

## Zeitaufgelöste Verfolgung der Position und Ausrichtung von ellipsoiden Partikeln in mikrofluidischen Scherströmungen

### Time-resolved tracking of position and orientation of ellipsoidal particles in microfluidic shear flows

**Sebastian Sachs, Jörg König, Christian Cierpka**

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Technische Universität Ilmenau, Am Helmholtzring 1, 98683 Ilmenau

Schlagworte: PTV, Bildverarbeitung, Mikrofluidik, akustische Oberflächenwellen

Key words: PTV, image processing, microfluidics, surface acoustic waves

#### Zusammenfassung

Die gezielte Beeinflussung von Partikeltrajektorien in mikrofluidischen Systemen ist eine vielfach notwendige Aufgabe, um Partikel voneinander zu trennen und chemische oder biologische Proben aufzureinigen. Beispielsweise lassen sich mit hochfrequenten akustischen Oberflächenwellen (SAW, engl. surface acoustic wave) Partikel nach Größe und akustischen Kontrast aktiv fraktionieren. Häufig wird dabei die Acoustic Radiation Force ausgenutzt, die für kleine sphärische Partikel theoretisch abgeschätzt werden kann. Allerdings kommen zumeist nichtsphärische Partikel zur Anwendung. Die Abschätzung der auf sie wirkenden akustischen Kräfte ist sehr herausfordernd und erschwert die Entwicklung geeigneter Fraktionierungssysteme. Um numerische Modelle zum Verhalten von nichtsphärischen Partikeln in akustischen Feldern validieren zu können, wird in diesem Beitrag ein neuer experimenteller Ansatz basierend auf der micro particle tracking velocimetry ( $\mu$ PTV) vorgestellt. Mit diesem können die Positionen  $(x, y)$  und die Orientierung  $(\varphi)$  von ellipsoiden Partikeln in der Messebene sowie der Winkel normal zur Messebene  $(\theta)$  zeitaufgelöst verfolgt werden. Anhand von synthetischen Partikelbildern wird gezeigt, dass eine subpixelgenaue Schätzung der Positionen  $(x, y)$  und eine mittlere absolute Messabweichung für den in-plane Winkel von  $MAE_\varphi = 0,03^\circ$  erreicht werden kann. Während die Unsicherheit des Winkels  $\varphi$  unabhängig von der tatsächlichen Orientierung des Partikels in der Messebene ist, weist die Unsicherheit für den Winkel  $\theta$  eine Abhängigkeit von der tatsächlichen Lage des ellipsoiden Partikels aus der Messebene heraus auf und schränkt den Messbereich zwischen  $18,6^\circ \leq \theta \leq 67^\circ$  ein. Innerhalb dessen kann der Winkel mit einer mittleren absoluten Messabweichung von  $MAE_\theta = 2,42^\circ$  zuverlässig geschätzt werden. Die Funktionstüchtigkeit wird experimentell durch Messungen der Position und Orientierung von ellipsoiden Polymerpartikeln in einem Mikrokanal mit SAW-Technologie demonstriert. Ohne Anregung der SAW kann die in der Literatur beschriebene Taumelbewegung dokumentiert werden, die u.a. abhängig von der Geschwindigkeit und dem Aspektverhältnis der Partikel ist. Mit Anregung einer eindimensionalen stehenden SAW bewegen sich die Partikel entlang der vom akustischen Druckfeld vordefinierten Positionen im Mikrokanal. Die typische Taumelbewegung wird dabei unterdrückt. Vielmehr orientieren sich die ellipsoiden Partikel bevorzugt quer zur Hauptströmungsrichtung und damit quer zum Verlauf der Minima des Druckfelds, was so bisher nicht in der Literatur beschrieben wurde.

