r}_p \approx \vec{r}_{G'} - \vec{r}_G$, vgl. Abb. 1(a). Es wird davon ausgegangen, dass das Einbringen des Glasstabes in die Flamme das Brechungsindexfeld auf dem optischen Weg von der Glasspitze zur Kamera nicht signifikant beeinflusst. Eine statistische Analyse wird schließlich durchgeführt, um die mittlere Positionsabweichung $\bar{\xi}$ und die Standardabweichung der Positionsabweichung $\sigma_{\vec{\xi}}$ zu bestimmen.

Experimenteller Aufbau

Messobjekt

Das Messobjekt ist eine vorgemischte Propanflamme. Der Brenners besitzt ein Rohr mit einem Durchmesser von 41,8 mm und einer Länge von 300 mm als Auslass, was für eine laminare Strömung sorgt. Die davorliegende Vormischkammer des Brenners ist mit Kugeln gefüllt ($\varnothing = 5$ mm), die den Propan- und Luftstrom homogenisiert. Die Gaszusammensetzung wird durch einen Propan- (1 Lmin^{-1}) und einen Luftzufluss (10 Lmin^{-1}) mittels Massenstromregler eingestellt, was zu einem Äquivalenzverhältnis von $\phi = 2,4$ führt. Die resultierende Flamme neigt vor allem im diffusen Bereich der Flamme zu Fluktuationen, vgl. Abb. 2(b). Diese Fluktuationen lassen sich durch Buoyancy-Effekte erklären [7].

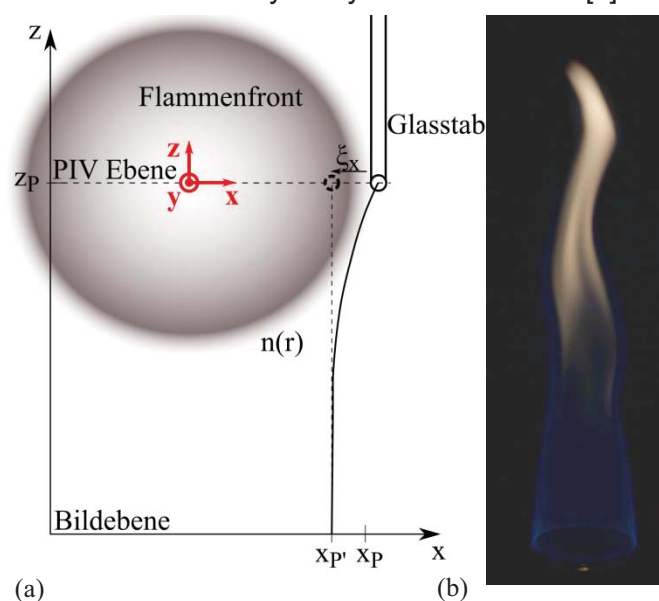


Abb. 1: (a) Partikelpositionsabweichung ξ_x in x-Richtung verursacht durch die Lichtablenkung des gestreuten Lichts von der Glasstabspitze in der PIV-Ebene bei $z = z_p = 0$ zur Kamera in der Bildebene. (b) Flamme für einen Propanzufluss von 1 Lmin^{-1} und einem Luftzufluss von 10 Lmin^{-1} .

PIV Messaufbau

Das Geschwindigkeitsfeld $v(\vec{r})$ der Flamme wird mittels PIV gemessen. Die Messebene befindet sich in der Mitte des Brennerauslasses bei $z=0$, welche die y -Symmetrieachse enthält. Die Laserlichtschnittbeleuchtung (Lichtschnittdicke ca. 0,3 mm) wird durch einen Doppelpulslaser mit 200 mJ Pulsenergie und einer Pulslänge von weniger als 10 ns (Quantel Evergreen) realisiert. Als Seeding werden Titandioxidpartikel mit einem mittleren Durchmesser von 0,4 μm verwendet, welche von einer 5,5 Mpx sCMOS-Kamera (Andor Zyla) bei $z=-60\text{ cm}$ mit einem 50 mm Brennweitenobjektiv (Zeiss Planar T* 1,4/50) beobachtet werden.

