3D3C Strömungsmessungen zum Einfluss akustisch induzierter Wirbelstrukturen auf die Partikelfraktionierung in Mikrokanälen

3D3C Flow measurements on the influence of acoustically induced vortex structures on particle fractionation in microchannels

Sebastian Sachs, Christian Cierpka und Jörg König

Institut für Thermo- und Fluiddynamik, Technische Universität Ilmenau, P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau, Deutschland

Schlagworte: Akustische Oberflächenwellen, Partikelfraktionierung, APTV Key words: surface acoustic waves, particle fractionation, APTV

Zusammenfassung

Der Einsatz akustischer Oberflächenwellen (engl. surface acoustic wave, SAW) ermöglicht die gezielte Manipulation von Partikeltrajektorien und bietet damit eine skalierbare Methode zur Fraktionierung von Partikellösungen. In vielen mikrofluidischen Systemen wird dabei die Wirkung der acoustic radiation force (ARF) genutzt, während akustisch induzierte Strömungen einen negativen Einfluss auf das Fraktionierungsergebnis nehmen. Im Hinblick auf die Auslegung entsprechender Systeme ist eine Charakterisierung der überlagerten Fluidbewegung somit essentiell. In der vorliegenden Arbeit wird die Struktur der Strömung sowohl im Zentrum, als auch in den äußeren Bereichen des stehenden Wellenfeldes mittels Astigmatismus Particle Tracking Velocimetry (APTV) experimentell untersucht. Durch eine sukzessive Erhöhung der Wellenlänge und eine Reduzierung der Kanalhöhe werden sinkende Partikelgeschwindigkeiten gemessen und ein signifikanter Einfluss auf die Wirbelstrukturen nachgewiesen. Speziell im Bereich der Kanalmitte sind die Wirbel geringer ausgedehnt, wodurch die strömungsbedingte Vermischung fraktionierter Partikel vermindert wird. Die elektrische Leistung hat hingegen keinen Einfluss auf das Strömungsbild und wirkt sich lediglich auf die Fluidgeschwindigkeit aus. Zu Beginn und am Ende des SAW-Feldes konnten dreidimensionale Wirbelstrukturen nachgewiesen werden, deren Ausdehnung mit der elektrischen Leistung zunimmt.

Einleitung

Die effiziente Fraktionierung von Partikellösungen stellt eine anspruchsvolle Aufgabe sowohl in der Industrie und Verfahrenstechnik als auch im Bereich der Biomedizin sowie Pharmakologie dar (Shekunov et al. 2007, Sajeesh und Sen 2014). Durch innovative Konzepte im Bereich mikrofluidischer Systeme, steht die gezielte Manipulation der Partikelbewegung durch extern aufgeprägte Felder als vielversprechender Ansatz im Fokus aktueller Forschungstätigkeiten (Sajeesh und Sen 2014, Ahmad et al. 2019, Wu et al. 2019). Ein Ansatz ist die Nutzung akustischer Felder, die in der Mikrofluidik mit Hilfe akustischer Oberflächenwellen einfach integriert werden können und sich als attraktive Methode mit hoher Flexibilität und einfacher Skalierbarkeit auszeichnen. Für die Auslegung entsprechender Systeme ist der Einfluss akustisch induzierter Strömungen auf den Sortierprozess von zentraler Bedeutung. Diese Arbeit widmet sich der Identifizierung von wesentlichen Einflussparametern auf die Struktur und Ausprägung der überlagerten Fluidbewegung.

