# Particle Tracking Velocimetry mit dynamischer Aberrationskorrektur für 3D-Strömungsmessungen in Tropfen mit dynamischer Oberfläche

Particle Tracking Velocimetry with Dynamical Aberration Correction for 3D Flow Measurements in Oscillating Droplets

# Clemens Bilsing<sup>1\*</sup>, Hannes Radner<sup>1</sup>, Lars Büttner<sup>1</sup>, Sebastian Burgmann<sup>2</sup>, Andreas Metzmacher<sup>2</sup> und Jürgen Czarske<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (MST), TU Dresden, 01062 Dresden \*E-Mail: clemens\_matthias.bilsing@tu-dresden.de <sup>2</sup>Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Particle Tracking Velocimetry, Adaptive Optik, Doppelhelix-Punktspreizfunktion Particle Tracking Velocimetry, Adaptive Optics, Double-Helix Point Spread Function

#### Zusammenfassung

Bei vielen technischen Prozessen spielen dreidimensionale, turbulente Strömungen eine bedeutende Rolle. Für ein genaues Verständnis ist in vielen Fällen ein 3D-3C-Messkonzept erforderlich. Soll die Strömung durch eine fluktuierende Phasengrenzfläche untersucht werden, führen durch diese Grenzschicht verursachte Abbildungsfehler jedoch zu einer erhöhten Messunsicherheit. Als Lösung wird in diesem Beitrag ein 3D-PTV-Messsystem mit adaptivoptischer Korrektur durch einen Spiegel mit deformierbarer Membran vorgestellt. Bei einer 3D-3C-Demonstrationsströmungsmessung an einer Mikrokanalströmung durch einen oszillerenden Tropfen konnte mit der adaptiven Optik die durch die von der fluktuierenden Grenzfläche induzierte Messunsicherheit um 58% gegenüber dem Fall ohne Oszillation gesenkt werden. Die zufällige Unsicherheit bei der Partikellokalisierung liegt bei 1,63 µm für die axiale Koordinate und bei 360,9 nm für die laterale Position. Das neuartige System ermöglicht perspektivisch die Messung von Strömungsmechanik sind auch andere Anwendungen denkbar, wie z. B. ein Einsatz in der Biomedizintechnik.

# Einleitung

Bildgebende Strömungsmessverfahren wie PIV (Particle Imaging Velocimetry) oder PTV (Particle Tracking Velocimetry) sind weit verbreitet, da sie eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung bieten und im Gegensatz zu LDA (Laser-Doppler-Anemometrie) auch ausgedehnte Messbereiche beobachtet werden können. Bei bestimmten Anwendungen treten jedoch besondere Herausforderungen für die Messtechnik auf, die den Einsatz der konventionellen Methoden erschweren.

Ein Beispiel dafür ist die Messung der Innenströmung eines oszillierenden Tropfens durch dessen fluktuierende Oberfläche. Dieser Fall ist z. B. interessant für die Untersuchung von Tropfen in Brennstoffzellen, da sich die Tropfen dort auf einer opaken Membran befinden

und die Oberfläche somit der einzige optische Zugang ist (Abb. 1). Eine ähnliche Problematik stellt sich bei Filmströmungen (Abb. 2).

Hier ergeben sich zwei besondere Herausforderungen:

- Mit den Standardverfahren f
  ür PIV und PTV sind nur Messungen in einem d
  ünnen Lichtschnitt m
  öglich und es k
  önnen auch nur zwei Komponenten des Str
  ömungsfelds bestimmt werden. Bisherige Messungen [1] deuten jedoch darauf hin, dass die Str
  ömungsmuster in oszillierenden Tropfen sehr komplex sind und zum vollst
  ändigen Verst
  ändnis eigentlich ein 3D-3C-Str
  ömungsmessverfahren ben
  ötigt wird.
- 2. Bei der Messung der Strömung durch dessen oszillierende Oberfläche ergibt sich eine erhöhte Messunsicherheit [12]. Der Grund dafür ist die Brechung des Partikellichts an der sich bewegenden Phasengrenzfläche, die sowohl zu statischen als auch dynamischen Abbildungsfehlern führt und somit die Standardabweichung der Messung erhöht.



