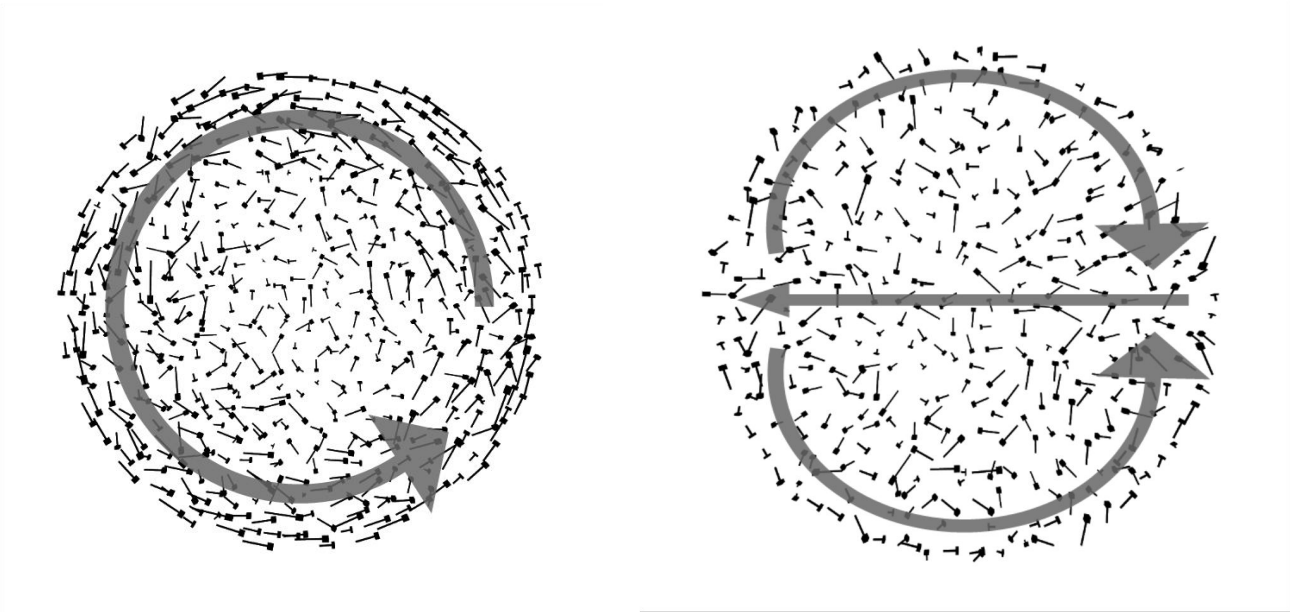
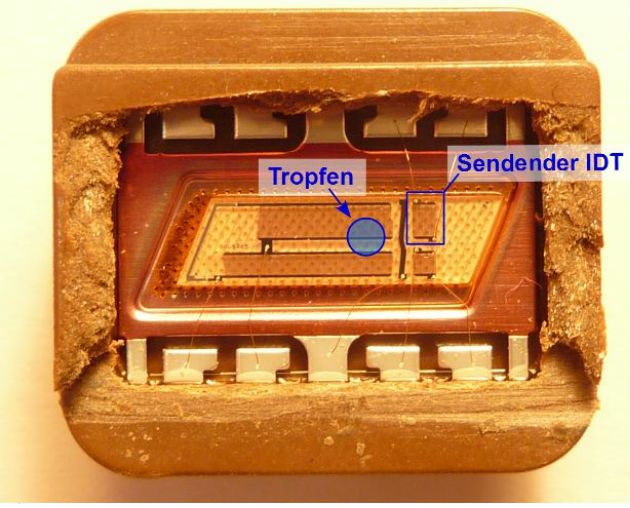
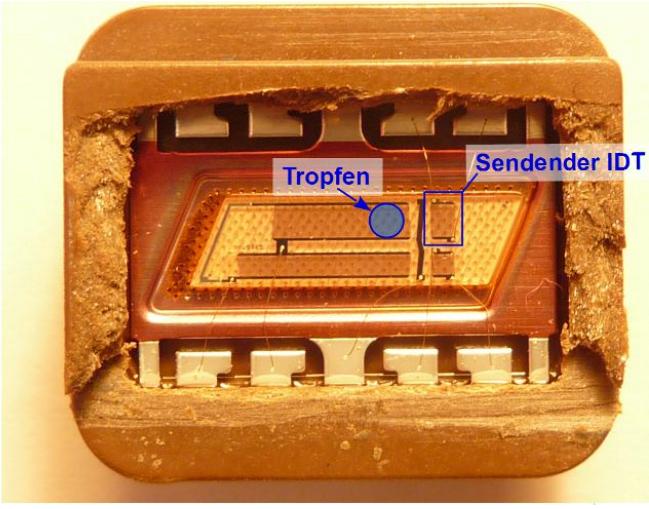
Akustische Mikrofluidik am Beispiel kleiner Tropfen







St. Michael-Gymnasium Bad Münstereifel

Adrian Lenkeit
Matthias Schäfers

Gliederung

1. Kurzfassung
2. Einleitung und Zielsetzung
3. Vorversuche
4. Theorie
5. Simulationen
   5.1. Simulation vom wellengesteuertem Bewegen von Tropfen und Festkörpern
   5.2. Simulation von Strömungen in einem Tropfen
6. Versuche mit einer Eigenkonstruktion
7. Experimentelle Untersuchung von Strömungen in Tropfen
8. Fazit und Ausblick
9. Link- und Literaturliste

1. Kurzfassung

In unserem Projekt beschäftigten wir uns mit der Entwicklung und dem Bau von Steuereinheiten in der Mikrofluidik. Die Mikrofluidik ist ein aktueller Forschungsbereich, der es erlaubt, komplette Laboratorien, sogenannte Labs-on-a-Chip im Miniaturbereich zu bauen. Damit werden Kosten minimiert und das Gefahrenpotential wird stark reduziert. Da im Mikrometerbereich keine herkömmlichen mechanischen Steuerelemente genutzt werden können, wird aktiv nach neuen Methoden zur Steuerung gesucht. Uns war es möglich, mithilfe von Computersimulationen Steuerelemente zum Erzeugen einer Strömung in Tropfen zu entwickeln und diese in einem Experiment funktionsfähig aufzubauen. Damit ist es uns möglich, Chemikalien zu mischen, sowie feste Bestandteile in einem Flüssigkeitstropfen im Zentrum des Tropfens zu konzentrieren. Zurzeit arbeiten wir daran, kleine Tropfen gezielt zu bewegen.

2. Einleitung und Zielsetzung

In vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden die Vorzüge eines Lab-on-a-Chip gepriesen. Ein Labor im Miniaturformat ermöglicht nicht nur eine große Platzersparnis, sondern auch eine immense Kostenersparnis bezüglich der eingesetzten Materialien sowie der entstehenden Kosten für die Entsorgung. Serienreife Lab-on-a-Chip-Einheiten sind bisher allerdings noch nicht auf dem Markt erhältlich. Die Herstellung solcher Minilabore stellt jedoch eine große technische Herausforderung dar, da die Gesetze aus der uns vertrauten Umwelt nicht einfach auf den Mikrokosmos übertragen werden können. Aufgrund des drastisch steigenden Oberflächen-Volumenverhältnisses treten hier starke elektrische Kräfte auf und die Viskosität von Flüssigkeiten nimmt deutlich zu. Aus diesem Grund sind kleine und trotzdem leistungsstarke Steuerungselemente notwendig. Piezoelektrisch erzeugte Oberflächenwellen sind hier nach unserer Meinung sehr erfolgversprechend. Aus diesem Grund beschäftigen wir uns in unserer Jugend forscht Arbeit mit dem Thema der „Akustischen Mikrofluidik am Beispiel kleiner Tropfen“. D.h., wir wollen Tropfen transportieren und Strömungen innerhalb von Tropfen erzeugen. Durch die Strömungen können Flüssigkeiten im Mikroliterbereich gemischt und Festkörper innerhalb von Tropfen konzentriert werden.

3. Vorversuch

In unserer Jugend forscht Arbeit von 2014 beschäftigen wir uns mit der Levitation von Kugeln in einem akustischen Stehwellenfeld (siehe Abb.3.1). Durch die an die Apparatur angepasste Veränderung des Ultraschallstehwellenfeldes, kann man den Abstand der einzelnen Styroporkugeln variieren. Je höher die Frequenz der Ultraschallwelle, desto kleiner sind diese Abstandsänderungen. Allerdings erfolgen diese Abstandsänderungen und damit auch die Bewegungen der Kugeln nur sprunghaft. Ein weiteres Problem besteht darin, dass mit abnehmender Größe des Aufbaus auch die benötigte Wellenlänge sinkt bzw. die Frequenz steigt und so ein Stehwellenfeld ab einem bestimmten Punkt nicht mehr mit Lautsprechern realisierbar ist. Aus diesem Grund suchten wir einen besseren Weg, um kleine Tropfen möglichst gleichmäßig zu bewegen. Außerdem mussten wir, wie in der Einleitung und Zielsetzung erwähnt, einen Weg finden, um gezielt bestimmte Strömungen innerhalb von Tropfen zu erzeugen.