Im vorgestellten Versuchsaufbau (siehe Abbildung 1) werden zwei gegenläufige SAW durch zwei Interdigitalwandler (engl. interdigital transducer, IDT) angeregt. Diese bestehen aus Fingerelektroden, welche periodisch mit einer Breite und einem Abstand von einem Viertel der Wellenlänge λ_{SAW} der SAW auf einem piezoelektrischen Substrat aus 128° YX LiNbO₃ aufgebracht sind. Durch den inversen piezoelektrischen Effekt kommt es nach Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung zu elastischen Oberflächendeformationen. welche sich im Bereich der IDT konstruktiv überlagern. Diese breiten sich als SAW entlang der Substratoberfläche in Richtung eines mittig zwischen den IDT positionierten Mikrokanals aus Polydimethylsiloxan (PDMS) aus. Sobald die akustischen Wellen auf die Fluidströmung innerhalb des Mikrokanals treffen, wird ein Teil der Energie in Form einer longitudinalen Druckwelle (engl. bulk acoustic wave, BAW) in das Fluid abgestrahlt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten im Fluid c_{Fluid} und im Substrat c_{SAW} erfolgt die Ausbreitung der BAW unter dem Rayleigh-Winkel $\Theta_R = \arcsin(c_{Fluid}/c_{SAW})$. Infolge der Überlagerung der gegenläufigen Wellen entstehen stationäre Druckknoten und -bäuche parallel zur Kanalwand, welche die Partikeltraiektorien im Kanal beeinflussen können und eine Fokussierung sowie Fraktionierung mitgeführter Polystyrolpartikel erlauben (Wu et al. 2019, Destgeer und Sung 2015, Ding et al. 2013). Durch Streuungseffekte der BAW an akustischen Diskontinuitäten wirkt die acoustic radiation force dabei als treibende Kraft zur Ausrichtung der Partikel entlang der Druckknoten. Gleichzeitig bildet sich eine stationäre Strömung aufgrund viskoser Dämpfung von laufenden Wellenanteilen, dem sog. acoustic streaming Effekt, und Gradienten im Druckfeld quer zur Hauptströmung aus (Devendran et al. 2016, Nama et al. 2015). Diese akustisch induzierte Strömung beeinflusst die Trajektorien der Partikel durch Stokes'sche Reibung und nimmt damit negativen Einfluss auf die Reinheit der Fraktionierung in vielen System (Ding et al. 2013, Sehgal und Kirby 2017, Barnkob et al. 2012).

Basierend auf numerischen sowie experimentellen Ansätzen untersuchen vergleichbare Studien entweder nur Strömungen aufgrund laufender SAW (Kiebert et al. 2017), im zentralen Teil der IDT (Devendran et al. 2016), mit einem IDT direkt unterhalb des Mikrokanals (Sehgal und Kirby 2017) oder in Kanälen, deren Breite mit einer Wellenlänge der SAW korrespondiert (Nama et al. 2015, Barnkob et al. 2018). Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse erweitern den aktuellen Forschungsstand durch umfassende 3D3C Strömungsmessungen zur Partikelbewegung in stehen Wellenfeldern in einem weiten Parameterbereich. Neben dem Einfluss der elektrisch eingebrachten Leistung lassen sich durch Variation der Wellenlänge und Kanalgeometrie wichtige Designkriterien für zukünftige Fraktionierungssysteme ableiten. Darüber hinaus liefern die Messergebnisse eine solide Grundlage zur Validierung numerischer Modelle.

Um die komplexe, dreidimensionale Struktur der Strömung messtechnisch erfassen zu können, kam die Astigmatismus Particle Tracking Velocimetry (APTV, Cierpka et al. 2010) zum Einsatz. Bei dieser auf der PTV beruhenden Defokustechnik wird eine Zylinderlinse in der Beobachtungsoptik ergänzt, wodurch optische Verzerrungen (sog. Astigmatismus) der Partikelbilder eine Zuordnung der Tiefenposition ermöglichen. Durch Verfolgung der Partikel über zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen können alle drei Geschwindigkeitskomponenten (3D3C) bei bekanntem Zeitabstand bestimmt werden. Da zur optischen Strömungsmessung somit nur eine Kamera notwendig ist, offenbaren sich Vorteile im Hinblick auf den limitierten optischen Zugang zum Mikrokanal (Cierpka et al. 2011). Die erreichbare Messtiefe ist auf einen Bereich beschränkt, in dem die Form der ellipsenförmigen Partikelbilder detektiert werden kann. Dieser wird maßgeblich durch den Abstand der beiden Fokusebenen und vom Signal- zu Rauschverhältnis (engl. signal to noise ratio, SNR) beeinflusst (Rossi et al. 2014). Zur Erfassung des gesamten Messvolumens ist im vorliegenden Fall eine Traversierung in Tiefenrichtung erforderlich, welche aufgrund der stationären Strömungsverhältnisse mit Reynoldszahlen Re < 1 vertretbar ist.

