

## Strömungsmessungen durch fluktuierende Phasengrenzflächen mittels Wellenfrontkorrektur

### Flow measurements through a fluctuating phase boundary

Hannes Radner, Lars Büttner und Jürgen Czarske

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

Adaptive Optik, Wellenfrontkorrektur, Fresnel Leitstern, Strömungsmessung, LDV  
adaptive optics, wavefront correction, Fresnel Guide Star, flow measurements, LDV

### Zusammenfassung

Laseroptische Messverfahren wie z.B. PIV, LDV oder DGV haben sich in der Strömungsmesstechnik fest etabliert, da diese kontaktlose Messungen mit einer hohen Ortsauflösung und niedriger Messunsicherheit ermöglichen. Um diese Eigenschaften zu erreichen, benötigen sie einen ungestörten optischen Zugang zum Messvolumen. In vielen Anwendungsfällen treten hier signifikante Brechungsindexfluktuationen auf, welche die Wellenfronten verzerren und dadurch die Qualität und Anzahl der Messsignale vermindern. Dies führt zu einer Erhöhung der Standardunsicherheit oder kann auch zum Versagen des Messsystems führen. Um diese Verzerrungen auszugleichen, können Wellenfrontkorrektursysteme verwendet werden. In diesem Beitrag wird ein Mach Zehner Interferometer vorgestellt, bei welchem beide Laserstrahlen mit einem Wellenfrontkorrektursystem durch eine fluktuierende Wasser-Luft Phasengrenzfläche hindurch stabilisiert werden. Um dies zu erreichen, wird der Fresnelreflex der Oberfläche ausgewertet, die daraus resultierende Wellenfrontverzerrung bestimmt und mit adaptiven Spiegeln kompensiert. Hierdurch konnte eine Steigerung der Signalrate von bis zu 50 % bei einer mittleren Wellenamplitude von 25  $\mu\text{m}$  erreicht werden. In Zukunft ist geplant, dieses neuartige System mit schnelleren Aktuatoren wie z.B. MEMS [1] auszustatten um Filmströmungen mit opakem Substrat oder das Strömungsprofil eines freien Wasserstrahls vermessen zu können. Bei Letzteren besteht ein hohes Interesse an einem genauen Verständnis der Kelvin-Helmholtz-Instabilität und an dem Wärmeübergang an der Grenzfläche unter Berücksichtigung von Konvektionseffekten. Bisher werden solche Effekte mit Hilfe der Navier Stokes Gleichung in einem Modell simuliert [2]. Dies ist jedoch auf Grund begrenzter Rechenkapazitäten nur für kleine Modelle gut möglich. Bei Makrosystemen wie Industrieanlagen müssen große Näherungen gemacht werden, welche nur mit Messdaten gut parametrisiert werden können.

### Einleitung

In der Strömungsmesstechnik kommen viele laseroptische Messverfahren wie z.B. PIV, LDV oder DGV zur Anwendung. Um eine hohe Orts- und Geschwindigkeitsauflösung zu erreichen, benötigen diese Verfahren einen ungestörten optischen Zugang zum Messvolumen. In vielen Applikationen treten hier erhebliche Störungen der Wellenfronten durch Brechungsindexfluk-