## Einleitung

Die gezielte Manipulation von in Flüssigkeiten suspendierten nicht-sphärischen korpuskularen Bestandteilen ist eine häufige Aufgabe in vielen Disziplinen der Wissenschaft und Technik. Beispielsweise ist die Trennung von Mikro- und Nanopartikeln nach deren Form für die Solar-energiespeicherung, die Biomedizin und bei der Produktion von Biokraftstoffen von großem Interesse (Behdani et al. 2018). Daher ist die Etablierung geeigneter passiver und aktiver Verfahren zur zuverlässigen Trennung nach Form ein entscheidender Schritt für die Entwicklung einer Vielzahl neuer Technologien in der Verfahrenstechnik oder der Medizin. Gegenüber passiven Trennverfahren bieten aktive Verfahren eine größere Flexibilität und Skalierbarkeit. Eine sehr vielversprechende Methode ist die aktive Partikel-trennung unter Verwendung von stehenden akustischen Oberflächenwellen (sSAW, engl. standing surface acoustic waves), da mit diesen nicht-invasiv und mit geringen Leistungen Partikellösungen mit hoher Reinheit (> 97%) erreicht werden können (Fan et al. 2022, Wu et al. 2018). Zumeist basiert die Trennung auf der sogenannten Acoustic Radiation Force (ARF), welche mit der Größe und dem akustischen Kontrast der Partikel skaliert. Aufgrund von Gradienten in den akustischen Feldgrößen (einschließlich der vom Partikel gestreuten Welle) wirkt auf das Partikel zusätzlich ein Moment, was in der Literatur als Acoustic Radiation Torque (ART) bezeichnet wird und die Position sowie die Orientierung eines nicht-sphärischen Partikels beeinflusst (Fan et al. 2008, Silva et al. 2012, Schwarz et al. 2015). Eine Trennung von nicht-sphärischen Partikeln nach Form basierend auf akustischen Kräften erscheint daher durchaus denkbar und ist Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten am Beispiel ellipsoider Polymerpartikel in hochfrequenten Schallfeldern (Sachs et al. 2023). Um den Einfluss des ART auf das dynamische Verhalten der ellipsoiden Polymerpartikel untersuchen und Schlussfolgerungen hinsichtlich der möglichen Trennung nach Form treffen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, welches anhand von Partikelbildern die Position und Ausrichtung der ellipsoiden Partikel in einem Mikrokanal erlaubt. Dieses Verfahren wird in diesem Beitrag vorgestellt und anhand einer beispielhaften Messung im Mikrokanal mit und ohne Anregung einer eindimensionalen sSAW demonstriert.

## Experimentelles Setup

Für die Entwicklung und Untersuchung des Algorithmus zur Detektion und Auswertung der Position und Orientierung ellipsoider Partikel, wurde mit Blick auf die Anwendung ein in der Literatur vielfach beschriebenes und eingesetztes Setup der SAW-Mikrofluidik zur Trennung von Partikeln nach Größe verwendet (Destgeer und Hyuang 2015, Wu et al. 2022, Sachs et al. 2022). Dieses besteht aus einem einfachen Mikrokanal aus Polydimethylsiloxan (PDMS), siehe Abb. 1 (rechts), welcher mittig zwischen zwei Interdigitalwandlern (IDT) auf  $128^\circ YX$  LiNbO<sub>3</sub> Substrat positioniert ist. Die IDTs sind periodische Fingerelektroden aus Aluminium, die mittels Elektronenstrahlverdampfen auf das Substrat mit einer Dicke von 300 nm aufgedampft wurden. Die Breite sowie der Abstand zwischen den Fingerelektroden beträgt jeweils ein Viertel der Wellenlänge  $\lambda_{SAW}$  der SAW, die durch die geometrische Periodizität der IDT festgelegt ist. Durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung mit der Frequenz  $f = v_{SAW}/\lambda_{SAW}$  ( $v_{SAW}$ , Phasengeschwindigkeit der SAW) wird die Substratoberfläche durch den inversen piezoelektrischen Effekt periodisch, zeitlich und räumlich, elastisch deformiert. Es breiten sich zwei gegenläufige SAW aus, die sich zwischen den beiden IDTs überlagern. Es entsteht eine eindimensionale stehende SAW (sSAW) mit einem periodischen Abstand zwischen den Druckknoten in  $x$ -Richtung, welcher der Hälfte der  $\lambda_{SAW}$  entspricht. Gleichzeitig wird die Energie der akustischen Oberflächenwellen von der im Mikrokanal befindlichen Flüssigkeit absorbiert, wodurch innerhalb des 500  $\mu\text{m}$  breiten und 60  $\mu\text{m}$  hohen Mikrokanals eine dreidimensionale Druckverteilung resultiert. Diese ist durch die Wellenlänge der SAW als auch durch die in die Flüssigkeit abgestrahlten longitudinalen Schallwellen charakterisiert und kann

