

Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf PIV-Messungen

Influence of inhomogeneous refractive index fields on PIV measurements

C. Vanselow, A. Fischer

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

Particle image velocimetry, Brechungsindex, Messabweichung, heiße Düsenströmung
Particle image velocimetry, refractive index, measurement error, hot jet flow

Zusammenfassung

Der Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf die Messunsicherheit von PIV-Messungen ist ein bekanntes Problem, welches beispielsweise in Flammen, Druckwellen und Überschallströmungen zu einer unbekanntenen Messabweichung führt. Bisherige Untersuchungen über den Einfluss inhomogener Brechungsindexverteilungen auf PIV-Messungen beschränken sich auf qualitative Auswirkungen oder geben quantitative Messabweichungen nur unter der Annahme an, dass die Verteilung des Brechungsindex unabhängig von der Blickrichtung der Kamera ist. Es fehlt eine allgemeine Beschreibung für die quantitative Bestimmung von Messabweichungen innerhalb von Brechungsindexfeldern. Insbesondere ist der quantitative Einfluss von Brechungsindexfeldern auf stereoskopische und tomographische PIV-Messungen eine offene Fragestellung. Aus diesem Grund wird zunächst ein Modell zur Bestimmung von Brechungsindexfeldern durch die Messung der Temperaturverteilung vorgeschlagen und mit dem Vergleich von Messung und Simulation validiert. Anschließend wird eine analytische Beschreibung der Abweichung von der gemessenen Partikelposition in Abhängigkeit von dem Brechungsindexfeld hergeleitet. Damit lassen sich quantitative Messabweichungen bei Standard-PIV bestimmen. Zusätzlich werden stereoskopische bzw. tomographische PIV-Messungen betrachtet. Hierbei geht zusätzlich zum Gradienten der Brechungsindexverteilung auch die Krümmung des Brechungsindexes ein. Die durch Messungen validierte Berechnung ergeben eine maximale Abweichungen der Partikelposition in einer 288°C heißen Düsenströmung von 8,5 μm für Standard-PIV und 14,9 μm für stereoskopische PIV-Messungen.

Einleitung

Particle image velocimetry (PIV) ist eine etablierte Methode für die Messung von Strömungsfeldern (Adrian 2005). Während Standard-PIV-Messungen die Möglichkeit bieten zwei Komponenten des Geschwindigkeitsvektorfeldes in einer Messebene zu bestimmen, erhält man mit stereoskopischen PIV-Messungen die drei Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren in einer Ebene (Prasad 2000) und mit tomographischen Messungen in einem Messvolumen (Scarano 2013). Dazu werden die Bildinformationen weiterer Kameras mit unterschiedlichen Perspektiven genutzt. Um diese zusätzlichen Informationen nutzen zu können, muss das Messsystem auf die Messebene bzw. -volumen kalibriert werden. Dazu wird die so genannte mapping-Funktion der einzelnen Kameras bestimmt, welche die 2D Bilddaten mit den Messkoordinaten korreliert. Wenn sich der kalibrierte Zusammenhang zwischen den Koordinaten-

systemen verändert oder eine Kalibrierunsicherheit vorliegt, so hat dies einen hohen Einfluss auf die Messunsicherheit des Messsystems (Beresh et al. 2016).

