



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

Bachelorarbeit

Charakterisierung des elektro-mechanischen Verhaltens eines
piezoelektrischen Wandlers für einen Piezomembrandruck-
kopfes

Arne Meeuw

Matr.-Nr.: 3602763

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Markus Kagerer

Ausgegeben am: 23.04.2012

Abgegeben am:

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 (27.09.2012)

Arne Meeuw

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zuge des Abschlusses meines Bachelorstudiums im Fach „Maschinenbau und Management“. Ich danke meinem Betreuer Dipl.-Ing. Markus Kagerer, welcher mich durch eine Seminararbeit 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, (September 2012)

Arne Meeuw

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	II
Vorwort	III
1 Einleitung.....	3
2 Problemstellung	4
3 Stand der Technik	5
3.1 Mikrotropfenerzeugung	5
3.2 Druckverfahren und ihre Entwicklung	6
3.2.1 Continuous Jet	6
3.2.2 Drop-On-Demand.....	6
3.3 Piezoelektrischer Effekt.....	8
3.3.1 Kristallstruktur und Polarisation	9
3.3.2 Aktuationssteigerung.....	10
Piezostapel.....	10
Bimorphprinzipien	11
3.3.3 Verwendung piezoelektrischer Aktoren.....	12
3.4 Klassifizierung unterschiedlicher Piezo-Wandler-Designs	13
3.4.1 Rohrwandler	13
3.4.2 Paddelwandler	14
3.4.3 Scherwandler	14
3.4.4 Membranwandler	15
3.5 Ansteuerungsprinzipien	16
3.5.1 Einzelner monopolarer Impuls	17
3.5.2 Doppelte monopolare Anregung	17
3.5.3 Bipolarer Impuls.....	17
3.5.4 Bipolare Folge von Impulsen	19
3.6 Stand am MiMed	19
3.6.1 Aufbau und Herstellung des Druckkopfes	19
3.6.2 Vorteile des verwendeten Piezomembrandruckkopfes	21
3.6.3 Ansteuerungsimpuls	22
3.6.4 Bisherige Ergebnisse und Erfolge	22
4 Kritik am Stand der Technik	25
5 Aufgabenstellung	27
6 Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung	28
7 Eigener Ansatz.....	30
7.1 Beschreibung der Kapazität eines Aktors	30
7.2 Mathematische Linearisierung einer Piezokeramik.....	32
7.3 Mechanische Betrachtung der Deformation des Aktors	34
7.4 Betrachtung der Wandsteifigkeit	38
7.5 Energiebetrachtung der Ansteuerung	38

7.6 Verformung des Aktors – Bedeutung für die Volumenänderung in der Pumpkammer	40
7.7 Energiebetrachtung des Tropfen	42
7.8 Zusammenfassung der erwarteten Effekte.....	42
8 Realisierung	43
8.1 Herstellung der Druckköpfe	43
8.2 Labor- und Geräteaufbau	50
8.2.1 Ansteuerungseinheit	50
8.2.2 Hub-Beobachtungsstand.....	50
8.2.3 Funktionsprinzip Laser-Vibrometer	51
9 Experiment.....	53
9.1 Beschreibung des Experiments	53
9.2 Vorgehen.....	53
9.2.1 Einteiliger Impuls	54
9.2.2 Zweiteiliger Impuls als fill-before-fire Action	54
9.3 Spannungvariation (Messreihe 1 – 3):	55
9.4 Frequenzvariation (Messreihe 4 und 5)	55
10 Auswertung der Messergebnisse	56
10.1 Veränderungen der Einschnitttiefe	56
10.2 Veränderung der Elektrodenbreite	58
10.3 Veränderung des Ansteuerungsimpulses	60
10.4 Verhalten der Elektroden bei verschiedenen Frequenzen.....	64
11 Zusammenfassung und Ausblick	67
Literaturverzeichnis.....	70
Abbildungsverzeichnis	71
12 Anhang.....	75
12.1 Datenblatt VIBRIT 1876	75
12.2 Messwerte des Experiments	75

1 Einleitung

Das Erzeugen und Dosieren kleinstter Tropfen ist heutzutage in vielen Anwendungsbereichen weit verbreitet. Im Bereich des Drucks und der Beschichtung besteht das größte Anwendungsgebiet. Beispielsweise im Tintenstrahldrucker werden kleinste Tropfen an Farbe erzeugt, welche auf das Papier gebracht werden, um dann einen einzelnen Farbpunkt zu ergeben.

Diese Bachelorarbeit stellt die Optimierung eines am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik entwickelten Tropfenerzeugers dar. Dieser ist seit einigen Jahren fester Bestandteil der Forschungsgruppe Mikrotechnik und unterliegt im Zuge von Bachelor- und Diplomarbeiten stetiger Verbesserungen.

Die Einsatzbereiche der Mikrotropfenerzeugung reichen von der Drucktechnik (beispielsweise in Tintenstrahldruckern) bis zur Medizintechnik. Ein etwas weiter gefasstes Ziel ist der Einsatz im 3D-Druck – hier wird das Bindemittel, welches zum Aushärten des Pulvers notwendig ist, ziel- und mengengenau auf das Pulverbett aufgebracht.

Der betrachtete Membrandruckkopf überträgt seine Energie mittels eines Piezo-Elements, dieses wird durch einen zeitlichen Verlauf einer Ansteuerspannung zur Verformung gezwungen und wölbt damit eine Membran, die auf der Pumpkammer liegt. Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Messung der Gesamtverschiebung der Membran in Bezug auf die gegebenen geometrischen (Breite und Einschnitttiefe des Aktors) und elektrischen Parameter (Spannung, Haltezeit und Impulsform).

In dieser Arbeit werden zudem die verschiedenen am Markt und in der Forschung befindlichen Dosierungsverfahren vorgestellt. Da diese Arbeit die Modifizierung und Optimierung der Geometrie und der Ansteuerung des Aktors behandelt, werden bisherige Erkenntnisse in der elektrischen Ansteuerung aufgeführt und mit dem aktuellen Stand am Lehrstuhl verglichen. Weiterhin wird ein Berechnungsmodell eingeführt, das im Voraus Abschätzungen erlaubt, welchen Effekt die Änderung der geometrischen Parameter des Aktors auf die Bewegung der Membran haben. Folgend wird auf die durchgeföhrten Experimente eingegangen, die sich durch Veränderung der Ansteuerungsparameter Spannung, Haltezeit und Impulsform auszeichnen. Abschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse dargestellt, ausgewertet und zusammen mit meiner Analyse ein Fazit gezogen, welche Verbesserungen am Aktor des Tropfenerzeugers erreicht worden sind.

2 Problemstellung

Ein Forschungsgebiet des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik stellen Piezomembrandruckköpfe dar. Auf einer strukturierten Siliziumbasis, welche die fluidischen Komponenten wie Fluidzuführung, Pumpkammer und Düse enthält, wird eine Membran aus Borsilikatglas anodisch gebondet. Auf diesem Verbund wird nun ein Aktor geklebt, der aus strukturierten Piezozungen besteht.

Um einen Tropfen aus der Düse zu stoßen, läuft ein klar definierter Tropfenbildungsprozess ab, der seine Energie durch den Aktor erhält. Dieser wiederum erhält seine Energie über einen elektrischen Impuls, eingebracht über die Elektroden auf dem Piezoaktor. Diese elektromechanische Kopplung zwischen elektrischem Impuls und der Bewegung des Aktors gilt es zu untersuchen.

Der Ansteuerimpuls besteht aus drei verschiedenen Zeitabschnitten. Zuerst erfolgt der Anstieg der Spannung in einer festgelegten Zeit, die einen Rückzug des Meniskus in die Pumpkammer erzeugt. Der zweite Abschnitt beschreibt die Haltezeit während derer der Meniskus in seiner ausgelenkten Position verweilt und so dem Fluid in der Pumpkammer ermöglicht eine Beschleunigung in Richtung der Austrittsdüse zu erfahren. Im dritten und letzten Abschnitt sinkt die Ansteuerungsspannung wieder auf das Nullniveau herab und die Pumpkammer gewinnt ihr Ursprungsvolumen wieder. Damit reißt der Fluidstrom aus der Düse ab und ein Tropfen entsteht. Bisher ist dieser Ansteuerungsimpuls nicht verändert worden und wird für sämtliche Versuche als gesetzt betrachtet.

Die Wandlung, der auf den Aktor in Form eines elektrischen Feldes eingebrachten Energie zum Ausstoß eines Tropfens, der seinerseits Energie in Form von Oberflächenspannung und kinetischer Energie besitzt ist ein Prozess, welcher bislang keine Beschreibung erfahren hat. Die Bezugnahme der vom Aktor als elektrischer Kondensator bereitgestellten Kapazität wurde bisher nicht weiter untersucht. Durch die Berechnung der auf den Aktor aufgebrachten Ladung wird auf eine normierte Größe zurückgegriffen, welche in Relation zu den Eigenschaften der gebildeten Tropfen gesetzt wird. Eine quantitative Beschreibung der Abhängigkeit der Kapazität (nF), aufgetragener Energie (J) des Aktors und seinem ausgeführten Hub im eingebauten Zustand (nm) und den daraus resultierenden Tropfenparametern Geschwindigkeit (m/s) und Volumen (pl) gibt es bisher nicht.

Bisher sind die Systeme für einen Tropfenbildungsprozess einem Versuch-und-Irrtum-Vorgehen unterworfen bei welchem die Ansteuerungsparameter für eine stabile Tropfenbildung langsam erreicht werden. Zwar gibt es Anhalts- und Orientierungspunkte nach denen sich gerichtet wird, jedoch ist eine genaue Beschreibung und Vorhersage des Verhaltens eines Aktors nicht bekannt. Es gibt Ansätze der Simulation der Verformung des Aktors. Diese befinden sich jedoch im Anfangsstadium und sind durch praktische Untersuchungen und empirische Messungen zu belegen.

Die Strukturierung von Piezokeramiken wird nicht ausreichend alterniert. Eine erweiterte Strukturierung in der Breite oder Tiefe des Abtrags zwischen den Elektroden wird bisher nicht praktiziert. Diese Strukturierungsparameter haben einen erheblichen Einfluss auf die Energieaufnahme und die Bewegungsfreiheit der einzelnen Aktoren. Aufgabe in dieser Bachelorarbeit ist es daher diesen Einfluss näher zu untersuchen.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die verwendete Technik der Mikrotropfenerzeugung sowie dessen Entwicklung und den zugrunde liegenden Prinzipien und Mechanismen gegeben. Des Weiteren wird auf den aktuellen Stand der Forschung am Lehrstuhl MiMed sowie anderer Forschungsgruppen eingegangen und im Abschluss auf bestehende Verbesserungspotenziale hingewiesen.

3.1 Mikrotropfenerzeugung

Das Dosieren kleinstster Mengen von Flüssigkeiten findet Anwendung in vielen Gebieten der Industrie und Forschung. Die Anwendungsgebiete umfassen den Druck und die Beschichtung von Oberflächen, Medizintechnik, elektronische Fabrikation und die Optik.

Während der Druck- und Beschichtungsbereich den größten Markt für die Verwendung von Tropfenerzeugern repräsentiert, welche durch den zunehmenden Gebrauch von Druckern dem Heim- und Office Bereich zuzuschreiben ist, erstreckt sich der Gebrauch auf immer mehr Gebiete. So werden Tropfenerzeuger nicht nur zum Druck von anderen Fluiden wie Lacke oder Klebstoffe, sondern auch zur gezielten Einspritzung von Brennstoffen genutzt. In der Medizintechnik gibt es weitere Anwendungsgebiete. Beispielsweise stellt die Firma MicroFab einen Tropfenerzeuger her, welcher in der Lage ist, zehn verschiedene Flüssigkeiten tropfen genau zu dosieren. Dieser wird im Bereich der DNS-Analyse eingesetzt (Lee 2003).

Im Bereich der Mikrotropfenerzeugung von Fluiden kann heutzutage auf zwei verschiedene Arten zurückgegriffen werden: Die Continuous-Jet Methode und die Drop-On-Demand Methode. (siehe Abb. 1)



Abb. 1 Unterteilung verschiedener Designs zur Mikrotropfenerzeugung.

Unter dem Drop-On-Demand-Verfahren versteht man speziell Tintenstrahl-Systeme bei welchen einzelne Tropfen auf Abruf („On Demand“) erzeugt und ausgestoßen werden. Konträr hierzu steht das Continuous-Jet-Verfahren.

3.2 Druckverfahren und ihre Entwicklung

3.2.1 Continuous Jet

Das Continuous-Jet-Verfahren stellt eine Methode der Tropfenerzeugung dar, bei welcher ein konstant ausgestoßener Strahl an Flüssigkeit durch einen Unterbrechungsmechanismus in einzelne Tropfen geteilt und dann auf die zu bedruckende Oberfläche gelenkt wird.