tuationen auf. Diese Störungen lassen sich näherungsweise in Volumen- und Phasengrenzflächenstörungen unterteilen. Volumetrische Störungen treten z.B. in Geweben oder Verbrennungsräumen mit hohen Temperatur- und Druckgradienten auf [3,4]. Phasengrenzflächenstörungen können z.B. an einer offenen fluktuierenden Wasseroberfläche beobachtet werden. Um diese Störungen kompensieren zu können, werden Wellenfrontkorrektursysteme eingesetzt. Bei diesen wird eine Referenzlichtquelle „Guide Star“ im Messvolumen platziert, welche eine bekannte Wellenfront abstrahlt. Diese bekannte Referenz wird zusammen mit dem eigentlichen Messsignal durch das inhomogene Medium zwischen Messort und Messsystem verzerrt. Im Messsystem wird die Wellenfront vom „Guide Star“ ausgewertet und damit das Nutzsignal entzerrt. Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich in der erdgebundenen Astronomie eingesetzt [5], bei welcher ein natürlicher heller Stern oder ein künstlich erzeugter „Laser Guide Star“ als Referenzlichtquelle benutzt wird. Dessen Licht wird durch den Seeing Effekt der Atmosphäre verzerrt, anschließend mit einem Wellenfrontsensor im Teleskop gemessen und mit einem Lichtmodulator korrigiert. Es gibt viele Ansätze dieses Prinzip auch für Aufgaben in der Messtechnik zu adaptieren. Ein großes Problem ist es, hier eine geeignete Referenzlichtquelle im Messort zu platzieren. In biologischen Proben werden hierfür z.B. fluoreszierende Partikel [6,7], Second Harmonic Generation [8] oder Ultraschall Leitsterne [9-11] eingesetzt. In der Strömungsmesstechnik ist es in der Regel nicht möglich, einen Leitstern im Messvolumen zu platzieren ohne dadurch das Strömungsprofil zu beeinflussen. Für den Fall, dass die Verzerrung der Wellenfront nur durch eine einzelne Phasengrenzfläche hervorgerufen wird, ist es möglich, die Verzerrung mit dem Fresnelreflex der Grenzfläche zu messen und zu kompensieren. Dies funktioniert, da der einfallende bekannte Laserstrahl zusammen mit dem reflektierten Laserstrahl alle Informationen über die Störung enthält. Hierdurch werden optische Messungen mit nur einem optischen Zugang durch die fluktuierende Phasengrenzfläche ermöglicht. Um dieses Konzept zu validieren, wurde am Institut ein Laser Doppler Velozimeter (LDV) mit einem Wellenfrontkorrektursystem ausgestattet, welches den Fresnelreflex der Phasengrenzfläche auswertet, um beide Laserstrahlen hinter der Grenzfläche zu stabilisieren. Das eingesetzte LDV basiert auf dem Mach Zehnder Interferometer. Bei ihm werden zwei Laserstrahlen mit der Wellenlänge  $\lambda$  unter einem Winkel von  $2\theta$  im Messvolumen zur Überschneidung gebracht. Dies erzeugt ein Interferenzstreifensystem, bei welchen die Streifen einen nahezu konstanten Abstand  $d$  haben.

$$d = \frac{\lambda}{2\sin(\theta)}$$

Wenn sich jetzt ein Partikel durch das Interferenzstreifensystem bewegt, streut es an den Streifen Licht und generiert ein Burstsinal mit einer Dopplermodulation. Die Teilchengeschwindigkeit  $v$  senkrecht zum Streifensystem ergibt sich aus dem Produkt des Streifenabstandes  $d$  und der Dopplerfrequenz  $f_d$  wie folgt:  $v = d \cdot f_d$ .

Wenn sich der Kreuzungswinkel auf Grund von Wellenfrontverzerrungen durch eine fluktuierende Phasengrenzfläche ändert, führt dies auch zu einer Variation des Streifenabstandes und erhöht dadurch die Messunsicherheit. In einer unserer früheren Arbeiten wurde untersucht, wie sich Oberflächenwellen einer freien Wasseroberfläche auf die Messunsicherheit auswirken [12,13]. Dabei stellte sich heraus, dass der größte Beitrag zur Messunsicherheit durch die Verkipfung der Wasseroberfläche hervorgerufen wird. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Wellenlänge der Oberflächenwellen sehr groß ist im Vergleich zum Durchmesser der Laserstrahlen am Durchtrittspunkt. Aus diesem Grund korrigiert das vorgestellte adaptive LDV nur die Verkipfung der Wasseroberfläche, um das Funktionsprinzip mit dem Fresnel Guide Star zu validieren.