Der Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder im Messvolumen und im optischen Weg zwischen Kamera und Messvolumen führt zu Abbildungsfehlern in den Kamerabildern, welche somit zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führen. Inhomogene Brechungsindexfelder können unter anderem durch Dichteschwankungen im optischen Medium oder durch den Einfluss unterschiedlicher optischer Medien verursacht werden, wie beispielsweise in Flammen (Schlüßler et al. 2015) und Sprays (Schlüßler et al. 2014a). In Drall-Brennern sind Brechungsindexfelder auf die Temperaturverteilung und damit einhergehende Dichteänderung zurückzuführen (Fischer et al. 2013). So ist durch die mittlere Temperaturverteilung eine systematische Abweichung der gemessenen Partikelpositionen in PIV-Messungen zu erwarten. Zudem können starke Hitzefluktuationen auftreten, die zu hohen Schwankungen im Brechungsindexfeld führen und die Messunsicherheit erhöhen (Schlüßler et al. 2014b). In vorgemischten, turbulenten Flammen werden Brechungsindexfluktuationen hauptsächlich durch die Temperaturschwankungen an der Flammenfront verursacht (Stella et al. 2001). Dabei wird die Verschiebung der Abbildung eines Partikels auf etwa 3 μm abgeschätzt. Einerseits resultierend in einer Verringerung des Signal zu Rausch Verhältnisses (SNR), ist der Einfluss auf die gemessene Geschwindigkeit stark von der zeitlichen Veränderung der Flammenfront und den zeitlichen Abstand der aufgenommenen Bilderpaare abhängig. Mithilfe der Kombination aus der background oriented schlieren (BOS) Methode mit PIV-Messungen lassen sich resultierende optische Abweichungen in den Partikelbildern quantitativ bestimmen und korrigieren (Elsinga et al. 2005). Dabei ist vorausgesetzt, dass die Brechungsindexverteilung unabhängig von der Blickrichtung der Kamera ist, was nur für spezielle Anwendungen zutreffend ist. Mit den erwähnten Arbeiten sind die Auswirkungen von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf Standard-PIV-Messungen untersucht und teilweise korrigiert worden. Besonders fluktuierende Einflüsse des Brechungsindexfeldes führen zu einer Erhöhung der Messunsicherheit (Schlüßler et al. 2014b). Quantitative Aussagen über den Einfluss bekannter inhomogener Brechungsindexverteilungen auf die Messunsicherheit lassen sich jedoch bislang noch nicht ableiten.

Darüber hinaus ist der Einfluss auf stereoskopische und tomographische-PIV Messungen in komplexen Strömungen mit inhomogenem Brechungsindex bislang kaum untersucht. Der verschiedene Einfluss von Lichtbrechungen wegen der unterschiedlichen optischen Wege vom Messvolumen zu den jeweiligen Kameras stellt dabei eine zusätzliche Schwierigkeit dar. Statische Störungen durch den Einfluss von Brechungsindizes, wie zum Beispiel durch Glascheiben zwischen Messvolumen und Kameras, können mithilfe eines kompensierenden Kalibrierungsprozesses berücksichtigt werden (Prasad und Adrian 1993, Soloff et al. 1997). So kann der Einfluss unbekannter statischer Lichtbrechungen mithilfe der Einbringung eines Kalibrierobjektes in das Messvolumen korrigiert werden. Jedoch ist diese Ansatz nur bedingt praktikabel, da beispielsweise in Flammen, Druckwellen oder Überschallströmungen sich kein Kalibrierobjekt einbringen lässt ohne die Strömung zu stören.

Für stereoskopische und tomographische PIV-Messungen werden Selbstkalibrierungsalgorithmen verwendet, die mithilfe von synchron aufgenommenen Partikelbildern Abweichungen in den Bildern untereinander bestimmen und durch eine Anpassung der mapping-Funktionen der Kameras korrigieren (Wieneke 2005, Wieneke 2008). Hierfür wird das Messvolumen in Teilbereiche aufgeteilt, in denen für jede Kamera die Abbildungen der Partikel zueinander verschoben werden bis diese Partikelbilder an der identischen Position liegen. Die daraus resultieren Verschiebevektoren werden in einem Optimierungsprozess minimiert und als Korrekturterme der mapping-Funktionen genutzt. Ein Problem dieser Prozedur ist, dass nicht unterschieden werden kann, von welcher Kamera die Abweichungen in den Partikelbildern stammt. Somit werden die Abweichungen einer Kamera in einer Korrektur aller mapping-

Funktionen resultieren. Zudem wird angenommen, dass die wahre Position der Partikel an der Position liegt, bei der die Summe der Verschiebevektoren minimal ist. Im Allgemeinen ist das nicht der Fall und somit unterliegt diese Methode einer unbekanntem Messabweichung. Um quantitative Aussagen über die Messunsicherheit bestimmen zu können, wird im vorliegenden Beitrag der Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf Standard-, stereoskopischen und tomographischen PIV-Messungen untersucht. Dazu wird das Brechungsindexfeld einer heißen Düsenströmung bestimmt und daraus resultierende Lichtstrahlablenkungen berechnet mit Messungen validiert. Hierzu wird eine Methode zur Berechnung der Messabweichungen der Partikelpositionen in PIV-Messungen vorgestellt. Mithilfe dieser Methode werden anschließend die Auswirkungen auf die Bestimmung der Partikelposition mithilfe von Triangulation, die bei stereoskopischen und tomographischen PIV-Messungen angewendet wird, berechnet.