Das Verfahren nutzt die Eigenschaft eines Freistrahls nach einer gewissen Flugstrecke in einzelne Tropfen zu zerfallen (Rayleigh-Zerfall). Da dieser eher zufällig ablaufende Prozess nicht ausreichend reproduzierbar ist, werden mit Hilfe eines piezoelektrischen Druckwandlers Druckwellen überlagert, welche zu einem kontrollierten Zerfall des Strahls beitragen. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Tropfenerzeugers. Mit dieser Methode ist es möglich, eine Tropfenbildungsr率te bis in den Megahertzbereich zu realisieren. Hierbei wird unter Einsatz einer Düse ein Schwarz-Weiß-Druck bzw. mit vier Düsen ein Farbdruck realisiert. Die Positionierung der zerfallenen Tröpfchen erfolgt durch deren elektrische Aufladung und einer Ablenkung durch ein kontrolliertes elektrisches Feld.

3.2.2 Drop-On-Demand

Beim Drop-On-Demand-Verfahren erfolgt die Erzeugung eines auf Abruf bereitgestellten Tropfens durch die Veränderung des flüssigkeitsführenden Pumpkammervolumens, sodass ein Tropfen aus der Düsenbohrung ausgestoßen wird. Hierbei gibt es verschiedene Verfahren zur Herbeiführung dieser Volumenänderung. Die meistgenutzten sind das Bubble-Jet- und Piezo-Jet-Verfahren. Bei diesem Verfahren arbeitet jeder Druckkopf mit den in Abbildung 3 dargestellten Grundfunktionen: Druckerzeugung, Verdrängung der Flüssigkeit, Leiten der Flüssigkeit, Ausstoß in die freie Umgebung, Tropfenbildung und Ablösung und kapillare Wiederbefüllung. Alle Drop-On-Demand-Verfahren arbeiten ohne ein Sperrventil. Die Sperrwirkung wird durch die Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Fluid und Luft an der Düse ausgenutzt (Elsner 2009).

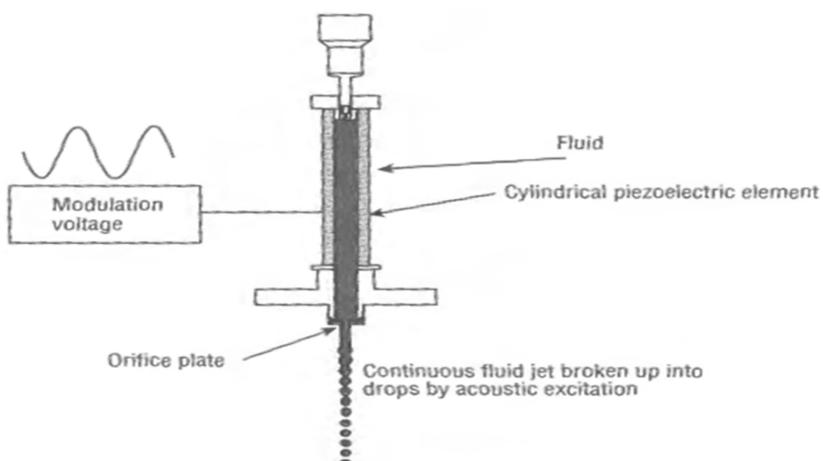


Abb. 2 Funktionsprinzip des Continuous-Jet-Verfahrens (entnommen aus: Lee 2003).

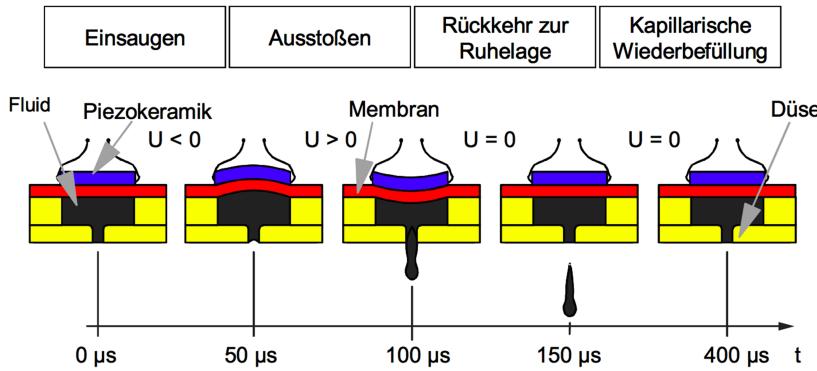


Abb. 3 Grundfunktionsprinzip eines Drop-on-Demand-Druckkopfes: Die Membran wird aus ihrem Ruhezustand ausgelenkt und zieht Flüssigkeit in die Pumpkammer hinein. Bei Wechsel der Polung wird die Membran in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt und drückt das Fluid aus der Düse. Ist die Ansteuerspannung auf Null abgefallen, findet der Tropfenabriß statt und die Membran nimmt ihre Ursprungsposition ein (entnommen aus: Elsner 2009).

Das Bubble-Jet-Verfahren nutzt einen thermischen Aktor, der in Form eines Heizelements direkt in der Pumpkammer sitzt. Solche Systeme werden überwiegend direkt aus einem Siliziumwafer gefertigt und enthalten somit bereits Düsen, Aktoren, Kanäle und die nötige Treiberschaltung in einem Chip. Hierbei werden aus der Chipfertigung bekannte Fertigungsmechanismen wie die Dünnschichttechnik angewendet. Die notwendige Volumenänderung in der Pumpkammer erfolgt bei diesem System durch eine schnelle Erhitzung des zu druckenden Fluides auf etwa 300 °C bis 500 °C (Elsner 2009). Durch das spontane Verdampfen und der Entstehung einer Gasblase erhöht sich der Druck in der Pumpkammer und das Fluid wird aus der Düse gedrückt. Durch das Abschalten des Heizelements und dem damit verbundenen Zusammenbruch der Gasblase entsteht ein Unterdruck, welcher für den Tropfenabriß nötig ist. Abbildung 4 zeigt das Funktionsprinzip eines solchen Tropfenerzeugers.

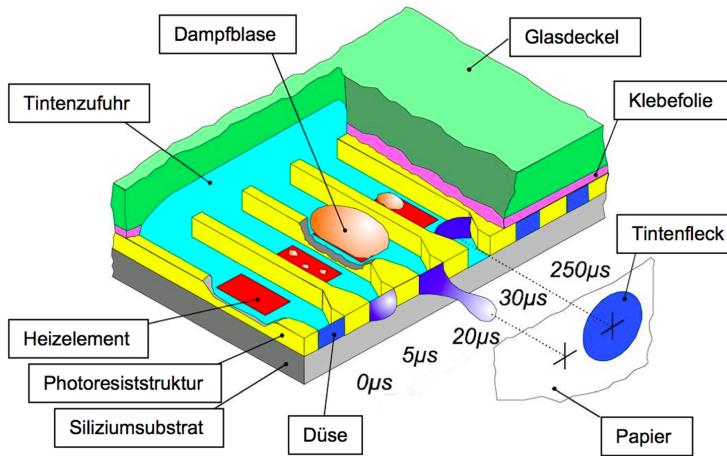


Abb. 4 Bubble-Jet Tropfenerzeuger: Ein Tropfen aus Flüssigkeit wird durch das Heizelement erhitzt. Die hierbei entstehende Dampfblase drückt das restliche Fluid aus der Düse. Nach Abschalten des Heizelements fällt die Dampfblase zusammen und ein einzelner Tropfen entsteht. (entnommen aus: Elsner 2009).

Wichtig hierbei ist, dass bei diesem Verfahren nur Fluide mit klar definiertem Phasenübergang von flüssig zu gasförmig zu verwenden sind. So können nur Substanzen mit leicht flüchtigen Anteilen wie Wasser oder Alkohol verwendet werden (Elsner 2009). Bei diesem System hängen Druck in der Pumpkammer und damit die Fluggeschwindigkeit des ausgestoßenen Tropfens direkt mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des zu drückenden Fluides zusammen. Der Nachteil dieses Verfahrens ist für die Nutzung in der Medizintechnik durch die chemische Veränderung der drückbaren Materialien so gravierend, dass eine sinnvolle Verwendung nicht möglich ist. Die Vorteile bestehen jedoch in der einfachen Herstellung solcher Systeme und der Möglichkeit eine hohe Integrationsdichte in kleinen Baugruppen zu erzielen. So stellen Canon und Hewlett Packard seit über zehn Jahren kommerziell erfolgreiche Drucker für den Heimbereich her, welche nach diesem Prinzip arbeiten (Lee 2003).

3.3 Piezoelektrischer Effekt

Der in dieser Bachelorarbeit untersuchte Tropfenerzeuger basiert auf dem piezoelektrischen Effekt. Der direkte piezoelektrische Effekt wurde 1880 erstmals von den Brüdern Pierre und Jacques Curie entdeckt und beschrieben. Er bezeichnet das Verhalten von speziellen Kristallen, welche unter Krafteinwirkung und der damit verbundenen mechanischen Verformung eine Ladungsverschiebung auf der Kristalloberfläche aufweisen. Die hierbei entstehende Ladungsverschiebung führt zu einer Entstehung eines elektrischen Feldes. Die Brüder Curie entdeckten diesen Effekt an natürlichen Kristallen wie Quarzsand und Turmalin. In Abbildung 5 ist der Aufbau der Atome und die vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Elementarzelle eines Quarzkristalls gezeigt. Bei mechanischer Deformation der Kristallzelle wird der Ladungsschwerpunkt verschoben und eine an den Elektroden abgreifbare Ladung entsteht.

Eine Umkehrung des Vorgangs wurde von Brewster postuliert und durch die Brüder Curie bestätigt. Das heißt es gibt spezielle Kristalle, die beim Anlegen eines elektrischen Feldes eine mechanische Deformation aufweisen.

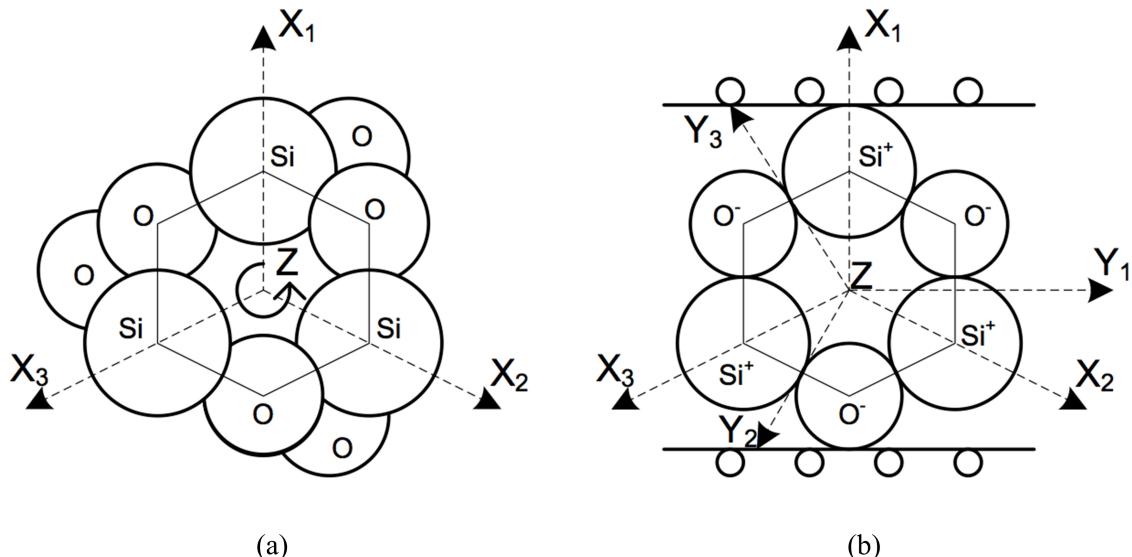


Abb. 5 Elemente eines Quarzkristalls (a); Vereinfachte Elementarzelle (b) (entnommen aus: PI 2009).

Wegen ihrer hohen Kopplung mechanischer und elektrischer Eigenschaften sind Keramiken mit einer Perovskit-Struktur im Bereich der Aktorik und Sensorik besonders geeignet. Sie weisen schon bei geringen Ansteuerspannungen eine hohe mechanische Deformation auf. Eine Keramik dieser Art weist eine Strukturformel nach der Form (1) auf (Günther 2008).



Ein weit verbreitetes Material dieser Gruppe ist das Blei-Zirkonium-Titanat (PZT).

Piezokeramiken mit Verwendung in der Industrie sind seit ca. 50 Jahren bekannt. Sie sind polykristalline Werkstoffe, die den direkten und den inversen Piezoeffekt aufweisen. Solche Werkstoffe werden heutzutage in aktiver und in passiver Form verwendet. So finden diese Elemente Anwendung bei Mikroventilen, Mikrorelais und Tintendruckköpfen. Als passives Element sind solche Keramiken im Bereich der Sensorik bei Kraft-, Drehraten- und Beschleunigungssensoren verbreitet.

3.3.1 Kristallstruktur und Polarisation

Werkstoffe, welche den piezoelektrischen Effekt aufweisen bestehen aus vielen einzelnen Einkristallen unterschiedlicher Ausrichtung. Um einen gerichteten und vorhersagbaren Piezoeffekt zu erreichen ist es nötig, diese Keramiken vor deren Verwendung zu polarisieren. Meist geschieht dies als letzter Prozessschritt in der Herstellung. Hierbei wird das Material unter Anwesenheit eines gerichteten elektrischen Feldes über seine Curie-Temperatur (T_c) erhitzt. Beim überschreiten dieser Temperatur besteht die Elementarzelle aus einer kubischen Gitteranordnung. Durch das vorhandene Feld richten sich die Dipole der Einzelkristalle nun uniform aus. Die Keramik wird langsam wieder auf eine Temperatur unterhalb T_c abgekühlt und behält nun die vorgegebene Polarisationsrichtung. Abbildung 6 zeigt die innere Struktur eines Piezokristalls vor und nach dessen Polarisationsprozesses.

