

Adaptives Helix Partikel Tracking in verdunstungsinduzierten Wassertropfenströmungen

Martin Teich, Lars Büttner und Jürgen Czarske

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden

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

3D-3C Particle Tracking Velocimetry, Adaptive Optik, Mikroströmungen

Zusammenfassung

Es wird eine neue 3D-3C Messmethode für die Strömungsmechanik von mikro- und millimeterkaligen Strömungen vorgestellt. Helix-PTV bietet einen einstellbaren Tiefenmessbereich von 40 bis 700 μm entlang der optischen Achse eines 1-Kamera-Systems. Es wird ein Lichtfeldmodulator eingesetzt (Flüssigkristall-Display), welcher neben der dritten Raumkoordinate zusätzlich Möglichkeiten zur Aberrationskorrektur bietet. Die neuartige Messmethode wird an einer Mikrokanalströmung mit rückwärts-gerichteter Stufe als auch in einem konvektionsgetriebenen Flüssigkeitstropfen demonstriert. Die Messergebnisse versprechen ein großes Potential für die 3D-3C Fluidmesstechnik und zeigen gleichzeitig die mögliche Erschließung neuer Strömungsanwendungen an fluktuierenden Phasengrenzflächen.

Einleitung

Particle Tracking Velocimetry (PTV) ist ein häufig verwendetes Messverfahren der Strömungsmesstechnik mit hoher Orts- und Geschwindigkeitsauflösung. Im einfachsten Fall wird ein 2D-2C Geschwindigkeitsfeld erstellt. Allerdings gibt es Anwendungsfälle bei denen eine dreidimensionale Erfassung des Strömungsfeldes erforderlich wird (z.B. im Flüssigkeitstropfen), da eine einzelne Messebene oder sich überschneidende Messebenen kein konsistentes Bild der Strömung liefern können. 3D-3C Ansätze können allerdings zu sehr hohem technischen Aufwand führen [1],[2].

Eine Manipulation des Tropfens kann durch Anströmung mit Luft erfolgen und in einem Mikrokanal [3] oder an einer freien Oberfläche [4] stattfinden. Die Luftanströmung induziert eine Strömungsbewegung im Tropfen aber auch Vibrationen an der Oberfläche und verändert diese zeitlich. Ein weiterer Weg Strömungen zu induzieren ist es Konvektion zu nutzen z.B. durch Zumischen von Ethanol [5]. Eine Anwendung für das gezielte Verwenden von Konvektion in einem Flüssigkeitstropfen ist z.B. die gezielte Streckung und kontrollierte Ablagerung von DNA-Molekülen [6],[7]. Eine Luft-Anströmung wird notwendig für die Wasserrückstandentfernung in Brennstoffzellen, was ein energie-effizienzsteigernder Ansatz ist. Dafür ist das grundlegende Verständnis von schnellen Tropfenströmungen (im Bereich Geschwindigkeitsbereich von 1-10 mm/s) wichtig. Die Strömungsmessung zu diesen Anwendungen stellt hohe Anforderungen an die 3D-3C Messtechnik, da durch die vibrierende Tropfenoberfläche zeitlich veränderliche Aberrationen in das System eingebracht werden. Bis dato gibt es lediglich Software-Korrektur Verfahren zur Entzerrung des Bildfeldes innerhalb

des Tropfens [8]. Diese funktionieren allerdings nur im Falle einer statischen Tropfenoberfläche ohne dynamisch veränderliche Vibrationen.

Zur Lösung des Problems benötigt man ein aberrations-robustes bzw. korrigierendes System für eine 3D-3C Messung. Um Informationen über die dritte Raumdimension zu erhalten gibt es bereits viele Ansätze. Ein Ansatz nutzt eine Zylinderlinse um die astigmatische Verzerrung der Partikel auf die Tiefe entlang der optischen Achse zurückzuführen [9]. Dieser Ansatz verwendet eine statische Phasenmaske (Zylinderlinse), die sehr lichteffizient eine zusätzliche Koordinate extrahieren lässt. In unserer Arbeit beschäftigen wir uns mit einer Phasenmaskenaufprägung, die mit einem Flüssigkristall-Lichtfeldmodulator erzeugt wird (Helix-PTV) [10]. Der Modulator bietet die zusätzliche Funktion, dynamische Aberrationen zu korrigieren und den Messbereich entlang der optischen Achse einstellbar zu machen um damit einen großen Messbereich mit hoher Genauigkeit erreichen zu können.