## Optischer Aufbau

Für das adaptive LDV siehe Abbildung 1 wird zuerst eine Laserquelle mit 532 nm Wellenlänge mit dem Beamsplitter BS in zwei Strahlen aufgespalten. Anschließend befindet sich in jedem Teilstrahl eine Linse zur Positionierung der Strahltaile. Hinter der Linse wird der Laserstrahl von einem zweiachsigen Kippspiegel AM (OIM101, Optics In Motion) auf die Wasseroberfläche eines transparenten, nach oben offenen, mit Wasser gefüllten Bassins abgebildet. Unterhalb des Bassins treffen sich beide transmittierten Laserstrahlen im Messvolumen auf einer rotierenden Scheibe mit einem Pinhole. Unterhalb des Beckens wird die Strahlablenkung über einen weiteren Beamsplitter mit einem Position Sensitive Device (PSD) (PDP90A, Thorlabs) zu Kalibrierzwecken beobachtet (in Abbildung 1 nicht dargestellt). Die vom Pinhole generierten Bursts signale dienen als Geschwindigkeitsreferenz. Die Bursts signale werden hinter der Scheibe mit einer Photodiode detektiert. Die an der Oberfläche reflektierten Strahlen werden zunächst auf ein rechtwinkliges Messerprisma (MRAK25-P01, Thorlabs) abgebildet und dann mit einem Position Sensitive Device (PSD) als Wellenfrontsensor ausgewertet. Diese Zwischenabbildung ist nötig, denn bei großen Oberflächenwellen kann es vorkommen, dass beide reflektierte Strahlen sonst den gleichen Detektor beleuchten würden. Des Weiteren wird eine Abschattung der einfallenden Strahlen verhindert. Um eine möglichst hohe Anzahl an Regelzyklen pro Sekunde zu erreichen, besitzt jeder Teilstrahl seinen eigenen Regelkreis. Der verwendete digitale Signal Prozessor (DSP) (dsPIC33EP512GP502, Microchip) schafft dabei ca. 10 000 Berechnungen pro Sekunde. Auf Grund der endlichen Geschwindigkeit der Kippspiegel ist das System in der Lage, Störungen mit einer Frequenz von bis zu 160 Hz zu unterdrücken.

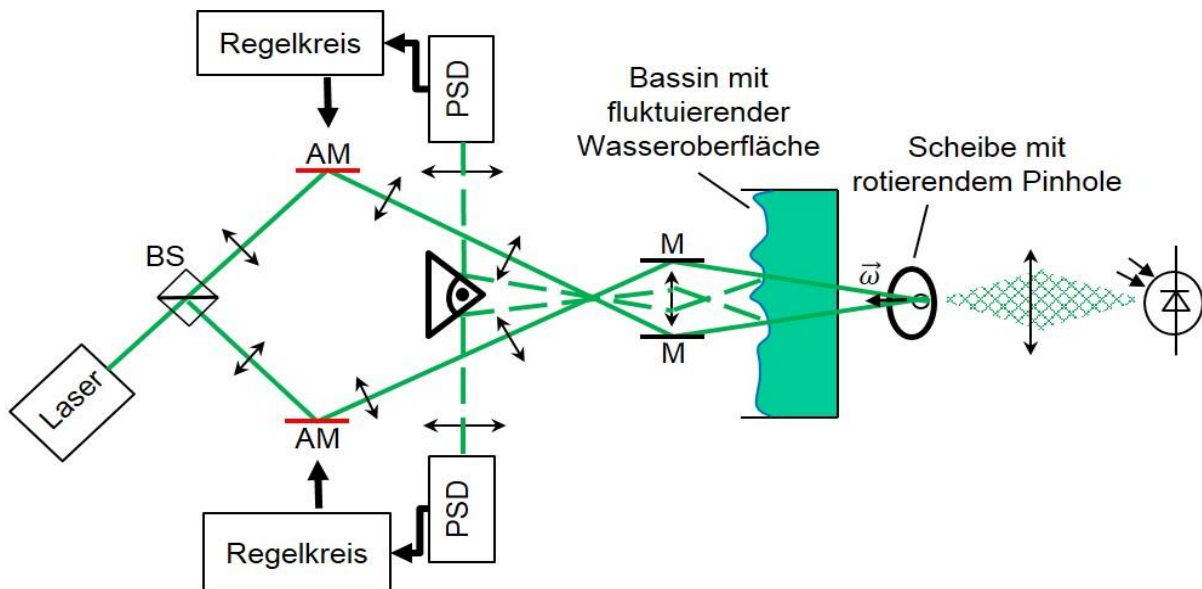


Abb. 1: Optischer Aufbau des adaptiven Laser Doppler Messsystems, BS: Beamsplitter, AM: Kippspiegel, PSD: Position Sensitive Device, M: Spiegel

