

Akustophoretische und dielektrophoretische Bewegung sphärischer und nicht-sphärischer Partikel in einem stehenden akustischen Wellenfeld

Acoustophoretic and dielectrophoretic motion of spherical and non-spherical particles in a standing acoustic wave field

Sebastian Sachs, Christian Cierpka, Jörg König

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau, Deutschland

Mikrofluidik, akustische Oberflächenwellen, Dielektrophorese, Akustophorese
microfluidics, surface acoustic waves, dielectrophoresis, acoustophoresis

Zusammenfassung

Die Integration akustischer Oberflächenwellen (engl. surface acoustic waves, SAW) in mikrofluidische Lab-on-a-Chip Systeme ermöglicht die gezielte Beeinflussung von Partikel- oder Zelltrajektorien zum hochspezifischen Separieren, Mischen oder Konzentrieren. Entwickelte Systeme basieren häufig auf der Wirkung der Acoustic Radiation Force (ARF) und akustisch induzierten Strömung. Da sich die SAW als mechanische Rayleighwelle entlang der Oberfläche eines piezoelektrischen Substrates ausbreitet, ist sie jedoch inhärent mit einem inhomogenen elektrischen Feld verknüpft. Unter dem Einfluss der akustischen und elektrischen Felder ist die Bewegung polarisierbarer Partikel somit durch Akusto- und Dielektrophorese gekennzeichnet. Das komplexe Zusammenspiel von akustischen und dielektrophoretischen Kräften und Momenten auf suspendierte Partikel oder Zellen ist Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten im Kontext SAW-basierter Systeme (Sachs et al. 2024). In diesem Beitrag wird das dynamische Verhalten sphärischer Mikropartikel in einem hochfrequenten akustischen Wellenfeld experimentell und numerisch untersucht. Um zwischen dem Einfluss der akustischen und dielektrophoretischen Kräfte im Experiment unterscheiden zu können, wurde das elektrische Feld in einem Mikrokanal partiell abgeschirmt und die dielektrophoretische Kraft lokal stark reduziert. Durch Messungen der dreidimensionalen Partikelpositionen mit der Astigmatismus Particle Tracking Velocimetry (APTV, Cierpka et al. (2010)) wurde neben der Fokussierung suspendierter Partikel auf Druckknoten einer stehenden SAW zusätzlich eine Levitation durch die dielektrophoretische Kraft im freien Bereich des Mikrokanals festgestellt. Sobald die Partikel in den abgeschirmten Bereich eintraten, wurden diese infolge der lokal dominierenden akustischen Kraft zum Boden des Mikrokanals verschoben. Ein ähnliches Verhalten wurde mit ellipsoiden Partikeln beobachtet, welche sich darüber hinaus sowohl im Bereich der freien als auch abgeschirmten Substratoberfläche orthogonal zu den Druckknoten der stehenden SAW ausrichteten. Das beobachtete Verhalten der nicht-sphärischen Partikel deutet auf komplementäre Effekte des akustischen und dielektrophoretischen Moments hin, welche durch ein dreidimensionales numerisches Modell bestätigt wurden. Das numerische Modell liefert Einblicke in die zugrundeliegenden akustischen und elektrischen Feldgrößen und etab-

liert ein fundamentales Verständnis der physikalischen Mechanismen, die das Verhalten sphärischer und nicht-sphärischer Partikel in mikrofluidischen Systemen mit hochfrequenten stehenden SAWs bestimmen.