Abb. 1: Von Luft angeströmter Tropfen auf opaker Unterlage. Der einzige optische Zugang ist hier die fluktuierende Grenzfläche.



Abb. 2: Auch bei Filmströmungen auf opaken Unterlagen ist eine optische Strömungsmessung schwierig.

Für 3D-3C-Strömungsmessungen gibt es bereits verschiedene Lösungsansätze [2]. Unter anderem können scannende 2D-2C-Verfahren angewendet werden oder auch Multi-Kamera-Aufbauten mit tomographischer Auswertung, wobei bei ersterem die Ebenen des Messvolumens zu unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen werden und deshalb nur bedingt von echten 3D-3C-Verfahren gesprochen werden kann.

Insbesondere für mikrofluidische Strömungen bieten sich Verfahren aus der 3D-Mikroskopie als Alternative an, bei denen das optische System so entworfen wird, dass aus dem Bild eines Fluoreszenzpartikels dessen drei Positionskomponenten bestimmt werden können. Diese besitzen den Vorteil, dass für eine vollständige 3D-3C-Messung nur eine einzige Kamera benötigt wird. Beispiele dafür sind die Verwendung einer speziellen Aperturmaske mit 3 Löchern [3] oder auch das Einbringen eines Astigmatismus [4, 5]. In diesem Beitrag wurde eine spezielle Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF) [6, 7, 8] verwendet, die ursprünglich aus der 3D-Mikroskopie stammt. Das Grundkonzept der dreidimensionalen Positionsmessung mittels DH-PSF ist in Abb. 3 dargestellt. Ein Partikel wird nicht auf einen, sondern auf zwei helle Punkte abgebildet. Während die laterale Position des Partikels durch den Orientierungswinkel zwischen beiden Punkten kodiert. Auf diese Weise können aus einem Bild einer einzigen Kamera alle drei Partikelkoordinaten bestimmt werden.

Die Brechung des Partikellichts an der sich bewegenden Phasengrenzfläche führt zu dynamischen Abbildungsfehlern wie sie auch ähnlich in der Astronomie auftreten. Hier hat sich das Konzept der adaptiven Optik durchgesetzt, bei dem die optische Störung mittels eines Laserleitsterns gemessen und anschließend mit einem deformierbaren Spiegel korrigiert wird. In einer vorangegangenen Publikation [9, 13] wurde dieses Konzept bereits erfolgreich für PIV verwendet, hier soll nun die Eignung dieses Verfahrens für die 3D3C-Strömungsmessung in Tropfen untersucht werden. Abb. 4 zeigt vereinfacht die Grundidee eines solchen Versuchsstands. Mittels eines Fresnel-Leitsterns (FGS) und einem Wellenfrontsensor wird die optische Störung bestimmt, die dann mit einem deformierbaren Spiegel korrigiert wird. Auf diese Weise kann mittels der PTV-Kamera eine Strömungsmessung mit verringerter Messunsicherheit aufgenommen werden.

Im folgenden Beitrag geht es darum, wie ein 3D-PTV-System auf Grundlage der DH-PSF mit adaptiver Optik kombiniert werden kann, um eine Strömungsmessung in Tropfen durchzuführen.



Abb. 3: Durch das Einbringen der DH-PSF wird ein Partikel auf zwei Intensitätsmaxima abgebildet, deren Orientierung die axiale Tief des Partikels kodieren. Die laterale Position ergibt sich durch den Mittelpunkt der beiden Maxima. Quelle: [11]



Abb. 4: Grundlegendes Konzept zur Strömungsmessung durch eine fluktuierende Phasengrenzfläche mit adaptiver Optik und einem Fresnel-Leitstern (FGS). Der Fresnel-Leitstern wird mit einem Strahlteiler eingekoppelt und in Richtung Grenzfläche geleitet. Bei der dortigen Reflexion wir die Wellenfront des Lasers gekrümmt. Die optische Störung des Fluoreszenzlichts lässt sich anschließend aus der Wellenfrontmessung des FGS bestimmen, sodass ein korrigierender Stellwert für den Spiegel berechnet werden kann.