Lichtbrechung durch inhomogene Brechungsindexverteilungen

Für die Simulation von Abweichungen der gemessenen Partikelposition innerhalb von Brechungsindexverteilungen wird ein Model zur Berechnung von Brechungsindexfeldern $n(\vec{r})$, mit $\vec{r} = (x, y, z)$, in Abhängigkeit der Dichte $\rho(\vec{r})$ genutzt. Die Gladstone-Dale-Beziehung (Merzkirch 2012)

$$n(\vec{r}) - 1 = K\rho(\vec{r}) \propto \frac{1}{1 + \gamma(T(\vec{r}) - T_0)} \quad (1)$$

beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex und der Dichte des optischen Mediums, wobei die Gladstone-Dale-Konstante K die Abhängigkeit des optischen Mediums beschreibt und für Luft den Wert $2,3 \cdot 10^{-4}$ besitzt (Elsinga et al. 2005). Die Proportionalität der Änderung der Dichte in Abhängigkeit der Temperatur $T(\vec{r})$ ist nach dem Gesetz von Gay-Lussac abhängig von dem Volumenausdehnungskoeffizient γ für die Referenztemperatur T_0 , wobei die Näherung $\gamma = \frac{1}{T_0}$ für ideale Gase genutzt wird. Mithilfe von

Ray-Tracing-Simulationen lassen sich die resultierenden Winkelablenkungen von den Lichtstrahlen $\vec{\alpha} = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ durch Lichtbrechung in inhomogenen Brechungsindexfeldern berechnen.

Die Validierung dieser Simulation wird durch den Vergleich mit experimentell gemessenen Abweichungen einer turbulenten heißen Düsenströmung erreicht. Der Temperaturquerschnitt dieser Strömung ist mithilfe eines Thermoelements bestimmt worden. Die mittlere Temperaturverteilung ist in Abb. 1 gezeigt. Dazu wurde die Annahme einer radialsymmetrischen Anordnung des Temperaturprofils getroffen. Für den Vergleich der simulierten Daten mit Messwerten, wird die horizontale Ablenkung dx des Lichtstrahls eines Laserpointers über einen Schirm mit einer Kamera gemessen, siehe Abb. 2. Die heiße Düsenströmung befindet sich im Abstand d zum Schirm und lässt sich horizontal verfahren. Über die gemessene Ablenkung lässt sich der Ablenkungswinkel $\alpha_x = \tan^{-1}\left(\frac{dx}{d}\right)$ berechnen. Die gemessene Strahlablenkung wird aus