Einleitung

Die gezielte Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von in Flüssigkeiten suspendierten Mikropartikeln und Zellen ist der Schlüssel für vielfältige Anwendungen in der Mikrofluidik. So werden in biomedizinischen, verfahrenstechnischen und pharmazeutischen Disziplinen aktive Systeme genutzt, um Partikel- oder Zellmischungen zu konzentrieren (Shilton et al. 2008, Collins et al. 2016), in äquidistanten Mustern anzuordnen (Shi et al. 2009, Deng et al. 2023), hochspezifisch zu fraktionieren (Nam et al. 2011, Ding et al. 2014) und zu mischen (Ahmed et al. 2009). Als vielversprechende Methode hat sich die Integration von stehenden akustischen Oberflächenwellen (engl. standing Surface Acoustic Waves, sSAW) in Lab-on-a-Chip Systemen etabliert. Dieser nicht-invasive, biokompatible und markerfreie Ansatz basiert meist auf der Wirkung der sogenannten Acoustic Radiation Force (ARF), welche aufgrund von Streueffekten der akustischen Wellen auf die Partikel oder Zellen wirkt, und der Stokes'schen Reibungskraft infolge einer akustisch induzierten Strömung. Dank der Skalierung der ARF mit dem Volumen und akustischen Kontrastfaktor der suspendierten Objekte wurde beispielsweise eine kontinuierliche Partikelfraktionierung mit einer Reinheit von über 97% demonstriert (Fan et al. 2022, Wu et al. 2018). Da die sSAW durch elastische Oberflächenverformungen eines piezoelektrischen Substrates gekennzeichnet ist, entsteht darüber hinaus ein inhomogenes elektrisches Feld, welches in das mikrofluidische System koppelt. Die Bewegung polarisierbarer Partikel im akustischen und elektrischen Feld wird somit ebenso durch Dielektrophorese beeinflusst. Da dies im Zusammenhang mit sSAW-basierten Systemen kaum erforscht ist, wurde das Zusammenspiel der akustischen und dielektrophoretischen Kräfte auf sphärische Partikel experimentell untersucht. Darüber hinaus wirkt in Abhängigkeit von Gradienten in den akustischen und elektrischen Feldgrößen (einschließlich der vom Partikel gestreuten Felder) zusätzlich das akustophoretische Moment, in der Literatur als Acoustic Radiation Torque (ART) bekannt, und das dielektrophoretische Moment auf nicht-sphärische Partikel. Anhand von ellipsoiden Polymerpartikeln wird der Einfluss der vorliegenden Kräfte und Momente sowohl auf deren Position als auch Orientierung in einem hochfrequenten akustischen und elektrischen Feld untersucht. Zur Detektion und Verfolgung der nicht-sphärischen Partikel anhand von Partikelbildern wird auf ein in vorangegangenen Arbeiten entwickeltes Verfahren zurückgegriffen (Sachs et al. 2023). Um Einblicke in die zugrundeliegenden akustischen, elektrischen und hydrodynamischen Felder zu erhalten, wird zudem ein dreidimensionales numerisches Modell vorgestellt, welches auf Basis der experimentellen Ergebnisse validiert wurde.

Physikalische Beschreibung und experimentelles Setup

Zur experimentellen Untersuchung des Verhaltens der sphärischen und nicht-sphärischen Partikel wurde ein akustofluidisches System eingesetzt, welches in Abb. 1a schematisch dargestellt ist. Das System besteht aus zwei gegenüberliegenden Interdigitalwandlern (engl. interdigital transducer, IDT) die durch Elektronenstrahlverdampfen auf einem piezoelektrischen Substrat aus 128° YX LiNbO₃ aufgedampft wurden. Die IDTs sind aus einer 5 nm dicken Titanschicht als Haftvermittler und 295 nm dicken Aluminiumschicht aufgebaute periodische Fingerelektroden, welche sich entlang einer Apertur von $AP = 2$ mm überlappen. Durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung mit der Frequenz f durch einen PowerSAW-Generator

(BelektronikG GmbH) wird die Substratoberfläche infolge des inversen piezoelektrischen Effektes elastisch deformiert. Aufgrund der periodischen Anordnung der Fingerelektroden mit einer Breite und einem Abstand von einem Viertel der Wellenlänge λ_{SAW} der akustischen Oberflächenwelle (engl. surface acoustic wave, SAW) überlagern sich die elastischen Oberflächendeformationen konstruktiv und breiten sich als SAW zu beiden Seiten der IDTs entlang der kristallographischen X-Achse aus. Die zum Rand des Substrates fortschreitenden Wellen werden durch eine Schicht aus Fotolack vollständig gedämpft, um Reflektionen an der Substratkante zu vermeiden. Im Gegensatz dazu überlagern sich die gegenläufigen SAWs zwischen beiden IDTs und bilden eine sSAW mit stationären Druckknoten, welche periodisch in einem Abstand der Hälfte der Wellenlänge der SAW in x -Richtung vorliegen. Durch die elastische Oberflächendeformation der sSAW entsteht wiederum ein elektrisches Feld mit gleicher Frequenz infolge des piezoelektrischen Effektes. Um mechanischer Beschädigungen und Korrosion vorzubeugen, wurde das Substrat und die IDTs (mit Ausnahme der Kontaktpads) mit einer 385 nm dicken Passivierungsschicht aus Siliziumdioxid (SiO_2) beschichtet.

