

Strömungsmessungen durch fluktuierende Grenzflächen mittels adaptiver optischer Komponenten

Flow measurement through fluctuating interfaces using adaptive optic components

L. Büttner¹, C. Leithold¹, H. Radner¹, J. Czarske¹, M. Stürmer², U. Wallrabe²

¹ Technische Universität Dresden

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur für Meß- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

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

² Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), Lehrstuhl für Mikroaktorik
Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

Laseroptische Strömungsmeßtechnik, Wellenfrontkorrektur, Adaptive Optik
Laser-optic flow measurement, wave front correction, adaptive optics

Kurzfassung

Laseroptische Strömungsmeßverfahren benötigen im Allgemeinen einen transparenten optischen Zugang zur Meßstelle, welcher die beteiligten Wellenfronten unverzerrt hindurchläßt. In vielen Anwendungen ist dieses aber nicht der Fall, z.B. in Anwesenheit von Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsgradienten oder wenn durch eine fluktuierende Gas-Flüssigkeits-Grenzschicht hindurch gemessen werden soll. Die Schwankungen rufen Verzerrungen der Wellenfronten hervor und verringern damit die Anzahl der gültigen Meßsignale, erhöhen die Meßunsicherheit oder führen im Extremfall zu einem völligen Versagen der Messung. Als Lösung für dieses Problem kann das aus der Astronomie bekannte Prinzip der Wellenfrontkorrektur mittels adaptiver Optiken auf die Strömungsmeßtechnik übertragen werden.

In diesem Beitrag wird ein Meßsystem auf Basis eines Laser-Doppler-Velozimeters (LDV) vorgestellt, welches auf Messungen durch eine fluktuierende Gas-Flüssigkeits-Grenzschicht ausgelegt ist. Dabei erfaßt ein Wellenfrontsensor die von den Oberflächenwellen verursachten Störungen. Die von diesen erzeugten Strahlablenkungen und Defokussierungen werden durch jeweils eine adaptive, d.h. elektrisch durchstimmbare Linse und einen zweiachsigen, elektromagnetischen Kippspiegel korrigiert, so daß sich ein ortsfestes Meßvolumen im Flüssigkeitsvolumen bildet. Mit der adaptiven Linse können nun größere Störampplituden korrigiert werden, als dieses mit dem zuvor genutzten MEMS-Spiegel möglich war. Eine deutliche Verbesserung der Ausbeute gültiger Meßsignale und eine Reduzierung der Meßunsicherheit wurden so erzielt. Die Vermessung des Geschwindigkeitsprofils einer eingetauchten Wasserturbine konnte erfolgreich durchgeführt werden und bestätigt diese Resultate.

Solche Meßsysteme mit Korrekturfunktion für optische Wellenfrontstörungen können zukünftig völlig neue Anwendungen ermöglichen, die vorher durch eine unzugänglich waren. Als Beispiele seien hier Filmströmungen, Wasserkanäle mit freien Oberflächen oder freie Flüssigkeitsjets in Gasen genannt.

Einleitung

Laseroptische Strömungsmeßverfahren benötigen im Allgemeinen einen transparenten optischen Zugang zur Meßstelle, welcher die beteiligten Wellenfronten unverzerrt hindurchläßt. In vielen Anwendungen ist dieses aber nicht der Fall, wenn in den beteiligten Medien signifikante Brechungsindexeffekte auftreten, die als optische Störungen fungieren. Solche Störungen lassen sich grob in Volumen- und Grenzflächenstörungen unterteilen. Als Beispiele für Volumenstörungen sind zu nennen:

- Temperaturgradienten, die z.B. in Verbrennungsvorgängen [1,2] oder Experimenten mit thermischer Konvektion auftreten können
- Druckgradienten, z.B. bei Druckstößen in kompressiblen Medien [3]
- Konzentrationsgradienten, z.B. in Gasgemischen oder Elektrolysezellen [4]