Aufbau des mikrofluidischen Systems

Untersucht wird die akustisch induzierte Strömung in einem Mikrokanal mit rechteckigem Querschnitt, welcher aus PDMS abgeformt und auf einem Substrat aus 128° YX LiNbO₃ aufgebracht ist (siehe Abbildung 1). Auf diesem Substrat wurden zwei IDT aus 5 nm Titan und 295 nm Aluminium durch Elektrodenstrahlverdampfen abgeschieden. Eine 385 nm dicke Schicht aus Siliziumdioxid (SiO₂) dient dem Korrosionsschutz der Elektrodenstrukturen. Während die Breite des mittig zu den Elektroden positionierten Kanals auf ca. 500 µm festgelegt war, wurde die Kanalhöhe zwischen 85 µm, 185 µm und 480 µm variiert. Mithilfe einer Brücke aus Polymethylmethacrylat (PMMA) wurde das PDMS von oben leicht gegen das piezoelektrische Substrat gepresst, um die Abdichtung zu gewährleisten.

Im Zuge einer Variation der Wellenlänge, wurde der Einfluss dieses Parameters auf die akustische Strömung mit verschiedenen Plattformen untersucht. Der Bereich, in dem eine aktive Beeinflussung der Partikeltrajektorien stattfindet, wird in erster Näherung durch die Apertur der IDT in allen Systemen auf 2 mm festgesetzt. Aufgrund der Geometrie der IDT breiten sich die SAW bidirektional entlang der kristallographischen X-Achse des Substrates aus, wobei nur Wellenanteile in Richtung des Mikrokanals genutzt werden. Zur Vermeidung von Reflektionen an den äußeren Substraträndern wird der ungenutzte Wellenanteil der SAW durch eine Schicht aus Photoresist vollständig gedämpft. Ein erheblicher Teil der durch die SAW transportierten Energie wird zudem im Bereich der seitlichen Kanalwände in das PDMS abgestrahlt und trägt nicht zur Anregung der akustischen Strömung bei (Kiebert et al. 2017). Durch Lufttaschen im PDMS konnten die Kanalwände auf Höhe der IDT auf eine Dicke von 500 µm begrenzt und Verluste an dieser Stelle reduziert werden. Anschließend wird Energie vom Substrat direkt an das Fluid übertragen und die SAW gedämpft. Die Dämpfungslänge skaliert proportional mit der Wellenlänge (Arzt et al. 1967) und übersteigt für $\lambda_{SAW} = 93,1 \,\mu m$ sowie 155,3 µm die Kanalbreite, wodurch der Anteil der an das Fluid übertragenen Energie in diesen Fällen weiter sinkt.





Die in das System eingebrachte elektrische Leistung P_{el} wurde mit einem Power SAW Generator (BelektroniG GmbH) eingestellt. Eine Anpassung der Frequenz an die Geometrie der Elektrodenstrukturen erfolgte anhand der Minima der Reflektionsfaktoren S₁₁ und S₂₂ beider IDT. Durchschnittlich wurden ca. 5 % der aufgeprägten Leistung reflektiert. Die Fluidzuführung

geschah durch eine Spritzenpumpe (neMESYS, cetoni GmbH), welche das Fluid mit konstantem Volumenstrom durch Metallkanülen in den Mikrokanal einbrachte. Zur pulsationsfreien Fluidförderung kamen Glasspritzen (ILS Innovative Laborsysteme GmbH) mit einem Volumen von 100 µl sowie 250 µl zum Einsatz.