Zentral zwischen beiden IDTs befindet sich ein geschlossener Mikrokanal aus Polydimethylsiloxan (PDMS) mit einem Ein- sowie Auslass. Der Mikrokanal besitzt einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 500 μm und einer Höhe von 180 μm . Durch Adhäsionskräfte zwischen den Kanalseitenwänden und dem mit SiO_2 beschichteten piezoelektrischen Substrat wird der Mikrokanal abgedichtet. Um die Dämpfung der SAWs zu limitieren, wurde die Dicke der Kanalseitenwände im Bereich der IDTs durch Lufttaschen auf ca. 500 μm reduziert. Mithilfe einer Glasspritze (500 μL , ILS Innovative Laborsysteme GmbH) und einer Spritzenpumpe (nEMESYS, cetoni GmbH) wurde die Partikelsuspension pulsationsfrei mit einem Volumenstrom von 1 $\mu L/min$ durch den Mikrokanal gefördert. Untersucht wurde das Verhalten von fluoreszenzmarkierten, monodispersen, sphärischen Polystyrolpartikeln (PS-FluoRed, Ex/Em 530 nm/607 nm, Microparticles GmbH) mit einem Radius von 2,52 μm sowie ellipsoide Polystyrolpartikel mit einem mittleren Aspekterhältnis von 4,1 bei einer Standardabweichung von 0,75. Die ellipsoiden Partikel wurden in einem Streckprozess aus den sphärischen Polystyrolpartikeln hergestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Herstellungsprozesses findet sich in Weirauch et al. (2022). Die SAWs strahlen Energie in das PDMS und Fluid ab, wodurch longitudinale Druckwellen (engl. Bulk Acoustic Waves, BAW) mit einer Wellenlänge von $\lambda_{BAW} = \lambda_{SAW} c_f/c_s$ angeregt werden. Die Phasengeschwindigkeit der SAW und BAW wird durch c_s und c_f bezeichnet. Gleichzeitig werden die gegenläufigen SAWs entlang ihrer Ausbreitungsrichtung gedämpft. Aufgrund der Überlagerung und partiellen Reflektion der BAWs an den Fluid-PDMS Grenzflächen entsteht ein pseudo-stehendes akustisches Wellenfeld im Fluid, welches ursächlich für die ARF und akustisch induzierte Strömung ist. Neben dem akustischen Feld breitet sich auch das elektrische Feld in den Mikrokanal aus, wobei sich die Feldlinien zwischen den Schwingungsbäuchen der sSAW schließen. Im Fluid liegt somit ein inhomogenes elektrisches Feld vor, welches den periodischen Verlauf der sSAW widerspiegelt. Um zwischen den Effekten der Akusto- und Dielektrophorese anhand des Partikelverhaltens experimentell unterscheiden zu können, wurden zwei Maßnahmen ergriffen. Zum einen deckt die Kanalhöhe mehrere Wellenlängen der BAW ab. Da die Amplitude des elektrischen Feldes exponentiell mit dem Abstand zur Substratoberfläche abklingt (Collins et al. 2014), ist das Partikelverhalten in Richtung Kanaldecke durch die Akustophorese dominiert. Zum anderen wurde das elektrische Feld durch eine dünne Metallschicht auf dem piezoelektrischen Substrat partiell abgeschirmt, während die Amplitude der sSAW in diesem Bereich nur marginal beeinflusst wurde. Folglich ist die dielektrophoretische Kraft und das Moment im Fluid oberhalb der Metallschicht stark reduziert, während die akustische Kraft und das Moment nahezu unbeeinträchtigt wirken.