Störungen durch fluktuierende Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Medien sind in folgenden Fällen zu erwarten:

- bei Strömungen mit offener Oberfläche, z.B. an Wasser/- oder Wellenkanälen oder an freien Flüssigkeitsjets [5]
- in Mehrphasenströmungen, bspw. Blasensäulen
- bei Messungen hinter komplex geformten Grenzflächen, z.B. levitierten Tröpfchen
- Strömungen entlang von Phasengrenzflächen
- in geschlossenen Maschinen, bei denen durch Seeding ein Niederschlag an einem Zugangsfenster auftritt [6]
- bei Messungen durch komplex geformte optische Zugänge, z.B. bei Rohrleitungen
- bei Filmströmungen

In allen Fällen rufen die Brechungsindexschwankungen Verzerrungen der Wellenfronten hervor und verringern damit die Anzahl der gültigen Meßsignale, erhöhen die Meßunsicherheit oder führen im Extremfall zu einem völligen Versagen der Messung.

Als Lösung für diese meßtechnische Problemstellung bietet sich das aus der Astronomie bekannte Prinzip der Wellenfrontkorrektur mittels adaptiver Optik an [7-9]. 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 Mikrospiegelarrays) für die eigentliche Wellenfrontkorrektur und einer beide Bauteile verbindenden Regelelektronik.

Am Beispiel eines Laser-Doppler-Velozimeters (LDV) wurde im letzten Jahr gezeigt [10,11], daß dieses Prinzip von der Astronomie auf die laseroptische Strömungsmeßtechnik übertragen werden kann. Beispielfür die oben genannten Störungen wurde eine Wasser-Luft-Grenzfläche betrachtet, auf der stochastisch Oberflächenwellen erregt werden. Durch die Wellenfrontkorrektur mittels eines mikro-elektromechanischen (MEMS) Spiegels mit deformierbarer Membran als Aktor konnten z.B. Strahlablenkungen kompensiert und so der Meßort konstant gehalten werden. Eine Relevanz für diesen Fall besteht allgemein bei Wasserströmungen mit offener Oberfläche, z.B. bei Wasserkanälen, Wellenkanälen oder bei Filmströmungen. Als spezielles Beispiel aus der Reaktortechnik sei das Einspeisen von Kühlwasser in den Kühlkreislauf eines Reaktors bei niedrigem Füllstand in Form eines Jets genannt. Hier sind Untersuchungen zur Kelvin-Helmholtz-Instabilität und zum Wärmeübergang unter Berücksichtigung von Konvektionseffekten von großem Interesse [5]. Ein solcher Freistrahl stellt allerdings eine besondere Herausforderung an die Meßtechnik dar, da eine optische Zugänglichkeit nur durch die allseits freie, fluktuierende Oberfläche besteht.

In diesem Beitrag wird über die neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet berichtet.

Vorbetrachtungen

Als wichtiges Ergebnis der bisherigen Untersuchungen stellte sich heraus, daß die dominierenden Störeinflüsse, die zu einer Abnahme der Anzahl valider Meßsignale und zu einer Erhöhung der Meßunsicherheit führen, durch folgende Effekte gegeben sind [7,8]:

- den Hub der Wasseroberfläche, der zu einer Verlagerung des Meßortes führt
- die Verkippung der Wasseroberfläche, die ebenfalls zu einer Verlagerung des Meßortes oder, je nach Orientierung der Oberfläche, zu windschiefen Strahlen führt,
- eine Krümmung der Wasseroberfläche, die eine Defokussierung der Teilstrahlen bewirkt.

Höhere Ordnungen der Störung, d.h. Anteile mit höherer Ortsfrequenz, sind größtenteils vernachlässigbar. Dieses wichtige Erkenntnis rührt aus dem Umstand, daß der Laserstrahldurchmesser beim Durchstoßen der Wasseroberfläche einen Durchmesser hat, der deutlich kleiner als die Wellenlänge der Kapillarwellen ist. Darüber hinaus konnte geklärt werden, daß die Korrigierbarkeit auf kleine Störampplituden beschränkt war, was dem endlichen Stellbereich des MEMS-Spiegels geschuldet war. Hiermit konnten lediglich Defokussierungen bis zu einer Stärke von 0,3 dpt korrigiert werden.