Experimentelle Strömungsmessung

Die optische 3D3C Strömungsmessung erfolgte in drei Regionen (engl. region of interest, ROI) des SAW-Systems (siehe Abbildung 1) unter Anwendung der APTV. Neben Untersuchungen im Zentrum des stehenden Wellenfeldes (ROI2) lag der Fokus auf der Charakterisierung von akustisch induzierten Wirbelstrukturen in den äußeren Bereichen (ROI1 und ROI3). Während des Experiments wurde die mikrofluidische Plattform auf einem inversen Mikroskop (Axio Observer 7, Zeiss GmbH) mit einem Plan-Neofluar Objektiv (M20x, NA=0.4, Zeiss GmbH) positioniert. Der jeweils beobachtbare Kanalabschnitt erstreckt sich über eine Länge von 800 µm in Hauptströmungsrichtung sowie über die gesamte Kanalbreite und -höhe. Zur volumetrischen Beleuchtung diente ein modulierbarer OPSL-Laser (tarm laser technologies tlt GmbH & Co.KG) mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer maximalen Leistung von 8 W. Mithilfe eines Funktionsgenerators (Tektronix UK Ltd.) wurde die Beleuchtungsdauer auf das jeweilige Parameterset angepasst, um Messungen mit einem guten SNR zu ermöglichen. Zur Strömungsmessung wurden dem zugeführten Fluid monodisperse, fluoreszierende Polystyrolpartikel mit einem Durchmesser d_p von entweder 1,14 µm oder 0,45 µm zugegeben. Durch die Wahl kleiner Partikel konnte der Einfluss der ARF (ARF ~ d_p³, Settnes und Bruus 2012) auf die Partikeltrajektorien reduziert und das Folgeverhalten der Tracer entscheidend verbessert werden. Gleichzeitig ergibt sich aus dem sinkenden SNR ein Zielkonflikt, der die minimale Partikelgröße für verlässliche Messungen begrenzt. Um die ARF zusätzlich zu verringern, wurde die Dichte des Fluids, bestehend aus 80 % entionisiertem Wasser und 20 % Glyzerin, an die der Partikel angepasst und der akustische Kontrast ϕ (ARF ~ ϕ) somit gesenkt. Durch den Zusatz von 0,2 % v/v Surfactants (Polysorbate 80, Biorigin) konnte die Wahrscheinlichkeit von Partikelagglomerationen reduziert werden.

Die Aufnahme der Partikelbilder erfolgte aufgrund des limitierten optischen Zugangs analog zur Beleuchtung von der Unterseite des Mikrokanals durch das piezoelektrische Substrat aus LiNbO₃ mit einer sCMOS Kamera (imager sCMOS, LaVision GmbH, 16 bit, 2560 x 2160 Pixel). Infolge der Doppelbrechung des fluoreszierten Lichtstrahls im LiNbO₃-Kristall, erscheint ein Partikel zweifach auf dem Kamerasensor und verhindert damit die eindeutige Zuordnung der Partikelposition. Um den außerordentlichen Lichtstrahl zu unterdrücken, wurde ein linearer Polarisationsfilter im optischen Pfad ergänzt. Dieser reduziert jedoch auch die Intensität des transmittierten Fluoreszenzsignals um ca. 62 %, wodurch das SNR zusätzlich verringert wird. Da die Partikel Licht mit einer Wellenlänge von 607 nm emittieren, können Reflektionen des Laserlichts an Kanalberandungen durch einen dichroitischen Spiegel (DMLP567T, Thorlabs Inc.) und einen Langpassfilter (FELH0550, Thorlabs Inc) unterdrückt werden. Vervollständigt wird das APTV-Setup durch eine Zylinderlinse mit einer Brennweite von f_c = 250 mm, welche in einem Abstand von ca. 40 mm zur Kamera platziert wurde.

Während der Messung wurden die Fokuspositionen in Tiefenrichtung (z) mit Schrittweiten von 15 µm für 1,14 µm Partikel bzw. 10 µm für 0,45 µm Partikel traversiert und in jeder Messebene 750 Doppelbilder aufgenommen. In der Bildnachbearbeitung wurde zunächst ein Hintergrundabzug durchgeführt und die Partikelbilder durch einen Gauß-Filter mit einer Kernelgröße von 5×5 Pixeln geglättet. Anschließend erfolgte eine Segmentierung durch einen globalen Schwellwert im Intensitätslevel, um potenzielle Partikelbilder zu bestimmen. Mit Hilfe von eindimensionalen Gauß-Fits in horizontaler sowie vertikaler Richtung wurden die Partikelposition in der *x*,*y* - Ebene und Längen der Halbachsen subpixelgenau determiniert. Anhand einer Kalibrierfunktion kann die Tiefenposition des jeweiligen Partikels aus der Größe der Halbachsen abschließend zugeordnet werden. Der euklidische Abstand zur Kalibrierkurve dient als Kriterium zur Ausreißererkennung und wurde in allen Messungen auf 7,5 Pixel beschränkt. Die Zuordnung der Partikelbilder eines Partikels in den Doppelbildern durch einen nearest-neighbor-Algorithmus ermöglicht die Berechnung des Verschiebungsvektors r[±] und der Partikelgeschwindigkeit $\vec{u} = \vec{r}/\Delta t$ bei bekanntem Zeitabstand Δt . Für weiterführende Analysen wurden die zufällig verteilten Geschwindigkeitsvektoren auf ein reguläres Gitternetz interpoliert. Dabei wurde eine Gauß - Wichtung der Daten innerhalb eines Voxels anhand des euklidischen Abstands zu dessen Zentrum angewandt. Geschwindigkeitsvektoren, deren Komponenten u_i sich mit einem Faktor $l > \sqrt{2 * var(u_i)}$ vom Median im jeweiligen Voxel unterscheiden, wurden als Ausreißer deklariert.