sich allein unter Berücksichtigung der ARF in einer periodischen Anordnung der möglichen Partikelpositionen in  $x$ - und  $z$ -Richtung widerspiegeln (Wu et al. 2022). Zur Anregung der SAW wurde ein PowerSAW-Generator (Belektronik GmbH) genutzt, wobei die Frequenz und die eingestellte Leistung während der Versuchsdurchführung für beide IDTs konstant gehalten wurden. Um eine pulsationsfreie Strömung im Mikrokanal zu erhalten, wurde Wasser mit einer Spritzenpumpe (neMESYS, Cetoni GmbH) und konstantem Volumenstrom von  $0,75 \mu\text{L}/\text{min}$  durch den Kanal gepumpt. Die darin suspendierten ellipsoiden Partikel wurden durch einen Ziehprozess von in Polyvinylalkohol eingebetteten monodispersen, sphärischen Polystyrolpartikel ( $d = 5,03 \mu\text{m}$ ) mit fluoreszierenden Farbstoff (PS-FluoRed, MicroParticles GmbH) hergestellt. Details zum Verfahren zur Herstellung der ellipsoiden Partikel können aus Weirauch et al. 2022 entnommen werden. Das Aspektverhältnis  $\Gamma = a_{\text{major}}/a_{\text{minor}}$  der hergestellten Partikel, gegeben durch die Hauptachse  $a_{\text{major}}$  und Nebenachse  $a_{\text{minor}}$ , wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie und anhand vieler Partikel statistisch bewertet. Das mittlere Aspektverhältnis betrug  $\Gamma_m = 4,10$ . Die Standardabweichung war  $\sigma_\Gamma = 0,75$ . Die Konzentration der Partikel war  $1,5 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$ , um eine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Partikeln zu reduzieren. Die Beobachtung der individuellen Partikelbewegungen im Mikrokanal ohne und mit Anregung einer SAW erfolgte mit Hilfe eines inversen Mikroskops (Axio Observer 7, Carl Zeiss Microscopy). Dazu wurden die Partikel mit einem modulierbaren OPAL Laser ( $\lambda_{\text{laser}} = 532 \text{ nm}$ , tarm laser technologies tit GmbH & Co. KG) durch ein Plan-Neofluar Mikroskopobjektiv (M20x, NA=0,4) beleuchtet und rückwärtig detektiert. Die Beleuchtungszeit wurde auf  $500 \text{ ns}$  eingestellt, um ein Verschmieren der Partikelbilder zu vermeiden und ein ausreichend hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Zur Trennung von Laserlicht und Fluoreszenzlicht der Partikel war das Mikroskop mit einem passenden dichroitischen Filtersatz ausgestattet. Mittels eines linearen Polarisationsfilters wurde die Doppelbrechung des Lithiumniobats und folglich Doppelbilder der Partikel unterdrückt. Zur Partikelbildaufnahme wurde eine sCMOS-Kamera (Imager sCMOS, 16 bit,  $2560 \times 2160$  Pixel, Lavisision GmbH) verwendet und Bilder mit einer Framerate von  $10 \text{ Hz}$  aufgenommen. Während der Experimente wurde mit einer Schrittweite von  $\Delta z = 5 \mu\text{m}$  in  $z$ -Richtung traversiert, um die Ausrichtung der ellipsoiden Partikel über der gesamten Kanalhöhe zu dokumentieren. Pro Messposition wurden 500 Aufnahmen getätigt.

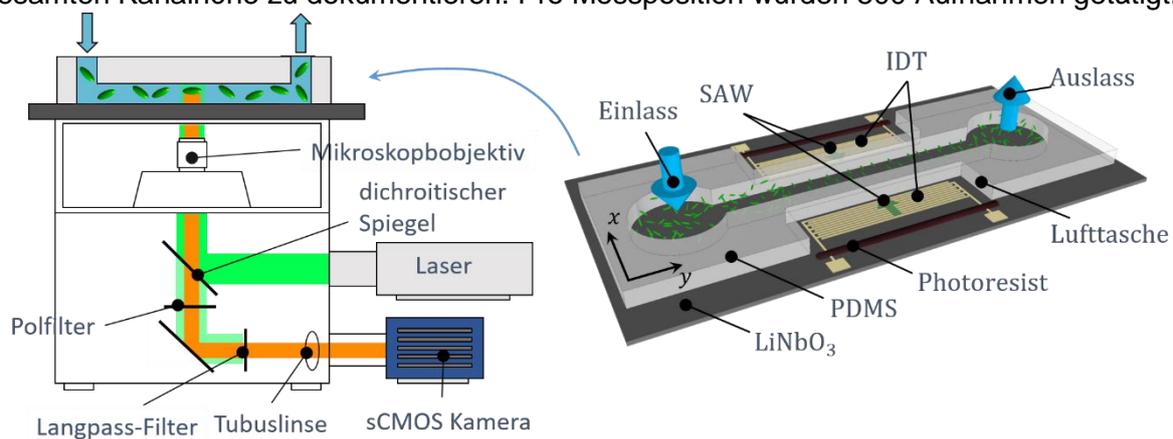


Abb. 1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus bestehend aus einem micro PTV-System und einem mikrofluidischen Kanal mit akustischen Oberflächenwellen (SAW), die durch seitlich zum Kanal aufgedampfte Interdigitalwandler (IDT) angeregt werden, um die Trajektorien und Ausrichtung der ellipsoiden Partikel im PDMS-Kanal akustisch zu beeinflussen.

