

Particle Image Velocimetry mit adaptiv-optischer Bildkorrektur

Particle Image Velocimetry with adaptive optics image correction

Lars Büttner, Martin Teich, Nektarios Koukourakis, Jan Grottke und Jürgen Czarske

Technische Universität Dresden

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden

E-Mail: Lars.Buettner@tu-dresden.de, Internet: <http://www.tu-dresden.de/et/pmp>

Particle Image Velocimetry, optische Verzerrungen, Bildkorrektur, Adaptive Optik

Particle Image Velocimetry, optical distortions, image correction, adaptive optics

Zusammenfassung

Durch Brechungsindexvariationen verursachte optische Störungen im Lichtweg können die Meßeigenschaften optischer Strömungsmeßverfahren dramatisch verschlechtern. Sie können beispielsweise eine Verlagerung des Meßortes, systematische Meßabweichungen und eine Verringerung der Anzahl auswertbarer Signale zur Folge haben. Solche optischen Störungen treten in der Strömungsmechanik häufig in Form von fluktuierenden Grenzflächen zwischen zwei Medien auf, wie beispielsweise bei Filmströmungen, Flüssigkeitsjets oder Zweiphasenströmungen.

Zur Lösung dieses Problems können optische Strömungsmeßverfahren mit adaptiven optischen Elementen ausgestattet werden, welche die Störungen potentiell korrigieren können. In diesem Beitrag wird über ein Particle Image Velocimetry (PIV)-Meßsystem berichtet, welches einen 69-elementigen deformierbaren Spiegel zur Bildkorrektur enthält. Die Bildkorrektur erfolgt iterativ basierend auf einem aus den Partikelbildern extrahierten Gütefaktor, so daß das Korrektursystem ohne einen zusätzlichen Sensor zur Bewertung der optischen Störung auskommt.

Es werden Untersuchungen zur Bildkorrektur basierend auf einer modellhaften Strömung vorgestellt. Eine eingebrachte Defokus-Aberration führt zu systematischen und statistischen Meßabweichungen im gemessenen Geschwindigkeitsvektorfeld. Durch die Bildkorrektur gelingt es, die Abweichungen zu reduzieren und das Vektorfeld nahezu wie im Fall ohne Störung zu rekonstruieren.

Die Arbeiten bereiten den Weg zu einer PIV-Meßtechnik mit verbreiterten Einsatzmöglichkeiten, welche auch in Anwesenheit optischer Störungen Messungen mit geringer Unsicherheit erlaubt.

Einleitung

Laseroptische Strömungsmeßverfahren benötigen im Allgemeinen mindestens einen transparenten optischen Zugang zur Meßstelle, welcher die beteiligten Wellenfronten unverzerrt hindurchläßt. In vielen Anwendungen ist dies aber nicht der Fall, wenn in den beteiligten Medien signifikante Brechungsindexeffekte auftreten, die als optische Störungen fungieren. Brechungsindexfelder mit örtlich und/oder zeitlich variierendem Brechungsindex werden z.B. durch Temperatur- [1], Druck- oder Konzentrationsgradienten [2] hervorgerufen. Davon abzugrenzen sind Grenzflächenstörungen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex. In strömungsmechanischen Aufgabenstellungen existieren hierzu zahlreiche Beispiele, wie bei Filmströmungen, Wasser- oder Wellenkanälen, Flüssigkeitsjets, Mehrphasenströmungen, Blasensäulen, etc.

Die Auswirkungen auf die Meßeigenschaften optischer Meßverfahren können sehr vielfältig sein und hängen von der Art der Störung und dem Meßverfahren ab. Für die Laser-Doppler-Anemometrie wurde gezeigt, daß eine Verlagerung des Meßortes und systematische Meßabweichungen auftreten können [1,3,4]. Darüber hinaus reduziert sich die Anzahl der gültigen Meßsignale, was im Extremfall zu einem völligen Versagen der Messung führt. Auch für die Particle Image Velocimetry wurde der negative Einfluß optischer Störungen auf die Meßunsicherheit bereits dokumentiert [5].