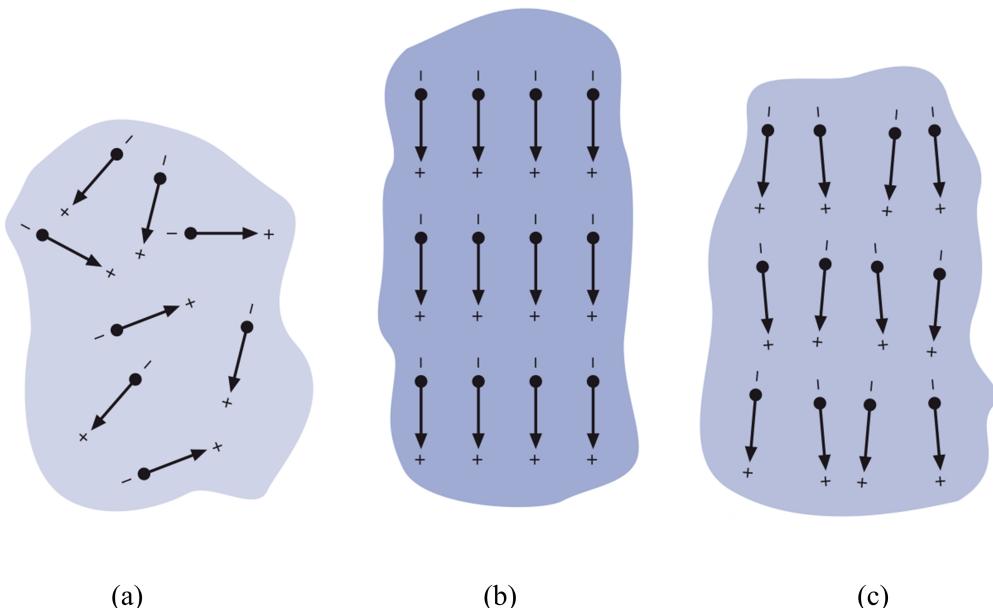


Abb. 6 Unpolarisierte Keramik mit strukturloser Anordnung der Kristalle (a). Unter Anwesenheit eines E-Feldes polarisierte Keramik (b) in der sich die Kristalle strukturiert angeordnet bleiben (c) (entnommen aus: PI 2009).

Die nun polarisierte Keramik ist in der Lage als Aktor verwendet zu werden. Wird ein elektrisches Feld in Richtung der Polarisation angelegt, so längt sich das Material in Feldrichtung und zieht sich senkrecht dieser Richtung zusammen. Man spricht hierbei vom „Longitudinal- und Transversaleffekt“. Ein zur Polarisationsrichtung senkrecht angelegtes Feld bewirkt eine Scherung im Material („Schereffekt“). In Abbildung 7 zu sehen ist die Deformation nach dem Längs- und Quereffekt eines piezoelektrischen Materials.

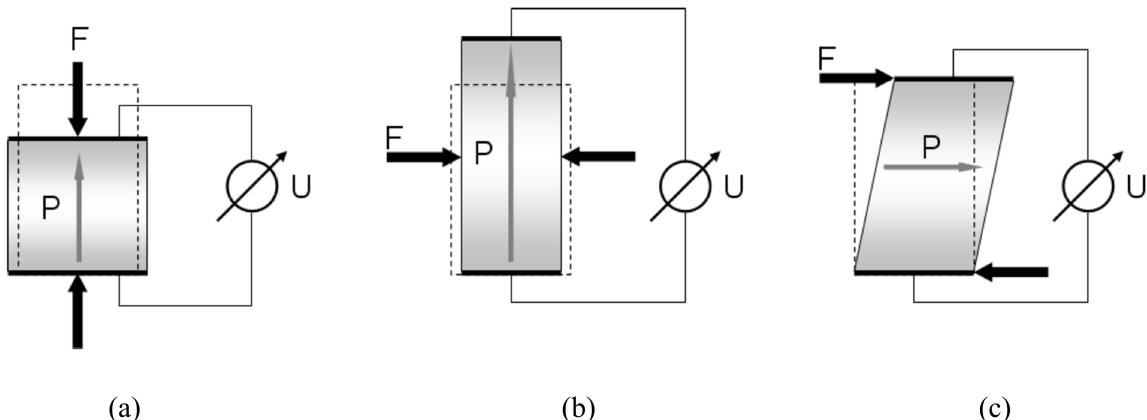


Abb. 7 Unter Anlegen eines elektrischen Feldes bildet sich in einer Piezokeramik je nach Richtung eine Verformung aus. Der Longitudinaleffekt, welcher sich parallel zur Polarisationsrichtung bei angelegtem E-Feld zeigt (a). Der Transversaleffekt, welcher sich senkrecht zur Polarisationsrichtung ausbildet (b). Der Schereffekt, welcher bei einem elektrischen Feld senkrecht zur Polarisationsrichtung auftritt und eine Scherung des Materials hervorruft (c).

3.3.2 Aktuationssteigerung

Die Verformungswerte von Piezoaktoren bei technisch beherrschbaren Spannungen liegen im Bereich von einem Promille der geometrischen Abmessungen. Diese Verformungen reichen in vielen Anwendungsfällen nicht aus und werden daher durch verschiedene Prinzipien vergrößert.

Piezostapel

Weit verbreitet ist die Verwendung von Multilayer-Aktoren (Piezostapel). Diese bestehen oft aus mehreren hundert dünnen Schichten von Piezomaterial, welche durch Elektroden voneinander getrennt sind. Hiermit wird eine große Feldstärke erzielt, die sich in einer entsprechend großen Verformung des Aktors widerspiegelt. Abbildung 8 (a) zeigt das Schema eines solchen Stapsels. Die hierbei eingesetzten Aktoren weisen Verfahrwege von 180 µm bei einer Ursprungslänge von 190 mm auf und erreichen Kräfte von über 80 kN (PI 2009).

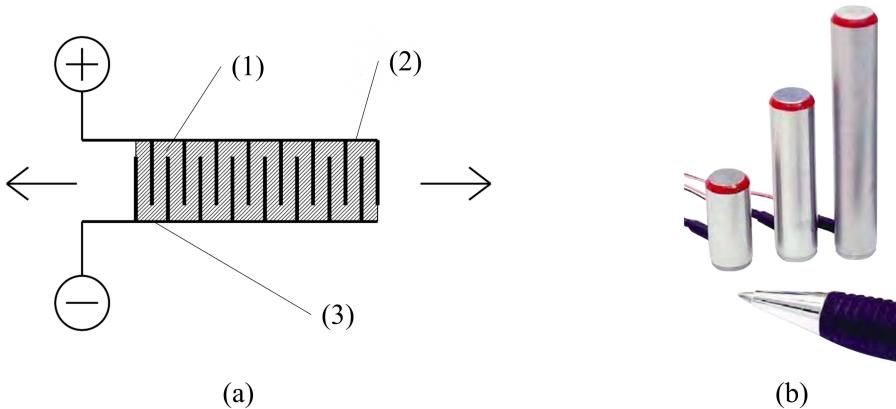


Abb. 8(a) Prinzip eines Piezostapelaktors: (1) Aktives Piezomaterial; (2) Positive Elektrode; (3) Negative Elektrode (entnommen aus: Günther 2008); (b) Kommerziell erhältliche Stapelaktoren (entnommen aus: PI 2009).

Bimorphprinzipien

Bei den Bimorphprinzipien kommt das aus thermischen Anwendungen bekannte Prinzip unterschiedlicher Längungen zweier fest miteinander verbundener Materialien zum tragen. Bei einem Bi-Metall-Sensor wie er in einfachen Thermostaten vorhanden ist sind zwei Metalle unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten verklebt. Steigt oder sinkt die Temperatur, so dehnen (respektive verkürzen) sich die Metalle nun unterschiedlich und es kommt zu einer Biegung des Verbunds. Zumeist wird ein solcher Sensor zugleich als Aktor eingesetzt, um den Schaltvorgang zu betätigen. Bei Piezokeramiken wird dieser Effekt mit dem Verkleben eines Aktors mit einem passiven Material realisiert. Auch möglich ist der Verbund zweier Schichten aktiven Materials, welche sich in entgegengesetzte Richtungen ausdehnen und damit verbiegen. Durch eine solche Verwendung wird eine noch größere Aktuationssteigerung erreicht.

In unserem Fall stellt der Verbund aus einem oben liegenden Aktor, der auf eine passive Membran aufgeklebt ist einen Membranaktor dar (siehe Abbildung 9).

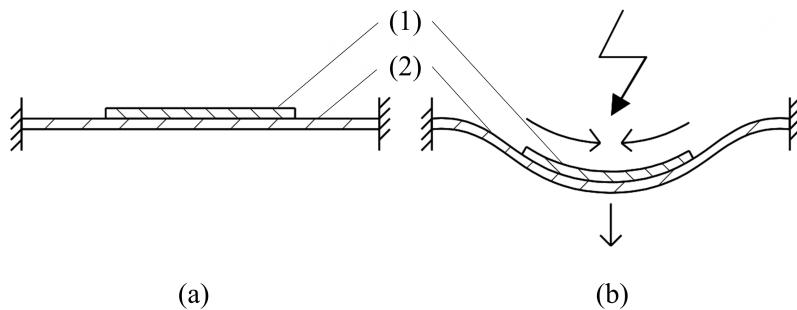


Abb. 9 Prinzip des Membranaktors in seiner Ruhelage (a) und unter Belegung mit einer Ansteuerspannung im verformten Zustand (b). Dargestellt ist der Aktor (1) und die passive Membran (2) (entnommen aus: Günther 2008).

Ein Membranaktor stellt bei dem hier verwendeten Druckkopf das Antriebsprinzip dar. Hierbei wird die Deformation des Aktors in eine Wölbung der über der Pumpkammer liegenden Membran gewandelt. Für diese Aktuation wird dem Aktor eine elektrische Spannung beauf-

schlagt. Diese wird zur Polarisation an einer vollflächigen Elektrode angewendet und im Betrieb dann in gleicher Feldrichtung an die separierten Einzelektroden gelegt.

Zur Steigerung der Auflösung und Druckgeschwindigkeit eines Tropfenerzeugers werden eine Vielzahl von Aktoren benötigt. Hierbei sind zum einen die zuvor geteilten Keramikplatten einzeln auf die passiven Membrane geklebt. Diese Handhabungsart erfordert viele aufwändige Schritte, daher wird zumeist ein anderes Prinzip angewendet: Die gesamte Keramik, welche alle Pumpkammern bedeckt, wird aufgeklebt. Danach wird die Entkopplung der Einzelaktoren mittels eines mechanischen Verfahrens (Schleifen oder Fräsen) erzeugt. Hierbei wird die Aktorkeramik an den Randbereichen der Pumpkammer entfernt, wobei darauf zu achten ist, dass die Elektrode auf der Unterseite nicht beschädigt wird. Durch diesen Prozess entstehen einzelne, auf der Pumpkammer liegende Membranaktoren, welche elektrisch und mechanisch voneinander getrennt sind. In Abbildung 10 ist ein am Lehrstuhl verwendeter strukturierter Aktor gezeigt.

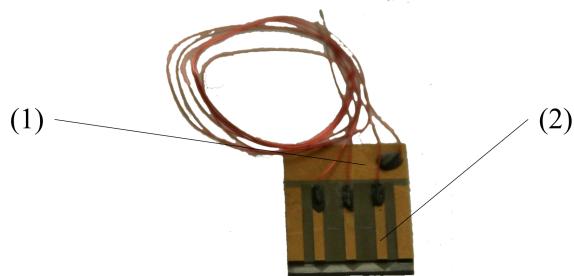


Abb. 10 Strukturierter Aktor: (1) Basiselektrode; (2) Einzelne Aktorzunge.

3.3.3 Verwendung piezoelektrischer Aktoren

Die Verwendung piezoelektrischer Aktoren begann bereits in den Jahren 1970 und 1971. Bei dem am Lehrstuhl verwendeten System wird eine bimorphe Membran als Aktor verwendet und als Deckel auf der Pumpkammer aus Silizium gesetzt. Die Membran besteht aus einem oben liegendem Aktor aus einer Piezokeramik (Vibrit 1876), welche mit einer aus Borsilikatglas (Pyrex) bestehenden Membran verklebt ist. Wird die Piezokeramik nun mit einem elektrischen Feld belegt, so verlängert sich diese auf Grund ihres positiven d_{33} Ausdehnungskoeffizienten und wird hierbei von der mit ihr verklebten Membran behindert, was dann zu einer Wölbung der zuvor beschriebenen bimorphen Struktur führt. Diese bimorphe Struktur befindet sich direkt über einer laserstrukturierten Pumpkammer aus Silizium und führt in dieser zu der gewünschten Volumenänderung.