Messung der Partikelpositionsabweichung

Die resultierende Messabweichung $\vec{\xi}(\vec{r})$ der Partikelposition wird durch die Messung der bekannten Position einer Glasstabspitze mit einem Durchmesser von 1,3 mm bestimmt, die von der entgegengesetzten Blickrichtung der Kamera in die Flamme eingebracht wird, vgl. Abb. 1(a). Im Vergleich zur typischen Partikelgröße bei PIV-Messungen von wenigen Mikrometern ist der Glasstabdurchmesser um drei Größenordnungen größer, was zu einem Mittelungseffekt führt. Somit wird die gemessene Positionsabweichung innerhalb der Flamme räumlich tiefpassgefiltert, was zu einer Unterschätzung der auftretenden Positionsabweichung führt. Dem gegenüber steht die Größe der Auswertefenster des PIV-Algorithmus, welches jedoch vergleichsweise klein und somit überkompensiert ist.

Durch eine relative Bewegung des Brenners mit einer Linearachse wird die positionsabhängige Abweichung $\vec{\xi}(\vec{r})$ der Glasstabspitze bestimmt. Es wird angenommen, dass das Brechungsindexfeld im optischen Pfad von der Glasspitze zur Kamera nicht wesentlich durch den Glasstab beeinflusst wird. Die Glasstabspitze wird über einen Pulslaser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von 1 ns beleuchtet, was zu einer vernachlässigbaren Zeitmittelung führt. Die Querempfindlichkeit einer möglichen Biegung des Glasstabes durch Strömungskräfte ist vernachlässigbar. Dies wurde durch die Messung der Glasspitzenposition in einem Luftstrom mit einem höheren Volumenstrom im Vergleich zum kombinierten Propan- und Luftstrom der Flamme getestet.

Die Materialauswahl des Stabes ist entscheidend für die Machbarkeit und Genauigkeit der Messung. Zunächst muss das Material den hohen Temperaturen der Flamme standhalten und inert sein, um nicht zu korrodieren. Außerdem darf sich die Stange nicht durchbiegen. Quarzglas erfüllt diese Anforderungen.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der PIV-Messung beschrieben und resultierende Messabweichungen aufgrund von Lichtbrechungen bestimmt.

PIV-Messergebnisse

Abb. 2 zeigt das mittlere Geschwindigkeitsfeld $\bar{v}(\vec{r})$ von 500 PIV-Einzelmessungen und die entsprechenden Standardabweichungen der x -Geschwindigkeitskomponente σ_{v_x} . Die Messungen erfolgten mit einer Wiederholungsrate von 15 Hz und einem Zeitabstand von 400 μs zwischen den Laserpulsen. Die maximale, ermittelte Geschwindigkeit beträgt 0,24 ms^{-1} und befindet sich im Bereich der Flammenfront, die eine konische Form aufweist. Die maximale Standardabweichung der x -Komponente der Geschwindigkeit σ_{v_x} befindet sich im hellen diffusen Bereich der Flamme, in dem die Flamme zu Fluktuationen neigt, und beträgt etwa

$0,1 \text{ ms}^{-1}$. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit weist eine geringe Rechtsdrehung auf, was zu einer leicht geneigten Symmetrieachse führt.

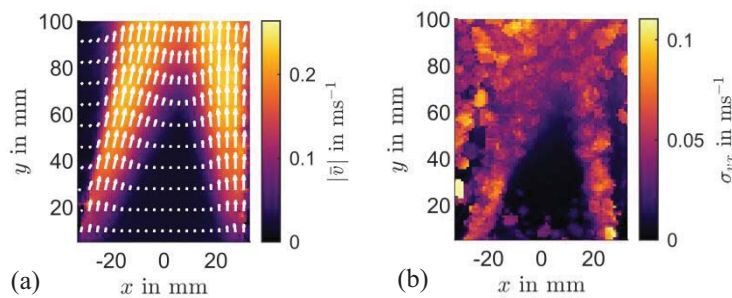


Abb. 2: (a) Mittleres Geschwindigkeitsfeld von 500 PIV-Einzelmessungen und der entsprechenden Standardabweichung der x -Komponente der Geschwindigkeit σ_{v_x} (b).

