

## **PIV-Messungen durch fluktuierende Phasengrenzflächen mittels Wellenfrontkorrektur und FPGA-beschleunigter Hardware**

### **PIV-measurement through a fluctuating phase boundary, featuring wave front correction with FPGA accelerated hardware**

**Hannes Radner, Martin Teich, Lars Büttner und Jürgen Czarske**

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

Adaptive Optik, Wellenfrontkorrektur, FPGA, Strömungsmessung, PIV  
adaptive optics, wavefront correction, FPGA, flow measurements, PIV

#### **Zusammenfassung**

Laseroptische Messverfahren wie z.B. PIV, LDV oder DGV sind in der Strömungsmesstechnik weit verbreitet, da sie berührungslos messen und eine hohe Orts- und Geschwindigkeitsauflösung mit einer niedrigen Messunsicherheit kombinieren. Die meisten laseroptischen Messverfahren haben jedoch eine gemeinsame Schwachstelle. Sie benötigen einen ungestörten optischen Zugang zum Messvolumen. In vielen Anwendungsfällen treten jedoch signifikante Brechungsindexfluktuationen auf, welche die Wellenfronten verzerren und dadurch den Bildpfad des Messgerätes stören. Hierdurch erhöht sich zunächst die Standardunsicherheit oder es kann auch zum Versagen der Messung führen. Um die auftretenden optischen Verzerrungen zu kompensieren, können Wellenfrontkorrektursysteme verwendet werden. Die Integration eines Wellenfrontsensors ist sehr aufwendig, deshalb stellen wir in diesem Beitrag eine iterative Korrektur des Bildpfades eines PIV Systems vorstellen. Hierbei wird über die Schärfemetrik des PIV-Bildes der Grad der Verzerrung bestimmt und eine iterative Korrektur durchgeführt. Es ist essentiell, dass die Kompensation der Störung sehr schnell erfolgt, da der Regelkreis mehrere Iterationen zur Korrektur braucht und schon bei einfachen Filmströmungen die Oberfläche mit einigen 100 Hz fluktuiert. Hierfür setzen wir eigens entwickelte Hardware ein, welche aus einer Hochgeschwindigkeitskamera, einem FPGA und einem Interface für einen Membranspiegel besteht. Der Regelkreis erreicht eine sehr geringe Zykluszeit, da der CMOS-Chip die Bilddaten direkt in den FPGA überträgt, welcher die nötigen Berechnungen durchführt und einen schnellen deformierbaren Membranspiegel mit 69 Elementen ansteuert. Es kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz der Spezialhardware eine Zykluszeit des Regelkreises von weniger als 1 ms erreicht werden kann. Hiermit wird es ermöglicht optische Störungen von bis zu 1 kHz zu dämpfen und neue Einsatzgebiete für PIV-Systeme zu erschließen. Als Beispiel kann die Untersuchung von Gasströmungen innerhalb von Taylorblasen angeführt werden. Hier würde ein genaues Verständnis über den Stofftransport zwischen Gas und Flüssigkeit es ermöglichen effizientere und umweltfreundlichere Reaktoren für die Prozessindustrie zu entwickeln.

#### **Einleitung**

Viele laseroptische Messverfahren, wie z.B. PIV, LDV, oder DGV haben sich in der Strömungsmesstechnik fest etabliert, da diese Verfahren eine hohe Geschwindigkeits- und