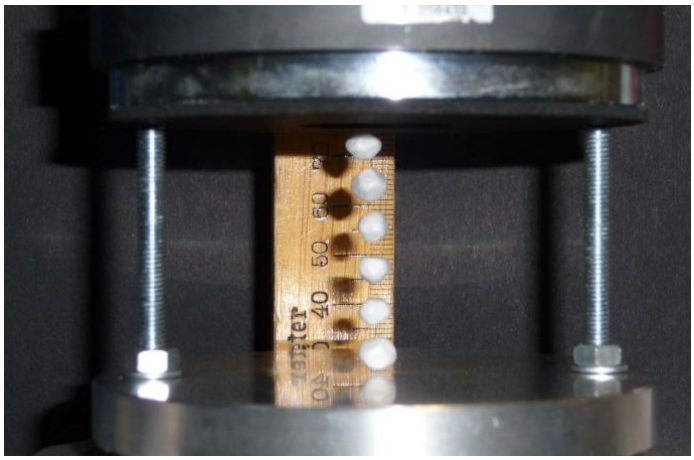


Abb. 3.1: Unsere levitierenden Kugeln im Ultraschallstehwellenfeld

4. Theorie

Für ein grundlegendes Verständnis von akustischen Wellen ist es wichtig, diese in Oberflächenwellen und Festkörperwellen einzuteilen. Eine Festkörperwelle kann wiederum aus einer Longitudinal- oder Transversalwelle aufgebaut sein. Longitudinal- und Transversalwellen unterscheiden sich in der Ausrichtung der Schwingrichtung relativ zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Während bei der Longitudinalwelle die Oszillatoren in Richtung der Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, schwingen die Oszillatoren der Transversalwelle senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Transversalwellen können zusätzlich, im Gegensatz zu Longitudinalwellen, in ihrer Schwingrichtung polarisiert werden. Deshalb unterscheidet man bei polarisierten Transversalwellen zwischen horizontalen und vertikalen Transversalwellen.
Oberflächenwellen bestehen aus einer Kombination von einer Longitudinalwelle und einer vertikalen Transversalwelle. Diese Kombination bezeichnet man als Rayleigh-Welle. Die Transversalwelle breitet sich dabei nur in einer dünnen Schicht auf der Oberfläche des Wellenmediums aus. Da sich Transversalwellen typischerweise langsamer ausbreiten als Longitudinalwellen, dringt die Transversalwelle nur langsam in das Wellenmedium ein.
Für unsere Untersuchungen ist die Wechselwirkung von Obeflächenwellen mit dem umgebenden Raum besonders wichtig. Da sie wie jede Welle gebrochen werden können, können sie beim Auftreffen auf einen Körper teilweise in den Körper gebrochen werden und geben so Energie ab. Ist die Energie der Oberflächenwelle hoch genug, kann sie den Körper entlang ihrer Ausbreitungsrichtung beschleunigen und so z.B. als Pumpe für Flüssigkeiten dienen. Falls der Körper ein Flüssigkeitstropfen ist, kann eine niedrig energetische Oberflächenwelle innerhalb des Tropfens verschiedene Strömungen erzeugen. Durch gezielte Anpassung der erzeugten Strömung kann so ein Tropfen zum Mischen von Chemikalien umfunktioniert werden.

Durch die gezielte Überlagerung von zwei gegenläufigen Oberflächenwellen ist es möglich, eine stehende Welle zu erzeugen. Diese besitzt im Unterschied zu normalen Wellen sogenannte Knotenpunkte, an denen keine Bewegung der Oszillatoren stattfindet und Bäuche, an denen die Bewegung der Oszillatoren maximal ist. Die Knotenpunkte haben festgelegte Positionen, d.h. sie verändern sich im Laufe der Zeit nicht, daher auch die Bezeichnung „Stehende Welle“. Dadurch hat eine stehende Welle auch andere Eigenschaften im Bezug auf die Wechselwirkung mit anderen Körpern. Körper, die sich in Wechselwirkung mit einem Stehwellenfeld befinden spüren eine Kraft, die sie zu den Knotenpunkten der stehenden Welle treibt und dort auch hält. Manipuliert man gezielt die Position der Knotenpunkte durch eine Phasen- oder Frequenzverschiebung der stehenden Welle, so verändern sich die Positionen der Knotenpunkte. Die Körper reagieren darauf, indem sie sich zusammen mit dem Knotenpunkt bewegen. Durch ein gezieltes Bewegen der Knotenpunkte wird dadurch auch ein gezieltes Bewegen der Körper möglich.
Für unsere Experimente benötigen wir wegen ihren besonderen Eigenschaften Oberflächenwellen. Jedoch stellte sich uns das Problem, wie man diese gezielt erzeugen kann. Dadurch sind wir auf die Piezoelektronik gestoßen. Die Piezoelektronik basiert auf kristallinen Materialien, die aufgrund ihrer besonderen Struktur als elektromechanische Wandler dienen. Wird ein Piezoelement mechanisch verformt, bildet sich im piezoelektrischen Material ein Dipol aus, von dem sich eine Spannung abnehmen lässt. Dies lässt sich jedoch auch umkehren, sodass durch das Anlegen einer Spannung das Piezoelement mechanisch verformt wird.
Um eine Oberflächenwelle auf einem Piezoelement zu erzeugen, muss man auf das Piezoelement eine Interdigitalstruktur, kurz IDT, aufbringen. Diese besteht aus zwei kammartigen Metallstrukturen, die ohne sich zu berühren ineinander greifen. Legt man an diese eine Wechselspannung an, so erzeugt die Struktur Oberflächenwellen. Die ideale Wellenlänge ist dabei der Abstand zwischen zwei gleich polarisierten Fingern. Wird genau diese Frequenz angelegt, so wird die Oberflächenwelle durch die einzelnen Finger verstärkt. Da die Interdigitalstruktur keine punktförmige Quelle ist, sondern eine Breite hat, so besitzt die erzeugte Oberflächenwelle eine besondere Eigenschaft. Direkt nach dem Erzeugen breitet sie sich im sogenannten Fresnel-Bereich wie eine Gerade aus. Erst im darauf folgenden Fraunhofer-Bereich breitet sie sich wieder punktförmig aus. Für uns interessant ist der Fresnel-Bereich, da wir dort die meiste Kontrolle haben.
Piezokristalle können unterschiedlich geschnitten werden, wodurch sich die Eingenschaften des Piezoelements ändern. Wir benötigen einen Schnitt der uns erlaubt, entlang zweier Achsen Oberflächenwellen zu erzeugen, was uns die Möglichkeit gibt, ein zweidimensionales Stehwellenfeld zu erzeugen. Der Schnitt, der uns dies ermöglicht ist der 128° Y-Cut.

5. Simulationen

5.1 Simulation vom wellengesteuertem Bewegen von Tropfen und Festkörpern

Um unser theoretisches Wissen zu prüfen, uns gut auf die Experimente vorzubereiten und vor allem, um eine physikalische Erklärung für die auftretenden Phänomene zu finden, wollten wir einige unserer Versuche am Computer modellieren und simulieren. Das Verfahren der Computersimulation bietet uns enorme Vorteile gegenüber den Experimenten, da wir in den Simulationen das Verhalten einzelner Teilchen beeinflussen und analysieren können, um daraus Rückschlüsse zu den Wirkungsweisen zu ziehen. Es gibt viele verschiedene Arten von Computersimulationen, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile haben. Wir benötigen eine Simulationsart, die es uns erlaubt, verschiedene Arten von Flüssigkeiten gleichzeitig zu simulieren, ein Wellenfeld anzulegen und die