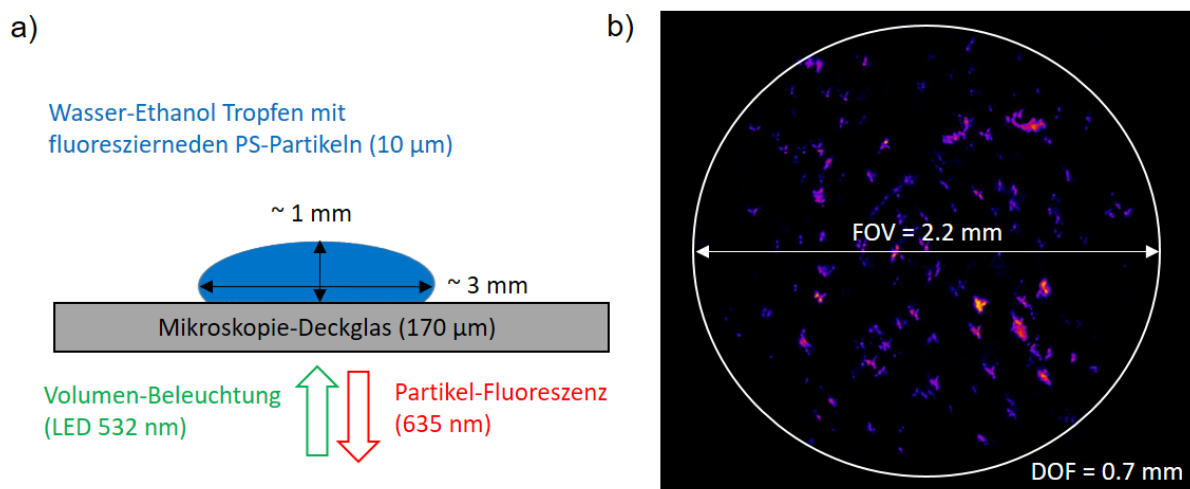


Abb. 1: a) Schematischer Aufbau und Abmessungen für eine 3-dimensionale Messung einer Tropfenströmung. Fluoreszierende Polystyrol-Partikel werden mit grünem LED-Licht angeregt und die Fluoreszenz wird in das Doppel-Helix-PTV-Setup abgebildet. b) Sichtfeld (FOV) bei 10-facher Objektivvergrößerung und einem 22 mm Okular. Die Tiefenschärfe (DOF) des Doppel-Helix-PTV-Setups beträgt 0,7 mm d.h. 70% der durchschnittlich zu erwartenden Tropfenhöhe von 1 mm.

In dieser Arbeit geht es um die Vorstellung einer neuen 3D-3C Messtechnik für die Strömungsmechanik. Diese nutzt eine Doppel-Helix Punktspreizfunktion zur Extrahierung der dritten Raumkoordinate. Der Einfluss von Aberrationen niedriger Ordnung ist gegenüber der normalen Punktspreizfunktion einfacher charakterisierbar und kann durch Re-Kalibrierung bzw. durch den Einsatz eines Lichtfeldmodulators kompensiert werden.

Es werden zuerst Messungen in einer kontrollierbaren Umgebung d.h. einem Mikrokanal gezeigt, um die Funktionsweise von Helix-PTV zu demonstrieren. Anschließend werden Messungen in einem Tropfen aus Wasser-Ethanol Gemisch erläutert, bei denen bereits das Aufsetzen des Tropfens und ein geringer Luftzug im Labor Herausforderungen an das Experiment stellen. Ziel der Arbeit ist es, die induzierten Störungen einer Luft-Anströmung und der damit verbundenen Vibration und Verformung des Tropfens zu entkoppeln von der 3D-3D Messfähigkeit des Systems. Es gilt Wege zu finden trotz dynamischer Störungen zuverlässig die innere Strömung des Tropfens und die Interaktion mit der Luft-Anströmung dreidimensional zu charakterisieren.

Experimenteller Aufbau

Der optische Messaufbau besteht aus einem invertierten Mikroskop (Nikon Ti-E) auf dem Mikrokanal bzw. Wassertropfen mit Deckglas sich befinden und einem Anbau am Ausgangsport des Mikroskops. Polystyrol-Partikel (PS-FluoRot-10.0 von Microparticles GmbH) werden der Mikrokanalströmung bzw. dem Wassertropfen beigegeben. Die rote Fluoreszenz wird mit grünem LED Licht angeregt. Der externe Anbau hinter der Tubus-Linse (L_1) des Mikroskops besteht aus einer Fourier-Linse (L_2), welche das Zwischenbild hinter dem Mikroskop-Ausgang auf einen Flüssigkristallmodulator (LCoS-SLM) in den Fourier-Raum transferrt. Der LCoS-SLM (Holoeye) reflektiert das Fluoreszenzlicht und prägt eine Phase (mit Rampen von 0 bis 2π) in Form einer Spiralphasenmaske auf. Nach der vertikalen Extrahierung durch einen Strahlteiler (BS) und der Transmission durch einen Polarisator wird das Licht durch eine Linse (L_3) auf eine Standard-CCD Kamera (Basler) fokussiert (siehe Abb. 2a). Die Spiralphasenmaske sorgt dafür, dass aus einer Standard-Punktspreizfunktion eine sogenannte Doppel-Helix-Punktspreizfunktion wird (Abb. 2b). D.h. jedes Partikel erscheint in Form eines Doppelbildes. Alle Partikel die außerhalb des Fokus ($z=0$) liegen, erfahren nicht wie standardmäßig zu erwarten ist, eine Verbreiterung der Intensitätsverteilung (Blurring), sondern das entstehende Doppelbild eines jeden Partikels verändert seine Orientierung entlang der optischen Achse z bei nahezu gleichbleibender Intensitätsverteilung (Abb. 2c).