Mit diesen Erkenntnissen ist es nun möglich, die adaptiven Optiken durch geeignetere Komponenten zu ersetzen und ein insgesamt einfacheres Meßsystem zu realisieren. Als adaptive optische Komponenten kommen nun zum Einsatz:

- eine elektrisch durchstimmbare Linse (Fluidmembranlinse) mit einem Defokussierbereich von ± 40 dpt und einer 3-dB-Grenzfrequenz von 60 Hz, hergestellt vom IMTEK,
- ein zweiachsiger Kippspiegel mit elektromagnetischem Antrieb mit einem mechanischen Stellbereich von $\pm 1,5^\circ$ und einer 3-dB-Grenzfrequenz von 850 Hz, Fa. Optics in Motion OIM101-one Inch FSM,

wobei in jedem Teilstrahl jeweils beide Komponenten verbaut sind. Mit diesen Komponenten wird nun eine bessere Korrigierbarkeit bei größeren Störampplituden erwartet.

Das Regelkonzept: Laser-Doppler-Velozimeter mit adaptiven optischen Komponenten

Grundlage für eine Korrektur der von einer fluktuierenden Grenzfläche aufgeprägten Störungen ist eine örtlich und zeitlich hochauflösende Erfassung der Wellenfronten. Dafür wird ein Wellenfrontsensor nach dem Hartmann-Shack-Prinzip verwendet, der aus einer Mikrolinsenmatrix besteht, von denen ca. 8×8 effektiv genutzt werden. Die erzeugten Brennflecke werden mit einer Transferlinse auf eine Kamera übertragen. Eine auf einem Standard-PC installierte Software bestimmt die Auslenkungen der Brennflecke von der Nulllage und rekonstruiert damit die Wellenfront.

Aus der Wellenfront müssen für eine vollständige Regelung der zwei LDV-Strahlen insgesamt die folgenden sechs Stellgrößen errechnet werden:

- die Brennweite der durchstimmbaren Linse für den 1. Strahl
- die Brennweite der durchstimmbaren Linse für den 2. Strahl
- die Auslenkung des Kippspiegels in x-Richtung für den 1. Strahl
- die Auslenkung des Kippspiegels in y-Richtung für den 1. Strahl
- die Auslenkung des Kippspiegels in x-Richtung für den 2. Strahl
- die Auslenkung des Kippspiegels in y-Richtung für den 2. Strahl

Vor dem Betrieb der Regelung wird zunächst eine Kalibrierung durchgeführt. Dazu werden in Abwesenheit der Störung elektrische Signale auf das System gegeben, die dadurch entstehenden Veränderungen der Wellenfront ausgewertet und diese Zusammenhänge in Form einer Transfermatrix gespeichert. Während des Regelbetriebs wird umgekehrt vorgegangen: Die Abweichungen der Wellenfront von der Sollvorgabe werden mit der invertierten Matrix multipliziert, um daraus die Stellsignale zu ermitteln, die gerade die Störung kompensieren

(lineare Störgrößenaufschaltung). Als Regeltyp wird ein Integralregler verwendet, der sich durch eine verschwindende Regelabweichung auszeichnet.