Reaktion der Flüssigkeit darauf zu beobachten sowie bei Bedarf Festkörper hinzuzufügen. Für unsere Anforderungen eignen sich Vielteilchensimulationen am besten. Diese haben den Vorteil, dass die Simulation aus einer Vielzahl von Teilchen, also z.B. aus vielen Atomen oder Molekülen aufgebaut wird und deren Wechselwirkung miteinander simuliert wird. Dabei ist es möglich die Eigenschaften der einzelnen Teilchen zu verändern und so zu jeder Zeit die Position und Geschwindigkeit der Teilchen gemessen werden kann. Damit ist es möglich das Verhalten aus der echten Welt genauer zu erklären, als es durch Experimente möglich ist, solange nur die wechselwirkenden Kräfte der Teilchen untereinander bekannt sind. Als Nachteil ergibt sich jedoch, dass die Vielteilchensimulationen viel Rechenleistung benötigen und damit also auch lange Rechenzeiten haben. Um das Problem der hohen Rechenleistung zu umgehen, benutzten wir deshalb nicht wie üblicherweise die CPU zur Berechnung der Simulation, sondern die GPU, also die Grafikkarte. Die einzelnen Prozessoren der Grafikkarte sind zwar langsamer getaktet als ein Prozessor der CPU, dafür besitzt die Grafikkarte jedoch mehrere tausende Prozessoren und kann damit bei richtiger Anwendung viele normalerweise langsame Rechenvorgänge stark beschleunigen. Dies ist auch mit den Vielteilchensimulationen möglich und würde uns damit die Anfertigung von komplizierten Vielteilchensimulationen erlauben.
Um jedoch eine Vielteilchensimulation zu berechnen, brauchen wir ein Computerprogramm, das diese auf der Grafikkarte simulieren kann. Es existieren jedoch keine Simulationsprogramme, welche diese Art von Simulation eingebaut haben, weshalb uns als einzigste Möglichkeit blieb, selber ein entsprechendes Programm zu schreiben. Da wir die Grafikkarte ansteuern müssen, ist dies mit viel Aufwand verbunden. In der Programmiersprache C++ mithilfe von CUDA zur Ansteuerung der Grafikkarte war es uns dennoch möglich, ein entsprechendes Programm zu schreiben. Dieses gibt uns die Möglichkeit, beliebig viele Teilchen in einen Raum einzufügen, ihnen bestimmte Eigenschaften zu geben und die Wechselwirkung der Teilchen untereinander festzulegen. Die Simulation kann während der Berechnung mittels einer grafischen Ausgabe live mitverfolgt und aufgezeichnet werden.

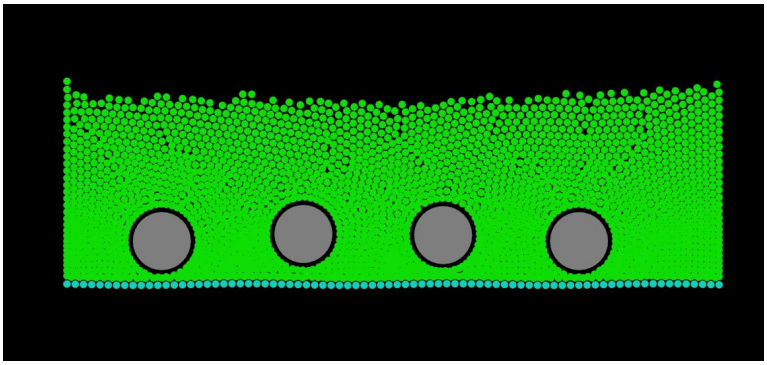


Abb. 5.1: Festkörper am Start der Simulation gleichmäßig verteilt

Als erste Simulation wollten wir das Verhalten von Festkörpern in einem flüssigen Medium bei einer angelegten Welle simulieren. Nach unserer Theorie sollte die Welle, wenn sie stark genug ist, den Festkörper entlang ihrer Ausbreitungsrichtung beschleunigen. Wenn dies funktioniert, können wir durch die Simulation aber auch erkennen, warum der Festkörper sich bewegt, also wie die Energieübertragung zwischen der Welle und dem Festkörper funktioniert. Die Welle wird in der Simulation durch eine Schicht von Teilchen dargestellt, die

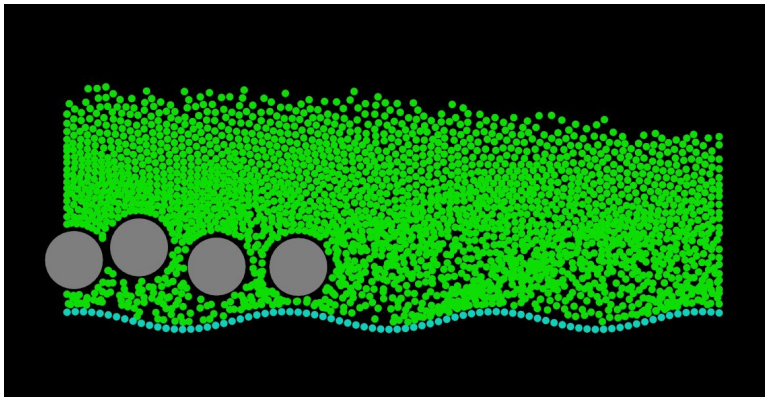


Abb. 5.2: Die Festkörper werden durch die von rechts nach links verlaufende Oberflächenwelle nach längerer Zeit an den linken Rand des Piezoelements bewegt.

die Oberfläche unseres Piezoelements darstellen sollen. Mithilfe der einfachen Wellengleichung $y_1 = y_0 \sin(kx + t\omega)$ simulieren wir auf der Oberfläche eine Sinuswelle mit einer nach links gerichteten Ausbreitungsrichtung. Auf die Oberfläche geben wir ein flüssiges Medium, welches die Wechselwirkung mit der Welle sichtbar macht. In das flüssige Medium werden dann mehrere Festkörper gegeben (Abb. 5.1). Die Festkörper sollten dann bis zum linken Rand des Mediums transportiert werden. Nach dem Start der Simulation war direkt ein interessanter Effekt zu beobachten. Die Oberflächenwelle gab einen Teil ihrer Energie in die Flüssigkeit ab, indem sie in der Flüssigkeit eine Longitudinalwelle erzeugte. Diese breitete sich jedoch in einen Winkel zu der Oberflächenwelle aus. Die Oberflächenwelle wurde also teilweise in die Flüssigkeit hinein gebrochen. Beschreiben lässt sich der Brechungswinkel mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz $\theta = \arcsin(c_l / c_s)$, wobei c_l und c_s die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit und dem Festkörper darstellen. Dieser Prozess geschieht auch mit den Festkörpern, wobei diese aber nicht nur Energie von der Piezooberfläche abgreifen, sondern zusätzlich Energie aus den Longitudinalwellen der Flüssigkeit entnehmen können. Die Flüssigkeit verstärkt so zusätzlich die auf die Festkörper wirkende Kraft. Das Ganze führt dazu, dass sich die Festkörper mit der Welle bewegen (Abb. 5.2). Diese Simulation haben wir zum Überprüfen der Theorie mit einigen Veränderungen wiederholt. Die Festkörper haben wir durch einen Wassertropfen (Abb. 5.3) ersetzt und das vorher umgebende flüssige Medium entfernt, sowie die Ausbreitungsrichtung der Welle geändert. Auch hier war zu beobachten, dass der Wassertropfen entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle bewegt wird (Abb. 5.4). Unsere Theorie wird hier also durch die Simulation bestätigt und ergänzt (Abb. 5.5).

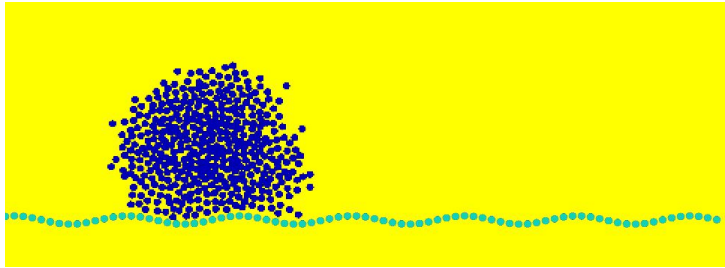


Abb. 5.3: Wassertropfen am Start der Simulation am linken Rand des Piezoelements

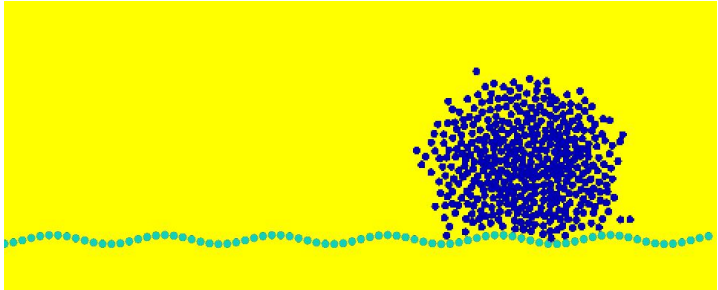


Abb. 5.4: Wassertropfen nach einiger Zeit am rechten Rand des Piezoelements

Als nächstes wollten wir die Interaktion von Festkörpern in einem Stehwellenfeld simulieren. Dazu wenden wir auf die Oberfläche des simulierten Piezoelements die Wellengleichung für stehende Wellen $y_1 = y_0 2 \sin(kx) \cos(t\omega)$ an.