Ortsauflösung mit einer niedrigen Messunsicherheit kombinieren und berührungslos messen. Um diese guten Eigenschaften zu erreichen, brauchen sie einen ungestörten optischen Zugang zum Messvolumen. Bei vielen Messaufgaben treten hier jedoch im optischen Messpfad zwischen Messvolumen und Messgerät erhebliche Brechungsindexschwankungen auf, welche die beteiligten Wellenfronten stören. Diese Störungen lassen sich im Allgemeinen in Volumen- und Phasengrenzflächenstörungen unterteilen. Volumetrische Brechungsindexstörungen treten z.B. in Geweben oder Verbrennungsräumen mit hohen Temperatur- und Druckgradienten auf [1,2]. Phasengrenzflächenstörungen treten an Grenzflächen mit verschiedenen Brechungsindizes, wie z.B. einer fluktuierenden Wasser-Luft Grenzfläche auf. Um diese Störungen auszugleichen wurden Wellenfrontkorrektursysteme entwickelt. Diese wurden zuerst in der erdgebundenen Astronomie eingesetzt [3]. Hierbei wird mit einem Laser in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Fluoreszenz ein Leitstern erzeugt, welcher Licht mit einer bekannten Wellenfront abstrahlt. Diese wird in der Atmosphäre durch den Seeing Effekt in gleicher Weise wie das Licht von den Sternen verzerrt. Im Teleskop auf der Erde befinden sich ein Wellenfrontsensor, welcher diese Verzerrung misst und eine adaptive Optik, wie z.B. ein Membranspiegel, welche die Wellenfrontverzerrung kompensiert. Dieses Prinzip wurde schon erfolgreich für viele messtechnische Aufgaben eingesetzt. Eine Herausforderung ist es hierbei, einen Leitstern im Messvolumen zu platzieren. In biologischen Geweben werden hierfür z.B. fluoreszierende Partikel [4,5], Second Harmonic Generation [6] oder Ultraschallleitsterne [7-9] eingesetzt. Bei Messaufgaben in der Strömungsmesstechnik ist es in der Regel nicht möglich einen Leitstern im Messvolumen zu platzieren, ohne die Strömung signifikant zu beeinflussen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, Wellenfrontstörungen, hervorgerufen durch eine fluktuierende Grenzfläche, mit Hilfe des Fresnel Guide Star Konzeptes [10] zu kompensieren und es so zu vermeiden, einen Guide Star hinter der Störung platzieren zu müssen. Die Fresnel Guide Star Technik ist jedoch mit einem hohen instrumentellen und kalibriertechnischen Aufwand verbunden. Deshalb wird in diesem Beitrag eine iterative Methode untersucht. Hierbei wird über eine Schärfemetrik der Grad der Verzerrung des PIV Bildes bestimmt und ein Lichtmodulator solange iterativ angepasst, bis die Schärfe maximal wird. Diese Methode kommt ohne Guide Star aus, braucht keine aufwendige Kalibrierung und nutzt nur einen optischen Zugang für die Messung. Um dieses Konzept zu validieren, wurde in den Bild Pfad eines PIV-Systems ein Membranspiegel mit 69 Aktuatoren eingebaut und ein spezielles Regelsystem entwickelt. Dieses wertet das PIV Bild mit einer streaming fähigen Hochgeschwindigkeitskamera auf einem FPGA aus und steuert den Membranspiegel entsprechend an. Eine hohe Anzahl an Regelzyklen pro Sekunde ist hierbei sehr wichtig, da viele Iterationen nötig sind, um eine Störung zu kompensieren. Das vorgestellte System ist in der Lage, über 1000 Iterationen pro Sekunde durchzuführen.

## Optischer Aufbau

Das adaptive PIV System, siehe Abbildung 1, besteht aus einem Basin gefüllt mit Wasser, einem Membranspiegel (ALPAO, DM69), einer von uns entwickelten Hochgeschwindigkeitskamera und FPGA Verarbeitungseinheit FMS (Flexible Measurement System). Der Lichtschnitt wird mit einer 561 nm Laserquelle im CW Betrieb und einer Zylinderlinse erzeugt. Er hat eine Dicke von ca. 0,5 mm und wird durch Acrylglas ungestört von der Seite in einen 3D gedruckten Kanal eingekoppelt, siehe Abbildung 2. Eine Testströmung wird durch einen 0,5 mm breiten Spalt erzeugt. Als Seeding wurden 10 µm große silberbeschichtete Hohlglas-Kugeln verwendet. Der Bild Pfad des PIV Systems wird durch eine definierte Störung, wie z.B. eine bewegte Linse gestört. In Zukunft ist geplant, die Wasseroberfläche direkt als Störung zu verwenden. Das PIV Bild wird hinter der Störung mittels eines Membranspiegels von ALPAO mit 69 Aktuatoren korrigiert. Hierfür wird eine Überlagerung der Zernike Moden mit

dem Noll Index 4-10 mit der Spiegelmembran eingestellt. Der Membranspiegel besitzt eine Einschwingzeit von  $540 \mu\text{s}$ , eine maximale Defokus Amplitude von  $50 \mu\text{m}$  und eine nutzbare Apertur von  $10,5 \text{ mm}$ . Als Hochgeschwindigkeitskamera wird der CMOS Chip LUPA3000A von ON Semiconductor verwendet. Dieser liefert eine Bildrate von 3808 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von  $512 \times 512$  Pixeln. Die Pixel Daten werden direkt in einen FPGA übertragen, welcher die Bildschärfe auswertet und direkt den Membranspiegel ansteuert.

