

## **Neue Möglichkeiten für die laseroptische Strömungsmeßtechnik durch den Einsatz adaptiver Optik**

### **New Possibilities for laser-optic flow measurement by using adaptive optics**

**Lars Büttner, Christoph Leithold, Jürgen Czarske**

Technische Universität Dresden

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur für Meß- und Prüftechnik

Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

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

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

#### **Kurzfassung**

Optische Meßverfahren haben sich u.a. wegen ihrer hohen örtlichen und zeitlichen Auflösung zu einem wichtigen und unverzichtbaren Werkzeug für die Strömungsforschung entwickelt. Für die Lichtausbreitung werden sowohl für den Sende- als auch für den Empfangsteil ungestörte optische Wege benötigt bzw. vorausgesetzt, was jedoch häufig nicht der Fall ist. In vielen strömungsmechanischen Anwendungen können Grenzflächeneffekte (z.B. turbulente Wasseroberflächen, Zweiphasenströmungen, etc.) oder Brechungsvariationen (hervorgerufen beispielsweise durch Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsgradienten) die Meßeigenschaften deutlich beeinträchtigen bzw. eine Messung im ungünstigsten Fall sogar ganz verhindern.

Als Lösung für diese meßtechnische Problemstellung bietet sich das aus der Astronomie bekannte Prinzip der Wellenfrontkorrektur mittels adaptiver Optik an. Dabei werden Störungen des optischen Weges mit einem Wellenfrontsensor detektiert und mit einem deformierbaren Spiegel anschließend korrigiert. In diesem Beitrag wird am Beispiel einer Messung durch eine fluktuierende Wasser-Luft-Grenzfläche gezeigt, daß sich dieses Prinzip auf die Strömungsmeßtechnik übertragen läßt und sich dort der negative Einfluß der genannten Störungen verringern läßt.

## Einleitung

Durch die inhärente hohe örtliche und zeitliche Auflösung und die berührungslose Messung sind laseroptische Strömungsmeßverfahren zu einem unverzichtbaren Instrument für die Strömungsforschung avanciert. Die große Bandbreite der inzwischen verfügbaren Meßverfahren belegt dies eindrucksvoll [1-4].

Gemäß dem allgemeinen Prinzip der Lasermeßtechnik werden dazu eine Beleuchtung der Strömung und eine Detektionsoptik zum Auffangen des Streulichtes benötigt. Für die Lichtausbreitung werden sowohl für den Sende- als auch für den Empfangsteil ungestörte optische Wege benötigt bzw. vorausgesetzt, was jedoch häufig nicht der Fall ist. Während statische Störungen, z.B. durch Zugangsfenster, durch eine entsprechende Vorjustierung korrigiert werden können, ist dieses bei dynamischen, d.h. zeitveränderlichen Störungen nicht mehr einfach möglich. Prominente Beispiele dafür sind fluktuierende Flüssigkeits-Gas-Grenzflächen, Mehrphasenströmungen sowie Druckstöße und Temperaturgradienten (z.B. bei Flammen [5]), welche den Brechungsindex verändern. Als Konsequenzen können dabei eine Verlagerung des Meßortes und eine Vergrößerung der Meßunsicherheit resultieren.

Als Lösung für diese meßtechnische Problemstellung bietet sich das aus der Astronomie bekannte Prinzip der Wellenfrontkorrektur mittels adaptiver Optik [6-8] an, welches zu einer Renaissance erdgebundener Teleskope geführt hat. Dabei werden Störungen des Lichtweges durch die Atmosphäre, welche durch turbulente Strömungen unterschiedlich erwärmter Luftschichten hervorgerufen werden, detektiert und bei der optischen Abbildung korrigiert. Durch die fortschreitende Entwicklung auf diesem Gebiet sind derartige Systeme auch bereits als kompakte Einheiten kommerziell verfügbar. Dabei werden mit einem Wellenfrontsensor (z.B. in Form des Hartmann-Shack-Sensors) die Laserstrahleigenschaften und die aufgeprägten Störungen erfaßt und letztere mit einem Flächenlichtmodulator (z.B. in Form von deformierbaren Spiegeln oder Mikrospiegelarrays) in einem geschlossenen Regelkreis korrigiert. Auf diese Weise können z.B. Strahlableitungen kompensiert und so der Meßort konstant gehalten werden.