Die Regelrate (Anzahl der Regelzyklen pro Zeiteinheit) hängt von unterschiedlichen Parametern ab, so z.B. von der Anzahl der ausgewerteten Brennflecke des Hartmann-Shack-Sensors. Werden nur vier Brennflecke ausgewertet, was der minimal erforderlichen Anzahl entspricht, so wird eine Regelrate von 1000 Hz erzielt. Um eine hinreichende Empfindlichkeit gegenüber der Wellenfrontverzerrung zu erreichen, werden bei den im Folgenden beschriebenen Experimenten ca. 20 Brennflecke ausgewertet. Hierbei erreicht das System ca. 540 Regelzyklen/s. Bedingt durch die Einschwingzeit des Regelkreises konnten damit zuverlässig Störungen von bis zu 42 Hz ausgeglet werden, was den Großteil des Frequenzspektrums der erzeugten Kapillarwellen abdeckt, siehe [10,11].

Das Modellexperiment: Turbulente Luft-Wasser-Grenzschicht

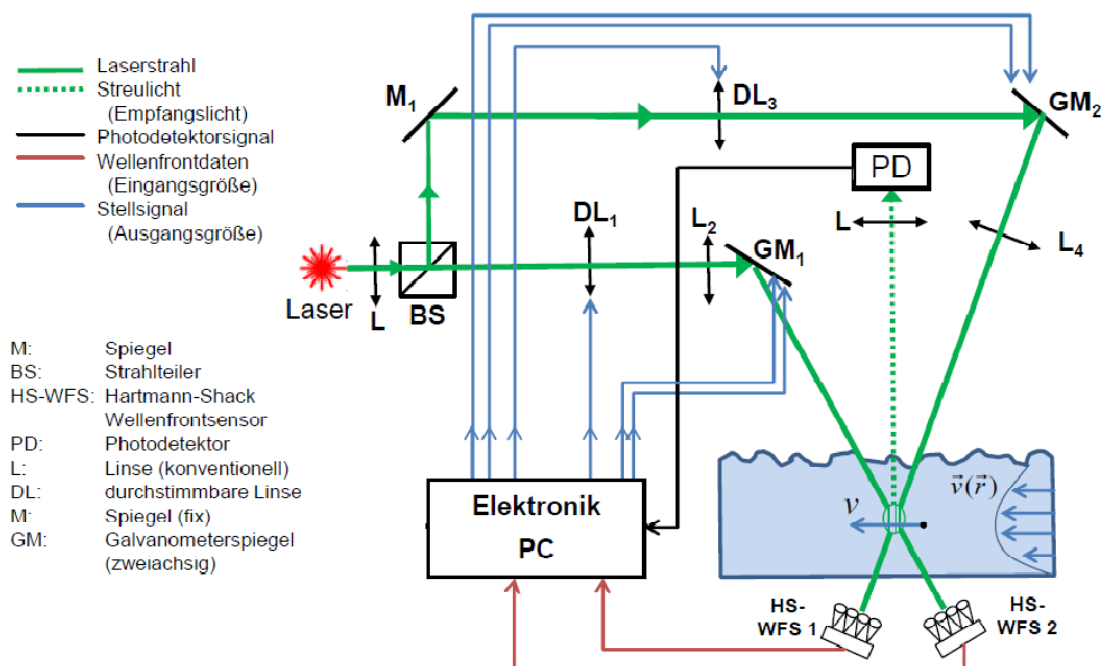


Abb. 1: Realisiertes Meßsystem (Laser-Doppler-Velozimeter) mit adaptiven Linsen und elektromagnetischen Kippspiegeln zur Korrektur der von einer fluktuierenden Gas-Wasser-Grenzschicht erzeugten optischen Störungen.