# **Experimenteller Aufbau**

Der vollständige Versuchsaufbau ist in Abb. 5 dargestellt.

Das Messsystem besteht grundlegend aus zwei Subsystemen: Dem 3D-PTV-System sowie dem Adaptive-Optik-System.



Abb. 5: Vereinfachte Skizze des experimentellen Aufbaus zur 3D-3C-Strömungsmessung durch fluktuierende Phasengrenzflächen.

Das 3D-PTV-Subsystem besteht im Kern aus dem Flächenlichtmodulator und der PTV-Kamera. Über das Objektiv und nicht eingezeichnete Relais-Linsen werden die Partikel im Messvolumen auf den Kamerasensor abgebildet. Der Flächenlichtmodulator steht in der Fourierebene der Abbildung und prägt mit einer Spiralphasenmaske die Doppelhelix-Punktspreizfunktion (DH-PSF) in das System ein, sodass dreidimensionale Strömungsmessungen durchgeführt werden können.

Die Grundstruktur des Wellenfrontkorrektursystems entspricht dem Schema in Abb. 4. Der Fresnel-Leitstern (FGS) zur Messung der Wellenfront wird in das System eingekoppelt. Das Licht des FGS wird an der Tropfenoberfläche reflektiert, wodurch dessen Wellenfront verzerrt wird. Diese Verzerrung wird mittels des FGS-Hartmann-Shack-Sensors gemessen. Anschließend kann der deformierbare Spiegel so eingestellt werden, dass die Wellenfrontverzerrung des Partikellichts korrigiert wird. Der transmittierende Laserleitstern TGS wird lediglich zur Kalibrierung des Systems benötigt, nicht aber zur eigentlichen Messung. Auf diese Weise wird die Korrektur von Störungen auch für Messvolumina ohne ungestörten optischen Zugang ermöglicht. Zur Signalverarbeitung und Regelung wird eine spezielle, an der MST entwickelte Hardware verwendet, die in [9] vorgestellt wurde.

# Charakterisierung und Ergebnisse

Zur Charakterisierung und Verifizierung des Systems wurden verschiedene Experimente durchgeführt. Die durchschnittliche, zufällige Messunsicherheit der Position wurde mit einem dreiachsigen Linearaktor bestimmt. Mit diesem wurde ein Fluoreszenzpartikel auf einem dreidimensionalen Gitter verfahren. Dabei wurden für jede Position 10 Bilder aufgenommen, sodass die zufällige Messunsicherheit in Abhängigkeit der Position bestimmt werden konnte. Im Durchschnitt ergab sich so eine zufällige axiale Messunsicherheit von 1,63 µm, während

die laterale Position eine Standardabweichung von 360,9 nm aufwies. Der axiale Messbereich beträgt hier 870  $\mu$ m, sodass sich eine durchschnittliche relative Unsicherheit von 0,2% ergibt.

Zur Charakterisierung der Messunsicherheitsverringerung bei Strömungsmessungen durch das Wellenfrontkorrektursystem, wurde die Strömung in einem Mikrokanal (Ibidi 800 µm Uncoated) durch einen oszillierenden Tropfen vermessen (Abb. 6). Die oszillierende Oberfläche des Tropfens bringt hier eine unbekannte optische Störung ein, die mithilfe der adaptiven Optik korrigiert wird. Die Mikrokanalströmung dient hier als bekannter Referenzfall, um die Adaptive-Optik-Korrektur zu charakterisieren. Der Tropfen bestand aus destilliertem Wasser und hatte ein Volumen von 3 ml. Die wichtigsten Parameter für die Messung sind in Tabelle 1 dargestellt.



Abb. 6: Zur Charakterisierung des Systems wurde die Strömung in einem Mikrokanal durch einen mit Luft angeströmten Tropfen gemessen.