Wirbelstrukturen in der Mitte des SAW-Feldes

Zur Diskussion der Messergebnisse soll zunächst das Strömungsfeld im zentralen Teil (ROI2) des stehenden Wellenfeldes analysiert werden. Da sich die akustisch induzierte Fluidbewegung in diesem Bereich ausschließlich quer zur Hauptströmung formiert, kann eine Beeinflussung durch die Geschwindigkeitskomponente *v* ausgeschlossen und der Volumenstrom zur Optimierung der optischen Messung angepasst werden. In Abbildung 2(a) ist die zeitlich und räumlich gemittelte Partikelbewegung quer zur Kanallängsachse für eine Wellenlänge von 20,5 µm und eine elektr. Leistung von ca. 20 mW dargestellt. Die räumliche Mittelung erstreckt sich dabei über den gesamten Beobachtungsbereich von 800 µm in Hauptströmungsrichtung. Weiße Gebiete kennzeichnen Stellen, in denen keine Messung von Partikeltrajektorien möglich war. Ursächlich dafür sind neben anhaftenden Partikel an Kanalberandungen, die das SNR drastisch herabsetzen, vor allem eine Partikelverarmung zwischen den Wirbelstrukturen. Diese treten vermehrt in der Nähe des Kanalbodens für größere Wellenlängen (siehe Abbildung 2(b)) auf.

Deutlich erkennbar sind SAW-induzierte Wirbelstrukturen in Abbildung 2(a), die sich von den seitlichen Kanalwänden symmetrisch als Eckart-Strömung über den gesamten Kanalguerschnitt ausdehnen. Der Winkel zwischen den äußeren und inneren Wirbeln beläuft sich auf ca. 24.2° und liegt damit nah am theoretisch bestimmten Rayleigh-Winkel von 23.4° für die Abstrahlung der BAW im verwendeten Fluid. Im Gegensatz dazu kann anhand des Strömungsverlaufes für größere Wellenlängen (siehe Abbildung 2(b)) kein konstanter Winkel mehr bestimmt werden. Darüber hinaus bilden sich für eine Wellenlänge von 155,3 µm mehrere kleine Wirbelpaare im Bereich der Kanalmitte. Diese resultieren aus der schwächeren Dämpfung der SAW. Während laufende Wellenanteile infolge der abweichenden Amplitude der gegenläufigen SAW für eine Wellenlänge von 20,5 µm über weite Teile der Kanalbreite dominieren, treten diese für $\lambda_{SAW} = 155,3 \,\mu m$ vornehmlich in der Nähe der Kanalwände auf. In der Folge wird die Partikelbewegung in der Kanalmitte maßgeblich durch das stehende Wellenfeld geprägt und große Wirbelstrukturen entstehen lediglich in den Randbereichen. Anhand einer FFT-Analyse des Verlaufes der Geschwindigkeitskomponente w entlang der Horizontalen im Intervall $x \in$ [92,8 µm; 392,8 µm] auf halber Kanalhöhe (z' = 92,5 µm) kann eine Periodenlänge von ca. 77,4 µm bestimmt werden. Diese stimmt in guter Näherung mit dem theoretischen Abstand der Druckknoten von $\lambda_{SAW}/2$ = 77,6 µm überein. Im Hinblick auf eine gezielte Partikelfraktionierung lässt sich schlussfolgern, dass Partikel, deren Trajektorien nicht durch die ARF dominiert werden, in einem SAW-System mit einer geringen Wellenlänge von 20,5 µm über weite

Bereiche des Kanals verteilt werden und den Sortierprozess damit erschweren. Für größere Wellenlängen (hier 155,3 µm) sind akustisch induzierte Wirbelstrukturen hingegen auf den Bereich zwischen zwei Druckknoten limitiert, wodurch eine strömungsgetriebene Durchmischung der Partikel begrenzt wird.