In diesem Beitrag wird beispielhaft für ein interferometrisches Meßverfahren die Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) betrachtet. Ein mit einem Adaptive-Optik-(AO-)System ausgestatteter Meßaufbau wird eingesetzt, um durch eine turbulente Wasser-Luft-Grenzschicht hindurch zu messen und die Meßeigenschaften mit und ohne Wellenfrontkorrektur zu untersuchen.

## Vorbetrachtungen

Bei der Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) werden zwei kohärente Laserstrahlen unter einem definierten Winkel  $\theta$  zur Überschneidung gebracht. Der Überschneidungsbereich der Teilstrahlen bildet das Meßvolumen, in welchem ein Interferenzmuster aus nahezu parallelen Interferenzstreifen im Abstand  $d = \lambda / (2 \sin \theta)$  ( $\lambda$ : Laserwellenlänge) entsteht. (Da die Laser-Doppler-Velozimetrie ein häufiger Gegenstand dieser Fachtagung ist, wird hier auf eine detaillierte Darstellung verzichtet und es sei statt dessen auf die einschlägige Literatur verwiesen, z.B. [3]). Die üblicherweise verwendeten Gaußschen Laserstrahlen werden so justiert, daß die Strahltaillen mit dem Meßvolumen zusammenfallen. Dadurch befinden sich einerseits die Stellen der maximalen Intensität im Meßvolumen, andererseits herrschen dort nahezu ebene Wellenfronten vor, die ein besonders homogenes Streifensystem entstehen lassen und die Streifenabstandsvariation minimieren.

Im Folgenden wird der Fall betrachtet, daß mit einem in Luft befindlichen LDV-Sensor die Geschwindigkeit im Volumen einer Wasserströmung gemessen werden soll, wobei die Wasserströmung eine nach oben offene, fluktuierende Oberfläche aufweist. Diese Anordnung ist u.a. bei offenen Strömungskanälen oder bei Filmströmungen von Bedeutung; hier soll sie aber darüber hinaus beispielhaft für Störungen aller oben erwähnten Arten (Temperatur-, Druck- und Konzentrationsgradienten, etc.) stehen.

Ordnung	Phänomen	Auswirkung	Korrektur durch
0	Hub	Verschiebung des Meßvolumens	Spiegelhub
1	Neigung	Verschiebung des Meßvolumens, Änderung des Streifenabstandes	Spiegelverkipfung
2	Krümmung	Veränderung der Strahltaillenposition	Spiegelkrümmung
≥ 3	Verzerrung	Störungen des Interferenzstreifensystems	Individuelle Einstellung der Spiegelsegmente

Tab. 1: Klassifizierung der auftretenden Störungen

Die Auswirkungen der Störung auf die Funktionalität des LDV lassen sich in diesem Fall wie folgt klassifizieren und bewerten (wobei die Ordnung den Term der Taylorreihenentwicklung der Grenzflächenprofilfunktion kennzeichnet), siehe auch Tab. 1:

- *0. Ordnung: Hub der Grenzfläche.* Es tritt eine Parallelverschiebung der LDV-Teilstrahlen auf, die zu einer Veränderung der Position des Kreuzungspunktes der Teilstrahlen und damit zu einer Verlagerung des Meßortes führen.
- *1. Ordnung: Neigung der Grenzfläche.* Es verändert sich die Richtung der Teilstrahlen, was auch hier zu einer Verlagerung des Meßortes führt. Zusätzlich kann sich durch den veränderten Winkel der Interferenzstreifenabstand ändern, d.h. die Kalibrierkonstante für die Bestimmung der Geschwindigkeit, wodurch für eine einzelne Messung eine unbekannte systematische Meßabweichungen auftritt. Das Maß der Abweichung ist wegen der stochastischen Bewegung der Grenzfläche zufällig und ändert sich zeitlich. Bei mehreren, zeitlich nacheinander erfolgten Messungen äußert sich dieser Effekt als zufällige, erhöhte Unsicherheit der Geschwindigkeit („virtuelle Turbulenz“). Da die Neigung der Grenzfläche und damit die Änderung der Strahlrichtung in zwei Raumdimensionen stattfinden kann, ist auch eine Ablenkung der Strahlung senkrecht zu der von den Teilstrahlen ursprünglich aufgespannten Ebene möglich. In diesem Fall verlaufen die Strahlen windschief. Mit der geringeren Überlappung der Teilstrahlen geht eine niedrigere valide Datenrate einher. Im Fall großer Störampplituden kommt es zu keiner Überlappung mehr, wodurch eine Messung nicht mehr möglich ist.
- *2. Ordnung: Krümmung der Grenzfläche.* Wegen der unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft und Wasser kommt es zu einem Linseneffekt und damit zu einer Veränderung der Lage und der Größe der Strahltaille. Die Strahltaille fällt dann nicht mehr mit dem Kreuzungspunkt zusammen und es kommt zur Interferenz von gekrümmten Wellenfronten und infolge dessen zu einer starken Änderung des Streifenabstandes innerhalb des Meßvolumens [1,9]. Auch dieser Effekt führt zu einer Vergrößerung der Unsicherheit der Geschwindigkeit („virtuelle Turbulenz“).
- *Höhere Ordnungen: Verzerrung der Grenzfläche.* Die Wellenfront des Laserstrahls wird lokal verzerrt, was sich unmittelbar in Inhomogenitäten des Interferenzstreifensystems widerspiegelt. Der Interferenzstreifenabstand ist nicht mehr konstant sondern kann in allen drei Raumrichtungen variieren  $d=d(x,y,z)$ . Analog zum vorigen Punkt ergibt sich eine Vergrößerung der Unsicherheit der Geschwindigkeit („virtuelle Turbulenz“).

## Modellexperiment: Messung durch eine turbulente Luft-Wasser-Grenzschicht

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 durch strahlkonditionierende Linsen geführt und schließlich durch zwei separate Umlenkspiegel vertikal nach unten gelenkt und zur Überschneidung gebracht werden. Die Strahlen werden durch ein mit Wasser gefülltes Bassin geleitet, in dem durch eine Pumpe Oberflächenwellen, d.h. eine fluktuierende Wasseroberfläche, erzeugt werden kann. Für die Untersuchungen ist der Strahlverlauf so eingestellt, daß sich der Schnittpunkt, d.h. das Meßvolumen des LDVs, unterhalb des Bassins befindet. Dort wurde als Geschwindigkeitsnormal ein mit einer Lochblende versehener optischer Chopper platziert, um Streulichtsignale mit definierter Dopplerfrequenz zu erzeugen.

Für die hier geplanten Prinzipuntersuchungen und Funktionalitätstests genügt es, die Störungen nur auf einen Teilstrahl wirken zu lassen, wodurch der Einsatz nur eines AO-Systems ausreicht. Das hier genutzte System (Fa. OKOTech, Niederlande) besteht aus einem deformierbaren Spiegel mit 10 mm nutzbarer Apertur, dessen 17 Segmente elektrostatisch ausgelenkt werden können, siehe Abb. 1. Der Spiegel ist auf einer zweiachsigen, piezoelektrischen Kippstufe montiert, um auch globale Strahlageänderungen vornehmen zu können. Der Wellenfrontsensor nach dem Hartmann-Shack-Prinzip besteht aus einer Mikrolinsenmatrix, von denen ca. 8x8 effektiv genutzt werden. Die erzeugten Brennflecke werden mit einer Transferlinse auf eine Kamera übertragen. Eine auf einem Standard-PC installierte Software bestimmt deren Auslenkungen von der Nullage, rekonstruiert die Wellenfront, berechnet die für die Wellenfrontkorrektur erforderlichen Auslenkungen und steuert damit den deformierbaren Spiegel an. Der auf diese Weise erzeugte geschlossene Regelkreis arbeitet mit einer Bandbreite von 200 Hz, was bei diesem Modell durch die piezoelektrische Kippstufe begrenzt wird, so daß gemäß dem Nyquist-Shannonschen Abtasttheorem dynamische Störungen mit Frequenzen bis zu 100 Hz korrigiert werden können.