Es wurde ein Laser-Doppler-Velozimeter mit einem 532-nm-Festkörperlaser als Lichtquelle aufgebaut. Ein Prismenstrahlteiler erzeugt zwei Teilstrahlen, die zunächst horizontal auf einem Breadboard geführt werden. In den Strahlwegen jedes Teilstrahls befinden sich neben strahlkonditionierenden Linsen auch jeweils eine durchstimmbare Linsen und ein elektromagnetischen Kippspiegel, siehe Abb. 1. Beide Strahlen werden schließlich durch statische Umlenkspiegel vertikal nach unten gelenkt und zur Überschneidung gebracht. Die Strahlen werden durch ein mit Wasser gefülltes Bassin mit freier Oberfläche geleitet, in dem sich eine Pumpe befindet. Diese hat zweierlei Funktion: Zum einen werden damit Kapillarwellen erzeugt, die die optische Störung darstellen, zum anderen stellt die Düsenströmung das Untersuchungsobjekt dar. Die Bewegungen der durch durchstimmbaren Linsen und die Kippspiegel beeinflussten Strahlen werden mittels Kepler-Teleskope als Transferoptiken auf die Wasseroberfläche übertragen, indem der Kippspiegel auf die eingangsseitige und die Wasseroberfläche auf die ausgangsseitige Brennebene justiert sind. Damit wird sichergestellt, daß der Durchstoßpunkt der Strahlen auf der Wasseroberfläche und letztendlich die Position des Meßvolumens konstant gehalten wird.

Charakterisierung der Meßeigenschaften

Für die Charakterisierung der Eigenschaften des Meßsystems wird das Meßvolumen unterhalb des Bassins justiert. Die Korrektur wurde zunächst für nur einen Strahl durchgeführt, während der andere durch eine Glasplatte auf der Wasseroberfläche unbeeinflusst blieb. Unterhalb des Bassins wird als Geschwindigkeitsnormal ein mit einer Lochblende versehener optischer Chopper plziert, um Streulichtsignale mit definierter Dopplerfrequenz zu erzeugen. Die Störung, hier repräsentiert durch die Oberflächenwelle, kann einerseits die Überlappung der Teilstrahlen verringern und so Signale von schlechter Qualität erzeugen, und andererseits den Streifenabstand ändern, was zu einer Meßabweichung führt. Hier wurden 1000 Burstsignale erzeugt und daraus der Anteil der auswertbaren Signale sowie deren Dopplerfrequenz bestimmt. Für jede festgestellte Amplitude der Störung ergeben sich damit eine bestimmte mittlere Validierungsrate und eine mittlere Meßunsicherheit, die in den Abb. 2 a und b dargestellt ist. Es ist zu erkennen, daß ohne Korrektur (Regelkreis ausgeschaltet) die Anzahl der gültigen Signale mit steigender Störampplitude rapide einbricht und die Meßunsicherheit ansteigt. Mit aktivierter Korrektur kann die Validierungsrate deutlich verbessert und die Meßunsicherheit verringert werden. Beispielsweise kann bei einer Störampplitude von 75 μm die Validierungsrate von 16 % auf 88 % verbessert werden. Zum Vergleich sind noch die Korrekturkurven, die im letzten Jahr mit dem MEMS-Spiegel als Korrektur элемент erzielt wurden [10,11], ebenfalls mit eingezeichnet. Bei der genannten Störampplitude konnten dort lediglich 58 % Validierungsrate erreicht werden. Damit ist dargelegt, daß die Kombination aus adaptiver Linse und elektromagnetischen Kippspiegel für die betrachtete Störung eine deutlich bessere Korrigierbarkeit ermöglicht. Grund dafür sind größeren Stellbereiche der Komponenten (Winkelbereich des Kippspiegels und Defokussierungsbereich der adaptiven Linse), die größere Störampplituden zu korrigieren vermögen.