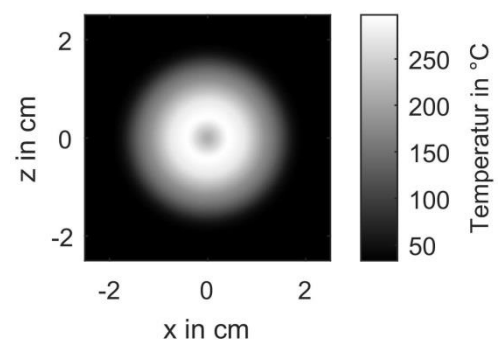


Abb. 1: Mittlere gemessene Temperaturverteilung der Turbulenten Düsenströmung

dem Mittelwert von 100 Bildaufnahmen bestimmt. In Abb. 3 ist der Vergleich der Ray-Tracing-Simulation mit den Messwerten gezeigt. Es zeigt sich, dass der Verlauf der gemessenen Abweichung mit den Ergebnissen der Simulation gut übereinstimmt. Lediglich im Bereich der abfallenden Flanke ergeben sich Werte, die nicht im Intervall der zweifachen Standardabweichung liegen. Als Fehlerquellen sind hier ein Offset des gemessenen Temperaturquerschnittes zum Mittelpunkt der Strömung und die Definition des Mittelpunktes im Temperaturquerschnitt zu nennen. Zudem ergibt sich eine Messabweichung durch die Wärmeleitung im Thermoelementdraht, der teilweise durch heißere Bereiche führt. Die relativ großen Konfidenzintervalle sind bedingt durch hohe zeitliche Schwankungen in der Messung der Strahlposition. Diese Schwankungen sind mit bloßem Auge zu beobachten und sind im Wesentlichen auf die Turbulenz der heißen Düsenströmung zurückzuführen. Die gute Übereinstimmung zwischen der Messung und der Simulation bestätigt, dass das beschriebene Modell zur Bestimmung des Brechungsindexfeldes anhand der Temperaturverteilung für die heiße Düsenströmung geeignet ist. Um Aussagen für die Messabweichung von PIV-Messungen in der heißen Düsenströmung treffen zu können, wird in den folgenden Kapiteln eine theoretische Beschreibung über die Abweichung der Partikelpositionen innerhalb des Brechungsindexfeldes beschrieben.

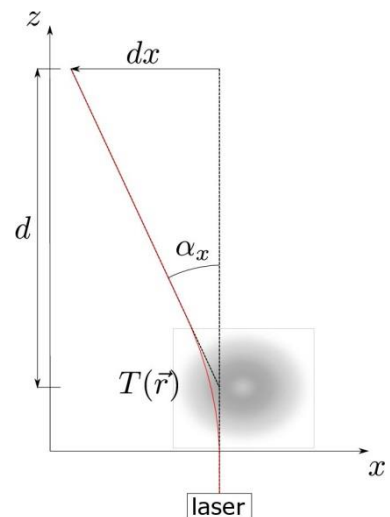


Abb. 2: Schematischer Aufbau zur Messung der Ablenkung von Lichtstrahlen aufgrund von Lichtbrechung in einer inhomogenen Temperaturverteilung

Messabweichungen bei PIV-Messungen

Für die Berechnung von Messabweichungen ohne aufwendige Ray-Tracing-Simulationen und um qualitative Aussagen über Messabweichungen bei stereoskopischen und tomographischen PIV-Messungen treffen zu können, wird im Folgenden ein analytischer Ausdruck zur Berechnung der Messabweichung in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung des Brechungsindex hergeleitet. Dazu wird die Gleichung

$$\frac{d}{ds} \left(n(\vec{r}) \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \vec{\nabla} n(\vec{r}) \quad (2)$$

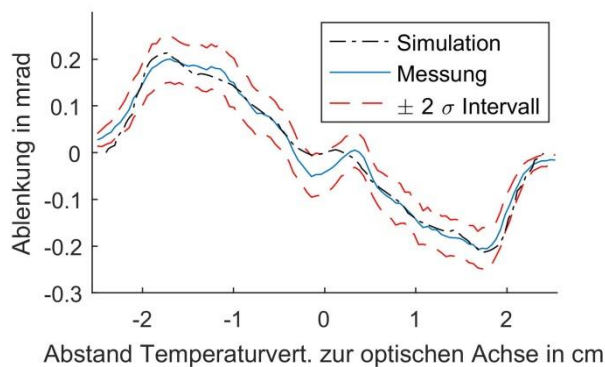


Abb. 3: Vergleich der Ergebnisse der Ray-Tracing-Simulation mit der gemessenen Ablenkung

für die Propagation von Licht (Born und Wolf 1981) genutzt, wobei ds das Wegelement des optischen Pfades ist. Mit der Näherung $ds \approx dz$, was für kleine Ablenkungen gilt, lässt sich näherungsweise der Winkel $\vec{\alpha} = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ der Lichtstrahl-ablenkung auf dem optischen Weg vom Ursprung an der Kamera zum Partikel an der Position $\vec{r}_P = (x_P, y_P, z_P)$ berechnen (Merzkirch 2012)

$$\tan \vec{\alpha} = \int_0^{z_P} \frac{\vec{\nabla} n(\vec{r})}{n(\vec{r})} dz. \quad (3)$$

Die Abweichung $\vec{\xi}$ der gemessenen Position $\vec{r}_{P'} = (x_{P'}, y_{P'}, z_P)$ des Partikels im Lichtschnitt in der Ebene $z = z_P$ zur wahren Position lässt sich mithilfe von N Steigungsdreiecken mit dem Intervall Δz berechnen, siehe Abb.4:

$$\vec{\xi} = \sum_{m=0}^N \vec{\xi}_{m+1} = \Delta z \sum_{m=0}^N \int_0^{m\Delta z} \frac{\vec{\nabla} n(\vec{r})}{n(\vec{r})} dz. \quad (4)$$

Mit diesem Ergebnis lässt sich die Abweichung $\vec{\xi}$ der gemessenen Partikelposition in Abhängigkeit des Partikelortes und dem Brechungsindexfeld berechnen.