Systematische Geschwindigkeitsabweichung

Die Geschwindigkeitsabweichung $\Delta \vec{v}(\vec{r})$ der PIV-Messungen wird durch die mittels Glasstab gemessene Positionsabweichung $\vec{\xi}(\vec{r})$ und die Gleichung

$$\frac{\Delta v_i}{v_i} = \nabla_i \xi_i - \frac{\nabla_i v_i}{v_i} \xi_i \quad (1)$$

von Elsinga et al. [2] bestimmt. Hier bezeichnet $i = x, y, z$ die jeweilige Richtungskomponente x, y und z . Die relative systematische Geschwindigkeitsabweichung $\frac{\Delta v_i}{v_i}$ wird durch Einsetzen der mittleren Positionsabweichung $\bar{\xi}_i$ und der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}_i in Gl. (1) bestimmt. Abb. 3(a) zeigt die mittleren Positionsabweichungen $\bar{\xi}_x$ in x -Richtung der Glasspitze gemittelt über 300 Einzelmessungen. Ein zweidimensionaler Gaußfilter mit einer Standardabweichung von $1,6 \text{ mm}$ wird zur Reduzierung des Rauschens eingesetzt.

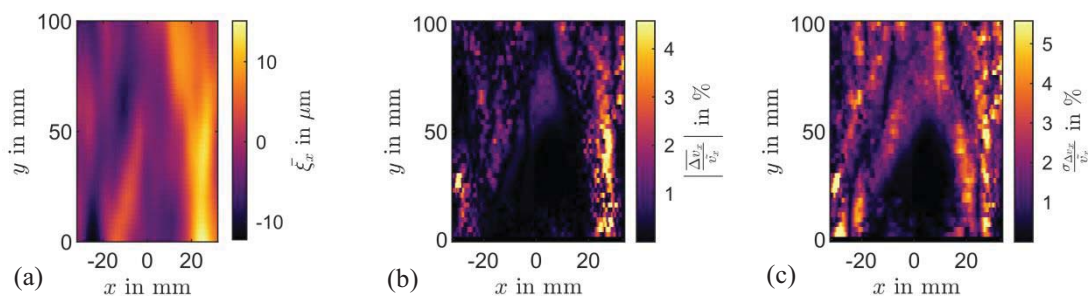


Abb. 3: (a) Gemessene Partikelpositionsabweichung $\bar{\xi}_x$. (b) Relative systematische $\left| \frac{\Delta v_x}{\bar{v}_x} \right|$ und (c) Relative zufällige Messabweichung $\frac{\sigma_{\Delta v_x}}{\bar{v}_x}$ verursacht durch Partikelpositionsabweichungen.

Die resultierende Positionsabweichung innerhalb der Flamme lässt sich qualitativ durch die Temperaturverteilung erklären, die die dominierende Quelle des Brechungsindexfeldes in vorgemischten Flammen ist [11] und ihr Maximum in der Flammenfront hat. Die Temperaturverteilung führt zu einer Dichteänderung des Mediums, was zu einer Brechungsindexänderung führt. Der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Brechungsindexfeld wird durch die Gladstone-Dale Beziehung beschrieben. So treten in der Region bei $x \approx \pm 25 \text{ mm}$ in Abb. 6 hohe Temperaturgradienten zwischen Flammenfront und Umgebungsluft bei Raumtemperatur auf. Innerhalb der Flamme werden die Temperaturgradienten durch den internen vorgemischten Gasstrom bei etwa Raumtemperatur invertiert. Daher gibt es im unteren Teil der Flamme bei $y < 40 \text{ mm}$, wo nicht verbranntes Gas vorhanden ist, lokale Extrema bei $x \approx \pm 18 \text{ mm}$.

Die Partikelpositionsabweichung $\bar{\xi}_x$ und die Geschwindigkeitsfelder $\vec{v}(\vec{r})$ innerhalb der Flamme wurden mit einem Glasstab bzw. mittels PIV gemessen. Mit Gl. (1) wird die systematische Geschwindigkeitsabweichung innerhalb der Flammenströmung abgeschätzt, wel-

che auf die mittlere Geschwindigkeit der gesamten Strömung \bar{v}_x normiert und in Abb. 3(b) dargestellt ist. Dabei werden die höchsten 1 % der resultierenden systematischen Geschwindigkeitsabweichungen als Ausreißer betrachtet und beschränkt.

