

Technische Universität München  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik  
Univ.-Prof. Dr. Tim C. Lüth

Semesterarbeit

# Beschreibung des Einflusses der Düsengeometrie und der elektrischen Ansteuerung eines Mikrotropfenerzeugers auf den Tropfenbildungsprozess

Arne Meeuw

Matr.-Nr.: 3602763

Betreuender  
Hochschullehrer: Univ.-Prof. Dr. Tim C. Lüth

Betreuer: Dipl.-Ing. Markus Kagerer

Ausgegeben am: 01.10.2014

Abgegeben am: 28.03.2014

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Garching bei München, den 28.03.2014

---

Arne Meeuw

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik im Rahmen des von der bayerischen Forschungstiftung unterstützten Projektes einer Experimentierplattform zur Mikrotropfenerzeugung. Ich danke meinem Betreuer Dipl.-Ing. Markus Kagerer, welcher mich bereits durch eine Bachelorarbeit auf das Thema der Mikrotropfenerzeugung und damit zur Gruppe Mikrotechnik am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik gebracht hat. Der Dank gilt hierbei insbesondere für die Einweisung und Unterstützung zur Benutzung der am Lehrstuhl vorhandenen und für meine Arbeit benötigten Geräte und Prozesse.

Des Weiteren danke ich dem Ordinarius des Lehrstuhls Professor Dr. Tim C. Lüth, der es ermöglicht dieses Thema an der Technischen Universität München zu behandeln.

Garching bei München, (März 2014)

Arne Meeuw

## Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung .....	II
Vorwort .....	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Anwendung.....	1
1.2 Stand der Technik .....	2
1.2.1 Arten der Mikrotropfenerzeugung .....	2
1.2.2 Herstellung von Düsengeometrien .....	6
1.2.3 Piezomembrandruckkopf am MiMed.....	10
1.3 Nachteile des Stands der Technik.....	13
1.3.1 Nachteile der verfügbaren Verfahren zur Düsenfertigung .....	13
1.3.2 Nachteile des Stands am MiMed zur Düsenfertigung.....	14
2 Eigener Ansatz.....	15
2.1 Aufgabenstellung .....	15
2.2 Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung .....	16
2.3 Lösungsstruktur .....	17
2.3.1 Fluidmechanische Grundlagen .....	17
2.3.2 Anforderungen an das Sägeblatt .....	21
2.3.3 Erstellung von Düsen definierter Breite .....	22
2.3.4 Erstellung von Düsen definierter Tiefe .....	24
2.4 Prozessbeschreibung.....	26
2.5 Realisierung .....	28
2.5.1 Sägeblattwahl .....	28
2.5.2 Umsetzung in Programmcode .....	29
2.6 Unterscheidungsmerkmale der Lösung .....	33
3 Experimente.....	34
3.1 Experiment 1: Laserparamater zur definierten Tiefe der Pumpkammern .....	34
3.1.1 Beschreibung der Messverfahren .....	34
3.1.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	35
3.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	37
3.2 Experiment 2: Herstellung von Düsen unterschiedlicher Breiten .....	38
3.2.1 Beschreibung der Messverfahren .....	38
3.2.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	39
3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	41
3.3 Experiment 3: Herstellung von Düsen unterschiedlicher Tiefen.....	42
3.3.1 Beschreibung der Messverfahren .....	42
3.3.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	43
3.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	45

3.4 Experiment 4: Einfluss der Düsenbreite und –tiefe auf Tropfenparameter .....	46
3.4.1 Beschreibung der Messverfahren .....	46
3.4.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	51
3.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	58
3.5 Experiment 5: Einfluss der Düsenlänge auf Tropfenparameter.....	61
3.5.1 Beschreibung der Messverfahren .....	61
3.5.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	62
3.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	65
3.6 Experiment 6: Einfluss der Pulslänge auf Tropfenparameter .....	67
3.6.1 Beschreibung der Messverfahren .....	67
3.6.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	68
3.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	70
3.7 Experiment 7: Einfluss der Spannung auf Tropfenparameter .....	72
3.7.1 Beschreibung der Messverfahren .....	72
3.7.2 Experiment zur Messung der Vorteile.....	73
3.7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	75
4 Zusammenfassung und Ausblick.....	76
Literaturverzeichnis.....	79
Abbildungsverzeichnis .....	81
A Messwerte .....	85
B CD-ROM .....	100

# 1 Einleitung

## 1.1 Anwendung

Das gezielte Erzeugen kleinster und genauer Mengen von Flüssigkeiten ist in vielen Gebieten der Industrie und Forschung nötig. Diese Gebiete umfassen mitunter den Druck, die Beschichtung von Oberflächen, die Fabrikation elektrischer Komponenten, die Optik und Medizintechnik.

Der umsatzstärkste und damit größte Markt der Anwendung der Mikrotropfenerzeugung bildet der Druck- und Beschichtungsbereich. Dies ist auf den in den vergangenen zwei Dekaden zunehmenden Gebrauch von Druckern im Heim- und im Office-Bereich zurückzuführen. Tropfenerzeuger, besonders solche der Drop-On-Demand Technik werden immer häufiger für diverse Anwendungen gebraucht (Seitz & Heinzl, 2004). Eine rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Herstellungsverfahren weist dem Druckkopf eine wichtige Bedeutung im Zuge der berührungslosen Positionierung von Flüssigkeitsmengen auf unterschiedlichen Substraten zu. Hierzu zählen Anwendungen wie die Herstellung von Liquid-Crystal-Displays und Organic-Light-Emitting-Diode-Displays, Medikamenten-Dosierung und Brennstoffeinspritzung in Motoren (Chen et al., 2007).

Die Qualität der Erzeugung von Tropfen (konstante Fluggeschwindigkeit und Tropfengröße) wirkt sich direkt auf die Qualität des Druckes aus. Kontrollierte Tropfengrößen eines Fluids auf ein Substrat zu positionieren, ermöglicht die Dosierung von Reaktanten zur Realisierung von Lab-On-A-Chip Systemen. Eine Einstellmöglichkeit der Tropfengröße und Geschwindigkeit ermöglicht eine Variation der Druckqualität und Prozessfrequenz. So ist es möglich, bei Einstellung der Parameter zur Erzeugung Tropfen größeren Volumens mit jedem Tropfen eine größere Fläche des Substrats mit dem verwendeten Fluid zu bedecken. Hierbei ist es möglich, größere Düsenabstände zu wählen und so eine höhere Druckgeschwindigkeit zu erreichen. Die Verwendung kleiner Tropfen ermöglicht einen Druck mit höheren Auflösungen. Die Tropfenfluggeschwindigkeit bestimmt die Dauer des Fluges eines Tropfens zwischen Verlassen der Düse und Aufschlag auf dem Substrat direkt. In dieser Zeit ist es für Einflüsse von außen (Temperatur, Feuchtigkeit, Luftbewegungen) möglich, die Tropfenflugbahn und die Struktur des Tropfens selbst (Zerstreuung) zu beeinflussen (Elsner, 2009). Diese Zeit gilt es möglichst gering zu halten, da hohe Tropfenfluggeschwindigkeiten für die Qualität des Drucks von Vorteil sind. Die gezielte Manipulation der Tropfeneigenschaften während des Druckprozesses ist durch die Anpassung der elektrischen Ansteuerungsparameter möglich. Hiermit kann während der Fertigung die Tropfengröße zur Bedeckung großer Flächen angehoben werden und bei Bedarf zur Auflösungssteigerung verkleinert werden.

Speziell piezoelektrisch aktuierte Tropfenerzeuger finden in weiten Gebieten der Industrie Anwendung. Beispiel hierfür ist die Beschichtungsindustrie. Der Vorteil dieser Tropfenerzeuger liegt in der Möglichkeit zur Dosierung einer breiten Auswahl an Flüssigkeiten (temperaturempfindlich, reaktiv, leitend u.v.m.).

Der Austritt eines Tropfens findet im Mikrotropfenerzeuger durch die Düse statt. An dieser Stelle wird der Tropfenbildungsprozess maßgeblich beeinflusst. Durch Änderungen der Größe und Form der Düse ist eine direkte Beeinflussung des Tropfens möglich. Eine Optimierung des Tropfenbildungsprozesses durch Anpassen der Düsenform auf eine optimale Größe bedeutet eine Verbesserung der erreichbaren Druckqualität.

## 1.2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über das dem verwendeten Tropfenerzeuger zugrunde liegende Prinzip sowie eine Auswahl weiterer Prinzipien zur Tropfenerzeugung gegeben. Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Methoden zur Düsenherstellung in der Forschung und Industrie verwendet werden.

### 1.2.1 Arten der Mikrotropfenerzeugung

Die Mikrotropfenerzeugung basiert nach heutigem Stand der Forschung und Technik auf zwei Schlüsseltechnologien: Die Continuous-Jet- und die Drop-On-Demand-Methode. Eine Aufteilung der Technologien ist in Abb. 1 zu sehen.

Bei dem Continuous-Jet-Verfahren wird ein kontinuierlicher Strahl an Flüssigkeit durch spezielle Mechanismen in Einzeltropfen getrennt. Ein natürlicher Mechanismus ist der Rayleigh-Zerfall. Dieser beschreibt das Aufbrechen des kontinuierlichen Strahles eines Fluids nach einer gewissen Flugstrecke in Einzeltropfen. Um diesen Prozess bestimmt und kontrolliert ablaufen zu lassen, werden dem Strahl, beispielsweise mit einem piezoelektrischen Aktor, mechanische Druckwellen überlagert.

Das Drop-On-Demand Verfahren ermöglicht es, einen Tropfen asynchron zu erhalten und (übersetzungsgemäß) auf Abruf bereitzustellen. Zur Bereitstellung eines Tropfens wird eine Volumenänderung in der Pumpkammer herbeigeführt, welche das zu druckende Fluid beinhaltet. Wird das Volumen der Pumpkammer verkleinert, so wird ein Tropfen aus einer Düse ausgestoßen. Die Grundfunktionen des Prinzips, um einen Tropfen auf Abruf bereitzustellen sind: Druckerzeugung, Verdrängung der Flüssigkeit, Ausstoß in die freie Umgebung, Tropfenbildung durch Ablösung und kapillare Wiederbefüllung. Hierbei ist es nicht nötig, Sperrventile zu verwenden, da die Sperrwirkung durch die Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Fluid und Umgebung (Luft) an der Düse ausgenutzt wird (Elsner, 2009). Da der in dieser Semesterarbeit verwendete Druckkopf nach dem Drop-On-Demand-Verfahren arbeitet, werden im Folgenden die zwei wichtigsten Techniken zur Mikrotropfenerzeugung dieses Verfahrens vorgestellt.

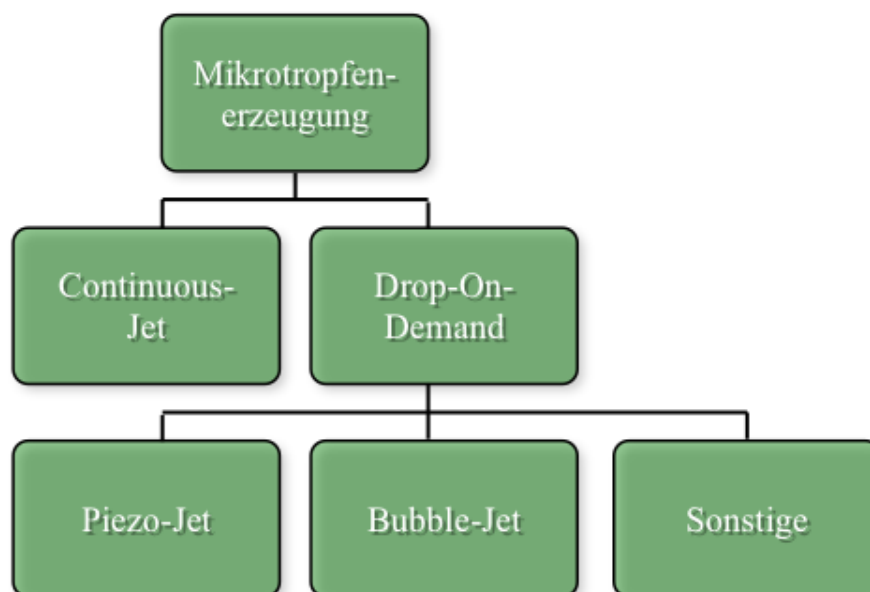


Abb. 1 Baumdiagramm zur Klassifizierung unterschiedlicher Mikrotropfenerzeugungsarten mit Fokus auf die wichtigsten Drop-On-Demand Prinzipien.

## 1. Drop-On-Demand mit Bubble-Jet

Der Energieeintrag zur Bildung und Ausstoßung eines Tropfens geschieht beim Bubble-Jet-Verfahren über einen thermischen Aktor (vgl. Abb. 2). Dieser liegt in der Pumpkammer in Form eines Heizelementes vor. Kommerziell erfolgreiche Systeme von Herstellern wie Canon und Brother basieren auf dem Prinzip des Bubble-Jets (Lee, 2003). Da die benötigten Komponenten wie Widerstände, Treiber- und Verstärkerschaltungen, sowie das Heizelement selbst bereits direkt auf dem Basissubstrat (meist Silizium) hergestellt werden, weisen diese Systeme eine hohe Integrationsdichte auf, welche das Zusammenlegen einer hoher Anzahl an Düsen und Treiberschaltungen auf geringer Fläche ermöglicht.

Der Ausstoß eines Tropfens erfolgt durch eine Volumenänderung in der Pumpkammer. Diese wird durch das Erhitzen und das daraus resultierende Verdampfen des zu druckenden Fluides erzeugt. Nach einer Temperaturerhöhung auf etwa 300 bis 500 °C bietet das Fluid eine ausreichende Expansion, um einen Tropfen aus der an der Spitze der mit Flüssigkeit gefüllten Kammer liegenden Düse zu stoßen (Elsner, 2009). Der für den Tropfenabriss benötigte Unterdruck wird durch das Abschalten des Heizelements und dem damit verbundenen Zusammenbruch der Gasblase erzeugt.

Die kommerziell am Markt erhältlichen Produkte besitzen eine an der Front liegende Düsenplatte, welche die Herstellung und Fertigungsgenauigkeit der Düsen erleichtert und erhöht. Die Strukturen werden in Silizium mit Hilfe von Verfahren der Photolithographie gefertigt, wodurch eine hohe Tauglichkeit der Massenfertigung ermöglicht wird.

Dieses Verfahren ermöglicht eine preisgünstige Herstellung von Drop-On-Demand fähigen Tropfenerzeugern. Allerdings sind die Anforderungen an die verwendbaren Fluide speziell. Für die definierte Expansion des Fluides in der Pumpkammer ist es notwendig, Flüssigkeiten mit leicht flüchtigen Anteilen wie Wasser oder Alkohol zu verwenden (Elsner, 2009). Die Verwendung eines Bubble-Jet-Druckkopfes in der Medizintechnik ist durch die chemische Veränderung des Fluides während des Prozesses der Tropfenerzeugung nicht praktikabel. Da die Fluide zwischenzeitlich zum Kochen gebracht werden, ist die Verwendung temperatur-empfindlicher oder organischer Materialien nicht möglich.

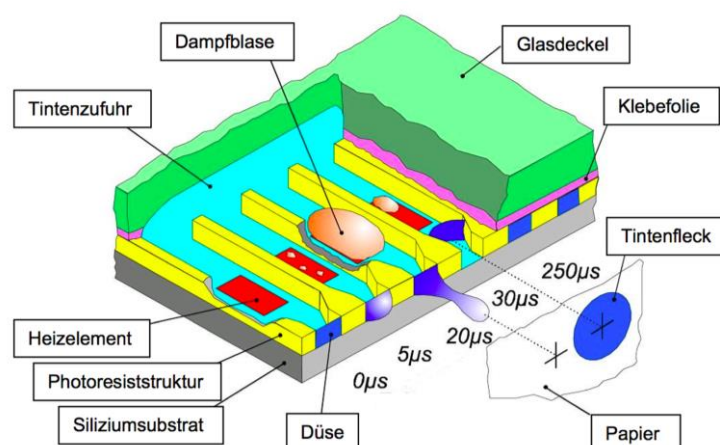


Abb. 2 Bubblejet Druckprinzip. Entnommen aus Elsner (2009).



## 2. Drop-On-Demand mit piezoelektrischer Aktuation

Eine weitere Möglichkeit zu Tropfenerzeugung ist das Einbringen der notwendigen Energie zur Änderung des Pumpkammervolumens durch einen Piezoaktor. Hierbei seien im Folgenden kurz verschiedene Formen der piezoaktuierten Druckköpfe vorgestellt.

### Rohrwandler

Diese Form des piezoaktuierten Mikrotropfenerzeugers stellt das älteste Design dar. Verwendet wird hierbei für die Einbringung der Energie und der benötigten Volumenänderung ein Piezoröhrchen. Die Druckwelle wird durch das Kontrahieren des Aktor-Röhrchens unter Ansteuerspannung erzeugt. Diese drückt das Fluid durch die Düse (siehe Abb. 3). Bei Verlassen des positiven Spannungsniveaus dehnt sich der Aktor wieder aus und das Pumpkammervolumen vergrößert sich erneut. Es findet ein Tropfenabriss statt. Die Pumpkammer füllt sich durch die rückwärtig liegende Fluidzuführung und ist für einen weiteren Tropfenbildungszyklus bereit.

### Paddelwandler

Der Paddelwandler besteht aus einem direkt in der Pumpkammer liegenden Piezoaktor. Der Aktor ist als Bimorph aufgebaut und stellt einen Biegeaktor dar. Unter Anlegen einer Ansteuerungsspannung hebt sich der Aktor und gibt eine darunter liegende Düse frei. Senkt sich diese Spannung wieder auf das Nullniveau herab, so schnellt der Aktor auf seine Ursprungsposition zurück und drückt eine Menge an Fluid durch die Düse hindurch (siehe Abb. 4). Es ist möglich, mehrere Aufbauten von Aktoren und Düsen auf einem Substrat unterzubringen, um so eine Auflösungs- oder Druckgeschwindigkeitssteigerung zu erreichen.

### Scherwandler

Bei einem Scherwandler-Mikrotropfenerzeuger wird der piezoelektrische Schereffekt ausgenutzt, um das Volumen der Pumpkammer zu verändern. Der Schereffekt beschreibt die Ausdehnung eines Piezoaktors quer zur Polarisationsrichtung. Die verwendeten Aktoren, welche im Aufbau des Tropfenerzeugers die Wände der Pumpkammer bilden (siehe Abb. 5), wölben sich im Zuge des Schereffektes nach außen und weiteres Fluid strömt in die Pumpkammer ein. Bei Polungswechsel der Ansteuerungsspannung tritt eine Kontraktion des Pumpkammervolumens ein und ein Tropfen wird aus der an der Spitze liegenden Düsenplatte ausgestoßen. Der Aufbau eines Scherwandlers ermöglicht eine einfache Verwendung einer Düsenplatte.

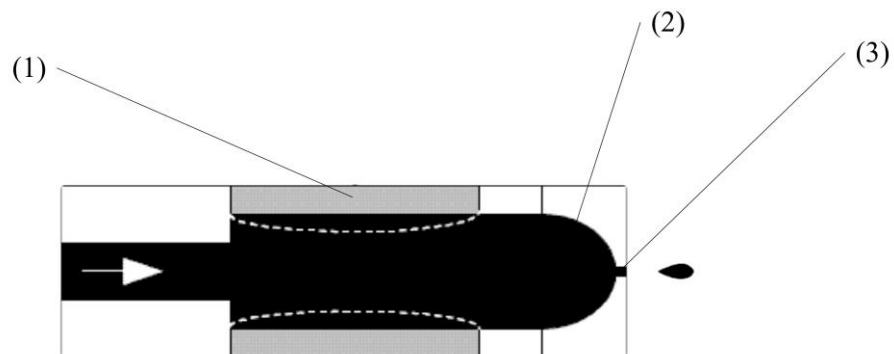


Abb. 3 Schematische Darstellung eines Tropfenerzeugers in der Ausführung als Rohrwandler. Aktor (1), Fluid (2) und Drossel (3) (entnommen aus Wijshoff (2008)).

Mit einer Düsenplatte ist es möglich, eine hohe Anzahl hochqualitativer Düsen in einem Tropfenerzeuger zu verwenden. Wie auch beim Paddelwandler ist es möglich, mehrere Strukturen dieser Funktionsweise in einen Aufbau zu integrieren und so eine hohe Druckauflösung zu gewährleisten.

Im Bezug auf verwendbare Fluide haben die zuvor genannten Mikrotropfenerzeuger den gemeinsamen Nachteil, dass die Aktoren im direkten Kontakt mit diesen stehen. So scheiden chemisch reaktive Fluide aus, da diese das Piezomaterial und dessen Elektroden angreifen und dessen Elektroden angreifen können. Dies wird im folgend beschriebenen Aktor durch die Trennung der aktiven Komponenten durch eine Membran erreicht.

### Membranwandler

In einem Membranwandler besteht die obere Deckschicht aus einem Deckel, welcher als Bimorphstruktur aufgebaut ist. Dieses Bimorph besteht aus einer passiven Membran, welche aus einem chemisch resistenten Material besteht und einem darüber angebrachten, meist aufgeklebten, Piezoaktor. Durch den festen Verbund der beiden Materialien, wölbt sich dieser nun unter Ansteuerung des Aktors und der damit verbundenen Längen- und Breitenkontraktion in die Pumpkammer hinein (siehe Abb. 6 (a)). Das Fluid wird nun aus der, an der Spitze der Pumpkammer liegenden, Düse gedrückt. Während der positiven Ansteuerungsspannung bleibt die Membran im ausgelenkten Zustand und gibt dem Fluid die notwendige Zeit um aus

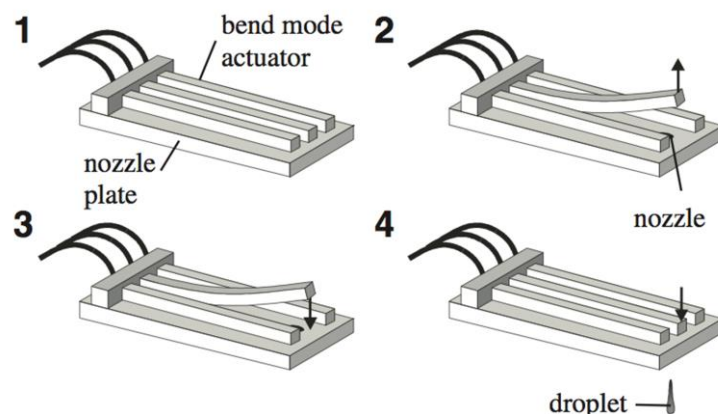


Abb. 4 Prinzip des Paddelwandlers. Ausgangszustand (1), elektrische Ansteuerung (2 & 3) und Tropfenausstoß (4). Entnommen aus Seitz und Heinzl (2004).

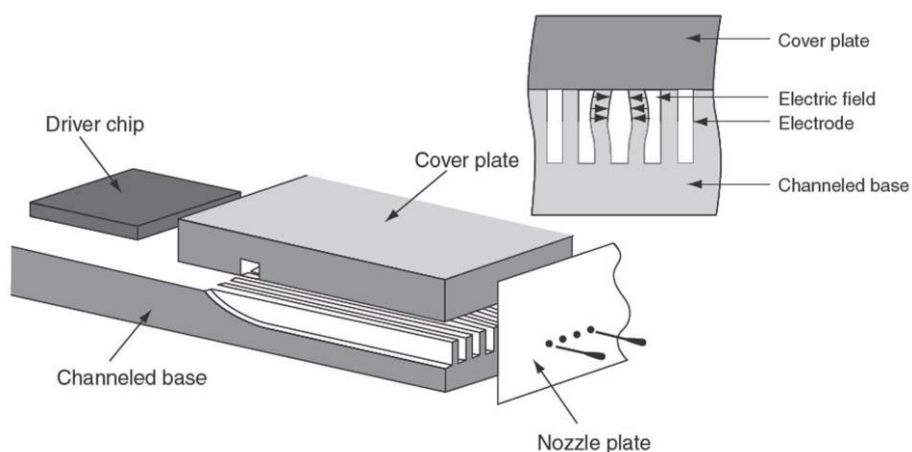


Abb. 5 Schematische Darstellung eines Tropfenerzeugers als Scherwandler und Verwendung einer Düsenplatte. Entnommen aus Lee (2003).

der Düse auszutreten. Fällt die Ansteuerungsspannung wieder auf Null herab, so bewegt sich die Membran in ihren Ausgangszustand. Die Fluidsäule reißt ab und ein einzelner Tropfen entsteht. Durch den Rückgang der Membran wird die Pumpkammer über den Versorgungskanal wieder mit Fluid gefüllt und ein erneuter Tropfenbildungsprozess beginnt. Vorteil dieses Tropfenerzeugerdesigns ist die räumliche Trennung des Fluids von den chemisch und thermisch empfindlichen Komponenten des Gerätes. So befindet sich das Fluid in einer Pumpkammer, welche durch geeignete Wahl des Materials (beispielsweise Silizium) chemisch resistent gegenüber Säuren, Lösungs- und Bindemitteln ist. Die Piezokeramik ist durch den Bimorphaufbau von der Flüssigkeit durch die Membran getrennt.

Eine spezielle Form des Tropfenerzeugers mit Membran, stellt der Pushmode-Wandler dar. Auch bei diesem ist das Fluid in einer getrennten Pumpkammer und gerät nicht in Kontakt mit der aktiven Piezokeramik. Hierbei ist der Aktor jedoch, anstelle einer breiten Aktorfläche, ein stabförmiger Aufsatz auf dem Deckel der Pumpkammer (vgl. Abb. 6 (b)). Wird dieser mit einer Ansteuerungsspannung belegt, so tritt an der Wand der Pumpkammer eine Verformung auf, durch welche ein Tropfen aus der Düse gedrückt wird.

### 1.2.2 Herstellung von Düsengeometrien

Jedem der zuvor vorgestellten Prinzipien liegt zugrunde, dass die Tropfen aus Düsen ausgestoßen werden. Diese sind meist in Form von wenigen Mikrometer abmessenden Öffnungen vorhanden. Die wiederholte Herstellung von Düsen einheitlicher Größe ist ein Schlüsselproblem für sämtliche Mikrotropfenerzeuger. Der Austritt des Tropfens, welcher durch die Düse geschieht, ist ein kritischer Zeitpunkt im Tropfenbildungsprozess. Die Formung des Tropfens wird durch Form und Qualität der Düse substantiell beeinflusst und beeinflusst damit auch das Druckerzeugnis. Daher ist die Qualität der gefertigten Düsen für die Druckqualität von entscheidender Wichtigkeit. Im Folgenden werden einige aus dem Stand der Technik und Forschung bekannten Methoden zur Herstellung von Düsen im Mikrometerbereich vorgestellt, welche den hohen Anforderungen bei der Erzeugung von Tropfen im Mikrometerbereich, an Genauigkeit und Reproduzierbarkeit gerecht werden.

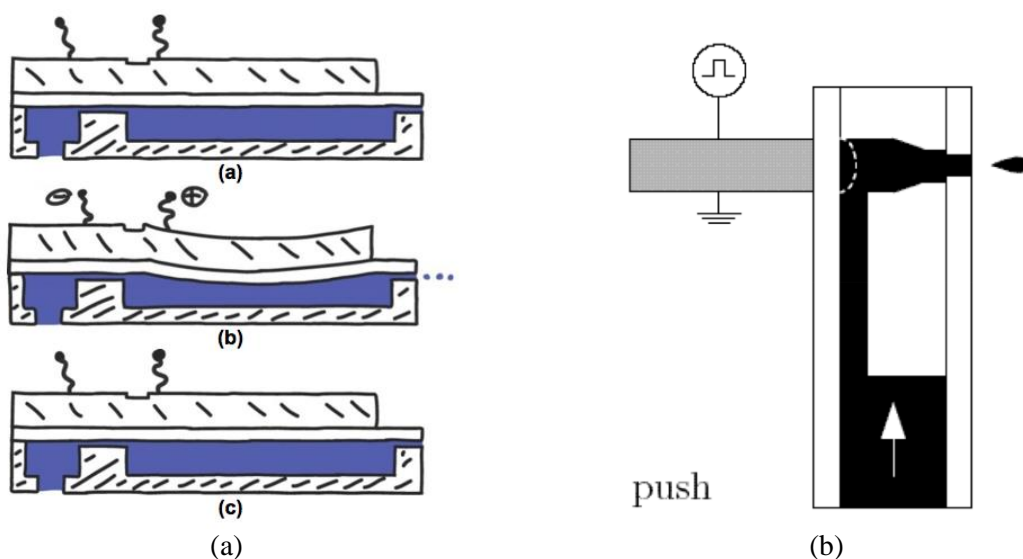


Abb. 6 Funktionsprinzip des Membranwandlers. In (a) ist ein Membranwandler mit einer als Bimorph aufgebauten Aktorfläche dargestellt. Entnommen aus Kagerer et al. (2013b). In (b) ist ein Pushmode-Tropfenerzeuger dargestellt, welcher mit einem stabförmigen Aktor gegen eine Pumpkammerwand drückt und so einen Tropfen ausstößt. Entnommen aus Wijshoff (2008).

## 1. Herstellung von Düsen in Silizium durch Ätzen

Ein Möglichkeit der Erstellung von Strukturen in Silizium ist das Ätzen (Bassous, Taub & Kuhn, 1977). Zunächst wird ein handelsüblicher (100)-orientierter Wafer thermisch oxidiert. Unter Zuhilfenahme der Methode der Photolithographie werden quadratische Aussparungen in der  $\text{SiO}_2$  Schicht erstellt, welche im weiteren Verlauf der Fabrikation als Maske zur Umrandung des Düsen Eintritts dient. Die Ätzraten bei der vorliegenden Methode liegen bei  $50 \mu\text{m/h}$  für die (100)-,  $30 \mu\text{m/h}$  für die (110)- und  $2 \mu\text{m/h}$  für die (111)-Ebene. Dies führt zu der für Ätzprozesse im Silizium charakteristischen Pyramidenform der entstehenden Düse (siehe Abb. 7). Die Kantenlänge der so entstandenen quadratischen Düsenöffnung an der Unterseite des Siliziums wird nach (1) beschrieben.

$$W_0 = W_E + \delta - \sqrt{2} \cdot t_s \quad (1)$$

Wobei  $W_E$  die Kantenlänge der quadratischen Öffnung an der Oberseite des Siliziums und  $t_s$  die Dicke des verwendeten Siliziumwafers beschreibt. Der Korrekturfaktor  $\delta$  wird eingesetzt, um Abweichungen der Größe der  $\text{SiO}_2$ -Öffnung von der tatsächlichen Si-Öffnung und der ungenauen Positionierung der Maske zu kompensieren. Die Ätzzeit beträgt bei einer Dicke des Siliziums von  $190 \mu\text{m}$  in (100)-Richtung etwa 4 Stunden (Bassous, Taub & Kuhn, 1977). Nach Jingkuang und Wise (1997) werden Düsen auf engstem Raum mit einem Abstand von nur  $4 \mu\text{m}$  und einer Kantenlänge von  $21 \mu\text{m}$  geätzt. Die Strukturen werden in Silizium geätzt, welches mit schlitzförmigen Öffnungsstrukturen versehen wird. Diese Öffnungen ermöglichen es der Säure, in die vorgesehenen Positionen einzudringen und die Düsenkanäle in das Material zu ätzen. Abschließend erfolgt das Schließen der Öffnungen. In einem späteren Prozess werden diese mit thermischen Oxiden in einem Niederdruck CVP (Chemical Vapor Deposition) Herstellungsschritt mit Oxid- und Nitridschichten verschlossen. Beide beschriebenen Verfahren verwenden Ethylendiamin Pyrocatechol (EDP), um die erforderlichen Strukturen in das Silizium zu ätzen. Hiermit werden Druckauflösungen von bis zu 1016 dpi erreicht (siehe Abb. 8).

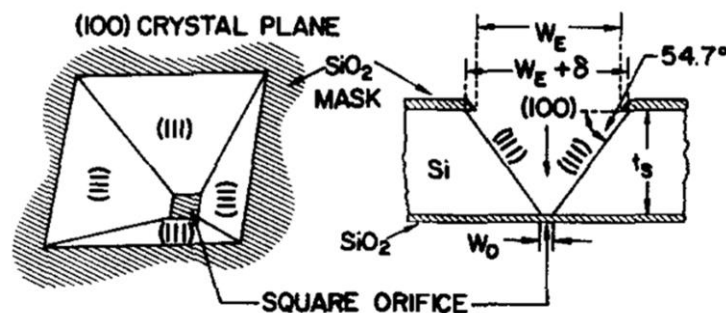


Abb. 7 Darstellung der Herstellung pyramidenförmiger Düsenöffnungen durch Ätzen mit EDP (entnommen aus Bassous, Taub und Kuhn (1977)).

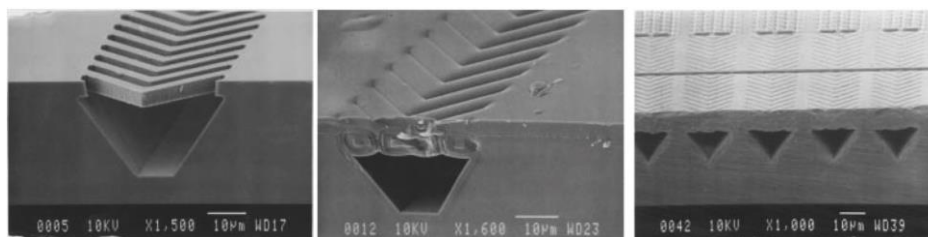


Abb. 8 Durch die Lamellenstruktur (links) dringt die Ätzflüssigkeit in das Substrat, diese wird dann verschlossen (mitte). Das rechte Bild zeigt die Düsen mit einer Breite von  $20 \mu\text{m}$  und einem Abstand von  $5 \mu\text{m}$  (entnommen aus Jingkuang und Wise (1997)).

## 2. Herstellung von Düsen durch Lasern

Zu Beginn wurde das Verfahren des Laserbohrens verwendet um 300 dpi (Punkte pro Zoll) Düsen in TAB (Tape-Automated Bonding) Schaltkreise zu bohren. Das Verwenden einer separaten Düsenplatte, welche Öffnungen zum Ausstoß des Fluides enthält, hat sich seit den späten 1990'er Jahren durchgesetzt. Die Technik diese Platte in einem späteren Fabrikations-schritt an die vorgelegten fluidischen Komponenten wie Heizung oder Pumpkammer anzuschließen, führt zu einer erheblichen Verbesserung der Druckqualität, Steigerung der Produktionsrate und Minimierung von Materialabfällen (Lizotte, Ohar & Waters, 2002).

Eine Art der Herstellung von Düsen, stellt das Abladieren durch Laserstrahlung dar (vgl. Abb. 9). So bestehen kommerziell erhältliche Inkjet-Druckköpfe aus einer Düsenplatte, in welche mit einem Excimer-Laser die notwendigen Löcher gebohrt werden. „Excimer Laser – verwendet um Düsenöffnungen zu bohren – sind für die Herstellung hochqualitativer Düsenplatten unverzichtbar“. Hauptmaterial für die beschriebenen Düsenplatten stellt Polyamid dar. Dieses ist durch seine körnige Struktur und eine hohe Energieabsorptionsfähigkeit des ultravioletten Laserlichtes hervorragend geeignet, um saubere, kleinstdimensionale Löcher zu erzeugen. Die Verwendung von Bandmaterial zur Herstellung von Düsenplatten ermöglicht eine fortlaufende Produktion. Erforderlich hierfür sind Automationsprozesse wie Temperaturüberwachung und Steuerung, Überwachung der Dicke des Materials und kontinuierliche Aufnahme der Laserleistungsdaten (Lizotte, Ohar & Waters, 2002).

Die Notwendigkeit für Düsen immer kleinerer Abmessungen besteht in der Anforderung der Auflösung an kommerzielle Druckköpfe. So sind Auflösungen von 1200 dpi keine Außergewöhnlichkeit und fordern Tropfengrößen im Nanoliter-Bereich. Um dies zu erreichen ist es notwendig, die Herstellungsgrößen von Düsen auf unter 20  $\mu\text{m}$  zu reduzieren. Die Photoablation mittels hochfrequenter Laserstrahlung stellt eine Methode der Herstellung dar, mit welcher Strukturen beliebiger Formen in ein Substrat aufgeprägt werden. So ist die meistverwendete Form rund, jedoch gibt es Indikationen, dass andere Formen wie quadratisch oder sogar elliptisch von Vorteil sind (Lizotte, Ohar & Waters, 2002).

Die Druckqualität, Geschwindigkeit und Genauigkeit (erreichbare Auflösung) wird durch die Anzahl der im Druckkopf verfügbaren Düsen begrenzt. Hierbei können in Düsenplatten mit einem Excimer-Laser über 430 Düsen auf einer Fläche von 2,7 x 10,8 mm enthalten. Mit einer solchen Anzahl an Düsen sind Druckauflösungen von 1200 dpi möglich (Sheng-Chih, Min-Wen & Chung-Jui, 2009). Die erreichbare Druckgeschwindigkeit wird ebenfalls durch eine Vergrößerung der druckbaren Fläche erreicht. Mit Verwendung einer längeren Düsenplatte wird die Vergrößerung der Fläche ebenfalls erreicht (Lindemann et al., 2007).

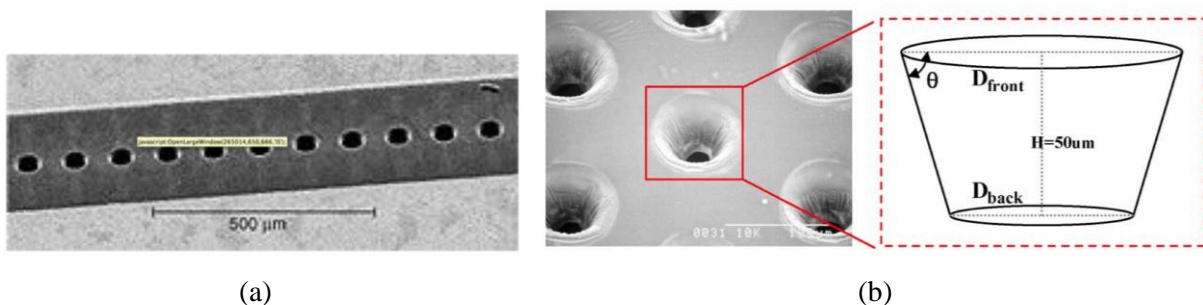


Abb. 9 Mit Excimer-Laser hergestellte Düsenplatten. (a) zeigt eine Düsenplatte in der Frontaufnahme (entnommen aus Lizotte, Ohar und Waters (2002)). In (b) ist die konische Form einer mit Excimer-Laser gefertigten Düse zu sehen (entnommen aus Sheng-Chih, Min-Wen und Chung-Jui (2009)).

### 3. Herstellung von Düsen durch Glasschmelzen

In der Forschung ist es, wie auch am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, wichtig an einer bestehenden Experimentierplattform in kurzer Zeit Änderungen vorzunehmen. So ist es für den am Lehrstuhl entwickelten Druckkopf möglich, Änderungen in der Geometrie der Pumpkammer durch eine Anpassung der entsprechenden CAD-Datei mit sofortiger Wirkung zu ändern.

Bezogen auf die Größe der Düse besteht in der Forschung die Möglichkeit der Herstellung von Glasdüsen, welche durch einen Schmelzprozess hergestellt und anschließendes Abschleifen auf den gewünschten Durchmesser gebracht werden. Diese Düsen werden als Teil eines nach dem Prinzip des Rohrwandlers aufgebauten Tropfenerzeugers als Kombination aus Pumpkammer und Düse verwendet.

Nach Li et al. (2010) wird hierzu eine Glasröhre mit einem Durchmesser von 5 mm außen und 3,5 mm im Inneren verwendet. Der verwendete Druckkopf ist nach dem Prinzip des Rohrwandlers aufgebaut, dieses wird in Kapitel 2 beschrieben. Hierbei dient das verwendete Glasrohr als Fluidreservoir und Pumpkammer mit integrierter Düse. Die Glasröhre wird in eine Rotationseinheit gespannt und mit Hilfe eines Elektromotors kontinuierlich gedreht, um eine gleichmäßige Erhitzung zu gewährleisten. Der untere Teil der Glasröhre wird nun mit einem Propan-Bunsenbrenner über die Übergangstemperatur erhitzt. Unter dem Einfluss der Hitze beginnt das Glas zu schmelzen und sich in Richtung seiner Achse zu längen. Dieser Prozess findet statt, bis das Glas soweit gedünnt ist, so dass es unter seinem Eigengewicht bricht.

Das Resultat dieses Prozesses sind zwei Röhren, welche eine sich zuspitzende Öffnung besitzen. Durch Abschleifen der Spitze ist es möglich, die Größe und Länge des Düsenaustritts zu bestimmen. Es werden 13 bis 300  $\mu\text{m}$  große Düsen hergestellt. Eine schematische Darstellung des Prozesses und eine resultierende Düse sind in Abb. 10 dargestellt. Zur Erstellung achsensymmetrischer Düsen empfiehlt Lee (2003) eine minimale Rotationsgeschwindigkeit von 600 U/min. Glas als Düsenmaterial bietet den Vorteil chemisch resistent zu sein, einen geringen Reibungswiderstand zu haben, leichter in der Herstellung zu sein, was in geringeren Herstellungskosten resultiert (Fan et al., 2008). Mit einem ähnlichen Verfahren wurden im Rahmen einer Semesterarbeit auch am MiMed Düsenstrukturen aus Glaskapillaren hergestellt (Träger, 2008).

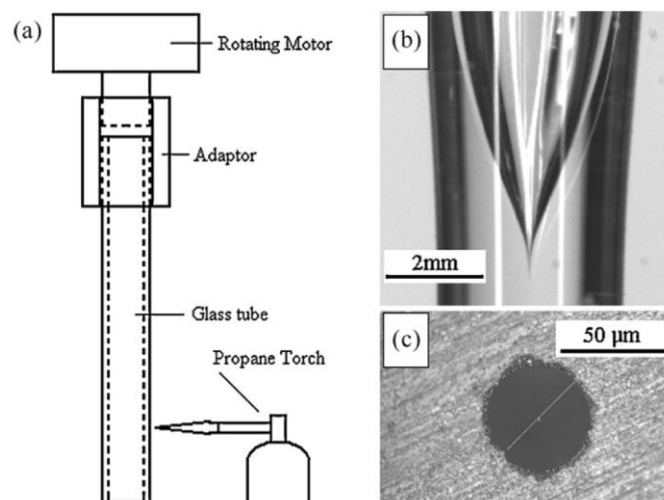


Abb. 10 Herstellung von Glasdüsen. (a) Prozess der Herstellung mit Rotationsmotor und Glasrohr, (b) gezogenes Glas in der Seitenansicht und (c) die entstandene Düse in der Draufsicht. Entnommen aus Li et al. (2010).