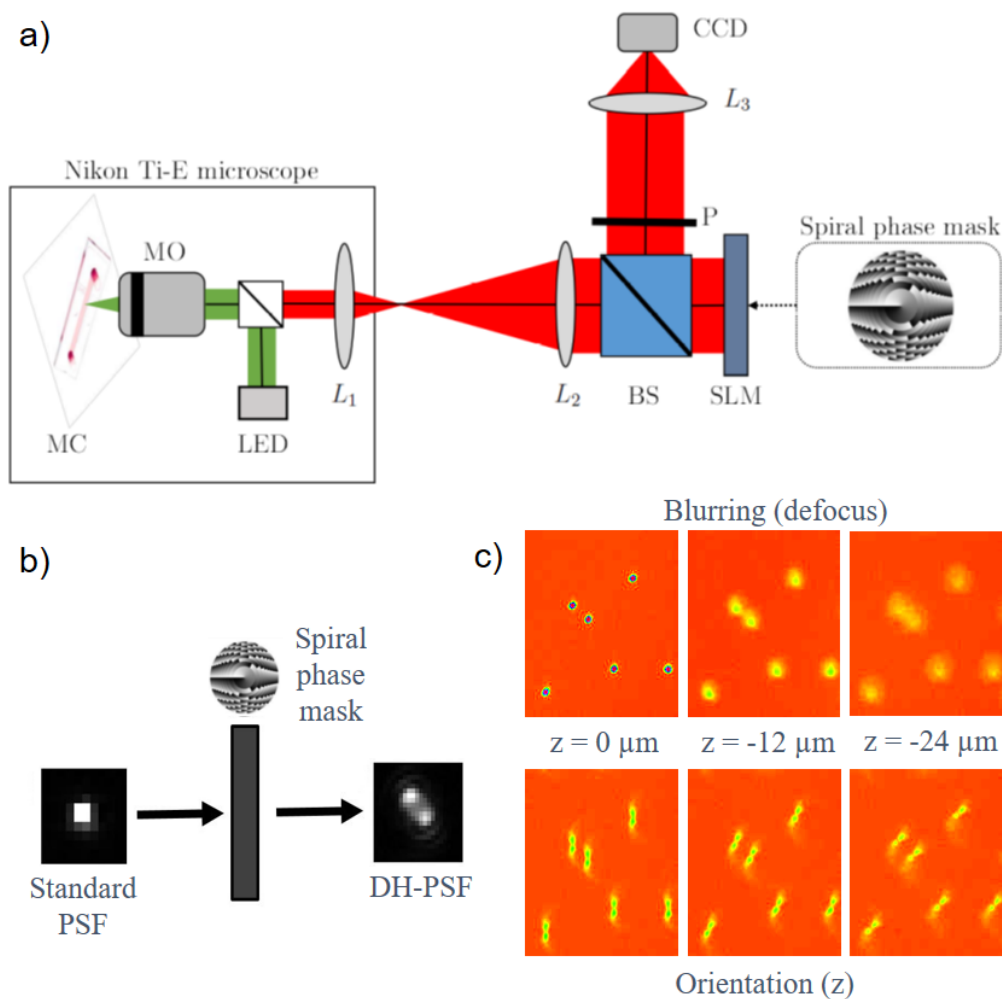


Abb. 2: a) Experimenteller Aufbau für die DH-PTV Messung. Das Messobjekt (MC) (Mikrokanal oder Tropfen) wird mit einer grünen LED beleuchtet und die Fluoreszenz zum Output-Port des Nikon Ti-E

Mikroskops geführt. Ein räumlicher Lichtmodulator (SLM) prägt eine spirale Phasenmaske in der Fourier-Ebene der Abbildung auf. b) Aus einer Standard Punktspreizfunktion (PSF) wird eine Doppel-Helix Punktspreizfunktion. c) Jedes Partikel erscheint als Doppelbild. Anstatt unscharf bei einer Defokussierung zu werden, ändert sich die Orientierung des Doppelbildes mit der sich auf die Tiefe entlang der optischen Achse schließen lässt.