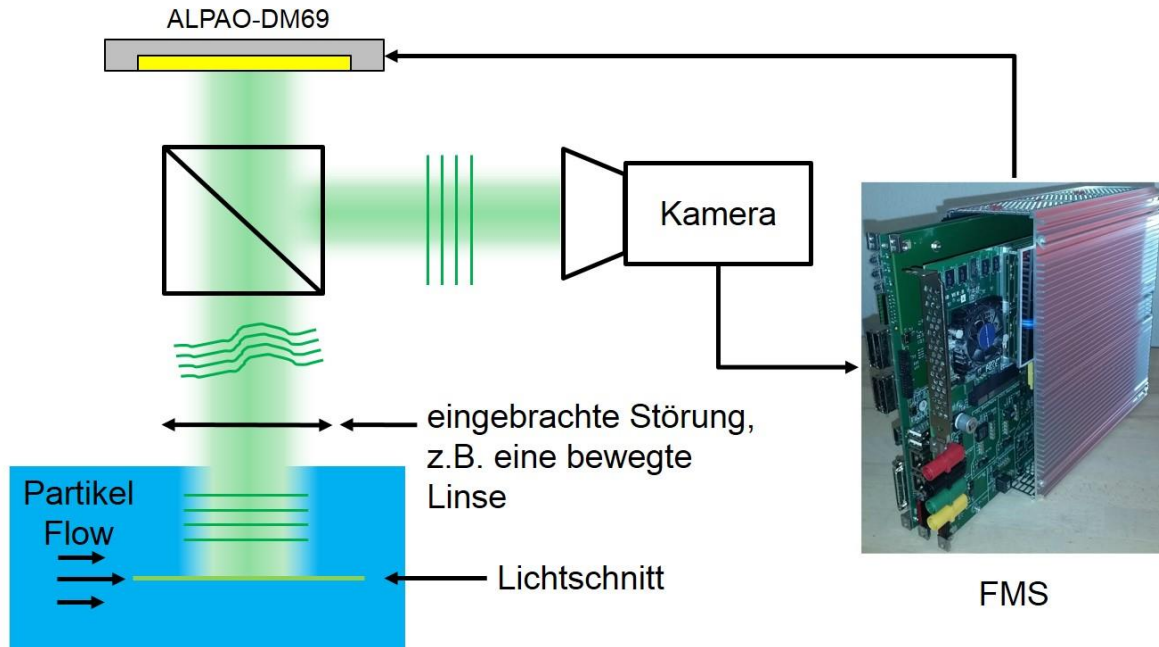


Abb. 1: Schematischer Aufbau des adaptiven PIV Systems, FMS: Flexible Measurement System

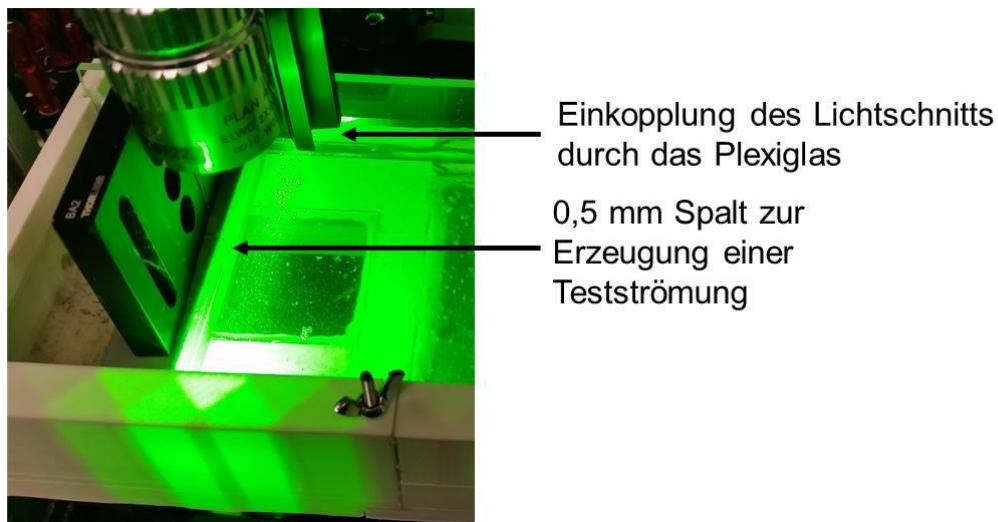


Abb. 2: Bassin mit Lichtschnitt.