### 1.2.3 Piezomembrandruckkopf am MiMed

Der am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik entwickelte Piezomembrandruckkopf dient als Versuchsplattform für die Mikrotropfenerzeugung unterschiedlicher Flüssigkeiten. Dieser ist als Membranwandler ausgeführt und ist mit Hilfe von Rapid-Prototyping Herstellungsmethoden günstig herzustellen. Grundsätzlich besteht der Druckkopf aus einer Silizium-Pumpkammer, welche mit Hilfe eines Nd:YAG-Lasers gefertigt wird. Als Membran dient eine dünne Scheibe aus Borosilikatglas, welche durch anodisches Bonden mit dem Siliziumsubstrat verbunden wird. Eine Klebschicht verbindet die Membran mit der Piezokeramik, welche nach der Strukturierung als Aktor der einzelnen Pumpkammern dient.

Der Druckkopf besteht aus vier zu unterscheidenden Schichten, welche in Abb. 11 dargestellt sind. Der Tropfenerzeuger funktioniert nach dem Prinzip des Piezo-Jet, bei welchem durch Membranbewegungen Tropfen ausgestoßen werden. Der Vorgang einer Tropfenerzeugung startet mit dem Befüllen der Pumpkammern durch die im hinteren Teil liegende Zuführung mit dem zu druckenden Fluid. Bei Ansteuerung des Aktors mit einem elektrischen Impuls, dehnt sich dieser durch den piezoelektrischen Längseffekt senkrecht zur Oberfläche und staucht sich durch den Quereffekt parallel zu dieser. Da der Aktor fest mit der darunterliegenden Membran verbunden ist, wölbt sich das Bimorphkonstrukt in die Pumpkammer hinein und führt so zu einer Verkleinerung des Volumens. Der entstehende Druck in der Pumpkammer zwingt das Fluid aus der an der Spitze liegenden Düse zu entweichen. Lässt die elektrische Ansteuerung ab, so springt der Aktor wieder auf seine Ursprungsposition und das Originalvolumen der Pumpkammer ist wiederhergestellt. Die an der Düse entstandene Flüssigkeitssäule reißt ab und ein Tropfen entsteht. Die Strukturierung der Pumpkammern erfolgt durch einen Nd:YAG-Laser, mit welchem es möglich ist, pro Herstellungsvorgang eine Anzahl von fünf Druckchips auf einem Waferviertel zu fertigen. Ein 4“ Wafer der Dicke 525  $\mu\text{m}$  wird mit Hilfe der am Lehrstuhl befindlichen Wafersäge geviertelt.

Anschließend wird das mit Pumpkammern versehene Silizium-Substrat durch Lappen von Aufwürfen, welche bei dem Laserablationsprozess entstehen, befreit und in einem Megashallbad gereinigt. Darauf folgend werden die Düsen in die Pumpkammern geschnitten. Vorhergehend wurden die Düsen im selben Prozess wie die Strukturierung der Pumpkammern mit Hilfe des genannten Lasers gefertigt.

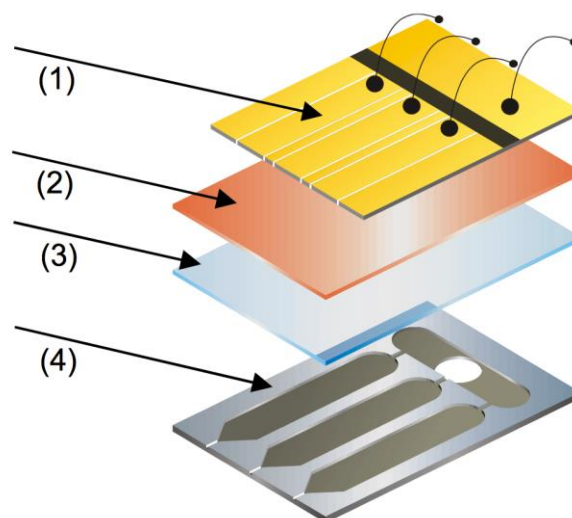


Abb. 11 Schichtaufbau des am Lehrstuhl hergestellten Mikrotropfenerzeugers. (1) strukturierte Piezokeramik, (2) Klebschicht, (3) Membran aus Borosilikatglas, (4) Silizium (entnommen aus Kagerer et al. (2013a)).

Da lasergefertigte Düsen stets eine raue V-Form aufweisen, werden diese nach Eiler (2012) mit der Wafersäge und einem der gewünschten Düsenbreite entsprechenden Sägeblatt gefertigt. Dieses Verfahren führt zu einer hohen Kantenschärfe, was jedoch eine leichte U-Form der Düse mit sich bringt (siehe Abb. 12). Nach erneuter Glättung durch Läppen, Reinigung mit Mega- und Ultraschallbad wird der nächste Prozess des anodischen Bondens durchgeführt. In diesem Schritt wird die Membran, welche aus einer 100 µm dicken Scheibe Borosilikatglas besteht, dauerhaft mit dem bisher bearbeiteten Silizium Waferviertel verbunden. Hierbei werden die beiden gereinigten Komponenten zusammen auf eine Heizplatte gelegt, welche anschließend auf eine Temperatur von 400 - 500 °C erhitzt wird. Ist die Zieltemperatur erreicht, so wird über eine Punktelektrode eine Spannung von 800 - 1200 V beaufschlagt. Es bildet sich eine dunkle Fläche aus, in welcher das Silizium und das Borosilikatglas auf atomarer Ebene fest gebunden sind. Sobald die beiden Flächen fest miteinander verbunden sind, ist der Vorgang abgeschlossen.

Der Verbund aus Silizium und Borosilikatglas wird nun mit der Piezokeramik verklebt. Unter Verwendung des zwei Komponenten Epoxy Klebers „Endfest 300“, wird eine Klebschicht konstanter Dicke von 20 µm auf das Borosilikatglas aufgetragen. Dies geschieht mit Hilfe einer in einer Semesterarbeit entstandenen Vorrichtung. Die verwendete Piezokeramik „Vibrit 1876“ wird anschließend auf der Klebschicht positioniert. Die Aushärtung erfolgt auf einer Heizplatte bei einer Temperatur von 70 °C. Die Strukturierung der Piezokeramik erfolgt nach der Aushärtung des Klebers. Verwendet wird hierzu die Wafersäge. Zur Erzeugung einer Elektrode werden zwei Schnitte, jeweils links und rechts im Abstand der gewünschten Breite, getätigt. Es ist darauf zu achten, dass die Schnitte mit der richtigen Höheneinstellung ausgeführt werden, da eine Beschädigung der Membran zu einem Funktionsverlust der entsprechenden Pumpkammer führt. Nach der Strukturierung der Masse, welche senkrecht zu der Richtung der Elektroden erfolgt, werden die Chips vereinzelt. Es erfolgt das Schneiden der Düsen auf die gewünschte Länge. Die Tropfenerzeuger werden nun mittels einer Sputter-Anlage hydrophobisiert. Verwendet wird hierbei eine Target-Folie, welche aus Teflon und Kohlenstoff besteht. Hierzu sind die Chips mit einer Lage Kupferband zu umwickeln, sodass die beim Sputtern verwendete Hochspannung keinen Schaden an der Piezokeramik verursacht. Die Düsenplatte bleibt frei. Die Tropfenerzeuger werden nun in einen Halter eingespannt und mit der Düsenfläche nach oben ausgerichtet. Der Vorgang des Sputterns belegt die Düsen mit einer Schicht Teflon, welches als hydrophobes Material eine Flüssigkeitsbildung an der Düsenfläche verhindert. Die 525 µm dicke Silizium Basisplatte besitzt eine Größe von

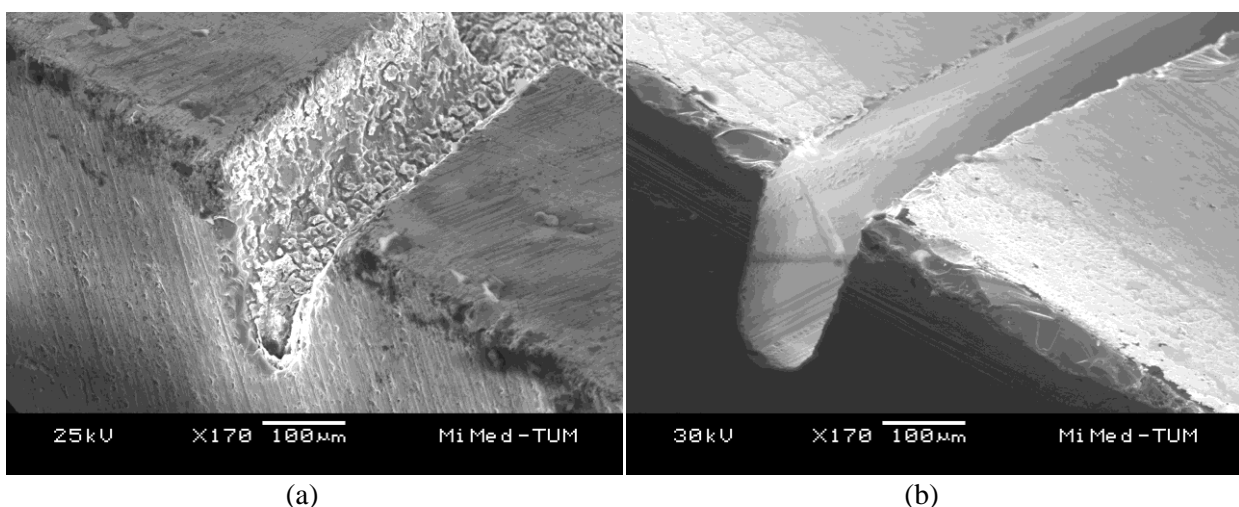


Abb. 12 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Düse hergestellt mit dem Laser (a) und nach aktuellem Herstellungsprozess mit einem Schnitt mit der Wafersäge (b) (entnommen aus Kagerer et al. (2012)).



ca. 17 x 12 mm. Die Piezokeramik, welche auf die Membran geklebt wird, besitzt eine Fläche von 16 x 12mm. Die strukturierten Elektroden besitzen eine Breite von 1,6 mm und Länge von 10 mm. Die Drosselbreite der Fluidzuführung ist 200  $\mu\text{m}$  und ihre Länge beträgt 1 mm. Die Pumpkammerbreite ist 2 mm. Das Borosilikatglas, aus welchem die Membran besteht, besitzt eine Dicke von 100  $\mu\text{m}$ . Insgesamt besitzt der Tropfenerzeuger eine Dicke von ungefähr 800  $\mu\text{m}$ . Die Abmessungen der verwendeten Materialien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Druckchips werden abschließend einzeln auf die dafür vorgesehenen Trägerplatinen geklebt. Zuvor wird noch ein Funktionstest der Düsen durchgeführt. Hierzu werden diese mit dem Testfluid Isopropanol gespült. Diese besitzen eine rückwärtige Fluidzuführung und eine Kontaktierungsfläche, über welche der Tropfenerzeuger mittels eines handelsüblichen Stecker an die elektrische Ansteuerung verbunden werden kann. Die Bohrungen links und rechts des Druckchips dienen dem schnellen Wechsel und leichten Einspannen des Tropfenerzeugers in den dafür vorgesehenen Halter. Die elektrischen Anschlüsse werden mittels Kupferlackdraht direkt mit den Elektroden verlötet (vgl. Abb. 13).

Die Dokumentation zur Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses umfasst die Aufzeichnung sämtlicher relevanter Messdaten. So werden die Höhen der Einzelmaterialien sowie die gefertigten Strukturgrößen wie Elektrodenbreite, Düsenbreite, Pumpkammertiefe und Drosselbreite in ihren Größen erfasst und in ein Messprotokoll, welches bei der Herstellung jedes verwendeten Druckkopfes geführt wird, eingetragen. Eine qualitätssichernde Maßnahme besteht darin, den Hub der Aktoren vorab zu testen. Hierzu wird ein Laser-Doppler-Interferometer des Typs „OVF3001“ der Firma „Polytec“ in Kombination mit dem Messkopf „OFV512“ verwendet. Die Messung des Hubs erfolgt kontaktlos durch die Veränderung der Frequenz des von der Oberfläche des Aktors reflektierten Laserlichtes. Auf Grund des Doppler-Effekts wird das Licht infolge der Bewegung der Aktoroberfläche bei einer Bewegung zum Messkopf hin in der Frequenz beschleunigt und bei einer Bewegung vom Messkopf weg in der Frequenz verringert. Die erreichten Ausschläge bei einer gegebenen Ansteuerung (sinusförmiger Spannungsverlauf) werden in einem Messprotokoll notiert und bei schlechter Leistung (bspw. Tropfenbildung) als Erklärung zu Rate gezogen.

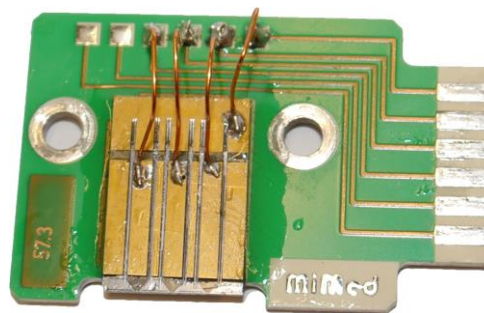


Abb. 13 Foto des am Lehrstuhl MiMed hergestellten Tropfenerzeugers, aufgebracht auf die Trägerplatine, welche eine Kontaktiereinheit und Fluidzuführung beinhaltet.

Tabelle 1: Verwendete Materialien und deren Abmessungen und Höhe.

Material	Abmessung [mm]	Höhe [ $\mu\text{m}$ ]
Silizium	17 x 12	525 $\pm$ 50
Borosilikat	17 x 12	100
Klebschicht	17 x 12	20
Piezokeramik	16 x 12	250

## 1.3 Nachteile des Stands der Technik

### 1.3.1 Nachteile der verfügbaren Verfahren zur Düsenfertigung

Die vorgestellten Verfahren zur Herstellung von Düsen in der Forschung und Industrie sind vielfältig. So werden mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren diverse Materialien bearbeitet. Eine Herstellung von Düsen in Silizium ist mit den Verfahren des Ätzens und der Laserfertigung möglich. Die Verwendung exakt gefertigter Glasdüsen ist auf den verwendeten Druckkopf nicht anwendbar, da dieser keine Aufnahmevorrichtung für eine externe Düse vorsieht.

Die Herstellung von Glasdüsen besitzt neben der Nichtanwendbarkeit auf einen Membrantropfenerzeuger den Nachteil, dass die zu fertigenden Düsengrößen nicht exakt erreicht werden. Experimente werden hier nicht mit exakt gefertigten Düsen ausgeführt, sondern es werden Tropfenexperimente zu gegebenen Düsenparametern durchgeführt. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Möglichkeit der Einstellbarkeit der Düsenlänge. Diese ist durch das Glasrohrziehen bestimmt und lässt sich nicht ohne Beeinflussung der Düsenquerschnittsöffnung manipulieren. Ebenfalls als problematisch erweist es sich, dass der Winkel der geschliffenen Glas-kante einen erheblichen Einfluss auf den Tropfenbildungsprozess besitzt (Fan et al., 2008). Die ungenaue Längen- und Querschnittöffnungsfertigung und die fehlende Möglichkeit den Kantenwinkel zu kontrollieren, stellen erhebliche Nachteile der Glasdüsenfertigung durch Schmelzen dar.

Die Herstellung mittels Ätzen in Silizium besitzt den Nachteil ein langwieriger Prozessschritt zu sein. So beträgt die Ätzrate von EDP in Silizium  $50 \mu\text{m/h}$ . Ein Vorteil des am Lehrstuhl hergestellten Tropfenerzeugers ist die vergleichsweise kurze Herstellungszeit. Der Ätzvorgang zur Herstellung einer Düse beträgt etwa vier Stunden. Dies ist mit der Forderung einen Druckkopf mit der Möglichkeit des Rapid Prototypings herzustellen unvereinbar. Ein Vorteil ist, dass es möglich ist, mit dieser Methode viele Düsen zur gleichen Zeit herzustellen, jedoch bildet der Herstellungsprozess der Düsen mit einer Zeit von vier Stunden den längsten Einzelschritt in der Fertigung des verwendeten Tropfenerzeugers. Ein weiterer Nachteil stellt sich in der Form der Düsen dar. Bedingt durch die asymmetrische Verteilung der Ätzgeschwindigkeiten behält eine geätzte Struktur die typische Pyramidenform. Dieses Verfahren lässt es nicht zu, Düsenstrukturen mit quadratischem Querschnitt zu fertigen.

Eine Herstellung mit Laser bietet eine Möglichkeit der Integration der Düsenherstellung in den Prozessschritt der Pumpkammer-Strukturierung. Ein großer Vorteil ist die kürzere Bearbeitungszeit, sowie die Möglichkeit die Düsengeometrie mit der Aktualisierung der CAD-Daten zu verändern. Die Kombination der beiden Herstellungsschritte Strukturierung und Schneiden der Düse spart im Gesamtherstellungsprozess Zeit, jedoch ist die Herstellungsqualität der Düsen nicht ausreichend. Der Hauptnachteil liegt in der geforderten Komplexität der Düsenstrukturen für den Tropfenerzeuger. Die Herstellung eines Kanals in Silizium ist nur bedingt möglich. So werden in der Industrie Düsenplatten hergestellt, welche an der Front eines Tropfenerzeugers montiert werden. Diese besitzen eine durch einen Laser gefertigte Düse, welche sich durch Bohren eines Lochs an der Front, einfach herstellen lässt. Wie in Abb. 12 (a) zu sehen, bietet ein mit einem Laser gefertigter Düsenkanal nicht dieselbe Oberflächenqualität der Düsenwand, welche erreicht wird, wenn die Düse mit einer Wafersäge gefertigt wird (vgl. Abb. 12 (b)).

### 1.3.2 Nachteile des Stands am MiMed zur Düsenfertigung

Die Fertigung der Düsen des Tropfenerzeugers erfolgt mit Hilfe der Wafersäge. Limitierender Faktor hierbei ist die Breite des Sägeblattes, welche für die Breite der gefertigten Düse bestimmend ist. Ebenfalls ist die Tiefe der gefertigten Düsen nur grob auf die Höhe der strukturierten Pumpkammer eingestellt. Die Fertigung einer Düse mit definierten und speziell freiwählbaren Abmessungen birgt durch Anpassung der Tropfenfluggeschwindigkeit und Tropfenvolumen einen Vorteil im Hinblick auf die erreichbare Druckqualität.

Das aktuelle Herstellungsverfahren ermöglicht es nicht, frei wählbare Düsenbreiten zu fertigen. Der Prozess ist hierbei auf das Angebot der Sägeblatthersteller angewiesen. Existiert für eine geforderte Düsenbreite kein entsprechendes Sägeblatt, so ist diese Düsengröße nicht zu fertigen. Die Schnitte für die zu fertigenden Düsen werden an der bisher vorhandenen Spitze der Düse positioniert. Diese ermöglicht es nicht, eine optimale Mittelpositionierung des Düsenschnittes zu gewährleisten.

Die Messung, Kontrolle und Sicherstellung der Qualität der gefertigten Düsen ist nicht ausreichend vorhanden. So werden die gefertigten Düsen nach dem Herstellungsprozess nicht in ihren Abmessungen kontrolliert. Um eine konstante Qualität des Düsenfertigungsprozesses zu gewährleisten, ist es daher notwendig eine konstante Schnittleistung des verwendeten Sägeblattes sicherzustellen. Bisher werden die Vorbereitungsschritte, welche zur Vorbereitung des Sägeblattes und der Schnitte dienen (Set-Up, Dressing, Hairline-Adjustment) nur sporadisch und nach Wechsel des Sägeblattes ausgeführt. Für eine konstante Fertigungsqualität und Genauigkeit, sind diese unerlässlich.

Die Tiefeneinstellung des Düsenschnittes basiert auf der Höhenmessung mittels eines Messtasters. Da auf der Oberfläche des verwendeten Siliziums herstellungsbedingte, lokale Höhenschwankungen von  $\pm 10 \mu\text{m}$  auftreten, bietet dieses Verfahren keine konstanten Ergebnisse. Der bisherige Prozess basiert darauf, die Düsentiefe mit der Pumpkammertiefe gleichzusetzen. Im Hinblick auf enger gesteckte Genauigkeitskriterien in der Fertigung gilt es diesen Prozess zu verbessern.

Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile der betrachteten Verfahren noch einmal zusammen.

Tabelle 2: Übersicht der Vor- und Nachteile der vorgestellten Herstellungsverfahren.

Verfahren	Vorteil	Nachteil
Laser	Integration von Prozessschritten, kurze Herstellungszeit, schnelle Anpassung von Geometrieänderungen	Unzureichende Qualität, hohe Oberflächenrauheit, V-Form der Düse (Eiler, 2012)
Ätzen	Hohe Fertigungsgenauigkeit, große Menge an Düsen in einem Schritt herstellbar	Lange Herstellungszeit, aufwendige Anpassung der Düsengröße
Glasziehen	Schnelle und einfache Herstellung, günstiges Material	Nicht anwendbar, ungenaue Fertigung der Düsengröße
Wafersäge	Hohe Oberflächenqualität, kurze Herstellungszeit,	Größe auf Sägeblatt begrenzt, Tiefe nicht exakt einstellbar

## 2 Eigener Ansatz

### 2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit gilt es den Einfluss der Größe der Düse auf den Tropfenbildungsprozess des am Lehrstuhl MiMed verwendeten Tropfenerzeugers zu untersuchen. Hierzu ist es notwendig eine Literaturrecherche zu den aktuell verwendeten Herstellungsverfahren in der Forschung und Industrie, sowie ein Vergleich mit dem am Lehrstuhl selbst praktizierten Prozess anzustellen. Da es sich in der vorliegenden Düse um eine Kanalströmung handelt, ist eine analytische Betrachtung der beeinflussenden Kräfte in Form der in der Fluidmechanik verwendeten dimensionslosen Kennzahlen wie Reynolds-, Ohnesorge- und Weber-Zahl zu berücksichtigen.

Hauptaufgabe der Semesterarbeit stellt die Herstellung verschiedener Düsengrößen dar. Diese sind mit einem quadratischen Querschnitt zu fertigen. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowohl in der Herstellung als auch in den folgenden Experimenten zu gewährleisten, ist eine Fertigungsgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  gefordert. Es gilt die Genauigkeit über einen ausreichend großen Probenraum zu verifizieren. Nach Abschluss des Entwurfs und der Durchführung des Herstellungsprozesses, gilt es die gefertigten Tropfenerzeuger zu evaluieren. Hierzu gilt es Experimente an dem vorhandenen Tropfenbeobachtungsstand durchzuführen und so die angenommenen Einflüsse der Düsenvariationen und gleichzeitig damit verbunden, der elektrischen Ansteuerung, zu validieren. Diese Experimente umfassen die benötigte Mindestspannung zur Bildung eines Tropfens zu unterschiedlichen Pulslängen, sowie die Messung der Geschwindigkeit und der Tropfengröße zu unterschiedlichen Pulslängen und Spannungen.

Die Experimente zum Tropfenbildungsprozess sind unter Verwendung eines Fluidgemisches durchzuführen, welches bestimmte fluidische Eigenschaften (Oberflächenspannung, Viskosität) besitzt.

Abschließend ist gefordert, die gesammelten Messwerte, Erkenntnisse und Ergebnisse zusammenzufassen und in Bezug zu den hergestellten Düsengrößen und verwendeten Parametern zu setzen. Zusammenfassend lässt sich die Aufgabenstellung wie folgt definieren:

- Theoretische Beschreibung des Einflusses der Düsengeometrie unter Berücksichtigung der fluidmechanischen, dimensionslosen Kennzahlen
- Düsenfertigung mit unterschiedlicher Breite mit einer Fertigungsgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  bei einer Minimalbreite von  $50 \mu\text{m}$
- Düsenfertigung mit unterschiedlicher Tiefe mit einer Fertigungsgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$
- Einfluss der elektrischen Ansteuerung auf den Tropfenbildungsprozess
- Möglichkeit zur gezielten und definierten Tropfenmanipulation
- Durchführen von Experimenten am Tropfenbeobachtungsstand
- Validierung der getroffenen Hypothesen mittels der Messergebnisse

## 2.2 Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung

Die erfolgreiche Abarbeitung der in der Aufgabenstellung dieser Semesterarbeit genannten Punkte, bietet verschiedene Vorteile für den verwendeten Mikrotropfenerzeuger und den resultierenden Tropfenbildungsprozess.

Der Herstellungsprozess der Düsen wird erweitert, sodass es möglich ist, Düsen unabhängig der Sägeblattbreite zu fertigen. Diese besitzen einen quadratischen Querschnitt. Durch Anpassen der Schnittparameter ist es möglich, jeden rechteckigen Querschnitt mit beliebiger Breite und Tiefe als Nut herzustellen. Im Allgemeinen gewährleistet die verbesserte Genauigkeit des Schnittvorgangs eine Steigerung der Schnittqualität jeder Anwendung der Wafersäge. Diese umfassen beispielsweise die Strukturierung des piezoelektrischen Aktors und die Vereinzelung der Druckchips. Die Oberflächenqualität der Düsenwände wird beibehalten.

Die Untersuchungen am Tropfenbeobachtungsstand dienen der Verifikation der postulierten Einflüsse. Der Einfluss der Düsengröße auf die Tropfenparameter wie Geschwindigkeit und Volumen ermöglicht eine definierte Menge an Flüssigkeit in Tropfenform zu dosieren. Dies ist für die Realisierung konstanter Druckqualität und beispielsweise Lab-on-a-Chip-Systemen notwendig.

Nach Untersuchung des Einflusses der elektrischen Ansteuerung sind diese Erkenntnisse gezielt zu verwenden. Der Einfluss des Parameters der elektrischen Ansteuerung (Pulslänge, Spannung) auf die Tropfenparameter, ermöglicht eine Erhöhung der Dosiergenauigkeit unabhängig der physischen Parameter der gefertigten Tropfenerzeuger. Dies bedeutet, dass ein Tropfenerzeuger mit einer Abmessung auf unterschiedliche Anwendungsbereiche angepasst wird, indem die elektrische Ansteuerung geändert wird.

Zusammenfassend ergeben sich die erwarteten Vorteile zu:

- Düsenfertigung mit frei wählbarer Breite und Tiefe unabhängig der Pumpkammertiefe und Sägeblattbreite
- Fertigung von Düsenkanälen mit quadratischem Querschnitt und geringer Oberflächenrauheit
- Erhöhung der Genauigkeit zum Schneiden der Tiefe bei Fertigungsprozessen mit der Wafersäge
- Erweiterung des Anwendungsbereiches von Wafersägenschnitten wie beispielweise gezielte Fertigung von Nuten
- Erhöhung der allgemeinen Fertigungsqualität bei Benutzung der Wafersäge durch gezieltes Vorbereiten und Durchführen der Versuche (Versetzen der Maschine in einen wiederherstellbaren Zustand)
- Möglichkeit zur gezielten und definierten Tropfenmanipulation durch geeignete Wahl der Düsengröße
- Möglichkeit der Tropfenmanipulation durch elektrische Ansteuerungsparameter
- Validierung mittels Tropfenexperimente

## 2.3 Lösungsstruktur

### 2.3.1 Fluidmechanische Grundlagen

Das folgende analytische Modell basiert auf den Gleichungen der Fluidmechanik. Hierbei wird die Eulersche Beschreibungsweise benutzt, welche die Benutzung ortsfester Koordinaten vorsieht. Damit sind die Strömungsgeschwindigkeit  $c = c(x, y, z, t)$ , der Druck  $p = p(x, y, z, t)$  und die Dichte  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  nur abhängig von den drei Raumkoordinaten und der Zeit. Im vorliegenden Fall wird die verwendete Flüssigkeit als inkompressibel angenommen, womit die Dichte  $\rho$  als konstant betrachtet wird. Auch die dynamische Viskosität  $\eta$  wird im Zuge der isothermen Betrachtung als konstant angenommen.

#### 1. Strömungsbetrachtung im Mikrokanal

Die zu betrachtende Strömung findet im Düsenkanal statt. In makroskopischen Systemen sind Oberflächen- und Reibungseffekte oft zu vernachlässigen. In kleiner werdenden Systemen steigt jedoch das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen. Dies führt im vorliegenden Mikrokanalsystem nach Scheicher (2004) zu folgenden Annahmen:

- Trägheitskräfte verschwinden aufgrund geringer Volumina
- Oberflächenkräfte bestimmen das Strömungsverhalten
- Reibungseffekte und Viskosität werden bei kleineren Querschnitten zunehmend wichtiger
- Rauheit von Oberflächen bestimmen das Strömungsprofil

#### 2. Dimensionslose Kennzahlen

Die Einordnung einer Strömung geschieht durch die Ermittlung bestimmter dimensionsloser Kennzahlen. Im Rahmen dieser analytischen Betrachtung wird die Berechnung dreier Kennzahlen als wichtig erachtet. Die Reynolds Zahl ermöglicht es, die vorkommende Strömungsart für einen gegebenen Strömungsquerschnitt zu berechnen. Dies ist wichtig, um die Annahme einer vorhandenen laminaren Strömung zu bestätigen, welche die analytische Betrachtung ermöglicht. Zur Einordnung der Wichtigkeit von Oberflächen- und Trägheitseffekten ist eine Berechnung der Weber-Zahl hilfreich. Schließlich wird weiterhin die Ohnesorge-Zahl bestimmt, welche den Einfluss der Viskosität auf den gebildeten Tropfen beschreibt.

Die Reynolds-Zahl ( $Re$ ) gilt als wichtigste Kennzahl der Fluidmechanik (Scheicher, 2004). Durch diese kann die Strömungsform (laminar oder turbulent) in einem gegebenen Kanalquerschnitt bestimmt werden. Die Art der Strömung ist abhängig von der Trägheit eines Fluids und dessen Viskosität. Bei laminarer Strömung ist das Verhältnis der Trägheitskräfte im Vergleich zu den Reibungskräften gering. Berechnet wird die Reynolds Zahl nach (2).

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot d_{hyd}}{\eta} \quad (2)$$

In dieser Gleichung werden die Dichte  $\rho$ , die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $c$ , der hydraulische Durchmesser  $d_{hyd}$  in das Verhältnis mit der dynamischen Viskosität  $\eta$  gesetzt. Der

hydraulische Ersatzdurchmesser ergibt sich nach Sigloch (2007) zu  $d_{hyd} = 4 \cdot A / U$  mit dem Umfang  $U$  und dem Strömungsquerschnitt  $A$ .

Die Weber-Zahl ( $We$ ) dient als Maß für die Tropfenverformung eines Fluids. Sie wird nach (3) bestimmt.

$$We = \frac{c^2 \cdot \rho \cdot l}{\gamma} \quad (3)$$

Hierbei ist  $c$  die Geschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte des Fluids und  $\gamma$  die Oberflächenspannung des Fluides und  $l$  die charakteristische Länge des betrachteten Strömungskanals.

Die Ohnesorge-Zahl ( $Oh$ ) ergibt sich aus den zuvor berechneten Kennzahlen zu (4).

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{(\gamma \cdot \rho \cdot l)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Nach Derby (2010) gibt es für Drop-On-Demand Tropfenerzeuger eine minimale Ausstoßgeschwindigkeit, welche sich nach (5) berechnen lässt.

$$c_{min} = \left( \frac{4 \cdot \gamma}{\rho \cdot d_{hyd}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Weiterhin definiert Derby einen Bereich in dem Fluide in einem Drop-On-Demand-Prozess druckbar sind und ob sie Satellitentropfen erzeugen (vgl. Abb. 14).

Nach Scheicher (2004) ist die kritische Reynolds-Zahl, welche in makroskopischen Betrachtungen bei 2300 liegt, in Mikrokanälen wesentlich niedriger. Genannt wird hier eine kritische Reynolds-Zahl von 1000 bei Abmessungen von 100  $\mu\text{m}$  bei quadratischem Querschnitt.

Da die Geschwindigkeiten im Kanal nicht bekannt sind, wird diese kritische Reynolds-Zahl benutzt um eine kritische Kanalgeschwindigkeit zu ermitteln ab welcher sich die laminare Strömung ablöst und turbulent wird. Diese ist nach (6) definiert.

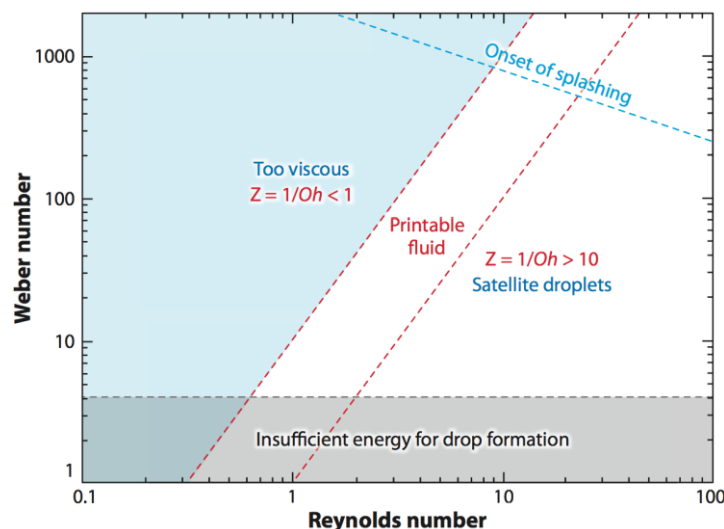


Abb. 14 Diagramm zur Bestimmung der Druckbarkeit eines Fluides in einem Drop-On-Demand-Tropfenerzeuger in Abhängigkeit der Kennzahlen (entnommen aus Derby (2010)).

$$c_{krit} = \frac{\eta \cdot R_{krit}}{\rho \cdot d_{hyd}} \quad (6)$$

Mit gegebenen Fluidparametern des Testfluides (Mischung aus Glycerin, Isopropanol und destilliertem Wasser)  $\eta = 5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,  $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$  sowie dem größten hydraulischen Querschnitt  $d_{hyd} = 100 \text{ } \mu\text{m}$  lässt sich ein minimales  $c_{krit}$  zu (7) errechnen.

$$c_{krit} = \frac{5 \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot 1000}{1,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 100 \text{ } \mu\text{m}} = 45,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7)$$

Es wird angenommen, dass diese Strömungsgeschwindigkeit nicht überschritten wird und somit die Betrachtungen unter Vorhandensein einer laminaren Strömung durchgeführt werden können.

### 3. Analytische Beschreibung von Strömungen

Die Gleichung von Navier-Stokes stellt in der Fluidmechanik die hauptsächliche Beschreibung von Strömungen dar. Unter Zuhilfenahme der Kontinuitätsgleichung können so laminare, reibungsbehaftete, inkompressible Strömungen betrachtet werden. Die nach den grundlegenden Strömungsbetrachtungen angenommenen Eigenschaften und die Berechnung der Reynolds-Zahl, ermöglichen es, eine analytische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zu benutzen, welche für Mikrokanäle häufig verwendet wird: Das Gesetz von Hagen-Poiseuille.

Grundsätzlich gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille (8) für Strömungen in langen, geraden und steifen Rohren mit kreisförmigen Querschnitten.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot dp}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (8)$$

Mit  $\dot{V}$  als Volumenstrom durch den Mikrokanal,  $r$  als Radius des Rohres,  $dp$  die Druckdifferenz zwischen Eingang und Ausgang des Kanals,  $\eta$  die dynamische Viskosität des strömenden Fluides und  $l$  die Länge des Mikrokanals. Da in der Mikrofluidik abweichende und speziell im vorliegenden Fall ein quadratischer Querschnitt vorliegt, sind Anpassungen in der Berechnungsvorschrift vorzunehmen. Bruus (2008) leitet eine Korrektur des Hagen-Poiseuille-Gesetzes für rechteckige Querschnitte her (9).

$$\dot{V} = \frac{h^3 \cdot w \cdot dp}{12 \cdot \eta \cdot l} \cdot \left( 1 - \sum_{n, odd}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{h}{w} \cdot \tanh\left(n \cdot \pi \cdot \frac{w}{2h}\right) \right) \quad (9)$$

Hierbei ist  $h$  die Höhe und  $w$  die Breite des Kanals. Der Ausdruck zur Anpassung des Volumenstroms lässt sich für einen quadratischen Querschnitt (Kantenlänge  $a = h = w$  und damit  $w/h = 1$ ) berechnen und führt zu einer vereinfachten Berechnungsvorschrift für den Volumenstrom in quadratischen Querschnitten.

Das Verhältnis von  $h$  zu  $w$  ist dann 1. Hierbei sei bemerkt, dass  $\tanh(\pi/2) = 0,9172$  und  $\tanh(3\pi/2) = 0,9998$ . Es ist also eine gerechtfertigte Annäherung, dass  $\tanh(n\pi/2) = 1$  für  $n \geq 3$ . Hierfür kann die Summe ausgewertet werden nach (10), (11), (12), (13).



$$1 - \sum_{n, \text{odd}}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \frac{192}{\pi^5} \cdot \tanh\left(\frac{1}{2}\pi\right) \quad (10)$$

$$\approx 1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \tanh\left(\frac{1}{2}\pi\right) - \frac{192}{\pi^5} \sum_{n=3,5,7}^{\infty} \frac{1}{n^5} \quad (11)$$

$$= 1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} + \frac{192}{\pi^5} - \frac{192}{\pi^5} \cdot \tanh\left(\frac{1}{2}\pi\right) \quad (12)$$

$$= 1 - \left\{ 0,630 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \left[ 1 - \tanh\left(\frac{1}{2}\pi\right) \right] \right\} = 0,4220 \quad (13)$$

Dies ergibt die Berechnung des Volumenstroms nach (14).

$$\dot{V} = 0,4220 \cdot \frac{a^4 \cdot dp}{12 \cdot \eta \cdot l} \quad (14)$$

Hieraus ergeben sich die Abhängigkeit des Volumenstroms von den Düsenparametern Breite und Länge zu (15) und (16).

$$\dot{V} \propto a^4 \quad (15)$$

$$\dot{V} \propto \frac{1}{l} \quad (16)$$

Demnach ist der Volumenstrom  $\dot{V}$  durch den Düsenkanal proportional zu dem Düsenquerschnitt  $a$  in der vierten Potenz. Ebenso ist dieser umgekehrt proportional zu der Länge  $l$  der Düse. Die Beziehungen sind in Abb. 15 dargestellt. Da der Tropfenbildungsprozess von vielen weiteren Faktoren wie beispielsweise der Oberflächenspannung und der Viskosität des Fluides abhängt, bietet die Beziehung des Volumenstroms und der Breite und Länge der Düse nur eine grobe Einschätzung der veränderten Tropfenparameter.

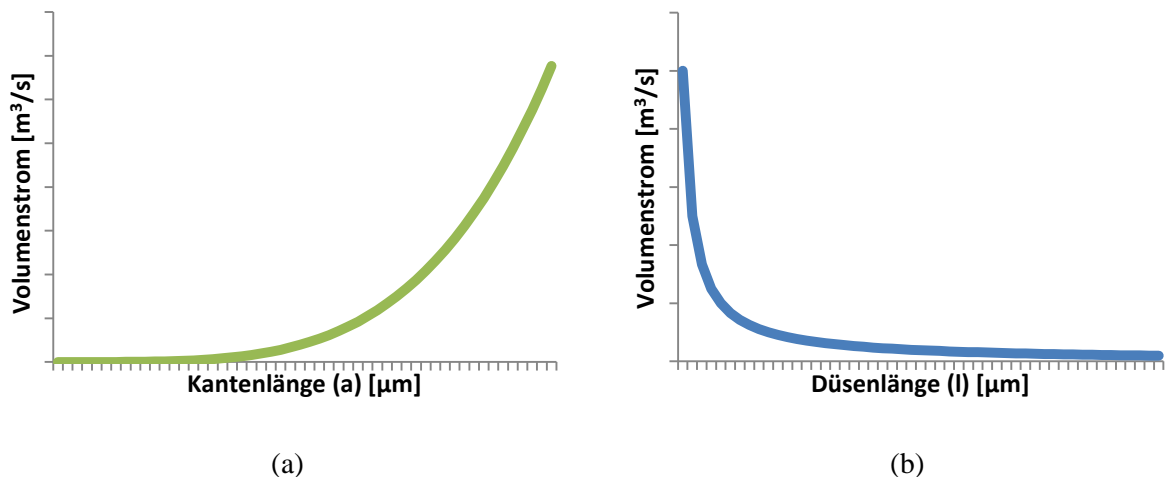


Abb. 15 Darstellung der gegebenen Proportionalitäten des Volumenstroms. (a) beschreibt die nach (15) und (b) die nach (16) gegebenen Abhängigkeiten.

### 2.3.2 Anforderungen an das Sägeblatt

Hauptaufgabe dieser Semesterarbeit ist die Herstellung von Düsen unterschiedlicher Breite, Tiefe und Länge mit hoher Fertigungsgenauigkeit. Hergestellt sind diese mit der am Lehrstuhl befindlichen Wafersäge. Das zu bearbeitende Material ist Silizium, da die Düsen direkt in Anschluss an die Pumpkammer in die Grundplatte gefräst werden. Vorgabe für die Form der Düse ist ein quadratischer Querschnitt. Hierfür ist es notwendig, ein Sägeblatt mit geringer Verrundung zu verwenden. Notwendig für einen optimalen Fluidfluss durch die Düse ist eine geringe Rauheit des Kanals. Diese kann nur erreicht werden, wenn das verwendete Blatt einen glatten Schnitt durch das Silizium zieht. Sogenanntes „Chipping“ wird durch Verwendung eines Sägeblattes mit geringer Körnung vermieden. Ein weiterer Faktor zur Auswahl des richtigen Sägeblattes besteht in dem Überstand des Blattes vom Flansch. Dieser Überstand limitiert die maximal erreichbare Schnitttiefe. Da das Schneiden der Düsen selbst eine Schnitttiefe von maximal 100  $\mu\text{m}$  erfordert, ist dieser Prozessschritt nicht limitierend, jedoch erfordert das Schneiden der Düsenlänge einen Durchschnitt durch die Borosilikatglas-Membran und das Silizium. Hierbei sind Schnitttiefen von bis zu 800  $\mu\text{m}$  notwendig (vergleiche Abb. 16).

Da eine hohe Oberflächenqualität des Düsenkanals von hoher Wichtigkeit für einen sauberen Tropfenbildungsprozess des Mikrotropfenerzeugers ist, gilt es Faktoren wie Chipping zu vermeiden. Dieser Ausbruch von kleinen Stücken des Siliziumsubstrats behindert den Fluss der Flüssigkeit durch die Düse und verhindert eine optimale Bildung und Formung von Tropfen. Verhindert werden kann das Chipping durch eine Erhöhung der Drehzahl, Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit und Verwendung eines Sägeblattes mit geringer Körnung.

Hauptauswahlkriterium des Sägeblattes ist seine Breite. Diese bestimmt sich nach der kleinsten zu fertigenden Düse. Da in der Aufgabenstellung dieser Semesterarbeit eine minimale Düsengröße von 50  $\mu\text{m}$  gefordert ist, ist nur ein Sägeblatt mit einer Schnittbreite kleiner / gleich 50  $\mu\text{m}$  zu verwenden.