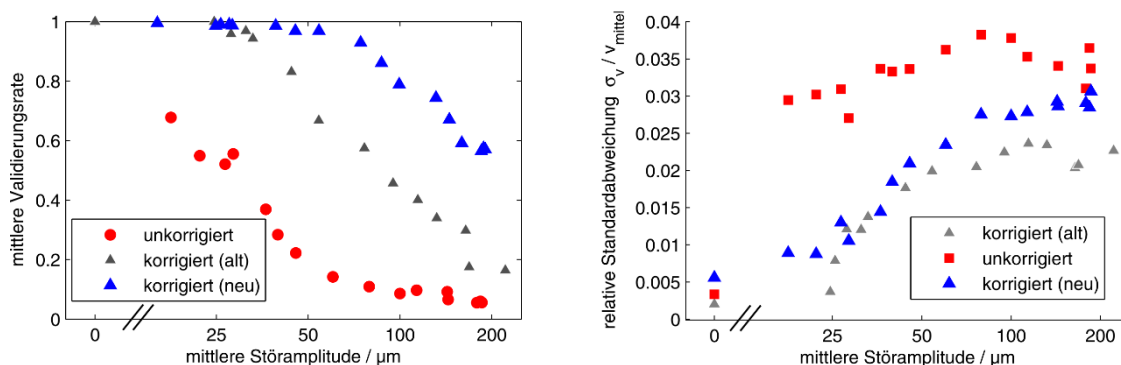


Abb. 2: Validierungsrate (links) und Meßunsicherheit (rechts) in Abhängigkeit von der mittleren Störampplitude der Oberflächenwelle mit und ohne Korrektur durch das Adaptive-Optik-System mit durchstimmbarer Linse und elektromagnetischen Kippspiegeln („neu“). Zum Vergleich sind auch die Kurven mit eingezeichnet, die mit einem MEMS-Spiegel als Aktor erhalten wurden („alt“), siehe [10,11].

Strömungsmessungen

Für die Demonstration einer Strömungsmessung wird das Meßvolumen innerhalb des Bassins ca. 10 mm vor einer im Wasser eingetauchten Düse von 10 mm Innendurchmesser platziert, um das Geschwindigkeitsprofil der austretenden Wasserströmung zu erfassen. Beiden Strahlen treten durch die turbulente Wasseroberfläche und werden korrigiert. Es wird die Qualität der erhaltenen Burstsignale ausgewertet.

In Abb. 3a ist das Geschwindigkeitsprofil der Düsenströmung inklusive der Standardabweichung aufgetragen, wobei letztere nicht vom Meßsystem, sondern von der in der Strömung vorherrschenden Schwankung dominiert wird. Der Einfluß der Wellenfrontkorrekturfunktion auf die Messung ist in Abb. 3b dargestellten Konfidenzintervall für die mittlere Geschwindigkeit zu erkennen, welches mit Korrektur deutlich verringert werden kann. Der Grund dafür

ist den Abb. 3c und 3d zu entnehmen: Aus dem mit Korrektur im Mittel höheren Interferenzkontrast der Burstsignale (Abb. 3c) resultiert eine spürbar höhere Anzahl gültiger, d.h. auswertbarer Signale (Abb. 3d). Damit stehen für eine feste, vorgegebene Meßzeit insgesamt mehr gültige Signale für eine Auswertung bereit, die sich dann in einem geringeren Konfidenzintervall, d.h. einer geringeren Meßunsicherheit äußern. Als Fazit kann festgehalten werden, daß die mit dem Geschwindigkeitsnormal (rotierende Lochblende) ermittelten Verbesserungen der Meßeigenschaften in einer realen Strömungsmessung ebenfalls auftreten und somit bestätigt werden.