## Hardware Konzept

Für das A-PIV System wurde eine spezielle FPGA Verarbeitungseinheit (FMS) gebaut. Diese besteht aus mehreren Platinen mit unterschiedlichen Funktionen, siehe Abbildung 3. Das Kernstück bildet ein FPGA Modul TE0782 von Trenz Electronic. Auf diesem Modul befindet sich ein Zynq 7100 SoC von Xilinx, welcher einen Kintex7 FPGA und einen Dual Core Arm Cortex-A9 Prozessor enthält. Dies ist eine sehr leistungsfähige Hardwarekombination, da der

Regelkreis im FPGA laufen kann und „High Level“ Steuer-, Initialisierungs- und Debugaufgaben von einem Linux System aus gesteuert werden können, welches auf dem Arm Prozessor läuft. Das Trenz Modul wird auf das Basis-Board aufgesteckt, welches eine Verbindung zu den anderen Platinen herstellt und einige Schnittstellen, wie z.B. Ethernet, PCI Express und USB zur Verfügung stellt. Das User-Board bildet die Schnittstelle zur streaming fähigen Hochgeschwindigkeitskamera und dem ALPAO Membranspiegel. Hierbei wurde Wert auf eine direkte Anbindung mittels LVDS Signalleitungen gelegt, um zusätzlich Latenzen bei der Datenübertragung zu vermeiden.

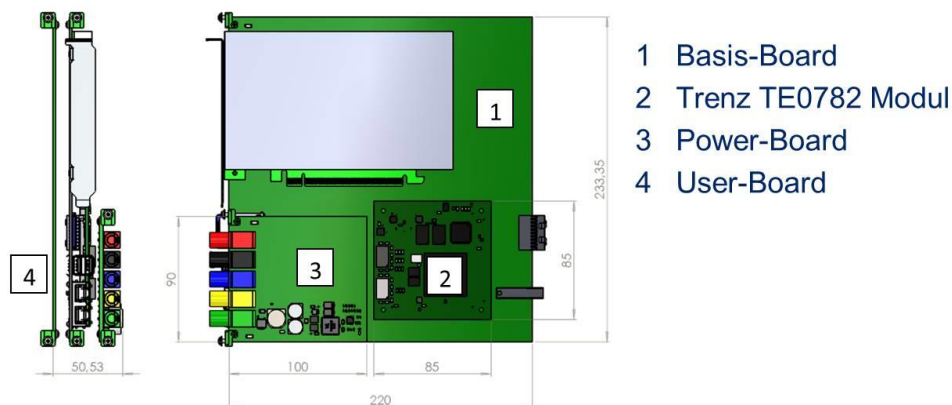


Abb. 3: Aufbau des Platinen-Stacks vom FMS.

## Regelkreis

Der Regelkreis besteht aus mehreren Teilschritten, siehe Abbildung 4. Zunächst erfolgt die Bildaufnahme mit dem CMOS Sensor durch Öffnen und Schließen des elektronischen Global Shutter. Danach wird das Bild vom CMOS zum FPGA übertragen. Während der Datenübertragung wird über eine Histogramm-Auswertung der Schärfegrad des Bildes bestimmt. Ein Regler entscheidet dann, ob das Bild im Vergleich zum vorherigen Regelschritt schärfer geworden ist oder nicht. Für den Fall, dass die Bildschärfe zugenommen hat, wird die Stellrichtung vom letzten Regelschritt beibehalten. Für den Fall, dass die Schärfe abgenommen hat, wird die Stellrichtung vom letzten Regelschritt invertiert. Mit dieser Strategie werden die Zernike Polynome mit den Noll Index 4-10 nacheinander optimiert. Im nächsten Schritt des Regelkreises wird berechnet, wie die 69 Aktuatoren ausgelenkt werden müssen, um die Überlagerung der Zernike Polynome darzustellen. Im letzten Schritt findet die Datenübertragung zum Membranspiegel statt und es wird die Einschwingzeit der Membran abgewartet, bevor das nächste Bild aufgenommen wird.