Folgend sind die geforderten Sägeblatteigenschaften aufgelistet:

- Blatt zum Schneiden von Silizium
- Geringe Verrundung
- Kleine Körnung zur Vermeidung von Chipping
- Ausreichend Überstand für das Schneiden der Länge
- Breite kleiner 50  $\mu\text{m}$  zur Fertigung der kleinsten Düsen
- Hohe Drehzahl, niedriger Vorschub zur Vermeidung von Chipping

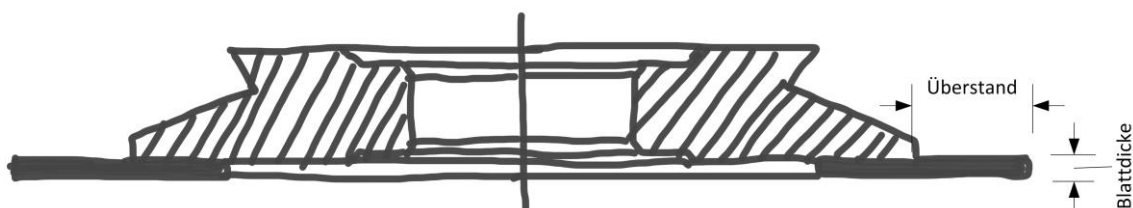


Abb. 16 Skizze eines Sägeblattes. Gezeigt ist ein Flansch (schraffiert) mit aufgeklebtem Sägeblatt (schwarz) im Halbschnitt. Eingezeichnet sind der Blattüberstand sowie die Sägeblattdicke.

### 2.3.3 Erstellung von Düsen definierter Breite

Ziel der Düsenherstellung ist die Erstellung von Düsen, welche exakte Maße besitzen und in reproduzierbarer Qualität herzustellen sind. Nachdem in Kapitel 1.3.1 und 1.3.2 (Nachteile des Stands der Technik) Defizite der Herstellungsmöglichkeiten und der aktuellen Herangehensweise an die Herstellung von Düsen aufgezeigt werden, gilt es diesen Prozess zu optimieren und an die gegebenen Forderungen anzupassen.

Die Düsen der in dieser Semesterarbeit verwendeten Mikrotropfenerzeuger sind mit einer Breite von 50 bis 100  $\mu\text{m}$  herzustellen. Unter Verwendung der Wafersäge und eines nach den Kriterien in Kapitel 2.3.2 genannten Sägeblattes ist es möglich, mit einem einzelnen Schnitt eine 50  $\mu\text{m}$  breite Düse zu schneiden. Die verwendete Wafersäge ermöglicht es, durch Eingabe von Programmschritten, mehrere Schnitte hintereinander auszuführen. Hiermit ist es also möglich, nach einem ausgeführten Schnitt, das Sägeblatt um einen gewissen Betrag in einer Achse zu verfahren und einen erneuten Schnitt auszuführen. Diese Funktion der Maschine wird verwendet, um für die zu fertigenden Düsen mehrere Schnitte zu tätigen um breitere Düsen zu erhalten. Diese Schnitte werden nacheinander ausgeführt und werden mit einem zentralen Schnitt durch die Düsenmitte begonnen. Es ist möglich, mit diesem ersten Schnitt die Düsenmitte zu positionieren, da die anschließenden Schnitte von diesem Schnitt ausgehen. Die dem zentralen Erstschnitt folgenden Schnitte besitzen einen betragsmäßig gleichen Abstand von dessen Mittellinie.

Der Abstand dieser Schnitte ist zunächst abhängig von der zu tätigenen Schnittbreite. Je breiter der Schnitt ist, desto weiter müssen die Schnitte versetzt werden. Da das Schneiden mit zu großem Abstand zwischen den einzelnen Schnitten eventuell Lücken oder „Wellen“ im Substrat hinterlässt, ist es zu vermeiden diese Abstände größer als die halbe Sägeblattgröße zu wählen. Neben der Breite des Schnittes und der Breite des Sägeblattes, spielt zur Vermeidung zu großer Abstände die Anzahl der durchzuführenden Schnitte eine große Rolle. Ein Richtwert könnte hier sein, dass sobald die zu fertigende Absatzbreite größer als die Hälfte der Sägeblattbreite ist, zwei weitere Schnitte hinzugefügt werden, wodurch sich der zu verwendende Abstand dann halbiert.

Die Parameter zur Einstellungen der Schnittbreite  $b$  bestehen also aus der Sägeblattbreite  $d$ , der Versatzbreite  $s$ , der zu fertigenden Breite  $b$  und der Anzahl der zu fertigenden Schnitte  $n$ . Die Schnittbreite  $b$  wird durch den ersten Schnitt auf die Sägeblattbreite  $d$  erstmals definiert. Ist nur ein Schnitt mit der Breite des Sägeblattes gefordert, so ist der Vorgang bereits abgeschlossen. Im nicht trivialen Fall der Forderung nach einer Schnittbreite größer der Sägeblattbreite gilt es nun durch geeignete Wahl der Schnittparameter die gewünschte Breite zu erreichen. Die Anzahl der Schnitte ist, exklusive des ersten, zentralen Schnittes, auf eine gerade Zahl festzulegen, da die Zentralpositionierung mit dem ersten Schnitt einen guten Weg darstellt, den gesamten Schnittvorgang an einer Position festzulegen. Für einen Schnitt unmittelbar größer als der Sägeblattbreite werden nun also drei Einzelschnitte benötigt, welche hintereinander ausgeführt werden. Hierbei fehlt nach der Durchfahrt des Sägeblattes durch die Mitte die Differenz der zu fertigenden Breite  $b$  und der Sägeblattbreite  $d$  um den Schnitt auf die gewünschte Breite zu bringen. Da eine gerade Anzahl an Schnitten gefordert ist, ist diese Differenz durch die verbleibende Anzahl an Schnitten zu teilen. Die Berechnungsvorschrift für die Schnittbreite  $b$ , welche mit einem Sägeblatt der Schnittbreite  $d$ , mit einer Versatzbreite  $s$  und einer Anzahl von Schnitten  $n$  gefertigt wird, ist in (17) definiert. Eine Umstellung dieser Formel zur Verwendung in der Erstellung von Schnittprogrammen ist in Kapitel 2.5.2 gegeben und wird verwendet, um die einzustellende Versatzbreite  $s$  anzugeben.

$$b = d + s * (n - 1) \quad (17)$$

Zu bedenken ist, dass die Sägeblattbreite nicht direkt der erzeugten Schnittbreite  $b$  entspricht. Die Vergrößerung des Schnittes ist durch die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Effekte wie Chipping und das durch die vorhandene Körnung am Sägeblatt begründete Kerf begründet. Daher gilt es die Schnittbreite des Sägeblattes empirisch zu ermitteln, um beste Schnittergebnisse zu erhalten. Zur Ermittlung der Schnittbreite und Einstellung dieser in den Wafersägenprogrammen bietet die Wafersäge selbst ein Programm, um ein „Hairline Adjustment“ durchzuführen. Diese Einstellung des „Fadenkreuzes“ geschieht durch das Setzen eines Schnittes auf eine freie Siliziumoberfläche. Anschließend an den ausgeführten Schnitt, wird das Fadenkreuz der Mikroskopkamera über den ausgeführten Schnitt gelegt. Durch Justierung der auf dem Bildschirm angezeigten Striche zur Markierung der Ober-, Mittel- und Unterposition des Sägeblatt-Schnittes, wird die Schnittbreite eingestellt. Die Breite wird hierbei stets angezeigt, sodass diese für die Berechnungen der Programme notiert wird. Ein weiterer Vorteil einer korrekten Einstellung des Fadenkreuzes liegt in der rein optischen Positionierung für einen Schnitt, da die angezeigten Linien im Monitor der Wafersäge die obere und untere Schnittkante des Sägeblattes anzeigen. Die Anzahl der Schnitte ist, soweit möglich, gering zu halten. Eine Erhöhung der Anzahl der Schnitte, führt zu einer Verlängerung der Fertigungszeit, welche für die geforderte Rapid-Prototyping-artige Herstellung des Piezomembrandruckkopfes kontraproduktiv ist.

Die weitere Verwendung der Wafersäge als Produktionsmittel zur Düsenherstellung besitzt den großen Vorteil, bereits in der Produktionskette eingegliedert zu sein. Eine Erstellung von Masken für die Lithografie zu Erstellung von Ätzmasken ist nicht ohne weiteres am Lehrstuhl möglich. Die Verwendung des Lasers, welcher bereits für die Strukturierung der Pumpkammern verwendet wird, scheidet aus, da (in Kapitel 1.3.2 aufgezeigt) die Qualität der gefertigten Düse unzureichend ist.

Abb. 17 zeigt schematisch den Ablauf eines mehrstufigen Schnittprogramms. Hierbei ist die linierte Position des Sägeblattes (2) der erste Schnitt, welcher in der Mitte der zu fertigenden Düse ausgeführt wird. Nach Versetzen der Schnittebene, werden weitere Schnitte links und rechts (alternierender Seitenwechsel nach jedem Schnitt) der Mitte ausgeführt, um eine größere Breite der Düse zu erreichen.

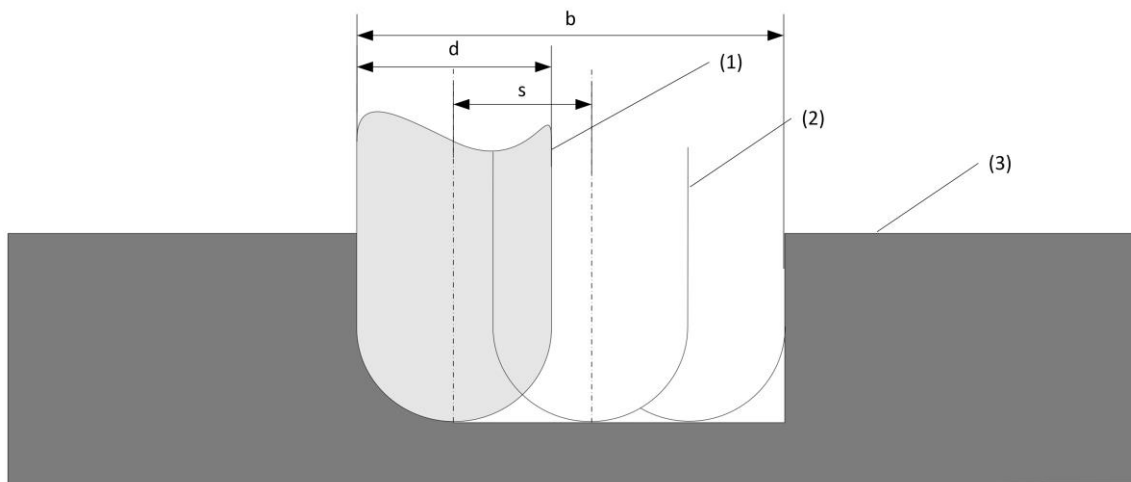


Abb. 17 Ablaufskizze der ausgeführten Schnitte zur Verbreiterung der Düsenbreite. (1): Sägeblatt. (2): Position des ersten Schnittes. (3): Siliziumsubstrat. Bemaßt sind Sägeblattbreite  $d$  und Versatzbreite  $s$  und Düsenbreite  $b$ .

### 2.3.4 Erstellung von Düsen definierter Tiefe

Unterschiedliche Fertigungsarten besitzen verschiedene erreichbare Formen der Düsen. So kann mit einem Excimer-Laser leicht eine runde Düse als Loch in eine Düsenplatte gebohrt werden und mit einem Ätzprozess eine quadratische Düse als Öffnung in ein Siliziumsubstrat geätzt werden. Der Prozess des Trennschleifens mittels einer Wafersäge bietet die Möglichkeit der freien Bestimmung einer rechteckigen Geometrie auf Basis der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Vorgehensweise. Substantiell für die erreichbare Herstellungsgenauigkeit ist in diesem Fall die Positioniergenauigkeit des ersten Schnittes, da von diesem aus, sämtliche Schnitte in relativen Bemaßungen durchgeführt werden.

Die Positionierung in der y-Achse (Achse zur Positionierung des Schnittes in die Düsenmitte) ist mit einfachen Mitteln (Messmikroskop der Wafersäge) durchzuführen. Die Positionierung der Höhe jedoch fordert die Messmittel heraus. Die in der Aufgabenstellung geforderten Düsengeometrien besitzen einen quadratischen Querschnitt. Damit ist die Tiefe der zu fertigen Düsen ebenso groß wie deren Breite. Das Schneiden der Breite einer Düse erfolgt in Relation zum ersten gesetzten Schnitt in der Mitte. Damit reicht hier die relative Positionierung des Wafersägenprogramms zu diesem ersten Schnitt. Die Tiefe einer Düse jedoch ist relativ zur Oberfläche des Siliziums zu fertigen. Da auf einem Siliziumwafer Höhenschwankungen von  $\pm 10 \mu\text{m}$  keine Seltenheit sind, gilt es ein Verfahren zu verwenden, welches diese Schwankungen ausgleicht. Eine Möglichkeit besteht darin die Höhe des Siliziums, welches zur Bearbeitung mit der Wafersäge auf eine Klebefolie aufgebracht wird, mittels eines Tasters zu messen. Das bisherige Verfahren besteht darin, nach Aufbringen des Siliziums auf die Klebefolie, fünf Messpunkte in der Nähe der Pumpkammer zu vermerken und den resultierenden Mittelwert als Höheneinstellung für die Wafersäge zu verwenden. Diese Messungen sind allerdings nicht ausreichend und führen zu Schwankungen in der Fertigungstiefe, hervorgerufen durch die genannten, lokalen Höhenunterschiede.

Die Wafersäge selbst besitzt eine Funktion (Set Up), bei welcher der verbleibende Durchmesser des verwendeten Sägeblattes gemessen wird. Dieser Prozess ist nach Wechsel eines Sägeblattes, längerer Benutzung oder Schleifvorgang (dem sogenannten Dressing) nötig, um eine exakte Höhenpositionierung der Schnitte zu gewährleisten. Dies geschieht durch Verfahren des Werkstückhalters in die Schnittebene des Sägeblattes. Nach Beschleunigen der Spindel, welche das Sägeblatt aufnimmt, wird dieses langsam abgesenkt. Während des Vorgangs wird der elektrische Widerstand zwischen Sägeblatt und Werkstückhalter (Chuck) gemessen, so dass der Absenkvorgang bei Kontakt (Kurzschluss der elektrischen Verbindung) sofort abgebrochen wird und die Größe des Sägeblattes bestimmt werden kann. Durch eine ausreichend hohe Drehzahl, wird sichergestellt, dass der aufgezeichnete Durchmesser des Sägeblattes über den Umfang konstant ist. Der Abschleiß des Sägeblattes während dieses Vorgangs ist zu vernachlässigen. Diese wird in einem automatischen Prozess als verbleibende Sägeblattgröße gespeichert und es wird der entstandene Abtrag in Mikrometern angezeigt.

Die Anwendung dieses Verfahrens ist nicht exakt auf den vorliegenden Fall durchzuführen. Das verwendete Siliziumsubstrat besitzt keine elektrische Leitfähigkeit und ein kontinuierliches Absenken der Schnittebene ist mit dem verwendeten Gerät nicht möglich. Es gilt nun diesen Prozess zu adaptieren und ein Verfahren zur Positionierung der z-Achse auf Höhe der Oberfläche des Siliziumsubstrates zu entwickeln.

Durch Verwendung eines ähnlichen Verfahrens ist es möglich eine hohe Positioniergenauigkeit der Wafersäge in der z-Achse zu erreichen. Nach Messung der ungefähren Höhe mit Hil-

fe des Messtasters an jedem zu fertigenden Chip (Verbund aus 3 Düsen) wird eine Position unterhalb der Düsen, welche für den Tropfenbildungsprozess keine Funktion hat, angefahren. Das Schnittprogramm zur Fertigung der Düsen wird an der nicht benötigten Stelle ausgeführt und anschließend überprüft, ob das Sägeblatt bereits auf Höhe der Siliziumoberfläche ist (vergleiche Position des Schnittes in Abb. 18). Zur verbesserten Darstellung ist der Positionierungsvorgang in zwei Ansichtsebenen dargestellt. Abb. 19 zeigt den Vorgang mit der Ebene der Düsenplatte als Vorderansicht. Hierbei wird die anfänglich zu hoch angesetzte Positionierung der Schnittebene über der Substratoberfläche klar. Nach der beschriebenen optischen Überprüfung wird die Schnittebene abgesenkt und der Schnitt erneut ausgeführt. Kratzt das Sägeblatt an der Oberfläche, so kann der Schnitt zur Breite durchgeführt werden. Abb. 18 zeigt den Schnittvorgang aus der Draufsicht. Hierbei ist die Positionierung des Testschnittes abseits der Pumpkammer verdeutlicht. Der Schnitt wird auf Starthöhe ausgeführt (a), nach optischer Überprüfung erfolgt eine Höheneinstellung (b), der Schnitt wird mit herabgesenkter z-Achse erneut ausgeführt (c), Kratzer auf der Siliziumoberfläche indizieren eine korrekte Einstellung der Oberflächenhöhe. Nach Erreichen der Oberflächenhöhe wird die benötigte Tiefe der Düse durch Einstellung des „Height Adjust“ in der Wafersäge eingestellt. Der Vorgang ist nun nach Kapitel 2.3.3 durchzuführen.

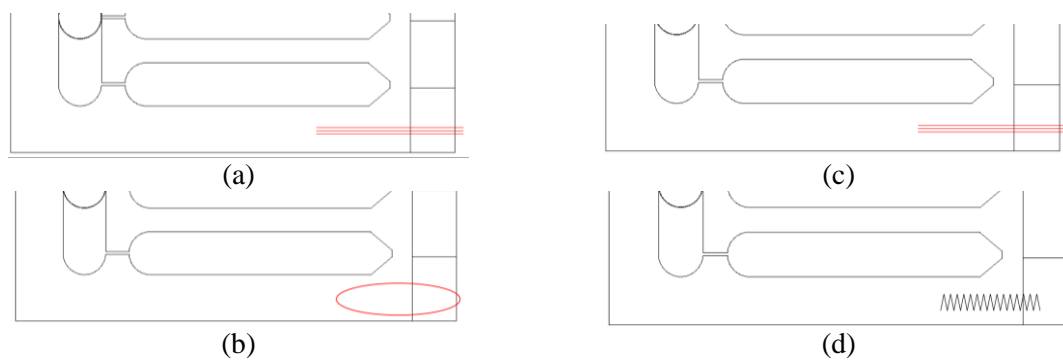


Abb. 18 Skizze zur Justierung der Düsen. Schnitte an nicht verwendeter Stelle (a), keine Kratzer nach Überprüfung (b), Absenken der z-Achse und erneutes Ausführen der Schnitte (c), Kratzer auf der Siliziumoberfläche (d).

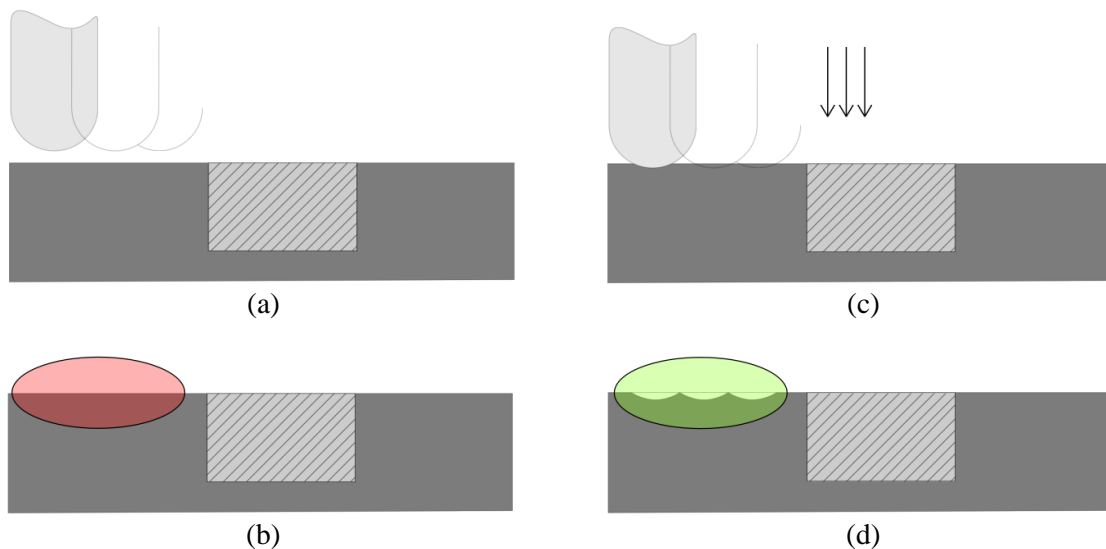


Abb. 19 Ablaufskizze der ausgeführten Schritte. (a): Erster Schnittvorgang, (b) Kontrolle der Oberfläche, (c) Absenken der Schnittebene, (d) erneute Kontrolle der Oberfläche.

## 2.4 Prozessbeschreibung

Zusammenfassend wird folgend der resultierende Herstellungsprozess dargestellt. Die Fertigung der Düsen mittels der Wafersäge stellt die für den Tropfenerzeuger geeignete Methode dar. Da in der bisherigen Fertigung nur einheitliche Düsengrößen gefertigt werden, wird dieser Schritt durch den in Abschnitt 2.3.3 erläuterten Ablauf ersetzt. Dieser ermöglicht es, Düsen mit beliebiger Breite größer der Sägeblattbreite zu fertigen. Die Tiefeneinstellung einer Düse erfolgt bisher nur durch Messtaster und die Tiefe der Pumpkammer, ersetzt wird dieser Schritt durch das in Abschnitt 2.3.4 erläuterte Verfahren. Der Fertigungsprozess läuft nun wie folgt ab:

- Das Waferviertel, welches die strukturierten Pumpkammer-Elemente enthält wird zunächst auf eine zwischen zwei Ringe gespannte Folie geklebt und in die Wafersäge eingesetzt (Abb. 20 (a)).
- Zur Einstellung der Tiefe erfolgt ein Schnittvorgang abseits der Pumpkammer (Abb. 20 (b), rote Linie) um die fluidführenden Komponenten nicht zu beschädigen. Ist keine Einwirkung des Sägeblattes auf der Oberfläche zu erkennen, wird die Schnitthöhe um jeweils 5  $\mu\text{m}$  abgesenkt.
- Ist ein leichtes Ankratzen der Oberfläche zu erkennen (Abb. 20 (c), blaue Linie), ist die Schnitthöhe korrekt eingestellt. Es erfolgt die Positionierung in der Mitte der Pumpkammer und der erste Schnitt der Düse (Abb. 20 (c), rote Linie).
- Ist eine Düse mit einer Breite größer der Sägeblattbreite gefordert, so erfolgen weitere Schnitte zur jeweils linken und rechten Seite des ersten Schnittes (Abb. 20 (d), rote Linien).
- Die weiteren auf dem aktuellen Druckchip verbleibenden Düsen werden mit derselben Höheneinstellung geschnitten. Zur Bearbeitung eines neuen Druckchips ist die Höheneinstellung durch Ankratzen erneut auszuführen (Abb. 20 (e)).
- Abschließend erfolgt die Einstellung der Düsenlänge und ein Schnitt quer zur Düsenlinie, um diese auf die gewünschte Länge zu kürzen (Abb. 20 (f), rote Linie).

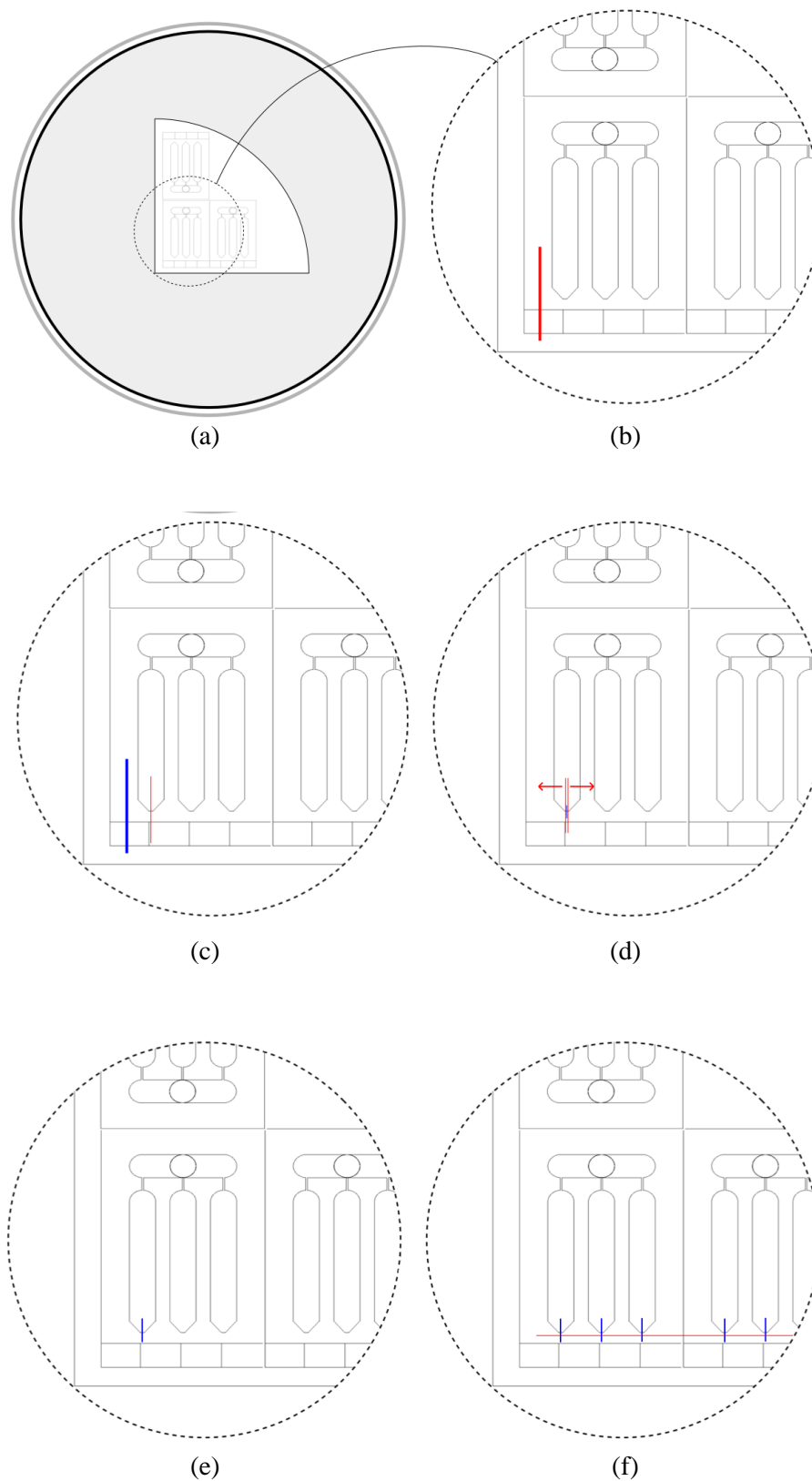


Abb. 20 Diagramm des Herstellungsprozesses der Düsen. Ein Viertelwafer mit Pumpkammerstrukturen wird auf Folie geklebt und gespannt (a), der erste Schnitt zur Höheneinstellung wird abseits der Pumpkammer getätigt (b). Nach Überprüfung auf korrekte z-Achsen-Position folgt der erste in der Pumpkammer (c), hiernach folgen zwei oder mehr weitere Schnitte (d) zur Fertigstellung der Düse (e). Abschließend werden die Düsenlängen durch einen Schnitt quer zum Düsenkanal geschnitten (f).



## 2.5 Realisierung

### 2.5.1 Sägeblattwahl

Dier Herstellung der für diese Semesterarbeit benötigten Düsen erfolgt mit der am Lehrstuhl vorhandenen Wafersäge. Mit dieser ist es möglich, exakte Schnitte auf den Werkstücken durchzuführen. Wichtigstes Werkzeug ist hierbei das Sägeblatt, welches auf den vorgesehenen Schnitvorgang anzupassen ist. In Kapitel 2.3.2 werden die Anforderungen erklärt und aufgelistet. Zu wählen ist ein Sägeblatt für einen Flansch mit einem Durchmesser von 2 Zoll und einem Bohrungsdurchmesser von 19 mm. Diese Werte sind unter den Herstellern von Wafersägen weitgehend standardisiert. Ebenfalls gibt es die Möglichkeit ein sogenanntes „Hub-Less“ Sägeblatt zu verwenden, welches eine integrierte Einheit aus Flansch und Sägeblatt ist.

Die erste Anforderung an das Sägeblatt stellt die Eignung für das Trennschleifen von Silizium dar. Standard für dieses Material ist eine Nickelbindung der Schleifkörper im Sägeblatt. Eine Nickelbindung zeichnet sich durch hohe Lebensdauer und damit Blattstandzeit aus. Im Schnitt von Silizium besitzt die Schnitttrichtung einen geringen Einfluss.

Die Schnittbreite  $w$  eines Blattes ist in (18) definiert.

$$w = d + k + c \quad (18)$$

Wobei  $d$  die Breite des Sägeblattes ist,  $k$  der Kerf und  $c$  das Chipping bezeichnet. Für die Bearbeitung von Silizium und einem nickelgebundenen Sägeblatt mit einer Körnung von  $6 \mu\text{m}$  sind folgende Richtwerte anzunehmen  $k = 10 \mu\text{m}$  und  $c = 20 \mu\text{m}$  (minitron, 2012). Hieraus ergibt sich eine gewünschte Schnittbreite von  $w = 50 \mu\text{m}$  eine Sägeblattbreite von  $d = 20 \mu\text{m}$ . Das Chipping wird durch Anpassen der Schnittparameter wie Geschwindigkeit und Drehzahl reduziert und durch Verwendung eines Blattes mit geringer Körnung lässt sich ein geringerer Kerf erreichen.

Um einen  $50 \mu\text{m}$  breiten Schnitt im vorhandenen Siliziumsubstrat durchzuführen, wird das Sägeblatt „FTBR4645100“ von „Mitsubishi“ gewählt. Dieses besteht aus einer galvanischen Nickelbindung mit Diamantkorn. Die Bezeichnung „R“ steht für „rigid“ und damit für besonders widerstandsfähiges Material. Dieses ist darauf ausgelegt minimale Kerf-Verluste und nahezu ausbruchfreie Kanten zu ermöglichen. Das Blatt besitzt eine maximale Blattdicke von  $45 \mu\text{m}$ , eine Körnung von  $4 - 6 \mu\text{m}$  und einen minimalen Überstand von  $1 \text{ mm}$  (vgl. Abb. 21).



(a)



(b)

Abb. 21 Foto von Diamantkörnern in galvanischer Nickelbindung (a) (entnommen aus minitron (2012)) und das verwendete Sägeblatt „FTBR4645100“.  $4 - 6 \mu\text{m}$  Körnung, max. Blattbreite  $45 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  Überstand (b).

### 2.5.2 Umsetzung in Programmcode

Die zur Herstellung der Düsen verwendete Wafersäge „DAD 321“ von „DISCO“ besitzt die Funktion programmierbar zu sein. Der „DAC“ genannte Funktionsmodus, ermöglicht es eine Abfolge von bis zu 30 Anweisungen einzuspeichern, welche nacheinander abgearbeitet werden. Vergleichbar mit der Struktur der Programmiersprache BASIC ist jeder Befehl mit einer bezeichnenden Schrittnummer, einem Befehlsnamen und dazugehörigen Parametern aufgebaut. Hierbei ist es ebenfalls möglich Loop-Strukturen zu erstellen, welche einen Sprung zu einem bestimmten Befehl darstellen. Das Gerät ist in Abb. 22 dargestellt. Die Wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 3 beschrieben. Die Befehle umfassen des Weiteren das Verfahren der an der Wafersäge vorhandenen Achsen (x-, y- und  $\theta$ -Achse), das Durchführen eines Schnittes und das Festlegen des Koordinatenursprungs ausgewählter Achsen. Eine Auflistung der in den Programmen zum Schneiden der Düsen verwendeten Befehle und dazugehörigen Parametern ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Zu jedem der vorhandenen Befehle gibt es einen Satz an Parametern, welche gesetzt werden um den Befehl korrekt auszuführen. Der Befehl Achop ist hierbei der wichtigste, da dieser einen Vorwärtsschnitt durchführt. Die hierbei einstellbaren Parameter sind die Absenkschwindigkeit, welche im Feld „PARA\_1“ als Wert in nm/s einzugeben ist.

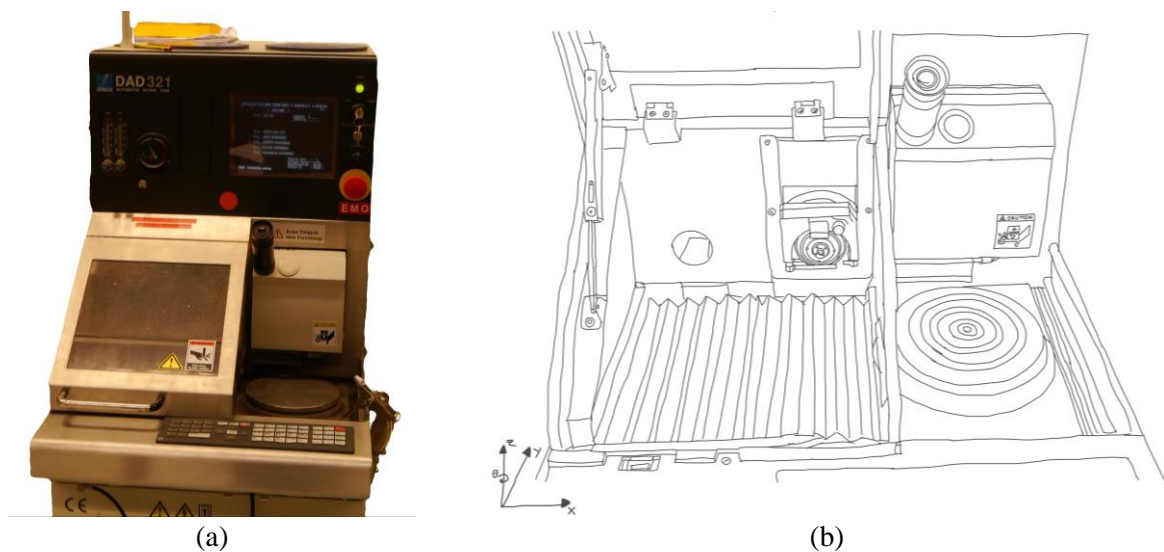


Abb. 22 Foto der verwendeten Wafersäge DAD 321 (a). Detailzeichnung der Hauptkomponenten bei geöffnetem Bearbeitungsraum (b): Werkstückhalter (Chuck, unten rechts), Mikroskop und Spindel mit Sägeblatt.

Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Wafersäge.

Eigenschaft	Wert
Maximale Werkstückgröße (Durchmesser) [Zoll]	6
Größe Schnittweite x-Achse [mm]	192
Größe Schnittweite y-Achse [mm]	162
Genauigkeit y-Achse (absolut) [ $\mu\text{m}$ ]	5 bei 160 mm Verfahrweg
Hub z-Achse [mm]	32
Drehzahl der Spindel [U/min]	3000 – 40000

Diese beschreibt die Geschwindigkeit, mit welcher sich das Sägeblatt bei Beginn eines Schnitte in der z-Achse in das Substrat hineinsenkt. Der zweite einzustellende Parameter („PARA\_2“) bezeichnet die ausgeführte Schnittlänge in Mikrometern. Wichtig ist hierbei zu bedenken, dass Beginn und Ende eines Schnittes durch das Lot des Mittelpunktes des Sägeblattes auf die Oberfläche des Werkstückes definiert ist. Bei tiefen Schnitten ist somit der Auslauf des Sägeblattes zu berücksichtigen. Da es sich bei den vorliegenden Schnitten um Tiefen von 50 bis 100 µm handelt, ist der Auslauf des Sägeblattes nicht zu bedenken. Nächster wichtiger Parameter des Schnittbefehls ist die Höhe des Schnittes. In Kombination mit dem nächsten Feld „MODE“ bezeichnet man hiermit die Schnitthöhe oder Schnitttiefe. Ist in das „MODE“ Feld ein „H“ eingetragen, so gilt die in „HEIGHT“ eingetragene Zahl als Abstand der Sägeblattkante von der Oberfläche des Werkstückhalters in Millimetern. Ist hingegen „D“ im „MODE“ Feld eingetragen so bezieht sich „HEIGHT“ auf die Tiefe des Schnittes von der Oberfläche des Werkstücks aus gesehen. Als „SPEED“ wird für diesen Befehl die Vorschubgeschwindigkeit in mm/s bezeichnet.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Steuerbefehle. Eingetragen sind die Eigenschaften der Parameter, welche für eine erfolgreiche Ausführung des Befehls notwendig sind.

Befehl	Ali_p	Idx_X / Idx_Y	Achop	Loop
Funktion	Markiert die Ursprungsposition der ausgewählten Achse	Verfährt die X- / Y-Achse	Führt einen Schnitt entlang der X-Achse aus	Springt zu einer ausgewählte Stelle und wiederholt die Schritte
PARA_1	-	-	Absenkgeschwindigkeit in nm/s	Anzahl der Wiederholungen
PARA_2	-	-	Länge des Schnittes in µm	Sprungpunkt im Programm
PARA_3	Achsenbezeichnung (X,Y, Theta)	-	-	-
HEIGHT	-	-	Höhe des angesetzten Schnittes	-
MODE	-	-	Höhe vom Werkstückhalter („H“) oder von der Werkstückhöhe („D“) aus gemessen	-
SPEED	-	-	Vorschubgeschwindigkeit in mm/s	-
INDEX	-	Verfahrweg in mm	-	-
MODE	-	Relative („R“) oder absolute („A“) Angabe	Relative („R“) oder absolute („A“) Angabe	-

Der zweite wichtige Befehl wird durch das Kommando „Idx\_Y“ bezeichnet und steht für „Index Y“. Hiermit ist eine indizierte Bewegung in der y-Achse gemeint. Dieser Befehl besitzt zwei weitere Parameter, welche für eine korrekte Ausführung wichtig sind. „INDEX“ bezeichnet die Distanz in Millimeter, um welche die y-Achse verfahren werden soll. Hierbei bezeichnet ein positiver Wert ein Verfahren des Sägeblattes zum Benutzer hin und ein negativer Betrag ein Verfahren vom Benutzer weg. Die Angabe des Feldes „MODE“ gibt an, ob die Distanz relativ zur aktuellen Position („A“) oder zum Koordinatenursprung und damit absolut („A“) stattfindet.

Die Fertigung der Düsen erfolgt nach dem Prinzip der versetzten Schnitte (vgl. Kapitel 2.3.3). Zunächst gilt es, die erforderlichen Versatzbreiten zu ermitteln, um die geforderten Düsengrößen von 50, 70 und 100 µm zu fertigen. Um eine Düse der Breite  $b$  mit einem Sägeblatt, welches eine Schnittbreite  $d$  besitzt, in einer Anzahl von  $n$  Schnitten zu fertigen, beträgt die Versatzbreite  $s$  nach (19).

$$s = \frac{b - d}{n - 1} \quad (19)$$

Die Anzahl der Schnitte ist immer ungerade, da die Festlegung der Mitte der Düse durch den zuerst ausgeführten Schnitt erfolgt. Von diesem Schnitt aus werden die folgenden Schnitte um den Betrag  $s$  und  $-s$  versetzt.

Praktikabel ist die Ermittlung der notwendigen Anzahl an Schnitten. Zur Ermittlung der Anzahl der Schnitte ist es von Vorteil einen Orientierungswert für die Versatzbreite anzugeben. Wichtig ist, dass es beim Schneiden nicht zu einer Rauheit der Düsenoberfläche durch Rillenbildung kommt. Als Richtwert wird hierbei ein Viertel der Sägeblattbreite festgelegt, da die Verrundung des Sägeblattes in diesem Bereich sehr gering ist. Die Anzahl der auszuführenden Schnitte ist gegeben durch (20).

$$n = \text{odd} \left( \text{ceil} \left( \frac{b - d}{e} \right) \right) \quad (20)$$

Hier bezeichnet  $e$  den vorgegebenen Richtwert für die Versatzbreite. *Ceil* (Ceiling) bezeichnet die Aufrundungsfunktion, welche zunächst die Schnittanzahl auf die nächste Ganzzahl aufrundet. *Odd* bezeichnet die Aufrundung der Anzahl der Schnitte auf die nächste ungerade Zahl. Mithilfe der beiden Berechnungsvorschriften (19) und (20) lassen sich nun also alle Schnittparameter berechnen. Die für die geforderten Schnitte notwendigen Parameter, sowie drei weitere Größen sind in Tabelle 5 dargestellt. Ein Nachteil der Programmierung der Wafersäge ist, dass nicht die Möglichkeit besteht mit Variablen zu arbeiten. Damit vergrößert sich die resultierende Programmgröße mit der Vergrößerung der zu fertigenden Nut, da jede Erhöhung der Schnittanzahl eine Folge von vier Befehlen mit sich bringt (Versatz, Schnitt, Versatz in die entgegengesetzte Richtung, Schnitt). Die Anzahl der Schnitte lässt sich durch eine Vergrößerung der Versatzbreite reduzieren, um die kritische Anzahl von 13 Schnitten nicht zu überschreiten. Diese setzen sich aus den 30 verfügbaren Befehlen zusammen von welchen ein Befehl für die Initialisierung („Ali\_p“), ein Befehl für den Zentralschnitt („Achop“) und zum Beenden ein Befehl benötigt wird. Da jeder weitere Schnitt 2 Befehle verbraucht („Idx\_Y“ und „Achop“), steht die Gesamtanzahl von 12 weiteren Schnitten zur Verfügung.

Die Ermittlung der Schnittbreite des verwendeten Sägeblattes erfolgt mit der Wafersäge selbst. Die Messungen ergeben - im Prozess mit mehreren Schnitten - eine zu verwendende

Schnittbreite von 46  $\mu\text{m}$ . Zu bemerken ist, dass zur Herstellung einer einzelnen Düse mit einer Breite von 50  $\mu\text{m}$  nur ein einzelner Schnitt getätigt wird, da durch den Kerf des verwendeten Blattes die Schnittbreite bei einem einzelnen Schnitt bei 50  $\mu\text{m}$  liegt. Tabelle 5 zeigt die für die geforderten Düsenbreiten verwendeten Parameter. Hierbei wird die Anzahl der Schnitte bei der Fertigung einer 100  $\mu\text{m}$  breiten Düse um zwei auf insgesamt fünf Schnitte erhöht, da eine möglichst ähnliche Versatzbreite für den Schnittprozess als vorteilhaft angenommen wird.

Die Einstellung der Schnittparameter für das Schneiden in Silizium erfolgt nach einer vorhergegangenen Diplomarbeit. Nach (Eiler, 2012) sind die Schnittparameter auf eine Umdrehungszahl der Spindel von 38.000 Umdrehungen pro Minute, die Vorschubgeschwindigkeit der Schnitte auf 5 mm/s, die Absenkgeschwindigkeit auf 0,4 mm/s und die Länge des Schnittes auf 2 mm einzustellen. Die direkte Übernahme dieser Parameter für die einzelnen Schnitte, gewährleisten eine Sicherstellung der Schnittqualität und der Qualität des Gesamtergebnisses.