## Bildverarbeitung und Ansatz

Durch die Beobachtung nur von einer Seite, lassen sich lediglich zweidimensionale Projektionen der im Raum orientierten ellipsoiden Partikel erfassen, vgl. Abb. 2a und b). Aus diesen lassen sich zunächst die Partikelpositionen  $(x, y)$  in der Messebene sowie der in der Ebene liegende Winkel  $\varphi$  ableiten. Dazu werden die Partikelbilder in einem zweistufigen Prozess detektiert. Zuerst wird der Hintergrund mittels eines zweidimensionalen Polynoms zweiter Ordnung abgezogen und die Bildaufnahmen unter Berücksichtigung eines globalen Intensitätsschwellwerts binarisiert und segmentiert (Cierpka et al. 2012). Anschließend werden in den segmentierten Bildern potentielle Partikelbilder anhand einer vorab festgelegten minimalen Fläche  $A_{\min}$  der elliptischen Partikelbilder identifiziert. Partikelbilder nahe am Rand der Bildaufnahmen, sich überlappende Partikelbilder oder stark defokussierte Partikelbilder werden mit der nachfolgend aufgeführten dreistufigen Validierung eliminiert.

- (i) Partikelbilder innerhalb von weniger als 20 Pixel zum Rand der Bildaufnahme, werden für die weitere Auswertung nicht betrachtet.
- (ii) Überlagern sich Partikelbilder, so gibt es innerhalb der geschätzten Partikelbildfläche  $A$ , Flächen  $A_l$  geringer Intensität. Letztere weisen dabei eine Intensität von weniger als der zweifachen Standardabweichung der Intensität des gesamten Partikelbildes auf. Ist das Flächenverhältnis  $A_l/A > 0,2$  wird ein aus sich überlappenden Partikelbildern bestehendes Partikelbild vermutet und eliminiert.
- (iii) Zur Identifikation von stark defokussierten Partikelbildern wird die Segmentierung der Bildaufnahmen mit einem halb so großen Intensitätsschwellwert wiederholt. Resultiert eine um den Faktor 2,5 oder größere Partikelbildfläche, wird dieses als ein stark defokussiertes Partikelbild identifiziert und nicht weiter berücksichtigt.

Die Partikelbildkoordinaten  $(x, y)$  in der Ebene sowie der in-plane Winkel  $\varphi$  für die validen Partikelbilder werden in einem zweistufigen Verfahren bestimmt. Im ersten Schritt wird dazu der Flächenschwerpunkt der segmentierten Partikelbilder geschätzt. Um eine Verkippung des Partikels um einen Winkel  $\theta$  aus der Messebene heraus zu berücksichtigen, wird bei der Segmentierung ein lokaler Intensitätsschwellwert angenommen, der das 0,8-fache der Intensität am zuvor bestimmten Flächenschwerpunkt nach Segmentierung mit globalem Schwellwert trägt. Abschließend werden der in-plane Winkel  $\varphi$  sowie die Längen der Haupt- und Nebenachsen der ellipsoiden Partikel mit Hilfe des Eigenvektors der Kovarianzmatrix der segmentierten Partikelbilder bestimmt (Haralick und Shapiro 1992). In einem zweiten Schritt dienen diese Schätzwerte als Startparameter für einen Least-Square-Fit an ein zweidimensionales Modell der Intensitätsverteilung  $G_i$  gemäß:

$$G_i = \hat{I} \exp \left[ - \left( \frac{8 \cdot (\tilde{x} - x_i)^2}{a_x^2} + \frac{8 \cdot (\tilde{y} - y_i)^2}{a_y^2} \right) \right] + \bar{I}$$

mit

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

Hierbei sind  $a_x, a_y$ , der in-plane Winkel  $\varphi$ , der Betrag  $\hat{I}$  und der Intensitätsoffset  $\bar{I}$  Fitparameter. Mit zwei eindimensionalen Spline-Interpolationen der Intensitätsverläufe entlang der Haupt- und Nebenachse werden deren Längen ( $a_{\text{major}}, a_{\text{minor}}$ ) final bestimmt.

Der Winkel  $\theta$  aus der Messebene heraus lässt sich nicht allein anhand des projizierten Partikelbilds ableiten. Um diesen dennoch bestimmen und damit die Orientierung der ellipsoiden Partikel im Raum angeben zu können, wird versucht die tatsächliche Länge des ellipsoiden

Partikels aus allen Partikelbildern während der Partikelverfolgung zu schätzen. Dazu muss das Partikel räumlich und zeitlich verfolgt werden (Cierpka et al. 2013). Mit der Annahme, dass das Partikel mindestens einmal vollständig in der  $xy$ -Ebene liegt ( $\theta = 90^\circ$ ), berechnet sich der Winkel zu:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\tilde{a}_{\text{major}}(\theta, z)}{\tilde{a}_{\text{max}}}\right).$$