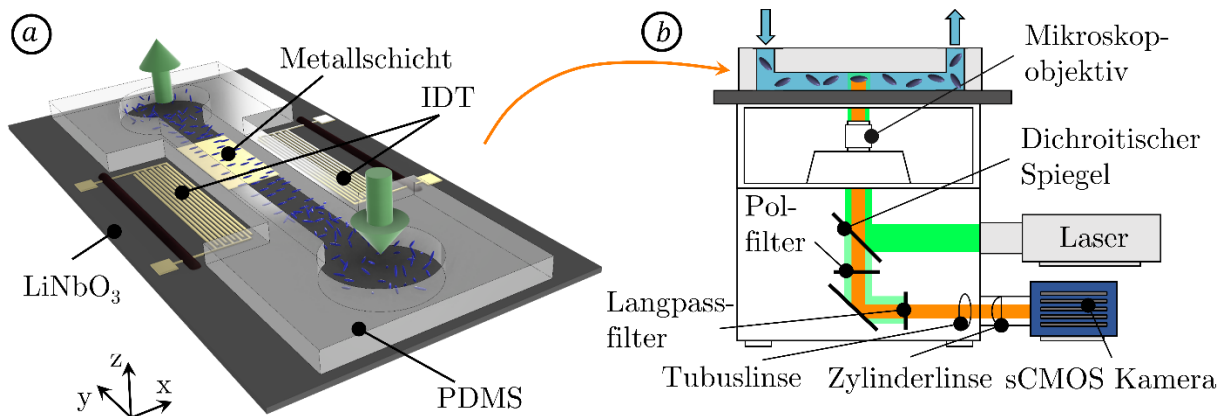


Abb. 1: (a) Schematische Darstellung des akustofluidischen Systems mit partiell aufgebrachter Metallschicht und ellipsoiden Partikeln. Die Kanaldecke aus PDMS wurde zur Visualisierung nicht dargestellt. (b) APTV-Setup mit Zylinderlinse im optischen Pfad zur Kamera. Während der Experimente wurde das akustofluidische System auf dem inversen Mikroskop montiert und die Partikelbewegung von unten durch das piezoelektrische Substrat beobachtet.

Zur Beobachtung des Partikelverhaltens wurde das akustofluidische System auf einem inversen Mikroskop (Axio Observer 7, Zeiss GmbH) mit einem Plan-Neofluar Objektiv (M20x, NA = 0,4, Zeiss GmbH) montiert, wie in Abb. 1b schematisch dargestellt. Die Partikel wurden mit einem modulierbaren OPAL Laser (tarm laser technologies tit GmbH & Co. KG) mit grünem Licht bei einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von 1 ms beleuchtet. Mit einem dichroitischen Spiegel (DMLP567T, Thorlabs Inc) und einem Langpassfilter (FELH0550, Thorlabs Inc) wurde das fluoreszierte Lichtsignal der Partikel von reflektiertem Laserlicht getrennt. Da der optische Zugang durch den Kanalboden aus doppelbrechendem LiNbO_3 erfolgte, wurde ein linearer Polarisationsfilter im optischen Pfad zur Kamera (imager sCMOS, LaVision GmbH, 16 bit) positioniert (Kiebert et al. 2017). In den Experimenten mit sphärischen Partikeln wurde zusätzlich eine Zylinderlinse ca. 40 mm vor der Kamera installiert, wodurch die Partikelbilder elliptisch verzerrt erschienen. Basierend auf der Form der Partikelbilder kann die Tiefenposition der Partikel anhand einer zuvor bestimmten Kalibrierfunktion zugeordnet werden. Um Partikelagglomerationen und anhaftende Partikel zu entfernen, wurden die Messungen in mehrere Einzelmessungen unterteilt und der Mikrokanal zwischen den Einzelmessungen gespült. Ein stationärer Zustand wurde zum Start jeder Einzelmessung ca. 6 Sekunden nach dem Einschalten der sSAW erreicht. Die gesamte Kanalhöhe wurde durch sukzessives Traversieren während der Experimente mit Schrittweiten von $\Delta z/n = 10 \mu\text{m}$ in z-Richtung abgedeckt. Der Brechungsindex der Flüssigkeit ist durch n gegeben. In jeder Messposition wurden mindestens 900 Doppelbilder mit einer Framerate von 10 Hz aufgenommen.