Als Lösung für diese meßtechnische Problemstellung bietet sich das aus der Astronomie bekannte Prinzip der Wellenfrontkorrektur mittels adaptiver Optik an [6]. Dabei werden Störungen des Lichtweges durch die Atmosphäre, welche durch turbulente Strömungen unterschiedlich erwärmter Luftschichten hervorgerufen werden, detektiert und bei der optischen Abbildung korrigiert. Das Grundprinzip der Wellenfrontkorrektur besteht dabei aus einem Wellenfrontsensor, welcher die den einfallenden Strahlen aufgeprägten Störungen erfaßt, einem Flächenlichtmodulator (z.B. in Form von deformierbaren Spiegeln oder Mikrospiegelmatrizen) für die eigentliche Wellenfrontkorrektur und einer beide Bauteile verbindenden Regelelektronik.

In bisherigen Arbeiten konnten wir zeigen [3,4,7,8], daß dieses Prinzip von der Astronomie auf die laseroptische Strömungsmeßtechnik übertragen werden kann. Dazu wurde ein Laser-Doppler-Velozimeter (LDV) mit einem deformierbaren Spiegel, einem Wellenfrontsensor und einer Regelelektronik ausgestattet und beispielhaft durch eine Wasser-Luft-Grenzfläche hindurch gemessen, auf der stochastisch Oberflächenwellen erregt werden. Auf diese Weise konnten Strahlableitungen kompensiert und der Meßort konstant gehalten werden. Die Rate gültiger Signale konnte erheblich gesteigert und die Meßunsicherheit verringert werden, so daß letztendlich Messungen durch die fluktuierende Oberfläche hindurch mit einer größeren statistischen Verlässlichkeit durchgeführt werden können.

In diesem Beitrag soll nun der Einsatz der adaptiven Optik für die Particle Image Velocimetry (PIV) vorgestellt werden. Im Gegensatz zu dem vorgestellten LDV soll auf den Wellenfrontsensor verzichtet und die Regelgröße aus dem Bild extrahiert werden, so dass insgesamt der experimentelle Aufwand für die adaptive Optik reduziert wird.

Experimenteller Aufbau: Particle Image Velocimeter mit deformierbarem Spiegel

Particle Image Velocimetry (PIV) basiert auf der Korrelation zweier in einem definierten Zeitabstand aufgenommenen Kamerabilder einer mit Streupartikeln versetzten Strömung [9]. In einem Modellexperiment soll untersucht werden, wie optische Störungen die Qualität von PIV-Messungen in Form von systematischen oder statistischen Meßunsicherheiten beeinflussen und wieweit diese Unsicherheiten durch adaptive optische Komponenten reduziert werden können.

Als Testströmung diente ein in einer runden Petrischale (Durchmesser 15 cm) angeregter großflächiger Wasserwirbel, der etwa auf halber Höhe von einem horizontalen Lichtschnitt beleuchtet wurde. Die Beobachtung erfolgte senkrecht von oben mit einem Mikroskopobjektiv, wobei das Bildfeld nur einen ca. $(2,2 \times 1,65) \text{ mm}^2$ großen Ausschnitt des Wirbels betrachtete. Hinter dem Mikroskopobjektiv fällt das Licht auf einen deformierbaren Spiegel und gelangt nach einem Strahlteiler-Prisma auf eine Kamera (Basler Typ pilot piA640-210gm, 640 x 480 Pixel, max. 210 Hz Bildrate). In diesen Meßpfad kann zwischen Mikroskopobjektiv und Strömung eine optische Störung eingebracht werden; die Störung durch die Fluktuation der freien Wasser-Luft-Grenzfläche kann aufgrund der geringen benutzten Strömungsgeschwindigkeiten vernachlässigt werden.