Abbildung 2: Durch APTV gemessene Querkomponenten des Strömungsfeldes im Zentrum des stehenden Wellenfeldes (ROI2). Die Kanalhöhe und -breite betragen 185 µm sowie 500 µm und die elektrische Leistung ca. 20 mW. Variiert wurde die Wellenlänge von 20,5 µm (a) auf 155,3 µm (b).

Asymmetrien in Abbildung 2(b) lassen sich auf Abweichungen in der Leistungseinkopplung der beiden IDT, der akustischen Dämpfung durch die Kanalwände sowie der Phasenlage der gegenläufigen SAW zurückführen. Mit steigender elektrischer Leistung konnte im betrachteten Parameterbereich (P_{el} \in [10 mW; 30 mW]) ein linearer Anstieg der maximalen Strömungsgeschwindigkeit in den Querkomponenten $\sqrt{u^2 + w^2}|_{max}$ in guter Näherung verzeichnet werden, während die Struktur der Strömung unverändert blieb. Weiterhin sinkt die max. Fluidgeschwindigkeit nichtlinear mit steigender Wellenlänge.

Im Gegensatz zur Wellenlänge bewirkt eine Reduzierung der Kanalhöhe von 480 µm auf 85 µm eine Verringerung der gemessenen Partikelgeschwindigkeit. Dies lässt sich auf die sinkende Lauflänge der BAW zurückführen, bevor diese die Kanaldecke erreicht und zu ca. 93,7 % in das PDMS transmittiert wird. Der Anteil der mitgeführten Energie, der durch viskose Dämpfung im Fluid zur Strömung beiträgt, wird maßgeblich durch diese Lauflänge bestimmt. Darüber hinaus bilden sich mit sinkender Höhe kleinere Wirbelstrukturen, die sich in ihrer Ausdehnung im Fall von H = 85 µm sowie $\lambda_{SAW} = 93,1$ µm auf den Abstand der Druckknoten beschränken. Zusätzlich verschiebt sich die Lage der Geschwindigkeitsmaxima in Richtung der Kanalwände.

Wirbelstrukturen in den äußeren Regionen des SAW-Feldes

Nachdem die voll entwickelte Strömung im Zentrum des stehenden Wellenfeldes diskutiert wurde, liegt der Fokus im Folgenden auf den äußeren Regionen (ROI1 und ROI3). Anhand von Abbildung 3 wird deutlich, dass die akustisch induzierte Fluidbewegung zu Beginn (a) und am Ende (b) des SAW-Feldes nicht nur Querkomponenten, sondern auch wesentliche Anteile in Hauptströmungsrichtung besitzt. In der gewählten Darstellung wurden Ausreißer zusätzlich durch den normalisierten Mediantest (Westerweel und Scarano 2005) identifiziert und mittels linearer Interpolation der umliegenden Geschwindigkeitsvektoren korrigiert. Getrieben durch Druckgradienten in *y*-Richtung und unter dem Einfluss der Massenerhaltung entwickeln sich in diesen Bereichen Wirbelstrukturen mit dreidimensionalen Charakter. Im gewählten Parameterbereich liegen die Wirbelzentren stets innerhalb der Apertur der IDT. Dabei bilden sich die zirkulierenden Strömungen am Beginn des SAW-Feldes zunächst an der Kanaldecke und am Ende mit umgekehrtem Drehsinn am Kanalboden. Mit steigender elektrischer Leistung dehnen sich die Wirbelstrukturen weiter in den Kanal aus und verdrängen die aufgeprägte Hauptströmung. Zusätzlich ist ein Einfluss des eingestellten Volumenstroms wahrscheinlich. Dieser wurde im Rahmen dieser Studie jedoch nicht untersucht.