Dieses Verhalten lässt sich mit statischen Partikeln kalibrieren indem das Mikroskop-Objektivs aktiv entlang der optischen Achse z verfahren wird. Um die Unterscheidbarkeit innerhalb eines jeden Doppelbildes zu erhöhen kann man die Anzahl der topologischen Ringe N erhöhen (d.h. die Anzahl der äußeren Ringe der Phasenrampen). Eine einfache Formel (Abb. 3b) kann verwendet werden, um den erforderlichen Messbereich entlang der optischen Achse einzustellen. Wie in Abb. 3a gezeigt wird, hat auch vor allem die numerische Apertur des verwendeten Objektivs (NA) einen großen Einfluss auf den Messbereich. Schon eine kleine Herabsetzung der NA bewirkt eine große Messbereichserweiterung. Für eine NA von 0.75 ist ein Messbereich von $30\ \mu\text{m}$ und für 0.6 von $120\ \mu\text{m}$ theoretisch zu erwarten. Diese sind ausreichend für die Messung in einem Mikrokanal, wie es weiter unten gezeigt wird. Bei einer NA von 0.5 lässt sich bereits ein Messbereich von $700\ \mu\text{m}$ abdecken. Dies entspricht nahezu einer für gewöhnlich zu erwartenden Wassertropfenhöhe von etwa $1\ \text{mm}$.

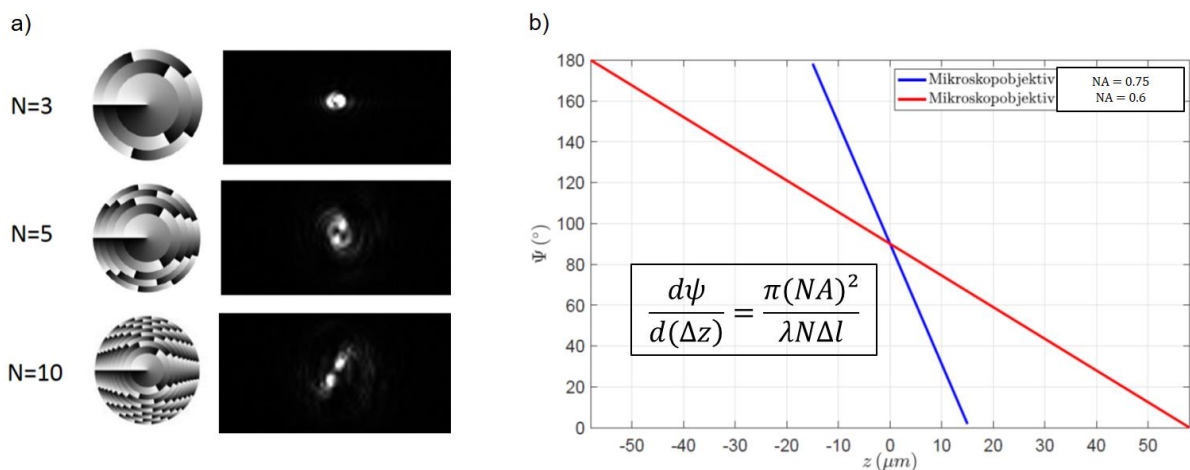


Abb. 3: a) Die Anzahl der topologischen Ringe (N) bestimmt den Abstand der beiden Komponenten im Doppelbild. Damit lässt sich eine optimale Separation für die Detektion mit einer Gaussmaske einstellen. Allerdings ändert sich auch die Steigung in der Kalibrierkurve (vgl. Formel in Abb. 3b). b) Kalibrierkurven für 2 verschiedene numerische Aperturen (NA) der Mikroskop-Objektive. Je kleiner die NA wird, desto größer ist der erreichbare Tiefenmessbereich entlang z . Damit kann z.B. ein $100\ \mu\text{m}$ dicker Mikrokanal mit einer NA von 0.6 vermessen werden. Für ein Objektiv mit einer NA von 0.5 ergibt sich bereits ein Tiefenmessbereich von $700\ \mu\text{m}$ wie es für einen Tropfen benötigt wird.

Es wurde ein modifizierter Partikel-Tracking Algorithmus auf die Videodaten angewendet, um sowohl die Verschiebung der Partikel in der xy -Ebene als auch entlang der optischen Achse z auszuwerten. Ein Masken-Kreuzkorrelations-Suchverfahren lokalisiert zuerst alle vorhandenen gaussförmigen Intensitätsverteilungen. Anschließend werden die Doppelbilder über Abstandsauswertungen als Partikel festgelegt und nummeriert. Ein darauffolgendes Kreuzkorrelationsverfahren ermittelt die Verschiebung eines jeden Doppelbildes in der xy -Ebene von Bild zu Bild. Die Änderung der Orientierung der Doppelbilder führt zur Bestimmung der Positionsänderung entlang der optischen Achse von Bild zu Bild.

Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Ein Mikrokanal mit einer der Strömung rückwärts-gerichteten Stufe mit einer Höhe von $50\ \mu\text{m}$ (Abb. 4a) wurde mit Helix-PTV vermessen. Wie in Abb. 4b erkennbar ist, lässt sich die Anpassung der Partikel-Trajektorien entlang der Stufe dreidimensional messen. Die Farbkodierung steht für jedes durchgängig detektierte Doppelbild eines Partikels. Durch eine Geschwindigkeitsauswertung hinter der Stufe (Kanalstärke = $100\ \mu\text{m}$) und eine Mittelung über die Verschiebungsvektoren wurde ein Flussprofil entlang der optischen Achse gemessen.