Bildverarbeitung

Basierend auf den aufgenommenen Partikelbildern wurden die räumlichen Positionen der sphärischen Partikel im Experiment detektiert. Dazu wurde zunächst ein Hintergrundabzug anhand eines zweidimensionalen Polynomfits zweiter Ordnung der Intensitätsverteilung im aufgenommenen Bild und ein Gaußfilter mit einer Fenstergröße von 5×5 Pixel auf die Bilder angewandt. Zur Detektion der Partikelbilder erfolgte anschließend eine Segmentierung mit einem globalen Schwellwert in der Intensität. Da die Aufnahme der Partikelbilder durch die dünne Metallschicht auf der Substratoberfläche erfolgte, ist das Signal-zu-Rausch Verhältnis (engl. Signal-to-noise ratio, SNR) im abgeschirmten Bereich deutlich geringer. Aus diesem Grund wurden separate Segmentierungen für den abgeschirmten und freien Bereich der Sub-

stratoberfläche durchgeführt. Subpixelgenauigkeit in der Bestimmung der planaren Partikelpositionen (x, y) und Länge der Halbachsen der ellipsoiden Partikelbilder (a_x, a_y) wurde durch anpassen von eindimensionalen Gaußfunktionen in x - und y -Richtung erreicht (Kähler et al. 2012). Anhand der detektierten Partikelform (a_x, a_y) wurde die Tiefenposition der Partikel durch die Position mit minimalem Euklidischen Abstand zu einer Kalibrierfunktion in der $a_x a_y$ -Ebene bestimmt (Cierpka et al. 2011). Die Kalibrierfunktion wurde anhand von zuvor aufgenommenen Bildern abgetrockneter Partikel mit bekannter z -Position aufgestellt. Detektierte Partikelbilder oberhalb der freien bzw. abgeschirmten Substratoberfläche mit einem Euklidischen Abstand von mehr als 2 bzw. 5 Pixel zur Kalibrierfunktion in der $a_x a_y$ -Ebene wurden als Ausreißer klassifiziert. Unter Verwendung eines nearest-neighbor Algorithmus wurde den validen Partikeldetektionen ein Verschiebungsvektor durch Verfolgen der Partikelbilder in den Doppelbildern zugeordnet. Anhaftende Partikel mit einer Verschiebung von weniger als 0,25 Pixel wurden aussortiert.

Um das dynamische Verhalten der ellipsoiden Partikel zu charakterisieren, ist neben der räumlichen Position auch die in-plane und out-of-plane Orientierung (φ, θ) relevant. Die Auswertung dieser Größen basiert auf Bildern, welche ohne Zylinderlinse im optischen Pfad zur Kamera aufgenommen wurden. Zur Detektion der planaren Positionen (x, y) und Orientierung (φ) der nicht-sphärischen Partikel wurde ein zuvor entwickelter Algorithmus verwendet (Sachs et al. 2023). Stark defokussierte Partikelbilder wurden zusätzlich anhand des Verhältnisses der summierten Intensitäten $I_{\text{sum}}/(I_{\text{ex}} - I_{\text{sum}})$ aussortiert (Franchini und Krevor 2020, Sachs et al. 2023b). Dafür wurden die Intensitäten innerhalb der detektierten Partikelkontur I_{sum} und der um den Faktor 1,25 erweiterten Partikelkontur I_{ex} aufsummiert. Auf Basis der durchgeführten Experimente und unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen Fokus dieses Beitrages wurde auf eine Auswertung der z -Position und out-of-plane Orientierung der nicht-sphärischen Partikel mit konventionellen Algorithmen verzichtet.

Numerisches Modell

Die dreidimensionale numerische Modellierung des akustofluidischen Systems umfasst zwei Schritte. Im ersten Schritt wurde die Ausbreitung und Überlagerung der SAWs im piezoelektrischen Substrat berechnet. Dazu wurde das Substrat, der Fluid- und PDMS-Raum modelliert. Zur Anregung der SAWs wurden 20 Elektrodenpaare als Flächen mit einem alternierenden elektrischen Potential von ± 10 V auf der Substratoberfläche vorgegeben, welche einen IDT repräsentieren. Durch eine Symmetriebedingung in der yz -Ebene mittig zwischen den IDTs wurde der numerische Aufwand stark reduziert und lediglich die Hälfte des akustofluidischen Systems numerisch abgebildet. Die akustischen und elektrischen Felder der SAW koppeln sich in den PDMS- und Fluidraum, wodurch die SAW in ihrer Ausbreitungsrichtung gedämpft wird. Eine Validierung der Oberflächenauslenkung des Substrats durch die SAW erfolgte anhand von Messungen mit einem hochfrequenten Laser-Doppler-Vibrometer (LDV, UHF-120, Polytec GmbH).