Dabei ist  $\tilde{a}_{\text{major}}$  die augenblickliche und  $\tilde{a}_{\text{max}}$  die maximale geschätzte Länge der Hauptachse des Partikelbildes, unter Berücksichtigung einer möglichen Partikelposition außerhalb der Fokusebene, die zu einer Überschätzung der tatsächlichen Länge des ellipsoiden Partikels führt. Zur Korrektur dessen, wird die Abweichung  $\delta_{\text{minor}} = a_{\text{minor}} - a_{\text{min}}$  der kurzen Halbachse  $a_{\text{minor}}$  von der minimalen Länge  $a_{\text{min}}$  und der Unterschied  $\delta_{\text{major}} = a_{\text{major}} - a_{\text{minor}}$  in der Defokussierung zwischen den beiden Halbachsen berücksichtigt. Unter Einbeziehung eines für das Setup gültigen Wichtungsfaktors  $K = 0,15$ , berechnet sich die so abgeschätzte Länge der Hauptachse zu:

$$\tilde{a}_{\text{major}} = a_{\text{major}} - \delta_{\text{minor}} \cdot \frac{\delta_{\text{minor}}}{\delta_{\text{minor}} - K\delta_{\text{major}}}.$$

### Unsicherheitsabschätzung

Um die Funktionstüchtigkeit des Algorithmus und die Unsicherheit bei der Schätzung der Position und Lage der ellipsoiden Partikel beurteilen zu können, wurden zunächst synthetische Partikelbilder verwendet. Diese wurden mit MicroSIG generiert (Rossi 2020). Hierbei handelt es sich um einen synthetischen Partikelbildgenerator, der ebenso die Generierung von Partikelbildern mit ellipsoiden Partikeln ermöglicht. Insgesamt wurden 5000 ellipsoide Partikel mit einem Aspektverhältnis von  $\Gamma = 4$  untersucht, die innerhalb eines Höhenbereichs von  $(-10 \leq z \leq 10)$   $\mu\text{m}$  verteilt und im Raum mit  $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$  und  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  zufällig orientiert waren. In Abb. 2b sind beispielhaft die synthetischen Bilder eines sich rotierenden Partikels dargestellt. Dabei indizieren die grünen Konturen und die blauen Pfeile die Form und Orientierung der Partikelbilder. Durch Auswertung der 5000 Partikelbilder und Vergleich mit der Grundwahrheit, konnte eine subpixelgenaue Schätzung der Partikelpositionen  $(x, y)$  festgestellt werden, siehe Abb. 2c. Die mittlere absolute Messabweichung in  $x$ - und  $y$ -Richtung beträgt  $MAE_x = 0,31$  Pixel und  $MAE_y = 0,39$  Pixel. Darüber hinaus kann die Ausrichtung der Partikel in der Messebene mit einer absoluten Messabweichung von  $MAE_\varphi = 0,03^\circ$  sehr gut geschätzt werden, vgl. hierzu Abb. 2d. Während hierbei keine Abhängigkeit der Unsicherheit von dem tatsächlichen Winkel  $\varphi_{\text{GT}}$  existiert, ist eine Abhängigkeit bei der Schätzung des Winkels  $\theta$  aus der Ebene heraus von der tatsächlichen Orientierung  $\theta_{\text{GT}}$  des Partikels erkennbar. Entsprechend Abb. 2e ist diese Abhängigkeit darin gekennzeichnet, dass mit zunehmender longitudinaler ( $\theta \rightarrow 0^\circ$ ) und transversaler ( $\theta \rightarrow 90^\circ$ ) Orientierung des Partikels die absolute Messabweichung  $MAE_\theta$  stark ansteigt. Dieses systematische Verhalten ist dem Ansatz zur Schätzung des Winkels  $\theta$  geschuldet, der zum einen eine minimale elliptische Partikelbildform voraussetzt und zum anderen geprägt ist von der geringen Empfindlichkeit der Arkussinusfunktion bei großen Winkeln  $\theta_{\text{GT}}$ . Hieraus resultiert eine untere Grenze  $\theta_{\text{min}} = 18,6^\circ$  und eine obere Grenze  $\theta_{\text{max}} = 67^\circ$  für die Schätzung des Winkels aus der Messebene heraus. Innerhalb dessen, in Abb. 2e als Region II markiert, kann der Winkel mit einer mittleren absoluten Messabweichung von  $MAE_\theta = 2,42^\circ$  geschätzt werden. Vorausgesetzt, dass während der Partikelverfolgung die maximale Länge des ellipsoiden Partikels geschätzt werden kann.