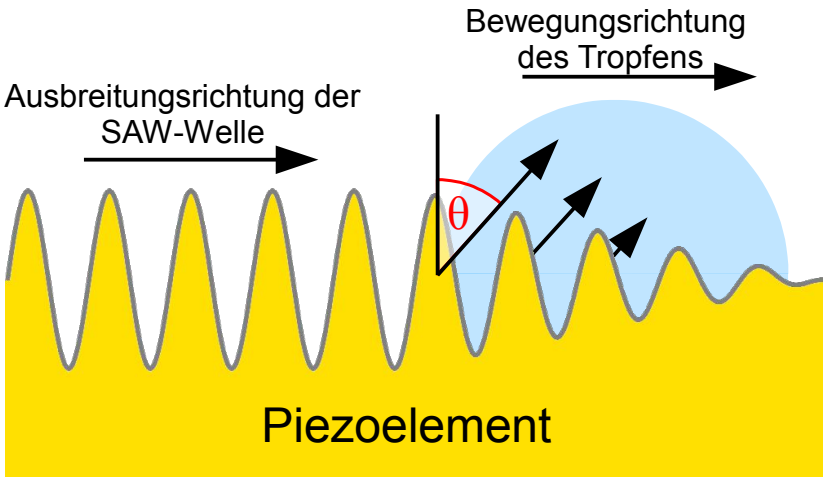


Abb. 5.5: Schemazeichnung der Bewegung des Tropfens

Auf die Oberfläche geben wir wieder eine Flüssigkeit und mehrere Festkörper (Abb. 5.6). Nach unser Theorie müssten die Festkörper zu den Knotenpunkten der stehenden Welle wandern. Über einen längeren Zeitraum der Simulation ist dieses Verhalten auch sichtbar geworden (Abb. 5.7). Interessant ist aber auch hier wieder, wodurch sich die Bewegung der Festkörper erklären lässt. Auch hier gibt die stehende Welle ihre Energie zum Teil wieder an die Flüssigkeit ab. Sie erzeugt damit in der Flüssigkeit Longitudinalwellen, die sich kreisförmig vom Ursprung entfernen. Damit wird an den Bäuchen der stehenden Welle in der Flüssigkeit ein sogenannter Schallstrahlungsdruck erzeugt.

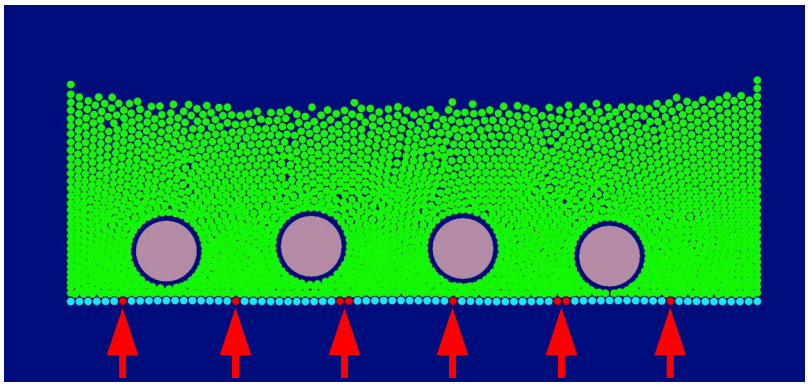


Abb. 5.6: Simulation des Stehwellenfeldes zum Beginn, die Festkörper sind zufällig positioniert. Die Roten Pfeile markieren die Knotenpunkte

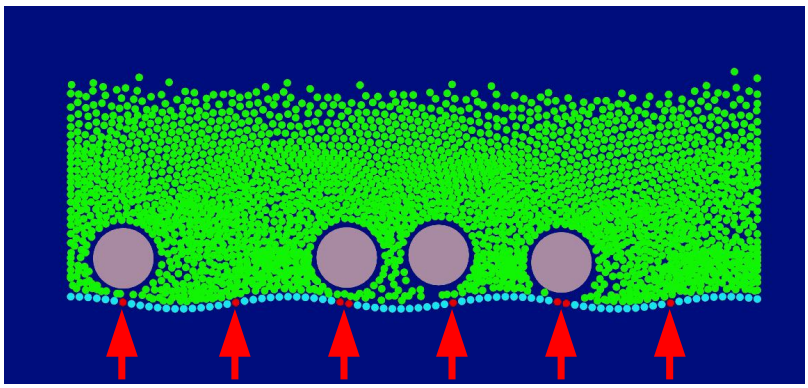


Abb. 5.7: Simulation des Stehwellenfeldes, nachdem die Festkörper zu den Knotenpunkten getrieben wurden

Der Schallstrahlungsdruck ist ein Phänomen, welches bei flüssigen und gasförmigen Wellenmedien auftritt, die mit einer hochfrequenten Longitudinalwelle durchsetzt sind. Die Longitudinalwelle bringt die Teilchen des Mediums zum oszillieren. Dabei werden die Teilchen entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle periodisch nach vorne geschoben, fließen jedoch wieder zur Ursprungsposition zurück. Bei sehr hohen Oszillationsfrequenz jedoch können die Teilchen nicht schnell genug zurückfließen, weshalb seitliche Teilchen den freien Platz einnehmen. Dadurch werden die von der Welle betroffenen Teilchen entlang der Ausbreitungsrichtung dauerhaft verschoben. Die Welle erzeugt so einen vom Ursprung weggerichteten Druck, der auf umliegende Körper wirken kann. Da an den Knotenpunkten der stehenden Welle kein Schallstrahlungsdruck entsteht, wirkt auf die Körper eine Kraft, welche die Körper zu den Knotenpunkten treibt. Die Kraft, mit der der Schallstrahlungsdruck auf einen Körper einwirkt, wird beschrieben mit $F = \frac{2\alpha I}{c}$, wobei α den Absorptionskoeffizienten darstellt, I die Intensität der Welle, c die Schallgeschwindigkeit im Wellenmedium und F die Stärke der resultierenden Kraft. Die Formel zeigt indirekt auch, dass der Schallstrahlungsdruck mit steigender Frequenz abnimmt. Dies liegt daran, dass der Absorptionskoeffizient sowie die Intensität mit steigenden Frequenzen sinken, bzw. hochfrequente Wellen schneller absorbiert werden und hohe Intensitäten bei hohen Frequenzen schwer zu erzeugen sind. Dieser Effekt hat jedoch nur insignifikante Auswirkungen bei den typischen, zur Ansteuerung von Piezoelementen verwendeten Frequenzen.

5.2. Simulation von Strömungen in einem Tropfen

Bisher simulierten wir nur die Auswirkungen von Oberflächenwellen auf die Bewegung ganzer Tropfen und Festkörper. Wie von uns jedoch theoretisiert, sollten Oberflächenwellen, die zu schwach zum Bewegen eines Tropfens sind, trotzdem innerhalb des Tropfens verschiedene Strömungen verursachen, welche für die Mikrofluidik nutzbar sind. Deshalb wollten wir auch diese auftretenden Strömungen simulieren, um ihre Wirkung auf den Tropfen besser zu verstehen und effizienter nutzen zu können. Da uns schon durch die voranschreitenden Simulationen die Kräfte, die eine Oberflächenwelle auf einen Tropfen einwirkten, bekannt waren, konnten wir das Simulieren der Oberfläche des Piezoelements in diesen Simulationen wegfallen lassen, ohne an Genauigkeit zu verlieren. Den Tropfen selber stellten wir in der Simulation durch einen Raum gefüllt mit einer Flüssigkeit dar, dessen Form der eines Tropfens auf der Oberfläche des Piezoelements entsprach. Die Kraft, die durch die Simulation einer Oberflächenwelle auf die einzelnen Teilchen des Tropfens wirken würde, wird vorher berechnet und an den entsprechenden Stellen im Tropfen angelegt. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Simulationen, wurde diese Simulation in drei Dimensionen berechnet, um auch sehr komplexe Strömungen simulieren zu können. In der Simulation beziehen wir auch die Lage des Tropfens relativ zum IDT (Interdigital Transducer) mit ein, da wir unterschiedliche Strömungsmuster aufgrund der Lage des Tropfens vermuten.