Um eine Düse mit einer Breite von 70  $\mu\text{m}$  zu fertigen ist es notwendig, drei versetzte Schnitte durchzuführen. Das in Abb. 23 gezeigte Programm führt die benötigten Schritte aus. In Schritt 1 werden die Achsen der Wafersäge ausgerichtet. Das Sägeblatt befindet sich derzeit über der Pumpkammer und in der Mittellinie der zu schneidenden Düse. In Schritt 2 wird der erste Schnitt mit den aus Tabelle 8 bekannten Werten ausgeführt. Schritt 3 führt einen Versatz entlang der Y-Achse um einen Betrag von 12  $\mu\text{m}$  in negative Richtung aus. Schritt 4 erzeugt einen Schnitt an der angefahrenen Position. In Schritt 5 wird das Sägeblatt um die doppelte Versatzbreite (also 24  $\mu\text{m}$ ) in positive Richtung gefahren um in Schritt 6 den letzten Schnitt auszuführen. Die Parameter für die Sägeblattbreite  $d$  und Versatzbreite  $s$  sind in Abb. 17 zu sehen.

	Mode	PARA_1	PARA_2	PARA_3	HEIGHT [mm]	MODE	SPEED [mm/s]	INDEX [mm]	MODE
1	Ali_p	0	0	XYT	0,0000	H	0,0	0,0000	R
2	Achop	400000	2000000	0	0,0000	D	5,0	0,0000	R
3	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	-0,0120	R
4	Achop	400000	2000000	0	0,0000	D	5,0	0,0000	R
5	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0240	R
6	Achop	400000	2000000	0	0,0000	D	5,0	0,0000	R
7	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	1,6000	R

Abb. 23 Beispielprogramm für das Fertigen einer Düse mit einer Breite von 70  $\mu\text{m}$  mittels drei Schnitten. Hierbei werden für drei Schnitte, 7 der 30 verfügbaren Befehle genutzt.

Tabelle 5: Verwendete Schnittparameter zur Herstellung der jeweiligen Düsenbreite.

Düsenbreite (b) [ $\mu\text{m}$ ]	Anzahl der Schnitte (n)	Schnittbreite (d) [ $\mu\text{m}$ ]	Versatzbreite (s) [ $\mu\text{m}$ ]	Programmnummer
50	1	50	-	175
70	3	46	12	176
100	5	46	13,5	177
150	11	46	10,4	-
200	15	46	11	-
250	19	46	11,33	-

## 2.6 Unterscheidungsmerkmale der Lösung

Das beschriebene Verfahren zur Herstellung der Düsen, Ausführen von Schnitten und allgemein der Positionierung der Schnittachse, besitzt umfangreiche Änderungen im Vergleich zum vorhergehenden Prozess (Schneiden der Düse mit individuellem Schnitt).

Um eine Düse zu fertigen ist es notwendig, einen kontrollierten Schnitt durchzuführen. Die Möglichkeit einen exakten Schnitt durchzuführen ist nicht nur auf die Düsenfertigung anwendbar, sondern findet im gesamten Verwendungsbereich der am Lehrstuhl verfügbaren Wafersäge Anwendung. Eine exakte Positionierung des Schnittes in zwei Achsen zu einer geforderten Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  bringt Verbesserungen für sämtliche Anwendungen. Eine exaktere Strukturierung der Piezokeramik und eine hohe Genauigkeit beim Heraustrennen von Einzelchips aus einem Wafer.

Das aktuelle Verfahren sieht keinen Schritt zur Kontrolle der Positionierung vor, außer der Positionierung über das an der Wafersäge vorhandenen Mikroskops. Mit der Technik des Anscratchens der zu bearbeitenden Oberfläche an einer nicht benötigten Stelle, ist eine exakte Einstellung der Schnitthöhe möglich. Die Verwendung des programmierbaren DAC-Modus der Wafersäge weist den Weg in die weitere Automation der Herstellung des Druckkopfes. Hierfür gibt (19) eine Berechnungsvorschrift an, mit welcher beliebige Schnittbreiten gefertigt werden.

Die gefertigten Tropfenerzeuger unterscheiden sich von den bisher hergestellten in ihrer Düsengröße. So ist es mit dem aktuell verwendeten Verfahren nicht möglich, Düsenbreiten zu fertigen, welche eine von der Sägeblattbreite unterschiedliche Breite besitzen. Die Tropfenerzeuger sind in der Lage mit unterschiedlichen Energieeinträgen verbesserte Tropfenbildungsprozesse zu generieren, größere und kleinere Tropfen zu erzeugen und höhere Geschwindigkeiten zu erreichen.

Die Unterscheidungsmerkmale umfassen:

- Herstellung von Düsenbreite unabhängig der Sägeblattbreite
- Erzeugung von Schnittmustern beliebiger Breite
- Erhöhung der Positioniergenauigkeit der Schnitthöhe auf geforderte  $\pm 5 \mu\text{m}$
- Verwendung des DAC Programmiermodus zur Automation des Herstellungsprozesses
- Erweiterung der Tropfenerzeuger durch Exemplare mit andere Düsengröße
- Variation der Eigenschaften, der mit unterschiedlichen Düsen erzeugten Tropfen

## 3 Experimente

### 3.1 Experiment 1: Laserparamater zur definierten Tiefe der Pumpkammern

#### 3.1.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

Ziel des Laserabladiers ist es, die Pumpkammergeometrien in das Waferviertel einzubrennen. Vorgabe hierbei ist es, eine Tiefe der Strukturen zu erreichen, welche über den gesamten Herstellungsprozess der Semesterarbeit konstant ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass die fluidmechanischen Experimente unter gleichbleibenden Bedingungen stattfinden. Der verwendete Laser brennt die Strukturen in das Silizium ein, indem das Gerät wiederholt die Strukturen abfährt und so für einen sukzessiven Abtrag sorgt. Um einen konstanten Abtrag zu gewährleisten wird hierfür ein Experiment durchgeführt, in welchem die Pumpkammertiefe bei konstanter Laserleistung variiert wird. Dabei gilt es herauszufinden, wie sich die Pumpkammertiefe mit Variation der Verfahrensgeschwindigkeit verändert.

##### 2. Hypothese

Die Aufgabenstellung gibt vor, Pumpkammern mit einer Tiefe von  $100\text{ }\mu\text{m}$  zu fertigen. Ziel des Experimentes ist es diese Vorgabe zu erfüllen und so eine konstante Strukturtiefe herzustellen. Die Tiefe der Pumpkammern ist über die Verfahrensgeschwindigkeit  $v_s$  des Laserspots zu variieren. Durch die Einstellung von  $v_s$  werden die Tiefen der Pumpkammer mit einer Genauigkeit von  $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$  gefertigt.

##### 3. Materialien

Zur Herstellung des am Lehrstuhl verwendeten Tropfenerzeugers wird zunächst ein 4" Wafer mit einer Dicke von  $525\text{ }\mu\text{m}$  mit Hilfe einer Wafersäge geviertelt. Ein solches Viertel wird anschließend mit einem Nd:YAG-Laser mit einer Pumpkammerstruktur versehen. Der Laser ist ein „LS 2000 / 8000“ der Firma „Laser-Systems“ und arbeitet mit einer Wellenlänge von  $1064\text{ nm}$ , einer maximalen Leistung von  $30\text{ W}$ , einer Pulslänge größer  $100\text{ ns}$  und einer Pulsfrequenz von  $10\text{ kHz}$ . Der Laser bezieht seine Daten aus einer CAD-Datei, welche es ermöglicht in kurzer Zeit Änderungen am Design der Pumpkammern vorzunehmen. Zur Messung der Pumpkammertiefe wird der Messtaster „ST3008“ der Firma „Heidenhain“ benutzt, welcher es ermöglicht, die Tiefe der abladierten Strukturen mit einem Systemfehler von  $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$  zu messen.

##### 4. Versuchsparameter

Als veränderliche Parameter in diesem Experiment steht die Verfahrensgeschwindigkeit des Galvanometerspiegels in  $\text{mm/s}$  zur Verfügung. Grundlage der Parameter Leistung des Lasers und Anzahl der Überfahrten bildet Kagerer et al. (2012) mit einer Laserleistung von  $5\text{ Watt}$  und  $8\text{ Überfahrten}$ . Als Messparameter sind die gemessene Leistung des Lasers in  $\text{Watt}$  und die Tiefe der abladierten Strukturen in  $\text{Mikrometer}$  zu nennen. Der Fokus des Laserstrahls liegt auf der Werkstückoberfläche. Die Einstellung der Verfahrensgeschwindigkeit wirkt sich auf die Tiefe pro Abtragswiederholung aus und ist somit eine verwendbare Größe zur Einstellung der gewünschten Tiefe. Die Anzahl der gefertigten Proben sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Verfahrensgeschwindigkeiten und Anzahl der getesteten Waferviertel und Pumpkammern.

Verfahrensgeschwindigkeit [mm/s]	Anzahl der Viertel	Anzahl der Pumpkammern (entspricht Messwerte „n“)
115	1	15
120	1	15
125	2	30
130	2	30

## 5. Methoden

Auf jedem gefertigtem Siliziumviertel befinden sich 15 einzelne Pumpkammerstrukturen. Nach einer Fertigung wird der Mittelwert dieser verwendet, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Dieser berechnet sich formal nach (21).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^n x_k \quad (21)$$

$X$  ist die gemessene Pumpkammertiefe,  $n$  die Anzahl der gemessenen Pumpkammern und  $\bar{x}$  bezeichnet der Mittelwert. Das Ergebnis des Mittelwertes lässt darauf schließen wie groß die Abweichung von der gewünschten Pumpkammertiefe ist.

Die Standardabweichung des Probenraums wird verwendet, um die Streuung abzuschätzen. Diese wird berechnet durch (22).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (22)$$

Die Standardabweichung bezeichnet ein Maß für die Streuung um den Mittelwert. Je kleiner die Standardabweichung, desto näher liegen die einzelnen Messergebnisse am Mittelwert und desto genauer ist der untersuchte Fertigungsschritt.

### 3.1.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Die Laseranlage besteht aus einem in x-, y- und z-Richtung verfahrbaren Tisch, welcher als Werkstückhalter dient, einem Galvanometerspiegel und dem Laser selbst. Diese Komponenten sind zur Vermeidung von Augenschäden und Ausschluss äußerer Einflüsse in einer geschlossenen Kabine untergebracht. Teil des Gesamtaufbaus ist ebenso ein Steuerrechner sowie ein Netzteil zur Bereitstellung der benötigten Leistung.

#### 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Zunächst wird die Pumpkammergeometrie mit einer Änderung versehen, da die bisherige Geometrie eine exakte Positionierung der Einschnitte für die Düse nicht ermöglicht. Hierzu



wird die Spitze der Pumpkammer abgeflacht und durch eine Fläche mit einer Breite von 300  $\mu\text{m}$  ersetzt (siehe Abb. 24). Diese Geometrieänderung erlaubt es im späteren Herstellungsprozess die Schnittlinie zum Schneiden der Düsen exakt mittig zu positionieren. Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei der Positionierung zum Schneiden der Längen von Düsen, da auch hier eine hohe Genauigkeit in der Abstandspositionierung erreicht wird.

Zu Beginn des Versuchs wird zuerst die Ausgangsleistung des Lasers auf einen Wert von 5 Watt eingestellt. Hierzu wird das Messgerät „*Fieldmaster*“ und der Messsonde „*LM-10 HTD*“ der Firma „*Coherent*“ verwendet. Die Messsonde wird in ausreichendem Abstand direkt in den Laserstrahl positioniert. Mit Hilfe eines Ablaufprogramms in der Steuersoftware des Lasers ist es nun möglich, die Laserleistung in Prozent anzupassen und so die Ausgangsleistung auf den gewünschten Wert zu justieren.

Ist die Leistung eingestellt, wird der Ablationsvorgang gestartet. Als Startverfahrensgeschwindigkeit wird ein Wert von 115 mm/s bei 8 Wiederholungen eingestellt. Nach Beendigung des Vorgangs wird die strukturierte Siliziumplatte zunächst geläppt. Verwendet wird hierbei eine Läppfolie mit einer Körnung von 12  $\mu\text{m}$ . Unter Zuhilfenahme destillierten Wassers wird so eine Entfernung des durch die Laserbearbeitung entstandenen Aufwurfs und ein Abschleifen der Kanten erreicht. Abschließend werden die Waferviertel in einem Megaschallbad für 10 Minuten gereinigt. Nach der Reinigung und Trocknung wird die Tiefe der hergestellten Pumpkammern gemessen und protokolliert.

Dieser Vorgang wird nach erneuter Leistungsmessung mit einer um 5 mm/s erhöhten Verfahrensgeschwindigkeit wiederholt.

### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Die aufgenommenen Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Wie sich zeigt, ist bei einer Ausgangsleistung des Lasers von 5 W eine Verfahrensgeschwindigkeit von 125 mm/s am besten geeignet, um eine Strukturtiefe von 100  $\mu\text{m}$  zu erreichen. Diese Parameter werden für sämtliche, im Laufe der Semesterarbeit folgenden Laserablationsprozesse verwendet.

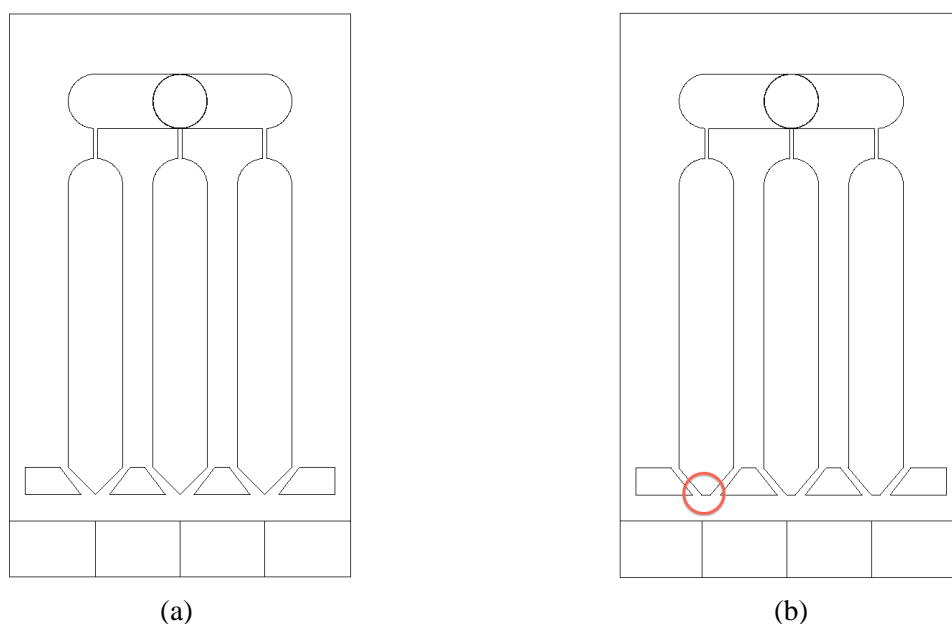


Abb. 24 Düsenmitte vor (a) und nach (b) der Modifikation. Die Abflachung der Spitze zu einer planen Fläche mit bekannter Länge (300  $\mu\text{m}$ ) ermöglicht eine einfachere Positionierung durch Benutzung der Messfunktion der Wafersäge in der Düsenmitte.

Tabelle 7: Pumpkammertiefen bei unterschiedlichen Verfahrgeschwindigkeiten

Verfahrgeschwindigkeit [mm/s]	Wiederholungen	Leistung in %	Leistung [W]	Tiefe gemessen [ $\mu\text{m}$ ]	STABW [ $\mu\text{m}$ ]
115	8	49,00	5,00	109,67	1,88
120	8	47,00	5,00	107,00	1,69
125	8	47,65	5,00	100,40	0,94
130	8	47,15	5,00	98,77	1,17

### 3.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die empirische Ermittlung geeigneter Parameter für den ersten Schritt im Gesamtherstellungsprozess, ist ein Teil der Aufgabenstellung erfüllt. Wie die Messergebnisse zeigen, ist es möglich die Pumpkammerstrukturen mit den verwendeten Parametern mit den benötigten Abmessungen und der geforderten Genauigkeit herzustellen. Abb. 25 zeigt eine Übersicht der gefertigten Tiefen in Abhängigkeit der Verfahrgeschwindigkeit, sowie deren Standardabweichungen.

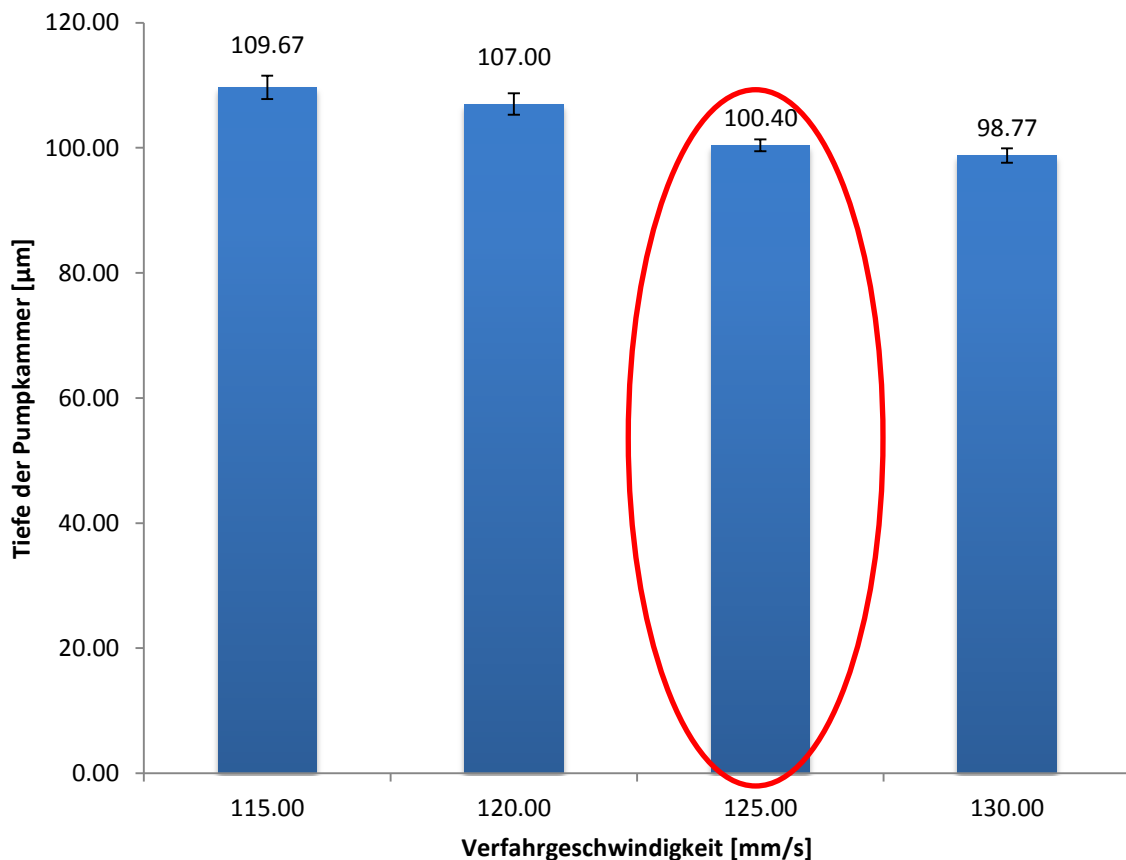


Abb. 25 Darstellung der ermittelten Pumpkammertiefen für unterschiedliche Verfahrgeschwindigkeiten des Galvanometerspiegels. Hierbei werden für die Verfahrgeschwindigkeiten von 115 und 120 mm/s jeweils 15 Pumpkammern und für 125 und 130 mm/s jeweils 30 Pumpkammern zur Probe gefertigt und gemessen.

## 3.2 Experiment 2: Herstellung von Düsen unterschiedlicher Breiten

### 3.2.1 Beschreibung der Messverfahren

#### 1. Fragestellung

Teilaufgabe dieser Semesterarbeit ist es, Düsen in bestimmten Breiten mit einer vorgegebenen Genauigkeit zu fertigen und diese über den gesamten Versuchsraum zu wahren. Die mikrometergenaue Herstellung von Düsen unterschiedlicher Größe erfordert eine neue Herangehensweise an den Prozess. Die Überlegungen hierzu stammen von der Strukturierung der Elektroden der ebenso im Tropfenerzeuger verwendeten Piezokeramik (Eiler, 2012). Hierbei werden mit der Wafersäge mehrere nebeneinanderliegende Schnitte ausgeführt, welche einen gewissen Versatz und einen gewissen Überlapp haben. Diese Technik ermöglicht es, unterschiedliche Schnitte, auch solche größer als die Breite des Sägeblattes, auszuführen.

#### 2. Hypothese

Unter Verwendung der Technik der versetzten Schnitte wird es möglich sein, eine Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  bei der Einhaltung der gewünschten Düsenbreiten zu erreichen. Ebenso möglich ist es, Düsen mit beliebiger Breite größer der Breite des verwendeten Sägeblattes herzustellen.

#### 3. Materialien

Der Schneidevorgang der Düsen wird mit der am Lehrstuhl vorhandenen Wafersäge „DAD 321“ von „DISCO“ realisiert. Teilaufgabe dieser Semesterarbeit ist es, die für die Steuerung der Wafersäge benötigten Schnitt-Programme selbst zu schreiben. Die optimale Befestigung des zu schneidenden Materials wird durch die Klebefolie „1027R“ der Firma „Ultron Systems“ gewährleistet, welche eine besonders hohe Klebekraft besitzt, die erst unter Zuhilfenahme eines UV-Belichters nachlässt. Als Sägeblatt findet ein „FTBR4645100“ der Firma „Mitsubishi“ Einsatz. Die Parameter des verwendeten Sägeblattes sind in Kapitel 2.5.1 gelistet.

#### 4. Versuchsparameter

Je nach Breite des Sägeblattes und der gewünschten Breite der abgetragenen Fläche ergeben sich unterschiedliche Werte für die Größen für die Variablen des Schnittvorgangs. Die für die unterschiedlichen Düsenbreiten veränderlichen Eingangs- und Ausgangs-Parameter sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Hinzu kommen noch weitere Parameter, welche in das Wafersägenprogramm eingetragen sind, aber nicht verändert werden, da diese sich als Schnittparameter für den Siliziumschnitt als vorteilhaft erwiesen haben (Eiler, 2012). Diese sind in Tabelle 8 mit ihren verwendeten Werten aufgeführt.

#### 5. Methoden

Bei der Auswertung der Messergebnisse kommen die Methoden des Mittelwertes und der Standardabweichung zur Verwendung. Mittels des Variationskoeffizienten lässt sich die Genauigkeit des Herstellungsprozesses auch über unterschiedliche Düsenbreiten vergleichen. Diese sind im Zusammenhang der Auswertung dieser Semesterarbeit ausreichend und geben

die erreichte Genauigkeit des Herstellungsprozesses wieder. Der Variationskoeffizient berechnet sich nach (23) zu:

$$VarK(x) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^n (x_k - \bar{x})^2}}{E(x)} \quad (23)$$

Hierbei ist  $VarK(x)$  der Variationskoeffizient und  $E(x)$  der Erwartungswert. Dieser wird durch den zu fertigenden Wert der Düsenbreite dargestellt und nimmt die jeweiligen Werte 50, 70 und 100  $\mu\text{m}$  an.

### 3.2.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Die verwendete Wafersäge „DAD 321“ von „DISCO“ besteht aus einem Werkstückhalter welcher zwei Freiheitsgrade (x und theta) besitzt. Hauptbestandteil der Säge ist die Spindel, welche in y- und z-Richtung beweglich ist und den Flansch zur Befestigung des Sägeblattes stellt. Auch eine Prozesswasserzuführung ist vorhanden, um während des Sägevorgangs entstehende Auswürfe sofort zu beseitigen. Die Säge besitzt weiterhin sowohl ein optisches als auch ein Video-Mikroskop, welche eine exakte Positionierung der Schnittkanten und eine Untersuchung der Oberfläche des Werkstücks ermöglichen.

Tabelle 8: Eingangs- und Ausgangsparameter für den Fertigungsprozess der Düsenbreite.

Name	Einheit	Erklärung	Werte
Sägeblattbreite	$\mu\text{m}$	Schnittbreite des verwendeten Sägeblattes	45
Düsenbreite	$\mu\text{m}$	Gewünschte Breite der zu fertigenden Düse	50; 70; 100
Versatz	$\mu\text{m}$	Verfahrweg des Sägeblattes zwischen einzelnen Schnitten	12; 13,5;
Anzahl der Schnitte	-	Anzahl der nötigen Schnitte um die gewünschte Düsenbreite zu fertigen	1; 3; 5
Anzahl Messproben pro Breite	-	-	> 48
Absenkgeschwindigkeit	mm/s	Geschwindigkeit mit der das Sägeblatt in die Schnittebene hineinfährt	0,4
Schnittgeschwindigkeit	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit des Sägeblattes	5
Drehzahl	U/min	Drehzahl des Sägeblattes	38.000
Schnittlänge	mm	Länge des durchgeführten Schnittes	2

## 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Bevor mit der Herstellung der Düsen begonnen wird, ist eine Vorbereitungsroutine durchzugehen, mittels welcher die in der Aufgabenstellung geforderte Reproduzierbarkeit erreicht wird.

Nach dem Einschalten der Maschine wird zunächst das benötigte Sägeblatt eingespannt. Hierzu wird die Klappe, welche die Spindel schützt, geöffnet und der Flansch mit Hilfe eines speziellen Drehmomentschlüssels gelöst. Das Sägeblatt wird eingelegt und die Klappe geschlossen. Anschließend werden die Parameter des eingebauten Sägeblattes eingegeben (bzw. voreingestellte Parameter ausgewählt). Darauf folgt das sogenannte „Set Up“, welches eine bestimmte Programmroutine ist mit welcher der verbleibende Schnittradius des Sägeblattes bestimmt wird. Hierzu fährt der Werkstückhalter in Position unter das Sägeblatt welches sich langsam absenkt. Besteht zwischen Sägeblatt und Werkstückhalter elektrischer Kontakt, fährt die Spindel sofort nach oben und das Programm ist beendet. Ein weiterer Schritt der Vorbereitung ist das sogenannte „Dressing“, welches mit dem Dressing Block „Type 5“ der Firma „microkerf“ durchgeführt wird. Im Dressing-Programm fährt das Sägeblatt wiederholt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch den Dressing Block und wird auf diese Weise geschliffen. Als vorletzter Schritt wird ein „Hairline-Adjustment“ durchgeführt, welches die Schnittmittellinie des Sägeblattes kalibriert. Abschließend wird erneut ein „Set Up“ durchgeführt, um während des Dress-Vorgangs eventuell entstandene Abtragungen des Sägeblattes zu kompensieren. Nach der Durchführung dieser Routine ist die Maschine in einem einsatzbereiten Zustand, welcher die geforderte Herstellungsgenauigkeit ermöglicht. Das Werkstück wird unter Zuhilfenahme einer Klebefolie, welche zwischen zwei Spannringe gespannt wird, aufgeklebt. Anschließend wird die Gesamthöhe des Siliziums und der Klebefolie mit Hilfe des Heidenhain-Tasters („ST 3008“) an mehreren Stellen gemessen. Der Mittelwert dieser Messung wird in das Schnittprogramm der Säge eingegeben. Über eine Ansaugfunktion wird das Werkstück auf dem Chuck mittels Vakuum fixiert. Nach Auswahl des Schnittprogramms und der Ausrichtung der  $\theta$ -Achse erfolgt die Kalibrierung des Sägeblattes auf die Höhe des Siliziums (siehe Kap. 2.3.4). Die Positionierung des Schnittes erfolgt durch Abmessen des Mittelpunktes der Pumpkammerplatte. Nach einer Fahrt um 1 mm in die Pumpkammer hinein wird der Schnitt ausgeführt. Um die Breiten der geschnittenen Düsen zu verifizieren wird im Anschluss an die Herstellung die Wafersäge selbst verwendet. Diese besitzt eine integrierte Messfunktion mit einer absoluten Genauigkeit von 5  $\mu\text{m}$  bei 160 mm Verfahrensweg, welche auch bereits bei der exakten Positionierung der Schnitte während der Herstellung zum Einsatz kommt. Hierbei ist es wichtig, dass die Oberfläche des Siliziums und die Düsen frei von Flüssigkeit und Schmutz sind, welche bei der Herstellung entstehen (bspw. Prozesswasser).

## 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Die zusammengefassten Ergebnisse der aufgenommenen Messreihen sind in Tabelle 9 zu sehen. Die größte Standardabweichung ist bei der Herstellung der Düsen mit einer Breite von

Tabelle 9: Auswertung der Messergebnisse zur Düsenbreite.

Düsenbreite [ $\mu\text{m}$ ]	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	Bereich [ $\mu\text{m}$ ]	STABW [ $\mu\text{m}$ ]	VarK [%]	Anzahl Proben
50,00	50,38	48,98 – 51,76	1,39	2,76	48
70,00	70,08	68,55 – 71,61	1,53	2,18	72
100,00	101,22	98,96 – 103,47	2,26	2,23	60

100  $\mu\text{m}$  aufgetreten. Diese ist mit einer Größe von 2,26  $\mu\text{m}$  gering und unterhalb der geforderten Fertigungsgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Bei der Betrachtung des Variationskoeffizienten fällt auf, dass dieser über den gesamten Probenraum ähnlich ist. Dies weist auf eine konstante Güte des Herstellungsprozesses.

### 3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Messwerte wurden über einen Probenraum von insgesamt 180 Düsen ermittelt. Eine Darstellung der Messwerte und Abweichungen ist in Abb. 26 zu sehen. Durch die Verwendung des Prinzips der versetzten Schnitte ist es möglich, Düsenbreiten größer der Breite des verwendeten Sägeblattes mit hoher Genauigkeit herzustellen. Abb. 27 zeigt die mit einem Rasterelektronenmikroskop geschossenen Bilder von geschnittenen Düsen. Die Bilder mit einer Vergrößerung von 400x ((d) bis (f)) zeigen, dass die Flächen des Düsenkanals glatt sind und eine quadratische Form aufweisen.

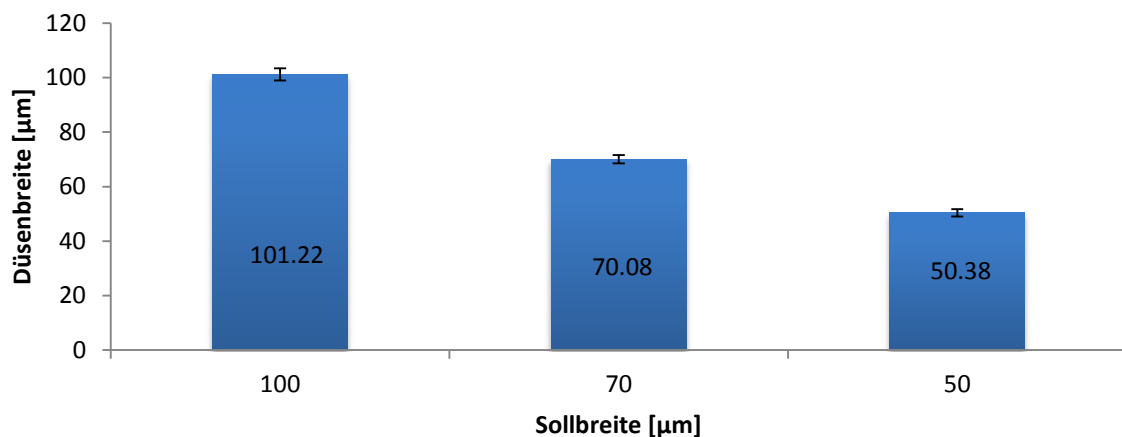


Abb. 26 Diagramm zur Darstellung der Fertigungsgenauigkeit für verschiedene Düsenbreiten. Es wurden 48 Düsen mit einer Breite von 50  $\mu\text{m}$ , 72 Düsen mit einer Breite von 70  $\mu\text{m}$  und 60 Düsen mit einer Breite von 100  $\mu\text{m}$  gemessen.

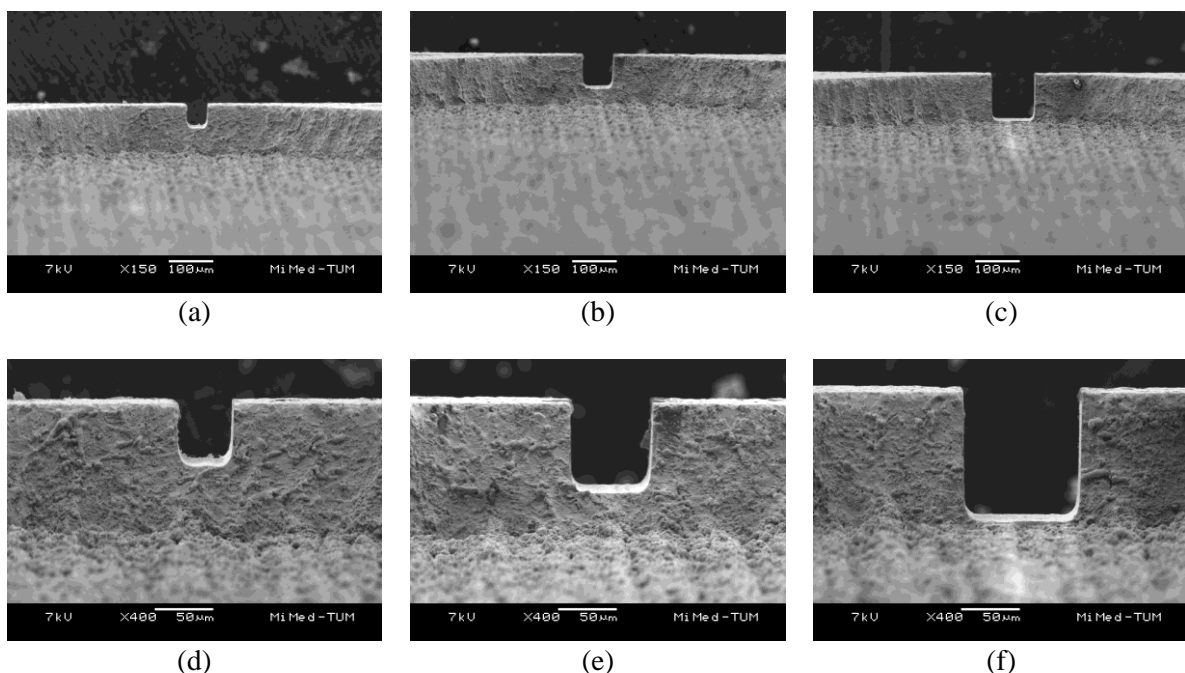


Abb. 27 Bilder von geschnittenen Düsen. (a) bis (c) zeigen Düsen mit Kantenlängen von 50 bis 100  $\mu\text{m}$  bei einer Vergrößerung von 150x. (d) bis (f) zeigen dieselben Düsen bei einer Vergrößerung von 400x. Aufnahmen sind mit einem Rasterelektronenmikroskop gemacht.

### 3.3 Experiment 3: Herstellung von Düsen unterschiedlicher Tiefen

#### 3.3.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

Forderung der Aufgabenstellung dieser Semesterarbeit ist es, die gewünschten Düsen in quadratischem Querschnitt herzustellen. Damit gilt auch für die Herstellung der Düsentiefe die Vorgabe der reproduzierbaren Genauigkeit. Bei der Fertigung exakter Tiefen kann nicht auf bereits bekannte Vorgehensweisen zurückgegriffen werden, daher gilt es einen Lösungsansatz zu schaffen, mit dem es möglich ist, die Tiefeneinstellung der Wafersäge zur Oberfläche des Siliziums exakt zu positionieren.

##### 2. Hypothese

Nach Einstellung der exakten Höhe der Oberfläche des Siliziums nach dem beschriebenen Verfahren lassen sich die Düsen reproduzierbar mit der geforderten Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  zu fertigen.

##### 3. Materialien

Da es sich bei diesem Experiment um denselben Schnitt handelt, welcher getätigt wird, um die Düsenbreite zu schneiden, sind die Materialien identisch zu denen beschrieben in Kapitel 3.2. Bei der Messung zur Verifikation der Güte des Herstellungsprozesses wird zusätzlich ein optisches Mikroskop verwendet, welches mit einem Messtaster der Firma „Heidenhain“ des Typs „MT12“ mit einer Systemgenauigkeit von  $0,2 \mu\text{m}$  zur Messung der Verstellung der Fokusebene ausgestattet wird.

##### 4. Versuchsparameter

Um eine exakte Einstellung der Höhe des Sägeblattes zur Siliziumoberfläche zu erreichen ist die Anpassung mehrerer Parameter notwendig. Die wichtigsten sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Geändert werden hierbei je nach Werkstück die Gesamthöhe des Aufbaus, Silizium und Klebefolie („Width“). Dieser Parameter wird bei Auswahl des Programms eingegeben. Die Höhen-Adjustierung findet im Prozess des „Herantastens“ an die Oberfläche statt und wird sukzessive in  $5 \mu\text{m}$  großen Schritten verringert. Hierbei bedeutet eine Verkleinerung des „Height Adjust“ ein Herabsenken des Schnittes in die Silizium-Ebene hinein. Je nach gewünschter

Tabelle 10: Parameter zur Einstellung der Schnitthöhe.

Name	Einheit	Erklärung	Verwendete Werte
Width	$\mu\text{m}$	Höhe des Gesamtaufbaus auf der Klebefolie	650 - 750
Height Adjust	$\mu\text{m}$	Korrektur der Schnitthöhe	$\pm 100$
Height	$\mu\text{m}$	Höhe des angesetzten Schnittes	50; 70; 100
Anzahl Messprobe	-	-	48; 72; 60

Tiefe der Düse ist im entsprechenden Schnittprogramm der Parameter „Height“ des Befehls „Achop“ anzupassen.

## 5. Methoden

Auch in dieser Messreihe werden der Mittelwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient über den Probenraum verwendet, um eine Aussage über die Bestätigung der Hypothese zu treffen.

### 3.3.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Da der Prozess zur Strukturierung der Tiefe derselbe wie bereits bei der Breitenherstellung ist, ist der Versuchsaufbau bereits in Kapitel 3.2 beschrieben.

#### 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Nach der Vorbereitung des Versuches ist die für jeden der fünf auf dem Siliziumviertel vorhandenen Druckchips die Oberflächenhöhe einzustellen. Hierfür wird zunächst die  $\theta$ -Achse kalibriert. Anschließend folgt ein Verfahren an eine geeignete Stelle des Druckchips (siehe Abb. 28). Diese Position wird durch Nullen der Messfunktion der Wafersäge gespeichert. Ohne weitere Höhen-Adjustierung („Height Adjust“) wird das Schnittprogramm ausgeführt. Ist das Programm fertig, wird die Oberfläche mit Druckluft gereinigt und der zuvor gespeicherte Punkt erneut angefahren. Ein Blick durch das optische Mikroskop der Wafersäge ermöglicht eine Überprüfung der Oberfläche. Ist diese einwandfrei, so wird eine Höhen-Adjustierung um  $5\text{ }\mu\text{m}$  nach unten (also in die Silizium-Ebene hinein) eingestellt und das Schnittprogramm an derselben Stelle erneut ausgeführt.

Ist die Oberfläche durch das Sägeblatt angekratzt, ist die Oberflächenhöhe des Siliziums erreicht. Nun wird eine Höhen-Adjustierung um die gewünschte Tiefe der Pumpkammer in die Silizium-Ebene hinein eingestellt. Anschließend wird der Schnitt der Düse nach (Kap. 3.2) eingestellt und ausgeführt.

Der Vorgang der Höheneinstellung ist für jeden einzelnen Druckchip erneut auszuführen, da das Silizium über die Gesamtfläche verteilt Höhenschwankungen aufweist, welche in der Lokalität benachbarter Düsen vernachlässigt werden.

Die Messung zur Verifikation der Tiefe der gefertigten Düsen stellt eine Herausforderung an die Messmittel dar. Während die Tiefe der in das Silizium abladierten Pumpkammern noch

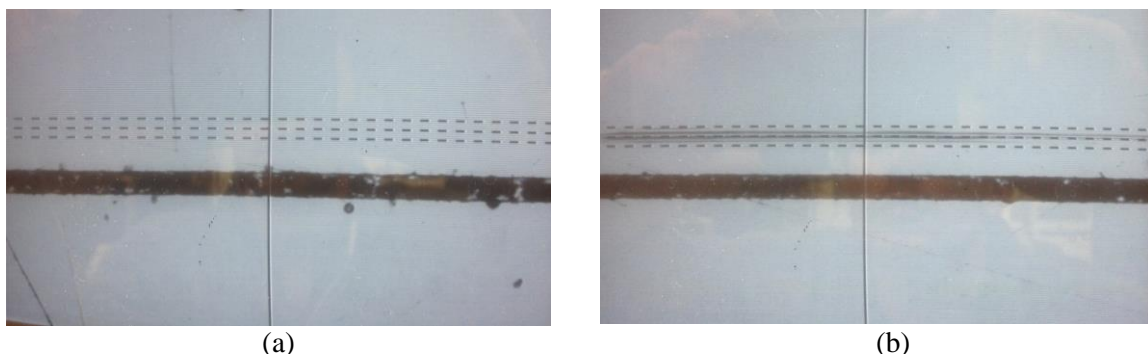


Abb. 28 Oberfläche des Siliziums vor (a) und nach (b) korrekter Höheneinstellung des Sägeblattes. Zu erkennen ist ein dunklerer Bereich zwischen den Fadenlinien in (b).



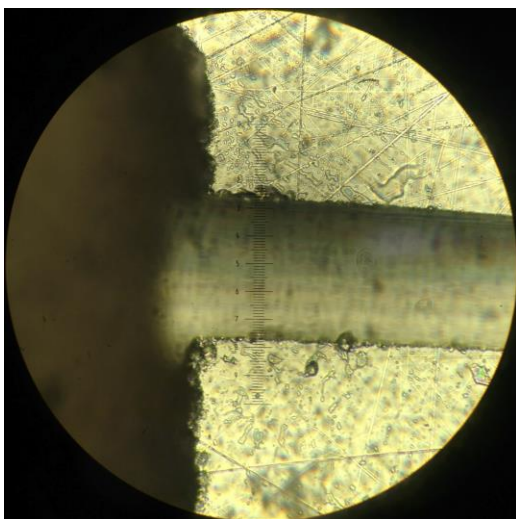
mit einem Messtaster gemessen wird, ist dies bei den gefertigten Düsen, welche Strukturbreiten kleiner  $100\text{ }\mu\text{m}$  aufweisen, auf Grund zu großer Messspitzen nicht mehr möglich. Hierzu wird ein optisches Verfahren verwendet, bei dem die Verstellung der Fokusebene eines Mikroskops benutzt wird, um die Tiefe der Strukturen zu ermitteln. Nach der Herstellung der Düsen, sowie Reinigung der Siliziumplatten durch ein 20 minütiges Megaschallbad in destilliertem Wasser, werden diese auf die Trägerplatte des Mikroskops gelegt. Mit einem Objektiv der Vergrößerungsstufe  $50\times$  wird zunächst die polierte Oberfläche des Siliziums fokussiert (vgl. Abb. 29 (a)) und ein Messtaster, welcher den Verfahrensweg der Fokusebene (z-Achse) misst, auf Null gestellt. Durch das Verschieben der Fokusebene auf den Grund der geschnittenen Düse (vgl. Abb. 29 (b)) wird über den verfahrenen Weg der z-Achse die Tiefe der Düse ermittelt.

### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

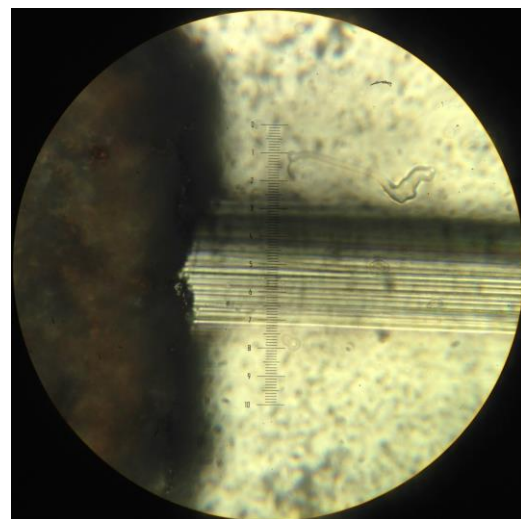
Tabelle 11 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der aufgenommenen Messungen der hergestellten Düsen. Die Betrachtung der größten Standardabweichung von  $3,02\text{ }\mu\text{m}$  bei der Fertigung der Düsen mit einer Tiefe von  $70\text{ }\mu\text{m}$  zeigt, dass auch die in der Aufgabenstellung geforderte Güte erreicht wird. Ein Blick auf den Variationskoeffizienten verrät, dass die allgemeine Genauigkeit des Tiefenschneidens unter derjenigen des Schneidens in die Breite liegt. Dies ist zurückzuführen auf einen komplizierteren und störungsanfälligeren Positionierungs- und Schneidprozess, sowie eine vorhandene Ungenauigkeit in der Methode der optischen Messung mittels Mikroskop.

Tabelle 11: Auflistung der Werte der Breitenherstellung. Die Gesamtanzahl der gemessenen Proben beträgt 180 Düsen.

Düsentiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	Bereich [ $\mu\text{m}$ ]	STABW [ $\mu\text{m}$ ]	VarK [%]	Anzahl Proben
50,00	50,44	48,40 – 52,46	2,03	4,03	48
70,00	69,58	66,56 – 72,59	3,02	4,33	72
100,00	101,08	98,43 – 103,72	2,64	2,62	60



(a)



(b)

Abb. 29 Tiefenmessung einer Düse. In (a) ist die Oberfläche des Siliziums in der Fokusebene. Von hier aus wird die Fokusebene bis auf den Grund der Düse verschoben (b) und die verstellte Distanz als Wert der Düsentiefe notiert.

### 3.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Abb. 30 sind die Fertigungsmaße der Düsentiefen gezeigt. Die Auswertung der Ergebnisse ergibt, dass die Fertigung der Düsentiefe mittels der Methode des Herantastens an die Siliziumoberfläche, der Genauigkeitsforderung der Aufgabenstellung genügt.

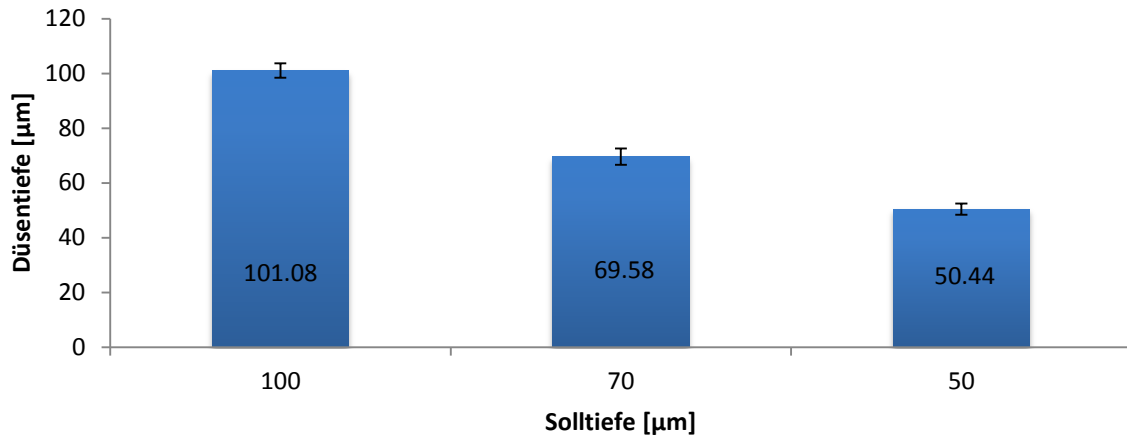


Abb. 30 Diagramm zur Darstellung der Fertigungsgenauigkeit für verschiedene Düsentiefen. Diese werden mit geringer Streuung und Standardabweichung gefertigt. Die Untersuchungen zur Genauigkeit der hergestellten Düsentiefen wird über einen Probenumfang bei einer Tiefe von 50 µm von 48, bei 70 µm von 72 und bei 100 µm von 60 Düsen durchgeführt.

### 3.4 Experiment 4: Einfluss der Düsenbreite und –tiefe auf Tropfenparameter

#### 3.4.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

In den folgenden Kapiteln werden die fluidmechanischen Untersuchungen, welche den zweiten Teil der Aufgabenstellung der Semesterarbeit bilden, beschrieben. Nach der Fertigung der Düsen und der darauf folgenden Fertigstellung der Tropfenerzeuger gilt es Überlegungen an die Auslegung der folgenden Experimente anzustellen.

Der Tropfenbildungsprozess des am Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik verwendeten Tropfenerzeugers ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. In diesem Experiment wird speziell auf den Einfluss der Größe der Düsen eingegangen. Im Laufe vorangegangener Experimente wurden Düsen mit quadratischem Querschnitt gefertigt. Diese sind in den Größen von 50 µm bis 100 µm Kantenlänge vorhanden.

In technischen Anwendungen ist neben der Fluggeschwindigkeit vor allem die Abgabe fest definierter Volumina von hoher Wichtigkeit. Es gilt den Einfluss der Querschnittsabmessungen auf diese beiden wichtigen Parameter zu untersuchen.

Zusätzlich ist es von großem Interesse, die Effizienz bestimmter Düsengrößen zu bewerten. Die ausgewählten Größen hierfür bestehen in der sogenannten Mindestspannung.

Eine analytische Betrachtung des Einflusses der Düsengröße ist notwendig, um betreffende Hypothesen bezüglich des Ausgangs der Experimente zu formulieren.

##### 2. Hypothese

Nach der analytischen Beschreibung der im Mikrokanal herrschenden Strömung in Kapitel 2.3.1 ergibt sich unter den getroffenen Annahmen folgende Beziehung zwischen Volumenstrom in der Düse und Kantenlänge des Düsenquerschnitts nach (24) zu:

$$\dot{V} \propto a^4 \quad (24)$$

Wie bereits erwähnt, gilt dieser Zusammenhang als eine Richtgröße, um die Veränderung der Tropfenparameter Volumen und Geschwindigkeit abzuschätzen.

Da der Volumenstrom mit steigender Querschnittsgröße in der vierten Potenz der Kantenlänge wächst, ist zu erwarten, dass die Tropfengröße ebenso zunimmt.

##### 3. Materialien

Die zur Durchführung des folgenden Experimentes benötigten Materialien werden zum Großteil in den vorhergehenden Prozessen beschrieben in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 hergestellt. Die gefertigten Piezomembrantropfenerzeuger (Beschreibung des Aufbaus und Funktionsweise siehe Kapitel 1.2.3) besitzen verschiedene Düsenquerschnitte, welche für die folgende Untersuchung benötigt werden.

Wichtiger Teil des Experiments ist ebenso das verwendete Fluid. In einer begleitenden Semesterarbeit wurde ein Verfahren entwickelt, nach welchem Fluide mit vorbestimmten fluidischen Eigenschaften, wie Viskosität und Oberflächenspannung hergestellt werden. Dieses

Gemisch besteht zu bestimmten Teilen aus Glycerin, Isopropanol und destilliertem Wasser. Die genaue Zusammensetzung sowie fluidische Parameter sind in Tabelle 12 dargestellt.

#### 4. Versuchsparameter

In diesem Experiment gilt es den Einfluss der Querschnittsgröße der Düse des verwendeten Tropfenerzeugers auf die Parameter der entstehenden Tropfen zu ermitteln. Wichtigster Eingangsparameter ist daher die Kantenlänge des quadratischen Profils der Düse sowie deren Länge. Tabelle 13 zeigt die Dimensionen mit ihren im Experiment untersuchten Größen.

Wird ein Tropfen ausgestoßen, so ist dessen wichtigste Eigenschaften die Fluggeschwindigkeit sowie das Gesamtvolumen der ausgestoßenen Flüssigkeitsmenge. Die Gesamtmenge setzt sich aus dem Volumen des Haupttropfens sowie des Volumens eines eventuell entstehenden Satellitentropfens zusammen. Neben diesen Parametern ist die Mindestspannung, bei der ein stabiler Tropfenbildungsprozess möglich ist, eine weitere wichtige Eigenschaft. Die vorgestellten Größen sind noch einmal in Tabelle 14 zusammengefasst und mit den dazugehörigen Einheiten dargestellt.

Tabelle 12: Zusammensetzung und fluidische Parameter des verwendeten Fluids.

Parameter	Einheit	Wert
Anteil Wasser	g	5,1
Anteil Glycerin	g	4,35
Anteil Isopropanol	g	0,55
Oberflächenspannung	mN/m	40
Viskosität	mPa s	5

Tabelle 13: Untersuchte Düsengrößen in den Experimenten.

Parameter	Einheit	Verwendete Größe
Düsenbreite	$\mu\text{m}$	50; 70; 100
Düsentiefe	$\mu\text{m}$	50; 70; 100
Düsenlänge	$\mu\text{m}$	100

Tabelle 14: Gemessene Parameter in den Experimenten.

Parameter	Einheit	Erklärung
Tropfenvolumen	nl	Kumuliertes Gesamtvolumen des ausgestoßenen Fluids
Tropfengeschwindigkeit	m/s	Fluggeschwindigkeit des Haupttropfens
Mindestspannung	V	Für einen stabilen Tropfenbildungsprozess notwendige Spannung
Anzahl der Proben	-	$\geq 4$

Hinzu kommen elektrische Ansteuerungsparameter, welche für die Durchführung dieses Experiments im Vorhinein ausgewählt wurden. Hierzu zählen die Impulsform mit welcher der Tropfenerzeuger angesteuert wird, die Länge des Impulses über welche die Ansteuerungsspannung gehalten wird, die Frequenz mit welcher ein Impuls wiederholt wird und die Amplitude der Ansteuerspannung. Tabelle 15 fasst diese Parameter zusammen.

Der Tropfenbeobachtungsstand selbst besitzt weitere Einstellmöglichkeiten, welche im Laufe des Experiments zur Beobachtung der gebildeten Tropfen verändert werden. Die „Phase“ beschreibt die einstellbare Verzögerungszeit zwischen dem Auslösezeitpunkt eines Impulses und der Belichtung des aufgenommenen Bildes der Kamera durch die Stroboskoplampe. Eine Veränderung dieser Zeit ermöglicht es, den Tropfen zu verschiedenen Zeiten seines Bildungsprozesses zu beobachten und dessen Verlauf zu evaluieren. Die Software des Tropfenbeobachtungsstandes ermöglicht ebenfalls einen Doppelblitz der Stroboskoplampe, was im Abbildungsprozess durch die Kamera zu einer Überlagerung zweier Einzelbilder zu verschiedenen Zeitpunkten führt. Der zeitliche Abstand dieser beiden aufeinanderfolgenden Blitze ist in der Software als „Delay“ bezeichnet.

Der erste Teil der Messungen in den fluidischen Experimenten, dient der Bestimmung der Mindestspannung. Gemeint ist hiermit die geringste Amplitude des angelegten Impulses, bei der ein Tropfenbildungsprozess nach bestimmten Vorgaben ausgeführt wird. Zunächst gilt es, die Mindestspannung für einen „geraden Tropfenflug“ zu ermitteln. Konkret ist dies die Spannung, bei welcher ein Tropfen genug Energie besitzt die Düse zu verlassen. Zwei weitere Messreihen sind durch die Forderung einer Tropfenfluggeschwindigkeit von 2,5 m/s und 5 m/s definiert. Die jeweiligen Messungen werden unter Veränderung des Parameters der Pulslänge ausgeführt.

Der zweite Teil dient der Messung von Tropfengeschwindigkeit und Tropfenvolumina. Hierzu werden Impulse vorgegebener Pulslänge und Spannung zur elektrischen Ansteuerung verwendet. Die benötigten Parameter werden nach denen im Folgenden beschriebenen Methoden gemessen.

Eine Übersicht der in den Messreihen verwendeten Werte der Parameter ist Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 15: Elektrische Ansteuerungsparameter für das durchgeführte Experiment.

Name	Einheit	Erklärung	Werte
Impulsform	-	Form des Ansteuerungsimpulses (Sinus, Sägezahn, Dreieck...)	Rechteck
Pulslänge	$\mu\text{s}$	Haltezeit des positiven Spannungsniveaus	1 – 100
Frequenz	Hz	Wiederholfrequenz des verwendeten Pulses	200
Amplitude	V	Maximalspannung des positiven Spannungsniveaus	1 – 150

Tabelle 16: Versuchsparameter Tropfenbeobachtungsstand.

Messreihe	Name	Einheit	Werte
-	Frequenz	Hz	200
Gerader Flug	Pulslänge	$\mu\text{s}$	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 16; 20; 50; 80; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
2,5 m/s	Pulslänge	$\mu\text{s}$	5; 10; 20; 50; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
''	Delay	$\mu\text{s}$	50
5 m/s	Pulslänge	$\mu\text{s}$	5; 10; 20; 50; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
''	Delay	$\mu\text{s}$	50
Volumen / Geschw.	Spannung	V	40; 60; 80
''	Pulslänge	$\mu\text{s}$	10; 20; 50
''	Phase	$\mu\text{s}$	400

## 5. Methoden

Während dieses Experiments werden unterschiedliche Düsenquerschnitte untersucht. Für eine hohe Korrektheit der Ergebnisse wird das Experiment zudem mit mehreren Düsen durchgeführt, um diese anschließend in einem Mittelwert zusammenzufassen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt durch das Erstellen von Diagrammen, welche es ermöglichen, Aussagen über bestehende Zusammenhänge zu treffen.

### Messung der Mindestspannung

Zur Messung der Mindestspannung bei unterschiedlichen Pulslängen ist darauf zu achten, dass ein stabiler Tropfenprozess zustande kommt. Diesen erkennt man an der Unbeweglichkeit gebildeter Tropfen.

### Messung der Geschwindigkeit

Zunächst gilt es eine Möglichkeit zu finden, die Messung der Geschwindigkeit eines ausgestoßenen Tropfens auf einen Blick zu gewährleisten. Hier wurde ein optisches Verfahren gewählt. Es wird mit einer vorgegebenen Delay-Zeit und vorgegebenen Geschwindigkeiten gearbeitet. Dieses ermöglicht es, auf die Geschwindigkeit des Tropfens, durch die Messung einer bestimmten Strecke zu schließen. Hierzu ist der Abbildungsmaßstab des Objektivs zu beachten, welcher im vorliegenden Fall für das 5x-Objektiv bei  $a = 0,953 \text{ Pixel}/\mu\text{m}$  liegt. Als Flugdauer des Tropfens wird eine Zeit von  $t = 50 \mu\text{s}$  (entspricht Delay) gewählt, welche sich bei Tropfengeschwindigkeiten bis zu 10 m/s als sinnvoll erweist, da in dieser Zeit die gesamte Flugstrecke des Tropfens auf dem dargestellten Bildschirmausschnitt liegt. Es sollen Geschwindigkeiten von  $v = 2,5 \text{ m/s}$  und  $v = 5 \text{ m/s}$  abgelesen werden. Die Kamera ist vom Typ „SCK-141“ des Herstellers „Ikegami“. Weiterhin ist die Breite des Fensters der Kameraan-

zeige  $w_b = 300 \text{ mm}$  und die Auflösung der Kamera in horizontaler Richtung  $x_b = 1392 \text{ Pixel}$ . Die Strecke  $s$ , welche ein Tropfen mit der Geschwindigkeit  $v$  in der Zeit  $t$  auf der Bildschirmoberfläche zurücklegt, berechnet sich nach (25) zu:

$$s = v \cdot t \cdot a \cdot \frac{w_b}{x_b} \quad (25)$$

Nach Einsetzen der bekannten Werte ergibt sich diese zu  $s = 102 \text{ mm}$ . Die Abstände für die Geschwindigkeiten  $v = 2,5 \text{ m/s}$  und  $v = 5 \text{ m/s}$  ergeben sich dementsprechend zu 25,5 und 51 mm. Diese Strecken werden auf der Oberfläche des Bildschirms aufgetragen (vergleiche Abb. 31).

Eine weitere Messreihe des Experiments erfordert eine Geschwindigkeitsmessung der Tropfen ohne, dass diese vorgegeben ist. Hierzu wird die Messung der Geschwindigkeit durch eine Messung der benötigten Zeit für das Zurücklegen einer bestimmten Strecke erledigt. Wird nun die Zeit  $t$  gemessen, die ein Tropfen benötigt um die vorgegebene Strecke  $s$  zurückzulegen, so berechnet sich die Geschwindigkeit des Tropfens nach (26) zu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (26)$$

Als Referenz wird der dritte Strich ausgewählt (5 m/s). Dieser Strich kennzeichnet die Distanz, die ein Tropfen mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s in  $50 \mu\text{s}$  zurücklegt. In diesem Fall beträgt die Flugstrecke  $s = 250 \mu\text{m}$ . Gemessen wird nun, in dem der Parameter „Delay“ soweit vergrößert wird, bis der Mittelpunkt des Tropfens jeweils auf den beiden vorgegebenen Linien steht. Die benötigte Zeit wird im Messprotokoll eingetragen und in der späteren Auswertung nach (26) in eine Geschwindigkeit in m/s zurückgerechnet. Der Parameter „Delay“ ist hier als die Flugdauer  $t$  einzusetzen.

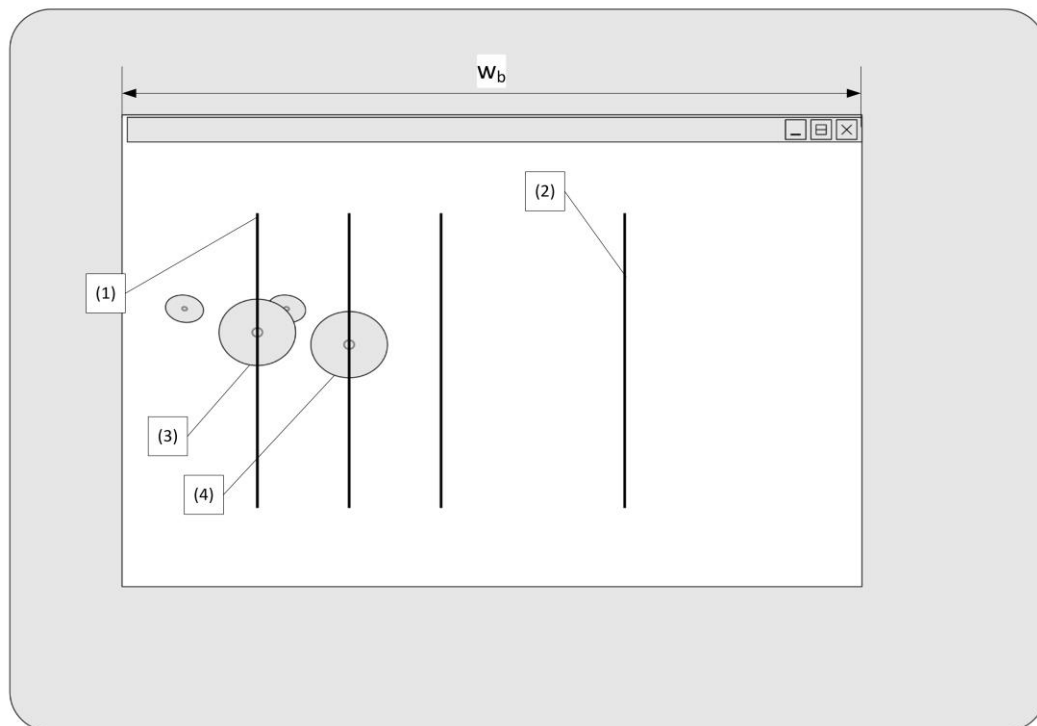


Abb. 31 Skizze zur Messung der Tropfengeschwindigkeit. Die erste (1) und vierte Linie (2) besitzt einen Abstand von  $s=102 \text{ mm}$ . Zur Messung einer Geschwindigkeit ist es nötig das Bild eines Tropfens (3) sowie die zeitversetzte Aufnahme (4) auf eine Linie zu positionieren.

## Messung der Tropfengröße

Die Tropfengröße kann über eine Bilderkennungssoftware komfortabel gemessen werden. Entsteht im Tropfenbildungsprozess ein Satellitentropfen wird dieser auch mittels der Software erkannt und gemessen. Die abgelesenen Werte werden in einem Anzeigefeld dargestellt und werden nach erfolgreicher Messung in das Messprotokoll eingetragen. Hierbei wird der Haupttropfen als „Tropfengröße 2“ und ein eventuell entstandener Satellitentropfen als „Tropfengröße 1“ bezeichnet.

Aus den notierten Durchmessern der Tropfen wird nach (27) das ausgestoßene Gesamtvolumen berechnet.

$$V_{ges} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left( \left( \frac{d_1}{2} \right)^3 + \left( \frac{d_2}{2} \right)^3 \right) = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot (d_1^3 + d_2^3) \quad (27)$$

$V_{ges}$  bezeichnet das ausgestoßene Gesamtvolumen und  $d_1$  und  $d_2$  die Durchmesser der entstandenen Tropfen.

### 3.4.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Zur Durchführung des Experiments wird der am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik vorhandene Tropfenbeobachtungsstand genutzt. Mit diesem ist es möglich, den Bildungsprozess eines Tropfens zu verschiedenen Zeiten zu betrachten und aufzunehmen. Ebenso ist es möglich, mittels einer integrierten Software das Volumen ausgestoßener Tropfen zu bestimmen. Der Tropfenbeobachtungsstand besteht aus einer Tischeinheit, welche einen verstellbaren Arm für die Befestigung des Tropfenerzeugers enthält. Diese Befestigung besteht aus einem speziellen Halter, welcher einen Kanal für die Zuführung des verwendeten Fluides beinhaltet. Dieses wird über eine Spritze zugeführt. Die optischen Instrumente bilden eine Stroboskoplampe und ein Mikroskop mit angeschlossener Kamera. Durch die Verwendung einer Stroboskoplampe ist es möglich, verschiedene Tropfen zu einem definierten Zeitpunkt zu beobachten. Die angeschlossene Kamera überträgt das aufgenommene Bild an den Steuerrechner und ermöglicht so eine Bildauswertung durch die Software. Eine Skizze des Tropfenbeobachtungsstandes ist in Abb. 32 zu sehen. Zur Realisierung und Kontrolle der elektrischen Ansteuerung kommen verschiedene Geräte zum Einsatz. Diese sind in Abb. 33 dargestellt. Zur Auswahl der Form und der Eigenschaften des elektrischen Ansteuerungsimpulses (Rechteck, Sinus, Frequenz, Impulslänge) kommt ein Funktionsgenerator des Typs „33220A“ der Marke „Agilent“ zum Einsatz. Die Synchronisation zwischen den optischen Instrumenten und der Ansteuereinheit wird durch ein Triggersignal des Steuerrechners sichergestellt. Hauptaufgabe der Ansteuerung übernimmt der Spannungsverstärker „PZD 350A“ der Marke „Trek“. Dieser bietet folgend technische Daten (Trek, 2012):

- Verstärkungsfaktor: 100
- Spannungsbereich des Ausgangs:  $\pm 350$  V
- Minimale Anstiegsgeschwindigkeit: 550 V/ $\mu$ s bipolar

Die Kontrolle der Ansteuerung erfolgt mit Hilfe eines Oszilloskops des Typs „DSO 4022“ der Marke „Votcraft“. Dieses Gerät ist wichtig, um eine Kontrolle der Ansteuerungsparame-



ter wie Frequenz, Pulslänge und Spannung des Impulses zu überprüfen und gegebenenfalls Korrekturen vorzunehmen.

Hauptelement des Tropfenbeobachtungsstandes stellt der Steuerrechner dar. Auf einem Bild-

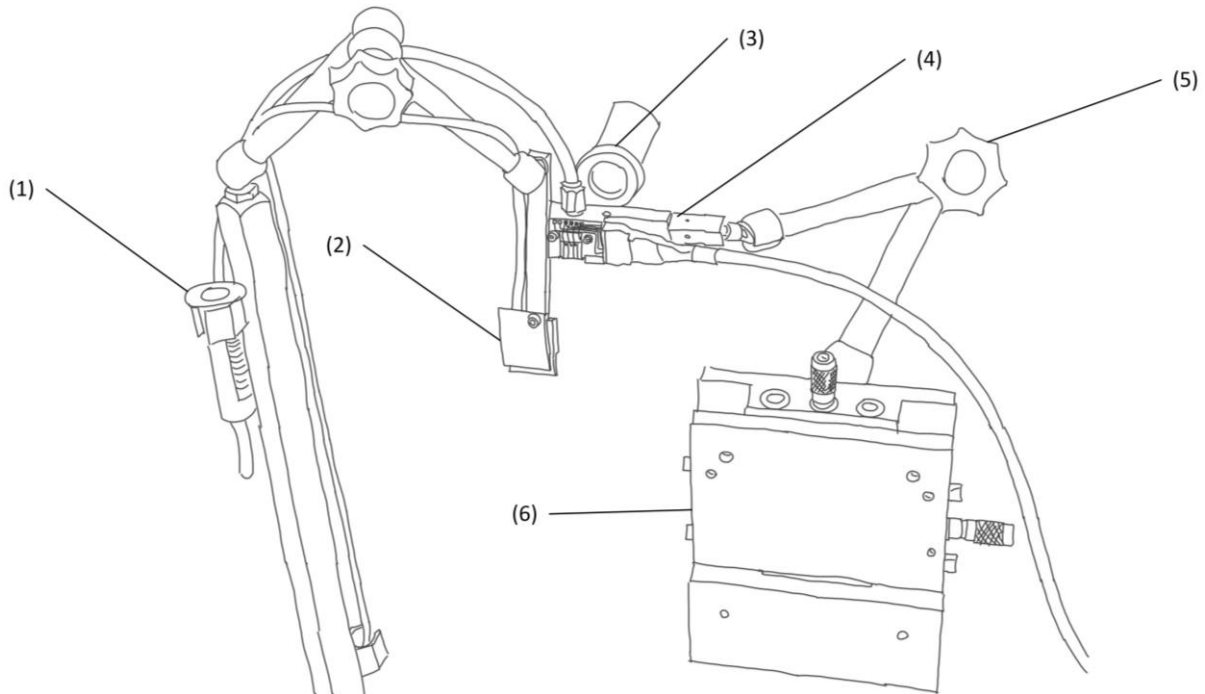


Abb. 32 Aufbau des Tropfenbeobachtungsstandes: Fluidzuführung (1), Stroboskoplampe (2), Objektiv der Mikroskopkamera (3), Tropfenerzeuger und Halter (4), verstellbarer Arm zur Ausrichtung (5) und über Stellschrauben verfahrbarer Tisch in zwei Achsen (6).

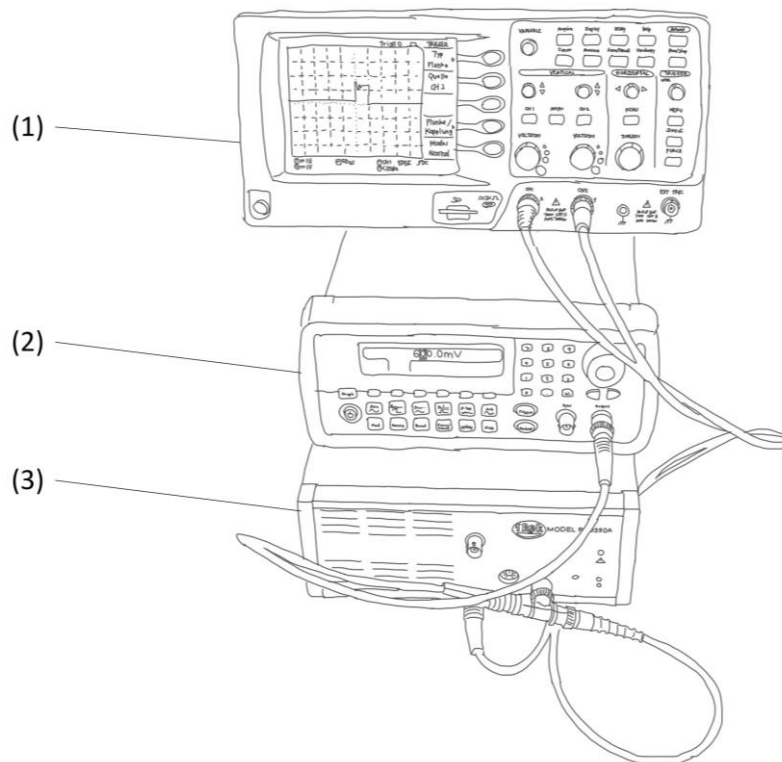


Abb. 33 Aufbau der elektrischen Ansteuerung: Oszilloskop zur Überprüfung der elektrischen Parameter (1), Funktionsgenerator zur Erzeugung des benötigten Signals (2) und Verstärker um die benötigten Spannungen zu erreichen (3).

schirm sind die Steuerungselemente zur Veränderung der benötigten Parameter dargestellt, wobei ein zweiter dauerhaft das aufgenommene Kamerabild in Echtzeit anzeigt. Ein Bildschirmfoto der verwendeten Software ist in Abb. 35 zu sehen. Die Funktion „Bildauswertung“ ermöglicht es, durch eine Bilderkennungssoftware die Größe der ausgestoßenen Tropfen zu errechnen.

## 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Zur Durchführung des Versuches gilt es diverse Vorbereitungen zu treffen, welche die korrekte Messung der Parameter ermöglichen. Ein konstantes Verhalten des Fluides ist unerlässlich. Ein Problem bei der Verwendung von Fluiden in einem Mikrotropfenerzeuger ist das Lösen von Gasblasen. Aus diesem Grund wird das verwendete Fluid vor jeder Verwendung mit Hilfe eines Ultraschallbades 30 min lang entgast. Nach einer zehnminütigen Abkühlphase, kann das Fluid für die Experimente verwendet werden. Ein ausgewählter Tropfenerzeuger wird mittels zweier Innensechskantschrauben an den dafür vorgesehenen Halter geschraubt und befestigt (siehe Abb. 34). Zunächst erfolgt ein Spülvorgang, welcher zum einen als Test für die Funktion der Düsen dient, als auch die fluidischen Strukturen wie Pumpkammer und Zuführungskanal blasenfrei mit Flüssigkeit füllt.

Der Druckkopf wird in Position gebracht, sodass die Düsenplatte in dem Bereich des linken Bildschirmrandes des Kamerafensters (vergleiche Abb. 35) zu sehen ist. Nach dem Anstecken des Kabels für die Energieversorgung, wird die elektrische Ansteuerung eingeschaltet. Für den Einschaltvorgang wird ein Impuls mit einer Pulslänge von  $100\ \mu\text{s}$  und einer Spannung von  $60\ \text{V}$  gewählt. Der nun folgende Tropfenbildungsprozess ist bei einer Phase von etwa  $230\ \mu\text{s}$  auf Veränderungen zu beobachten. Verschiebt ein Tropfen sich in Längsrichtung oder bricht der Bildungsprozess vollkommen ab, ist dies auf Lufteinschlüsse in den fluidischen Komponenten des Tropfenerzeugers zurückzuführen. Um Lufteinschlüsse zu entfernen wird der Tropfenerzeuger „über Kopf“ gespült. Hierzu wird die Feststellschraube des Halters gelöst und der Halter mit dem Druckkopf (vgl. Abb. 34 (2)) um  $180^\circ$  gedreht. Die elektrische Ansteuerung ist hierbei nicht abzuschalten. Folgend ist es nötig den Fluidbehälter erhöht zu positionieren, um einen permanenten Überdruck des Fluides auf den Pumpkammern zu erreichen. Sind Lufteinschlüsse vorhanden, sind diese an den Düsen spitzen zu erkennen. Durch Klopfen und Erschüttern des Halters werden diese Bläschen gelöst und entweichen über die Düse. Der Halter wird nun wieder umgedreht und mittels der Feststellschraube fixiert. Der letzte Schritt besteht darin, das Fluidreservoir wieder in Ausgangsposition zu bringen. Ein Bewegen des Fluidreservoirs führt zu Druckschwankungen in dem Schlauchsystem und birgt

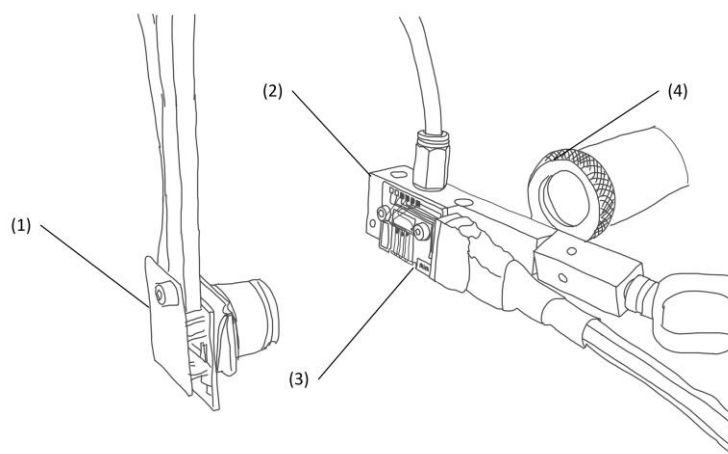


Abb. 34 Tropfenbeobachtungsstand im Detail. Gezeigt sind Stroboskoplampe (1), Halter (2), Tropfenerzeuger auf Trägerplatine (3) und Objektiv der Mikroskopkamera (4).

die Gefahr erneut Luft über die Düsen zu ziehen. Um diesen Effekt vorzubeugen, wird eine mit dem verwendeten Fluid gefüllte Pipette benutzt, um einen versiegelnden Flüssigkeitstropfen an der Düse zu halten, während das Fluidreservoir bewegt wird. Hierdurch werden zuverlässig gefangene Luftblasen entfernt und ein Eindringen neuer verhindert. Das Fluidreservoir wird in jedem Tropfenbeobachtungsexperiment leicht unterhalb der Düse positioniert um einen leichten Unterdruck erzeugen. Durch die kapillaren Kräfte findet eine Wiederbefüllung der Pumpkammer statt. Hierzu wird die Flüssigkeitssäule des Fluidreservoirs mit Höhenunterschied von 3 – 4 cm unterhalb der Düsenöffnung positioniert. Ist der Tropfenbildungsprozess stabil (keine Veränderungen des Tropfenbildungsprozesses über einen Zeitraum von mindestens 5 Minuten), werden die vorgesehenen Messungen durchgeführt.

### Messreihe 1 - Mindestspannung

Um für einen vorgegebenen Tropfenbildungsprozess (gerader Flug, 2,5 m/s und 5 m/s) die Mindestspannung zu bestimmen, wird zunächst die vorgesehene Impulslänge eingestellt. Ausgehend von einem stabilen Tropfen wird nun die Spannung durch Einstellung des Funktionsgenerators soweit herabgesenkt, bis der Bildungsprozess abbricht. Der zuletzt funktionierende Wert der Spannung wird im Messprotokoll notiert. Zur Messung der Mindestspannung mit vorgegebener Geschwindigkeit ist die Funktion „Geschwindigkeitsmessung“ in der GUI auszuwählen. Nach Einstellen der vorgesehenen Impulslänge wird die Spannung soweit erhöht, bis die jeweiligen Mittelpunkte des beobachteten Tropfens mit den auf den entsprechenden auf dem Bildschirm befindlichen Linien übereinstimmen. Die eingestellte Spannung ist im Messprotokoll zu vermerken. Für die Messung eines Tropfens mit 2,5 m/s und 5 m/s sind dies die Linien 1 und 2, respektive 1 und 3 (vergleiche hierzu Abb. 36).

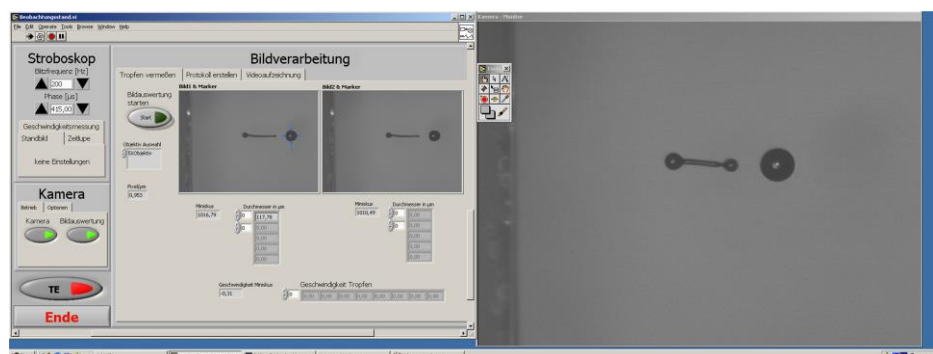


Abb. 35 Screenshot des Programmfensters am Tropfenbeobachtungsstand. Zu sehen ist auf der linken Seite das Bedienpanel mit den aktivierten Komponenten zur Tropfengrößenbestimmung. Auf der rechten Seite befindet sich das Fenster mit dem Kamerabild zur Beobachtung des Tropfenbildungsprozesses.

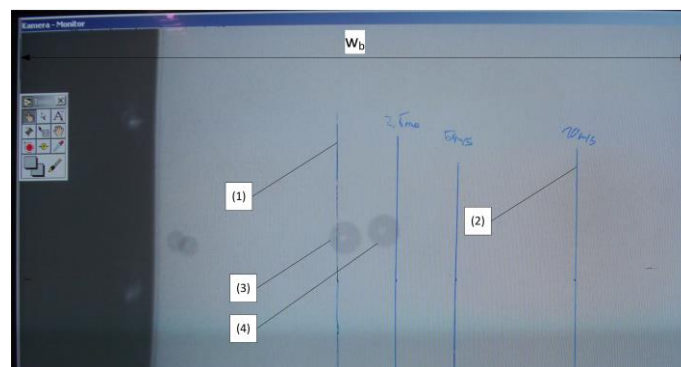


Abb. 36 Foto des Bildschirms der Kamera bei einer Geschwindigkeitsmessung. Die Grundlinie (1) und die 10 m/s Linie (2) besitzen den berechneten Abstand  $s$ . (3) und (4) sind die Bilder eines Tropfens zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten.

## Messreihe 2 - Tropfenparameter

Die zweite durchgeführte Messreihe besteht darin, die Parameter eines Tropfens bei einer vorgegebenen Ansteuerung zu ermitteln. Die verwendeten Werte sind Tabelle 16 zu entnehmen. Ausgehend von einem stabilen Tropfenbildungsprozess, werden die einzustellenden Parameter gesetzt (Amplitude, Impulslänge, Phase). Zunächst wird die Größe des Haupttropfens und des, soweit vorhanden, Satellitotropfens mit Hilfe der Bilderkennungsfunktion gemessen und notiert. Durch Verwendung der Funktion Geschwindigkeitsmessung und Einstellen des Parameters „Delay“, sowie der Stellschraube zur Verschiebung des Tropfenhalters in z-Richtung, ist der jeweilige Mittelpunkt des Tropfens auf die Grundlinie und die 5 m/s-Linie zu legen. Die unter Delay eingestellte Zeit ist zu notieren und wird in der Auswertung unter Verwendung von Gleichung (26) in eine Fluggeschwindigkeit in m/s umgerechnet.

### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Dieses Experiment hat zum Ziel, einen Zusammenhang des Düsenquerschnitts in Form von Düsenbreite und Düsentiefe auf die Parameter des entstehenden Tropfens zu charakterisieren. Die Vorbetrachtung in Kapitel 2.3.1 zeigt, dass sich eine Vergrößerung des Querschnitts auf den gesamten Volumenstrom in der Düse auswirkt. Daher werden die Messwerte über die Breite und Tiefe der Düse aufgetragen, um einen Überblick zu erhalten wie diese die betrachteten Parameter beeinflussen (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Messwerte zu Düsenbreite & -tiefe.

Abmessung (Breite x Länge)	50 x 100	70 x 100	100 x 100
Anzahl der Proben	4	7	6
	Wert	Wert	Wert
Pulslänge (gerader Flug)	Mindestspannung [V]		
100	28,00	27,89	28,00
80	28,75	28,33	27,20
50	32,25	30,00	31,00
20	36,25	38,78	38,40
16	38,50	43,89	43,00
12	44,00	49,33	50,40
10	48,75	53,56	56,20
9	50,00	56,33	59,60
8	53,25	60,11	63,20
7	58,25	58,75	68,40
6	64,00	65,38	73,40
5	71,00	70,88	79,00
4	76,50	78,13	81,60
3	79,25	76,17	83,60

<b>Abmessung (Breite x Länge)</b>	<b>50 x 100</b>	<b>70 x 100</b>	<b>100 x 100</b>
<b>Anzahl der Proben</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>6</b>
	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>
Pulslänge [ $\mu\text{s}$ ] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]		
2	-	85,25	-
1	-	-	-
Pulslänge [ $\mu\text{s}$ ] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]		
100	49,75	39,78	50,00
50	54,00	41,22	52,00
20	58,50	51,00	63,00
10	65,75	69,33	81,80
5	86,75	86,50	102,20
Pulslänge [ $\mu\text{s}$ ] (5 m/s)	Mindestspannung [V]		
100	71,00	55,67	73,40
50	72,50	57,33	73,80
20	70,75	68,44	81,00
10	81,00	81,38	103,00
5	101,50	95,00	129,40
	Zeit [ $\mu\text{s}$ ]		
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	143,33	68,57	169,20
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	69,50	49,75	66,00
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	85,50	69,11	76,40
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	46,00	36,44	43,20
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	50,00	42,44	37,60
	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]		
Tropfengröße 1 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	76,00	86,17	85,70
Tropfengröße 1 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	59,30	93,36	92,22
Tropfengröße 1 (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	60,03	80,93	74,73
Tropfengröße 1 (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	67,50	81,42	86,82
Tropfengröße 1 (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	54,65	80,26	115,78
Tropfengröße 2 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	82,73	112,46	129,57
Tropfengröße 2 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	86,65	124,14	147,40

Abmessung (Breite x Länge)	50 x 100	70 x 100	100 x 100
Anzahl der Proben	4	7	6
	Wert	Wert	Wert
	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]		
Tropfengröße 2 (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	73,68	100,11	114,66
Tropfengröße 2 (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	68,40	110,70	126,38
Tropfengröße 2 (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	88,00	99,58	138,44
	Zeit [ $\mu\text{s}$ ]		
Delay (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	433,33	403,00	446,00
Delay (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	442,50	443,00	560,00
Delay (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	406,25	402,50	482,00
Delay (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	400,00	404,17	516,00
Delay (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	400,00	450,00	562,00
Hub Sinus 50 V / 200 Hz	156,75	156,67	154,00
	Volumen [nl]		
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,48	1,21	1,21
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,45	1,57	2,14
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	0,32	0,90	1,01
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	0,34	1,11	1,51
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,45	0,91	2,42
	Geschwindigkeit [m/s]		
Geschwindigkeit [m/s] (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	1,94	3,70	1,52
Geschwindigkeit [m/s] (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	3,87	6,04	3,80
Geschwindigkeit [m/s] (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	3,49	4,97	3,40
Geschwindigkeit [m/s] (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	6,86	8,19	5,81
Geschwindigkeit [m/s] (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	5,00	9,54	6,66

### 3.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt folgt eine Zusammenfassung und Anwendung der Ergebnisse auf die Hypothese und getroffenen Annahmen.