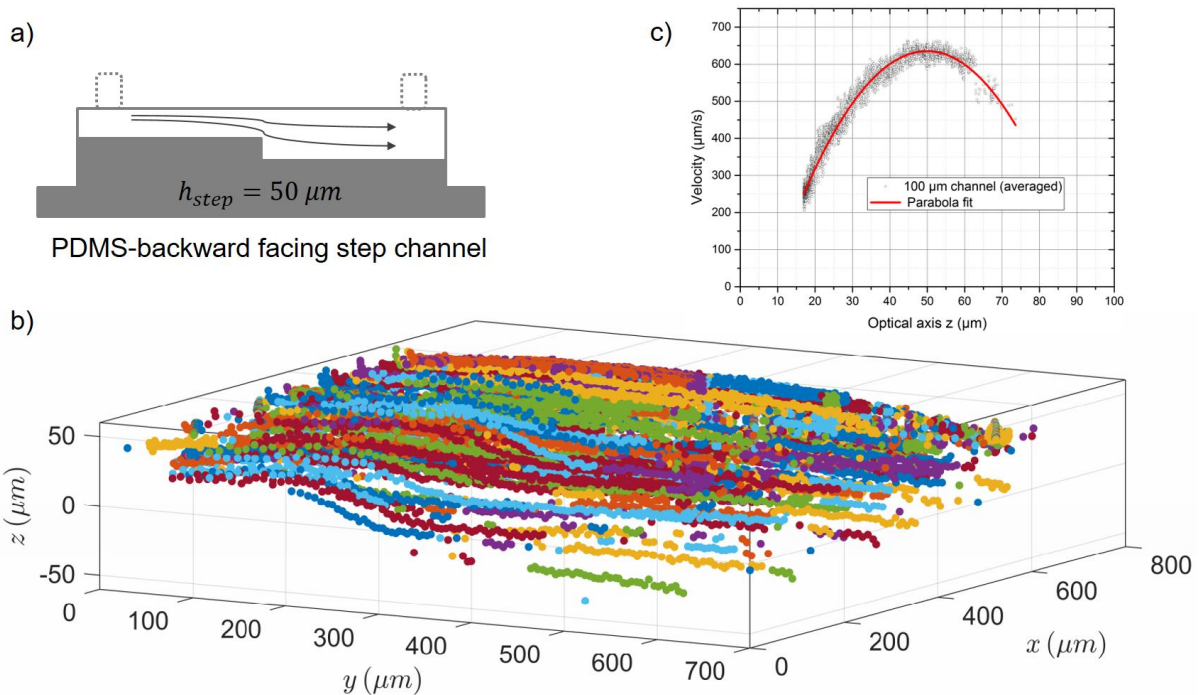


Abb. 4: Messung an einer rückwärtsgerichteten Stufe in einem $100\ \mu\text{m}$ dicken Mikrokanal. a) Aufbau des Kanals. b) Trajektorien im Umfeld der Stufe. c) Flussprofil hinter der Stufe.

Ein weiteres Messobjekt war ein Wassertropfen, der mit 10 % Ethanol (99 vol% vergällt) versetzt wurde. Das Aufsetzen des Tropfens auf das Mikroskopie-Deckglas führte vorerst zu einer ungeordneten Strömungsbewegung, welche über nahezu das komplette Tropfenvolumen aufgezeichnet werden konnte (Abb. 5b). Bei einer Tropfenhöhe von etwa $1\ \text{mm}$ und einer Tropfenbreite von $3\ \text{mm}$ (siehe auch Abb. 1a) wurde mit einem Sichtfeld von $2,2\ \text{mm}$ (FOV) und einem Tiefenmessbereich von $0,7\ \text{mm}$ (DOF) die Strömung im Tropfen zu 75% bzw. 70% erfasst. (siehe auch Abb. 6).

Wie in Abb. 6 zu erkennen ist, konnten aufgrund des guten Signal-zu-Rausch Verhältnisses (Abb. 5a) auch sehr lange Trajektorien ohne Unterbrechung der Detektion von Bild zu Bild aufgenommen werden. Die Trajektorien zeigen ein vielfältiges Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der Partikel - erkennbar am sich verändernden Abstand der Positionsdatenpunkte.

Es wurden Untersuchungen angestellt zur Sondierung des Einflusses von Aberrationen auf die Helix-PTV 3D-3D Messtechnik. Dazu wurden Zernike-Moden niedriger Ordnung (Astigmatismus und Coma) zusätzlich auf den SLM addiert und die Wirkung auf statische Partikel hinsichtlich des Verhaltens der Kalibrierkurven und der räumlichen Lokalisierung gemacht.