Als ersten Fall simulierten wir die Situation, dass ein Wassertropfen nur zur Hälfte von einer Oberflächenwelle

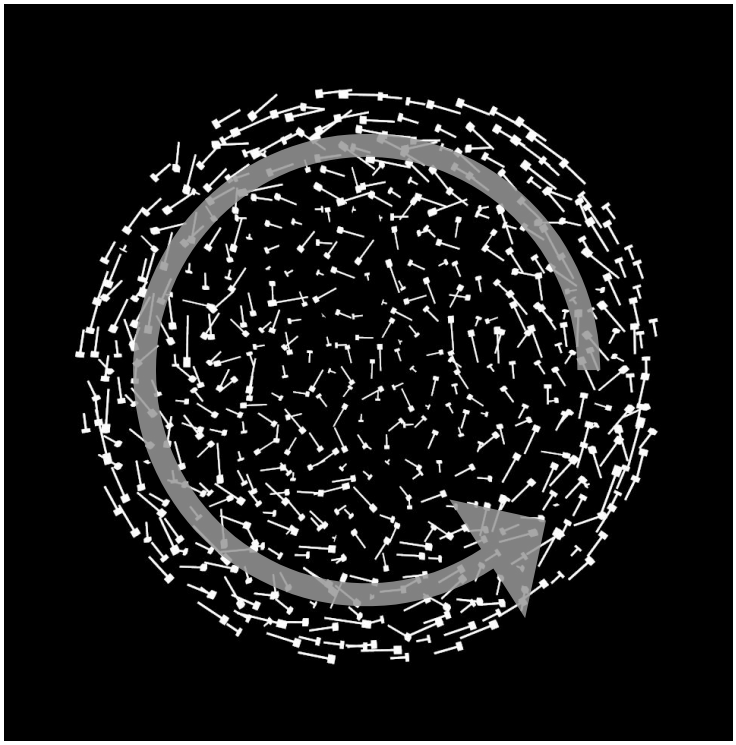


Abb. 5.8: Kreisförmige Strömung in einem Tropfen in der Aufsicht von oben.Darstellung der Bewegungsrichtung einzelner Teilchen durch einzelne Pfeile, wobei das dicke Ende die Spitze darstellt.

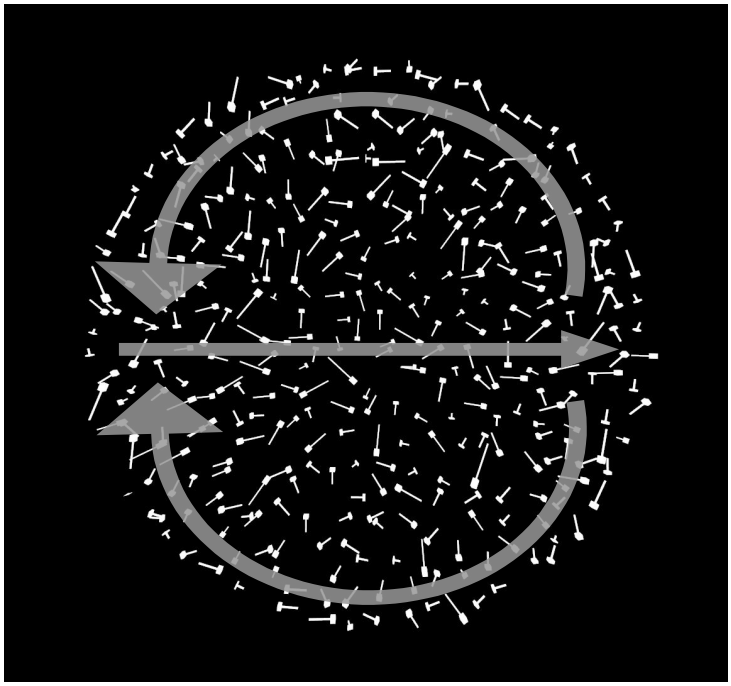


Abb. 5.9: Eine rechtsgerichtete Zentralströmung

getroffen wird. Nach unserer Theorie sollte im Tropfen eine kreisförmige Strömung entstehen. Nach einiger Zeit wies die Simulation auch eine kreisförmige Strömung auf (Abb. 5.8). Es zeigten sich dabei aber auch einige interessante Nebeneffekte, die einen großen Nutzen für die Mikrofluidik haben. Die Simulation zeigt auf, dass im Tropfen Druckunterschiede herrschen. In diesem Fall steigt der Druck, also die Dichte der Teilchen, mit der Entfernung zur Mitte des Tropfens an. Außerdem konzentriert sich die Strömung nur auf einen Ring am Rand des Tropfens, während in der Mitte des Tropfens keine klaren Strömungen auftreten. Dadurch ergibt sich, dass bei einer Zugabe von Festkörpern in den Tropfen sich diese in der Mitte des Tropfens sammeln sollten. Dies bewirkt das in Richtung der Mitte des Tropfens herrschende Druckgefälle, welches die Festkörper in die Mitte drückt, sowie die Differenz zwischen den Strömungsgeschwindigkeit der Mitte des Tropfens und dem Rand des Tropfens, welche auf die Festkörper zur Mitte gerichtete Scherkräfte einwirkt. Damit wäre diese Art von Strömung ideal zur Konzentration von festen Bestandteilen geeignet.
Die zweite Simulation bestand darin, einen Tropfen zu simulieren, der auf der gesamten Breite von einer Oberflächenwelle getroffen wird. Hier muss eine komplexere Strömung auftreten, da im Tropfen zwei ringförmige Strömungen aufeinander prallen. Nach einiger Zeit zeigte sich in der Simulation, dass sich eine zentrale Strömung ausbildete, die beim Auftreffen auf den Rand des Tropfens sich in zwei Teilströmungen aufspaltet. Die Teilströmungen fließen dann am Rand des Tropfens entlang zurück zur Zentralströmung (Abb. 5.9). Durch die Vereinigung von zwei Teilströmungen aus unterschiedlichen Regionen des Tropfens ist es uns mit dieser Strömungsart dann möglich, mehrere Flüssigkeiten zu mischen.

6. Versuche mit einer Eigenkonstruktion

Als erstes Experiment wollten wir ein Stehwellenfeld erzeugen, um Tropfen genauestens bewegen zu können. Dies ist jedoch mit viel Aufwand verbunden, da wir auf ein Piezoelement ein bestimmtes Leiterbahnenmuster aufbringen müssen, welches uns das Erzeugen eines Stehwellenfeldes überhaupt erst erlaubt. Dieses Muster würde aus zwei gegenüberliegenden IDTs bestehen, die getrennt von einander gesteuert werden können. Freundlicherweise konnte uns die Firma Johnson Matthew mit Piezoelementen bestücken, weshalb wir uns auf das Aufbringen des IDT-Musters konzentrieren konnten.
Das genaue Aufbringen des Musters ist sehr wichtig, da der Abstand zwischen den IDTs ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein muss und die Finger untereinander immer den selben Abstand haben müssen. Abweichungen lassen sich später nur schwer korrigieren, weshalb Präzision wichtig ist. Da die Piezoelemente schon mit einer Goldschicht vorbeschichtet waren, war unsere erste Idee, die Goldschicht maschinell an bestimmten Stellen durch Anlegen von einer Spannung verdampfen zu lassen. Dies funktioniert, da die Goldschicht eine sehr geringe Dicke