Andere Formen der Einbringung einer Volumenänderung mittels Piezoaktoren bestehen in der Verwendung einer scherenden Membran (Paddel-Aktor), welche in der Pumpkammer selbst liegt. Des Weiteren gibt es die Bauform eines rohrförmigen Aktors, welcher die Pumpkammer selbst darstellt und unter Auferlegung eines elektrischen Feldes kontrahiert. Eine weitere Form des Aktordesigns ist eine keilartige Aktorform, welche mit der Spitze auf die Pumpkammer drückt um so das Volumen zu ändern. Diese Bauformen werden im Folgenden kurz beschrieben (Abbildung 11).

Da im weiteren Verlauf der Arbeit nur mit dem Drop-On-Demand-Verfahren und der Volumenänderung durch einen Piezoaktor gearbeitet wird, werden die übrigen Druckmodelle (Continuous-Jet und Drop-On-Demand durch Bubble-Jet) vernachlässigt.

3.4 Klassifizierung unterschiedlicher Piezo-Wandler-Designs

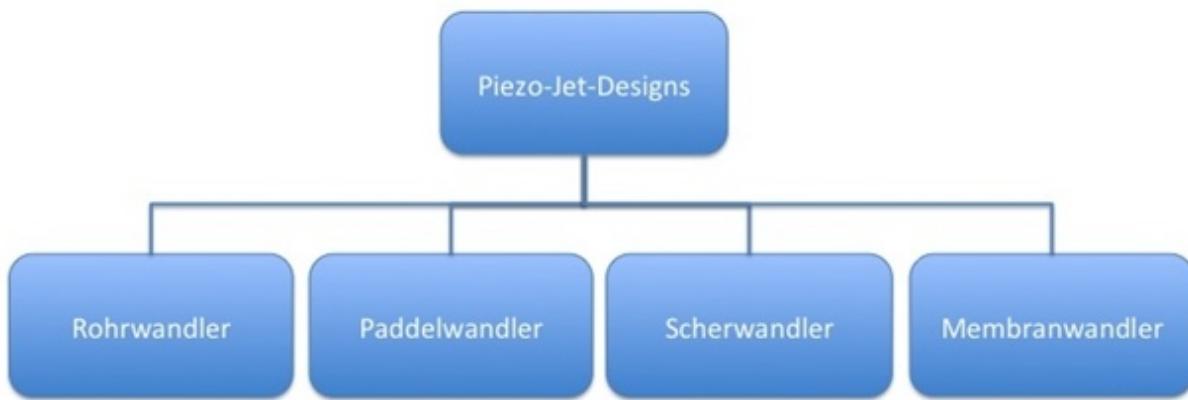


Abb. 11 Klassifizierung piezobasierender Aktordesigns im Drop-On-Demand-Verfahren.

In der Entwicklung von piezoaktuierten Tropfenerzeugern haben sich vier verbreitete Designformen ergeben.

3.4.1 Rohrwandler

Mikrotropfenerzeuger mit sogenannten Rohrwandlern bilden die älteste Form der piezoaktuierten Tropfenerzeuger. So stellte die Firma Siemens Ende der siebziger Jahre den Druckkopf PT80 her. Dieser Druckkopf besaß 12 Düsen, die mittels umgebender Piezoröhrchen die notwendige Druckwelle zur Tropfenerzeugung aufbringen. Mit Druckköpfen dieser Bauart war es möglich Druckgeschwindigkeiten von bis zu 300 Zeichen pro Sekunde zu erreichen (Wehl 1984). Die Druckwelle wird durch die unter einer Ansteuerspannung kontrahierenden Aktorröhren hervorgerufen, die das Fluid aus der Pumpkammer durch die Düse drücken (siehe Abbildung 12). Wird die Spannung nun abgeschaltet, dehnt sich der Wandler wieder aus und der nötige Tropfenabriß findet statt. Durch Kapillarkräfte füllt sich die Pumpkammer erneut mit Fluid und ist für den nächsten Tropfenbildungszyklus bereit.

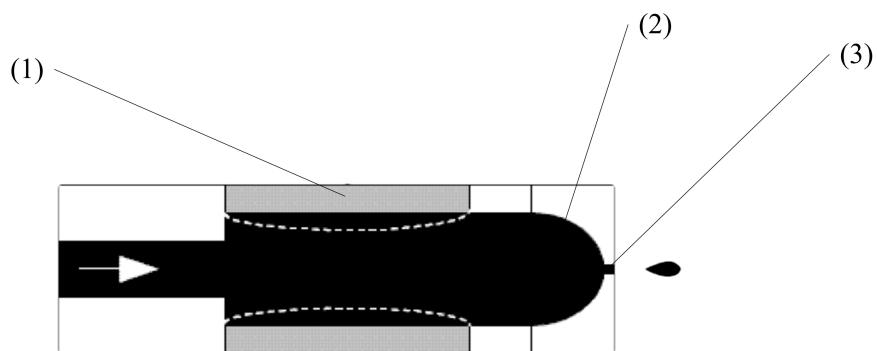


Abb. 12 Mikrotropfenerzeuger nach dem Rohrwandler-Prinzip im Schnitt: (1) Aktives Piezokeramikröhrchen; (2) Fluidefüllte Pumpkammer; (3) Düse (entnommen aus: Wijshoff 2008).

Ein Nachteil dieses Systems ist, dass die zu drückenden Fluide sehr begrenzt sind, da durch die große Oberfläche des Piezo-Rohr-Kanals eine große Wandreibung vorhanden ist. Hier-

durch sind nur niedrig viskose Fluide druckbar. Ebenso ist durch den direkten Kontakt des zu drückenden Fluids mit der Piezokeramik die Möglichkeit der Verwendung chemisch aggressiver Flüssigkeiten nicht möglich, da der Aktor durch diese angegriffen wird.

3.4.2 Paddelwandler

Bei einem Paddelwandler (Abbildung 13) liegt der Piezoaktor direkt in der Fluidkammer. Dieser ist nach dem Bimorphprinzip aufgebaut. Dieser Biegewandler gibt nun bei Ansteuerung eine darunter liegende Düse frei, welche in diesem Schritt mit Fluid gefüllt und umströmt wird. Nach Abschalten der Ansteuerspannung schnellt der Aktor nun wieder zurück auf seine Ursprungsposition und drückt das Fluid unter sich durch die Düse hindurch. Durch die plötzliche Unterbrechung des Fluidstromes durch das Aufschlagen des Aktors auf der Grundfläche reißt der gebildete Tropfen ab und löst sich von der Düse.

Wie in der Abbildung zu sehen, ist es auch möglich mehrere parallele Aufbauten solcher Wandler in einem Druckchip zu vereinen, um so eine höhere Auflösung oder Druckgeschwindigkeit zu realisieren.

Ebenso wie beim Rohrwandler ist der Nachteil eines Paddelwandlers, dass die Piezokeramik im Inneren der Pumpkammer liegt und so im direkten Kontakt mit dem Fluid steht. Auch hier ist zu beachten, dass chemisch aggressive Fluide zum Beispiel dem Aktor schaden, in dem sie die Piezokeramik oder die verbindende Klebschicht des Bimorph angreifen. Auch ist es nicht möglich Fluide mit einer Temperatur größer der Curietemperatur der Piezokeramik zu verwenden, da diese dann ihre vorgegebene Polarisation verlieren würde.

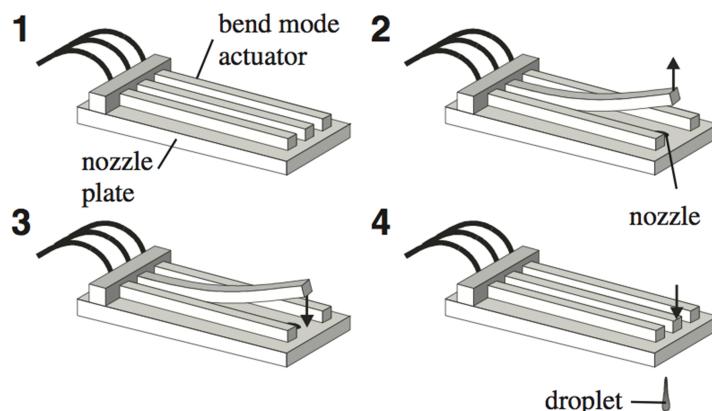


Abb. 13 Piezoaktuierter Paddelwandler: Der in der Pumpkammer liegende Aktor (1) biegt sich unter Ansteuerung und gibt so einen die Fluidströmung zur Düse frei (2). Nach Abschalten der Spannung schnellt der Aktor zurück auf seine Ausgangsposition (3) und drückt einen einzelnen Tropfen aus der Düse heraus (4) (entnommen aus: Seitz & Heinzl 2004).

3.4.3 Scherwandler

Das Scherwandlerprinzip ist das im kommerziellen Markt am weitesten verbreitete. So sind diese Wandler am häufigsten in Druckköpfen für den Endverbraucher zu finden. Bei dieser Art von Aktor wird der piezoelektrische Schereffekt ausgenutzt, welcher bei einem elektrischen Feld quer zur Polarisationsrichtung auftritt. Hierbei führt der Aktor eine Scherbewegung aus und wölbt sich dementsprechend. In einem solchen Druckkopf befinden sich parallel liegende Aktorpaare, welche die Seitenwände einer einzelnen Pumpkammer bilden. Bei Ansteuerung wölben sich diese nun nach außen, vergrößern so das Gesamtvolume der Pump-

kammer und drücken dann nach Polungswechsel der Ansteuerspannung durch eine Kontraktion der Pumpkammer einen Tropfen aus der an der Spitze liegenden Düse. Wie in Abbildung 14 zu sehen, liegen bei einem solchen Design viele Düsen nebeneinander, wobei zu beachten ist, dass nur jeder dritte Hohlraum zwischen zwei Aktoren als Pumpkammer genutzt wird, da die Aktoren Platz zum ausdehnen benötigen. Trotz dieser Limitierung werden bei einem solchen Druckchip sehr viele Düsen nebeneinander platziert. So gibt es Druckköpfe des Herstellers Xaar („Xaar 1001“), die bis zu 360 npi (nozzles per inch) besitzen (Xaar 2011).

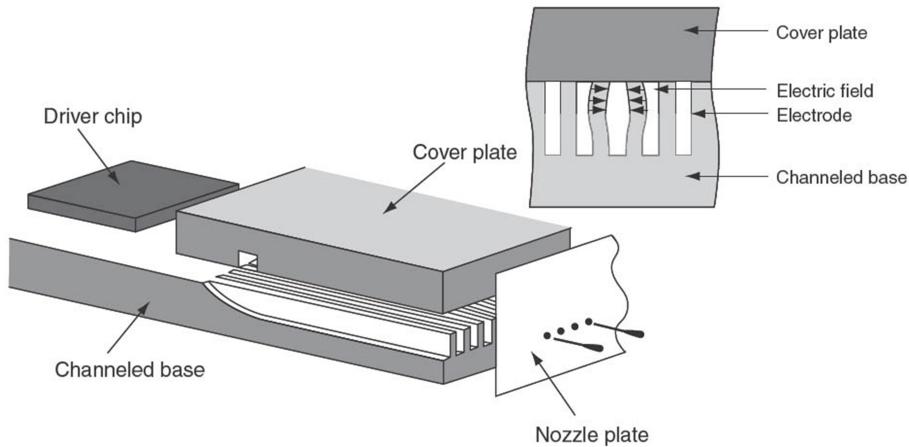


Abb. 14 Scherwandler-Prinzip (entnommen aus: Seitz & Heinzl 2004).

Auch hierbei ist der Nachteil, dass die Wahl des Fluids durch den Kontakt der Elektroden mit der Flüssigkeit eingeschränkt ist. Auch die Elektroden können durch chemisch reaktive Fluide angegriffen und mit der Zeit zerstört werden, wodurch ein Betrieb des Druckkopfes über längere Zeit unmöglich wird.

3.4.4 Membranwandler

Der Membranwandler ist gekennzeichnet durch eine Bimorphstruktur, die den Deckel für die fluidführende Pumpkammer bildet. Dieses Bimorph besteht zumeist aus einer passiven Membran aus einem chemisch resistenten Material, welche auf einen Piezoaktor aufgeklebt ist. Wird der Piezoaktor nun mit einem Spannungsfeld belegt verformt sich dieser unter dem piezoelektrischen Längs- und Quereffekt und biegt sich so zusammen mit der Membran. Die einzelnen Schritte des Tropfenbildungsprozesses sind in Abbildung 15 zu sehen. Wird zunächst eine negative Ansteuerspannung gewählt, so wölbt sich die auf der Pumpkammer liegende Membran nach außen und vergrößert so das Pumpkammervolumen. Eine weitere Menge Fluid strömt in die Pumpkammer ein. Nach einem Wechsel des Vorzeichens der Spannung wölbt sich die Membran nach innen und drückt so den Tropfen aus der Düse der Pumpkammer heraus. Durch das Abschalten des elektrischen Feldes springt die Membran wieder auf ihre Ausgangsposition zurück und ermöglicht die Bildung eines Tropfen durch den Abriss des Fluidstromes aus der Düse. Durch kapillarische Kräfte gelangt wieder Fluid in die Pumpkammer. Nach vollständiger Füllung ist diese wieder bereit für einen erneuten Tropfenbildungszyklus. Ein solcher Zyklus dauert circa 200 bis 400 μ s wodurch die maximale Tropfenbildungsfrequenz auf einen Bereich von 2,5 bis 5 kHz beschränkt ist (Elsner 2009).