Anwendung bei der Triangulation

Gemäß Gleichung (4), ist die Abweichung der gemessenen Position des Partikels abhängig vom optischen Weg von der Kamera zum Partikel. Die dreidimensionale Rekonstruktion des Partikelortes benötigt im Regelfall mehr als eine Kamera und wird im Fall von zwei Kameras über den Schnittpunkt der jeweiligen Sichtlinien \vec{k}_1 und \vec{k}_2 bestimmt. Durch den Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern und die unterschiedlichen optischen Wege zum Partikel ergeben sich somit unterschiedliche Abweichungen in den einzelnen Kamerabildern. Sollte trotz dieser Abweichungen eine Position des Partikels bestimmt werden, hat die ermittelte Position im Allgemeinen eine Abweichung zur wahren Position. Eine Visualisierung des geometrischen Problems ist in Abb. 5 gezeigt. Aus der geometrischen Betrachtung ergibt sich, dass die resultierende Abweichung eine Superposition

$$\vec{\xi} = \vec{\xi}_i + c_i \vec{k}_i \quad (5)$$

der Abweichung der jeweiligen Kamera $i=1,2$ und dem Vektor $c_i \vec{k}_i$ ist. Dabei ist c_i ein Skalierungsfaktor, der durch die Gleichung (5) für zwei Kameras $i=1$ und $i=2$ überbestimmt ist. Für die Berechnung werden die Gleichungen für die Dimensionen x und y genutzt um c_2 zu eliminieren. Es ergibt sich:

$$c_1 = \frac{\Delta \xi_x - \frac{k_{2,x}}{k_{2,z}} \Delta \xi_z}{k_{1,z} \left(\frac{k_{2,x}}{k_{2,z}} - \frac{k_{1,x}}{k_{1,z}} \right)} \quad (6)$$

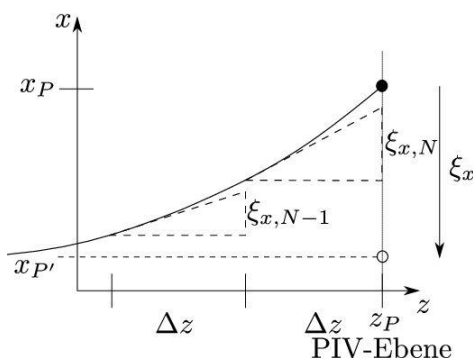


Abb. 4: Visualisierung des Ansatzes von N Steigungsdreiecken zur Berechnung der Abweichung der abgebildeten Partikelposition

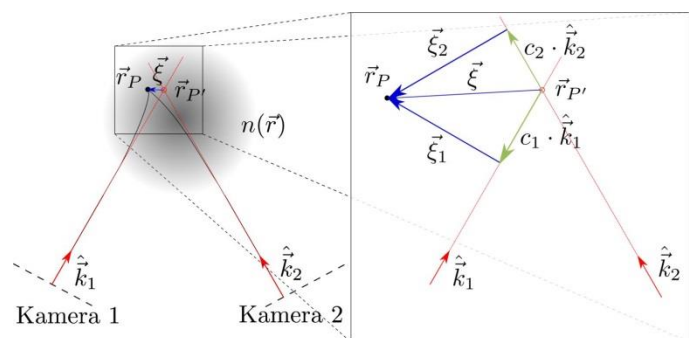


Abb. 5: Skizze des geometrischen Problems zur Bestimmung der Position eines Partikels innerhalb eines Brechungsindexfeldes mittels Triangulation

mit $\Delta\vec{\xi} = \vec{\xi}_1 - \vec{\xi}_2$. Das Einsetzen von Gleichung (6) in Gleichung (5) ergibt die Abweichung der Triangulation durch den Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder und kann mithilfe von Gleichung (4) für die Berechnung der jeweiligen Abweichung $\vec{\xi}_i$ gelöst werden.