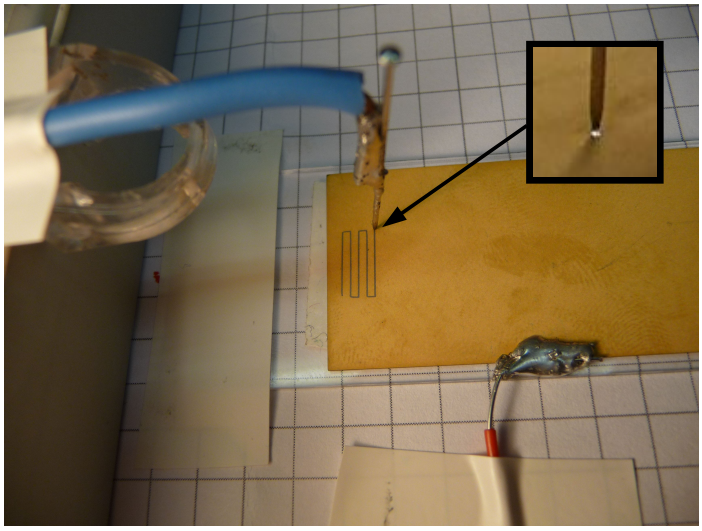


Abb. 6.1: Herstellung eines Piezoelements mittels eines Plotters

hat. Dazu haben wir einen Funktionsplotter an einen Arduino angeschlossen und den Arduino so programmiert, sodass der Funktionsplotter das benötigte IDT-Muster abfährt. An den Funktionsplotter haben wir dann eine Nadel angebracht, deren Spitze zum Verdampfen der Goldschicht dient. Damit war es uns möglich, das IDT-Muster auf ein Piezoelement (Abb. 6.1) zu übertragen. Leider stellte sich jedoch heraus, dass dieser Prozess uns nicht genug Kontrolle erlaubt, weshalb der hergestellte Piezo nicht für unsere Versuche geeignet war.
Ein Wechsel der Technik war notwendig. Dazu orientierten wir uns an einem viel genaueren Verfahren zur Herstellung von Leiterbahnen, der Fotolithographie, welche auch in der Halbleitertechnik intensiv genutzt wird und damit gut verstanden ist. Dazu wird auf das zu beschichtende Objekt zuerst eine Metallschicht abgeschieden, welche später die Leiterbahnen bildet. Auf diese Schicht wird zusätzlich entweder positiver oder negativer Fotolack aufgetragen. Im nächsten Schritt, der Belichtung, wird mithilfe einer Belichtungsmaske UV-Licht auf den Fotolack gestrahlt. Die Belichtungsmaske absorbiert dabei an bestimmten Stellen das UV-Licht und verhindert so, dass der Fotolack bestrahlt wird. Wird der Fotolack jedoch von UV-Licht getroffen, verändert sich seine chemische Struktur. Die Art des Fotolacks entscheidet dabei, wie sie sich verändert. Positiver Fotolack wird an den belichteten Stellen weich, unbelichtete Stellen bleiben jedoch hart. Negativer Fotolack hingegen ist ursprünglich weich und wird erst durch den Prozess des Belichtens gehärtet. Wird nun eine Entwicklerlösung hinzugegeben, greift dieser den Fotolack an den weichen Stellen an und löst in auf. Die Belichtungsmaske wird so auf den Fotolack übertragen, wodurch Teile der Metallschicht freigesetzt werden. Diese können dann mit einem Ätzmittel entfernt werden. Nach anschließender Entfernung des Fotolacks wird die Belichtungsmaske in Form von Leiterbahnen in der Metallschicht sichtbar.

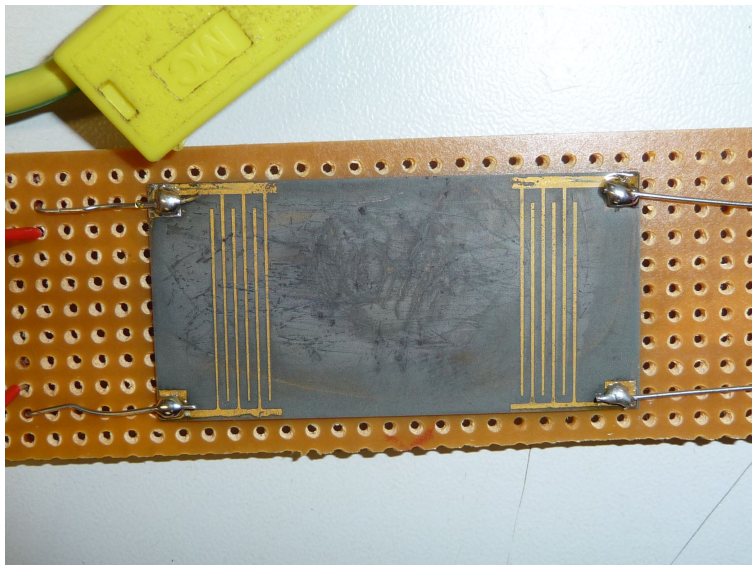


Abb. 6.2: Durch Fotolithographie hergestelltes Layout

Dieser Prozess funktioniert bei Leiterbahnen mit einer Größe von mehreren Millimetern gut, bei kleineren Leiterbahnen ist er jedoch ohne spezielles Equipment schwer umzusetzen. Dies stellte sich uns als Problem im Weg, da für unsere Experimente dünne Leiterbahnen notwendig sind. Außerdem war es für uns nicht möglich, die schon auf unseren Piezoelementen vorhandene Goldschicht mithilfe einer Ätzlösung zu entfernen. Nach mehreren Tests stellte sich jedoch heraus, dass sich die Schicht durch Zugabe von hoch konzentriertem Sauerstoff vollständig ablöst. Mithilfe der Elektrolyse von Wasser ist es uns dann möglich gewesen, reinen Sauerstoff direkt an der Goldschicht entstehen zu lassen. Die Stellen der Goldschicht, die vom Fotolack abgedeckt wurden, konnten jedoch mit dem Sauerstoff nicht in Kontakt treten, wodurch der Fotolack dort ein Ablösen der Schicht verhinderte. Da diese Methode zum Entfernen der Goldschicht jedoch sehr aggressiv war, erschwerte dies weiter den Herstellungsprozess. Nach mehreren Versuchen mithilfe vom gezielten Verändern der Belichtungszeit gelang uns jedoch die Herstellung eines mit zwei IDTs beschichteten Piezoelements (Abb. 6.2).
Durch Anlegen einer Wechselspannung an die IDTs sollten Oberflächenwellen erzeugt werden und ein Stehwellenfeld bilden. Um zuerst aber die Funktionalität der beiden IDTs zu prüfen, haben wir

eine Wechselspannung mit einer Frequenz im hörbaren Bereich angelegt. Beide IDTs produzierten einen Ton mit der gleichen Lautstärke und sollten dann auch in der Lage sein, ein Stehwellenfeld zu erzeugen. Dafür gaben wir einen Tropfen Wasser umgeben von Öl auf den Piezo. Sollte ein Stehwellenfeld entstehen, so sollte der im Öl befindliche Wassertropfen zu den Knotenpunkten des Feldes wandern. Dies war jedoch auch nach mehreren Tests leider nicht zu beobachten. Ein kompletter Durchlauf des Frequenzspektrums, auf das der Tropfen reagieren sollte, resultierte in keiner Bewegung. Auch die Steuerspannung des Piezoelements von ±20 Volt sollte vollkommen ausreichen, um zumindest eine Strömung zu erzeugen. Deswegen vermuten wir hier den Fehler an einer anderen Stelle, die wir nur schwer beeinflussen können. Das Material, aus dem unser Piezoelement besteht, ist eine Piezokeramik. Diese haben zwar eine gute piezoelektrische Kopplungskonstante bzw. einen guten Wirkungsgrad, wie wir jedoch herausfanden, können sie aufgrund ihres mikroskopischen Aufbaus nur schlecht Wellen übertragen. Piezokristalle haben im Gegensatz zu Piezokeramiken nicht dieses Problem.

Nach einiger Recherche beschlossen wir Lithiumniobat ($LiNbO_3$) Wafer zu kaufen. Lithiumniobat Wafer mit einem 128° Y-Cut würden uns mit dem richtigen Layout erlauben, ein zweidimensionales Stehwellenfeld zu erzeugen. Obwohl sie nur eine Kopplungskonstante von 0,055 bzw. 5,5% besitzen, kann man sie mit vergleichsweise hohen Spannungen betreiben um dies auszugleichen. Sie sind durch den häufigen Gebrauch in der Industrie auch zu akzeptablen Preisen für uns verfügbar.

Unser erstes Problem bestand jedoch schon darin, dass die Wafer nicht beschichtet waren. Um jedoch mithilfe der Fotolithographie unsere IDT-Struktur auf den Wafer zu übertragen, muss auf dem Wafer eine Metallschicht vorhanden sein. Da die Wafer erst kurz vor dem Landeswettbewerb bei uns eintrafen, war es für uns nicht möglich, die Wafer industriell verarbeiten zu lassen. Deshalb testeten wir einige Alternativen aus. Um eine Metallschicht auf den Wafer aufzubringen wollten wir zuerst mithilfe von Leitsilber bzw. Kupferspray den Wafer kontaktieren. Dies funktionierte auch, jedoch war es uns nicht möglich, mithilfe der Fotolithographie das benötigte Layout zu erzeugen, da sich das Leitsilber nicht ätzen lies und sich das Kupferspray beim Auftragen des positiven Fotolackes ablöste. Deshalb hatten wir die Idee, das Metall Indium, welches einen sehr geringen Schmelzpunkt von ca. 156°C hat und gut an glasartigen Oberflächen, also auch an unseren Wafern, haftet, auf die Wafer aufzuschmelzen. Durch vorherige Tests auf Objektträgern hat sich herausgestellt, dass sich bei Temperaturen von ca. 300°C sehr dünne Indiumschichten auftragen lassen, die sehr gut geätzt werden können. Als wir versuchten, das Indium auf einem unserer Wafer aufzutragen, heizten wir den Wafer jedoch zu schnell auf, wodurch der pyroelektrische Effekt starke statische Ladungen im Wafer erzeugte und damit durch den piezoelektrischen Effekt auch sehr starke mechanische Spannungen