Zur Bewertung der Auswirkungen auf das gemessene Geschwindigkeitsvektorfeld wird eine zweite Kamera verwendet. Diese Referenzkamera ist unterhalb des Wasserbeckens angebracht und vom selben Typ wie die Meßkamera. Beide Kameras sind über einen externen Trigger synchronisiert und werden mit 100 Hz betrieben. Durch eine Kalibrierung wurden beide Kameras auf das Gleiche Bildfeld ausgerichtet. Da die Störung in den optischen Pfad der Meßkamera zwischen Objektiv und Wasseroberfläche eingebracht wird, bleibt das Bild der Referenzkamera davon unbeeinflusst. Für die im Folgenden betrachteten Untersuchungen wird jeweils das Differenzbild vom oberen zum unteren aufgenommenen Geschwindigkeitsvektorfeld betrachtet.

Für die PIV-Auswertung wird die frei verfügbare Software PIVlab für Matlab [10] auf einem Standard-PC verwendet.

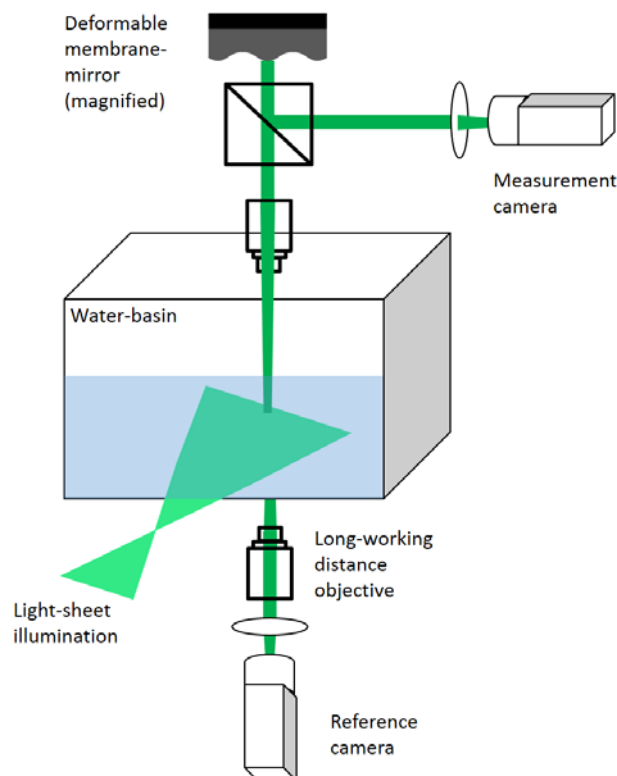


Abb. 1: Für die Untersuchungen verwendeter PIV-Aufbau mit Meßpfad (obere Kamera) und Referenzpfad (untere Kamera). Zwei Objektive mit großem Arbeitsabstand bilden die laminare Strömung aus dem Lichtschnitt heraus ab.

Der deformierbare Spiegel (Fa. Alpao/Frankreich, Typ DM69, siehe Abb. 2a) besitzt 69 Elemente, die einzeln oder als Verbund in Form von Zernike-Moden mit einer Frequenz von 1,2 kHz (3 dB Grenzfrequenz) angesteuert werden können (Abb. 2b). Eine Defokus-Aberration (Linsenwirkung) kann mit einem maximalen Peak-to-Valley-Wert von 18 μm eingestellt werden.