Die Ergebnisse belegen, dass der Betrag der zu erwartenden Abweichung im Allgemeinen höher ist als bei Standard PIV Messungen

$$|\vec{\xi}| \geq |\vec{\xi}_i|, \quad (7)$$

weil $\vec{\xi}_i$ senkrecht zu \vec{k}_i steht, siehe Gleichung (5). Darüber hinaus ist durch die Singularität in Gleichung (6) eine Zunahme der Abweichung ξ für

$$\left(\frac{k_{2,x}}{k_{2,z}} - \frac{k_{1,x}}{k_{1,z}} \right) \rightarrow 0 \quad (8)$$

zu erwarten. Das Verhältnis $\frac{k_x}{k_z}$ beschreibt hierbei die Steigung von der Sichtlinie der Kamera. Ähnliche Steigungen der Sichtlinien der Kameras erreicht man bei spitzen Winkeln zwischen den Kameraorientierungen, was zu einer Zunahme der Abweichung der gemessenen Position führt. Die weitere Abhängigkeit von $\Delta\vec{\xi}$ in Gleichung (6) zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Abweichungen der jeweiligen Kameras. Die Differenz lässt sich mithilfe von Gleichung (4) weiter quantifizieren. Mit der Näherung $\frac{1}{n_{Luft}} \approx 1$ folgt

$$\Delta\vec{\xi} = \Delta z \sum_{m=0}^N \int_0^{m\Delta z} [\vec{\nabla} n(\vec{r}_1(z)) - \vec{\nabla} n(\vec{r}_2(z))] dz, \quad (9)$$

wobei $\vec{r}_1(z) = (x_1(z), y_1(z), z)^T$ und $\vec{r}_2(z) = (x_2(z), y_2(z), z)^T$ die optischen Wege der einzelnen Kameras beschreiben. Die Differenz lässt sich durch ein Integral über die zweite Ableitung des Brechungsindexfeldes beschreiben

$$\Delta\vec{\xi} = \Delta z \sum_{m=0}^N \int_0^{m\Delta z} \int_{\vec{r}_1(z)}^{\vec{r}_2(z)} \vec{\nabla}^2 n(\vec{r}) d\vec{r} dz. \quad (10)$$

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Messabweichung für die Bestimmung der 3D-Partikelposition mittels Triangulation nicht mehr allein vom Gradienten sondern zusätzlich von der Krümmung des Brechungsindexfeldes abhängt. Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Resultate quantifiziert und mittels Messungen validiert.

Ergebnisse

Die Methode zur Berechnung der Abweichung der Partikelposition innerhalb von Brechungsindexfeldern nach Gleichung (4) wird zunächst experimentell validiert. Dazu wird Laserlicht in eine Singlemode-Glasfaser eingekoppelt und das offene Glasfaserende als partikelimitierende punktlichtquelle genutzt. Das Faserende wird 1 cm in die heiße Düsenströmung einge-

führt und mithilfe einer Kamera abgebildet. Die heiße Düsenströmung wird horizontal zur optischen Achse verschoben, um die resultierenden Abweichungen der Partikelpositionen zu messen. Die Messwerte sind in Abb. 6 dargestellt. Die für die Berechnung genutzte Anzahl N der Steigungsdreiecke beträgt 3901 bei einem Intervall von $\Delta z = 10 \mu\text{m}$. Es zeigt sich, dass die berechneten Abweichungen innerhalb des 2σ Intervalls liegen und somit die angeführte Methode für die Berechnung der Abweichungen der Partikelposition geeignet ist. Es zeigen sich im Messvolumen Abweichungen von über $3,5 \mu\text{m}$. Eine Betrachtung der maximalen Abweichung zwischen zwei Positionen mit einem Abstand von 2 mm ergibt eine maximale relative Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit von $0,5 \%$ innerhalb des untersuchten Messvolumens. Die Abweichungen der Partikelposition innerhalb der heißen Düsenströmung sinken für kleiner werdende Abstände von dem Messvolumen zu dem Bereich mit hohen Brechungsindexgradienten. Somit sinkt das Signal zu Rausch Verhältnis mit kleiner werdenden Abstand des Messvolumens zum Mittelpunkt der Strömung. Das führt dazu, dass Messungen im Zentrum der Strömung keine repräsentativen Messwerte liefern.