## Fresnel Guide Star

Um eine möglichst hohe Anzahl an gültigen Messsignalen und eine geringe Messunsicherheit zu erhalten, muss das adaptive System die Kippspiegel derart ansteuern, dass die Strahlablenkung durch die Oberfläche ausgeglichen wird und sich beide Laserstrahlen im Messvolumen unter einem konstanten Winkel schneiden. Für den Fall, dass die Ablenkung der transmittierten Strahlen T gemessen werden kann, muss die Regelung nur versuchen, diese Strahlen in Position zu halten. Bei einer Regelung in Reflexion reicht dies nicht mehr aus, da ein konstanter Winkel des reflektierten Strahls R in Relation zum Messsystem bei Variation der

Verkipfung der Wasseroberfläche unterschiedliche transmittierte Strahlen T hat. Um die Ablenkung des transmittierten Strahls T unter Wasser indirekt bestimmen zu können, muss das Lot der Wasseroberfläche bestimmt werden und anschließend mit Hilfe des Snellschen Brechungsgesetzes die Ausbreitung des Strahls hinter der Grenzfläche berechnet werden. Wenn eine Höhenänderung der Wasseroberfläche vernachlässigt wird, kann das Lot der Wasseroberfläche mit der Bedingung, dass an reflektierenden Oberflächen der Einfallswinkel gleich den Ausfallswinkel ist wie folgt berechnet werden:

$$\gamma = \frac{\beta_1 - \alpha_1}{2}$$

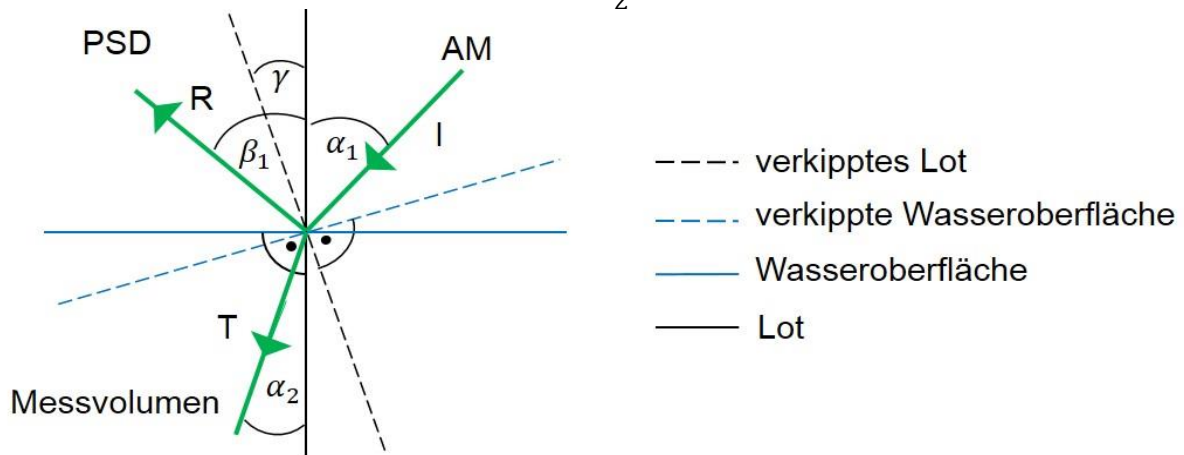


Abb. 2: Beziehungen zwischen dem inzidenten I, reflektierten R und transmittierten T Laserstrahls an einer Phasengrenzfläche, AM: Kippspiegel, PSD: Position Sensitive Device