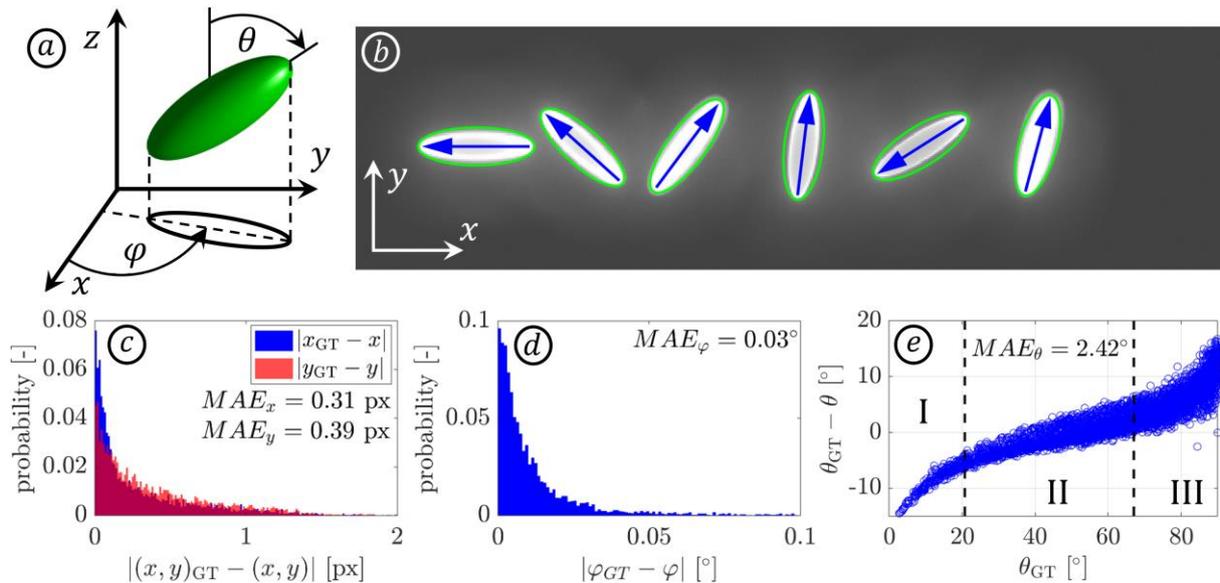


Abb. 2: Obere Reihe: a) Koordinatensystem  $(x, y, z)$  und Orientierung  $(\varphi, \theta)$  eines ellipsoiden Partikels. b) Beispielhafte, synthetische Partikelbilder eines ellipsoiden Partikels mit geschätzter Partikelbildform (grüne Kontur) und Orientierung (blaue Pfeile). Untere Reihe: mittlere absolute Messabweichung für c) der Partikelpositionen, d) in-plane Winkel  $\varphi$  und e) out-of-plane Winkel  $\theta$  basierend auf 5000 synthetisch generierten Partikelbildern mit bekannter Grundwahrheit.

### Anwendung und erste Ergebnisse

Zunächst wurde eine Messung der Position und Orientierung der Partikel ohne Anregung einer SAW durchgeführt. Dies bedeutet, die Partikel strömten, wie oben beschrieben, durch eine druckgetriebene Strömung mit konstanten Volumenstrom räumlich zufällig verteilt durch den Mikrokanal. Dabei konnte aufgrund des großen Aspektverhältnis des Mikrokanals eine für nicht-sphärische Partikel typische Taumelbewegung in der Messebene festgestellt werden. In Abb. 3(oben) ist beispielhaft die gemessene Taumelbewegung von zwei exemplarischen ellipsoiden Partikeln mit vergleichbarer Geschwindigkeit dargestellt. Vergleicht man das zeitliche Verhalten des Taumelns, stellt man fest, dass das längere Partikel mit einem Aspektverhältnis von  $\Gamma = 3,6$  langsamer rotiert als das Partikel mit einem Aspektverhältnis von  $\Gamma = 2,5$ . Diese Abhängigkeit ist anhand von numerischen Simulationen aus der Literatur bekannt (Lauricella et al. 2022). Darüber hinaus ist die Taumelbewegung des kürzeren Partikels gleichmäßiger, während das lange Partikel zeitweise in bevorzugter Orientierung ( $\varphi \rightarrow 90^\circ$  und  $\varphi \rightarrow 270^\circ$ ) in Strömungsrichtung verharrt. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der statistischen Analyse aller detektierten Partikel wider, in der entsprechend der Häufigkeitsverteilung in Abb. 4a eine bevorzugte Orientierung der ellipsoiden Partikel in Strömungsrichtung vorzufinden ist. Wird hingegen eine SAW angeregt und die Partikeltrajektorien aufgrund der resultierenden akustischen Kräfte (ARF, ART) beeinflusst, ändert sich das dynamische Verhalten der ellipsoiden Partikel grundlegend. Dies bedeutet zum einen, dass die Partikeltrajektorien im Mikrokanal durch die Charakteristik der 1dsAW festgelegt sind. Die Partikel strömen nicht mehr räumlich zufällig verteilt, sondern in äquidistanten Abständen zueinander durch den Kanal (Destgeer und Hyuang 2015). Zum anderen zeigt sich anhand der Häufigkeitsverteilung in Abb. 4b, dass die Partikel aufgrund des ART eine bevorzugte Orientierung aufweisen. Folglich ist, im Vergleich zu dem Ergebnis ohne Anregung einer SAW, die typische Taumelbewegung der ellipsoiden Partikel gehemmt. Interessanterweise orientieren sich die Partikel mit  $\varphi \approx 180^\circ$  quer zur Hauptströmungsrichtung und damit orthogonal zu den sich ausbildenden Druckknoten aufgrund der eindimensionalen stehenden SAW, was so bisher nicht in der Literatur beschrieben wurde.