Abbildung 3: Strömung in Schnittebenen am Beginn (a, ROI1, $x' = 250 \mu m$) und Ende (b, ROI3, $x'' = 160 \mu m$) des SAW-Feldes für eine Wellenlänge von 20,5 μm , eine Kanalhöhe von 185 μm und eine elektrische Leistung von 154 mW. Die Hauptströmung wurde in *y*-Richtung aufgeprägt. Die Strichlinien kennzeichnen den Beginn bzw. das Ende der IDT.

Im Zuge der Verdrängung und Rückströmung des Fluides ist ein lokaler Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit in *y*-Richtung zu verzeichnen. In Abbildung 4 ist die Geschwindigkeitskomponente *v* in Hauptströmungsrichtung für die gleiche Messung über dem Kanalquerschnitt an der Stelle $y' = 90,7 \mu m$ visualisiert. Eine Rückströmung findet innerhalb der gewählten Schnittebene mittig in der Nähe der Kanaldecke statt, während sich räumlich separierte Maxima in den unteren Ecken des Kanals ausbilden. Infolge des umgekehrten Drehsinns der Wirbelströmung in ROI3 gestaltet sich die räumliche Anordnung der Rück- und Hauptströmung dort invers. Schlussfolgernd formiert sich ein zentraler Wirbel zu Beginn der akustischen Anregung und zwei Wirbel in den unteren Ecken des Kanals am Ende. Diese Phänomene sind ausschließlich am Beginn bzw. Ende des SAW-Feldes zu beobachten und unterstreichen die signifikanten Auswirkungen der akustisch induzierten Fluidbewegung auf den Verlauf der Hauptströmung. Da sich die Wirbelstrukturen in den äußeren Gebieten des Wellenfeldes über die gesamte Kanalbreite erstrecken, besteht ein zusätzlicher Einfluss auf die Trajektorien mitgeführter Partikel. Im Kontext einer Partikelfraktionierung wirken sich die überlagerten Strömungen somit kritisch auf bereits sortierte Partikel am Ende des SAW-Feldes sowie auf eine Vorpositionierung, wie sie in vielen Systemen zur Anwendung kommt (Sehgal und Kirby 2017, Ding et al. 2014), aus.



Abbildung 4: Strömungsgeschwindigkeit v in y-Richtung über dem Kanalquerschnitt an der Position $y' = 90,7 \ \mu m$ für H = 185 μm , $\lambda_{SAW} = 20,5 \ \mu m$ und $P_{el} = 154 \ mW$.

Resümee

Durch umfassende Strömungsmessungen konnte der Einfluss der Wellenlänge, der Kanalhöhe und der elektrischen Leistung auf die akustisch induzierte Strömung im Zentrum eines stehenden Wellenfeldes charakterisiert werden. Der untersuchte Parameterbereich orientiert sich dabei an einem System zur Partikelfraktionierung, bei dem sich mehrere Druckknoten sowohl über der Kanalbreite als auch -höhe ausbilden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl eine Erhöhung der Wellenlänge, als auch eine Reduzierung der Kanalhöhe zu einer verminderten Partikelgeschwindigkeit führen. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Wirbelpaare, welche sich im Bereich der Kanalmitte lediglich zwischen zwei benachbarten Druckknoten formieren. Eine strömungsbedingte Verteilung mitgeführter Partikel über den Kanalquerschnitt wird somit räumlich limitiert, wodurch sich Vorteile für das Design entsprechender Fraktioniersysteme ergeben. Eine Skalierung der elektrischen Leistung führte im betrachteten Parameterbereich zu einem linearen Anstieg der max. Partikelgeschwindigkeit, während strukturelle Änderungen im Strömungsbild nicht beobachtet wurden. In den äußeren Bereichen des stehenden Wellenfeldes konnten Wirbelstrukturen mit dreidimensionalem Charakter nachgewiesen werden. Diese können neben einer signifikanten Verdrängung der aufgeprägten Hauptströmung eine zusätzliche Verschiebung vorpositionierter oder bereits fraktionierter Partikel bewirken. Der Drehsinn der Wirbel sowie die Position der max. Verdrängung verhalten sich zum Ende des SAW-Feldes invers zu denen am Beginn.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogrammes SPP2045 MehrDimPart "Hochspezifische mehrdimensionale Fraktionierung von technischen Feinstpartikelsystemen" (CI 185/8-1). Weiterhin bedanken sich die Autoren bei den Mitarbeitern des DFG-Gerätezentrums "Mikro-Nano-Integration" für die Unterstützung bei der Fertigung der mikrofluidischen Plattformen.