## Regelkreis

Die Vorbetrachtungen zum Fresnel Guide Star führen zu einem Regelkreis, wie er in Abbildung 3 zu sehen ist. Bei ihm wird mit einem Beobachter aus dem Winkel des einfallenden Strahls I und der Messung des reflektierten Strahls R der Winkel des transmittierten Strahls T hinter der Phasengrenzfläche geschätzt. Diese Schätzung wird mit dem vorgegebenen Winkel verglichen und die Abweichung  $e$  einem Integral Regler übergeben, welcher dann den Spiegel entsprechen ansteuert. Eine Kanaltrennung zwischen den beiden Spiegelachsen wird über eine Koordinatentransformation mit einer kalibrierten Matrix durchgeführt.

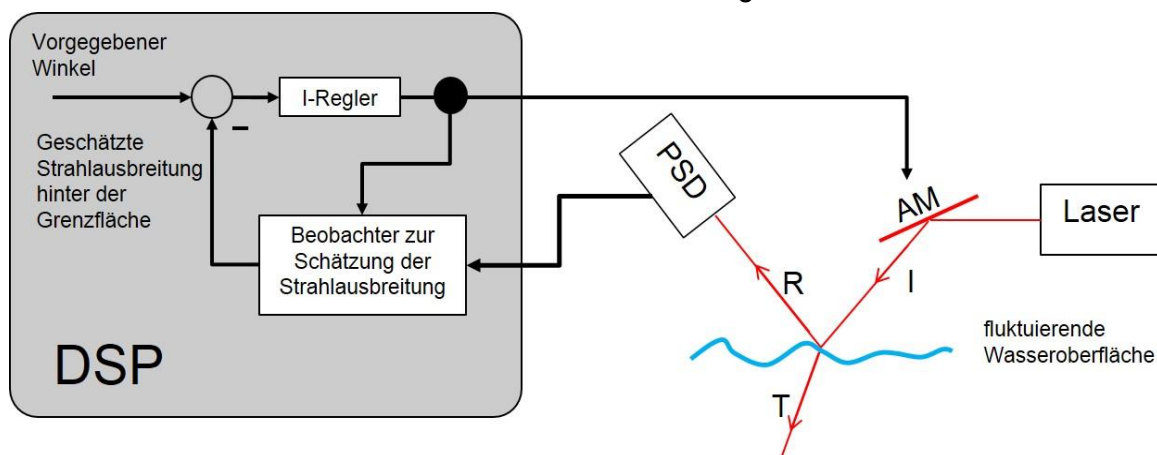


Abb. 3: Der Beobachter im Regelkreis schätzt die Strahlausbreitung des Transmittierten Strahls T anhand der Stellgröße vom Kippspiegel und der gemessenen Auslenkung auf der PSD. Diese wird mit einem vorgegebenen Wert verglichen und dem Integralregler übergeben, welcher dann den Spiegel entsprechen ansteuert. AM: Kippspiegel, PSD: Position Sensitive Device, DSP: digitaler Signal Prozessor, R: reflektierter, I: inzidenter, T: transmittierter Laserstrahl

## Kalibrierung des Beobachters

Um die Ausbreitung des transmittierten Strahls hinreichend genau schätzen zu können, muss der Zusammenhang zwischen Winkel des Kippspiegels, gemessener Auslenkung an der PSD und dem Winkel des transmittierten Strahls sehr genau bekannt sein. Es wird eine Schätzgenauigkeit von ca.  $\frac{2}{100^\circ}$  benötigt. Bei Vernachlässigung einer Höhenänderung der Wasseroberfläche ergibt sich als mathematischer Zusammenhang eine ebene Fläche. Für den realen Aufbau ist es praktisch jedoch nicht möglich, die Positionierung und Orientierung aller Komponenten hinreichend genau zu bestimmen. Aus diesem Grund wird eine Eigenkalibrierung durchgeführt, bei welcher der Zusammenhang gemessen wird. Hierfür wird die Wasseroberfläche mit einer Pumpe angeregt und für verschiedene Auslenkungen des Spiegels der Zusammenhang zwischen transmittiertem, reflektiertem und inzidentem Strahl gemessen. Die Messpunkte sind in Abbildung 4 als blaue Punkte zusehen. In diese blauen Punkte wird eine Ebene, welche in rot dargestellt ist, gefittet. Diese Ebene wird vom Beobachter verwendet, um die Ausbreitungsrichtung des transmittierten Strahls zu schätzen. Auffällig ist, dass die Messdaten nicht in einer Ebene liegen. Dies lässt sich mit der Nichtlinearität der PSDs im Randbereich erklären. In zukünftigen Messungen ist geplant einen Fit höherer Ordnung durchzuführen, um die Nichtlinearitäten auszugleichen.