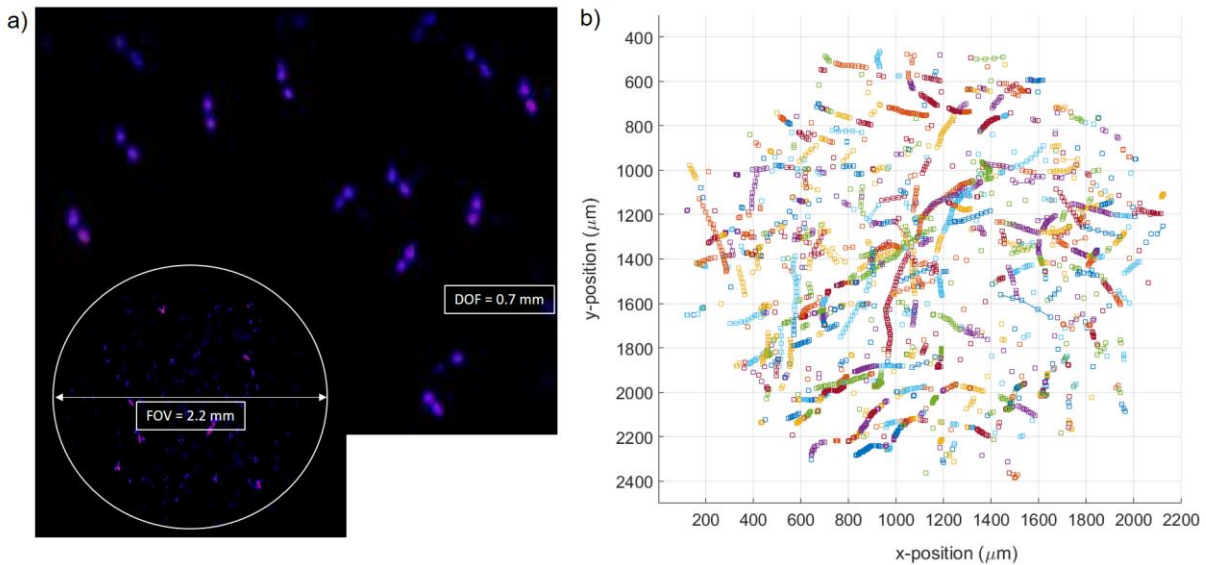


Abb. 5: DH-PTV Messungen in einem Tropfen aus einer Wasser-Ethanol Mischung (10% Ethanol) direkt nach der Platzierung. a) Über das Sichtfeld (FOV) von 2.2 mm sind die Doppelbilder der Partikel zu erkennen (zoom). b) Die Trajektorien sind noch unsymmetrisch und mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Turbulenzen nach dem Aufsetzen des Tropfens). Die Anfangs-Störungen des Aufsetzens überwiegen noch gegenüber der verdunstungs-induzierten Strömung.

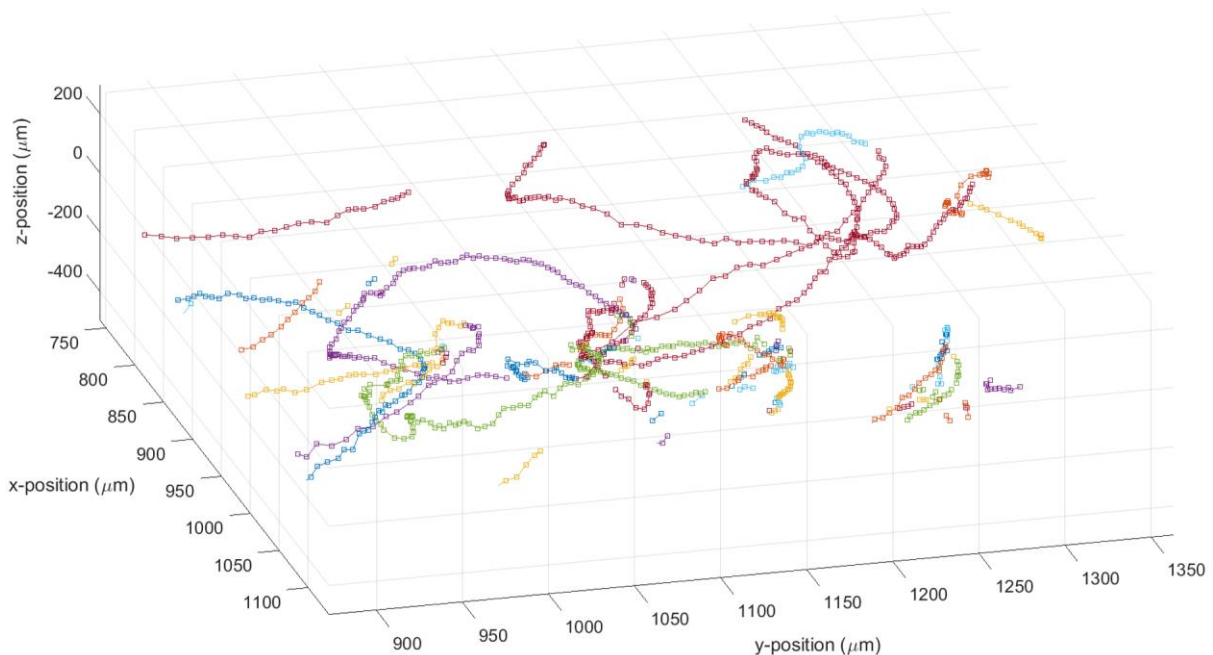


Abb. 6: Lange Trajektorien mehrerer Partikel direkt nach dem Aufsetzen des Tropfens. Erkennbar an den Positionsabständen sind Beschleunigungs- und Abbremsungs- Vorgänge.