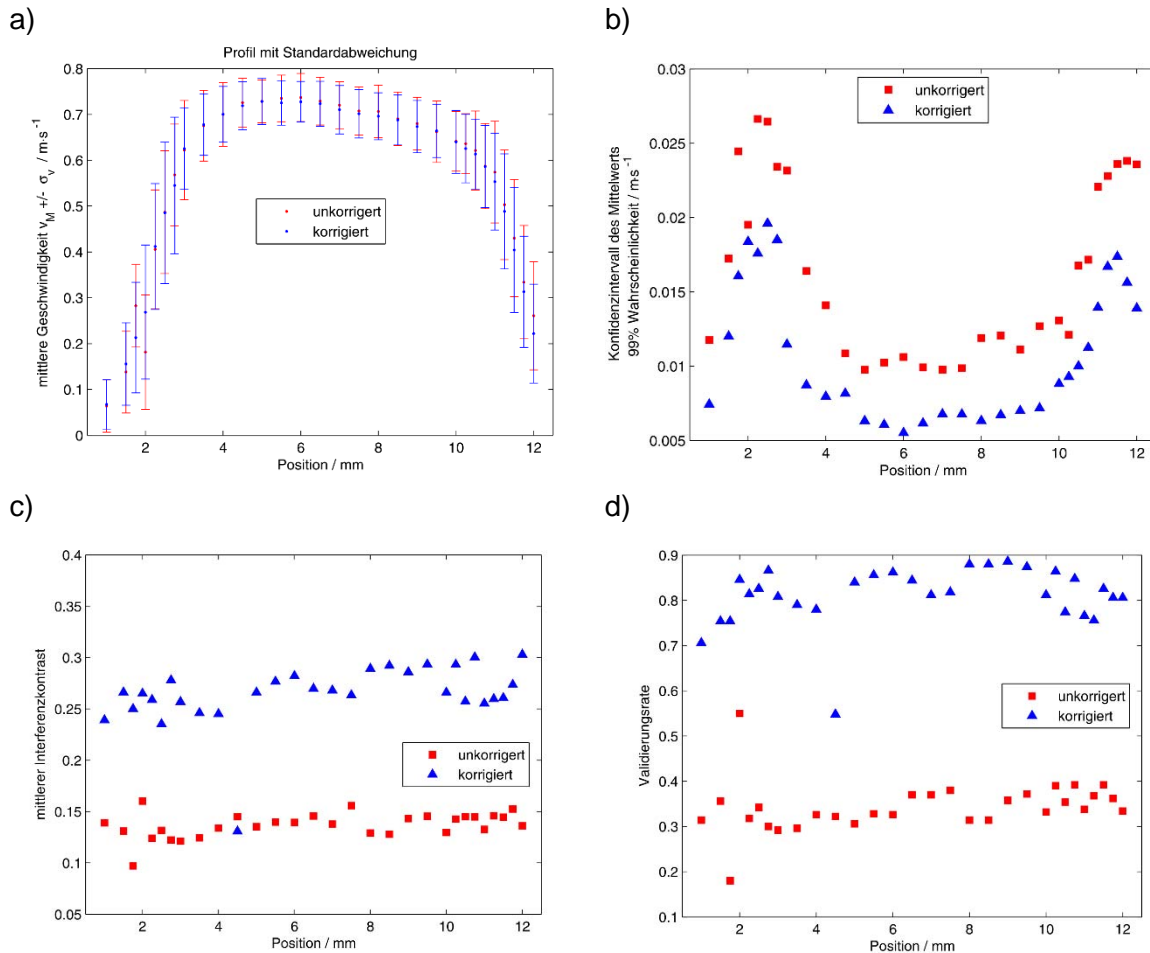


Abb. 3: Vermessung des Strömungsprofils einer im Bassin eingetauchten Düse. a) Profil der mittleren Geschwindigkeit mit der Standardabweichung als Fehlerbalken. Die Größe der Fehlerbalken wird von der Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit dominiert. b) Konfidenzintervall des Mittelwertes als Maß für die Meßunsicherheit der Geschwindigkeit, c) mittlerer Interferenzkontrast und d) mittlere Validierungsrate, jeweils aufgetragen über der Position über den Düsendurchmesser.

Zusammenfassung

Schwankungen des Brechungsindex, hervorgerufen z.B. durch variable Brechungsindexfelder oder durch fluktuierende Grenzflächen, können die Eigenschaften laseroptischer Meßverfahren spürbar beeinträchtigen oder eine sinnvolle Messung sogar vollständig verhindern. In diesem Beitrag wurde demonstriert, wie durch den Einsatz adaptiver optischer Komponenten auch unter dem Einfluß optischer Störungen Messungen ermöglicht werden können. Dazu wurde beispielhaft ein Laser-Doppler-Velozimeter mit elektrisch durchstimmbaren Linsen und mit elektromagnetischen Kippspiegeln ausgestattet. Deren Ansteuerung durch einen Regelkreis ermöglicht die Korrektur von optischen Störungen. In diesem Beitrag fungierte

eine fluktuierende Grenzfläche, dargestellt durch eine mit Kapillarwellen angeregte Wasseroberfläche, als dynamische Störung.