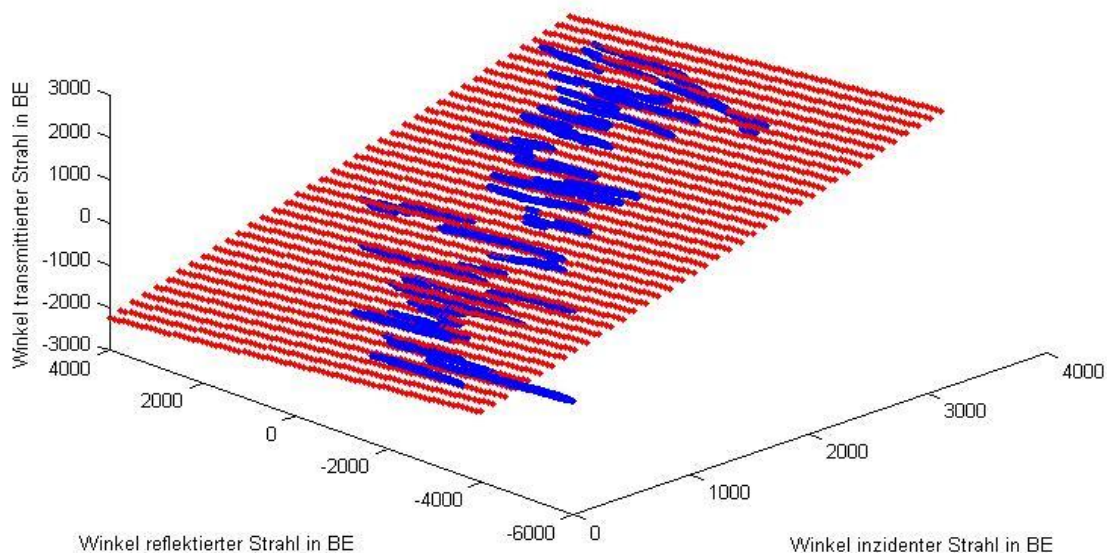


Abb. 4: Eigenkalibrierung, Blau: gemessener Zusammenhang zwischen inzidenten, reflektierten und transmittierten Strahl. Rot: in Messdaten gefittete Ebene für den Beobachter.

## Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde über die Validierungsrate charakterisiert. Diese gibt prozentual an, wie viele von wie vielen Burst Signalen gültig sind und ausgewertet werden können. Ein Burstsignal ist gültig, wenn der Interferenz Kontrast über 12 % liegt. Zur Charakterisierung der Stärke der Störung wurde der zeitliche Verlauf der Höhe von der Wasseroberfläche mit einem chromatisch konfokalen Sensor gemessen und die mittlere Amplitude der Wasserwellen ermittelt.

Um die Verbesserung durch das Wellenfrontkorrektursystem zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 5 die Validierungsrate einmal mit aktiver und einmal mit inaktiver Regelung über verschiedene Störampplituden aufgetragen. Bei kleinen Störungen erreicht das System bei aktiver