Die Maxima befinden sich wieder im Bereich der Flammenfront, wo die Geschwindigkeitsgradienten $\nabla_x \bar{v}_x$, die Partikelpositionsabweichungen $\bar{\xi}_x$ und deren Gradienten $\nabla_x \bar{\xi}_x$ hohe Werte zeigen. Es treten systematische Geschwindigkeitsabweichungen von maximal 4,5 % auf. Im Vergleich zur typischen PIV-Messunsicherheit von etwa 1-2 % [14, 13] kann der Effekt der Lichtbrechung innerhalb von Flammenströmungen aufgrund von Brechungsindexfeldern daher zu signifikanten systematischen Messabweichungen im Bereich der Flammenfront führen. Diese Region ist von besonderem Interesse für die Untersuchung der Dynamik der Verbrennungschemie [5, 8], die zuverlässige Geschwindigkeitsdaten erfordert. Um dies zu erreichen, kann die Genauigkeit der Geschwindigkeitsdaten durch die Korrektur der in Abb. 3(a) dargestellten Geschwindigkeitsabweichungen verbessert werden.

Zufällige Geschwindigkeitsabweichung

Da die systematische Geschwindigkeitsabweichung durch Gl. (1) quantifiziert wird, wird deren Unsicherheitsfortpflanzung zur Abschätzung der zufälligen Geschwindigkeitsabweichung verwendet. Dies ist der Annahme, dass das fluktuierende Brechungsindexfeld die dominante Ursache für die Standardabweichung der gemessene Positionsabweichung ist, gerechtfertigt. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta v_i} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta v_i}{\partial \xi_i} \cdot \sigma_{\xi_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta v_i}{\partial v_i} \cdot \sigma_{v_i}\right)^2 + 2 \frac{\partial}{\partial \xi_i} \frac{\partial}{\partial v_i} \text{cov}(\xi_i, v_i)} \\ &\approx \sqrt{(\nabla v_i \sigma_{\xi_i})^2 + (\nabla \xi_i \sigma_{v_i})^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

wobei $\sigma_{\Delta v_i}$, σ_{ξ_i} und σ_{v_i} die Standardabweichungen von Δv_i , ξ_i und v_i sind und $\text{cov}(\xi_i, v_i)$ die Kovarianz von ξ_i und v_i ist. Ein positiver Kovarianzterm ist zu erwarten, da sich hohe Geschwindigkeiten und hohe Partikelpositionsabweichungen in der Flammenfront befinden. Darüber hinaus ist die Entstehungsursache von erhöhter Geschwindigkeit und erhöhter Lichtbrechung mit der Erwärmung des Fluides der Gleiche. Die Erwärmung führt zu Expansion, Konvektion und einer Reduzierung der lokalen Dichte, die den Brechungsindex variiert. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass der Kovarianzterm relativ klein ist, da das Geschwindigkeitsfeld innerhalb der PIV-Messebene gemessen wird und die Partikelpositionsabweichung durch das Brechungsindexfeld auf dem optischen Weg von der Messebene zur Kamera entsteht. Deshalb wird eine untere Grenze der tatsächlichen zufälligen Abweichung abgeschätzt, was zu einem Best Case-Szenario führt. Die resultierende zufällige Messabweichung ist wieder auf die mittlere Geschwindigkeit der gesamten Strömung \bar{v}_x in x -Richtung normiert und in Abb. 3(c) dargestellt.

Auch hier werden die höchsten 1 % der resultierenden zufälligen Geschwindigkeitsabweichung als Ausreißer angesehen. Wie die maximalen systematischen Abweichungen liegen auch die maximalen zufälligen Abweichungen im Bereich um die Flammenfront mit maximal 5,5 %.

Fazit

Die Messabweichungen der Partikelposition bei PIV-Messungen durch inhomogene Brechungsindexfelder in Flammenströmungen führen zu Geschwindigkeitsmessabweichungen, die im Allgemeinen unbekannt sind. Deshalb wurde eine experimentelle Methode demonstriert, die quantitative Informationen über auftretende PIV-Messabweichungen in Flammenströmungen liefert. Als Beispiel wurde das Geschwindigkeitsfeld einer vorgemischten Propanflamme mittels PIV gemessen. Die Positionsmessabweichungen aufgrund von Lichtbrechungen wurden experimentell bestimmt, wobei in die Flamme ein Glasstab mit fester Position eingebracht und dessen Position mit der PIV-Optik und -Kamera gemessen wird.