Abb. 37 stellt die Abhängigkeit der Mindestspannung für einen stabilen Tropfenbildungsprozess von der Pulslänge dar. Die drei aufgetragenen Kurven repräsentieren die unterschiedlich hergestellten Querschnittsgrößen. Auf den Zusammenhang der Mindestspannung und der Pulslänge wird in Kapitel 3.6 tiefer eingegangen. Bezeichnend im Bezug auf die unterschiedlichen Düsenquerschnitte sind die geringen Unterschiede des dargestellten Mindestspannungsverlaufs. Die dem Piezoaktor und damit maximale zugeführte elektrische Energie berechnet sich analog zu der in einem Kondensator gespeicherten Energie zu Gleichung (28).

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (28)$$

Hierbei ist  $C$  die Kapazität eines Kondensators. Da der Energieeintrag proportional zu der angelegten Spannung  $U$  im Quadrat ist (29), ist diese als Maß für die nötige Energie zur stabilen Bildung eines Tropfens geeignet.

$$W \propto U^2 \quad (29)$$

Die maximale auftretende Differenz besteht zwischen der Düse mit einer Kantenlänge von  $50 \mu\text{m}$  und derjenigen mit  $100 \mu\text{m}$  und beträgt bei einer Pulslänge von  $8 \mu\text{s}$   $\Delta U = 9,95 \text{ V}$ . Der Einfluss des Düsenquerschnitts auf die benötigte Mindestspannung ist als gering einzuschätzen. Zu beachten ist jedoch, dass die Düse mit dem größten Querschnitt ( $100 \mu\text{m}$ ) zumeist die höchste Spannung benötigt und die Düse mittlerer Größe ( $70 \mu\text{m}$ ) ebenfalls im Mittel häufig zwischen den beiden Extrema der Herstellungsdimensionen liegt. In Abb. 38 ist der Verlauf der Tropfengeschwindigkeit über verschiedene Düsenquerschnitte aufgetragen. Die einzelnen Kurven sind dabei bei unterschiedlichen Amplituden aufgenommen. Dies dient der Verifikation der Messergebnisse. Aussagen über die Veränderlichkeit der Tropfenbildung durch Veränderung der Pulslänge der elektrischen Ansteuerung erfolgen im Speziellen ausführlich in Kapitel 3.7. In diesem Experiment wird auf die Veränderlichkeit der Tropfenparameter bei Veränderung der Düsengröße eingegangen. Wie den Kurven zu entnehmen ist, verlaufen diese sehr ähnlich. Während der größte, respektive der kleinste hergestellte Düsenquerschnitt zu einer ähnlichen Geschwindigkeit führen, bietet die Düse mit einem Querschnitt von  $70 \mu\text{m}$  in jedem der drei Ansteuerungen ein Maximum der Geschwindigkeit.

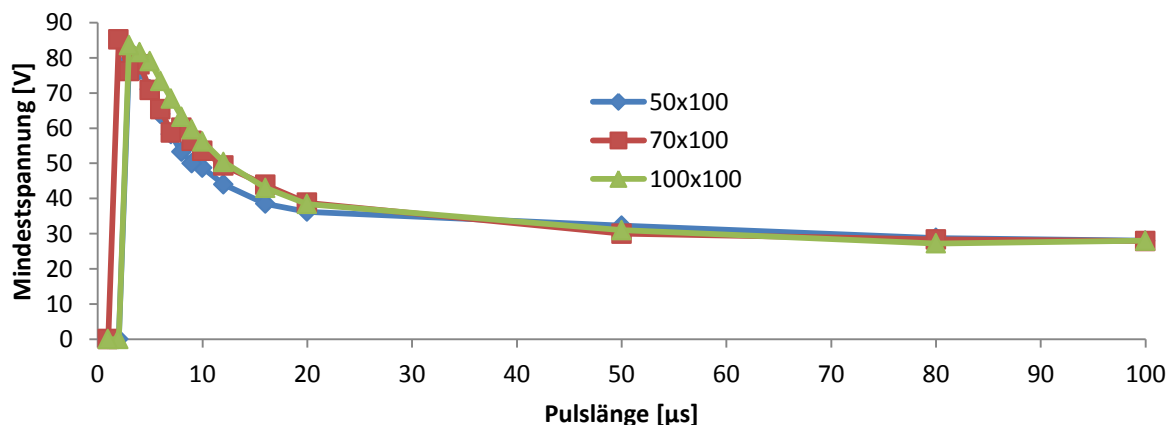


Abb. 37 Benötigte Mindestspannung abhängig von der Pulslänge für unterschiedlich breite Düsen bei gleichzeitig konstanter Düsenlänge. Der Einfluss der Breite ist gering.

Ein großer Düsenquerschnitt erlaubt durch den geringeren Strömungswiderstand nicht den Aufbau des Drucks, welcher benötigt wird, um einen Tropfen hoher Geschwindigkeit zu bilden. Die gefertigten Düsen mittleren Querschnitts bilden, den Messungen nach zu urteilen, ein Optimum der Energieausbeute im Bezug auf die Tropfengeschwindigkeit. Die untersuchten Düsen mit einer Größe von 50 und 100  $\mu\text{m}$  Breite erreichen Fluggeschwindigkeiten von 1,51 m/s und 1,93 m/s bei einer Ansteuerung mit 40 V, 3,87 m/s und 3,8 m/s bei einer Ansteuerung von 60 V und 5 m/s und 6,6 m/s bei einer Ansteuerung von 80 V. Der Geschwindigkeitsvorteil der Düse des Querschnitts 70  $\mu\text{m}$  gegenüber den übrigen Düsengrößen, liegt bei jeder der untersuchten Spannungsniveaus bei über 1,7 m/s.

Da es im Tropfenbildungsprozess häufig zu der Bildung von Satellitentropfen kommt, werden deren Volumina bei der folgenden Auswertung zum ausgestoßenen Gesamtvolumen hinzugefügt. In Abb. 40 ist die Menge des ausgestoßenen Volumens über die Breite und Tiefe der verwendeten Düsen aufgetragen. Hierbei repräsentieren die drei Kurven erneut die Verwendung dreier Amplitudenniveaus in der elektrischen Ansteuerung und dienen der Absicherung der Messergebnisse. Wie in der Hypothese postuliert, ist durch eine Vergrößerung des Düsenquerschnitts mit einer Vergrößerung der Tropfenvolumina zu rechnen. Jede der gezeigten Balken repräsentiert diesen Anstieg und bestätigen die angenommene Hypothese. Ziel des vorliegenden Experiments ist es, den Einfluss der Breite und Tiefe der Düse auf den Tropfenbildungsprozess zu erschließen. Nach Auswertung der Messungen ist eine qualitative Aussage über das Verhalten möglich. Während die Mindestspannung nicht in kennzeichnendem Maß beeinflusst wird, entspricht die Abhängigkeit des Tropfenvolumens der vorher angenommenen. Bezogen auf die Tropfengeschwindigkeit, stellt die Düse mit mittleren Abmessungen ein Optimum dar. Bei einer Fertigungsbreite und –tiefe von 70  $\mu\text{m}$  erreichen die Düsen die höchsten Geschwindigkeiten bei jeder Ansteuerungsform. In Abb. 39 zu sehen sind zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommene Bilder des Tropfenbildungsprozesses. Hierbei ist der Geschwindigkeitsvorteil der 70  $\mu\text{m}$  breiten Düse (g) bis (m) deutlich zu sehen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Verwendung einer kleinen Düsenabmessung, der notwendige Druckgradient so hoch ist, dass die gewählte Ansteuerung nicht ausreicht, um diesen zu erreichen.

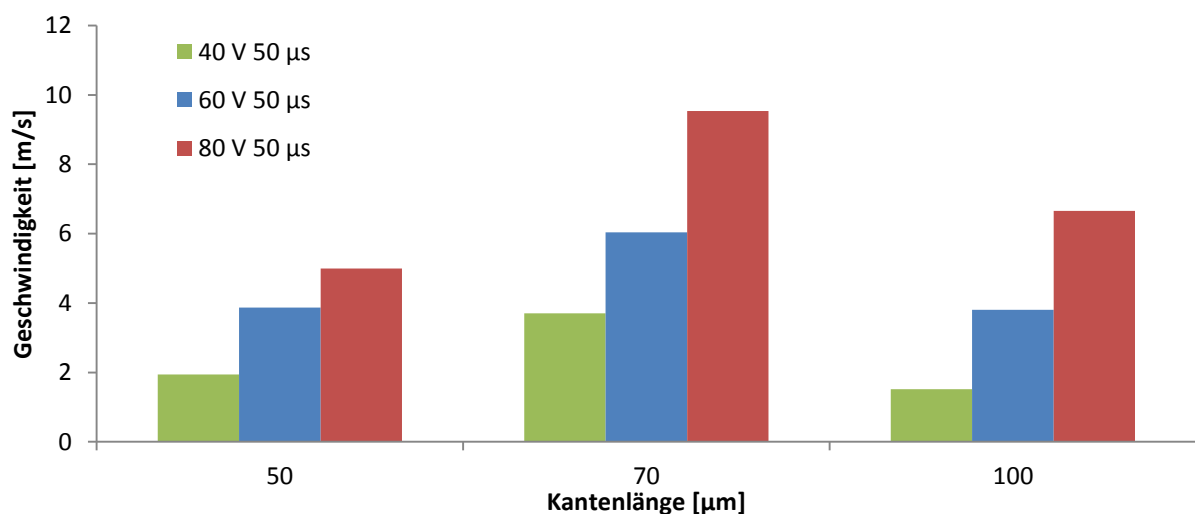


Abb. 38 Diagramm der Tropfengeschwindigkeit bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Spannungsniveaus (40, 60, 80 V) bei konstanter Pulslänge (50  $\mu\text{s}$ ). Die Düsen der Breite 70  $\mu\text{m}$  liegen im Mittel auf jedem der Spannungsniveaus am höchsten.



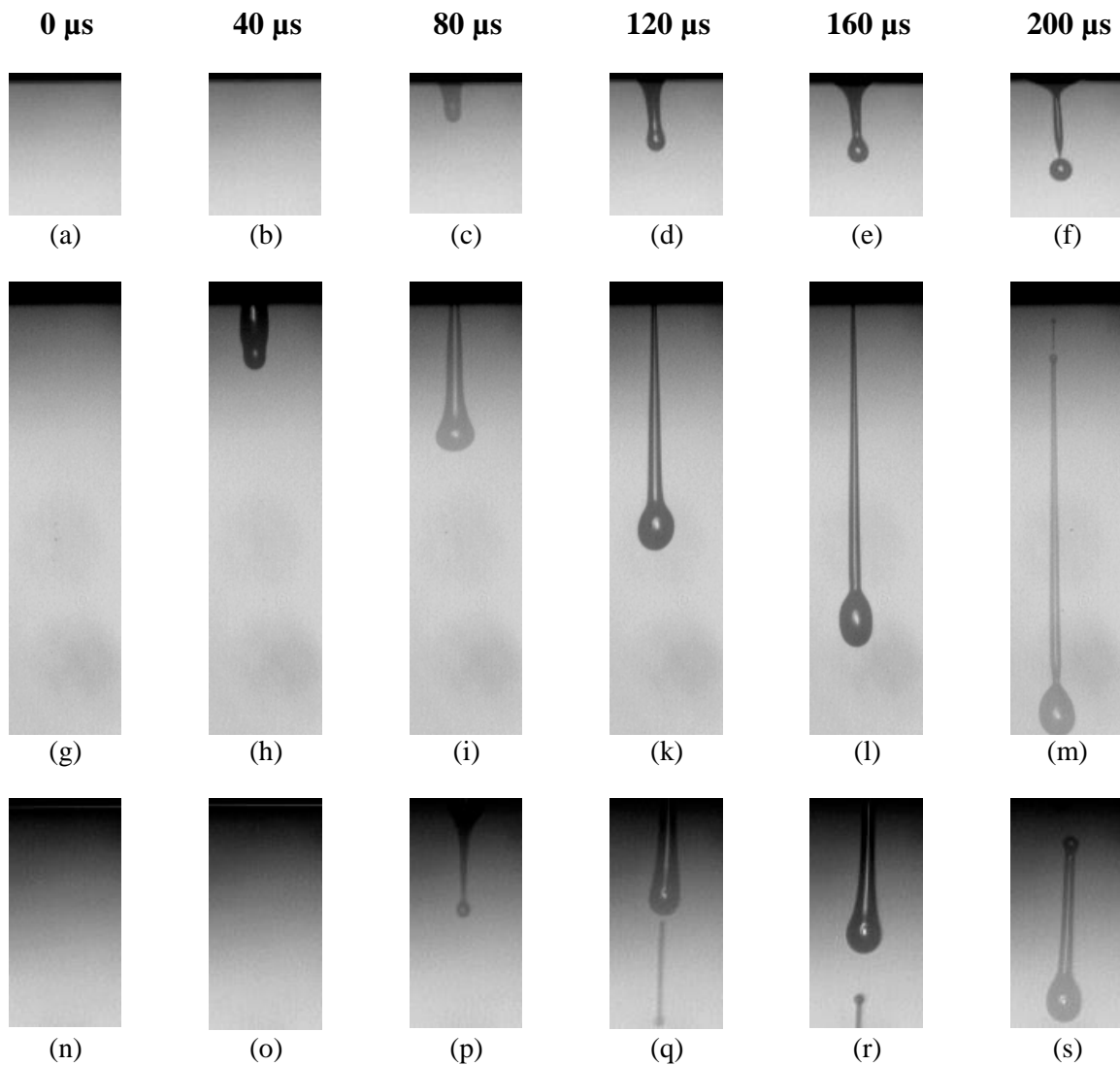


Abb. 39 Bildsequenzen drei verschiedener Tropfenbildungsprozesse. (a) bis (f) zeigen die Tropfenbildung einer Düse mit einem Querschnitt von 50 µm, (g) bis (l) zeigen eine Düse mit 70 µm und (n) bis (s) eine Düse mit 100 µm Querschnitt. Die elektrische Ansteuerung erfolgt mit einer Pulslänge von 50 µs und einer Spannung von 60 V.

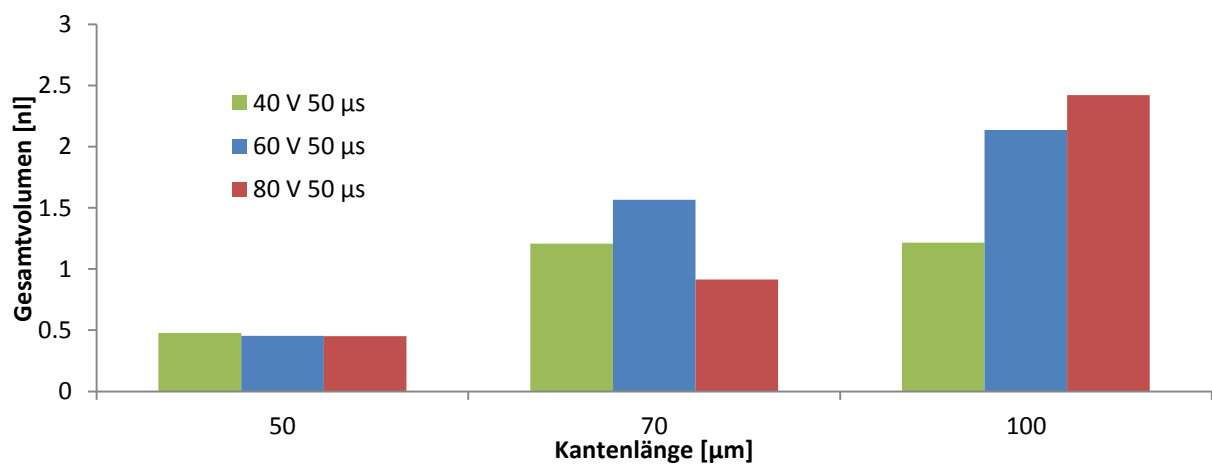


Abb. 40 Ausgestoßenes Gesamtvolumen bei verschiedenen Spannungsniveaus und konstanter Pulslänge. Der Einfluss der Düsenabmessung auf das Tropfenvolumen zeigt sich durch den Anstieg der Mittelwerte mit steigender Kantenlänge.

### 3.5 Experiment 5: Einfluss der Düsenlänge auf Tropfenparameter

#### 3.5.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

Neben der Variation der Breite und Tiefe der Düse wird im Laufe dieser Semesterarbeit auch die Länge der gefertigten Düsen variiert. Der Einfluss der Düsenlänge auf die Tropfenparameter wie Volumen und Geschwindigkeit stellt einen wichtigen Zusammenhang dar, da durch Anpassen der Länge und der damit verbundenen Veränderung der im Düsenkanal herrschenden Reibung ein verbesserter Tropfenbildungsprozess erreicht wird.

##### 2. Hypothese

Basierend auf den Annahmen zur Mikrokanalströmung, welche in Kapitel 2.3.1 beschrieben werden, wird eine Hypothese des Tropfenverhaltens aufgestellt. Bei Vorhandensein einer Hagen-Poiseuille-Strömung folgt eine proportionale Beziehung des Volumenstroms  $\dot{V}$  zum Kehrwert der Länge des Kanals  $l$  (vgl. (30)).

$$\dot{V} \propto \frac{1}{l} \quad (30)$$

Aus dieser Beziehung ist ein Rückgang der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit mit steigender Düsenlänge zu erwarten.

##### 3. Materialien

Untersucht werden in diesem Experiment Düsen mit unterschiedlicher Länge. Die Herstellung dieser wird im weiteren Verlauf beschrieben. Des Weiteren werden identische Materialien wie in Experiment 4 verwendet (vgl. Kapitel 3.4).

##### 4. Versuchsparameter

Der Großteil der für den Messprozess benötigten Parameter ist bereits in Kapitel 3.4 beschrieben. In Tabelle 18 sind die in diesem Experiment betrachteten Düsenparameter dargestellt.

Es werden für dieses Experimente dieselben Messreihen durchgeführt, welche bereits im vorhergehenden Kapitel ausführlich beschrieben wurden. Hierfür werden bei jeder zu untersuchenden Länge eine Anzahl von mindestens fünf Proben verwendet.

##### 5. Methoden

Die bereits vorgestellten Messmethoden werden auch hier eingesetzt, um eine möglichst ge-

Tabelle 18: Verwendete Größen im Experiment.

Parameter	Einheit	Wert
Düsenbreite	$\mu\text{m}$	70
Düsentiefe	$\mu\text{m}$	70
Düsenlänge	$\mu\text{m}$	50; 100; 200

naue Aufnahme der Tropfenparameter und deren Abhängigkeit zu erzielen. Zur Auswertung der Ergebnisse werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung über den Probenraum herangezogen.

### 3.5.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist im Detail in Kapitel 3.4 nachzulesen.

#### 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Für dieses Experiment alleinstellend ist die Herstellung der Düsenlängen. Die Fertigung der Düsenlängen stellt den letzten Schritt der Herstellung mit Hilfe der Wafersäge dar. Folgend auf den Schritt der Vereinzelung werden die einzelnen Druckchips erneut mittels der Klebefolie fixiert und auf den Werkstückhalter gespannt. Nach der Ausrichtung der  $\theta$ -Achse wird die Frontlinie der mittleren Düse angefahren. Von hier aus wird mit Hilfe des eingebauten Messwerkzeugs die entsprechende Strecke der Düsenlänge eingestellt. Nach einer Positionierung der Startposition um einige Millimeter links des Chips, kann der Schneidevorgang gestartet werden. Anschließend werden die entstandenen Düsenlängen mittels des Mess-Werkzeugs kontrolliert und in das jeweilige Herstellungsprotokoll eingetragen.

Die Messungen zu den fluidischen Untersuchungen verlaufen analog zu den vorhergehenden Experimenten.

#### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Zur Ableitung der Ergebnisse aus den zusammengetragenen Messwerten werden die jeweiligen Parameter über den Verlauf der Düsenlänge aufgetragen (siehe Tabelle 19). Hierdurch ist es möglich, die vorhandenen Zusammenhänge zu erkennen und zu beschreiben.

Tabelle 19: Aufgenommene Messwerte der Tropfenexperimente im Bezug auf die Düsenlängen 50, 100 und 200  $\mu\text{m}$ .

Abmessung (Breite x Länge)	70 x 50	70 x 100	70 x 200
Anzahl der Proben	7	7	5
	Wert	Wert	Wert
Pulslänge [ $\mu\text{s}$ ] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]		
100	30,14	27,89	33,40
80	30,00	28,33	33,80
50	31,00	30,00	34,60
20	37,71	38,78	46,80
16	41,57	43,89	51,60
12	46,43	49,33	59,40
10	50,57	53,56	68,00
9	53,14	56,33	72,00

<b>Abmessung (Breite x Länge)</b>	<b>70 x 50</b>	<b>70 x 100</b>	<b>70 x 200</b>
<b>Anzahl der Proben</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>5</b>
	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>
<b>Pulslänge [µs] (gerader Flug)</b>	<b>Mindestspannung [V]</b>		
8	55,71	60,11	76,60
7	59,57	58,75	81,60
6	63,86	65,38	84,40
5	70,00	70,88	91,80
4	73,67	78,13	80,25
3	78,50	76,17	86,75
2	91,50	85,25	96,50
1	-	-	-
<b>Pulslänge [µs] (2,5 m/s)</b>	<b>Mindestspannung [V]</b>		
100	45,00	39,78	52,00
50	42,57	41,22	51,80
20	51,14	51,00	63,75
10	58,43	69,33	76,80
5	74,71	86,50	94,00
<b>Pulslänge [µs] (5 m/s)</b>	<b>Mindestspannung [V]</b>		
100	65,71	55,67	72,00
50	62,14	57,33	70,20
20	67,71	68,44	85,00
10	78,00	81,38	99,80
5	85,17	95,00	122,60
	<b>Zeit [µs]</b>		
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 V / 50 µs)	110,86	68,57	171,60
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 V / 50 µs)	53,43	49,75	64,40
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 10 µs)	52,00	69,11	96,00
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 20 µs)	38,57	36,44	50,00
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 50 µs)	31,71	42,44	36,80

Abmessung (Breite x Länge)	70 x 50	70 x 100	70 x 200
Anzahl der Proben	7	7	5
	Wert	Wert	Wert
	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]		
Tropfengröße 1 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	60,03	86,17	56,35
Tropfengröße 1 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	69,41	93,36	53,83
Tropfengröße 1 (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	54,50	80,93	64,42
Tropfengröße 1 (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	69,28	81,42	63,15
Tropfengröße 1 (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	71,90	80,26	62,48
Tropfengröße 2 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	100,39	112,46	94,10
Tropfengröße 2 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	107,99	124,14	107,26
Tropfengröße 2 80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	77,89	100,11	91,48
Tropfengröße 2 80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	96,59	110,70	104,39
Tropfengröße 2 80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	109,37	99,58	119,18
	Zeit [ $\mu\text{s}$ ]		
Delay (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	397,86	403,00	387,00
Delay (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	447,86	443,00	413,00
Delay (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	336,43	402,50	403,00
Delay (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	362,86	404,17	407,00
Delay (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	400,71	450,00	408,00
	Messung Laservibrometer [mV]		
Hub (Sinus 50 V / 200 Hz)	137,00	156,67	152,50
	Volumen [nl]		
Ausgestoßenes Volumen (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,61	1,21	0,50
Ausgestoßenes Volumen (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,92	1,57	0,74
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	0,39	0,90	0,57
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	0,66	1,11	0,73
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,99	0,91	1,06
	Geschwindigkeit [m/s]		
Geschwindigkeit (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	2,87	3,70	1,96
Geschwindigkeit (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	5,22	6,04	4,29
Geschwindigkeit (80 V / 10 $\mu\text{s}$ )	5,80	4,97	3,39
Geschwindigkeit (80 V / 20 $\mu\text{s}$ )	7,35	8,19	5,92
Geschwindigkeit (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	8,67	9,54	7,27

### 3.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Parameter Mindestspannung, Tropfengeschwindigkeit und Tropfenvolumen mit der Länge des Düsenkanals in Relation gesetzt und die dargestellten Zusammenhänge erläutert.

Der Fokus in der Betrachtung des in Abb. 41 gezeigten Diagramms liegt auf den Niveau-Unterschieden der Kurven. Diese repräsentieren die unter Verwendung unterschiedlicher Düsen aufgenommenen Messwerte. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Düsen sich über den Verlauf der Pulslänge ähnlich verhalten. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich bei Betrachtung der längsten Düse. Diese Kurve ist deutlich höher angesiedelt als die Kurven der Düsen von kürzerer Länge. Nach den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Gleichungen (vgl. (15) und (16)) zur Abschätzung der für den Tropfenausstoß aufgewendeten Energie benötigt eine längere Düse eine höhere Energie für die stabile Tropfenbildung. Zurückzuführen ist dies auf den fluidischen Widerstand, welcher mit der Länge des durchströmten Kanals wächst.

Abb. 43 zeigt die gemessenen Tropfengeschwindigkeiten und zeichnet diese über die Längen der verwendeten Düsen auf. Auffallend ist, dass in dem Bereich der mittleren Düsenlänge von  $100\text{ }\mu\text{m}$  ein Hochpunkt jeder der drei Kurven zu erkennen ist. Bei Verwendung einer langen Düse ( $200\text{ }\mu\text{m}$ ) fallen die erreichten Geschwindigkeiten signifikant ab. Auch dies ist dem gestiegenen Reibungswiderstand im Kanal zuzusprechen. Eine eindeutige Zuordnung der Abhängigkeit der Geschwindigkeit ist hierbei nicht möglich, da bei Betrachtung der kürzesten Düsen ebenfalls ein Rückgang der Tropfengeschwindigkeit zu erkennen ist. Wie auch bereits in Kapitel 3.4 gezeigt, ist das mittlere gewählte Düsenmaß den Übrigen überlegen. Hierbei ist der Geschwindigkeitsvorteil unter jeder der verwendeten elektrischen Ansteuerungen mindestens  $0,9\text{ m/s}$ .

Der zweite Tropfenparameter von Interesse ist das ausgestoßene Gesamtvolumen. Abb. 42 stellt dar, wie sich das Gesamtvolumen über die Länge der Düse verhält. Auch diese Kurven des Tropenvolumens verhalten sich ähnlich der vorangegangenen Messwerte. So bietet die Düsenlänge von  $100\text{ }\mu\text{m}$  den Tropfen mit dem höchsten Volumen bei gleicher Ansteuerung. Der sehr geringe Volumenstrom der längsten Düse ist erklärbar durch den gewachsenen Wi-

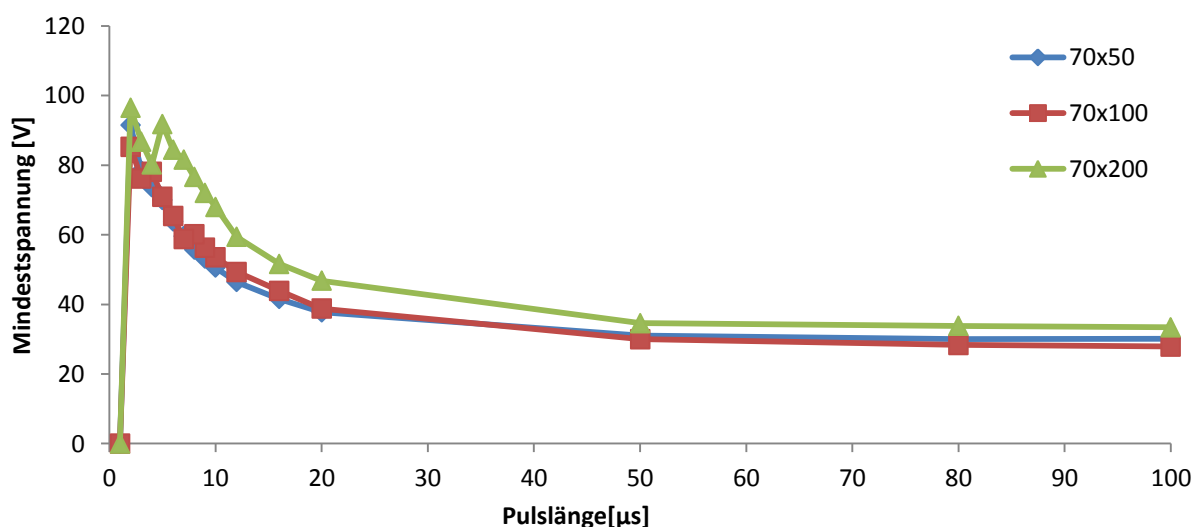


Abb. 41 Einfluss der Düsenlänge auf die für einen stabilen Tropfenbildungsprozess benötigte Mindestspannung. Hierbei ist zu sehen, dass die Düsen mit einer Länge von  $200\text{ }\mu\text{m}$  bis zu 150 % der Spannung benötigen als die Düsen kleinerer Länge.

derstand. Das vorhandene Defizit der kürzesten Düse lässt darauf schließen, dass diese Länge nicht geeignet ist, im Tropfenerzeuger verwendet zu werden. Durch den geringen Widerstand im Kanal ist der Aufbau des notwendigen Drucks nicht möglich.

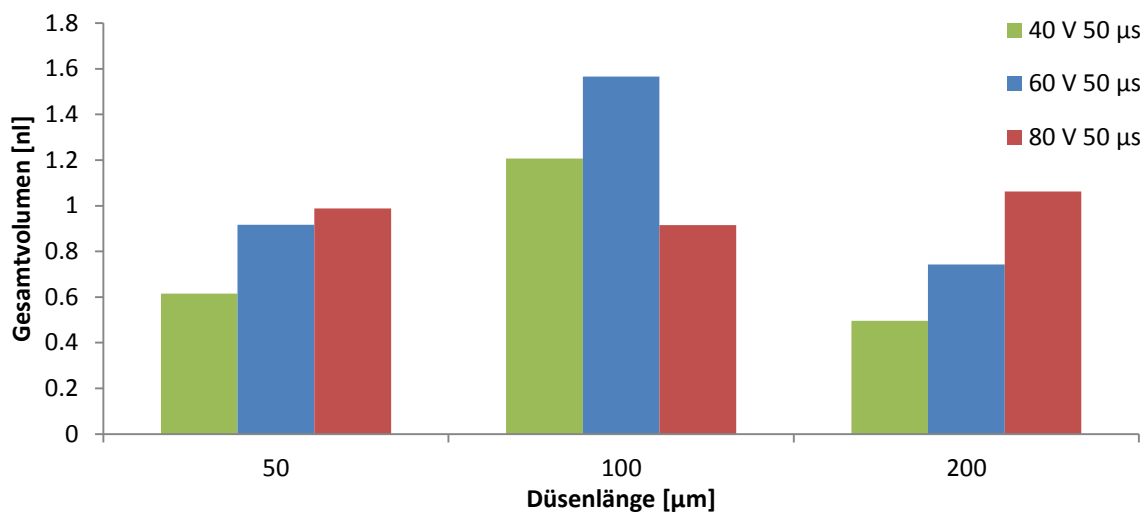


Abb. 42 Darstellung des ausgestoßenen Gesamtvolumens bei unterschiedlichen Spannungsniveaus. Die Düse mit einer Länge von 100 µm erreicht mit 1,57 nl den höchsten Wert, wohingegen die geringste Flüssigkeitsmenge aus einer 200 µm langen Düse ausgestoßen wird.

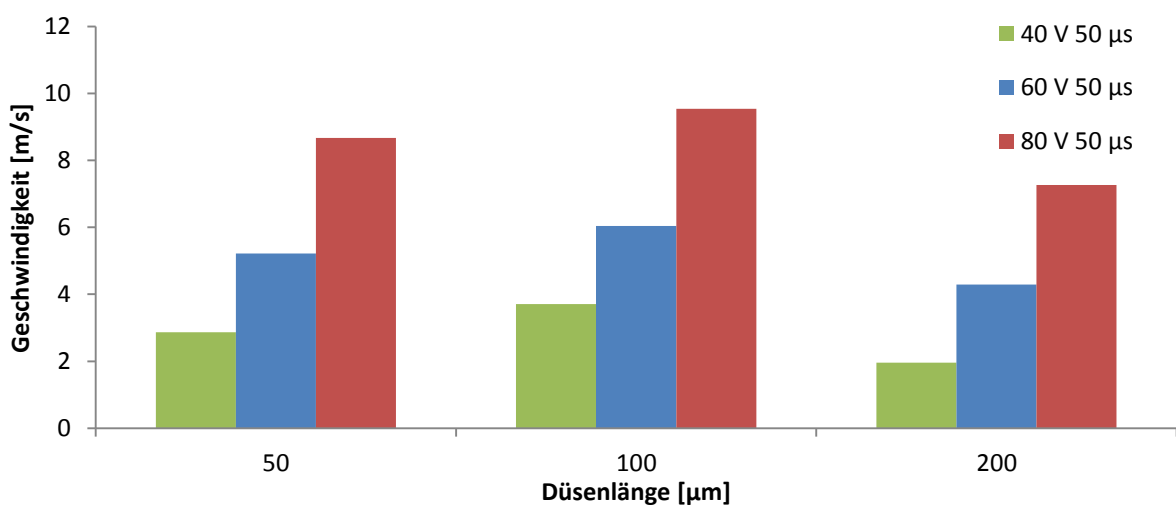


Abb. 43 Geschwindigkeit der Tropfen zu unterschiedlichen Spannungsniveaus der Ansteuerung (40, 60, 80 V) und konstanter Pulslänge (50 µs). Zu jeder Ansteuerung bietet eine Düsenlänge von 100 µm die höchsten Tropfengeschwindigkeiten und bieten einen Vorteil von über 0,9 m/s gegenüber der übrigen Düsenlängen 50 und 100 µm.

### 3.6 Experiment 6: Einfluss der Pulslänge auf Tropfenparameter

#### 3.6.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

Nach den angestellten Experimenten und Untersuchungen zu den Einflüssen der Düsendimensionen ist im weiteren Verlauf der Semesterarbeit der Einfluss der elektrischen Ansteuerung zu untersuchen. Im Speziellen gilt es, zunächst den Einfluss der Pulslänge zu betrachten. Eine Veränderung der Haltezeit des positiven Spannungsniveaus geht einher mit der Veränderung der Ausstoßzeit des Fluides. Zu untersuchen sind hier die Abhängigkeiten der Tropfenparameter Volumen und Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Pulslängen. Ebenfalls zu betrachten ist die Abhängigkeit der Mindestspannung zur Bildung eines Tropfens von der Pulslänge.

##### 2. Hypothese

Während der Phase der positiven Ansteuerspannung wird die Membran als Teil des bimorphen Aktor-Aufbaus in die Pumpkammer hineingedrückt. Dieses Eindrücken hat einen Ausstoß des Fluids aus der Düse zur Folge. Verändert sich nun der Parameter der Haltezeit durch Veränderung der zeitlichen Länge des Steuerungsimpulses, so steht dem Fluid eine unterschiedlich lange Zeit für den Austritt aus der Düse zur Verfügung. Wie Wijshoff (2008) beschreibt, korreliert eine Vergrößerung der Pulslänge bei konstanten Tropfenfluggeschwindigkeiten direkt mit einer Vergrößerung des Tropfenvolumens. Dies ist auf die vergrößerte Ausstoßzeit des Fluids zurückzuführen. Die Systemsimulation nach Scheicher (2004) hingegen führt zu Kurven der Geschwindigkeit und des Volumens über die Pulslänge, welche eine höher-polynomiale-Abhängigkeit suggerieren. Diese besitzen sowohl Maxima als auch Minima über den Verlauf der Länge des Pulses.

##### 3. Materialien

Da es sich in diesem Experiment um eine veränderte Auswertung von vorhandenen Daten handelt, sind die Materialien den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen. Verwendet werden in diesem Experiment die Tropfenerzeuger sämtlicher Abmessungen, um den Probenraum zur Untersuchung des Pulslängeneinflusses möglichst groß zu gestalten.

##### 4. Versuchsparameter

Die Versuchsparameter dieses Abschnitts unterscheiden sich im Vergleich zu den Vorhergehenden auf Seite der verwendeten Ansteuerungsparameter. So wird für diese Versuchsreihe die Verwendung unterschiedlicher Pulslängen bei konstanter Spannung, sowie die benötigte Mindestspannung bei unterschiedlichen Pulslängen verwendet. Hierzu werden die Experimente zur Bereitstellung eines Tropfens mit "geradem Flug", sowie der festgelegten Tropfengeschwindigkeit von 2,5 und 5 m/s durchgeführt. Die in diesem Experiment veränderten Parameter sind in Tabelle 20 aufgeführt.

Hierbei ist zu beachten, dass die Experimente zur Messung der Tropfenparameter Geschwindigkeit und Volumen nur unter Berücksichtigung einer Ansteuerungsspannung von 80 V durchgeführt werden. Eine Veränderung dieser wird in Kapitel 3.7 beschrieben. Die gesamte Probenanzahl beläuft sich auf 29 Düsen.



Tabelle 20: Versuchsparameter Tropfenbeobachtungsstand.

Messreihe	Name	Einheit	Werte
-	Frequenz	Hz	200
Gerader Flug	Pulslänge	$\mu\text{s}$	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 16; 20; 50; 80; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
2,5 m/s	Pulslänge	$\mu\text{s}$	5; 10; 20; 50; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
''	Delay	$\mu\text{s}$	50
5 m/s	Pulslänge	$\mu\text{s}$	5; 10; 20; 50; 100
''	Phase	$\mu\text{s}$	230
''	Delay	$\mu\text{s}$	50
Volumen / Geschw.	Spannung	V	80
''	Pulslänge	$\mu\text{s}$	10; 20; 50
''	Phase	$\mu\text{s}$	400

## 5. Methoden

Die Methoden zur Messung der betreffenden Parameter werden in den vorhergehenden Kapiteln erläutert.

### 3.6.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Da das Experiment im Rahmen der selben Messungen am Tropfenbeobachtungsstand wie die bisherigen Experimente durchgeführt wird, ist der Versuchsaufbau identisch.

#### 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Die Durchführung der Versuche ist in Kapitel 3.4 ausführlich beschrieben.

#### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Analog zur Betrachtung der gemessenen Werte in Relation zur Düsenbreite und -tiefe werden die Ergebnisse nun über die veränderten Pulslängen aufgetragen. Es werden mehrere Kurven in den Diagrammen zusammengefasst, um einen Überblick der unterschiedlich gefertigten Düsen und ein verbessertes Gesamtbild des Aktorverhaltens zu erhalten. Die aufgenommenen Messwerte zur Untersuchung des Verhaltens der Tropfenerzeugung bei Veränderung der Pulslänge der elektrischen Ansteuerung wird, unabhängig der Abmessungen der Druckchips, mit jedem Versuch durchgeführt. Die aufgenommenen Mittelwerte der Messwerte sind Tabelle 21 zu entnehmen. Die Mindestspannungsmesswerte sind den vorherigen Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 21: Aufgenommene Messwerte zur Pulslänge.

<b>Abmessung (Breite x Länge)</b>	<b>50 x 100</b>	<b>70 x 100</b>	<b>100 x 100</b>	<b>70 x 50</b>	<b>70 x 200</b>
<b>Anzahl der Proben</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>
	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>
	<b>Zeit [<math>\mu</math>s]</b>				
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 10 $\mu$ s)	85,50	69,11	76,40	52,00	96,00
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 20 $\mu$ s)	46,00	36,44	43,20	38,57	50,00
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 50 $\mu$ s)	50,00	42,44	37,60	31,71	36,80
	<b>Durchmesser [<math>\mu</math>m]</b>				
Tropfengröße 1 (80 V / 10 $\mu$ s)	60,03	80,93	74,73	54,50	64,42
Tropfengröße 1 (80 V / 20 $\mu$ s)	67,50	81,42	86,82	69,28	63,15
Tropfengröße 1 (80 V / 50 $\mu$ s)	54,65	80,26	115,78	71,90	62,48
Tropfengröße 2 (80 V / 10 $\mu$ s)	73,68	100,11	114,66	77,89	91,48
Tropfengröße 2 (80 V / 20 $\mu$ s)	68,40	110,70	126,38	96,59	104,39
Tropfengröße 2 (80 V / 50 $\mu$ s)	88,00	99,58	138,44	109,37	119,18
	<b>Zeitpunkt der Aufnahme [<math>\mu</math>s]</b>				
Delay (80 V / 10 $\mu$ s)	406,25	402,50	482,00	336,43	403,00
Delay (80 V / 20 $\mu$ s)	400,00	404,17	516,00	362,86	407,00
Delay (80 V / 50 $\mu$ s)	400,00	450,00	562,00	400,71	408,00
	<b>Messung Laservibrometer [mV]</b>				
Hub (Sinus 50 V / 200 Hz)	156,75	156,67	154,00	137,00	152,50
	<b>Volumen [nl]</b>				
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 10 $\mu$ s)	0,32	0,90	1,01	0,39	0,57
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 20 $\mu$ s)	0,34	1,11	1,51	0,66	0,73
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 50 $\mu$ s)	0,45	0,91	2,42	0,99	1,06
	<b>Geschwindigkeit [m/s]</b>				
Geschwindigkeit (80 V / 10 $\mu$ s)	3,49	4,97	3,40	5,80	3,39
Geschwindigkeit (80 V / 20 $\mu$ s)	6,86	8,19	5,81	7,35	5,92
Geschwindigkeit (80 V / 50 $\mu$ s)	5,00	9,54	6,66	8,67	7,27

### 3.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Mindestspannung zur Bildung eines Tropfens ist für die Evaluierung der Effizienz eines Tropfenerzeugers von Bedeutung. Abb. 44 zeigt die benötigte Mindestspannung, welche bei einer eingestellten Pulslänge einen gerade fliegenden Tropfen erzeugt. Zu erkennen ist ein Abflachen der Kurve bei Erreichen höherer Pulslängen. Bis zu einem Wert von  $50\ \mu\text{s}$  betragen die Spannungsunterschiede zu den Mindestspannungen bei Pulslängen von  $100\ \mu\text{s}$  maximal  $10\ \text{V}$ . Im Bereich der kurzen Pulslängen von  $20$  bis  $4\ \mu\text{s}$  steigen die benötigten Spannungen exponentiell an. Im Bereich der sehr kurzen Pulslängen ( $3$  bis  $1\ \mu\text{s}$ ) ist ein Tropfenbildungsprozess nur noch bei wenigen Tropfenerzeugern möglich. Dies liegt an der Beschränkung, in den Experimenten eine maximale Ansteuerspannungen von  $150\ \text{V}$  zu verwenden, da das verwendete Piezomaterial ansonsten Schaden nimmt und der Tropfenerzeuger nicht für weitere Experimente benutzt werden kann. Zu bemerken ist außerdem, dass sämtliche gefertigten Tropfenerzeuger das selbe Verhalten bezüglich der Mindestspannung aufweisen. Unterschiede im Bezug auf die Düsenlänge und Düsenbreite werden im Detail in Kapitel 3.4 und 3.5 beschrieben.