In Abb. 7 sind die gemessenen Strömungsparabeln für drei unterschiedliche Fälle dargestellt. Wird die Strömung durch den Tropfen ohne Korrektur gemessen, nimmt die Streuung der Messpunkte deutlich zu (Vergleich (7.b) und (7.c)). Durch die Korrektur kann die durch die dynamischen Aberrationen verursachte Messunsicherheit um ca. 58 % gesenkt werden (Abb. 8). Die genaueste Messung wird ohne Tropfen erreicht, da hier die statischen Aberrationen des Tropfens nicht auftreten und der Mikrokanal direkt im richtigen Arbeitsabstand zum Objektiv platziert werden kann.

| Mess-<br>dauer | Abstand<br>der Mes-<br>sung<br>zum Zu-<br>fluss | Fluoreszenz-<br>partikel                         | Flüssigkeit                                      | Soll-<br>Volumenstrom | Bildrate | Mess-<br>Volumen-<br>Größe |
|----------------|---|--|--|-----------------------|----------|----------------------------|
| 76 s           | 7,5 mm  | PS-FluoRot-<br>Fi317<br>(microparticles<br>GmbH) | Salzwasser<br>mit<br>1,05<br>g / cm <sup>3</sup> | 7 µl / s              | 60,6 Hz  | 1mm<br>x0,75 mm<br>x800µm  |

Tab. 1: Parameter der Strömungsmessung im Mikrokanal



Abb. 7: Gemessene Strömungsparabeln für unterschiedliche Fälle. Messpunkte mit mehr als 2σ Abstand zum Mittelwert wurden mit einem Ausreißertest aussortiert.



Abb. 8: Mittlere relative Abweichung der Geschwindigkeitspunkte vom Mittelwert.

Des Weiteren wurde zum Demonstrationszwecken eine 3D-3C-Strömungsmessung in einem 0,5µl-Tropfen durchgeführt, der langsam von Luft angeströmt wurde (Abb. 9 und 10). Für Messungen in deutlich oszillierenden Tropfen ist die Bildrate der verwendeten Kamera mit 60 Hz zu gering (CS2100M-USB von Thorlabs). In Übereinstimmung zu den Beobachtungen von [10] ist ein Wirbel um das Zentrum des Tropfens erkennbar.





Abb. 9: Auswahl an Trajektorien, die während der Messung aufgenommen wurden.

Abb. 10: Strömungsfeld in der lateralen Ebene über alle axialen Positionen, das mittels Interpolation aus den Partikeltrajektorien gewonnen wurde.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Für die Messung dreidimensionaler Strömungen durch fluktuierende Phasengrenzflächen wurde ein 3D-PTV-System mit adaptiv-optischer Korrektur aufgebaut und charakterisiert. Das PTV-System besitzt eine durchschnittliche zufällige Messunsicherheit von 1,63 µm für die axiale Position bei einem Messbereich von 870 µm, sodass sich eine relative Standardabweichung von 0,2 % ergibt. Die laterale Position von Partikeln wird im Mittel mit einer zufälligen Unsicherheit von 360,9 nm bestimmt. Zur Verifikation und Charakterisierung wurde das Strömungsprofil in einem Mikrokanal durch einen oszillierenden Tropfen gemessen. Dabei konnte die relative Messunsicherheit im Vergleich zum statischen Tropfen um ca. 58 % gesenkt werden. Zu Demonstrationszwecken wurde des Weiteren eine 3D-3C-Strömungsmessung in einem langsam von Luft angeströmten Tropfen durchgeführt.