Abb. 1: Links: Zur Wellenfrontkorrektur eingesetzter deformierbarer Spiegel mit neuartiger Kipp-/Neigefunktion. Rechts: Aufteilung des Spiegels in 17 Segmente, die individuell angesteuert werden.

Das AO-System wurde wie folgt in den Aufbau integriert, siehe dazu Abb. 2: Der deformierbare Spiegel wurde in den Lichtweg des einen Strahls auf dem Breadboard eingebracht, bevor dieser mit einem weiteren Spiegel nach unten auf das Bassin gerichtet wird. Nach dem Austritt dieses Strahls aus dem Bassin wurde ein Strahlteiler vor dem Meßvolumen installiert, der einen Teilstrahl auskoppelt und auf den Wellenfrontsensor richtet. Der LDV-Teilstrahl ohne die AO-Korrektur wurde durch eine Glasplatte geführt, die sich auf der Wasseroberfläche befindet, um den Einfluß der fluktuierenden Grenzfläche für diesen Strahl auszuschließen. Der andere Teilstrahl mit integriertem AO-System durchstößt hingegen neben der Glasplatte die Luft-Wasser-Grenzfläche direkt.

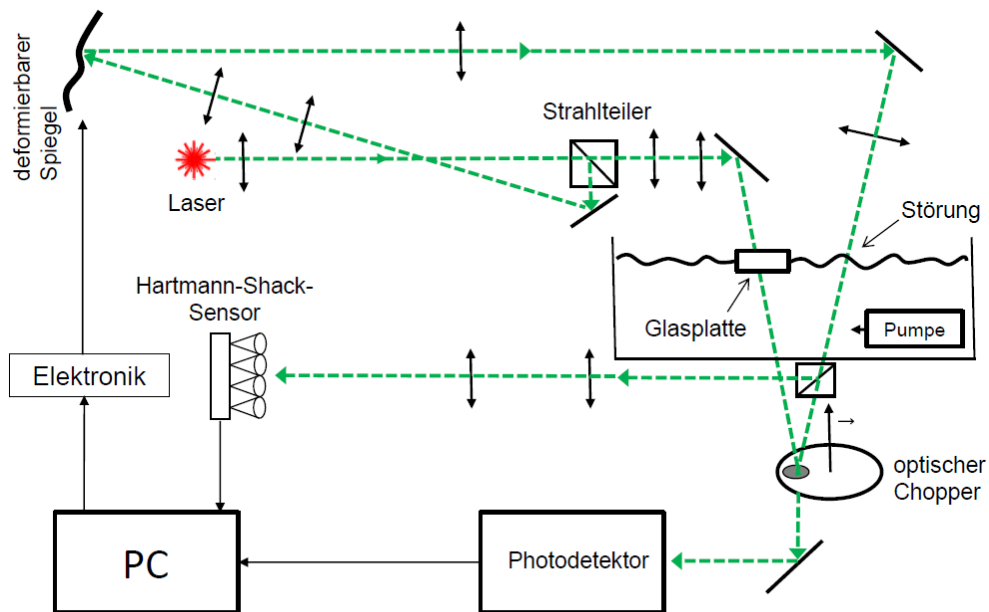


Abb. 2: Optischer Aufbau des Modellexperiments: Laser-Doppler-Velozimeter mit einem in einem Teilstrahl installierten Adaptive-Optik-System zur Korrektur der von der fluktuierenden Wasseroberfläche erzeugten Wellenfrontstörungen.