Die relativen systematischen und zufälligen Messabweichungen der Strömungsgeschwindigkeit ergeben sich so zu maximal 4,5 % und 5,5 %. Es ist zu beachten, dass die resultierenden Messabweichungen von der Dimension der untersuchten Flamme bzw. des inhomogenen Brechungsindexfeldes abhängen. Neben der optischen Weglänge innerhalb des Brechungsindexfeldes beeinflussen auch die maximalen Temperaturen, das Mischungsverhältnis zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel sowie der verwendete Brennstoff den Brechungsindex und somit die resultierenden Messabweichungen. Die PIV-Messabweichungen müssen daher für den jeweils betrachteten Messaufbauten individuell bestimmt werden. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass sowohl die systematischen als auch die zufälligen Messabweichungen für PIV-Messungen innerhalb von Flammenströmungen signifikant sein können, wobei die größten Messabweichungen im Bereich der Flammenfront und damit im Bereich der maximalen Beträge des Brechungsindexgradienten auftreten. Für präzise Messungen in größeren Flammenströmungen ist daher die Messunsicherheit durch Lichtbrechung problematisch und sollte berücksichtigt werden. Dies ist besonders wichtig, wenn die experimentellen Daten zur Validierung von Ergebnissen aus numerischen Strömungssimulationen [1] verwendet werden.

Literatur

- [1] R. S. Barlow. Laser diagnostics and their interplay with computations to understand turbulent combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(1):49–75, 2007.
- [2] G. E. Elsinga, B. W. van Oudheusden, and F. Scarano. Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV. *Experiments in Fluids*, 39(2):246–256, 2005.
- [3] A. Fischer. Fundamental uncertainty limit of optical flow velocimetry according to Heisenberg's uncertainty principle. *Applied Optics*, 55(31):8787, 2016.
- [4] A. Fischer. Imaging Flow Velocimetry with Laser Mie Scattering. *Applied Sciences*, 7(12):1298, 2017.
- [5] J. Kiefer, Z. S. Li, J. Zetterberg, X. S. Bai, and M. Aldén. Investigation of local flame structures and statistics in partially premixed turbulent jet flames using simultaneous single-shot CH and OH planar laser-induced fluorescence imaging. *Combustion and Flame*, 154(4):802–818, 2008.
- [6] H. Nobach und E. Bodenschatz. Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities. *Experiments in Fluids*, 47(1):27–38, 2009.
- [7] K. J. Nogenmyr, J. Kiefer, Z. S. Li, X. S. Bai, and M. Aldén. Numerical computations and optical diagnostics of unsteady partially premixed methane/air flames. *Combustion and Flame*, 157(5):915–924, 2010.
- [8] R. Schlüßler, M. Bermuske, J. Czarske, and A. Fischer. Simultaneous three-component velocity measurements in a swirl-stabilized flame. *Experiments in Fluids*, 56(10):183, 2015.
- [9] R. Schlüßler, J. Czarske, and A. Fischer. Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations. *Optics and Lasers in Engineering*, 54:93–104, 2014.
- [10] A. M. Steinberg, I. Boxx, M. Stöhr, C. D. Carter, and W. Meier. Flow flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor. *Combustion and Flame*, 157(12):2250–2266, 2010.
- [11] A. Stella, G. Guj, J. Kompenhans, M. Raffel, and H. Richard. Application of particle image velocimetry to combustor flows: design considerations and uncertainty assessment. *Experiments in Fluids*, 30(2):167–180, 2001.
- [12] C. Vanselow und A. Fischer. Influence of inhomogeneous refractive index fields on particle image velocimetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 107:221–230, 2018.
- [13] M. Voges, M. Beversdorff, C. Willert, and H. Krain. Application of particle image velocimetry to a transonic centrifugal compressor. *Experiments in Fluids*, 43(2):371–384, 2007.
- [14] J. Westerweel. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8(12):1379, 1997.