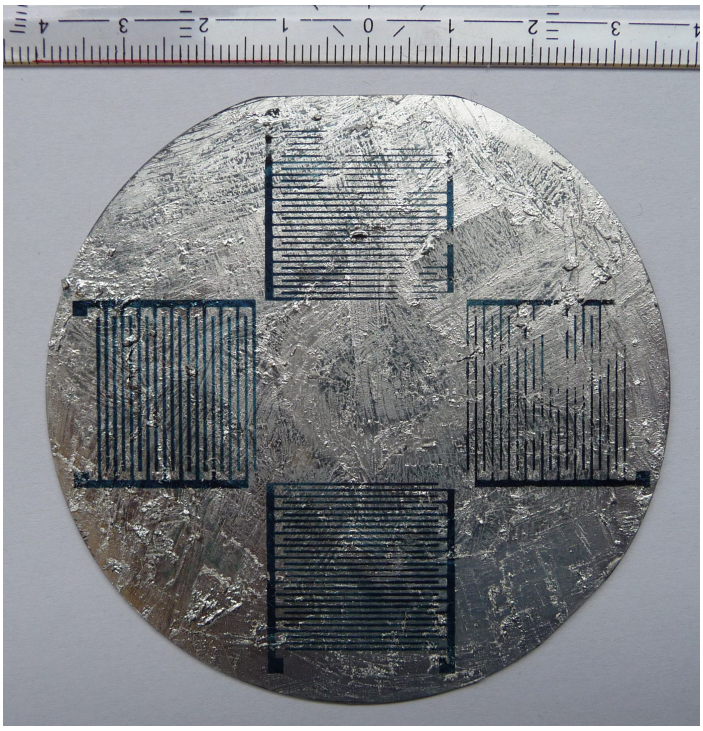


Abb. 6.3: Mit Indium beschichteter und schon entwickelter Wafer

hervorrief, die letztendlich zum Reißen des Piezos führten. Um dies zu verhindern, erhöhten wir die Dauer des Aufheizens und Abkühlens und schirmten den Wafer vor der kalten Umgebungsluft ab. Zusätzlich reduzierten wir die Zieltemperatur auf 200°C. Dies hatte zur Folge, dass wir den Wafer zwar ohne Schäden mit Indium beschichten konnten, durch die niedrigere Temperatur wurde die Indiumschicht aber auch dicker und klumpte an einigen Stellen leicht zusammen. Das Belichten und Ätzten wurde uns damit erschwert, weshalb es uns nur möglich war, einen einzigen vollständigen IDT, mit einer noch relativ großen Wellenlänge von 2 mm, auf den Piezo aufzubringen (Abb. 6.3).
Leider war es uns nicht möglich, mit diesem IDT Strömungen innerhalb eines Tropfens anzuregen oder einen Tropfen zu bewegen. Unser Problem, was sich nur mit professioneller Hilfe lösen lässt, liegt darin, dass unsere IDT Struktur eine relativ hohe Wellenlänge besitzt. Wie jedoch im folgenden Kapitel noch festgestellt wird, benötigen wir IDT Strukturen mit viel kleineren Wellenlängen, die wir selber nicht herstellen können, da uns das Produzieren einer so kleinen Maske leider nicht möglich ist. Deshalb werden wir versuchen, unsere Wafer professionell mit einem Layout versehen, mit dem uns das gezielte Bewegen von Tröpfen möglich wird. Wir planen, bis zum Bundeswettbewerb schon einige Experimente mit den beschichteten Wafern durchgeführt zu haben, von denen wir vor Ort genauer berichten werden.

7. Experimentelle Untersuchung von Strömungen in Tropfen

Da unsere selbst hergestellten SSAW-Einheiten (SSAW für **S**tanding **S**urface **A**coustic **W**ave) leider noch nicht wie erhofft funktionierten, standen wir vor einem großen Problem. Während einer Internetrecherche stießen wir jedoch auf preiswerte Oberflächenwellenfilter (kurz OFW, siehe Abb. 7.1), welche ebenfalls auf dem piezoelektrischem Effekt basierend dazu benutzt werden, um

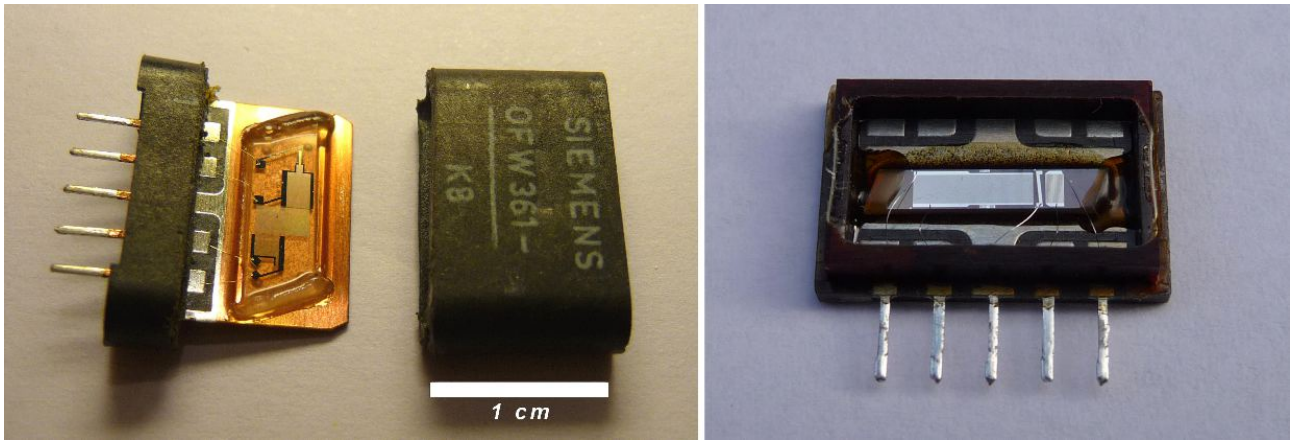


Abb. 7.1: Zwei aufgeschnittene OFWs mit unterschiedlichem Layout

mechanisch bestimmte Frequenzen zu filtern. Zum Einsatz kommen sie z.B. in Schaltkreisen von Mobiltelefonen und Fernsehgeräten, wo sie mit dafür genutzt werden um Daten über WLAN oder Mobilfunknetze zu übertragen. Genau wie bei unseren SSAW-Einheiten befinden sich auch hier IDTs auf dem Piezokristall (siehe Abb. 7.2) mit denen ebenfalls Oberflächenwellen durch das Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung erzeugt werden können.