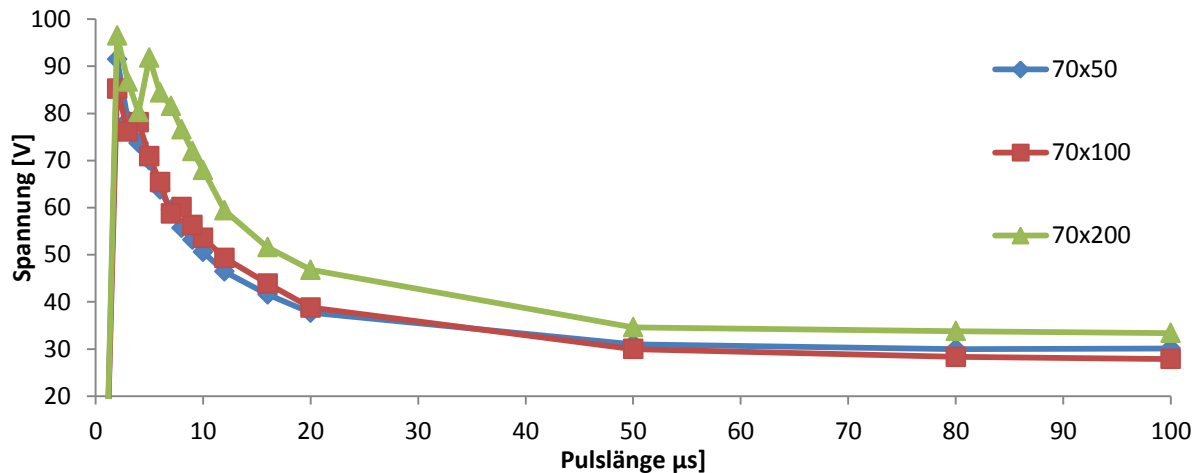


Abb. 44 Darstellung der benötigten Mindestspannung zur Erzeugung eines Tropfens. Der Einfluss auf die Mindestspannung nimmt mit steigender Pulslänge ab. Ab einem Wert von  $50\ \mu\text{s}$  Pulslänge verändert sich die Mindestspannung in geringem Maß ( $0,5 - 1,2\ \text{V}$ ).

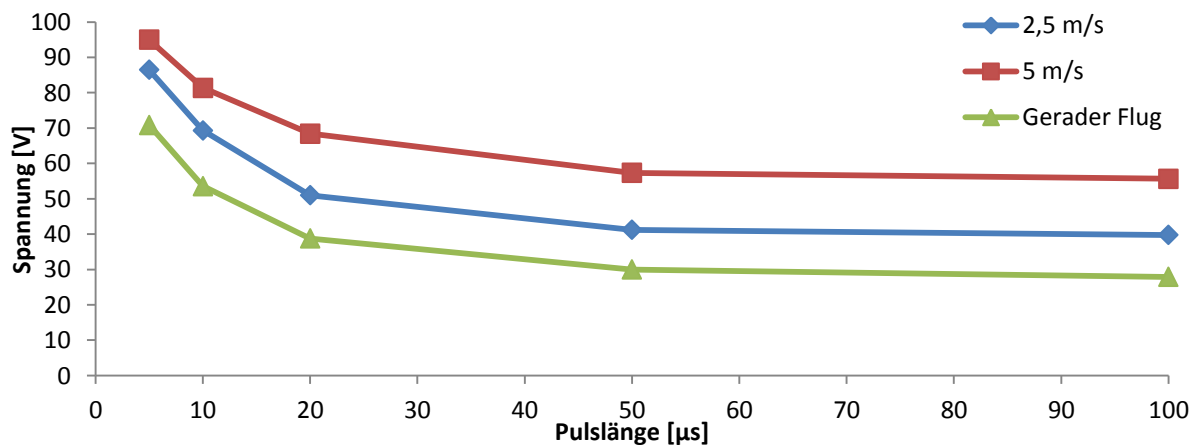


Abb. 45 Darstellung der zum Erreichen einer vorgegebenen Geschwindigkeit benötigten Mindestspannung. Die Kurven zeigen einen exponentiell fallenden Verlauf, welcher ab einer Pulslänge von  $50\ \mu\text{s}$  nur noch eine geringere Änderung zeigt. Beispielhaft ist hier ein Druckchip mit einer Düsengröße von  $70 \times 100\ \mu\text{m}$  gewählt.

In Abb. 45 sind, ähnlich wie bereits zuvor, Kurven der Mindestspannung in Abhängigkeit der Pulslänge dargestellt. Die dargestellten Werte beziehen sich alle auf die Durchschnittswerte der Messungen, welche mit einem Aktor mit einer Düsenbreite von 70  $\mu\text{m}$  und einer Düsenlänge von 100  $\mu\text{m}$  durchgeführt wurden. Hierbei repräsentieren die drei unterschiedlichen Kurven die geforderten Mindestgeschwindigkeiten der entstehenden Tropfen („gerader Flug“, 2,5 und 5 m/s). Auch hier ist zu erkennen, dass bei kürzeren Pulslängen die benötigte Spannung zum Ausstoß eines Tropfens exponentiell wächst. Wichtig ist, dass dieses Verhalten weiterhin bei den geforderten Geschwindigkeiten besteht. Dies lässt die Verallgemeinerung des Zusammenhangs zwischen einem konstanten Tropfenbildungsprozess, unabhängig von dessen Geschwindigkeit und Geometrie der Düse und der Pulslänge, zu. Zur Bewertung der Veränderung der Tropfengröße bei unterschiedlichen Pulslängen sind die Messwerte der hergestellten Tropfenerzeuger in Abb. 46 dargestellt. Jeder der Balken repräsentiert eine Düsengeometrie und ist in der Form *Breite x Länge* bezeichnet. Bemerkenswert ist, dass sechs der Kurven dasselbe Verhalten zeigen. Eindeutig zu erkennen ist, dass mit einem Anstieg der Länge eines Ansteuerungsimpulses auch das ausgestoßene Gesamtvolumen zunimmt. Dies entspricht dem in der Hypothese angenommenen Verhalten, welches sich durch die verlängerte Ausstoßzeit des Fluides erklärt.

In Abb. 47 zu erkennen sind die Mittelwerte aufgenommener Tropfengeschwindigkeiten zu den eingestellten Pulslängen. Wie bereits zuvor sind sämtliche Tropfenerzeuger in dem Diagramm zusammengefasst, um eine Bewertung der Ähnlichkeit des Verhaltens zu ermöglichen. Die Kurven lassen erkennen, dass eine Erhöhung der Pulslänge auch eine Vergrößerung der Fluggeschwindigkeit der erzeugten Tropfen bewirkt. Zu bemerken ist ebenfalls, dass die Steigung im ersten Intervall der Pulslängenänderung höher ist als im zweiten. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine effiziente Steuerung des Tropfenvolumens im Bereich des ersten Intervalls (10 bis 20  $\mu\text{s}$ ) erfolgt.

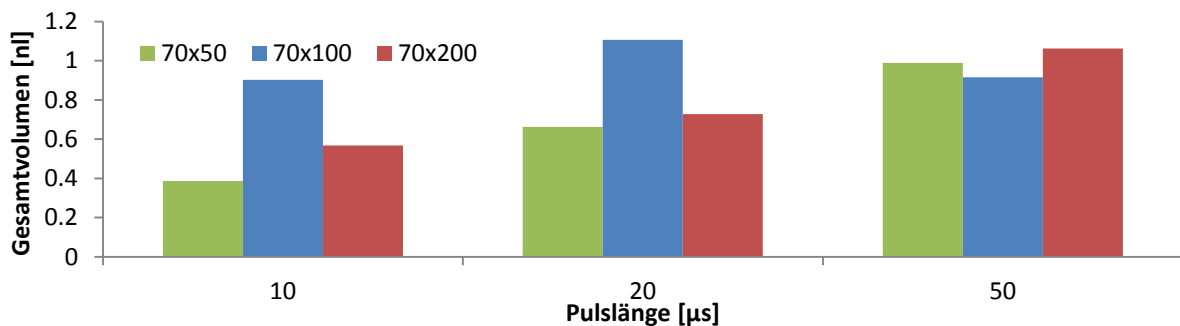


Abb. 46 Einfluss der Pulslänge auf das Gesamtvolumen. Für die Düsendimensionen 70x50 und 70x200  $\mu\text{m}$  wächst das Volumen mit steigender Pulslänge. Konstante Ansteuerspannung von 80 V.

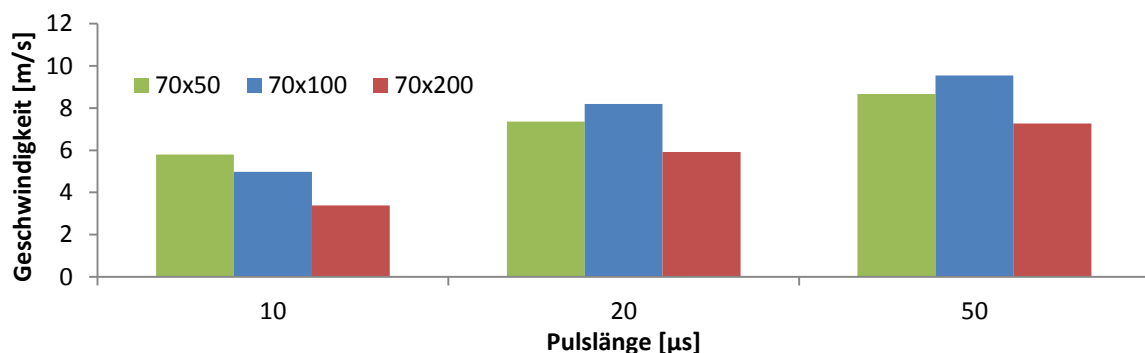


Abb. 47 Die Tropfengeschwindigkeit steigt bei unterschiedlichen Pulslängen unabhängig von der Düsendimension (Breite x Länge). Konstante Ansteuerspannung von 80 V.

### 3.7 Experiment 7: Einfluss der Spannung auf Tropfenparameter

#### 3.7.1 Beschreibung der Messverfahren

##### 1. Fragestellung

Im zweiten Teil der Betrachtung des Einflusses der elektrischen Ansteuerung auf die gebildeten Tropfen, wird die Spannung (Amplitude) des applizierten Impulses untersucht. Diese ist im Rahmen der Piezoelektrizität eine wichtige Kenngröße, da sie direkt proportional zu dem anliegenden elektrischen Feld ist und so ein Maß für die Verformung des Aktors darstellt.

##### 2. Hypothese

Eine Abschätzung des zu erwartenden Verhaltens der Tropfenparameter erfolgt durch eine Beschreibung des Verhaltens von piezoelektrischen Materialien. Unter Annahme des Kleinsignalbetriebs und der Ansteuerung unterhalb der Resonanzfrequenz, sowie unter Absehen von der Notwendigkeit der Berechnung eines exakten Stellweges, wird die Verformung des verwendeten Piezomaterials „VIBRIT 1876“ mit einem linearen mathematischen Modell beschrieben. Die hierbei interessierende Richtung der Längung  $\Delta l_1$  berechnet sich nach (31) zu:

$$\Delta l_1 = l_1 \cdot E_3 \cdot d_{31} = l_1 \cdot \frac{U}{d} \cdot d_{31} \quad (31)$$

Hierbei ist  $l_1$  die Ausgangslänge in der 1-Richtung des verwendeten Materials,  $E_3$  das angelegte elektrische Feld in 3-Richtung und  $d_{31}$  der Dehnungskoeffizient der verwendeten Keramik. Damit ist die Verformung  $\Delta l_1$  proportional zur angelegten Spannung  $U$  (32).

$$\Delta l_1 \propto U \quad (32)$$

Wird die Spannung nun erhöht, vergrößert sich damit ebenfalls der von der Membran ausgeführte Hub  $w$ . Die Hubgeschwindigkeit  $\dot{w}$  definiert sich nach (33) zu:

$$\dot{w} = \frac{w}{t} \quad (33)$$

Da der Anstieg der Spannung und die damit verbundene Verschiebung der Membran in der konstanten Zeit  $t$  erfolgt, ist die Geschwindigkeit der Membran  $\dot{w}$  proportional zur applizierten Spannungsamplitude  $U$  (34).

$$\dot{w} \propto U \quad (34)$$

Durch die Erhöhung der Membrangeschwindigkeit wird ebenfalls eine Erhöhung der Tropfengeschwindigkeit erreicht. Da der Volumenstrom wächst, die Ausstoßzeit durch die konstante Pulslänge jedoch konstant ist, ist ebenfalls ein Anstieg des ausgestoßenen Volumens zu erwarten.

##### 3. Materialien

Verwendet werden für diese Experimente sämtlich gefertigte Tropfenerzeuger. Die aufgenommenen Messwerte sind Tabelle 23 zu entnehmen. Für eine Aufstellung und Erklärung der übrigen benutzten Materialien siehe Kapitel 3.4.

#### 4. Versuchsparameter

Die für dieses Experiment verwendeten Versuchsparameter sind in Tabelle 22 dargestellt.

#### 5. Methoden

Die verwendeten Methoden zur Messung der Geschwindigkeit und Größe der Tropfen sowie der Auswertungsmethoden wurden in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

### 3.7.2 Experiment zur Messung der Vorteile

#### 1. Versuchsaufbau

Dieser Aufbau gleicht ebenfalls dem Aufbau der vorhergehenden Experimente.

#### 2. Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Die Vorbereitung und Durchführung des Versuchs werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

#### 3. Ableitung der Ergebnisse aus den Messwerten

Wie bereits in Kapitel 3.6 werden die Ergebnisse aller verwendeten Tropfenerzeuger zusammengefasst und dargestellt. Hierbei liegt der Fokus auf der Variation der Tropfenparameter durch die Veränderung der Spannung (siehe Tabelle 23).

Tabelle 22: Versuchsparameter des durchgeführten Experiments.

Parameter	Einheit	Werte
Spannung	V	40; 60; 80
Pulslänge	$\mu\text{s}$	50
Phase	$\mu\text{s}$	400

Tabelle 23: Aufgenommene Messwerte zur Spannung.

Abmessung (Breite x Länge)	50 x 100	70 x 100	100 x 100	70 x 50	70 x 200
Anzahl der Proben	4	7	6	7	5
	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
	Zeit [ $\mu\text{s}$ ]				
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	143,33	68,57	169,20	110,86	171,60
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	69,50	49,75	66,00	53,43	64,40
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	50,00	42,44	37,60	31,71	36,80
	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				
Tropfengröße 1 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	76,00	86,17	85,70	60,03	56,35
Tropfengröße 1 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	59,30	93,36	92,22	69,41	53,83
Tropfengröße 1 (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	54,65	80,26	115,78	71,90	62,48

<b>Abmessung (Breite x Länge)</b>	<b>50 x 100</b>	<b>70 x 100</b>	<b>100 x 100</b>	<b>70 x 50</b>	<b>70 x 200</b>
<b>Anzahl der Proben</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>
	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>	<b>Wert</b>
	<b>Durchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</b>				
Tropfengröße 2 (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	82,73	112,46	129,57	100,39	94,10
Tropfengröße 2 (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	86,65	124,14	147,40	107,99	107,26
Tropfengröße 2 (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	88,00	99,58	138,44	109,37	119,18
	<b>Zeitpunkt der Aufnahme [<math>\mu\text{s}</math>]</b>				
Delay (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	433,33	403,00	446,00	397,86	387,00
Delay (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	442,50	443,00	560,00	447,86	413,00
Delay (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	400,00	450,00	562,00	400,71	408,00
	<b>Messung Laservibrometer [mV]</b>				
Hub (Sinus 50 V / 200 Hz)	156,75	156,67	154,00	137,00	152,50
	<b>Volumen [nl]</b>				
Ausgestoßenes Volumen (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,48	1,21	1,21	0,61	0,50
Ausgestoßenes Volumen (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,45	1,57	2,14	0,92	0,74
Ausgestoßenes Volumen (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	0,45	0,91	2,42	0,99	1,06
	<b>Geschwindigkeit [m/s]</b>				
Geschwindigkeit (40 V / 50 $\mu\text{s}$ )	1,94	3,70	1,52	2,87	1,96
Geschwindigkeit (60 V / 50 $\mu\text{s}$ )	3,87	6,04	3,80	5,22	4,29
Geschwindigkeit (80 V / 50 $\mu\text{s}$ )	5,00	9,54	6,66	8,67	7,27

### 3.7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abb. 48 zeigt die ausgestoßenen Tropfenvolumina sämtlich hergestellter Tropfenerzeuger. Abgebildet sind die Werte für die fünf hergestellten Düsengrößen. Die Kurven zeigen meist einen Anstieg des Volumens in Verbindung mit einem Anstieg der Spannungsamplitude. Wie in der Hypothese festgestellt, ist dies durch eine Vergrößerung des Volumenstroms begründet. Dieser ist nicht abhängig von der Düsengeometrie oder Düsengröße, sondern ist nur auf die vergrößerte Aktuation der Piezokeramik mit einem Anstieg des elektrischen Feldes begründet.

Die Darstellung der Verläufe der Tropfengeschwindigkeit über eine Vergrößerung der Ansteuerungsspannung in Abb. 49 bestätigt die getroffene Hypothese. Auffallend ist, dass die Anstiege, ebenfalls wie erwartet, annähernd linear sind. Die Anstiege sind durch die gleichbleibende Anstiegszeit bei erhöhter Spannung begründet, da durch diese die Geschwindigkeit der Membran zunimmt.

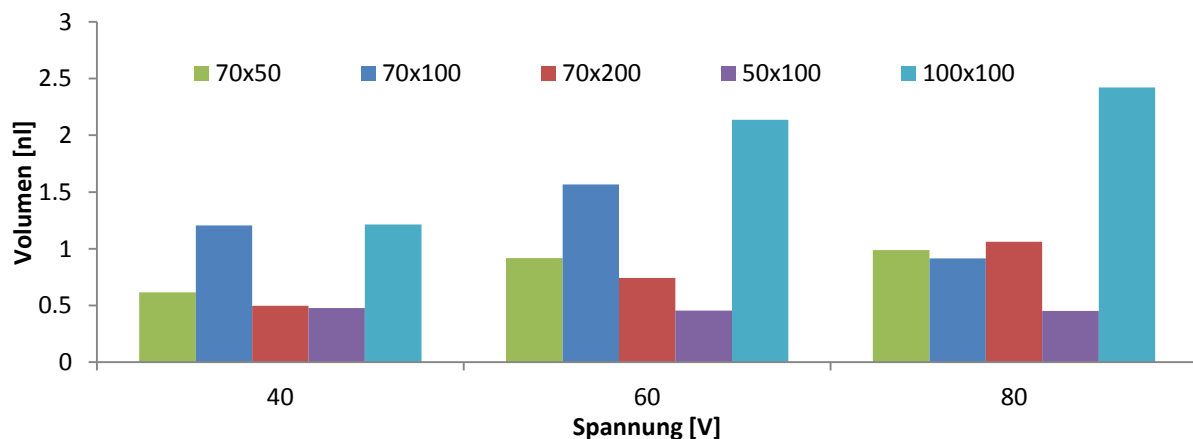


Abb. 48 Einfluss der Spannung auf die Tropfenvolumina. So steigt wie im Diagramm zu sehen bei fast jeder gefertigter Düsendimension das Tropfenvolumen mit zunehmender Spannung an.

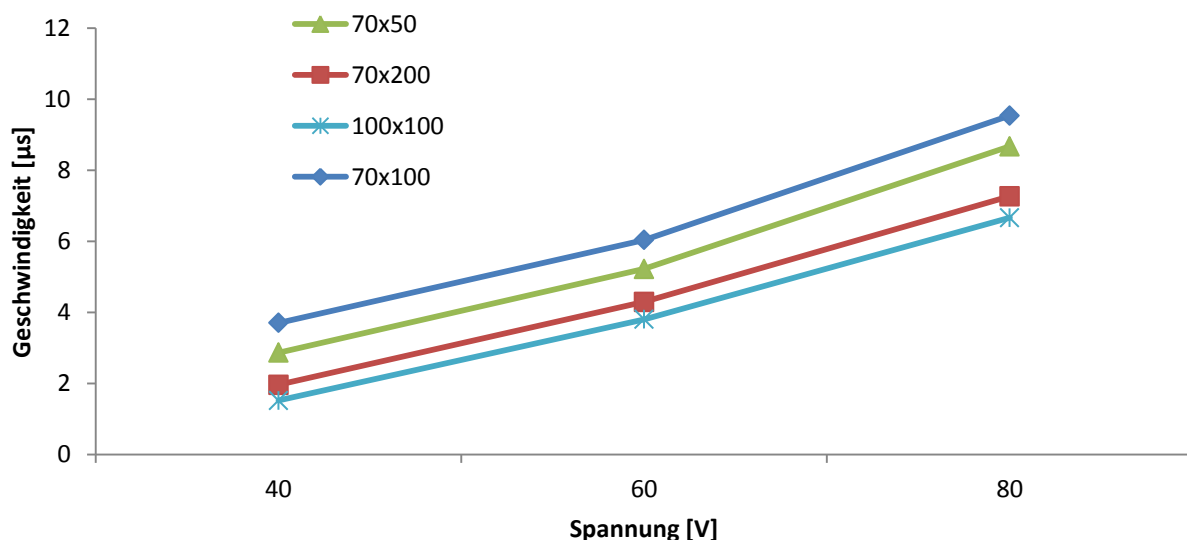


Abb. 49 Der Zusammenhang zwischen Spannung und Tropfenfluggeschwindigkeit ist für die Düsendimensionen nahezu linear.



## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Semesterarbeit wurde die Düsengeometrie des am Lehrstuhl entwickelten und verwendeten Piezomembran-Druckkopfes untersucht und in seinen Abmessungen und Form verändert. Nach Planung der Herstellungsmethoden und Ausführen umfangreicher Tests zur Sicherstellung der geforderten Fertigungsgenauigkeit, wurden Druckköpfe hergestellt, welche die vorgenommenen Änderungen beinhalten. Die Experimente wurden im Vorhinein entworfen und verwendet, um im Anschluss an die Herstellung eine Evaluation der durchgeführten Änderungen durchzuführen. Hierbei wurden die elektrischen Ansteuerungsparameter festgelegt, mit denen die gefertigten Druckköpfe getestet werden, um den veränderten Tropfenbildungsprozess zu bewerten.

Das Ziel der Semesterarbeit war es, eine erweiterte Art der Herstellung von Düsen zu erarbeiten und anzuwenden, um so eine breite Variation von Düsengrößen zu erhalten. Es galt den Herstellungsprozess des Tropfenerzeugers zu Ende zu führen und fertige Produkte mit den gefertigten Düsen zu erstellen. Ziel war es ebenfalls, eine für das aktuell vorhandene Design, bestehend aus dem Aktor mit einer Elektrodenbreite von 1,6 mm, der Membran mit einer Dicke von 100  $\mu\text{m}$  und einer Pumpkammertiefe von 100  $\mu\text{m}$ , eine optimale und passende Düsengröße zu ermitteln. Diese Düsengröße bietet ein optimales Verhältnis zwischen aufgewendeter Energie und optimalen Eigenschaften des Tropfens (geringe Größe, hohe Geschwindigkeit).

Zunächst wurden Anpassungen am Laserstrukturierungsprozess zur Herstellung der Pumpkammern in Silizium getätigt. Die Anpassung der Pumpkammertiefe von 50 auf 100  $\mu\text{m}$  ermöglicht die Verwendung von größeren Düsen. Die Anpassung der Form der Pumpkammer Spitze ermöglicht eine höhere Genauigkeit im Positioniervorgang der Düse. Diese wird nun an einer 300  $\mu\text{m}$  langen Kante positioniert, welche mit dem an der Wafersäge vorhandenen Mikroskop gemessen wird. Die erste Möglichkeit der verbesserten Positionierung in der y-Achse galt es ebenfalls auf die zweite Positionierungsachse, die z-Achse, welche für die Schnitttiefe verantwortlich ist, zu erweitern. Aufgrund lokaler, durch die Fertigung des Lieferanten bedingter Schwankungen in der Höhe der verwendeten Siliziumsubstrate, gestaltet sich die Höhenpositionierung schwierig. Ein Messtaster reicht nicht aus, um sämtliche Höhen des Siliziums aufzunehmen. Die Idee des Anscratchens, welche sich von dem Wafersägen eigenen Set-Up ableitet, ermöglicht eine hohe Positioniergenauigkeit der Schnitthöhe. Hierzu wurde ausgenutzt, dass in relativer Nähe der zu fertigenden Düse ungenutzte Bereiche sind. An diesen Stellen wird ein Testschnitt getätigt, der, wenn erfolgreich, auf der Oberfläche des Substrates liegt und diese leicht ankratzt. Ist dies nicht der Fall, gilt es die z-Achse in der Höhe zu justieren und nach unten zu versetzen und so den Schnitt noch einmal, bis zum erfolgreichen Ankratzen der Oberfläche, auszuführen. Nach folgender Einstellung der Schnitttiefe, wurden nun Schnitte ausgeführt, welche gefertigte Düsen als Ergebnis hatten, welche der geforderten Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  genügen.

Eine weitere Forderung der Aufgabenstellung bestand darin, Düsen mit beliebigen Breiten zu fertigen. Hierbei wurde auf ein Verfahren zurückgegriffen, welches die Programmierfähigkeit der benutzten Wafersäge verwendet. Nach der Schnittpositionierung in der Höhe und Positionierung der y-Achse des Schnittes anhand der Pumpkammerfläche wird ein einzelner, zentral in der Pumpkammer liegender Schnitt ausgeführt. Ist es nun notwendig eine Schnittbreite zu erhalten, welche eine größere Breite als die des verwendeten Sägeblattes hat, so wird eine weitere gerade Anzahl an Schnitten ausgeführt, welche den erstmaligen Zentralschnitt erwei-

tern. Die Ermittlung der notwendigen Versatzbreite in Abhängigkeit der Anzahl der Schnitte ist mit einer formulierten Gleichung zu errechnen.

Die Tropfenexperimente wurden in verschiedene Kategorien unterteilt, um einen geordneten Überblick über den Einfluss der Variation der Düsendrößen auf den Tropfenbildungsprozess zu erhalten.

Die Untersuchung des Einflusses der Breite und der Tiefe förderten eine Überlegenheit der Düse mit den Abmessungen von 70  $\mu\text{m}$  Kantenlänge zu Tage. Diese besitzt einen auffälligen Vorteil gegenüber den getesteten Düsen mit 50 und 100  $\mu\text{m}$  Kantenlänge im Bereich der erreichten Tropfengeschwindigkeit bei fester Ansteuerung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses der Düsenlänge ermöglichten ebenfalls die Identifizierung einer vorteilhaften Größe. Gilt als Parameter der Optimierung die höchste Tropfenfluggeschwindigkeit (bei konstanter elektrischer Ansteuerung), so ist die Düse mit einer Länge von 100  $\mu\text{m}$  überzeugend in ihren Ergebnissen, gegenüber den gefertigten Längen von 50 und 200  $\mu\text{m}$ .

Im Bezug auf die Pulslänge und Spannung ist zusammenfassend die Aussage zu treffen, dass die Größe der Einflüsse von Pulslänge und Spannung unabhängig der physischen Abmessungen der Düsen sind. Hiermit bietet die Manipulation des Tropfenbildungsprozesses durch Veränderung der elektrischen Ansteuerungsparameter eine unabhängige Form der Druckprozesssteuerung. Eine Erhöhung der Spannung geht einher mit einer Erhöhung der Tropfenfluggeschwindigkeit und Erhöhung des Tropfenvolumens. Die benötigte Mindestspannung zur Erzeugung eines Tropfens spielt nur in den Bereichen unterhalb einer Pulslänge von 50  $\mu\text{s}$  eine Rolle. Über diesem Bereich ist die Dauer der Ansteuerung gesättigt und verändert sich nicht mehr in signifikantem Maß. Geht die Pulslänge zu kürzeren Zeiten, so steigt die benötigte Spannung exponentiell an, es ist also ein Optimum in der Ansteuerung zwischen Pulslänge und Spannung zu finden, bei welcher der Tropfenbildungsprozess stabil ist.

Die erwarteten Vorteile des Verfahrens wurden zum Teil sehr gut erfüllt. So beläuft sich die Herstellungsgenauigkeit der gefertigten Düsen unterhalb der geforderten  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Diese Genauigkeit betrifft den gesamten Anwendungsbereich der Wafersäge und konnte bereits erfolgreich auch in anderen Bereichen angewendet werden (gezieltes Trennen einer 100  $\mu\text{m}$  dicken Siliziumschicht). Der erstellte Herstellungsprozess ermöglicht eine freie Wahl der zu fertigenden Nutendimensionen. Die Schnitttiefe ist dabei begrenzt durch den am Sägeblatt vorhandenen Überstand, dieser stellt durch eine große Auswahl am Markt verfügbarer Sägeblätter kein Problem dar.

Die gezielte Manipulation der Tropfeneigenschaften durch Anpassung der elektrischen Ansteuerungsparameter wurde erreicht, indem die Beziehung zwischen Spannung, Pulslänge, Tropfengeschwindigkeit und Tropfenvolumen überprüft und dargestellt wurden.

Der entworfene, erarbeitete und beschriebene Herstellungsprozess der Düsen ermöglicht eine schnelle Anpassung des Druckkopfdüsensdesigns an gegebene Anforderungen. So ist beispielsweise die Anpassung der Düsendröße zur Dosierung von Tinten mit leitfähigen Partikeln denkbar. Eine Vergrößerung der Düse auf eine Breite, welche größer ist als der Durchmesser der gelösten Partikel, ermöglicht die Verwendung der Tinte.

Die Verwendung des am Lehrstuhl entwickelten Piezomembrandruckkopfes als Experimentierplattform wird durch die Ergebnisse dieser Semesterarbeit weiter vorangetrieben. So ist es ein Ziel der Experimentierplattform zu gegebenen Parametern des Druckprozesses ein geeig-

netes Druckkopfdesign bereitzustellen, welches in kurzer Zeit hergestellt werden kann. Eine automatische Anpassung des Programms zur Fertigung der Düsen ist denkbar. Eingabeparameter sind die Sägeblattbreite und die Breite der zu fertigenden Düse. Das Ergebnis der Berechnung besteht aus einem fertigen Wafersägenprogramm, welches nur auf das Gerät übertragen wird und dann ausgeführt wird.

Die Verwendung einer optimierten Düse erlaubt es, die Ansteuerungsspannung für den Aktor weiter zu senken. So ist es denkbar, dass in Zukunft durch geeignete Wahl der Dimensionen des Tropfenerzeugers (Düse, Aktor, Membran, Klebschicht) Ansteuerungsspannungen unter 10 V realisiert werden. Eine Verringerung der Ansteuerungsspannung ermöglicht ein breiteres Anwendungsfeld für den Tropfenerzeuger. Der Schaltungsaufwand zur Ansteuerung und damit Platzbedarf wird erheblich reduziert und ermöglicht die Realisierung eines „Handheld-Device“ zur Tropfenerzeugung.

Der fortlaufende Verbesserungsprozess der Experimentierplattform konnte durch Strukturierung der Düse, Evaluation der Einflüsse durch Experimente und Beschreibung der zugrunde liegenden Fluidmechanik erweitert werden.

## Literaturverzeichnis

- Bassous, E., Taub, H. H. und Kuhn, L. 1977, 'Ink jet printing nozzle arrays etched in silicon', *Applied Physics Letters*, vol. 31, no. 2, S. 135-137.
- Bruus, H. U. 2008, *Theoretical Microfluidics*, OUP Oxford.
- Chen, Y.-S., Huang, Y.-L., Kuo, C.-H. und Chang, S.-H. 2007, 'Investigation of design parameters for droplet generators driven by piezoelectric actuators', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, no. 6, S. 733-740.
- Derby, B. 2010, 'Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution', *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, S. 395-414.
- Eiler, K. 2012, Optimierung eines piezoelektrischen Drop-on-Demand Mikrotropfenerzeugers, Diplomarbeit, Technische Universität München.
- Elsner, P. 2009, 3D-Drucktechnologie – Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften, Dissertation, TU Berlin.
- Fan, K.-C., Chen, J.-Y., Wang, C.-H. und Pan, W.-C. 2008, 'Development of a drop-on-demand droplet generator for one-drop-fill technology', *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, no. 2, S. 649-655.
- Jingkuang, C. und Wise, K. D. 1997, 'A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing', *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 9, S. 1401-1409.
- Kagerer, M., Eiler, K. L., Irlinger, F. und Lueth, T. C. 2012, 'Intelligent Combination of Batch Fabrication With Rapid Prototyping Techniques for a Drop-on-Demand Microdrop Generator', *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, S. 619-628.
- Kagerer, M., Huedig, M., Lueth, T. C. und Irlinger, F. 2013a, 'Manual microassembly system with integrated squeegee device for homogenous and defined adhesive layers for bimorph piezoelectric actuators using in drop-on-demand techniques', *Proceedings of the Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference on*, S. 1911-1917.
- Kagerer, M., Rumschoettel, D., Ottnad, T., Lueth, T. C. und Irlinger, F. 2013b, 'Fast Droplet Generation With a Printhead Manufactured With Rapid Manufacturing Techniques Mounted on a Carrier Board', *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, S. V07BT08A008-V07BT08A008.
- Lee, E. R. 2003, *Microdrop Generation*, Taylor & Francis.
- Li, E. Q., Xu, Q., Sun, J., Fuh, J. Y. H., Wong, Y. S. und Thoroddsen, S. T. 2010, 'Design and fabrication of a PET/PTFE-based piezoelectric squeeze mode drop-on-demand inkjet printhead with interchangeable nozzle', *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 163, no. 1, S. 315-322.
- Lindemann, T., Ashauer, H., Ying, Y., Sassano, D. S., Zengerle, R. und Koltay, P. 2007, 'One Inch Thermal Bubble Jet Printhead With Laser Structured Integrated Polyimide Nozzle Plate', *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 16, no. 2, S. 420-428.
- Lizotte, T., Ohar, O. und Waters, S. C. 2002, 'Excimer lasers drill inkjet nozzles', *Laser focus world*, vol. 38, no. 5, S. 165-170.

- minitron 2012, 'Broschüre: Dicing Blades für 2 "-Spindeln', <http://minitron.com/uploads/media/dicblae.pdf>.
- Scheicher, R. 2004, *Kompaktmodell zur Systemsimulation eines Tropfenerzeugers mit Piezobiegewandlern*, VDI-Verlag.
- Seitz, H. und Heinzl, J. 2004, 'Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators', *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 8, S. 1140.
- Sheng-Chih, S., Min-Wen, W. und Chung-Jui, L. 2009, 'Manufacture of an Integrated Three-Dimensional Structure Nozzle Plate Using Microinjection Molding for a 1200-dpi Inkjet Printhead', *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 18, no. 1, S. 52-63.
- Sigloch, H. 2007, *Technische Fluidmechanik*, Springer London, Limited.
- Träger, M. 2008, *Konstruktion eines Geräts zur Herstellung miniaturisierter Düsenstrukturen aus Glaskapillaren*, Semesterarbeit, TU München.
- Trek 2012, 'Datenblatt PZD-350A', <http://www.trekinc.com/products/PZD350A.asp>.
- Wijshoff, H. 2008, *Structure- and fluid-dynamics in piezo inkjet printheads*, Universität Twente.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Baumdiagramm zur Klassifizierung unterschiedlicher Mikrotropfenerzeugungsarten mit Fokus auf die wichtigsten Drop-On-Demand Prinzipien. ....	2
Abb. 2	Bubblejet Druckprinzip. Entnommen aus Elsner (2009). ....	3
Abb. 3	Schematische Darstellung eines Tropfenerzeugers in der Ausführung als Rohrwandler. Aktor (1), Fluid (2) und Drossel (3) (Entnommen aus Wijshoff (2008). ....	4
Abb. 4	Prinzip des Paddelwandlers. Ausgangszustand (1), elektrische Ansteuerung (2 & 3) und Tropfenausstoß (4). Entnommen aus Seitz und Heinzl (2004). ....	5
Abb. 5	Schematische Darstellung eines Tropfenerzeugers als Scherwandler und Verwendung einer Düsenplatte. Entnommen aus Lee (2003). ....	5
Abb. 6	Funktionsprinzip des Membranwandlers. In (a) ist ein Membranwandler mit einer breiten, als Bimorph aufgebauten Aktorfläche dargestellt. Entnommen aus Kagerer et al. (2013b). In (b) ist ein Pushmode-Tropfenerzeuger dargestellt, welcher mit einem stabförmigen Aktor gegen eine Pumpkammerwand drückt und so einen Tropfen ausstößt. Entnommen aus Wijshoff (2008). ....	6
Abb. 7	Darstellung der Herstellung pyramidenförmiger Düsenöffnungen durch Ätzen mit EDP (entnommen aus Bassous, Taub und Kuhn (1977)). ....	7
Abb. 8	Durch die Lamellenstruktur (links) dringt die Ätzflüssigkeit in das Substrat, diese wird dann verschlossen (mitte). Das rechte Bild zeigt die Düsen mit einer Breite von 20 $\mu\text{m}$ und einem Abstand von 5 $\mu\text{m}$ (entnommen aus Jingkuang und Wise (1997)). ..	7
Abb. 9	Mit Excimer-Laser hergestellte Düsenplatten. (a) zeigt eine Düsenplatte in der Frontaufnahme (entnommen aus Lizotte, Ohar und Waters (2002)). In (b) ist die konische Form einer mit Excimer-Laser gefertigten Düse zu sehen (entnommen aus Sheng-Chih, Min-Wen und Chung-Jui (2009)). ....	8
Abb. 10	Herstellung von Glasdüsen. (a) Prozess der Herstellung mit Rotationsmotor und Glasrohr, (b) gezogenes Glas in der Seitenansicht und (c) die entstandene Düse in der Draufsicht. Entnommen aus Li et al. (2010). ....	9
Abb. 11	Schichtaufbau des am Lehrstuhl hergestellten Mikrotropfenerzeugers. (1) strukturierte Piezokeramik, (2) Klebschicht, (3) Membran aus Borosilikatglas, (4) Silizium (entnommen aus Kagerer et al. (2013a)). ....	10
Abb. 12	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Düse hergestellt mit dem Laser (a) und nach aktuellem Herstellungsprozess mit einem Schnitt mit der Wafersäge (b) (entnommen aus Kagerer et al. (2012)). ....	11
Abb. 13	Foto des am Lehrstuhl MiMed hergestellten Tropfenerzeugers, aufgebracht auf die Trägeplatine, welche eine Kontaktierereinheit und Fluidzuführung beinhaltet. ....	12
Abb. 14	Diagramm zur Bestimmung der Druckbarkeit eines Fluides in einem Drop-On-Demand-Tropfenerzeuger in Abhängigkeit der Kennzahlen (entnommen aus Derby (2010)). ....	18
Abb. 15	Darstellung der gegebenen Proportionalitäten des Volumenstroms. (a) beschreibt die nach (15) und (b) die nach (16) gegebenen Abhängigkeiten. ....	20
Abb. 16	Skizze eines Sägeblattes. Gezeigt ist ein Flansch (schraffiert) mit aufgeklebtem Sägeblatt (schwarz) im Halbschnitt. Eingezeichnet sind der Blattüberstand sowie die Sägeblattdicke. ....	21
Abb. 17	Ablaufskizze der ausgeführten Schnitte zu Verbreiterung der Nubbreite. (1): Sägeblatt. (2): Position des ersten Schnittes. (3): Siliziumsubstrat. Bemaßt sind Sägeblattbreite d und Versatzbreite s und Düsenbreite b. ....	23

Abb. 18	Skizze zur Justierung der Düsen. Schnitte an nicht verwendeter Stelle (a), keine Kratzer nach Überprüfung (b), Absenken der z-Achse und erneutes Ausführen der Schnitte (c), Kratzer auf der Siliziumoberfläche (d).	25
Abb. 19	Ablaufskizze der ausgeführten Schritte. (a): Erster Schnittvorgang, (b) Kontrolle der Oberfläche, (c) Absenken der Schnittebene, (d) erneute Kontrolle der Oberfläche.	25
Abb. 20	Diagramm des Herstellungsprozesses der Düsen. Ein Viertelwafer mit Pumpkammerstrukturen wird auf Folie geklebt und eingespannt (a), der erste Schnitt zur Höheneinstellung wird abseits der Pumpkammer getätigt (b). Nach Überprüfung auf korrekte z-Achsen-Position folgt der erste in der Pumpkammer (c), hiernach folgen zwei oder mehr weitere Schnitte (d) zur Fertigstellung der Düse (e). Abschließend werden die Düsenlängen durch einen Schnitt quer zum Düsenkanal geschnitten (f).	27
Abb. 21	Foto von Diamantkörnern in galvanischer Nickelbindung (a) (entnommen aus minitron (2012)) und das verwendete Sägeblatt „FTBR4645100“. 4 – 6 $\mu\text{m}$ Körnung, max. Blattbreite 45 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$ Überstand (b).	28
Abb. 22	Foto der verwendeten Wafersäge DAD 321 (a). Detailzeichnung der Hauptkomponenten bei geöffnetem Bearbeitungsraum (b): Werkstückhalter (Chuck, unten rechts), Mikroskop und Spindel mit Sägeblatt.	29
Abb. 23	Beispielprogramm für das Fertigen einer Düse mit einer Breite von 70 $\mu\text{m}$ mittels drei Schnitten. Hierbei werden für drei Schnitte, 7 der 30 verfügbaren Befehle genutzt.	32
Abb. 24	Düsen Spitze vor (a) und nach (b) der Modifikation. Die Abflachung der Spitze zu einer planen Fläche mit bekannter Länge (300 $\mu\text{m}$ ) ermöglicht eine einfachere Positionierung durch Benutzung der Messfunktion der Wafersäge in der Düsenmitte.	36
Abb. 25	Darstellung der ermittelten Pumpkammertiefen für unterschiedliche Verfahrensgeschwindigkeiten des Galvanometerspiegels. Hierbei werden für die Verfahrensgeschwindigkeiten von 115 und 120 mm/s jeweils 15 Pumpkammern und für 125 und 130 mm/s jeweils 30 Pumpkammern zur Probe gefertigt und gemessen.	37
Abb. 26	Diagramm zur Darstellung der Fertigungsgenauigkeit für verschiedene Düsenbreiten. Es wurden 48 Düsen mit einer Breite von 50 $\mu\text{m}$ , 72 Düsen mit einer Breite von 70 $\mu\text{m}$ und 60 Düsen mit einer Breite von 100 $\mu\text{m}$ gemessen.	41
Abb. 27	Bilder von geschnittenen Düsen. (a) bis (c) zeigen Düsen mit Kantenlängen von 50 bis 100 $\mu\text{m}$ bei einer Vergrößerung von 150x. (d) bis (f) zeigen dieselben Düsen bei einer Vergrößerung von 400x. Aufnahmen sind mit einem Rasterelektronenmikroskop gemacht.	41
Abb. 28	Oberfläche des Siliziums vor (a) und nach (b) korrekter Höheneinstellung des Sägeblattes. Zu erkennen ist ein dunklerer Bereich zwischen den Fadenlinien in (b).	43
Abb. 29	Tiefenmessung einer Düse. In (a) ist die Oberfläche des Siliziums in der Fokusebene. Von hier aus wird die Fokusebene bis auf den Grund der Düse verschoben (b) und die verstellte Distanz als Wert der Düsentiefe notiert.	44
Abb. 30	Diagramm zur Darstellung der Fertigungsgenauigkeit für verschiedene Düsentiefen. Diese werden mit geringer Streuung und Standardabweichung gefertigt. Die Untersuchungen zur Genauigkeit der hergestellten Düsentiefen wird über einen Probenumfang bei einer Tiefe von 50 $\mu\text{m}$ von 48, bei 70 $\mu\text{m}$ von 72 und bei 100 $\mu\text{m}$ von 60 Düsen durchgeführt.	45
Abb. 31	Skizze zur Messung der Tropfengeschwindigkeit. Die erste (1) und vierte Linie (2) besitzt einen Abstand von $s=102\text{ mm}$ . Zur Messung einer Geschwindigkeit ist es nötig das Bild eines Tropfens (3) sowie die zeitversetzte Aufnahme (4) auf eine Linie zu positionieren.	50