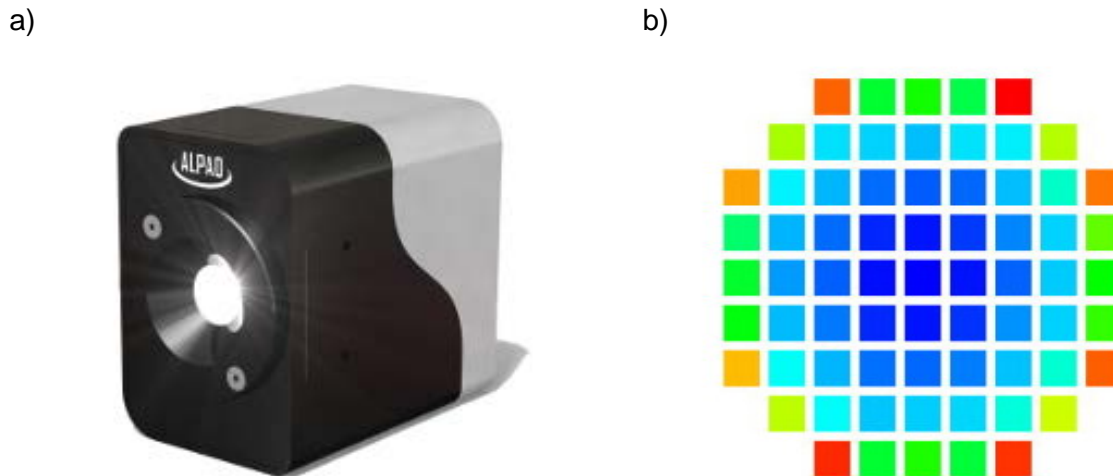


Abb. 2: a) Zur Bildkorrektur eingesetzter deformierbarer Spiegel (Quelle: [11]). b) Struktur des Spiegels mit 69 einzeln adressierbaren Spiegelementen. Die Farbkodierung kennzeichnet die Auslenkung der einzelnen Elemente, hier dargestellt für eine Defokus-Aberration (Linsenwirkung). (Quelle: [11])

Experimenteller Untersuchungen und Ergebnisse

Es wurden PIV-Bilder der Strömung mit einer Bildwiederholrate von 100 Hz aufgenommen. Anschließend wurden die Geschwindigkeitsfelder durch Mittelung über 1000 Aufnahmen erstellt. Als modellhafte Störung wird eine Linse der Brennweite $f = 140 \text{ mm}$ verwendet (Defokus-Aberration).

In Abb. 3 sind die Auswirkungen auf das gemessene Vektorfeld (Meßkamera) dem ungestörten Feld der Referenzkamera gegenübergestellt. Es zeigen sich deutliche systematische Abweichungen der Geschwindigkeit sowohl vom Geschwindigkeitsbetrag als auch von der Richtung.

Die PIV-Messung mit eingebrachter Störung resultiert in erhöhten Geschwindigkeitswerten im gesamten Bildfeld. Während bei der Referenzmessung eine mittlere Geschwindigkeit von 2,25 mm/s auftritt (Abb. 3b), wird mit eingebrachter Störung ein Wert von 3,12 mm/s gemessen (Abb. 3a). Dies resultiert aus der Verschiebung der Meßebeine innerhalb der Lichtschnittdicke in Richtung des Objektivs und der damit verbundenen Messung einer schneller strömenden Schicht des Wassers (größere Entfernung vom Beckenboden).

Ein weiterer Effekt ist die Unschärfe der abgebildeten Partikel aufgrund der eingebrachten Linsenstörung. Dies führt zu einer größeren Meßunsicherheit in der PIV-Auswertung (Anstieg von 6,9% auf 11,2% relative Standardabweichung). Diese Vergrößerung der Unsicherheit wird der Verbreiterung des Korrelationspeaks in der für die Geschwindigkeitsberechnung eingesetzten Kreuzkorrelationsfunktion zugeschrieben.