Zur Charakterisierung der von der Pumpe erzeugten Störungen, d.h. die Fluktuationen der Luft-Wasser-Grenzfläche, kam ein chromatisch-konfokalen Abstandssensor der Fa. Micro-Epsilon Optronic GmbH, Dresden/Langebrück, mit einer Meßrate von 1 kHz zum Einsatz. Damit konnte jeder Einstellung der die Turbulenzen erzeugenden Pumpe eine mittlere Amplitude und Frequenz zugeordnet werden. In Abb. 3 sind die aufgenommenen Höhengschwankungen als Zeitreihe und deren Spektrum für drei Betriebspunkte der Pumpe dargestellt. Es zeigte sich, daß die Oberflächenwellen signifikante Frequenzanteile bis zu einigen 10 Hz aufweisen. Diese Werte liegen innerhalb der Regelbandbreite des AO-Systems und können somit korrigiert werden.

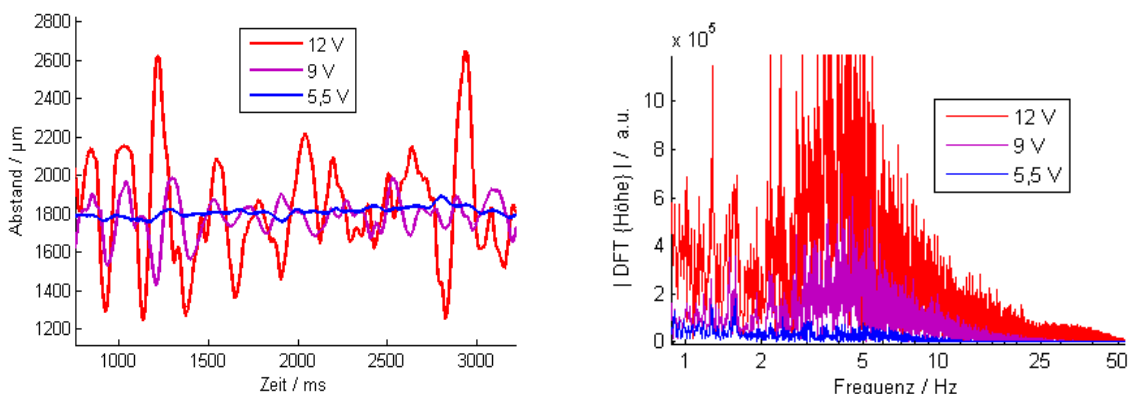


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der mit einem chromatisch-konfokalen Abstandssensor aufgenommenen Höhengschwankungen der Wasseroberfläche (links) sowie deren Spektrum (rechts), jeweils für drei unterschiedliche Betriebsspannungen der die Wasserwellen erzeugenden Pumpe.

Da die Störung in dem betrachteten Modellexperiment von zufälliger Natur ist, kann eine Charakterisierung der Einflüsse auf die Meßeigenschaften bzw. der erreichten Korrektur nur durch statistische Aussagen geschehen. Gemäß den Vorbetrachtungen kann sich die Strahl-lage ändern und die Strahlen können windschief werden, andererseits kann sich der Interfe-

renzstreifenabstand ändern und so die Frequenz- bzw. Geschwindigkeitsunsicherheit erhöhen. Für die Charakterisierung der Meßeigenschaften bieten sich daher der Interferenzkontrast, die Validierungsrate und die Standardabweichung der Geschwindigkeit an.