Im zweiten Schritt der Simulation wurden die numerisch berechnete Oberflächenauslenkung und das elektrische Potential der sSAW als Randbedingungen an der Substratoberfläche in zwei reduzierten numerischen Modellen zur Berechnung der akustischen und elektrischen Feldgrößen im Fluidraum genutzt. Infolge der entkoppelten Berechnung mit geringerem numerischen Aufwand in separaten Modellen wurden Parameterstudien ermöglicht, ohne die Wellenausbreitung im piezoelektrischen Substrat erneut berechnen zu müssen. Im reduzierten Modell zur Bestimmung der akustischen Feldgrößen wurde weiterhin die akustisch induzierte

Fluidströmung berechnet, welche zur Validierung anhand von Geschwindigkeitsmessungen und thermoviskosen zweidimensionalen numerischen Modellen dient (Sachs et al. 2022, Sachs et al. 2023). Während die akustischen und dielektrophoretischen Kräfte auf sphärische Partikel als Feldgrößen bestimmt wurden (Bach und Bruus 2020, Pohl und Crane 1972), wurden die Kräfte und Momente auf ein ellipsoides Partikel durch Integration über der Partikelgleichgewichtsoberfläche berechnet (Wang et al. 1997, Doinikov 1997). Dazu wurde ein ellipsoides Partikel als Festkörper im Fluidraum modelliert und die mechanische Verschiebung sowie das elektrische Feld im Inneren des Partikels bestimmt.

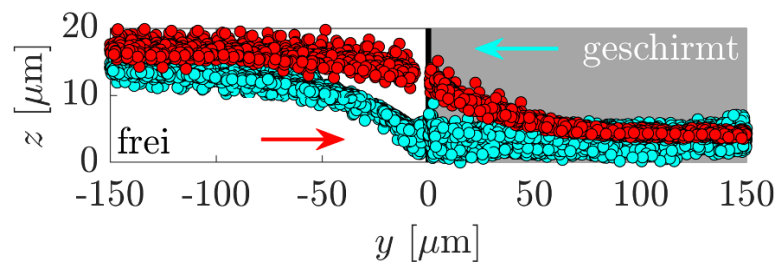


Abb. 2: Gemessene Positionen sphärischer Partikel in der Nähe der Grenzfläche zwischen freier und abgeschirmter Substratoberfläche für gegensätzliche Strömungsrichtungen. Die Richtung der druckgetriebenen Hauptströmung ist durch die farblichen Pfeile gekennzeichnet.

Ergebnisse und Diskussion

Mit Anregung der sSAW wurden die sphärischen Partikel über der gesamten Kanalhöhe in Druckknoten fokussiert, während die dreidimensionalen Positionen der Partikel unter Anwendung der APTV bestimmt wurden. Wie in Abb. 2 verdeutlicht, wurden die oberflächennahen Partikel im nicht abgeschirmten Bereich des Mikrokanals um ca. $17 \mu\text{m}$ durch die dielektrophoretische Kraft levitiert. Sobald die Partikel in den abgeschirmten Bereich eintraten, wurden sie infolge akustischer Kräfte zur Substratoberfläche verschoben. Ein ähnliches Verhalten war mit invertierter Hauptströmungsrichtung beobachtbar. Nachdem die sphärischen Partikel den abgeschirmten Bereich nahe der Substratoberfläche passierten, wurden sie infolge der im Bereich der freien Substratoberfläche wirkenden dielektrophoretischen Kraft levitiert. Da an der Kante der dünnen Metallschicht jedoch Gradienten im elektrischen Feld in Hauptströmungsrichtung vorliegen, wirkt zusätzlich eine dielektrophoretische Kraftkomponente in positiver y -Richtung entgegen der Hauptströmung. Übersteigt die dielektrophoretische Kraftkomponente die Stokes'sche Reibungskraft aufgrund der Hauptströmung, werden die Partikel an der Kante der Metallschicht gefangen. Da die dielektrophoretische Kraft exponentiell mit dem Abstand zur Substratoberfläche abklingt, war dieses Verhalten in höheren Fokuspositionen nicht präsent (nicht dargestellt).