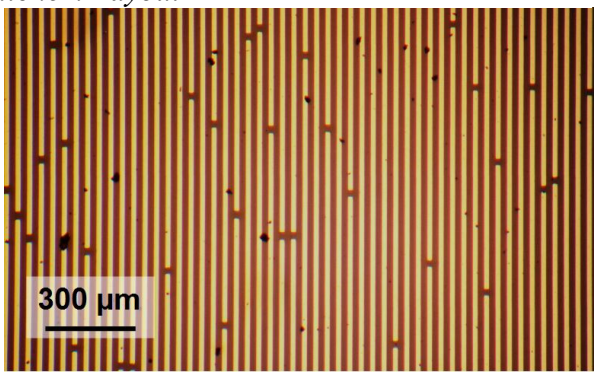


Abb. 7.2: Nahaufnahme eines IDTs auf einem OFW

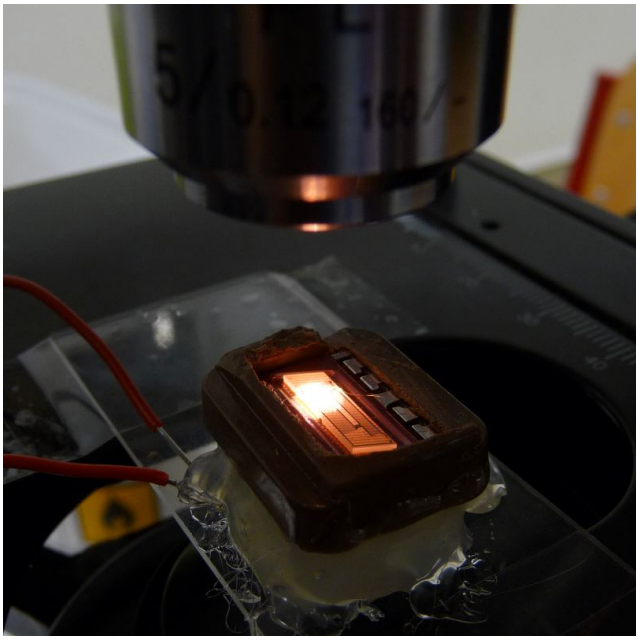


Abb. 7.3: Ein OFW unter dem Auflichtmikroskop

Anfangs führten wir Versuche mit kleinen, in entionisiertem Wasser schwebenden Öltröpfchen durch, was jedoch nicht besonders gut funktionierte, da sich das leichtere Öl nach einiger Zeit als dünnen Film auf die Oberfläche des Wassers legte. Danach experimentierten wir mit einem Gemisch aus Wasser und Latexkugeln mit einem Durchmesser von ca. 1µm. Durch die Latexkugeln erhofften wir uns, die Bewegungen des Wassers innerhalb des Tropfens, den wir direkt auf den OFW legten, besser analysieren zu können. Leider waren die kleinen Latexkugeln unter unserem Auflicht-mikroskop nicht zu sehen. Auch der Versuch den Tropfen von der Seite mit einem Laser zu bestrahlen brachte keinen Erfolg. Anschließend führten wir den Versuch erneut durch, nur dass wir diesmal die Latexkugeln durch Ruß ersetzten. Dies brachte uns schon einen Schritt weiter, weil wir nun in der Lage waren die Strömungen im Tropfen besser zu sehen. In einem weiterem Versuch fügten wir dem Wasser etwas Glycerin im Verhältnis 1:1 zu, was den Tropfen dickflüssiger werden ließ und so durch ein Verlangsamen der Bewegungen bessere Vergleiche mit unseren vorangegangenen Simulationen zuließ. In Kombination mit etwas Kondensmilch, waren wir nun im Stande noch bessere Ergebnisse zu erzielen. Auf den Fotos Abb. 7.4 und 7.5 kann man erkennen, wie die Strömungen innerhalb des Tropfens verlaufen. Abb. 7.4 zeigt dabei eine kreisförmige Bewegung. Abb. 7.5 hingegen zeigt eine Strömung, die durch die Mitte des Tropfens verläuft, sich an der rechten Seite nach oben und unten aufteilt und an der linken Seite wieder zusammen fließt. Was uns während der Experimente auffiel war, dass die Richtung der Strömungen, wie bereits in den Simulationen gezeigt, von der Lage des Tropfens auf dem OFW abhängt (Abb. 7.6) und die Geschwindigkeit durch die Frequenz variiert werden kann. Die Ausgangsfrequenz, die wir bei unseren Versuchen nutzten, lag bei 32 MHz, wobei wir eine Rotation entgegen dem Uhrzeigersinn vorfanden. Während der Versuche änderten wir nun

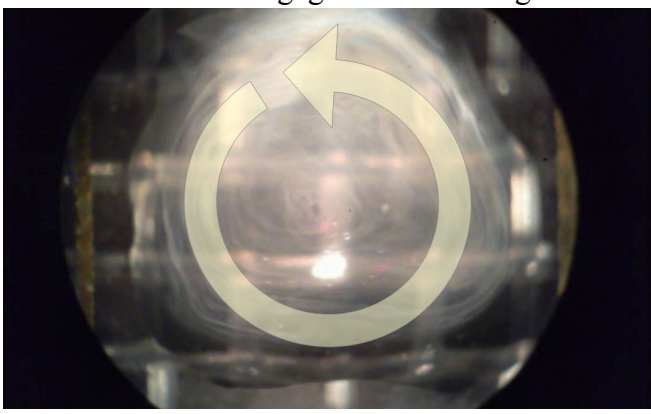


Abb. 7.4: Kreisförmige Strömung in einem Tropfen, wenn er zur Hälfte von der Oberflächenwelle getroffen wird. Die Strömung ist im Bild leider nicht gut erkennbar, kann auf dem Wettbewerb jedoch als Video sowie im Versuch gezeigt werden.

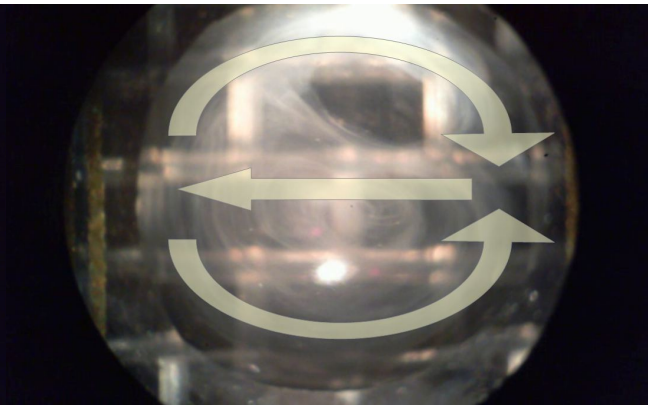


Abb. 7.5: Zentrale Strömung in einem Tropfen, wenn er vollständig auf dem IDT liegt. Die Strömung ist im Bild leider nicht gut erkennbar, kann auf dem Wettbewerb jedoch als Video sowie im Versuch gezeigt werden.

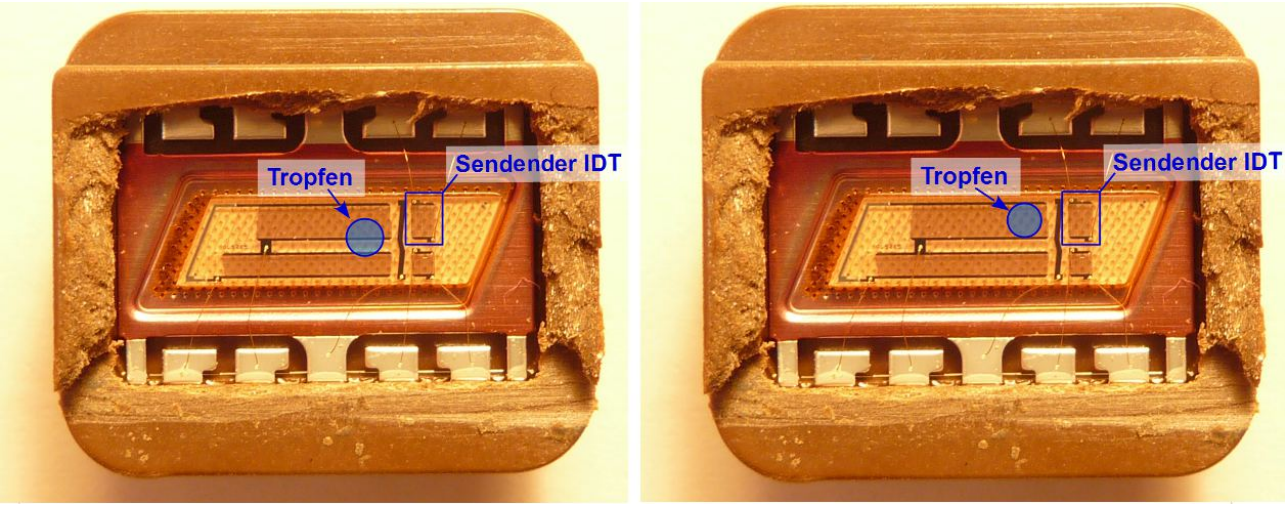


Abb. 7.6: Mögliche Lagen des Tropfens auf dem OFW. Im linken Tropfen entsteht eine kreisförmige Strömung. Im rechten Tropfen bildet sich eine zentrale Strömung aus.

die Frequenz, wobei sichtbar wurde, dass sich bei einer Änderung nach unten die Rotationsgeschwindigkeit, bis zum vollständigen Stillstand bei 28 MHz, immer weiter verlangsamte. Ähnlich geschah dies auch bei einer Verschiebung der Frequenz nach oben. Bis zu einer Frequenz von ca. 35 MHz verlor die Rotation an Geschwindigkeit. Ab 36 MHz kehrte sich die gesamte Rotationsrichtung um, sodass die Strömung nun im Uhrzeigersinn verlief.

8. Fazit und Ausblick

Im Verlauf unseres Projekts haben wir mithilfe von Vielteilchensimulationen und mittels preiswerter Experimente, ein Verfahren entwickelt, welches in der Mikrofluidik das Erzeugen von Strömungen in Tropfen erlaubt. Die Experimente bestätigen die Realitätsnähe unserer Vielteilchensimulationen sehr gut. Damit ist es uns möglich, verschiedene Chemikalien miteinander zu mischen oder Festkörper in einem Tropfen zu konzentrieren. Dies ist essentiell zum Bau eines Lab-on-a-Chip, da sonst die Reaktion mehrerer Chemikalien miteinander nicht möglich ist.
Wir planen nun Experimente um Tropfen gezielt zu bewegen. In unseren Simulationen haben wir gezeigt, wie diese Experimente funktionieren können.

9. Link- & Literaturverzeichnis

[1] Belder, Detlev:
Forschungsbericht 2005 - Max-Planck-Institut für Kohlenforschung; Mühlheim an der Ruhr 2005
URL: http://www.mpg.de/840095/forschungsSchwerpunkt2/

[2] Hochschul- und Kreisbibliothek Bonn-Rhein-Sieg
URL: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.200906653/pdf

[3] Achim Wixforth:
Acoustically driven planar microfluidics, Augsburg 2004
URL: https://www.physik.uni-augsburg.de/exp1/publikationen/planar_microfluid_slm.pdf

[4] Strobl, Christoph Josef:
Mikro- und Nanofluidik auf piezoelektrischen Substraten, München 2005
URL: http://edoc.ub.uni-muenchen.de/3727/1/Strobl_Christoph.pdf

[5] Winkler, Andreas:
SAW-basierte, modulare Mikrofluidsysteme hoher Flexibilität, Dresden 2011
URL: http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/8497/2012-03-07_Doktorarbeit_Andreas_Winkler.pdf