Es kann gezeigt werden, mit einer aktiven Kompensation der Störungen die Rate gültiger Meßsignale deutlich erhöht werden kann, beispielsweise von 16 % für den unkorrigierten Fall auf 88 % bei einer Stör-Amplitude von 75 μm . Gleichzeitig wird die Meßunsicherheit verringert. Durch die erfolgreich durchgeführte Vermessung des Geschwindigkeitsprofils einer eingetauchten Wasserdüse konnte die Anwendbarkeit des Meßsystems auf reale Strömungssituationen demonstriert werden. Die hier durchgeführte Analyse der Meßsignale bestätigt die zuvor schon mit einem Geschwindigkeitsnormal nachgewiesenen Verbesserungen der Meßeigenschaften. Messungen in Anwesenheit von optischen Störungen können nun in deutlich kürzerer Zeit und mit größerer statistischer Verlässlichkeit durchgeführt werden.

Solche Meßsysteme mit Korrekturfunktion für optische Wellenfrontstörungen können zukünftig völlig neue Anwendungen ermöglichen, die vorher unzugänglich waren. Perspektivisch sollen die Messungen in Reflexion stattfinden, um mit nur einem optischen Zugang auszukommen. Als Beispiele für Anwendungen seien hier Filmströmungen, Wasserkanäle mit freien Oberflächen oder Flüssigkeits-Freistrahlen in Gasumgebungen genannt.

Literatur

- [1] C. Willert, C. Hassa, G. Stockhausen, M. Jarius, M. Voges, J. Klinner, "Combined PIV and DGV applied to a pressurized gas turbine combustion facility", *Meas. Sci. Technol.* 17, pp. 1670–1679, 2006
- [2] R. Schlüßler, J. Czarske, A. Fischer, "Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations", *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 94-104, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.10.011, 2014
- [3] G.E. Elsinga, B.W. van Oudheusden, F. Scarano, "Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV", *Exp. Fluids* 39, pp. 246–256, 2005
- [4] 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
- [5] Lucas, D.; Beyer, M.; Krepper, E.; Vallée, C.; Höhne, T.; Seidel, T.; Szalinski, L.; Hampel, U.; Schmidtke, M.; Schleicher, E.; Pietruske, H.; Schütz, P.; Danciu, D.; Zhang, D.; Deendarlianto; Barthel, F.; Zippe, C.; Hänsch, S.; Carl, H.; Weiß, F.-P., „TOPFLOW-Experimente, Modellentwicklung und Validierung von CFD-Codes für Wasser-Dampf-Strömungen mit Phasenübergang“, Wissenschaftlich-Technischer Bericht Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf; HZDR-011 2011, ISSN: 1437-322X
- [6] C. Willert, M. Jarius, "Planar Flow Field Measurements in Atmospheric and Pressurized Combustion Chambers", 4th Int. Symp. Particle Image Velocimetry, PIV'01, paper 1083, Göttingen, Germany, September 17-19, 2001
- [7] J.M. Beckers, "Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performance, and Applications", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 31(1), S. 13–62., 1993
- [8] John W. Hardy, "Adaptive Optics for Astronomical Telescopes", Oxford University Press, New York 1998, ISBN: 019509019-5.
- [9] A. Glindemann, S. Hippler, T. Berkefeld, W. Hackenberg, "Adaptive Optics on Large Telescopes", *Experimental Astronomy* 10, 2000
- [10] 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, 3.–5.09.2013
- [11] 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