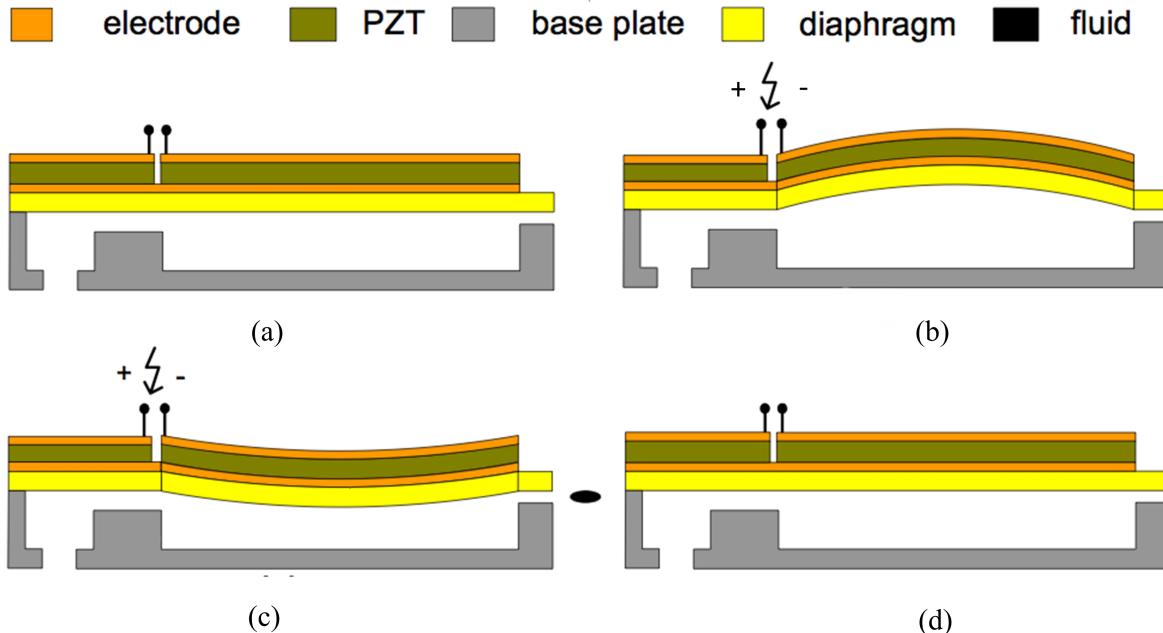


Abb. 15 Prinzip eines Membranwandlers: Vor der Ansteuerung befindet sich der Aktor in Ruhelage (a). Wird eine zunächst negative Ansteuerspannung auf den Aktor gegeben, so wölbt sich dieser nach außen (b). Nach einem Polaritätswechsel biegt sich der bimorphe Aufbau nach innen und stößt so einen Tropfen aus (c). Nach Abschalten der Ansteuerspannung befindet sich der Aktor wieder in Ruhelage und ist für einen nächsten Zyklus bereit (d) (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).

Ein erheblicher Vorteil dieses Systems ist die chemische Resistenz durch die Trennung der Aktormaterialien (Piezokeramik und Elektroden) von der Flüssigkeit durch eine Membran. Hierdurch ist es möglich bei geeigneter Wahl des Materials der Pumpkammer (Silizium) chemisch aggressive Flüssigkeiten, wie beispielsweise Säuren, Lösungsmittel und Bindemittel zu verwenden. Auch Flüssigkeiten, die mit einer Temperatur gedruckt werden, welche höher als die Curietemperatur der verwendeten Piezokeramik ist, sind durch Wahl einer ausreichend dicken Membran zu verwenden. Hierbei bildet sich über die Dicke der Membran ein Temperaturgradient aus, durch den an der Kontaktstelle zwischen Membran und Piezoaktor eine niedrigere Temperatur herrscht. Nachteil ist hierbei, dass durch die Verwendung einer Membran die Aktuierfähigkeit in Form des ausführbaren Hubs der Piezokeramik eingeschränkt wird. Je dicker die Membran ist, desto steifer ist der Bimorphverbund. Dies zeigt sich in einer niedrigeren Tropfengeschwindigkeit (Eiler 2012).

3.5 Ansteuerungsprinzipien

Weltweit wird an der Verwendung und Weiterentwicklung piezoelektrisch getriebener Membrandruckköpfe geforscht. Viele internationale Forschergruppen arbeiten an der Verwendung und Ansteuerung solcher Druckköpfe. Dabei gibt es vereinzelt Unterschiede in den verwendeten Druckkopfmodellen, jedoch ist das Grundprinzip allen gemein, wodurch ein Vergleich der Ansätze im Bezug auf die Ansteuerung möglich ist.

Die Ansteuerung eines Druckkopfes erfolgt auf verschiedene Arten. In der aktuellen Forschung werden sowohl monopolare als auch bipolare Ansteuer-Impulse benutzt. Unter einer monopolaren Ansteuerung versteht man einen Spannungsverlauf, welcher einseitig der Null-Linie (siehe Abbildung 16 (a)) verläuft. Die bipolare Anregung (Abbildung 16 (b)) sieht einen

Wechsel im Vorzeichen der Ansteuerspannung nach einer gewissen Zeit vor. Auch ist es möglich eine Folge von Pulsen abzugeben, die den Tropfenbildungsprozess beeinflussen. Bei der Manipulation zeigt sich, dass eine Berücksichtigung der akustischen und elektrodynamischen Eigenschaften des Druckkopfes durchaus wichtig sind.

3.5.1 Einzelter monopolarer Impuls

Die Ansteuerung mittels eines trapezoidalen Impulses bietet eine Möglichkeit auf die Charakteristik eines Druckkopfes, wie beispielsweise die Trägheit der Membran, einzugehen. Bei dieser Form sind drei Zeiten festgelegt, die den Impuls beschreiben. Dieser besteht aus der Rise-Time, also der Zeit bis die Ansteuerung vom Null-Niveau bis zu maximalen Spannung erhöht wird, der Dwell-Time, welche die Haltezeit der Maximalspannung beschreibt und der Fall-Time, in welcher die Spannung wieder zurück auf das Nullniveau fällt. Durch Anpassen dieser Zeiten werden die Tropfeneigenschaften (Volumen, Geschwindigkeit) direkt beeinflusst (Wijshoff 2008).

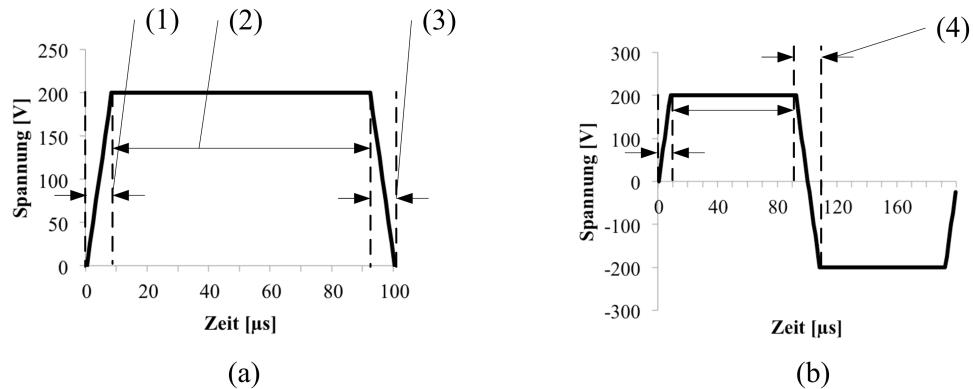


Abb. 16 Monopolarer (a) und bipolarer (b) Impuls im Vergleich. Bei dem monopolaren Impuls sind drei Teilzeiten zu unterscheiden: (1) Steigzeit; (2) Haltezeit; (3) Fallzeit. Bei dem bipolaren Impuls werden dieselben Zeitabschnitte der Polungssphasen (negativ und positiv) und deren Abstand unterschieden (4).

3.5.2 Doppelte monopolare Anregung

Die Anregung durch zwei aufeinander folgende Impulse gleicher Polarität ist eine weitere Möglichkeit der monopolaren Ansteuerung. Gezeigt ist ein Schema des Ansteuerungsimpulses in Abbildung 17. Die Idee dahinter ist, dass der erste Puls einen Fluid-Strahl aus der Düse drückt und der zweite, darauf folgende Puls einen Abriss der Fluid-Säule ermöglicht, um so einen einzelnen Tropfen zu erhalten. Hierbei wird eine genaue Zeit definiert in der der Fluidstrahl aus der Düse austritt bevor er abreißt und den Tropfen formt. Hierdurch ist es möglich größere Variationen an Tropfengrößen zu realisieren als bei der Anregung mittels eines einzelnen Impulses (Lee 2002).

3.5.3 Bipolarer Impuls

Bei einer bipolaren Ansteuerung wechselt nach dem Abfall der ersten Flanke das Vorzeichen der Ansteuerspannung und eine negative Spannung wird auf den Aktor übertragen. Diese negative Anregung bewirkt eine erneute Beschleunigung in die Gegenrichtung. Zu unterscheiden ist bei der bipolaren Ansteuerung die Zeit zwischen den beiden gegensätzlichen Ansteuerimpulsen, welche zu verschiedenen Zwecken genutzt werden können. So kann mit zwei direkt

aufeinander folgenden Pulsen („Fill-Before-Fire-Action“) eine größere Schwingungsamplitude erreicht werden, durch die das Tropfenvolumen moduliert wird. Eine weitere Möglichkeit einen zweiten Impuls zu nutzen, ist der Zweck der Dämpfung (dargestellt in Abbildung 18) der verbleibenden Schwingungen des Meniskus nach der Anregung, durch welche der Tropfenbildungsprozess konsekutiver Ausstöße negativ (beispielsweise ungewollte Satellitentropfenbildung) beeinflusst wird. Hierbei ist darauf zu achten die akustischen Charakteristika der Pumpkammer zu berücksichtigen, da der Dämpfungsimpuls synchron mit dem Verlauf der Druckwelle in der Pumpkammer zu erfolgen um diese effektiv zu dämpfen. In diesem Fall ist die Zeit nach der eine Druckwelle wieder am Ausgangspunkt ist (2).

$$t_p = 2 \cdot \frac{L}{C} \quad (2)$$

Wobei t_p die Wartezeit zwischen den beiden Pulsen, L die Länge der Pumpkammer und C die Schallgeschwindigkeit im zu drückenden Fluid ist.

Ein Anwendungsfall dieser Art der Ansteuerung ist die Reduzierung der Bildung von Satellitentropfen, welche sich negativ auf das Druckergebnis auswirken (Wijschoff 2008).

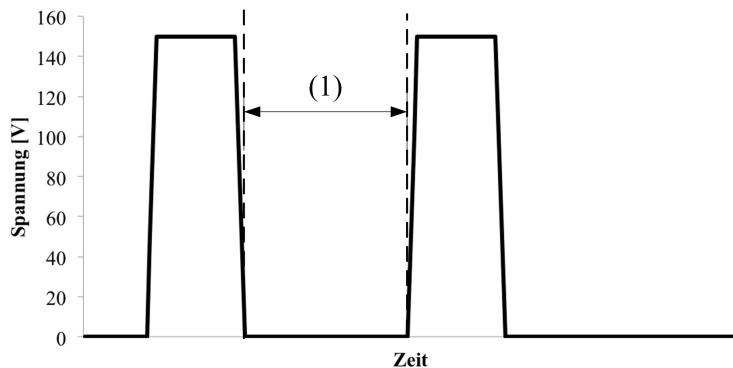


Abb. 17 Konsekutive Folge monopolarer Impulse. Zwei aufeinander abgestimmte Impulse folgen in einer gewissen Zeit (1) aufeinander. Ziel dieser Ansteuerung ist die Verbesserung des Tropfenabisses.

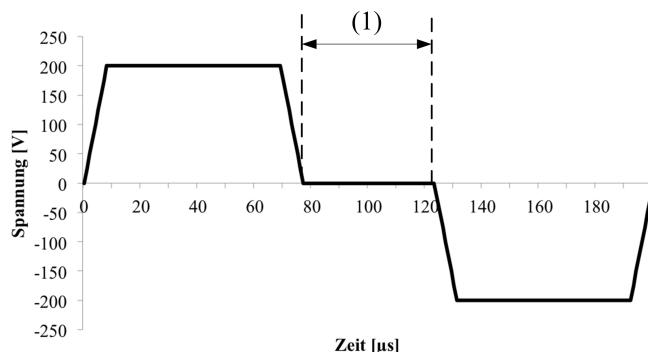


Abb. 18 Abfolge von zwei Impulsen unterschiedlicher Polung. Der zeitliche Abstand zwischen den Impulsen (1) ist nach Formel (2) zu wählen um den Effekt der Dämpfung der residualen Membranschwingungen zu erreichen.