- Abb. 32 Aufbau des Tropfenbeobachtungsstandes: Fluidzuführung (1), Stroboskoplampe (2), Objektiv der Mikroskopkamera (3), Tropfenerzeuger und Halter (4), verstellbarer Arm zur Ausrichtung (5) und über Stellschrauben verfahrbarer Tisch in zwei Achsen (6). ..... 52
- Abb. 33 Aufbau der elektrischen Ansteuerung: Oszilloskop zur Überprüfung der elektrischen Parameter (1), Funktionsgenerator zur Erzeugung des benötigten Signals (2) und Verstärker um die benötigten Spannungen zu erreichen (3). ..... 52
- Abb. 34 Tropfenbeobachtungsstand im Detail. Gezeigt sind Stroboskoplampe (1), Halter (2), Tropfenerzeuger auf Trägerplatine (3) und Objektiv der Mikroskopkamera (4). ..... 53
- Abb. 35 Screenshot des Programmfensters am Tropfenbeobachtungsstand. Zu sehen ist auf der linken Seite das Bedienpanel mit den aktivierten Komponenten zur Tropfengrößenbestimmung. Auf der rechten Seite befindet sich das Fenster mit dem Kamerabild zur Beobachtung des Tropfenbildungsprozesses. .... 54
- Abb. 36 Foto des Bildschirms der Kamera bei einer Geschwindigkeitsmessung. Die Grundlinie (1) und die 10 m/s Linie (2) besitzen den berechneten Abstand  $s$ . (3) und (4) sind die Bilder eines Tropfens zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. .... 54
- Abb. 37 Benötigte Mindestspannung abhängig von der Pulslänge für unterschiedlich breite Düsen bei gleichzeitig konstanter Düsenlänge. Der Einfluss der Breite ist gering. ... 58
- Abb. 38 Diagramm der Tropfengeschwindigkeit bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Spannungsniveaus (40, 60, 80 V) bei konstanter Pulslänge (50  $\mu$ s). Die Düsen der Breite 70  $\mu$ m liegen im Mittel auf jedem der Spannungsniveaus am höchsten. .... 59
- Abb. 39 Bildsequenzen drei verschiedener Tropfenbildungsprozesse. (a) bis (f) zeigen die Tropfenbildung einer Düse mit einem Querschnitt von 50  $\mu$ m, (g) bis (h) zeigen eine Düse mit 70  $\mu$ m und (n) bis (s) eine Düse mit 100  $\mu$ m Querschnitt. Die elektrische Ansteuerung erfolgt mit einer Pulslänge von 50  $\mu$ s und einer Spannung von 60 V... 60
- Abb. 40 Ausgestoßenes Gesamtvolumen bei verschiedenen Spannungsniveaus und konstanter Pulslänge. Der Einfluss der Düsenabmessung auf das Tropfenvolumen zeigt sich durch den Anstieg der Mittelwerte mit steigender Kantenlänge. .... 60
- Abb. 41 Einfluss der Düsenlänge auf die für einen stabilen Tropfenbildungsprozess benötigte Mindestspannung. Hierbei ist zu sehen, dass die Düsen mit einer Länge von 200  $\mu$ m bis zu 150 % der Spannung benötigen als die Düsen kleinerer Länge. .... 65
- Abb. 42 Darstellung des ausgestoßenen Gesamtvolumens bei unterschiedlichen Spannungsniveaus. Die Düse mit einer Länge von 100  $\mu$ m erreicht mit 1,57 nl den höchsten Wert, wohingegen die geringste Flüssigkeitsmenge aus einer 200  $\mu$ m langen Düse ausgestoßen wird. .... 66
- Abb. 43 Geschwindigkeit der Tropfen zu unterschiedlichen Spannungsniveaus der Ansteuerung (40, 60, 80 V) und konstanter Pulslänge (50  $\mu$ s). Zu jeder Ansteuerung bietet eine Düsenlänge von 100  $\mu$ m die höchsten Tropfengeschwindigkeiten und bieten einen Vorteil von über 0,9 m/s gegenüber der übrigen Düsenlängen 50 und 100  $\mu$ m. .... 66
- Abb. 44 Darstellung der benötigten Mindestspannung zur Erzeugung eines Tropfens. Der Einfluss auf die Mindestspannung nimmt mit steigender Pulslänge ab. Ab einem Wert von 50  $\mu$ s Pulslänge verändert sich die Mindestspannung in geringem Maß (0,5 – 1,2 V). .... 70
- Abb. 45 Darstellung der zum Erreichen einer vorgegebenen Geschwindigkeit benötigten Mindestspannung. Die Kurven zeigen einen exponentiell fallenden Verlauf, welcher ab einer Pulslänge von 50  $\mu$ s nur noch eine geringere Änderung zeigt. Beispielhaft ist hier ein Druckchip mit einer Düsengröße von 70 x 100  $\mu$ m gewählt. .... 70
- Abb. 46 Einfluss der Pulslänge auf das Gesamtvolumen. Für die Düsendimensionen 70x50 und 70x200  $\mu$ m wächst das Volumen mit steigender Pulslänge. Konstante Ansteuerspannung von 80 V. .... 71



Abb. 47	Die Tropfengeschwindigkeit steigt bei unterschiedlichen Pulslängen unabhängig von der Düsendimension (Breite x Länge). Konstante Ansteuerspannung von 80 V. ....	71
Abb. 48	Einfluss der Spannung auf die Tropfenvolumina. So steigt wie im Diagramm zu sehen bei fast jeder gefertigter Düsendimension das Tropfenvolumen mit zunehmender Spannung an. ....	75
Abb. 49	Der Zusammenhang zwischen Spannung und Tropfenfluggeschwindigkeit ist für die Düsen-dimensionen nahezu linear. ....	75

## Anhang

### A Messwerte

#### A.1 Herstellung

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
Soll [ $\mu\text{m}$ ]	50,00	50,00	
Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	50,38	50,44	
SIGMA [ $\mu\text{m}$ ]	1,39	2,03	
Anzahl	48 werte	48 werte	35 werte
50.2.1	50,00	51,00	
50.2.2	52,00	54,00	
50.2.3	49,00	53,00	
51.2.1	49,00	52,00	
51.2.2	50,00	48,00	
51.2.3	50,00	49,00	
49.5.1	50,00	55,00	
49.5.2	50,00	53,00	
49.5.3	52,00	55,00	
59.1.1	52,00	51,00	98,20
59.1.2	50,00	48,00	101,00
59.1.3	49,00	50,00	99,40
59.2.1	52,00	50,00	99,60
59.2.2	50,00	51,00	100,80
59.2.3	49,00	50,00	101,40
59.3.1	48,00	50,00	102,40
59.3.2	47,00	49,00	102,60
59.3.3	52,00	50,00	103,20
59.4.1	52,00	49,00	99,20
59.4.2	51,00	51,00	99,60
59.4.3	49,00	52,00	98,60
59.5.1	51,00	53,00	104,00
59.5.2	49,00	50,00	103,80
59.5.3	51,00	49,00	102,20
64.1.1	52,00	50,00	98,80
64.1.2	51,80	51,00	100,40
64.1.3	50,20	50,00	99,20
64.5.1	50,40	51,00	102,00
64.5.2	50,40	51,00	102,40
64.5.3	51,20	51,00	98,00
65.2.1	50,20	51,00	
65.2.2	51,40	50,00	99,00
65.2.3	52,20	52,00	100,80

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>sol1 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	50,00	50,00	
65.3.1	49,60	51,00	97,00
65.3.2	51,20	44,00	98,60
65.3.3	52,20	46,00	98,60
64.1.1 Re	52,40	52,00	102,20
64.1.2 Re	49,80	50,00	98,60
64.1.3 Re	50,80	50,00	97,20
64.5.1 Re	52,00	49,00	104,40
64.5.2 Re	50,60	50,00	99,20
64.5.3 Re	51,80	49,00	100,20
65.2.1 Re	48,00	52,00	103,00
65.2.2 Re	48,00	51,00	106,00
65.2.3 Re	48,60	49,00	106,80
65.3.1 Re	49,00	52,00	
65.3.2 Re	48,60	48,00	
65.3.3 Re	51,60	48,00	

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>sol1 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	70,00	70,00	
<b>Mittelwert [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	70,08	69,58	
<b>SIGMA [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1,53	3,02	
<b>Anzahl</b>	72 werte	72 werte	54 werte
50.1.1	75,00	74,00	
50.1.2	69,00	73,00	
50.1.3	69,00	71,00	
50.4.1	70,00	68,00	
50.4.2	71,00	71,00	
50.4.3	73,00	73,00	
51.4.1	71,00	71,00	
51.4.2	71,00	71,00	
51.4.3	72,00	73,00	
49.1.1	72,00	62,00	
49.1.2	71,00	74,00	
49.1.3	70,00	71,00	
49.4.1	73,00	69,00	
49.4.2	72,00	72,00	
49.4.3	70,00	68,00	
52.1.1	67,00	68,00	49,40
52.1.2	67,00	68,00	51,00
52.1.3	69,00	70,00	48,80
52.2.1	71,00	73,00	198,80
52.2.2	69,00	70,00	199,40
52.2.3	69,00	67,00	200,80
52.3.1	71,00	72,00	198,20
52.3.2	68,00	71,00	200,60

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Soll [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	70,00	70,00	
52.3.3	68,00	73,00	200,00
52.4.1	70,00	71,00	101,80
52.4.2	69,00	69,00	99,80
52.4.3	70,00	72,00	98,80
52.5.1	69,00	70,00	202,20
52.5.2	70,00	71,00	202,80
52.5.3	70,00	72,00	199,20
60.1.1	69,00	70,00	98,20
60.1.2	70,00	69,00	100,40
60.1.3	69,00	70,00	100,80
60.2.1	69,00	70,00	97,80
60.2.2	70,00	68,00	99,60
60.2.3	71,00	70,00	99,40
60.3.1	69,00	70,00	100,20
60.3.2	68,00	70,00	98,20
60.3.3	67,00	70,00	100,40
60.4.1	71,00	68,00	68,00
60.4.2	69,00	69,00	69,00
60.4.3	70,00	71,00	68,00
60.5.1	69,00	69,00	
60.5.2	71,00	70,00	
60.5.3	69,00	70,00	
61.1.1	70,00	70,00	101,80
61.1.2	71,00	69,00	101,60
61.1.3	71,00	68,00	102,20
61.2.1	70,00	72,00	98,60
61.2.2	69,00	69,00	100,20
61.2.3	68,00	70,00	99,60
61.3.1	70,00	71,00	49,40
61.3.2	70,00	68,00	48,60
61.3.3	71,00	71,00	49,00
61.4.1	70,00	69,00	51,80
61.4.2	71,00	68,00	50,60
61.4.3	70,00	68,00	50,80
61.5.1	70,00	71,00	51,80
61.5.2	70,00	69,00	51,20
61.5.3	72,00	68,00	51,00
64.4.1	69,80	69,00	102,80
64.4.2	71,00	70,00	103,40
64.4.3	70,60	69,00	99,00
65.4.1	69,60	57,00	99,20
65.4.2	70,60	58,00	99,40
65.4.3	69,00	60,00	102,80
64.4.1 Re	73,40	72,00	98,40

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Soll [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	70,00	70,00	
64.4.2 Re	73,60	71,00	99,40
64.4.3 Re	72,00	70,00	95,60
65.4.1 Re	68,80	69,00	106,20
65.4.2 Re	68,20	71,00	102,40
65.4.3 Re	69,40	71,00	100,20

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Soll [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	100,00	100,00	
<b>Mittelwert [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	101,22	101,08	
<b>SIGMA [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	2,26	2,64	
<b>Anzahl</b>	60 werte	60 werte	39 werte
50.3.1	102,00	99,00	
50.3.2	102,00	104,00	
50.3.3	99,00	99,00	
50.5.1	102,00	106,00	
50.5.2	102,00	107,00	
50.5.3	99,00	104,00	
51.1.1	102,00	102,00	
51.1.2	100,00	98,00	
51.1.3	99,00	98,00	
51.3.1	102,00	98,00	
51.3.2	103,00	102,00	
51.3.3	101,00	101,00	
51.5.1	102,00	102,00	
51.5.2	100,00	103,00	
51.5.3	101,00	103,00	
49.2.1	101,00	105,00	
49.2.2	99,00	102,00	
49.2.3	99,00	103,00	
49.3.1	101,00	105,00	
49.3.2	103,00	99,00	
49.3.3	102,00	107,00	
57.1.1	103,00	103,00	99,80
57.1.2	112,00	106,00	101,60
57.1.3	99,00	100,00	99,40
57.2.1	100,00	102,00	97,60
57.2.2	102,00	99,00	101,80
57.2.3	103,00	100,00	101,40
57.3.1	102,00	103,00	98,80
57.3.2	103,00	103,00	98,20
57.3.3	100,00	103,00	99,60
57.4.1	102,00	102,00	99,20
57.4.2	103,00	100,00	100,20
57.4.3	101,00	99,00	101,60

Charge	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Länge [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Soll [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	100,00	100,00	
57.5.1	101,00	101,00	99,60
57.5.2	98,00	103,00	98,80
57.5.3	100,00	101,00	98,00
64.2.1	99,00	98,00	99,40
64.2.2	102,80	98,00	102,60
64.2.3	104,40	96,00	98,60
64.3.1	107,00	95,00	102,60
64.3.2	102,00	103,00	100,20
64.3.3	103,00	96,00	103,60
65.1.1	101,20	100,00	99,20
65.1.2	101,80	103,00	98,80
65.1.3	99,60	98,00	100,00
65.5.1	100,00	101,00	100,80
65.5.2	101,20	100,00	96,80
65.5.3	102,40	101,00	98,20
64.2.1 Re	103,60	100,00	101,80
64.2.2 Re	100,40	100,00	99,60
64.2.3 Re	102,20	100,00	98,80
64.3.1 Re	99,20	103,00	101,00
64.3.2 Re	99,80	99,00	100,00
64.3.3 Re	101,00	102,00	102,80
65.1.1 Re	98,40	99,00	101,40
65.1.2 Re	98,20	99,00	99,00
65.1.3 Re	98,80	101,00	98,20
65.5.1 Re	99,60	98,00	102,20
65.5.2 Re	98,80	101,00	104,40
65.5.3 Re	98,80	102,00	99,60

## A.2 Fluidexperimente

Abmessung	50 x 100				MITTEL- WERT	STAB W
Chip	64.1. 1	64.5. 1	64.5. 3	65.2. 1		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]					
100	21	35	25	31	28,00	3,11
80	22	35	25	33	28,75	3,12
50	26	35	31	37	32,25	2,43
20	40	39	37	29	36,25	2,50
16	44	43	35	32	38,50	2,96
12	51	50	36	39	44,00	3,81
10	56	55	41	43	48,75	3,92
9	59	54	44	43	50,00	3,89
8	63	58	47	45	53,25	4,33
7	68	63	52	50	58,25	4,33
6	74	68	59	55	64,00	4,30
5	80	74	69	61	71,00	4,02
4	82	78	76	70	76,50	2,50
3	85	80	79	73	79,25	2,46
2						
1						
Pulsdauer [ $\mu$ s] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]					
100	60	49	50	40	49,75	4,09
50	61	44	50	61	54,00	4,22
20	45	46	72	71	58,50	7,51
10	62	62	82	57	65,75	5,54
5	85	78	107	77	86,75	6,98
Pulsdauer [ $\mu$ s] (5 m/s)	Mindestspannung [V]					
100	78	68	67		71,00	3,04
50	79	63	66	82	72,50	4,70
20	61	62	80	80	70,75	5,34
10	77	79	97	71	81,00	5,60
5	97	98	125	86	101,50	8,29
zeit [ $\mu$ s]						
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 v / 50 $\mu$ s)		140	90	200	143,33	27,54
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 v / 50 $\mu$ s)	88	52	50	88	69,50	10,69
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 10 $\mu$ s)	148	48	86	60	85,50	22,29
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 20 $\mu$ s)	78		24	36	46,00	14,18
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 50 $\mu$ s)	50				50,00	
Durchmesser [ $\mu$ m]						
Tropfengröße 1 (40 v / 50 $\mu$ s)		59,8	92,2		76,00	11,46
Tropfengröße 1 (60 v / 50 $\mu$ s)	59,6	52,7	67,7	57,2	59,30	3,14
Tropfengröße 1 (80 v / 10 $\mu$ s)		59,9	78,3	41,9	60,03	9,10

Abmessung	50 x 100				MITTEL- WERT	STAB W
Chip	64.1. 1	64.5. 1	64.5. 3	65.2. 1		
	Durchmesser [µm]					
Tropfengröße 1 (80 v / 20 µs)	75,2		60,2	67,1	67,50	3,75
Tropfengröße 1 (80 v / 50 µs)	64,7	44,6			54,65	7,11
Tropfengröße 2 (40 v / 50 µs)		72,9	88,6	86,7	82,73	4,28
Tropfengröße 2 (60 v / 50 µs)	88,4	82,6	85	90,6	86,65	1,77
Tropfengröße 2 (80 v / 10 µs)	79,4	62,8	68,6	83,9	73,68	4,84
Tropfengröße 2 (80 v / 20 µs)	76,2		58,9	70,1	68,40	4,39
Tropfengröße 2 (80 v / 50 µs)	88,4	87,6			88,00	0,28
	zeit [µs]					
Delay (40 v / 50 µs)		400	500	400	433,33	28,8 7
Delay (60 v / 50 µs)	400	400	570	400	442,50	42,5 0
Delay (80 v / 10 µs)	400	400	425	400	406,25	6,25
Delay (80 v / 20 µs)	400		400	400	400,00	0,00
Delay (80 v / 50 µs)	400	400			400,00	0,00
	Messung Laservibrometer [mV]					
Hub (Sinus 50 v / 200 Hz)	140	160	162	165	156,75	5,68
	Volumen [nl]					
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 v / 50 µs)		0,31	0,77	0,34	0,48	0,13
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 v / 50 µs)	0,47	0,37	0,48	0,49	0,45	0,03
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 10 µs)	0,26	0,24	0,42	0,35	0,32	0,04
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 20 µs)	0,45		0,22	0,34	0,34	0,06
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 50 µs)	0,50	0,40			0,45	0,04
	Geschwindigkeit [m/s]					
Geschwindigkeit [m/s] @ 40 v / 50 µs		1,79	2,78	1,25	1,94	0,39
Geschwindigkeit [m/s] @ 60 v / 50 µs	2,84	4,81	5,00	2,84	3,87	0,60
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 10 µs	1,69	5,21	2,91	4,17	3,49	0,76
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 20 µs	3,21		10,42	6,94	6,86	1,80
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 50 µs	5,00				5,00	

Abmessung	70 x 50							MITTEL- WERT	STAB W
Chip	52.1. 1	52.1. 2	61.3. 1	61.5. 3	61.4. 1	61.4. 2	61.4. 3		
Pulsdauer [µs] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]								
100	38	25	38	31	14	35	30	30,14	4,26
80	39	21	37	31	16	35	31	30,00	4,25
50	39	26	34	33	17	34	34	31,00	3,63
20	29	34	30	50	22	47	52	37,71	5,91
16	31	37	30	56	25	56	56	41,57	6,97
12	35	39	31	64	29	67	60	46,43	8,28
10	40	41	33	71	32	73	64	50,57	9,03
9	43	43	34	77	32	76	67	53,14	9,80



Abmessung	70 x 50							MITTEL- WERT	STABW
chip	52.1.1	52.1.2	61.3.1	61.3.2	61.4.1	61.4.2	61.4.3		
Pulsdauer [µs] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]								
8	47	45	37	75	37	79	70	55,71	9,15
7	53	48	41	78	40	82	75	59,57	9,10
6	56	50	46	81	45	89	80	63,86	9,39
5	66	58	54	85	51	92	84	70,00	8,37
4	75	70	67	85	59		86	73,67	5,27
3	80	75	72	88	67		89	78,50	4,41
2	105	94	90		77			91,50	5,78
1									
Pulsdauer [µs] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]								
100	53	30	54	41	26	75	36	45,00	8,49
50	54	39	54	40	25	50	36	42,57	5,35
20	54	68	49	58	30	61	38	51,14	6,65
10	55	47	52	81	45	88	41	58,43	9,25
5	76	67	72	86	66	101	55	74,71	7,50
Pulsdauer [µs] (5 m/s)	Mindestspannung [V]								
100	71	38	81	58	39	119	54	65,71	14,11
50	71	54	81	59	39	76	55	62,14	7,33
20	71	63	79	77	46	82	56	67,71	6,64
10	73	53	75	96	65	128	56	78,00	13,13
5	88	77	84	100	90		72	85,17	4,96
	zeit [µs]								
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 v / 50 µs)	78	140	212	82	42	142	80	110,86	28,62
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 v / 50 µs)	44	54	80	44	28	76	48	53,43	9,29
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 10 µs)	42	30	42	60	50	112	28	52,00	14,33
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 20 µs)	38	56	48	26	22	54	26	38,57	7,13
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 50 µs)	30	30	48	26	18	44	26	31,71	5,30
	Durchmesser [µm]								
Tropfengröße 1 (40 v / 50 µs)	54,8			56,8	68,5			60,03	3,70
Tropfengröße 1 (60 v / 50 µs)	74,9	63	69,9	62,8	85	58,1	72,2	69,41	4,54
Tropfengröße 1 (80 v / 10 µs)	74,1	18	49,2	60,8	68,2		56,7	54,50	9,94
Tropfengröße 1 (80 v / 20 µs)	87		47,5	82	75,5	49,9	73,8	69,28	8,32
Tropfengröße 1 (80 v / 50 µs)	71,3	47	50,9	111,8	82,5	70,6	69,2	71,90	10,75
Tropfengröße 2 (40 v / 50 µs)	111,5	83,1	76,7	114,8	119,4	95,9	101,3	100,39	8,10
Tropfengröße 2 (60 v / 50 µs)	123,8	81,2	81,1	136,2	130,5	98,2	104,9	107,99	11,36
Tropfengröße 2 (80 v / 10 µs)	82,4	38	69,7	109,7	85,1	80,9	79,4	77,89	10,71
Tropfengröße 2 (80 v / 20 µs)	104,1	103	91,8	98,2	114,7	88,4	75,9	96,59	6,28
Tropfengröße 2 (80 v / 50 µs)	134,3	106	83,2	132,5	119	104,2	86,4	109,37	10,21

Abmessung	70 x 50							MITTEL- WERT	STA BW
chip	52.1 .1	52.1 .2	61.3 .1	61.5 .3	61.4 .1	61.4 .2	61.4 .3		
	Zeit [ $\mu$ s]								
Delay (40 v / 50 $\mu$ s)	335	400	400	400	450	400	400	397,86	16, 70
Delay (60 v / 50 $\mu$ s)	475	560	400	400	500	400	400	447,86	32, 40
Delay (80 v / 10 $\mu$ s)	230	200	300	425	400	400	400	336,43	46, 20
Delay (80 v / 20 $\mu$ s)	315	315	300	410	400	400	400	362,86	24, 91
Delay (80 v / 50 $\mu$ s)	495	435	300	375	400	400	400	400,71	29, 49
	Messung Laservibrometer [mV]								
Hub (Sinus 50 v / 200 Hz)	182	152	70	140	160	125	130	137,00	17, 64
	Volumen [nl]								
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 v / 50 $\mu$ s)	0,81	0,30	0,24	0,89	1,06	0,46	0,54	0,61	0,1 6
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 v / 50 $\mu$ s)	1,21	0,41	0,46	1,45	1,49	0,60	0,80	0,92	0,2 3
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 10 $\mu$ s)	0,51	0,03	0,24	0,81	0,49	0,28	0,36	0,39	0,1 2
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 20 $\mu$ s)	0,94	0,57	0,46	0,78	1,02	0,43	0,44	0,66	0,1 2
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 50 $\mu$ s)	1,46	0,68	0,37	1,95	1,18	0,78	0,51	0,99	0,2 8
	Geschwindigkeit [m/s]								
Geschwindigkeit [m/s] @ 40 v / 50 $\mu$ s	3,21	1,79	1,18	3,05	5,95	1,76	3,13	2,87	0,7 9
Geschwindigkeit [m/s] @ 60 v / 50 $\mu$ s	5,68	4,63	3,13	5,68	8,93	3,29	5,21	5,22	0,9 7
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 10 $\mu$ s	5,95	8,33	5,95	4,17	5,00	2,23	8,93	5,80	1,1 6
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 20 $\mu$ s	6,58	4,46	5,21	9,62	11,3 6	4,63	9,62	7,35	1,4 0
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 50 $\mu$ s	8,33	8,33	5,21	9,62	13,8 9	5,68	9,62	8,67	1,4 5

Abmessung	70 x 100							MITTEL- WERT	STAB W
chip	60.1. 1	60.1 .2	60.3. 2	60.3. 3	60.1. 3	61.2. 2	52.4. 1		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]								
100	28	27	38	19	18	45	28	27,89	4,40
80	32	27	40	19	17	44	28	28,33	4,57
50	38	26	46	19	17	50	28	30,00	5,96
20	50	35	59	22	25	66	30	38,78	7,89
16	54	42	64	24	28	79	34	43,89	9,18
12	61	44	70	28	33	85	39	49,33	9,47
10	68	48	74	31	37	86	44	53,56	9,30
9	72	51	77	33	40	90	47	56,33	9,55
8	76	54	83	36	43	95	51	60,11	9,96
7	80	58	89	40	46		56	58,75	8,51
6	88	65	100	44	51		62	65,38	9,53
5	89	72	100	50	58		70	70,88	8,20
4	90	77	106	60	68		78	78,13	7,08
3		80		68	73		82	76,17	2,54

Abmessung	70 x 100							MITTEL- WERT	STA BW
Chip	60.1 .1	60.1 .2	60.3 .2	60. 3.3	60.1 .3	61.2 .2	52.4 .1		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]								
2				76	83			85,25	3,97
1									
Pulsdauer [ $\mu$ s] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]								
100	41	37	58	34	28	67	35	39,78	6,89
50	44	36	67	34	29	69	33	41,22	7,94
20	63	43	78	38	40	85	37	51,00	9,60
10	66	61	94	53	55	127	56	69,33	12,5 3
5	84	86	116	75	80		85	86,50	6,23
Pulsdauer [ $\mu$ s] (5 m/s)	Mindestspannung [V]								
100	61	55	78	48	38	80	50	55,67	7,3 8
50	62	54	83	48	42	87	50	57,33	8,4 0
20	80	62	98	55	55	108	52	68,44	10, 79
10	85	79	119	74	73		71	81,38	7,9 0
5	109	96		92	89		91	95,00	3,4 0
	Zeit [ $\mu$ s]								
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 v / 50 $\mu$ s)	72	78		66	78		72	68,57	4,4 6
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 v / 50 $\mu$ s)	46	40	128	28	42		38	49,75	16, 02
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 10 $\mu$ s)	52	46	190	34	46	132	38	69,11	27, 16
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 20 $\mu$ s)	30	28	68	18	32	70	28	36,44	9,4 3
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 50 $\mu$ s)	20	20	44	16	30	176	24	42,44	25, 37
	Durchmesser [ $\mu$ m]								
Tropfengröße 1 (40 v / 50 $\mu$ s)	128	107		115 ,4	51,1		53,2	86,17	15, 33
Tropfengröße 1 (60 v / 50 $\mu$ s)	123	118	122, 5	122	70,4		44,9	93,36	15, 68
Tropfengröße 1 (80 v / 10 $\mu$ s)	99,8	90,6	128	101 ,2	48	68,7	63,7	80,93	12, 71
Tropfengröße 1 (80 v / 20 $\mu$ s)	88,6	112, 7	121	82, 4	60,3	98,6	51,4	81,42	12, 85
Tropfengröße 1 (80 v / 50 $\mu$ s)	87,8	90,5	136	80, 1	68,4	53,2	54,2	80,26	12, 52
Tropfengröße 2 (40 v / 50 $\mu$ s)	124	109, 3		113 ,8	114		91,4	112,46	5,1 7
Tropfengröße 2 (60 v / 50 $\mu$ s)	130	118	117, 4	128	135, 1		106, 3	124,14	4,7 1
Tropfengröße 2 (80 v / 10 $\mu$ s)	100, 4	89,5	120	102 ,8	110	114, 1	82,3	100,11	6,3 7
Tropfengröße 2 (80 v / 20 $\mu$ s)	87,8	121, 6	122	81, 1	119, 9	114, 2	108, 9	110,70	7,7 8
Tropfengröße 2 (80 v / 50 $\mu$ s)	84,2	88,2	134	78, 1	87,2	111, 9	117, 4	99,58	9,2 3
	zeit [ $\mu$ s]								
Delay (40 v / 50 $\mu$ s)				400	400		400	403,00	3,3 5
Delay (60 v / 50 $\mu$ s)				420	435		400	443,00	17, 99
Delay (80 v / 10 $\mu$ s)				400	415	400	400	402,50	3,0 6
Delay (80 v / 20 $\mu$ s)				415	400	395	400	404,17	4,3 1

Abmessung	70 x 100							MITTEL- WERT	STA BW
chip	60.1 .1	60.1 .2	60.3 .2	60.3 3.3	60.1 .3	61.2 .2	52.4 .1		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (gerader Flug)	zeit [ $\mu$ s]								
Delay (80 V / 50 $\mu$ s)				400	500	400	400	450,00	27, 39
	Messung Laservibrometer [mV]								
Hub (Sinus 50 V / 200 Hz)	140	150	180	140	148	182		156,67	9,6 5
	volumen [nl]								
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 V / 50 $\mu$ s)	2,10	1,33		1,5 8	0,85		0,48	1,21	0,2 6
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 V / 50 $\mu$ s)	2,12	1,72	1,81	2,0 5	1,47		0,68	1,57	0,2 3
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 10 $\mu$ s)	1,05	0,76	2,00	1,1 1	0,75	0,95	0,43	0,90	0,2 4
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 20 $\mu$ s)	0,72	1,69	1,88	0,5 7	1,02	1,28	0,75	1,11	0,2 2
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 V / 50 $\mu$ s)	0,67	0,75	2,58	0,5 2	0,51	0,81	0,93	0,91	0,3 2
	Geschwindigkeit [m/s]								
Geschwindigkeit [m/s] @ 40 V / 50 $\mu$ s	3,47	3,21		3,7 9	3,21		3,47	3,70	0,2 5
Geschwindigkeit [m/s] @ 60 V / 50 $\mu$ s	5,43	6,25	1,95	8,9 3	5,95		6,58	6,04	0,9 7
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 V / 10 $\mu$ s	4,81	5,43	1,32	7,3 5	5,43	1,89	6,58	4,97	1,0 3
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 V / 20 $\mu$ s	8,33	8,93	3,68	13, 89	7,81	3,57	8,93	8,19	1,5 6
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 V / 50 $\mu$ s	12,5 0	12,5 0	5,68	15, 63	8,33	1,42	10,4 2	9,54	2,0 8

Abmessung	70 x 200					MITTELWERT	STABW
chip	52.2.1	52.2.2	52.2.3	52.3.1	52.3.2		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]						
100	35	24	42	32	34	33,40	3,23
80	35	25	43	32	34	33,80	3,23
50	34	31	43	32	33	34,60	2,41
20	42	47	71	32	42	46,80	7,29
16	47	51	79	33	48	51,60	8,41
12	54	60	88	38	57	59,40	9,05
10	58	67	108	44	63	68,00	11,99
9	61	72	113	48	66	72,00	12,28
8	66	74	122	51	70	76,60	13,41
7	71	79	130	55	73	81,60	14,24
6	74	84	132	57	75	84,40	14,17
5	78	89	150	62	80	91,80	16,98
4	79	90		71	81	80,25	3,90
3	81	110		75	81	86,75	7,88
2				81	112	96,50	10,96

Abmessung	70 x 200					MITTEL- WERT	STABW
chip	52.2. 1	52.2. 2	52.2. 3	52.3. 1	52.3. 2		
Pulsdauer [ $\mu$ s] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]						
100	46	47	72	52	43	52,00	5,82
50	47	47	74	49	42	51,80	6,34
20	53	69	86		47	63,75	8,75
10	69	91	96	60	68	76,80	7,87
5	85	104	111	82	88	94,00	6,37
Pulsdauer [ $\mu$ s] (5 m/s)	Mindestspannung [V]						
100	62		97	66	63	72,00	8,38
50	62	66	96	64	63	70,20	7,25
20	69	86	115		70	85,00	10,73
10	85	116	132	79	87	99,80	11,50
5	106	147	149	103	108	122,60	11,63
	zeit [ $\mu$ s]						
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 v / 50 $\mu$ s)	106	114	406	146	86	171,60	66,40
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 v / 50 $\mu$ s)	48	54	106	70	44	64,40	12,64
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 10 $\mu$ s)	56	194	120	58	52	96,00	30,78
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 20 $\mu$ s)	32	58	92	36	32	50,00	12,92
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 50 $\mu$ s)	28	32	58	36	30	36,80	6,11
	Durchmesser [ $\mu$ m]						
Tropfengröße 1 (40 v / 50 $\mu$ s)				49,1	63,6	56,35	5,13
Tropfengröße 1 (60 v / 50 $\mu$ s)	48,8	48,6	49,2	68,7		53,83	4,96
Tropfengröße 1 (80 v / 10 $\mu$ s)	59,3	58,2	89,2	68,4	47	64,42	7,90
Tropfengröße 1 (80 v / 20 $\mu$ s)	51,6	59,7	89,6		51,7	63,15	9,02
Tropfengröße 1 (80 v / 50 $\mu$ s)	51,2	62,1	50,8	54,9	93,4	62,48	8,93
Tropfengröße 2 (40 v / 50 $\mu$ s)	87,8	101,8	91,1	78,1	111,7	94,10	6,49
Tropfengröße 2 (60 v / 50 $\mu$ s)	95,8	116	109,8	90,7	124	107,26	6,93
Tropfengröße 2 (80 v / 10 $\mu$ s)	91,4	96,6	82,2	98,4	88,8	91,48	3,23
Tropfengröße 2 (80 v / 20 $\mu$ s)	104,3 5	108,9	94,9	103,4	110,4	104,39	3,04
Tropfengröße 2 (80 v / 50 $\mu$ s)	114,3	134,3	120	102,8	124,5	119,18	5,86
	zeit [ $\mu$ s]						
Delay (40 v / 50 $\mu$ s)	300	375	410	450	400	387,00	27,82
Delay (60 v / 50 $\mu$ s)	450	410	405	400	400	413,00	10,55
Delay (80 v / 10 $\mu$ s)	375	350	490	400	400	403,00	26,43
Delay (80 v / 20 $\mu$ s)	375	430	395	400	435	407,00	12,57
Delay (80 v / 50 $\mu$ s)	385	415	340	475	425	408,00	24,97
	Messung Laservibrometer [mV]						
Hub (Sinus 50 v / 200 Hz)	190	139	136	171	149	152,50	11,67

Abmessung	70 x 200					MITTEL- WERT	STAB W
chip	52.2. 1	52.2. 2	52.2. 3	52.3. 1	52.3. 2		
	Volumen [nl]						
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 v / 50 µs)	0,35	0,55	0,40	0,31	0,86	0,50	0,11
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 v / 50 µs)	0,52	0,88	0,76	0,56	1,00	0,74	0,10
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 10 µs)	0,51	0,58	0,66	0,67	0,42	0,57	0,05
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 20 µs)	0,67	0,79	0,82	0,58	0,78	0,73	0,05
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 50 µs)	0,85	1,39	0,97	0,66	1,44	1,06	0,17
	Geschwindigkeit [m/s]						
Geschwindigkeit [m/s] @ 40 v / 50 µs	2,36	2,19	0,62	1,71	2,91	1,96	0,43
Geschwindigkeit [m/s] @ 60 v / 50 µs	5,21	4,63	2,36	3,57	5,68	4,29	0,67
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 10 µs	4,46	1,29	2,08	4,31	4,81	3,39	0,80
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 20 µs	7,81	4,31	2,72	6,94	7,81	5,92	1,15
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 50 µs	8,93	7,81	4,31	6,94	8,33	7,27	0,90

Abmessung	100 x 100					MITTEL- WERT	STABW
chip	64.2.1	64.3.2	64.3.3	65.1.1	65.5.1		
Pulsdauer [µs] (gerader Flug)	Mindestspannung [V]						
100	25	26	27	28	34	28,00	1,77
80	25	26	23	28	34	27,20	2,10
50	30	34	33	28	30	31,00	1,22
20	40	45	38	35	34	38,40	2,20
16	46	51	43	38	37	43,00	2,89
12	53	60	52	44	43	50,40	3,51
10	62	65	58	48	48	56,20	3,94
9	66	67	62	51	52	59,60	3,82
8	70	68	67	55	56	63,20	3,56
7	75	71	73	62	61	68,40	3,23
6	82	74	77	66	68	73,40	3,27
5	86	79	83	72	75	79,00	2,85
4	87	80	85	77	79	81,60	2,11
3	90	82	87	78	81	83,60	2,41
2							
1							
Pulsdauer [µs] (2,5 m/s)	Mindestspannung [V]						
100	54	46	46	50	54	50,00	2,00
50	55	52	50	51	52	52,00	0,94
20	62	68	66	64	55	63,00	2,50

Abmessung	100 x 100					MITTEL- WERT	STABW
chip	64.2.1	64.3.2	64.3.3	65.1.1	65.5.1		
10	80	91	86	79	73	81,80	3,45
5	98	114	109	99	91	102,20	4,60
Pulsdauer [ $\mu$ s] (5 m/s)	Mindestspannung [V]						
100	77	77	69	72	72	73,40	1,75
50	78	76	70	73	72	73,80	1,60
20	80	89	80	81	75	81,00	2,52
10	98	118	109	98	92	103,00	5,20
5	121	148	147	123	108	129,40	8,75
	zeit [ $\mu$ s]						
Flugzeit bis Strich 5 m/s (40 v / 50 $\mu$ s)	144	188	154	216	144	169,20	15,90
Flugzeit bis Strich 5 m/s (60 v / 50 $\mu$ s)	68	72	66	64	60	66,00	2,24
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 10 $\mu$ s)	76	92	94	60	60	76,40	8,26
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 20 $\mu$ s)	40	48	44	44	40	43,20	1,67
Flugzeit bis Strich 5 m/s (80 v / 50 $\mu$ s)	36	40	38	38	36	37,60	0,84
	Durchmesser [ $\mu$ m]						
Tropfengröße 1 (40 v / 50 $\mu$ s)			85,7			85,70	
Tropfengröße 1 (60 v / 50 $\mu$ s)	101,6	90,7	78,2	94,5	96,1	92,22	4,38
Tropfengröße 1 (80 v / 10 $\mu$ s)	80,9		69,1	65,3	83,6	74,73	4,45
Tropfengröße 1 (80 v / 20 $\mu$ s)	58,8	122,3	114,4	79,3	59,3	86,82	15,04
Tropfengröße 1 (80 v / 50 $\mu$ s)	112,2	151	145,2	71,4	99,1	115,78	16,52
Tropfengröße 2 (40 v / 50 $\mu$ s)	130,32	137,7	136,2	123,25	120,4	129,57	3,83
Tropfengröße 2 (60 v / 50 $\mu$ s)	142,6	155,7	168,1	138,7	131,9	147,40	7,23
Tropfengröße 2 (80 v / 10 $\mu$ s)	102,3	138,8	124,4	108,8	99	114,66	8,33
Tropfengröße 2 (80 v / 20 $\mu$ s)	135,8	115,9	120	131,2	129	126,38	4,10
Tropfengröße 2 (80 v / 50 $\mu$ s)	151,5	117,2	118,4	158,3	146,8	138,44	9,64
	zeit [ $\mu$ s]						
Delay (40 v / 50 $\mu$ s)	500	490	400	400	440	446,00	23,87
Delay (60 v / 50 $\mu$ s)	400	700	700	500	500	560,00	67,08
Delay (80 v / 10 $\mu$ s)	415	700	415	400	480	482,00	62,86
Delay (80 v / 20 $\mu$ s)	500	640	435	550	455	516,00	41,13
Delay (80 v / 50 $\mu$ s)	500	570	590	550	600	562,00	19,81
	Messung Laservibrometer [mV]						
Hub (Sinus 50 v / 200 Hz)	150	140	160	160	160	154,00	4,47
	volumen [nl]						
Ausgestoßenes Volumen [nl] (40 v / 50 $\mu$ s)	1,16	1,37	1,65	0,98	0,91	1,21	0,15
Ausgestoßenes Volumen [nl] (60 v / 50 $\mu$ s)	2,07	2,37	2,74	1,84	1,67	2,14	0,21
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 10 $\mu$ s)	0,84	1,40	1,18	0,82	0,81	1,01	0,13
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 20 $\mu$ s)	1,42	1,77	1,69	1,44	1,23	1,51	0,11
Ausgestoßenes Volumen [nl] (80 v / 50 $\mu$ s)	2,56	2,65	2,47	2,27	2,17	2,42	0,10

Abmessung	100 x 100					MITTEL- WERT	STAB W
Chip	64.2. 1	64.3. 2	64.3. 3	65.1. 1	65.5. 1		
	Geschwindigkeit [m/s]						
Geschwindigkeit [m/s] @ 40 v / 50 $\mu$ s	1,74	1,33	1,62	1,16	1,74	1,52	0,13
Geschwindigkeit [m/s] @ 60 v / 50 $\mu$ s	3,68	3,47	3,79	3,91	4,17	3,80	0,13
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 10 $\mu$ s	3,29	2,72	2,66	4,17	4,17	3,40	0,37
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 20 $\mu$ s	6,25	5,21	5,68	5,68	6,25	5,81	0,22
Geschwindigkeit [m/s] @ 80 v / 50 $\mu$ s	6,94	6,25	6,58	6,58	6,94	6,66	0,15



## **B CD-ROM**