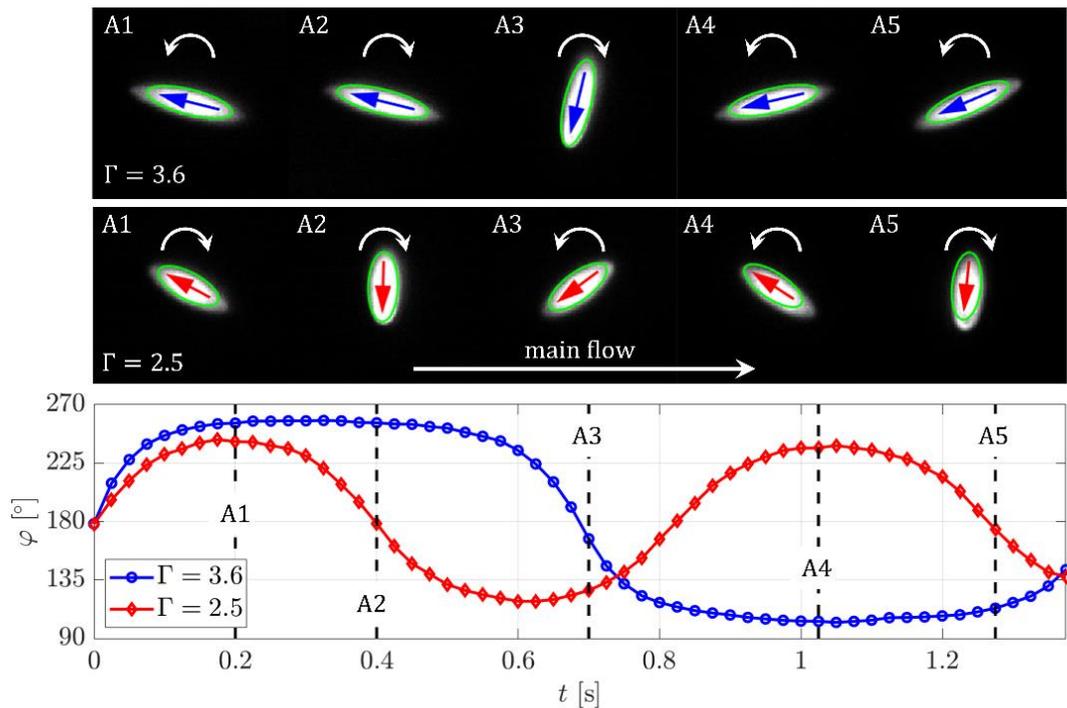


Abb. 3: Oben: Visualisierung der Taumelbewegung anhand der Ausrichtung (Pfeile) für Partikel mit unterschiedlichen Aspektverhältnis  $\Gamma$  in einer druckgetriebenen Mikroströmung. Unten: Detektierter in-plane Winkel  $\varphi$  als Funktion der Zeit  $t$ .