Exemplarisch wird dazu das Verhalten eines schwingenden Tropfens gegeben, bei der sich in vereinfachter Annahme die Krümmung der Oberfläche des Tropfens als Störfaktor ändert. Eine symmetrische Krümmungserhöhung der Oberfläche um die Tropfen-Mitte herum führt zu einer Defokus Störung und damit zu einer direkten Messunsicherheit in der Bestimmung der z-Koordinate. Eine Tropfenoberfläche mit Linsenform die sich gegenüber dem Zentrum verschiebt, lässt sich als Astigmatismus beschreiben und eine Verkippung der gleichen als

Coma (Abb. 7a und 7b). Die Defokus-Störung und der Astigmatismus haben einen direkten Einfluss auf die Kalibrierkurve entlang z. Ein Defokus erzeugt einen positiven bzw. negativen Offset auf die Kalibriergerade. Astigmatismus fügt dagegen eine Nichtlinearität der Kalibrierkurve hinzu, die sich symmetrisch um $z=0$ verhält (Abb. 7a). Coma bewirkt eine Verschiebung des Doppelbildmittelpunktes (x,y) entlang der angelegten Coma Orientierung (x bzw. y Richtung). Auch dieses Verhalten weist eine Symmetrie auf, die um $z=0$ herum liegt (Abb. 7b). Damit lässt sich festhalten, dass der Einfluss von Aberrationen niedriger Ordnung einen analytisch herauskalibrierbaren Effekt auf die Doppel-Helix-Punktspreizfunktion haben. Astigmatismus verändert die z-Kalibrierkurve, was eine direkte systematische Messabweichung für die z-Koordinate und z-Komponente der Geschwindigkeit mit sich bringt. Coma hingegen beeinflusst nur die x und y Koordinate (den Mittelpunkt des Doppelbildes), was zu einem Positionsoffset entlang x bzw. y führt. Dieser Offset beeinflusst allerdings nicht die Geschwindigkeitsmessung, die eine absolute Verschiebung von Bild zu Bild ist.