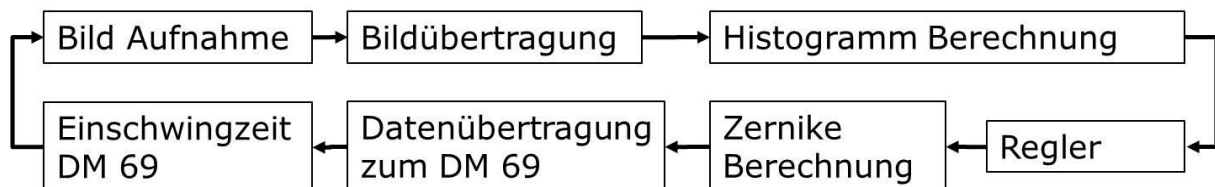


Abb. 4: Regelkreis, implementiert im FPGA auf dem FMS.

In der nachfolgenden Tabelle 1 ist jeweils aufgelistet, wieviel Zeit für jeden einzelnen Schritt mindestens gebraucht wird. Des Weiteren werden die benötigten Zeiten einer PC basierten Lösung gegenübergestellt.

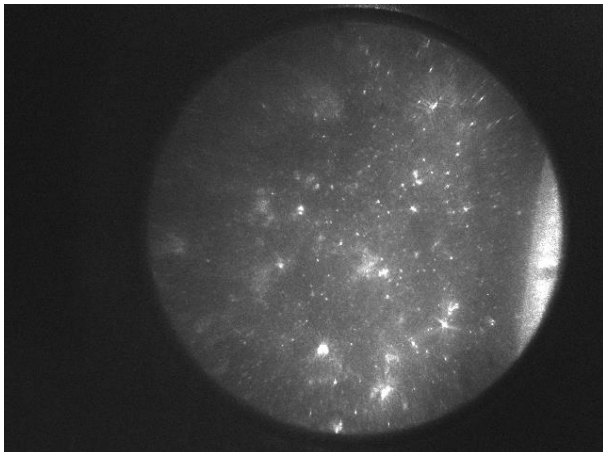
Regelschritt	FPGA	PC
Bild Aufnahme	1,6 $\mu$ s	10 ms
Bildübertragung	290 $\mu$ s	
Histogramm Berechnung	Berechnung während der Übertragung	1,25 ms
Regler	40 ns	
Zernike Berechnung	6 $\mu$ s	
ALPAO Datenübertragung	100 $\mu$ s	10 ms
Einschwingzeit DM 69	540 $\mu$ s	
$\sum$ 1 cycle	938 $\mu$ s	21,25 ms

Tabelle 1: Aufschlüsselung der benötigten Zeit für die einzelnen Arbeitsschritte des Regelkreises im Vergleich zu einer PC basierten Lösung.

### Schärfemetrik als Regelgröße

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, wird zur Bestimmung des Schärfegrades eine Histogramm Auswertung des PIV-Bildes vorgenommen. Der Grundgedanke dabei ist, dass ein scharfes Bild mehr helle Pixel als dunkle Pixel enthält.