Regelung bis zu 80 % Validierungsrate. 100 % wurden nicht erreicht. Mögliche Ursachen hierfür sind Schätzfehler vom Beobachter, wie z.B. die Vernachlässigung von Höhenänderungen der Wasseroberfläche und Systemnichtlinearitäten. Bei Störampplituden über 25  $\mu\text{m}$  kann die Regelung der Störung nicht mehr folgen und die Validierungsrate bricht stark ein. Die größte Steigerung der Signalrate von ca. 50 % konnte bei einer Störampplitude von 25  $\mu\text{m}$  erreicht werden. Daraus ergibt sich eine 3-mal höhere Datenrate, welche sich in einer kürzeren Messzeit und höheren statistischen Sicherheit niederschlägt. Außerdem können transiente Vorgänge mit einer höheren Zeitaufösung untersucht werden. Bei Störampplituden, welche größer als 45  $\mu\text{m}$  sind, wird eine Messung erst durch das Wellenfrontkorrektursystem ermöglicht. Die Standardunsicherheit konnte durch das System um ca. 1,5 % bei 20  $\mu\text{m}$  Störampplitude gesenkt werden.

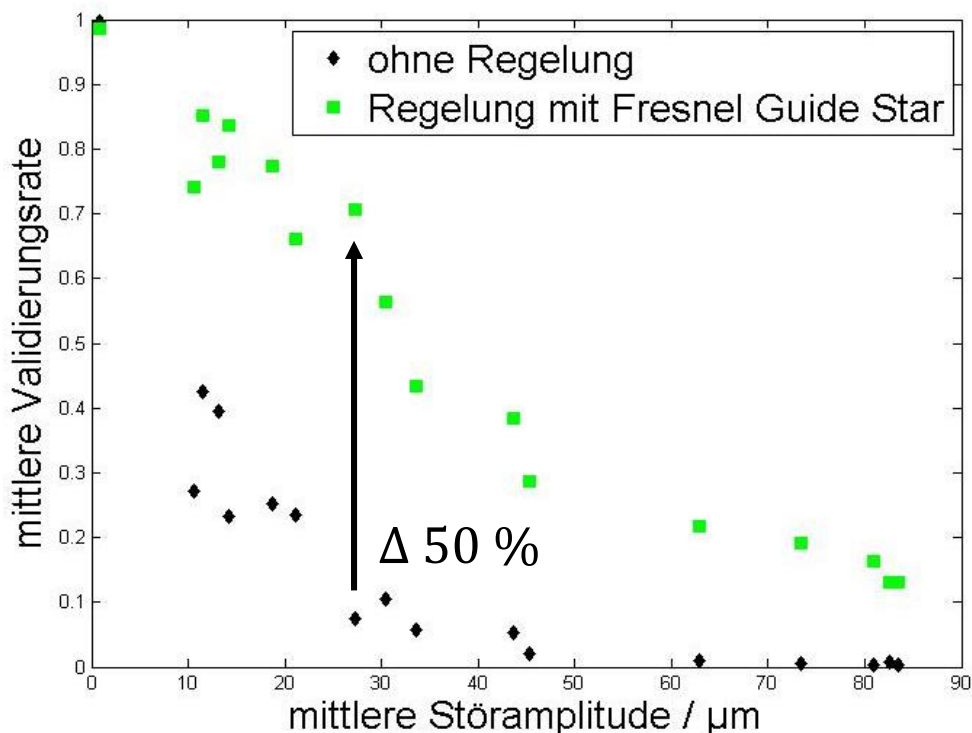


Abb. 5: mittlere Validierungsrate aufgetragen über der mittleren Störampplitude

## Fazit

In diesem Beitrag wurde ein Wellenfrontkorrektursystem vorgestellt, welches den Fresnelreflex einer Phasengrenzfläche als Leitstern nutzt, um Laserstrahlen durch die Grenzfläche hindurch zu stabilisieren. Um dies zu erreichen, wird ein Regelsystem mit einem Beobachter verwendet, um die Strahlpropagation hinter der Grenzfläche mit Hilfe des einfallenden und des reflektierten Strahls zu schätzen. Mit diesem Ansatz wird nur ein einziger optischer Zugang durch die fluktuierende Phasengrenzfläche benötigt, um Strömungsmessungen im Medium durchzuführen. Es konnte eine Steigerung der Signalrate von bis zu 50 % erreicht werden bei gleichzeitiger Reduzierung der Standardunsicherheit. Bei Störampplituden größer als 45  $\mu\text{m}$  könnte dieses neuartige Verfahren zur Wellenfrontkorrektur die Vermessung des Strömungsprofils eines freien Wasserstrahls ermöglichen, um hier neue Erkenntnisse bei dem Wärmetransport in Kühlsystemen zu erlangen [14]. Des Weiteren könnte das Prinzip der Wellenfrontkorrektur an Phasengrenzflächen mittels Fresnel Guide Star auf andere etablierte Messsysteme wie z.B. PIV übertragen werden und so neue Gebiete in der Laser Anemometrie erschlossen werden, die bisher nicht zugänglich gewesen sind.