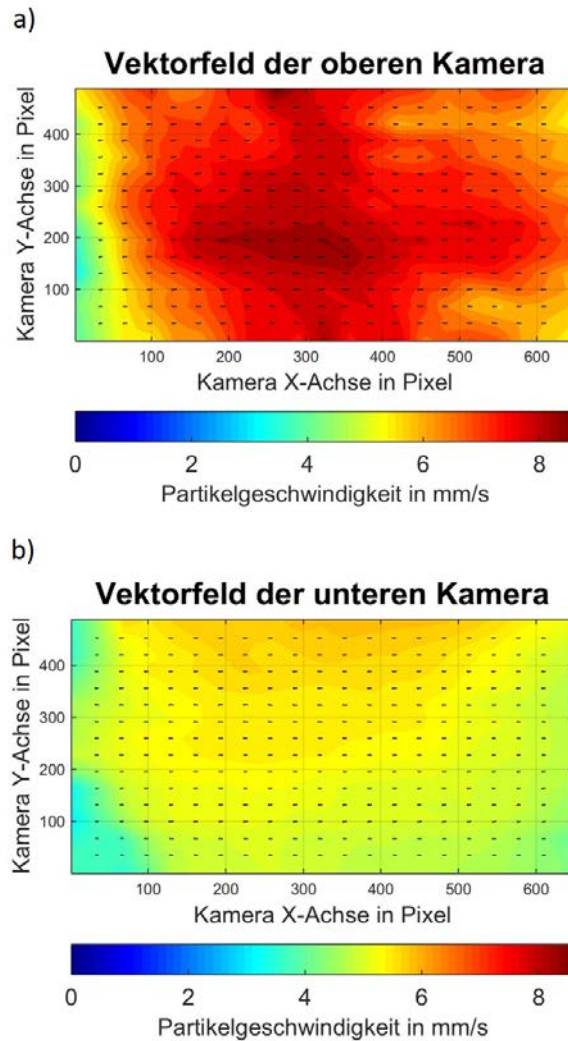


Abb. 3: a) Gemessenes Geschwindigkeitsvektorfeld der laminaren Strömung mit einer in den optischen Pfad der Meßkamera eingebrachten Störung. b) Gemessenes Vektorfeld der ungestörten Referenzkamera. Die Störung verursacht deutliche systematische Meßabweichungen.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten adaptiv-optischen LDV, welches einen Wellenfrontsensor zur Vermessung der Störung benötigte, soll hier auf einen Wellenfrontsensor verzichtet werden; die Korrektur kann statt dessen sensorlos aus dem Partikelbild der Kamera gewonnen werden. Es wird ein Gütefaktor benötigt, wofür in dieser Arbeit der maximale Intensitätsgradient, die maximale Standardabweichung und die maximale Ortsfrequenz des Partikelbildes untersucht wurden; alle drei Größen stellen ein Maß für die Schärfe des Bildes dar. Für den Korrekturvorgang wird eine bestimmte Art einer Verzerrung (Zernike-Polynom) gewählt (in diesem Fall das dritte Zernike-Polynom, welches eine Defokus-Aberration beschreibt), die Amplitude dieser Verzerrung in dem mit dem deformierbaren Spiegel verfügbaren Wertebereich durchgeföhren und die Gütefaktoren parallel dazu bestimmt. Das Ergebnis ist in Abb. 4 zu sehen. In Abb. 4b und 4c ist ein Testtarget (Thorlabs frequency grid distortion target R3L354P2) mit eingebrachter Störung und mit durchgeföhrtter Korrektur gezeigt. Es zeigt sich, daß der maximale Gradient des Bildes die signifikanteste Abhängigkeit aufweist (Abb. 4a), weshalb im Folgenden diese Größe für die Iteration genutzt wird. Für komplexere Verzerrungen können danach weitere Zernike-Polynome auf die gleiche Weise durchiteriert werden.