Mithilfe der nach Gleichung (4) vorgestellten Methode zur Berechnung der Abweichungen lässt sich eine Karte für die gemittelten Abweichungen innerhalb der Brechungsindexverteilung bestimmen. In Abb. 7 ist die berechnete Messabweichung für die Partikelpositionen innerhalb der heißen Düsenströmung dargestellt. Die erhöhte Strahlabweichung an den Seiten der Strömung ist auf den erhöhten Brechungsindexgradienten bzw. Temperaturgradienten zurückzuführen. Die Lichtstrahlablenkung nach Durchlaufen des Brechungsindexfeldes lässt die Abweichungen linear zur Richtung z ansteigen.

Durch die Gleichungen (5) und (6) werden die Auswirkungen auf die Triangulation berechnet. Dazu wird ein Winkel von 60° zwischen zwei Kameras angenommen. Die resultierenden Abweichungen sind höher als die Abweichungen mit nur einer Kamera, vgl. Abb. 7 und 8. Die höchsten Abweichungen liegen in dem Überschneidungsbereich der hohen Abweichungen der einzelnen Kameras bei den Koordinaten $x=-2$ und $y=3$. Die Differenzterme mit den Einzelabweichungen $\Delta \vec{\xi}$ ergeben hier eine Erhöhung der Gesamtabweichung.

Fazit und Ausblick

Es wurde eine analytische Berechnung von Abweichungen der gemessenen Partikelposition bei PIV-Messungen durch den Einfluss inhomogener Medien durchgeführt und durch den Vergleich mit Messungen validiert. Dazu ist die Kenntnis der Brechungsindexverteilung notwendig, welche über die Messung der Temperaturverteilung an einer heißen Düsenströmung ermittelt wurde. Die resultierende Messabweichung für die Bestimmung der Partikelposition durch Triangulation, wie sie bei stereoskopischen und tomographischen Messungen auftritt,

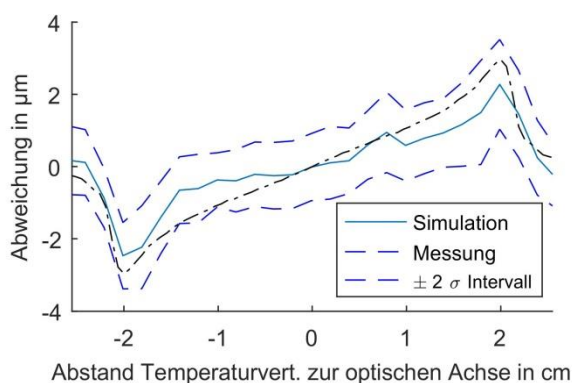


Abb. 6: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Abweichung der Partikelposition 1 cm innerhalb einer heißen Düsenströmung

ist im Allgemeinen höher als bei Standard-PIV. Zudem hängt die Messabweichung nicht allein vom Gradienten sondern auch von der Krümmung des Brechungsindexes ab. Die so bestimmte ortsabhängige Messabweichung ermöglicht eine Korrektur der im Mittel auftretenden Abweichungen. Im vorliegenden Experiment einer heißen Düsenströmung ergab sich übereinstimmend zwischen Simulation und Messung

eine maximale Messabweichung von $8,5 \mu\text{m}$ (Standard-PIV) an den steilen Flanken der Temperaturverteilung bzw. von $14,9$

μm (Stereo-PIV).

Die analytisch berechnete und gemessene Messabweichung der Partikelposition resultiert letztlich in einer Messabweichung der Geschwindigkeit. Letztere betrifft zum einen die Ortsgeschwindigkeit \vec{r} der Geschwindigkeitsverteilung und zum anderen den Betrag der Geschwindigkeitsvektoren (Elsinga et al. 2005). Als weitere Fragestellung bleibt eine Beschreibung für die Korrektur der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung. Zudem muss untersucht werden, welchen Einfluss die turbulenten Schwankungen auf die Messunsicherheit haben. Hierbei spielt die zeitliche Änderungsrate der Verwirbelungen im Verhältnis zur Zeitdifferenz zwischen den Belichtungspulsen eine entscheidende Rolle (Stella et al. 2001).