3.5.4 Bipolare Folge von Impulsen

Die Manipulation der Abfolge von Impulsen mit denen ein Mikrotropfenerzeuger angesteuert wird geht soweit, dass man eine bestimmte Abfolge von Impulsen und Wartezeiten moduliert, welche die Entstehung eines Tropfens mit einem Durchmesser kleiner der Düse erreicht. Eine mögliche Form eines solchen Impulses zusammen mit dem Ergebnis der Tropfenbildung ist in Abbildung 19 gegeben. Durch einen kurzzeitigen Rückzug des Meniskus und einem darauf folgenden erneuten Impulses wird ein im Zentrum der Düse liegender kleiner Tropfen ausgestoßen, wobei der Großteil der Flüssigkeit weiterhin in der Pumpkammer verbleibt. Hierbei ist es möglich eine Reduzierung der Tropfengröße im Vergleich zu einer Ansteuerung mittels eines bipolaren Impulses um den Faktor zwei zu erreichen (Chen 2002).

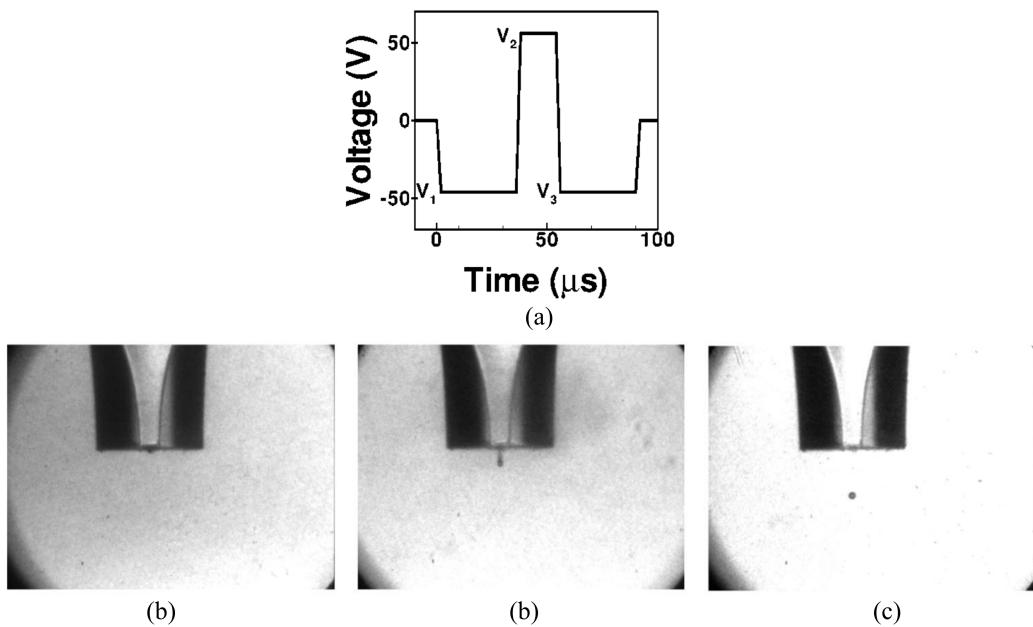


Abb. 19 Form und Auswirkungen einer speziell angepassten Impulsform: Die Impulsform ist ein dreiteiliges Konstrukt verschiedener Spannungen, welche nacheinander auf den Aktor gegeben werden (a). Es bildet sich eine Flüssigkeitssäule am Düsenaustritt (b). Durch den kurzzeitigen Vorschub des Meniskus entsteht ein kleinerer Tropfen in der Mitte der Düse (c). Der letzte Rückzug der Membran bewirkt eine Ablösung des kleinen Tropfens von der Düse (d) (entnommen aus: Chen 2002).

3.6 Stand am MiMed

3.6.1 Aufbau und Herstellung des Druckkopfes

Der am Lehrstuhl verwendete Druckkopf basiert auf dem Membran-Design. Kennzeichen dieses Druckkopfes ist es mit Mitteln des Rapid-Prototypings günstig hergestellt zu werden. Er besteht aus einer Silizium-Pumpkammer, welche im Laserlabor mit Hilfe eines Nd:YAG-Lasers gefertigt wird. Auf diese Pumpkammer wird anschließend eine 100 μm dicke Membran aus Pyrex-Glas mittels anodischem Bonden dauerhaft verbunden. Abschließend wird auf dieses Konstrukt der Aktor unter Zuhilfenahme eines in einer Semesterarbeit entstandenen Mikro-Montage-Platzes aufgebracht und mittels eines zwei Komponenten Klebers verklebt. Nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden sind so entstandene Druckköpfe fertig und einsatzbereit.

Der Druckkopf besteht aus drei Materialschichten. Diese sind in Abbildung 20 dargestellt. Der Tropfenerzeuger funktioniert nach dem Prinzip des Piezo-Jet-Prinzips mit einer Membran, die den Aktor vom Fluid trennt. Das Fluid strömt durch ein Zuführloch in die Fluidkammer und gelangt durch Kapillarkräfte über die Drossel in die drei auf einem Druckchip vorhandenen Pumpkammern. Sind diese gefüllt wird nun ein elektrischer Impuls auf die jeweilige Aktor-Zunge belegt, wodurch sich diese durch den piezoelektrischen Quereffekt senkrecht zur Oberfläche ausdehnt und den Längseffekt parallel zur Oberfläche staucht. Durch die starre Verbindung von passiver Membran und Aktor wölbt sich der bimorphe Aufbau nach innen und erzeugt so eine Volumenverkleinerung der Pumpkammer. Hierdurch wird ein Tropfen aus der Düse an der Spitze der Pumpkammer ausgestoßen. Nach Ende des elektrischen Impulses verliert der Aktor seine mechanische Spannung und die Pumpkammer besitzt wieder ihr ursprüngliches Volumen. Der letzte Schritt der Tropfenerzeugung ist die kapillare Wiederbefüllung der Pumpkammer nach dessen Abschluss ein erneuter Impuls einen weiteren Tropfenbildungsprozess einleitet.

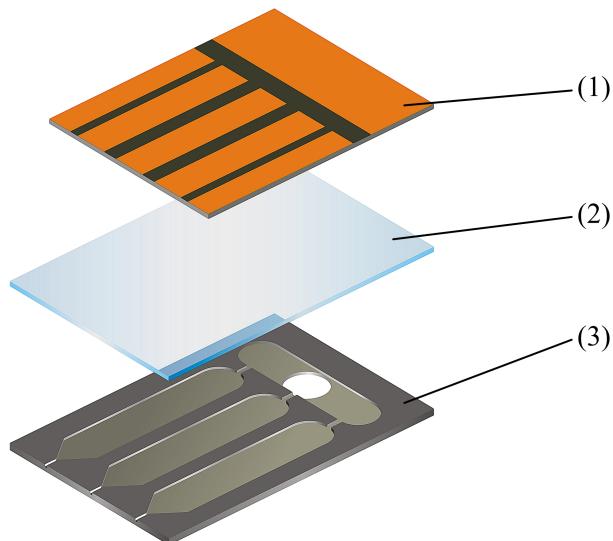


Abb. 20 Der am Lehrstuhl MiMed entwickelte Tropfenerzeuger: (1) Strukturierte Aktokera- mik; (2) Membran aus Pyrex; (3) Pumpkammerstrukturen auf Silizium.

Zur Herstellung der Pumpkammer wird zunächst ein 4“ Wafer mit einer Dicke von 525 µm mit Hilfe der Wafersäge geviertelt. Anschließend wird in ein solches Viertel mit Hilfe des Nd:YAG-Lasers die Struktur von 5 Druck-Chips gefräst. Der Laser ist ein LS2000 der Firma Laser-Systems und arbeitet mit einer Wellenlänge von 1064 nm, einer maximalen Leistung von 25 W, einer Pulslänge größer 100 ns, einer Pulsfrequenz von 10 kHz und einer Intensität von 1200 MW / cm³ (Kagerer *et al.* 2011).

Besteht die Notwendigkeit einer Veränderung der Pumpkammer-Geometrie so geschieht dies durch eine Aktualisierung in den CAD-Dateien für die Laserbearbeitung und ist sofort wirksam. Dieser Prozess dauert ca. 30 Minuten. Anschließend werden die für die Fertigstellung der Pumpkammer benötigten Düsen mit der Wafersäge in das Silizium geschnitten.

Nach der Glättung durch Läppen und anschließender Reinigung mittels eines Megaschallbades kann nun eine 100 µm dicke Schicht Pyrex Glas auf die Pumpkammer-Geometrie aufgebracht werden. Dies geschieht durch anodisches Bonden, durch welches eine feste Bindung auf atomarer Ebene zwischen dem Silizium und dem Borsilikatglas entsteht. Hierbei werden die gereinigten Komponenten auf einer Heizplatte auf 400 °C erhitzt und durch eine Punkt-

Elektrode mit einer Spannung von 800 - 1200 V belegt. Nach diesem Prozess ist ein fester Verbund aus dem Silizium-Chip und der Pyrex-Membran entstanden.

Gefolgt ist dieser Prozessschritt von dem Verkleben der Aktoren mit dem Silizium-Pyrex-Verbund. Damit dies möglich wird, ist der Aktor aber zuvor zu strukturieren.

Als Aktor-Material wird die Piezokeramik Vibrit 1876 der Firma Johnson Matthey verwendet, welche in Form einer Platte mit 47 x 25 mm Abmessungen gefertigt wird. Die Piezokeramik besitzt eine Dicke von 250 µm und ist auf Ober- und Unterseite mit einer Goldschicht bedampft, die als Elektrode dient. Nun wird die Piezokeramik mit Hilfe der Wafersäge zugeschnitten und in einem anschließenden Prozess mit dieser Strukturiert. Durch die Strukturierung der auf der Keramik liegenden Elektroden ist es möglich in einer einzelnen Ebenen Platte ein Konstrukt mehrerer Aktoren zu erzeugen, welche einzeln angesteuert werden. So besitzt ein einzelner Druckchip mehrere unterschiedlich ansteuerbare Pumpkammern, Düsen und Aktoren, wodurch die Druckgeschwindigkeit und damit die Produktivität erheblich gesteigert wird.

Ist der Aktor nun strukturiert wird er mit dem oben genannten Mikro-Montage-Platz exakt auf dem Silizium-Pyrex-Verbund platziert und mittels einer dünnen Klebschicht eines zwei-Komponenten-Epoxy-Klebers fixiert (Eiler 2011). Nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden werden die noch zusammenhängenden Druckchips mit Hilfe der Wafersäge vereinzelt. Insgesamt ist eine Herstellungszeit von ungefähr 30 Stunden realisierbar.

3.6.2 Vorteile des verwendeten Piezomembrandruckkopfes

Das Drop-On-Demand-Druckverfahren mit welchem der untersuchte Druckkopf arbeitet verfügt über einige Vorteile gegenüber anderen Druckverfahren. So ist es möglich mit diesem Druckverfahren nicht nur Fluide mit konstanter Phase zu drucken, sondern auch phasenübergangsbehaftete Fluide wie beispielsweise Wachs und Metalle. Dies wird durch die Verwendung eines beheizbaren Fluidreservoirs und einer Heizung an der Spitze des Druckkopfes ermöglicht. Mit solchen Stoffen ist es dann auch möglich in die dritte Dimension zu steigen und räumliche Modelle aus einzelnen Print-Dots aufzubauen.

Beim Druck von verschiedenen Fluiden kommt es vor, dass beispielweise chemisch kritische (Säuren) oder biologisch kritische (DNS) Materialien zu drucken sind. Hierbei ist es wichtig, dass sämtliche am Druckprozess beteiligte Komponenten chemisch und biologisch inert und resistent sind. Denken wir nun an das Bubblejet-Verfahren so fällt auf, dass die Erhitzung einer Flüssigkeit bereits zu einer ungewünschten Veränderung führt und das Ergebnis verfälscht. Der am Lehrstuhl entwickelte und untersuchte Druckkopf verwendet eine chemische resistente Pumpkammer aus Silizium, die mit einer resistenten Pyrex-Borsilikatglas Membran geschlossen ist. Dieser Aufbau erlaubt es auch saure Materialien gefahren- und einflussfrei zu drucken.

Ein weiterer am MiMed entwickelter Druckkopf erlaubt es Zinn mit einer Zuführungstemperatur von bis zu 350 °C zu drucken. Möglich wird dies durch einen 22 mm langen Pumpkanal, in welchem sich ein Temperaturgradient ausbildet. Durch diesen Abfall in der Fluidtemperatur ist die Temperatur an der aktiven Stelle des Piezo-Aktors so weit unterhalb seiner Curie-Temperatur, dass die für den Betrieb notwendige Polarisierung erhalten bleibt (Lemmermeyer 2006).

3.6.3 Ansteuerungsimpuls

Die Ansteuerung des am Lehrstuhl benutzten Druckkopfes erfolgt mittels eines monopolaren Rechtecksignals. Dieses besteht aus einer Flanke, die mit möglichst kurzer Anstiegszeit auf die volle Ansteuerspannung ansteigt und diese dann über einen gewissen Zeitraum hält, um die Membran nach innen zu wölben, die Flüssigkeit in der Pumpkammer zu beschleunigen und so den Prozess der Tropfengeneration zu starten.