**Fokussiert**



**Defokussiert**

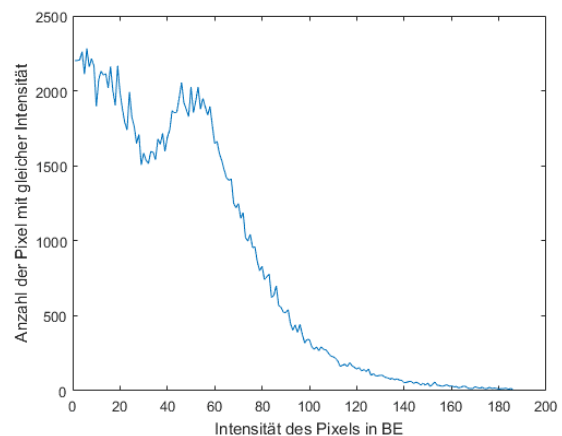
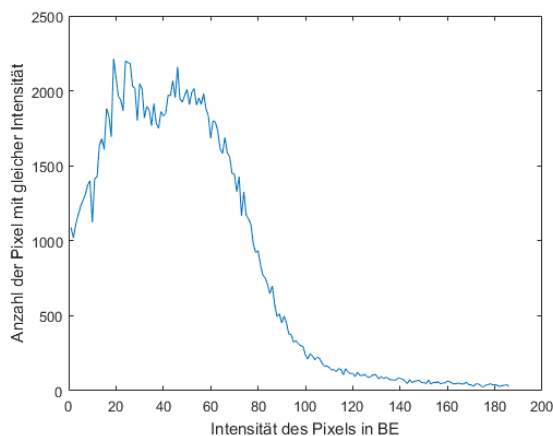
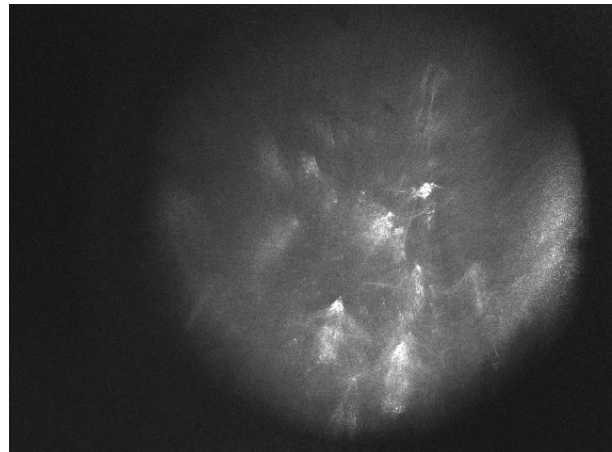


Abb. 5: Links: PIV-Bild und Histogramm fokussiert. Rechts: PIV-Bild und Histogramm defokussiert. Es ist deutlich im Histogramm zu erkennen, dass im defokussierten Fall die Anzahl an dunklen Pixeln viel größer ist, als im fokussierten Fall.

Um den Schärfegrad zu ermitteln, erstellt der Algorithmus zunächst ein Histogramm, in welchem er die Häufigkeiten verschiedener Pixelhelligkeiten zählt. Danach wird jede Häufigkeit mit ihrer Intensität gewichtet und anschließend über alle so erhaltenen Werte aufsummiert. In Abbildung 5 sind zwei PIV Bilder mit den zugehörigen Histogrammen zu sehen. Dabei ist das linke Bild scharf und das rechte Bild mit einer Linsenstörung defokussiert worden. Es ist deutlich zu erkennen, dass im defokussierten Fall in der Histogramm Verteilung viel mehr dunkle Pixel vorkommen, als im fokussierten Fall. Es gibt noch viele andere Algorithmen, um den Schärfegrad eines Bildes ermitteln zu können, z.B. der Riemann Tensor oder eine Betrachtung der Ortsfrequenzverteilung. In diesem Beitrag wurde sich für die Histogramm Schärfemetrik entschieden, weil diese sehr einfach auf einem FPGA zu implementieren ist und schon während der Datenübertragung berechnet werden kann. Dies verringert die benötigte Rechenzeit signifikant.

## Ergebnisse

Um das System zu validieren, wurde eine Linsenstörung in den Bild Pfad eingebracht und der zeitliche Verlauf der Schärfe während der iterativen Korrektur gemessen. Dies ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Regelsystem benötigt ca. 70 Iterationen, um die Linsenstörung auszugleichen. Als nächsten Schritt ist es geplant, die optische Verzerrung einer fluktuierenden Wasser-Luft Phasengrenzfläche zu kompensieren und die Anzahl der benötigten Iterationen durch den Einsatz und Kombination anderer Schärfemetriken zu verringern.

