

Christoph Vanselow

# **Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf die Particle Image Velocimetry**

Band 5

**BI**MAQ

**SHAKER  
VERLAG**

Bremer Institut für  
Messtechnik, Automatisierung  
und Qualitätswissenschaft

# **Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern auf die Particle Image Velocimetry**

Vom Fachbereich Produktionstechnik der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

## **Dissertation**

**von**  
**M.Sc. Christoph Vanselow**

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer  
Universität Bremen
2. Gutachter: Prof. Dr. habil. Andreas Dreizler  
Technische Universität Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung: 25. August 2021



Forschungsberichte des Bremer Instituts für Messtechnik,  
Automatisierung und Qualitätswissenschaft

Band 5

**Christoph Vanselow**

**Einfluss von inhomogenen Brechungsindexfeldern  
auf die Particle Image Velocimetry**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Düren 2022

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8386-6

ISSN 2570-2491

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Kurzfassung

Für das Verständnis und die Optimierung technischer Strömungsprozesse mit heißen Gas-, Verbrennungs- und Zweiphasenströmungen sind valide Messungen der Strömungsfelder notwendig. Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist die am häufigsten verwendete optische Strömungsfeldmessmethode, wobei die Bewegung von der Strömung folgenden Partikeln mittels Kamera gemessen wird. Die Partikel werden flächig mittels gepulsten Laserlichtschnitt beleuchtet und monoskopisch mit einer Kamera oder stereoskopisch mit zwei Kameras beobachtet und damit in zwei beziehungsweise drei Richtungen verfolgt. Über den Zeitabstand der Beleuchtungspulse wird die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Eine volumetrische Beleuchtung und Beobachtung aus mindestens vier Richtungen ermöglichen tomographisch alle drei Komponenten der Geschwindigkeit zu messen. Bei der Anwendung von PIV innerhalb von heißen Gas-, Verbrennungs- und Zweiphasenströmungen treten jedoch störende Lichtbrechungen bei der Beleuchtung und Beobachtung aufgrund inhomogener Brechungsindexfelder auf. Es entstehen im Allgemeinen unbekannte Messabweichungen. Deshalb soll in dieser Arbeit die Relevanz der Brechungsindexeinfüsse geklärt werden und eine Methode gefunden werden valide PIV-Messergebnisse in Zweiphasenströmungen mit unbekannter Oberflächen zu erzielen.

Dafür werden zwei Methoden zur Quantifizierung von Lichtbrechungen für PIV-Messungen validiert. Bei der simulativen Methode wird das Brechungsindexfeld separat gemessen und mittels Ray-Tracing die Lichtbrechungen berechnet. Die Simulation beruht dabei auf der hergeleiteten theoretischen Beschreibung resultierender Messabweichungen der Partikelpositionen innerhalb eines Lichtschnitts sowie für die Triangulation bei tomographischen Messungen. Bei der experimentellen Methode werden direkt resultierende Positionsabweichungen in den Partikelbildern durch das Einbringen eines Referenzobjektes gemessen. Die Differenz zwischen gemessener und bekannter Referenzposition ergibt dann die Positionsabweichung. Durch die Fortpflanzung der Positionsabweichungen auf die Geschwindigkeit können so die PIV-Messabweichungen bestimmt werden.

In zwei heißen Luftströmungen mit einer maximalen Temperatur von 291 °C und einem Durchmesser von 6 cm wurde gezeigt, dass höhere Positionsabweichungen für schräge Beobachtungsrichtungen bei stereoskopischen als bei senkrechter Richtung bei monoskopischen PIV-Messungen entstehen. Bei tomographischen Messungen entstehen lateral höhere Positionsabweichungen als axial in Hauptblickrichtung der Kameras, wobei die volumetrische Selbstkalibrierungsmethode die Positionsabweichungen um bis zu einer Größenordnung senkt. Resultierende Geschwindigkeitsabweichungen sind für alle PIV-Messmethoden in den untersuchten heißen Strömungen nicht relevant.

Innerhalb von Verbrennungsströmungen wurde gezeigt, dass generell eine Vergrößerung der resultierenden Positions- und Geschwindigkeitsabweichungen bei steigender Reynoldszahl zu erwarten ist. Eine Korrelation zwischen Positionsabweichungen und mittlerem Flammendurchmesser konnte auch gezeigt werden. In den untersuchten vorgemischten Propanflammen entstehen besonders im Bereich der Flammenfront ab Reynoldszahlen von etwa 500 bis 700 dominante Messabweichungen von 1-2 % parallel und bei stereoskopischem PIV bis 12 % senkrecht zur Lichtschnittebene.

Mittels experimenteller Methode lassen sich Korrekturen für PIV-Messungen innerhalb von Zweiphasenströmungen durchführen. In einer untersuchten zylindrischen Wasserströmung konnten im Strömungsbereich mit einem Abstand von 3-4 mm zur Grenzschicht der Umgebungsluft die relativen PIV-Messabweichungen von 20 % auf einen niedrigen einstelligen Prozentbereich reduziert werden. Somit können mithilfe der experimentellen Methode valide PIV-Messungen innerhalb von Zweiphasenströmungen mit unbekannter Oberfläche erzielt werden.