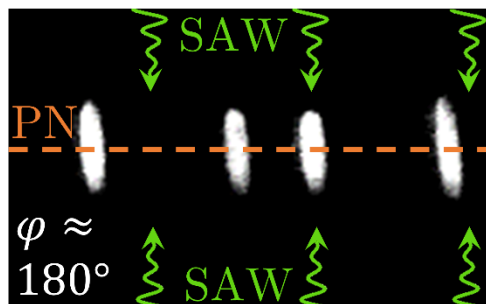


Abb. 3: Ausrichtung ellipsoider Partikel zu einem planaren Winkel $\varphi \approx 180^\circ$, während die Partikel auf einen Druckknoten der sSAW fokussiert waren.

Ein ähnliches Verhalten zeigten ellipsoide Partikel aus Polystyrol, welche sich zusätzlich bevorzugt orthogonal zu den Druckknoten (engl. pressure nodes, PN) des stehenden akustischen Wellenfeldes ausrichteten (siehe Abb. 3, Sachs et al. 2023). Die statistische Analyse des planaren Winkels φ in Abb. 4 bestätigt, dass die bevorzugte Ausrichtung der ellipsoiden Partikel unabhängig von der Beschichtung der Substratoberfläche durch die sSAW bestimmt wird. Während sich die ellipsoiden Partikel ohne den Einfluss der sSAW bevorzugt parallel zur Hauptströmung mit $\varphi \approx 90^\circ$ orientieren, richteten sie sich mit eingeschalteter sSAW sowohl im Bereich der freien als auch abgeschirmten Substratoberfläche orthogonal zu den Druckknoten mit $\varphi \approx 180^\circ$ aus. Offensichtlich liegen komplementäre Effekte des akustischen und dielektrophoretischen Moments zur Ausrichtung der nicht-sphärischen Partikel vor. Anhand der umfassenden experimentellen Untersuchungen wurde ein dreidimensionales numerisches Modell validiert. Dieses konnte den komplementären Effekt zur Ausrichtung nicht-sphärischer Partikel bestätigen und bietet einen detaillierten Einblick in die zugrundeliegenden akustischen und elektrischen Felder. Darüber hinaus erlaubt es die Bewegung von Partikeln beliebiger Größe und Form in komplexen akustofluidischen Systemen präzise vorherzusagen. Die Resultate und Herausforderungen der experimentellen und numerischen Studien werden während der Konferenz präsentiert und diskutiert.

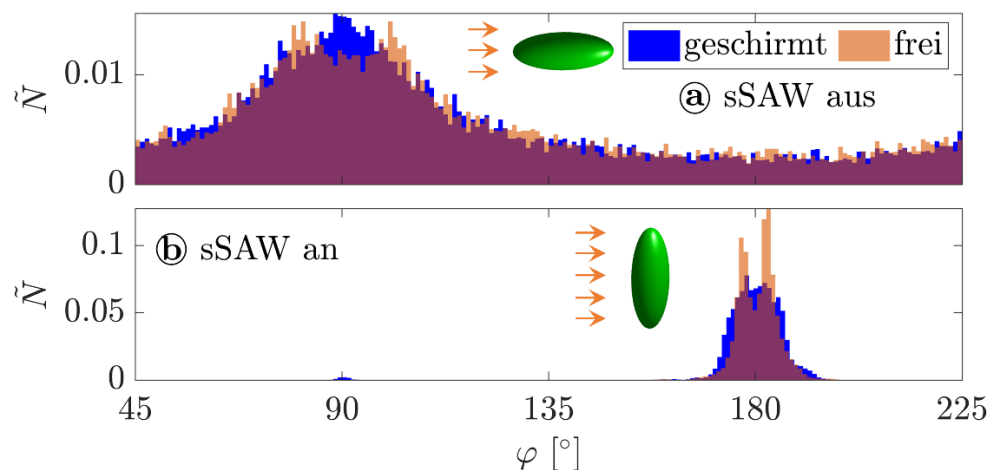


Abb. 4: Relative Anzahl \tilde{N} detektierter Partikel mit einem planaren Winkel φ bei ausgeschalteter sSAW (a, sSAW aus) und eingeschalteter sSAW (b, sSAW an), gemessen über der geschirmten und freien Substratoberfläche.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogrammes SPP2045 „Hochspezifische mehrdimensionale Fraktionierung von technischen Feinstpartikelsystemen“ (444806275). Weiterhin danken wir 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. Darüber hinaus drücken wir unsere Dankbarkeit für den technischen Support durch Henning Schwanbeck bei der Durchführung der numerischen Simulationen im high-performance computing cluster des Universitätsrechenzentrums der TU Ilmenau aus. Besonderer Dank gilt weiterhin Prof. Klaus Stefan Drese von der Hochschule Coburg für die Bereitstellung von Messungen der SAW-Amplitude.