Für die Untersuchung der schnellen Strömungen in deutlich oszillierenden Tropfen soll in Zukunft ein Bildverstärker mit einer Hochgeschwindigkeitskamera in das System integriert werden. Außerdem sollen Optimierungsmöglichkeiten in der Regelungstechnik untersucht und eingebracht werden, um die Störunterdrückung zu verbessern. Schlussendlich soll die Innenströmung eines Tropfens in einem Brennstoffzellenmodell untersucht werden mit dem Ziel, genauere Modelle für das Bewegungsverhalten von Tropfen aufzustellen.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Messsystem ermöglicht erstmals weltweit die dreidimensionale Strömungsmessung durch fluktuierende Phasengrenzflächen. Der Aufbau kann an unterschiedliche Probleme angepasst werden, wodurch perspektivisch neue Erkenntnisse für verschiedene Anwendungsfälle in der Mikrofluidik gewonnen werden können.

#### Dankesworte

Die Autoren würden gerne Dr. Nektarious Koukourakis für die anregenden Diskussionen danken. Das IGF-Vorhaben (Nr. 21190 BG/2) der Forschungsvereinigung aus der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik (TU Dresden) sowie dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik (Bergische Universität Wuppertal) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Des Weiteren gilt unsere Danksagung den im Projektausschuss beteiligten Firmen.

#### Literatur

[1] S. Burgmann, M. Dues, B. Barwari, J. Steinbock, L. Büttner, J. Czarske, U. Janoske, 2021: "Flow measurements in the wake of an adhering and oscillating droplet using laser-Doppler velocity profile sensor", Experiments in Fluids (2021) 62:47

[2] C. Cierpka, C. J. Kähler (2011): "Particle imaging techniques for volumetric three-component (3D3C) velocity measurements in microfluidics", J Vis (2012) 15:1–31

[3] C. E. Willert, M. Gharib (1992): "Three-dimensional particle imaging with a single camera", Experiments in Fluids 12, 353-358 (1992)

[4] C. Cierpka, M. Rossi, R. Segura, C. J. Kähler (2010): "On the calibration of astigmatism particletracking velocimetry for microflows", Meas. Sci. Technol.22(2011) 015401 (10pp)

**[5] H. Pin Kao, A. S. Verkman (1994):** "Tracking of Single Fluorescent Particles in Three Dimensions: Use of Cylindrical Optics to Encode Particle Position", Biophysical Journal Volume 67 September 1994 1291-1300

[6] M. Teich, M. Mattern, J. Sturm, L. Büttner, J. W. Czarske (2016): "Spiral phase mask shadowimaging for 3D measurement of flow fields", Vol. 24, No. 24, 28 Nov 2016, OPTICS EXPRESS 27371

[7] M. Teich, L. Büttner und J. Czarske (2018): "Adaptives Helix Partikel Tracking in verdunstungsinduzierten Wassertropfenströmungen", Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", 4.– 6.September 2018,Rostock

[8] S. Pavani, M. Thompson, J. Biteen, S. J. Lord, N. Liu, R. Twieg, R. Piestun, W. E. Moerner: "Three-dimensional, single-molecule fluorescence imaging beyond the diffraction limit by using a double-helix point spread function", Proceedings of the National Academy of Sciences Mar 2009, 106 (9) 2995-2999

[9] H. Radner, J. Stange, L. Büttner, J. Czarske (2021): "Field-Programmable System-on-Chip-Based Control System for Real-Time Distortion Correction in Optical Imaging", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No. 4, April 2021

[10] G. Minor, N. Djilali, D. Sinton, P. Oshkai (2009): "Flow within a water droplet subjected to an air stream in a hydrophobic microchannel", Fluid Dyn. Res. 41 (2009) 045506 (22pp)

[11] S. Pavani und R. Piestun (2008), "Three dimensional tracking of fluorescent microparticles using a photon-limited double-helix response system," Opt. Express 16, 22048-22057 (2008)

[12] L. Büttner, C. Leithold, and J. Czarske (2013), "Interferometric velocity measurements through a fluctuating gas-liquid interface employing adaptive optics", Opt. Express 21, 30653-30663 (2013)

[13] L. Büttner, M. Teich, N. Koukourakis, J. Grottke und J. Czarske (2016), "Particle Image Velocimetry mit adaptiv-optischer Bildkorrektur", GALA-Tagung 6. – 8. September 2016, Cottbus