---

## Abstract

Valid measurements of flow fields are necessary for understanding and optimizing technical flow processes involving hot gas, combustion and two-phase flows. Particle-Image-Velocimetry (PIV) is the most commonly used optical flow field measurement method, where the motion of particles following the flow is measured by a camera. The particles are illuminated two-dimensionally by pulsed laser light and observed monoscopically with one camera or stereoscopically with two cameras and thus tracked in two or three directions, respectively. The time interval between the illumination pulses is used to determine the flow velocity. Volumetric illumination and observation from at least four directions allow tomographic measurements of all three components of the velocity. However, applying PIV within hot gas, combustion, and two-phase flows, disturbing light refractions occur in illumination and observation due to inhomogeneous refractive index fields. Unknown measurement errors generally result. Therefore, this work aims to clarify the dominance of refractive index influences to the measurement uncertainty and to find a method to obtain valid PIV measurement results in two-phase flows with unknown surfaces.

For this purpose, two methods for the quantification of refractions for PIV measurements are validated. In the simulative method, the refractive index field is measured separately and ray tracing is used to calculate the refractions. The simulation is based on the derived theoretical description of resulting measurement errors of the particle positions within a light sheet as well as for the triangulation in tomographic measurements. In the experimental method, directly resulting position errors in the particle images are measured by inserting a reference object. The difference between measured and known reference position then gives the position error. By propagating the position error to the velocity, the PIV measurement error can thus be determined.

In two hot airflows with a maximum temperature of 291 °C and a diameter of 6 cm, it was shown that higher position errors arise for oblique observation directions for stereoscopic than for perpendicular directions for monoscopic PIV measurements. For tomographic measurements, higher position deviations arise laterally than axially in the main viewing direction of the cameras, with the volumetric self-calibration method lowering position deviations by up to an order of magnitude. Resulting velocity errors are not relevant for all PIV measurement methods in the hot flows studied.

Within combustion flows, it has been shown that, in general, an increase in the resulting position and velocity errors can be expected with increasing Reynolds number. A correlation between position error and mean flame diameter was also shown. In the premixed propane flames investigated, dominant measurement errors of 1-2 % parallel to the light section plane and, in the case of stereoscopic PIV, up to 12 % perpendicular to the light section plane occur, especially in the region of the flame front from Reynolds numbers of about 500 to 700.

By the experimental method, corrections can be made for PIV measurements within two-phase flows. In an investigated cylindrical water flow, in the flow region with a distance of 3-4 mm to the boundary layer of the ambient air, the relative PIV measurement errors of 20 % were reduced to a low single-digit percentage range. Thus, using the experimental method, valid PIV measurements can be obtained within two-phase flows with unknown surfaces.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik und Forschung	1
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	6
<b>2 PIV-Messungen in optisch inhomogenen Medien</b>	<b>9</b>
2.1 Messprinzip	9
2.2 Einfluss inhomogener Medien	13
2.2.1 Brechungsindex von optischen Medien	14
2.2.2 Lichtausbreitung in inhomogenen Brechungsindexfeldern	15
2.2.3 PIV-Messabweichung aufgrund von Lichtbrechungen	17
Lichtbrechungen bei der Beobachtung	18
Lichtbrechungen bei der Beleuchtung	24
2.3 Messsystem	25
<b>3 Methoden zur Quantifizierung von PIV-Messabweichungen</b>	<b>27</b>
3.1 Experimentelle Methode	28
3.2 Validierung der simulativen und experimentellen Methode	30
3.2.1 Messobjekt	30
3.2.2 Quantitativer Vergleich der Methoden	30
<b>4 Heiße Düsenströmung</b>	<b>36</b>
4.1 Monoskopisches PIV	36
4.2 Stereoskopisches PIV	40
4.3 Tomographisches PIV	43
<b>5 Verbrennungsströmung</b>	<b>48</b>
5.1 Messobjekt	48
5.2 PIV-Messungen	49
5.2.1 Messaufbau	49
5.2.2 Strömungsfelder in Abhängigkeit der Reynoldszahl	51
5.2.3 Strömungsfelder abhängig von der Position der Messebene	52
5.3 PIV-Messabweichungen abhängig von der Reynoldszahl	53
5.3.1 Messung der inhomogenen Brechungsindexfelder	53
5.3.2 Simulation der Positionsabweichungen innerhalb der Verbrennungsströmungen	59
5.3.3 Berechnung der PIV-Messabweichungen	63
5.4 PIV-Messabweichungen abhängig von der Position der Messebene	67
5.4.1 Direkte experimentelle Messung der Positionsabweichungen innerhalb der Verbrennungsströmung	68
5.4.2 Berechnung der PIV-Messabweichungen	71

---

<b>6</b>	<b>Zweiphasenströmung</b>	<b>73</b>
6.1	Zylindrische Referenzströmung . . . . .	73
6.2	Simulative Methode . . . . .	74
6.3	Experimentelle Methode . . . . .	75
6.4	Positionsabweichungen innerhalb der Zweiphasenströmung . . . . .	77
6.5	PIV-Messabweichung . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>81</b>
7.1	Ausgangslage der Arbeit . . . . .	81
7.2	Wissenschaftlicher Fortschritt . . . . .	82
7.3	Weiterführender Forschungsbedarf . . . . .	86
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Veröffentlichungsliste des Autors</b>	<b>96</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>97</b>
	<b>Curriculum Vitae des Autors</b>	<b>98</b>

---