Die Spannung fällt nach der Haltezeit (t_d) wieder auf das Nullniveau ab und die Membran schwingt nun im Zuge der vorgegangenen Beschleunigung eine gewisse Zeit nach. Nach Ausschwingen des Aktors wird nun ein erneuter Impuls gegeben, welcher einen Tropfenausstoß bewirkt.

Der Impuls besitzt eine Pulslänge von 100 μs und eine Frequenz im Bereich um 1 kHz. Technisch bedingt liegt die Anstiegszeit der ersten Flanke des Rechteckimpulses bei 5 ns. Durch die Trägheit der Membranmasse ist dies aber nicht weiter kritisch.

Generiert wird der Ansteuerungsimpuls von einem Signalgenerator. Dieser ist an einen elektrischen Verstärker angeschlossen, welcher das gegebene Signal um das 50-fache auf eine Spannung von 150 bis 250 V hebt. Diese Spannung ist nötig, um einen ausreichenden Hub in der Membran zu erzeugen, welcher einen Tropfenausstoß ermöglicht.

Der Takt wird am Tropfenbeobachtungsstand durch einen Computer gegeben. Hierfür steht eine in National Instruments LabVIEW entwickelte grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Der Computer triggert zusätzlich eine Stroboskoplampe, um so eine Beobachtung des Tropfenbildungsprozesses mittels eines Videomikroskops zu ermöglichen. Die Benutzeroberfläche erlaubt es dann die gemachten Bilder anzuzeigen, auszuwerten und zu drucken.

3.6.4 Bisherige Ergebnisse und Erfolge

In einer vorhergegangenen Diplomarbeit (Eiler 2012) wurde ein Druckkopfhalter entworfen und gebaut. Dessen Aufbau ist in Abbildung 21 zu sehen. Er besteht aus einer Aufnahme für den Druckkopf, einem beheizbaren Fluidreservoir und einer Kontaktiereinheit, welche einen schnellen Wechsel der Druckköpfe ermöglicht.

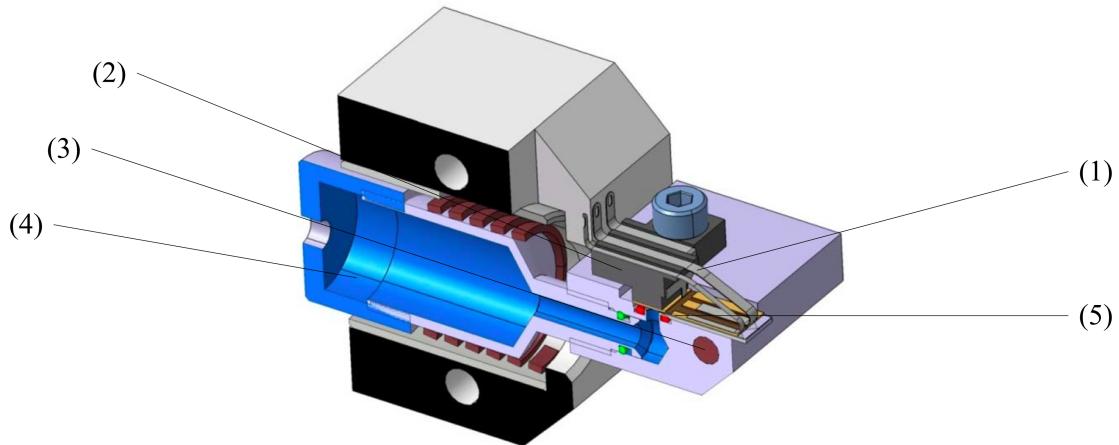


Abb. 21 Am Lehrstuhl entwickelte Aufnahmeverrichtung für Druckchips: (1) Kontaktiereinheit; (2) Befestigungseinheit; (3) Einschub für Heizelement; (4) Fluidzuführung; (5) Druckchip.

Unter den genannten Ansteuerungsparametern hat sich ein stabiler Tropfenbildungsprozess herausgestellt, welcher für Untersuchungen am Tropfenbeobachtungsstand ausreichend ist. Wie in Abbildung 22 zu sehen, formiert sich unter dem gegebenen Impuls ein Tropfen und wird von einem zweiten, sogenannten Satellitentropfen gefolgt.

Das primäre Druckmedium ist Iso-Propanol, welches sich durch seine niedrige Viskosität als versuchsgeeignet erwiesen hat. Auch wurden bereits Versuche durchgeführt bei denen phasenübergangsbehaftete Fluide wie Wachs mit Hilfe dieses Tropfenerzeugers gedruckt wurden.

Bei Messungen mit unterschiedlichen Spannungsamplituden des Ansteuerungsimpulses wurde im Bereich von 100 - 200 V ein linearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit ausgestoßener Tropfen und der angelegten Spannung festgestellt. Wie in Abbildung 23 weiterhin zu sehen ist, kommt es ab einer Ansteuerungsspannung über 200 V zu einem Einbruch der Tropfengeschwindigkeit. Dies ist darauf zu führen, dass ein unkontrollierter Eintritt von Luftbläschen in die Pumpkammer stattfindet. Zustande kommt dieses Phänomen durch einen zu schnellen Rückzug des Meniskus. Die in der Pumpkammer befindlichen Bläschen reduzieren nun den Druck, welcher nötig ist, um Tropfen mit einer gewissen Geschwindigkeit auszustoßen (Kagerer et al. 2011).

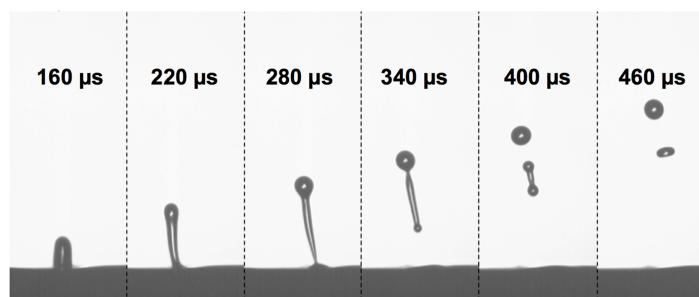


Abb. 22 Tropfenbildungsprozess mit dem am Lehrstuhl benutzten Druckkopf. In der letzten Sequenz (460 µs) ist ein gebildeter Satellitentropfen zu erkennen. Dieser beeinflusst das Druckbild und ist zu vermeiden (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).

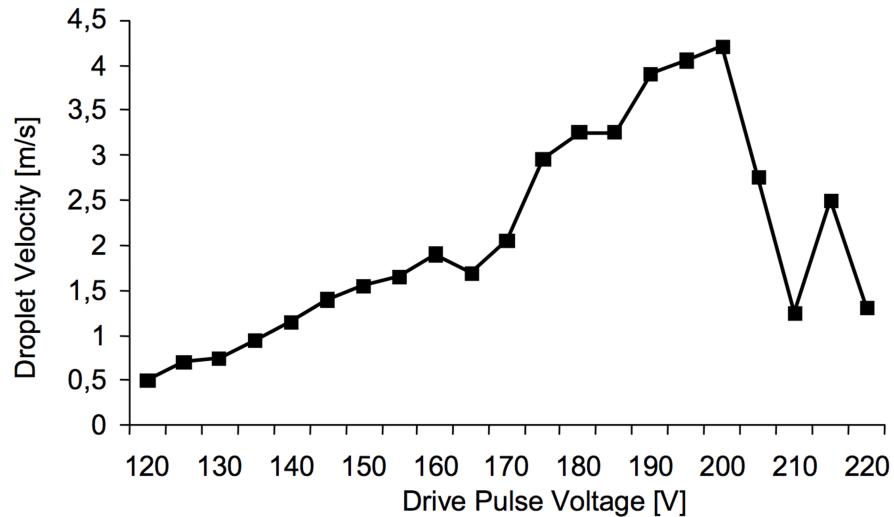


Abb. 23 Zusammenhang zwischen Ansteuerungsspannung und Tropfengeschwindigkeit. Wie in Kapitel 7 erläutert, ist die Geschwindigkeit des Tropfens linear abhängig von der Ansteuerungsspannung. Der Einbruch ab einer Spannung von 200 V entsteht durch eine unkontrolliert schnelle Bewegung der Membran (entnommen aus: Kagerer *et al.* 2011).

4 Kritik am Stand der Technik

In dieser Bachelorarbeit gilt es den am Lehrstuhl verwendeten Druckkopf und seinen Betriebsprozess zu beobachten und zu bewerten. Ein großer Nachteil des aktuellen Standes ist die Bildung von Satellitentropfen. Diese stören in erheblichem Maß die Erzeugung eines homogenen Druckbildes und sind daher weitestgehend zu vermeiden. Der ideale Tropfenbildungsprozess setzt sich neben der Druckkopf- und Aktorgeometrie und den stoffbezogenen Eigenschaften des Fluids auch durch das Zusammenspiel aus den elektrischen Größen zusammen. Durch die Aufgabenstellung haben sich drei Bereiche herauskristallisiert, die es im Bezug auf den Tropfenbildungsprozess zu verbessern gilt.

Um einen Tropfen aus dem Druckkopf heraus zu befördern wird der Aktor mit einem verstärkten Signal aus einem Funktionsgenerator angesteuert. Die Amplitude dieses Signals liegt zwischen 120 und 250 V. Innerhalb dieser Ober- und Untergrenze zeigt sich ein stabiler Tropfenbildungsprozess unter gelegentlicher Bildung von Satellitentropfen. Bisher ist die Form und Abfolge der Ansteuerungsimpulse auf einen monopolaren Impuls festgelegt. Dieser besitzt eine Rechteck-Form und eine Haltezeit der Maximalspannung von 100 µs. Durch diesen einseitigen Impuls führt auch die Membran des Druckkopfes nur eine einseitige, nach innen wölbende Bewegung aus. Dies schränkt die Bildung - gerade im Bezug auf die letzte Phase, den Abriss der Fluidsäule - eines einzelnen Tropfens ein.

Die Manipulation dieses Signals in eine sowohl zweiteilige, als auch bipolare Ansteuerung ist bisher nicht erprobt worden, da die am Lehrstuhl verfügbaren Geräte technisch nicht dazu in der Lage sind. Dies liegt daran, dass kein Signalverstärker vorhanden ist, welcher die zur Auslenkung des Piezoaktors notwendigen Spannungen (bis 250 V) in sowohl positiver als auch negativer Polung bereitstellt. Mit einem solchen Impuls wird die Peak-to-Peak-Spannung (Amplitude der Spannung) vergrößert und eine erweiterte Bewegung des Aktors ermöglicht.

Der Strukturierungsprozess des Aktors bezeichnet das Abtragen der auf der Piezokeramik aufgedampften Goldschicht. Hierbei entstehen einzelne Elektroden, die dann verdrahtet werden und durch Ansteuerung einen jeweils eigenen Aktor auf der Piezokeramik repräsentieren. Diese Aktorzungen besitzen in jedem bisher verwendeten und untersuchten Tropfenerzeuger eine feste Breite von 1,5 mm. Diese Breite hat sich für die darunterliegende Pumpkammerbreite von 2,0 mm als sinnvoll erwiesen und wurde unter dem Erhalt eines stabilen Tropfens nicht weiter verändert. Die Abtragtiefe des Dielektrikums zwischen den Elektroden wird bisher nicht verändert. Diese Einschnitttiefe besitzt einen festen Wert von 45 µm. Der Wert kommt dadurch zustande, dass die Piezokeramik im Auslieferungszustand eine Dicke von $250 \pm 25 \mu\text{m}$ hat. Somit besteht bei einem zu flach ausgeführten Einschnitt die Möglichkeit, dass an verschiedenen Stellen die Elektrode nicht vollkommen abgetragen wird und der Strukturierungsvorgang erneut durchzuführen ist. Durch empirische Untersuchungen hat sich der oben genannte Wert als zweckmäßig erwiesen. Diese Strukturierung ist allerdings nur eine elektrische Entkopplung durch eine Trennung der Elektroden auf der Oberseite. Nachteil ist, dass bei einem nur oberflächlichen Einschnitt sich weiterhin eine dicke Schicht ($\sim 200 \mu\text{m}$) nicht aktiven Piezomaterials zwischen den einzelnen Aktorzungen befindet. Je kleiner nun der Abstand zwischen den Elektroden ist, desto steifer ist die Verbindung der einzelnen Aktorstrukturen. Eine mechanische Entkopplung der Aktoren ist nur in begrenztem Maß vorhanden weshalb diese in ihrer Gesamtverschiebung eingeschränkt sind.

Der Aktor im untersuchten Druckkopf verhält sich elektrisch gesehen durch die Eigenschaften einer Piezokeramik wie ein Kondensator. Dieser wurde bisher noch nicht im Bezug auf seine Kapazität und die damit verbundene Energieaufnahme untersucht. Dies ist eine nicht zu unterschätzende Größe. Ein Vergleich aus der vom Aktor aufgenommenen Energie und seiner ausgeführten Arbeit wurde bisher nicht durchgeführt. Da es ein Ziel der Forschung ist, ein reproduzierbares Druckergebnis zu erhalten, ist eine Betrachtung dieser Werte erforderlich. Die aufgenommene Energie ist in Relation zu dem vom Aktor ausgeführten Hub zu setzen. Die Verformung des Aktors in Form des Hubs wurde am verwendeten Tropfenerzeuger noch nicht ausgemessen und bewertet. Ebenso wird die vom Tropfen aufgenommene und enthaltene Energie in Form von Oberflächen- und kinetischer Energie mit der eingetragenen elektrischen Energie verglichen und gibt so Aufschluss über das Arbeitsvermögen des Aktor.