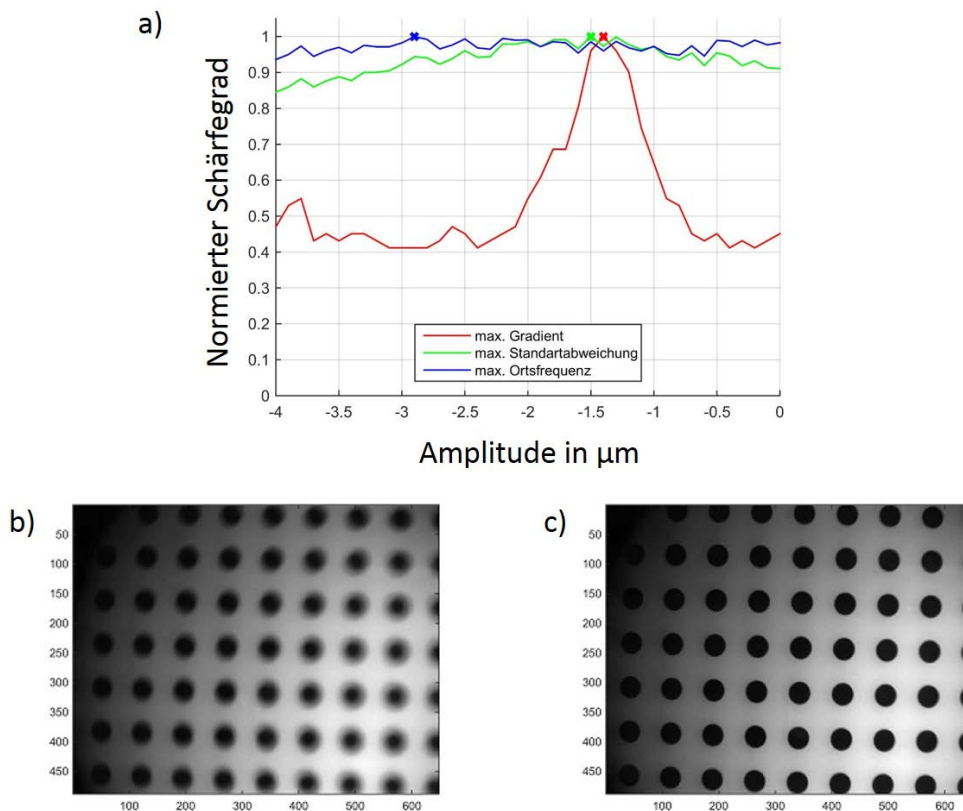


Abb. 4: Iterative Bildkorrektur. a) In Abhängigkeit der Amplitude des dritten Zernike-Polynoms (Defokussierung) wird der Schärfegrad eines Testtargets bestimmt. Als Gütefaktor dienen der maximale Intensitätsgradient, die maximale Standardabweichung und die maximale Ortsfrequenz. b) Durch Einbringen einer Störung in Form einer Linse wird das Testtarget unscharf abgebildet. c) Durch Änderung der Amplitude des Zernike-Polynoms kann die optimale Korrektoreinstellung ermittelt werden, die zu einem scharfen Bild führt.

In Abb. 5 ist die Differenz der Vektorfelder und ein Beispiel-Frame für drei Fälle dargestellt: PIV ohne Störung, mit eingebrachter Störung in Form einer Linse zwischen Objektiv und Lichtschnitt, sowie die Messung mit korrigierter Störung. Im Fall der ungestörten Messung erkennt man scharfe PIV Bilder und die Differenz der Vektorfelder zwischen Meß- und Referenzkamera ist nahezu null. Durch Einfügen der Störung sind die PIV Bilder deutlich unscharf und die Differenz des Geschwindigkeitsbetrags beträgt bis zu 3,5 mm/s.

Nach der Korrektur ist Differenz der Vektorfelder zwischen Meß- und Referenzkamera wieder nahezu null über das gesamte Bildfeld und die PIV Bilder sind scharf. Allerdings gibt es eine Einschränkung des Bildfeldes, die mit dem deformierbaren Spiegel nicht korrigierbar ist, aber bei der PIV Auswertung in Form einer Re-Skalierung des Meßfeldes eingegangen ist.

Desweiteren zeigt sich eine Verbesserung der Meßeigenschaften nach der Korrektur auch in den Standardabweichungen. Beim Einbringen der Störung erhöht sich die relative Unsicherheit um den Faktor zwei und kann auch durch die Korrektur wieder um den Faktor zwei reduziert werden.