Werden die Strahlen windschief, so verringert sich der Überlappingsgrad der Laserstrahlen und der Interferenzkontrast und damit der Modulationsgrad der Burstsignale. Damit einhergehend verringert sich der Wechselanteil des Dopplersignals und folglich der Signal-Rauschabstand (SNR: Signal to Noise Ratio). Da üblicherweise eine SNR-Validierung durchgeführt wird, bei der nur Signale, deren SNR einen bestimmten Wert überschreitet, für die Auswertung herangezogen werden, ist die Anzahl der als valide betrachteten Signale ebenfalls ein Maß für die Überlappung der Teilstrahlen und ein ausgebildetes Interferenzstreifensystem. Im Experiment wurden dazu für jede Störampplitude 1000 der von der Lochblende erzeugten Burstsignale aufgezeichnet und ausgewertet. In Abb. 4 sind der Interferenzkontrast und die Validierungsrate in Abhängigkeit von der mittleren Amplitude der Oberflächenwellen dargestellt. Der Interferenzkontrast beträgt im ungestörten Fall ca. 83 % und sinkt mit steigender Störampplitude bis auf 20 % ab. Durch die Korrektur mit dem AO-System werden die Werte um ca. einen Faktor 2,5 verbessert. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in der Validierungsrate: Werden im ungestörten Fall 100 % der Signale als gültig betrachtet, so sinkt deren Wert bis auf 8 % bei maximaler Störampplitude ab. Mit der Korrektur können die Werte um bis zu 50 % absolut verbessert werden. Der maximale Gewinn durch das AO-System besteht dabei bei mittleren Störampplituden. Offenbar können größere Amplituden zunehmend schlechter ausgegletzt werden.

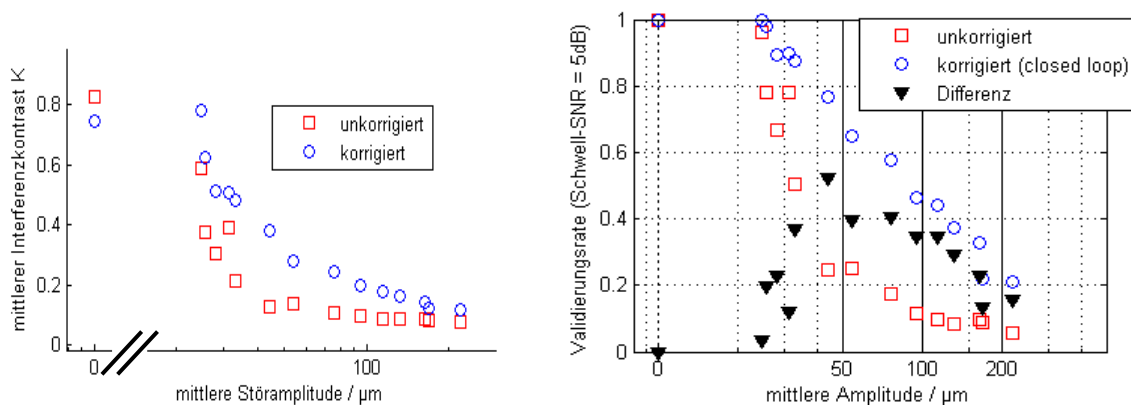


Abb. 4: Interferenzkontrast (links) und Validierungsrate (rechts) in Abhängigkeit von der mittleren Störampplitude der Oberflächenwelle mit und ohne Korrektur durch das Adaptive-Optik-System.

Ferner wurden aus den 1000 je Störampplitude aufgenommenen Burstsignalen der Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeit der Lochblende berechnet, siehe dazu Abb. 5. Im ungestörten Fall wird eine relative Standardabweichung von  $3 \cdot 10^{-4}$  erreicht. In der Anwesenheit der Störungen kann zwar der Mittelwert weiterhin korrekt bestimmt werden, d.h. es treten keine systematischen Abweichungen auf, siehe Abb. 5a, jedoch steigt die Standardabweichung deutlich auf bis zu 3 % bei maximaler Störung an, siehe Abb. 5b. Grund dafür sind die in den Vorbetrachtungen genannten Effekte. Durch Einschalten des AO-Systems wird die Meßunsicherheit reduziert, wobei hier die Reduzierung um so größer ausfällt, je niedriger die Störampplitude ist, siehe Abb. 5c. Wo die Grenzen der Korrigierbarkeit liegen und ob diese von technischer oder prinzipieller, physikalischer Natur sind, ist derzeit noch Gegenstand von Untersuchungen.