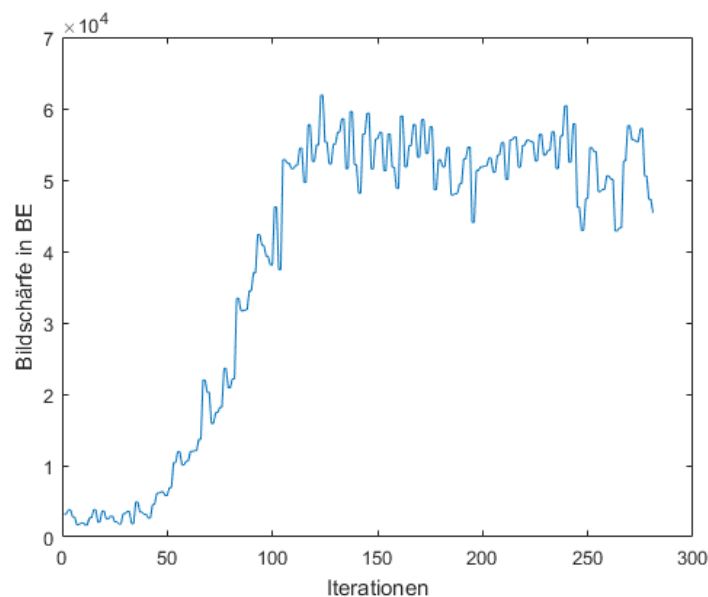


Abb. 6: Korrektur einer Linsenstörung in ca. 70 Iterationen. Im nächsten Schritt ist es geplant, die optische Störung einer fluktuierenden Wasseroberfläche zu kompensieren und die Anzahl der benötigten Iterationen durch den Einsatz und Kombination anderer Schärfemetriken zu verringern.

## Fazit

In diesem Beitrag wurde ein adaptives PIV System vorgestellt, welches über eine Schärfemetrik den Grad der Verzerrung des PIV Bildes bestimmt und iterativ einen Membranspiegel solange anpasst, bis die optische Störung vollständig kompensiert wurde. Dieses iterative Verfahren benötigt keinen weiteren optischen Zugang für einen Guide Star und es muss nur

ein Membranspiegel in den Bild Pfad des PIV-Systems integriert werden. Dies stellt einen großen Vorteil im Vergleich zu Guide Star basierten Wellenfrontkorrektursystemen dar. Für die Bildkorrektur werden allerdings mehrere Iterationen benötigt. Um diesen Nachteil zu kompensieren, wurde bei dem Systemdesign Wert auf eine möglichst kleine Zykluszeit gelegt. Das vorgestellte System schafft mehr als 1000 Iterationen pro Sekunde. Es ist damit um ca. zwei Größenordnungen schneller, als eine vergleichbare PC basierte Lösung. Erreicht wurde dies durch den Einsatz von eigenentwickelter Spezialhardware, wie dem FMS und einer streaming fähigen Hochgeschwindigkeitskamera. Mit diesem System können in der optischen Messtechnik neue Gebiete 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] **R. Schlüßler, J. Czarske und A. Fischer, 2014:** "Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations", *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 94-104
- [2] **C. Willert, C. Hassa, G. Stockhausen, M. Jarius, M. Voges and J. Klinner, 2006:** "Combined PIV and DGV applied to a pressurized gas turbine combustion facility", *Meas. Sci. Technol.* 17, pp. 1670–1679
- [3] **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, 1991:** "Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star", *NATURE*
- [4] **J. Bertolotti, E. G. v. Putten, C. Blum, A. Lagendijk, W. L. Vos<sup>1</sup> and A. P. Mosk<sup>1</sup>, 2012:** "Non-invasive imaging through opaque scattering layers", *NATURE*
- [5] **O. Katz, E. Small, Y. Guan and Y. Silberberg, 2014:** "Noninvasive nonlinear imaging through strongly-scattering turbid layers", *Optica*, Vol. 1, Issue 3, pp. 170-174
- [6] **C.-L. Hsieh, Y. Pu, R. Grange, G. Laporte und D. Psaltis, 2010:** "Imaging through turbid layers by scanning the phase conjugated second harmonic radiation from a nanoparticle", *Opt. Express* 18, 20723-20731
- [7] **X. Xu, H. Liu and L. V. Wang, 2011:** "Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media", *NATURE PHOTONICS*, Vol. 5 pp. 154-157.
- [8] **G. Lerosey and M. Fink, 2013:** "Merging the best of two worlds", *NATURE PHOTONICS* | Vol. 7 pp. 265-267
- [9] **B. Judkewitz, Y. M. Wang, R. Horstmeyer and A. Mathy, 2013:** "Speckle-scale focusing in the diffusive regime with time reversal of variance-encoded light (TROVE)", *NATURE PHOTONICS*
- [10] **H. Radner, L. Büttner und J. Czarske, 2015:** "Interferometric velocity measurements through a fluctuating phase boundary using two Fresnel guide stars", *Optics Letters*