## Dankesworte

Die Autoren danken der Deutsche Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines Reinhart Koselleck Projektes (DFG, grant CZ 55/30).

## Literatur

- [1] H. Schenk, T. Sander, C. Drabe, T. Klose and H. Conrad, Single crystal silicon micro mirrors, *PhysStatusSolidi C*, 2009;6:728–35..
- [2] D. Lucas, M. Beyer, E. Krepper, C. Vallée, T. Höhne, T. Seidel, L. Szalinski, U. Hampel, M. Schmidtke, E. Schleicher, H. Pietruske, P. Schütz, D. Danciu, D. Zhang, Deendarlianto, F. Barthel, C. Zippe, S. Hänsch, H. Carl and F.-P. Weiß, 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..
- [3] R. Schlüßler, J. Czarske and 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.
- [4] C. Willert, C. Hassa, G. Stockhausen, M. Jarius, M. Voges and J. Klinner, Combined PIV and DGV applied to a pressurized gas turbine combustion facility, *Meas. Sci. Technol.* 17, pp. 1670–1679, 2006.
- [5] R.Q.Fugate, D.L.Fried, G.A.Ameer, B.R.Boeke, S.L.Browne, P.H.Roberts, R.E.Ruane, G.A.Tyler and L.M.Wopat, Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star, *NATURE*, 12 September 1991.
- [6] J. Bertolotti, E. G. v. Putten, C. Blum, A. Lagendijk, W. L. Vos<sup>1</sup> and A. P. Mosk<sup>1</sup>, Non-invasive imaging through opaque scattering layers, *NATURE* 11578, 8 November 2012.
- [7] O. Katz, E. Small, Y. Guan and Y. Silberberg, Noninvasive nonlinear imaging through strongly-scattering turbid layers, *Optica*, Vol. 1, Issue 3, pp. 170-174 (2014).
- [8] C.-L. Hsieh, Y. Pu, R. Grange, G. Laporte and D. Psaltis, Imaging through turbid layers by scanning the phase conjugated second harmonic radiation from a nanoparticle, *Opt. Express* 18, 20723-20731 (2010), doi: 10.1364/OE.18.020723.
- [9] X. Xu, H. Liu and L. V. Wang, Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media, *NATURE PHOTONICS*.2010.306 | VOL 5 | MARCH 2011 | p 154-157.
- [10] G. Lerosey and M. Fink, Merging the best of two worlds, *NATURE PHOTONICS* | VOL 7 | APRIL 2013 | p. 265-267.
- [11] B. Judkewitz, Y. M. Wang, R. Horstmeyer and A. Mathy, Speckle-scale focusing in the diffusive regime with time reversal of variance-encoded light (TROVE), *nature photonis* 2013.31, 17 March 2013.
- [12] L. Büttner, C. Leithold and J. Czarske, Advancement of an Interferometric Flow Velocity Measurement Technique by Adaptive Optics, *International Journal of Optomechatronics*, 8:1, 1-13, DOI: 10.1080/15599612.2014.890685.
- [13] L. Büttner, C. Leithold and J. Czarske, Interferometric velocity measurements through a fluctuating gas-liquid interface employing adaptive optics, *Opt. Express* 21(25):30653–30663, December 2013.
- [14] W. Ambrosini, N. Forgione and F. Oriolo, Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures, *International Journal of Multiphase Flow*; Volume 28, Issue 9, September 2002, Pages 1521–1540; doi:10.1016/S0301-9322(02)00039-3.