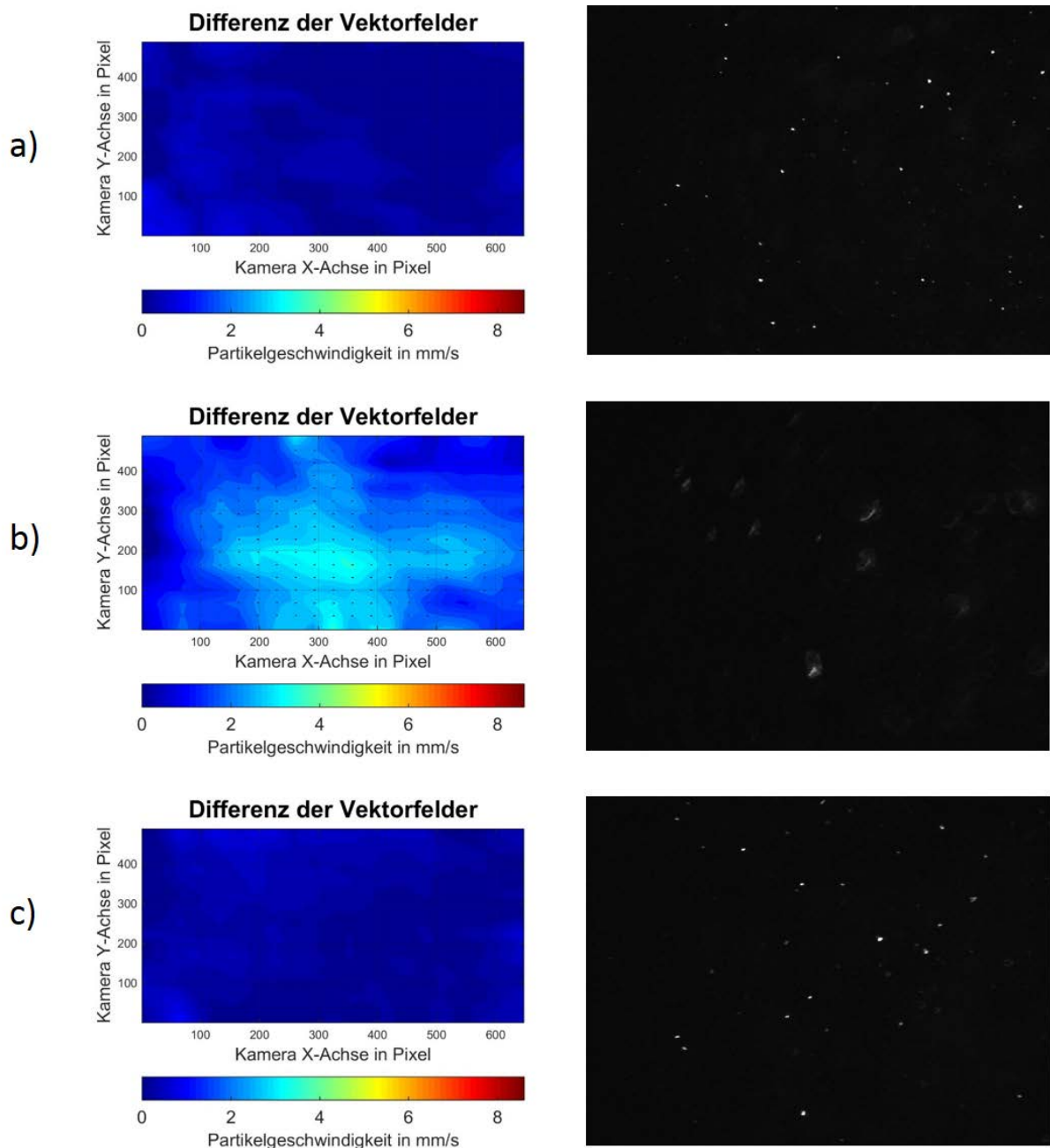


Abb. 5: Partikelbilder und Differenz der Vektorfelder von Mess- und Referenzkamera. a) ohne Störung, b) mit eingebrachter Störung (Defokus-Aberration) und c) mit korrigierter Störung. Zu beachten ist, dass beim Einbringen einer Linse ($f=140$ mm) in Form einer Störung zusätzlich zur Defokussierung eine Bildfeldeinschränkung auftritt.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein PIV-System vorgestellt, in das ein deformierbarer Spiegel mit 69 einzeln adressierbaren Elementen implementiert wurde, um mögliche optische Störungen im Lichtweg korrigieren zu können. Die Korrektur erfolgt in Form einer iterativen Durchstimmung, wobei verschiedene Verzerrungsarten in ihrer Amplitude variiert werden. Das Meßsystem kommt daher ohne einen Wellenfrontsensor aus, was den optischen Aufbau unaufwendig hält. Als

Gütekriterium für die Bewertung der Bildqualität bei der Iteration hat sich der maximale Intensitätsgradient als besonders geeignet herausgestellt. An einer laminaren Strömung konnte mit dem Beispiel einer Defokus-Aberration gezeigt werden, daß deutliche systematische Abweichungen bei der Geschwindigkeitsbestimmung induziert werden. Diese können durch die Bildkorrektur auf nahezu Null wieder reduziert werden.

Zukünftig sollen das Systemverhalten und die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsmessung auch für andere Arten optischer Störungen untersucht werden. Durch eine schnelle, automatisierte Iteration soll das System echtzeitfähig gemacht werden, so daß auch zeitveränderliche Störungen korrigiert werden können. Mit einem solchen System kann perspektivisch ein Beitrag zur Vermessung Filmströmungen oder Flüssigkeitsjets geleistet werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung im Rahmen des Reinhardt Koselleck-Projektes CZ 55/30.

Literatur

- [1] C. Resagk , R. du Puits, A. Thess, „Error estimation of laser-Doppler anemometry measurements in fluids with spatial inhomogeneities of the refractive index”, *Exp Fluids* 35(4), S. 357–363, 2003