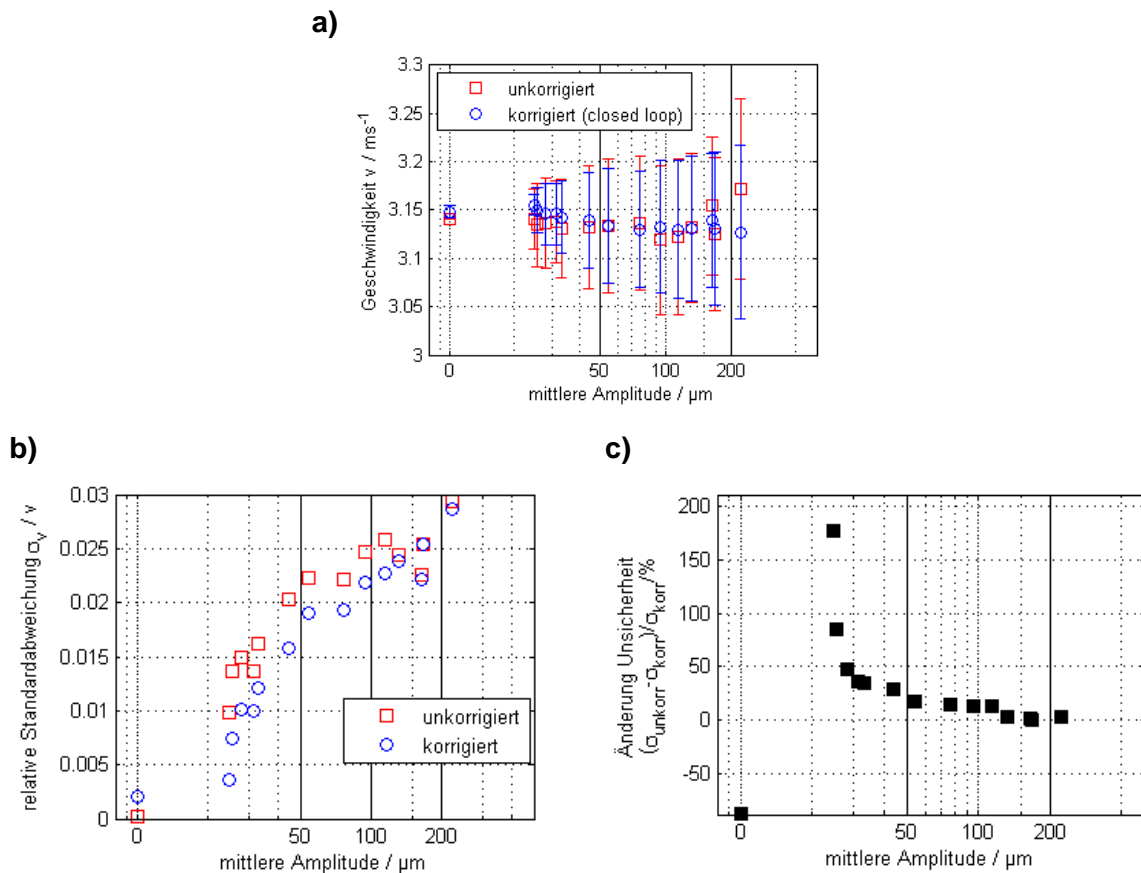


Abb. 5: a) Bestimmte mittlere Geschwindigkeit der als Geschwindigkeitsnormal genutzten Lochblende in Abhängigkeit von der mittleren Amplitude der Störung. Der Vorgabewert (Sollwert) beträgt 3,15 m/s. b) Darstellung der relativen Standardabweichung und c) der Änderung der relativen Meßunsicherheit bei eingeschalteter Korrektur.