Literatur

Ahmad, M., Bozkurt, A., Farhanieh, O., 2019: " Evaluation of acoustic-based particle separation methods", World Journal of Engineering, 16(6), pp. 823-838

Arzt, R. M., Salzmann, E., Dransfeld, K., 1967: "Elastic surface waves in quartz at 316 MHz", Appl. Phys. Lett., 10(5), pp. 165–167.

Barnkob, R., Augustsson, P., Laurell, T., Bruus, H., 2012: "Acoustic radiation- and streaming-induced microparticle velocities determined by microparticle image velocimetry in an ultrasound symmetry plane", Phys. Rev. E, 86(5), 056307

Barnkob, R., Nama, N., Ren, L., Huang, T. J., Costanzo, F., Kähler, C. J., 2018: "Acoustically Driven Fluid and Particle Motion in Confined and Leaky Systems", Phys. Rev. Applied, 9(1), 014027

Cierpka, C., Rossi, M., Segura, R., Kähler, C. J. 2011: "On the calibration of astigmatism particle tracking velocimetry for microflows", Meas. Sci. Technol., 22(1), 015401

Cierpka, C., Segura, R., Hain, R., Kähler, C. J., 2010: "A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics", Meas. Sci. Technol., 21(4), 045401

Destgeer, G., Sung, H. J., 2015: "Recent advances in microfluidic actuation and micro-object manipulation via surface acoustic waves", Lab on a Chip, 15(13), pp. 2722-2738

Devendran, C., Albrecht, T., Brenker, J., Alan, T., Neild, A., 2016: "The importance of travelling wave components in standing surface acoustic wave (SSAW) systems", Lab on a Chip, 16(19), pp. 3756-3766

Ding, X., Li, P., Lin, S. S., Stratton, Z. S., Nama, N., Guo, F., Slotcavage, D., Mao, X., Shi, J., Costanzo, F., Huang, T. J., 2013: "Surface acoustic wave microfluidics", Lab on a Chip, 13(18), pp. 3626-3649

Ding, X., Peng, Z., Lin, S.-C., Geri, M., Li, S., Li, P., Chen, Y., Dao, M., Suresh, S., Huang, T. J., 2014: "Cell separation using tilted-angle acoustic waves", PNAS, 111(36), pp. 12992-12997

Kiebert, F., Wege, S., Massing, J., König, J., Cierpka, C., Weser, R., Schmidt, H., 2017: "3D measurement and simulation of surface acoustic wave driven fluid motion: a comparison", Lab on a Chip, 17(12), pp. 2104-2114

Nama, N., Barnkob, R., Mao, Z., Kähler, C. J., Costanzo, F., Huang, T. J., 2015: "Numerical study of acoustophoretic motion of particles in a PDMS microchannel driven by surface acoustic waves", Lab on a Chip, 15(12), pp. 2700-2709

Rossi, M., Kähler, C.J., 2014: "Optimization of astigmatic particle tracking velocimeters", Exp Fluids, 55(9), pp. 1-13

Sajeesh, P., Sen, A. K, 2014: "Particle separation and sorting in microfluidic devices: a review", Microuidics and Nanouidics, 17(1), pp. 1-52

Sehgal, P., Kirby, B. J., 2017: "Separation of 300 and 100 nm Particles in Fabry-Perot Acoustofluidic Resonators", Analytical Chemistry, 89(22), pp. 12192-12200

Settnes, M., Bruus, H., 2012: "Forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid", Phys. Rev. E, 85(1), 016327

Shekunov, B., Chattopadhyay, P., Tong, H. H. Y., Chow, A. H. L., 2007: "Particle size analysis in pharmaceutics: principles, methods and applications", Pharmaceutical research, 24(2), pp. 20-227

Westerweel, J., Scarano, F., 2005: "Universal outlier detection for PIV data", Exp Fluids, 39(1), pp. 1096-1100

Wu, M., Ozcelik, A., Rufo, J., Wang, Z., Fang, R., Huang, T. J., 2019: "Acoustofluidic separation of cells and particles", Microsystems and nanoengineering, 5(32), pp. 5-32