Literatur

- Ahmed D., Mao X., Shi J., Juluri B.K. und Huang T.J. (2009)** A millisecond micromixer via single-bubble-based acoustic streaming. *Lab Chip* 9:2738-2741
- Bach J.S. und Bruus H. (2020)** Suppression of Acoustic Streaming in Shape-Optimized Channels. *Physical Review Letters* 124:214501
- Cierpka C., Segura R., Hain R. und Kähler C.J. (2010)** A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics. *Measurement Science and Technology* 21:045401
- Cierpka C., Rossi M., Segura R. und Kähler C.J. (2011)** On the calibration of astigmatism particle tracking velocimetry for microflows. *Measurement Science and Technology* 22:015401
- Collins D.J., Alan, T. und Neild A. (2014)** Particle separation using virtual deterministic lateral displacement (vDLD). *Lab Chip* 14:1595
- Collins D.J., Ma. Z. und Ai Y. (2016)** Highly localized acoustic streaming and size-selective submicrometer particle concentration using high frequency microscale focused acoustic fields. *Analytical Chemistry* 88:5513-5522
- Deng Z., Kondalkar V.V., Cierpka C., Schmidt H. und König J. (2023)** From rectangular to diamond shape: on the three-dimensional and size-dependent transformation of patterns formed by single particles trapped in microfluidic acoustic tweezers. *Lab Chip* 23:2154
- Ding X., Peng Z., Lin S.-C.S., Geri M., Li S., Li P., Chen Y., Dao M., Suresh S. und Huang T.J. (2014)** Cell separation using tilted-angle standing surface acoustic waves. *PNAS* 111:36
- Doinikov A.A. (1997)** Acoustic radiation force on a spherical particle in a viscous heat-conducting fluid. I. General formula. *J. Acoust. Soc. Am.* 101:713
- Fan Y., Wang X., Ren J., Lin F. und Wu J. (2022)** Recent advances in acoustofluidic separation technology in biology. *Microsystems & Nanoengineering* 8:94
- Franchini S. und Krevor S. (2020)** Cut, overlap and locate: a deep learning approach for the 3D localization of particles in astigmatic optical setups. *Exp Fluids* 61:140
- Kähler C.J., Scharnowski S. und Cierpka C. (2012)** On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls. *Exp Fluids* 52:1641-1656
- Kiebert F., Wege S., Massing J., König J., Cierpka C., Weser R. und Schmidt H. (2017)** 3D measurement and simulation of surface acoustic wave driven fluid motion: a comparison. *Lab Chip* 17:2104
- Nam J., Lee Y. und Shin S. (2011)** Size-dependent microparticles separation through standing surface acoustic waves. *Microfluidics and Nanofluidics* 11:317-326
- Pohl H.A. und Crane J.S. (1972)** Dielectrophoretic Force. *J. theor. Biol.* 37:1-13
- 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* 27:81
- Sachs S., Ratz M., Mäder P., König J. und Cierpka C. (2023b)** Particle detection and size recognition based on defocused particle images: a comparison of a deterministic algorithm and a deep neural network. *Exp Fluids* 64:21
- Sachs S., Schreier D., Brand, F., Drese K.S., Cierpka C. und König J. (2024)** Interplay of acoustophoresis and dielectrophoresis in a standing surface acoustic wave field: from spherical to non-spherical particles, *Lab on a Chip*, under review
- Shi J., Ahmed D., Mao X., Lin S.-C.S., Lawit A. und Huang T.J. (2009)** Acoustic tweezers: patterning cells and microParticles using standing surface acoustic waves (SSAW). *Lab Chip* 9:2890-2895
- Shilton R., Tan M.K., Yeo L.Y. und Friend J.R. (2008)** Particle concentration and mixing in microdrops driven by focused surface acoustic waves. *Journal of Applied Physics* 104:014910
- Wang X., Wang X.-B. und Gascoyne P.R.C. (1997)** General expressions for dielectrophoretic force and electrorotational torque derived using the Maxwell stress tensor method. *Journal of Electrostatics* 39:277-295
- 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