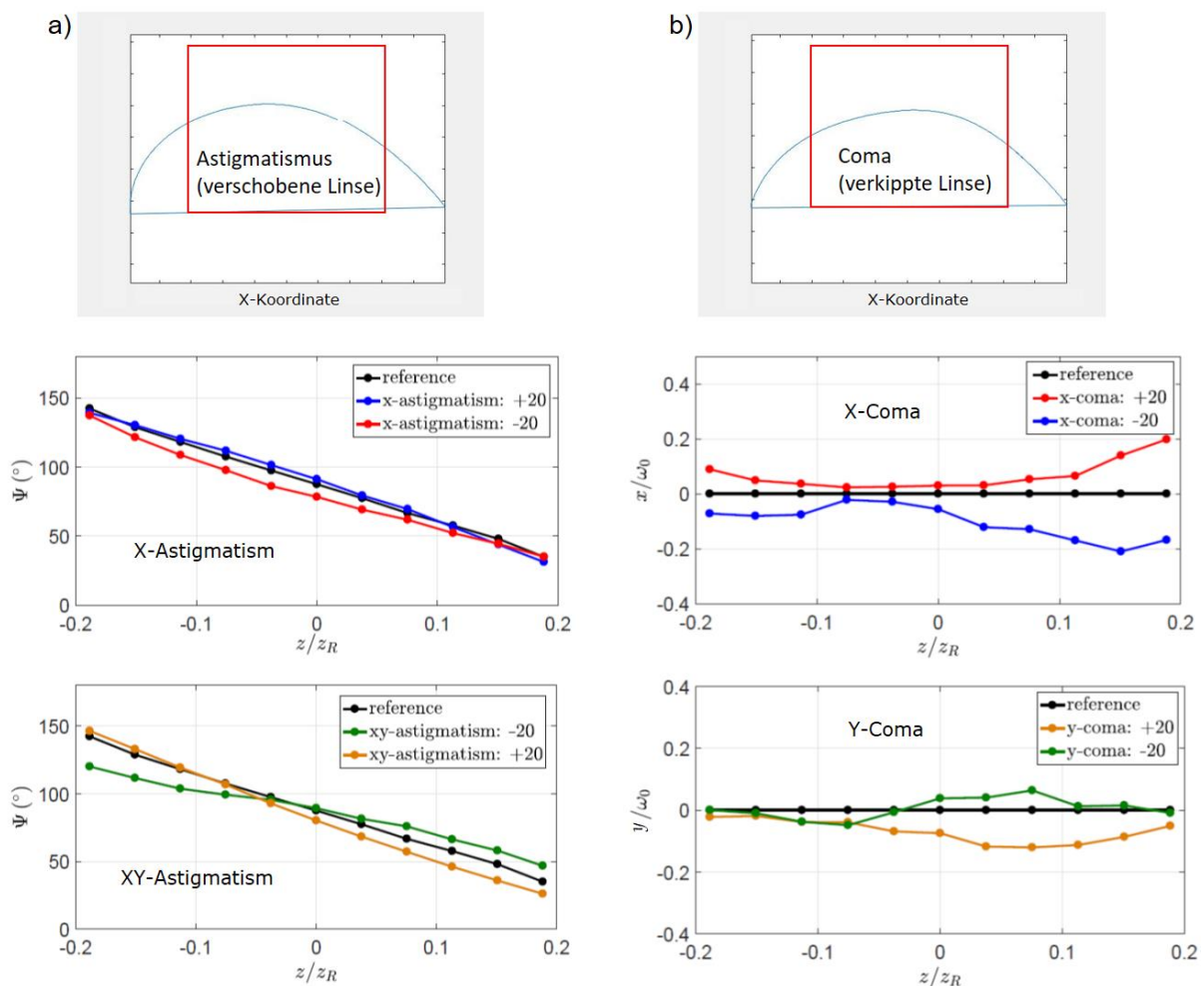


Abb. 7: Einfluss von Aberrationen auf die DH-PTV Messungen (Messungen mit aufaddierter Phasemaske einer Aberration auf den SLM). a) Astigmatismus beeinflusst ausschließlich die Kalibrierfunktion, die durch eine zusätzliche symmetrische Krümmung um den Fokus ($z=0$) herum geprägt wird. b) Coma beeinflusst nicht die Kalibrierung entlang z, aber die Position in der xy-Ebene. Auch hier gibt es ein gut charakterisierbares symmetrisches Verhalten um $z=0$ herum.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass Helix-PTV eine 3D-3C Methode mit großem Potential für die Strömungsmesstechnik ist. Es macht zusätzliche Funktionen implementierbar wie z.B. das dynamische Einstellen des Messbereichs und eine hardwarebasierte Aberrationskorrektur [11]. Je nach Konfiguration können aktuell Tiefeninformationen über die Tracer-Partikel entlang der optischen Achse von 70 bis 700 μm extrahiert werden. Es wurde über den Aufbau des Messsystems und dessen Leistungsfähigkeit anhand von Mikrokanal- und Tropfenströmungen berichtet. Des Weiteren wurden erste Ansätze für die hardwarebasierte Aberrationskorrektur an einer Tropfenoberfläche diskutiert.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung im Rahmen des Reinhart-Koselleck-Projektes CZ 55/30.

Literatur

- [1] H. Kim, S. Groe, G. E. Elsinga, and J. Westerweel, "Full 3D-3C velocity measurement inside a liquid immersion droplet," *Exp. Fluids*, vol. 51, no. 2, pp. 395–405, 2011.
- [2] K. H. Kang, S. J. Lee, C. M. Lee, and I. S. Kang, "Quantitative visualization of flow inside an evaporating droplet using the ray tracing method," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 1104–1112, 2004.
- [3] G. Minor and et al., "Flow within a water droplet subjected to an air stream in a hydrophobic microchannel," *Fluid Dyn. Res.*, vol. 41, no. 4, p. 45506, 2009.
- [4] S. Burgmann, B. Barwari, T. Maurer, and U. Janoske, "Hydrodynamische Instabilitäten eines Tropfens auf einer Platte unter Anströmung und Vibration," in *Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, Karlsruhe, 2017, no. September.
- [5] K. H. Kang, S. J. Lee, C. M. Lee, and I. S. Kang, "Quantitative visualization of flow inside an evaporating droplet using the ray tracing method," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 1104–1112, 2004.
- [6] S. S. Abramchuk, A. R. Khokhlov, T. Iwataki, H. Oana, and K. Yoshikawa, "Direct observation of DNA molecules in a convection flow of a drying droplet," *Europhys. Lett.*, vol. 55, no. 2, pp. 294–300, 2001.
- [7] J. Jing *et al.*, "Automated high resolution optical mapping using arrayed, fluid-fixed DNA molecules," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 95, no. 14, pp. 8046–8051, 1998.
- [8] G. Minor, P. Oshkai, and N. Djilali, "Optical distortion correction for liquid droplet visualization using the ray tracing method: further considerations," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. L23–L28, 2007.
- [9] A. Marin, R. Liepelt, M. Rossi, and C. J. Kähler, "Surfactant-driven flow transitions in evaporating droplets," *Soft Matter*, vol. 12, no. 5, pp. 1593–1600, 2016.
- [10] M. Teich, M. Mattern, J. Sturm, L. Büttner, and J. W. Czarske, "Spiral phase mask shadow-imaging for 3D-measurement of flow fields," *Opt. Express*, vol. 24, no. 24, pp. 27371–27381, 2016.
- [11] M. Teich, J. Sturm, L. Büttner, and J. Czarske, "Distortion-free 3D imaging using wavefront shaping," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2017, vol. 10335.