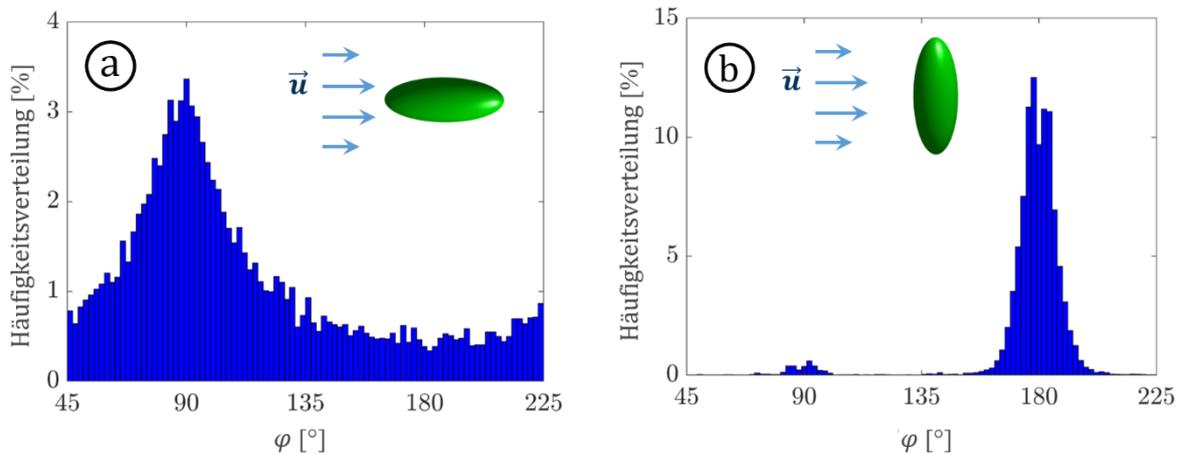


Abb. 4: Histogramme der detektierten in-plane Winkel  $\varphi$  für ellipsoide Partikel im Mikrokanal mit druckgetriebener Strömung bei a) ohne und b) mit Anregung einer 1dsSAW.

## Dankesworte

Wir danken Laura Weirauch vom Fachgebiet Chemische Verfahrenstechnik der Universität Bremen für die Bereitstellung der nicht-sphärischen Polymerpartikel sowie dem Team des Zentrums für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN, DFG-gefördertes Gerätezentrum) der TU Ilmenau und insbesondere David Schreier für die Unterstützung bei der Herstellung des experimentellen Setups. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ist für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten (CI 185/8-1) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP2045 "Hochspezifische mehrdimensionale Fraktionierung von technischen Feinstpartikelsystemen" ausdrücklich gedankt.

## Literatur

- Behdani B., Monjezi S., Carey M. J., Weldon C. G., Zhang J., Wang C. und Park J (2018)** Shape-based separation of micro-/nanoparticles in liquid phases. *Biomicrofluidics* 12:051503
- Cierpka C., Lütke B. und Kähler C. J. (2013)** Higher order multi-frame particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids* 54:1533
- Cierpka C., Rossi M., Segura R., Mastrangelo F. und Kähler, C. J. (2012)** A comparative analysis of the uncertainty of astigmatism- $\mu$ PTV, stereo- $\mu$ PIV, and  $\mu$ PIV, *Experiments in Fluids* 52, 605
- Destgeer, G., Hyung, J. S. (2015)** Recent advances in microfluidic actuation and micro-object manipulation via surface acoustic waves, *Lab Chip* 15, 2722
- Fan Y., Wang X., Ren J., Lin F. und Wu J. (2022)** Recent advances in acoustofluidic separation technology in biology. *Microsystems & Nanoengineering* 8:94
- Fan Z., Mei D., Yang K. und Chen, Z. (2008)** Acoustic radiation torque on an irregularly shaped scatterer in an arbitrary sound field, *J. Acoustic Society America* 124, 2727–2732
- Haralick R. M., und Shapiro L. G. (1992)** *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley Longman Publishing Company, Boston
- Lauricella G., Zhou J., Luan Q., Papautsky I. und Peng Z (2022)** Computational study of inertial migration of prolate particles in a straight rectangular channel. *Physics of Fluids* 34:082021
- Rossi M (2020)** Synthetic image generator for defocusing and astigmatic PIV/PTV. *Measurement Science and Technology* 31:017003
- Sachs S., Baloochi M., Cierpka C. und König J. (2022)** On the acoustically induced fluid flow in particle separation systems employing standing surface acoustic waves - Part I. *Lab Chip* 22:2011–2027
- Sachs S., Schmidt H., Cierpka C. und König J. (2023)** On the behavior of prolate spheroids in a standing surface acoustic wave field, *Microfluidics and Nanofluidics*, *under review*
- Schwarz, T., Hahn, P., Petit-Pierre, G., Dual, J. (2015)** Rotation of fibers and other non-spherical particles by the acoustic radiation torque, *Microfluidics and Nanofluidics* 18, 65–79
- Silva G. T., Lobo T. P. und Mitri F.G. (2012)** Radiation torque produced by an arbitrary acoustic wave, *Europhysics Letters* 97:54003
- Weirauch L, Giesler J, Baune M., Pesch R. G und Thöming J. (2022)** Shape-selective remobilization of microparticles in a mesh-based DEP filter at high throughput. *Separation and Purification Technology*, 300:121 792
- Wu, M., Huang, P.H., Zhang, R., Mao, Z., Chen, C., Kemeny, G., Li, P., Lee A.V., Gyanchandani, R., Armstrong, A.J., Dao, M., Suresh, S. und Huang T. J. (2018)** Circulating Tumor Cell Phenotyping via High-Throughput Acoustic Separation, *Small* 14: e1801131