- [2] J. König, K. Tschulik, L. Büttner, M. Uhlemann, J. Czarske, „Analysis of the Electrolyte Convection inside the Concentration Boundary Layer during Structured Electrodeposition of Copper in High Magnetic Gradient Fields”, *Analytical Chemistry* 85(6), pp. 3087-309, 2013
- [3] L. Büttner, C. Leithold, J. Czarske, “Interferometric Velocity Measurements through a fluctuating Gas-Liquid Interface employing Adaptive Optics”, *Optics Express* 21(25), S. 30653-30663, 2013
- [4] L. Büttner, C. Leithold, J. Czarske, „Neue Möglichkeiten für die laseroptische Strömungsmesstechnik durch den Einsatz von adaptiver Optik“, 21. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Beitrag 33, München, 3.–5.09.2013
- [5] R. Schlüßler, J. Czarske, A. Fischer, „Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations“, *Optics and Lasers in Engineering* 54, S. 94–104, 2014
- [6] J.M. Beckers, "Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performance, and Applications", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 31(1), S. 13–62., 1993
- [7] H. Radner, L. Büttner, J. Czarske, “Interferometric velocity measurements through a fluctuating phase boundary using two Fresnel guide stars”, *Opt. Lett.* 40(16), 3766-3769, 2015
- [8] L. Büttner, C. Leithold, H. Radner, J. Czarske, M. Stürmer, U. Wallrabe, „Strömungsmessungen durch fluktuierende Grenzflächen mittels adaptiver optischer Komponenten“, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 22. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“*, Beitrag 1, Karlsruhe, 9.–11.09.2014
- [9] M. Raffel, C.E. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, „Particle Image Velocimetry: A Practical Guide”, Springer, 2nd ed. 2007
- [10] W. Thielicke, E.J. Stamhuis, “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB”, *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, 2014
- [11] www.alpao.com