## Zusammenfassung

In der Astronomie werden seit langem Adaptive-Optik-(AO-)Systeme in erdgebundenen Teleskopen zur Korrektur der von atmosphärischen Fluktuationen erzeugten Wellenfrontstörungen eingesetzt. Solche Brechungsindexstörungen treten auch in einer Vielzahl von Fragestellungen der Strömungsmechanik auf, z.B. in Form von Grenzflächenstörungen (turbulente Wasseroberflächen, Zweiphasenströmungen, etc.) oder in Form von Brechungsindexfeldern (Temperaturgradienten bei Verbrennungen, Druckgradienten bei Verdichtungsstößen, Konzentrationsgradienten bei Elektrolysevorgängen, etc.). Die adaptive Optik bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen derartiger Störungen zu reduzieren und Messungen auch in schwierigen Umgebungen möglich zu machen.

In diesem Beitrag wurde erstmals das Potential dieser Technik anhand einer LDV-Messung durch eine nach oben offene, fluktuierende Wasseroberfläche demonstriert. Es wurden verschiedene Störungen klassifiziert, die zu einer Verlagerung der Meßposition, zu einem Absinken der validen Meßrate und zu einer Erhöhung der Unsicherheit der Geschwindigkeit führen können. Es konnte gezeigt werden, daß die Beeinträchtigung der Meßeigenschaften durch die fluktuierende Oberfläche durch den Einsatz des AO-Systems deutlich verringert werden können. Sowohl die Unsicherheit der Geschwindigkeit als auch die Validierungsrate wurden deutlich verbessert, wobei der erreichte Faktor von der Amplitude der Störung abhängt. Beispielsweise konnte die Validierungsrate bei einer Störampitude von 50  $\mu\text{m}$  mit dem hier eingesetzten System von 20 % auf 77 % erhöht werden.

Als Fazit kann festgehalten werden, daß der Einsatz Adaptiver-Optik-Systeme in der Strömungsmeßtechnik zu neuen meßtechnischen Möglichkeiten führen kann. Die durchgeführten

Experimente erscheinen vielversprechend, um in schwierigen meßtechnischen Umgebungen Unsicherheiten zu reduzieren bzw. Messungen überhaupt ermöglichen zu können.

## Literatur

- [1] P. Vennemann, R. Lindken, J. Westerweel, „In vivo whole-field velocity measurements“, *Exp. Fluids* 42(4), S. 495-511, 2007
- [2] C.J. Kähler, „Review of Optical Multipoint Methods for Velocity, Density, Deformation, Pressure and Temperatur Measurement in Aerodynamics“, Eds. Rossow, Radespiel. Hermann Schlichting Memorial Lectures, Braunschweig, 28. Sept. 2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [3] H. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea, „Laser-Doppler and phase-Doppler measurement techniques“, Heidelberg: Springer, 2002
- [4] M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans, „Particle Image Velocimetry – A Practical Guide“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 978-3-540-72307-3
- [5] A. Fischer, J. König, L. Büttner, J. Czarske, T. Leitgeb, J. Woisetschläger, „Detektion von Flammeninstabilitäten mittels Mehrpunktmessung von Strömungsgeschwindigkeitsspektren“, 20. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, S. 44.1 – 44.10, 04.–06.09.2012, Rostock
- [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] John W. Hardy, „Adaptive Optics for Astronomical Telescopes“, Oxford University Press, New York 1998, ISBN: 019509019-5.
- [8] A. Glindemann, S. Hippler, T. Berkefeld, W. Hackenberg, „Adaptive Optics on Large Telescopes“, *Experimental Astronomy* 10, 2000
- [9] P.C. Miles, „Geometry of the fringe field formed in the intersection of two Gaussian beams“, *Appl. Opt.* 35(30), S. 5887-5895, 1996