Literatur

Adrian, R.J., 2005: "Twenty years of particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 39, No. 2, pp.159-169

Beresh, S.J., Wagner, J.L., Smith, B.L., 2016: "Self-calibration performance in stereoscopic PIV acquired in a transonic wind tunnel", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 4, pp. 48

Born, M, Wolf, E., 1981: "Principles of Optics", Pergamon Press, Oxford

Elsinga, G. E., van Oudheusden, B. W., Scarano, F., 2005: "Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV", *Experiments in Fluids*, Vol. 39, pp. 246-256

Fischer, A., König, J., Czarske, J., Peterleithner, J., Woisetschlager, J., Leitgeb, T, 2013: "Analysis of flow and density oscillations in a swirl-stabilized flame employing highly resolving optical measurement techniques", *Experiments in Fluids*, Vol. 54, pp. 1622

Merzkirch, W., 2012: "Flow Visualization", Academic Press, Orlando

Prasad, A.K., Adrian, R.J., 1993: "Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows", *Experiments in Fluids*, Vol. 15, No. 1, pp. 49-60

Prasad, A.K., 2000: "Stereoscopic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 2, pp.103-116

Scarano, F., 2013: "Tomographic PIV: principles and practice", *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 28

Schlüßler, R., Gürtler, J., Czarske, J., Fischer, A., 2014a: "Planar near-nozzle velocity measurements during a single high-pressure fuel injection", *Experiments in Fluids*, Vol. 56, pp. 176

Schlüßler, R., Czarske, J., Fischer, A., 2014b: "Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 54, pp. 93-104

Schlüßler, R., Bermuske, M., J., Czarske, J., Fischer, A., 2015: "Simultaneous three-component velocity measurements in a swirl-stabilized flame", *Experiments in Fluids*, Vol. 56, pp. 183

Soloff, S.M., Adrian, R.J., Liu, Z-C, 1997: "Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry", *Measurement Science and Technology*, Vol.8, No.12, pp. 1441-1454

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*, Vol. 30, pp. 167-180

Wieneke, B., 2005: "Stereo-PIV using self-calibration on particle images", *Experiments in Fluids*, Vol. 39, No. 2, pp.267-280

Wieneke, B., 2008: "Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol.45, pp.549-556

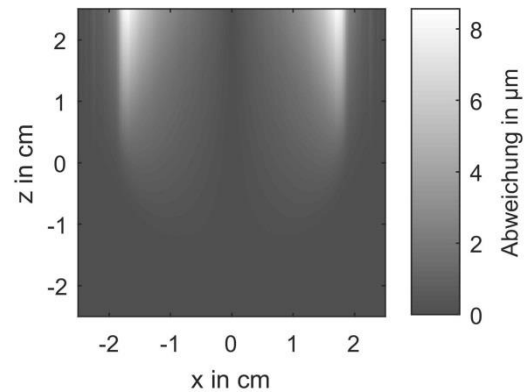


Abb. 7: Berechnete Abweichungen der Partikelposition innerhalb der heißen Düsenströmung (Standard-PIV)

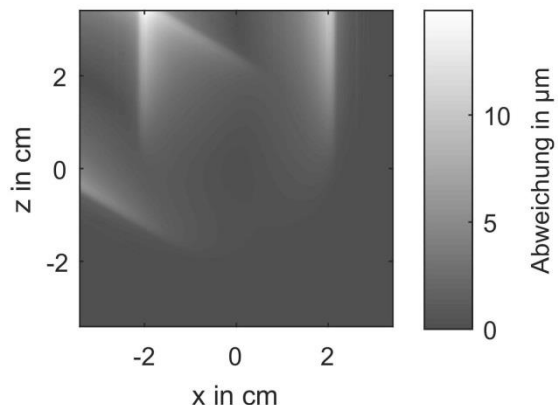


Abb. 8: Berechnete Abweichungen der Partikelposition innerhalb der heißen Düsenströmung für die Triangulation (stereo-PIV)