5 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Ansätze einer Optimierung des Ansteuerungsprozesses des aktuell am Lehrstuhl verwendeten Tropfenerzeugers gefordert. Zunächst gilt es sich in den Herstellungsprozess des Tropfenerzeugers einzuarbeiten und sich mit den am Lehrstuhl verfügbaren Geräten wie Infrarot-Laser und Wafersäge vertraut zu machen. Es gilt einen Beobachtungsstand zur Messung des Hubs einzelner Aktoren aufzubauen, welcher auf der Verwendung eines Laservibrometers basiert.

Die auszuführenden Aufgaben erstrecken sich über:

- Herstellung von Piezomembrandruckköpfen nach dem aktuellen am Lehrstuhl praktizierten Prozessflow. Hierbei werden die Pumpkammerstrukturen mit einem Infrarot-Laser in eine Silizium-Basisplatte gebrannt. Anschließend erfolgt das Aufbringen der Membran aus Pyrex durch anodisches Bonden und wird durch das Aufkleben des Aktors auf den Verbund abgeschlossen.
- Strukturierung von Aktoren unterschiedlicher Elektrodenbreite und -tiefe mit Hilfe der am Lehrstuhl vorhandenen Wafersäge. Hierzu gilt es ein angepasstes Programm zur Strukturierung zu schreiben, welches je nach gewünschter Breite und Tiefe der Elektroden jeweils zwei gleiche Druckchips erstellt.
- Variation des Ansteuersignals in Spannung, Form und Länge. Ein Wechsel von dem momentan verwendeten monopolaren Rechteckimpuls hin zu einem bipolaren Impuls mit zwei Flanken ist unter Beobachtung und Rücksicht auf die Energieaufnahme des Aktors durchzuführen.
- Bewertung der vorgenommenen Variationen durch messen des Aktorhubs mittels eines Laservibrometers. Dabei ist der Messstand so zu gestalten, dass eine Messung verschiedener Punkte auf dem Aktor möglich wird um ein vollständiges Bild des durchgeführten Hubs des Aktors zu erhalten.

6 Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung

Die im Rahmen dieser Arbeit erwarteten Vorteile sind in drei Kategorien aufzuteilen. Da eine Vielzahl von Faktoren den Tropfenbildungsprozess beeinflussen ist es die Aufgabe in dieser Bachelorarbeit auf die zwei Aspekte der Energieaufnahme und der Ansteuerungsdynamik einzugehen. Hierbei werden die vorhandenen Werkzeuge, Geräte und Techniken weiter genutzt und optimiert.

Durch die Manipulation der Abmessungen der Zungen am Aktor und damit der Variation der aufnehmbaren Energie wird eine Verbesserung des Tropfenbildungsprozesses erwartet. Die Änderung der Kapazität des Aktors durch die Veränderung der Zungenbreite vergrößert die vom Aktor aufgenommene Energie. Hierbei wird erwartet, dass durch das Mehr an Energie auch eine höhere Energie dem Tropfen zugeführt wird. Dies wird sich durch einen größeren Hub und eine höhere Aktorgeschwindigkeit zeigen. Mit der zusätzlichen Variation der Einschneittiefe links und rechts der Elektroden werden weitere Vorteile erwartet. Durch den möglichst tiefreichenden Abtrag des passiven Piezomaterials und der damit verbundenen abnehmenden mechanischen Kopplung der einzelnen Aktorzungen, wird eine weitere Steigerung der Arbeitsfähigkeit in Form größeren Hubs unter gleicher bereitgestellter Energie erwartet. Auch wird eine schnellere Aktorbewegung durch die abnehmende Steifigkeit der Aktoren erwartet, welche zu einem verbesserten Tropfenabriss und damit zur Optimierung des gesamten Tropfenbildungsprozesses beiträgt.

Die Variation der Impulsform ermöglicht eine zuvor nicht genutzte Art der Ansteuerung und Verformung des Aktors. Untersuchungen anderer Forschergruppen haben bereits gezeigt, dass durch eine gezielte Veränderung des Impulses eine deutliche Verbesserung der ausgestoßenen Tropfen zu erreichen ist. Durch Verwendung eines bipolaren Impulses wird die Ansteuerungssamplitude um bis zu 15 % vergrößert (Wijshoff 2008). Beschränkt ist die Ansteuerung dann nur noch durch die physikalischen Grenzen der verwendeten Piezokeramik. Dadurch wird erwartet das verwendete Material bestmöglich auszureißen und dem Tropfenbildungsprozess die höchstmögliche Menge an Energie bereitzustellen. Die Maximierung der Ansteuerungssamplitude wirkt sich direkt auf den Hub des Aktors und damit auf den Tropfenbildungsprozess aus. Durch einen dem Hauptimpuls nachgeschalteten negativen Impuls wird die Membran nach Ausstoß einer Flüssigkeitssäule aus der Düse in die Gegenrichtung beschleunigt und ermöglicht so einen genauer definierten Tropfenabriss, welcher sich im Tropfenbildungsprozess in Form der Verminderung von Satellitentropfen widerspiegeln wird.

Die zuvor genannten Vorteile werden alle unter der Verwendung der auf den Aktor eingetragenen Energie evaluiert. So wird der Hub eines Aktors in Relation zu seiner ihm zugeschriebenen Ladung gesetzt. Nachgehend wird diese im Tropfenbildungsprozess beobachtet. Hierdurch wird ein weiterer Vorteil der Normierung erhofft. Bisher wurde die dem Aktor maximal zugeführte Spannung als Beschreibungsgröße der Ansteuerung benutzt. Durch den Wechsel auf die zugeführte Energie, wird erwartet eine weitreichendere Beschreibung der Ansteuerung zu erreichen, sodass diese auch bei verschiedenen Aktordesigns miteinander verglichen werden kann.

Zusammenfassend die erwarteten Vorteile:

Erweiterte Strukturierung:

Verbesserung: Variation der Elektrodenbreite- und Tiefe

- Vergrößerung /-kleinerung der Kapazität (*Farad*)
- Einschnitttiefe zwischen den Aktoren (μm)

Ergebnis: Eigenschaften des Aktors

- Variation der zugeführten Energie (*Joule*)
- Vergrößerung des Hubs (nm)

Ansteuerungsimpuls:

Verbesserung: Veränderung des Impulses

- Erhöhung der zugeführten Energie (*Joule*)
- Vergrößerung der Peak-Peak Spannungsdifferenz

Ergebnis: Eigenschaften des Tropfens

- Variation der Geschwindigkeit (m/s) und damit der kinetischen Energie (*Joule*)
- Veränderung der Tropfengröße und damit der Oberflächenenergie (*Joule*)
- Vergrößerung des Hubs (nm)
- Verbesserter Tropfenabriss

Untersuchung des Membranhubs:

Verbesserung: Messen des direkten Ansteuerungsergebnisses durch Laservibrometer

Ergebnis:

- Aufschluss über den Membranhub
- Aufschluss über Reaktionsgeschwindigkeit

7 Eigener Ansatz

Nach der Aufgabenstellung der Bachelorarbeit gilt es den Betriebsprozess des am Lehrstuhl entwickelten Mikrotropfenerzeugers zu charakterisieren und zu verbessern. Hierbei ist es wichtig strukturiert vorzugehen und im Vorhinein Überlegungen anzustellen, welche Probleme im Laufe der Untersuchungen auftreten.

Eine Analyse des zu untersuchenden Aktors im Bezug auf seine physikalischen Eigenschaften, welche das elektrische Verhalten und die mechanische Verformung beinhalten ist durchzuführen. Eine Vorabbetrachtung der möglichen Veränderung der Kennwerte ist wichtig um zu einem definierten Ergebnis zu gelangen. Hierzu werde ich im folgenden drei Aspekte anführen, welche in sich zu einem besseren Verständnis des Tropfenerzeugers beitragen werden.

7.1 Beschreibung der Kapazität eines Aktors

Wie in Abbildung 24, gezeigt verhält sich der Aktor als elektromechanisches Koppelsystem zwischen der Ansteuerung mittels eines elektrischen Feldes und dem Hub der Membran. Rein elektrisch betrachtet verhält sich der Aktor als Kondensator und wird dementsprechend unter Aufladung eines elektrischen Feldes auf seine Maximalkapazität aufgeladen. Die Maximalkapazität ist erreicht, wenn ein Aktor seinen maximal ausführbaren Hub, respektive seine maximale Kraft erreicht.

Die Vereinfachung der elektrischen Betrachtung der Piezokeramik als Kondensator ergibt sich aus dem quasistatischen Betrieb. Dies ist der Fall, wenn eine Ansteuerung weit unter der Resonanzfrequenz gewählt wird. Die Resonanzfrequenz des verwendeten Aktors liegt im Fall einer Elektrode mit einer Breite von 1,5 mm bei 7 kHz. Der Druckkopf wird in unserem Fall mit Frequenzen um 1 kHz betrieben. Daher ist die Näherung durch den quasistatischen Betrieb gegeben.

In diesem Fall verhält sich die Auslenkung einer Piezokeramik proportional zur gespeicherten elektrischen Ladung.

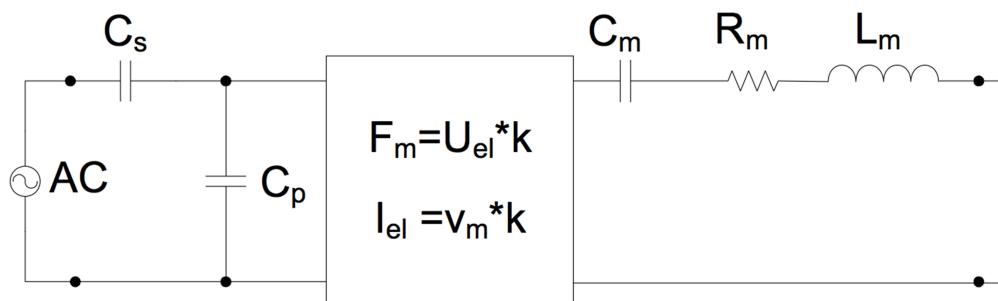


Abb. 24 Ersatzschaltbild Serienschaltung der Kondensatoren im Aktor und elektromechanisches Koppelsystem. Die Größen C_s und C_p repräsentieren die Basis-, bzw. Elektrodenkapazität. Die mechanische Kraft (F_m) und der elektrische Strom (I_{el}) stehen mit der applizierten Spannung (U_{el}), bzw. der Verformungsgeschwindigkeit (v_m) mit einem Koppelfaktor (k) in proportionaler Beziehung. Die Bewegung der Membran ist durch ein mechanisches Feder- (L_m), Masse- (C_m), Dämpfer-System (R_m) dargestellt (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).

Die Abmessungen zu den folgenden Gleichungen sind in Abbildung 25 eingetragen.

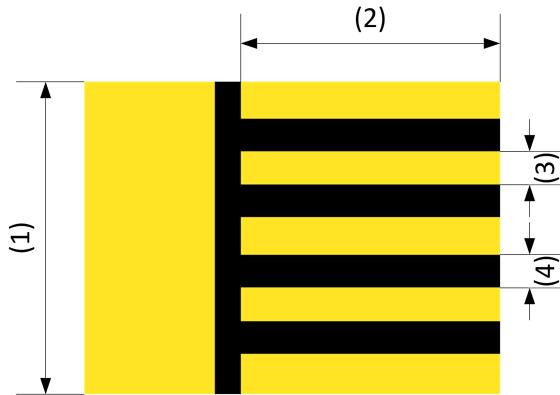


Abb. 25 Strukturierter Aktor mit eingetragenen Abmessungen: (1) Breite der Bodenelektrode (b_B); (2) Länge einer Zungenelektrode (l_Z); (3) Breite einer Elektrode (b_Z); (4) Breite des Dielektrikums an den Seiten der Elektroden.

Die Piezokeramik mit ihren strukturierten Elektroden ist als Platten-Kondensator zu betrachten. Dessen Kapazität wird allgemein durch die Gleichung (3).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (3)$$

angegeben. Bei bekannten Abmessungen (A : Fläche der Elektrode und d : Abstand der Elektroden) eines Kondensators und der relativen Permittivität des Dielektrikums ist also eine Berechnung der Kapazität möglich.

Der Piezoaktor des Druckkopfes besteht aus drei funktionalen Zungen-Elektroden und einer Basis-Elektrode, welche die Masse repräsentiert. Da die Piezokeramik zwischen den Goldelektroden als Dielektrikum wirkt bildet der Piezoaktor einen Kondensator.

Das elektrische Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 22) des Druckkopfes macht deutlich, dass es sich bei diesem um eine Serienschaltung zweier Plattenkondensatoren handelt. Diese entstehen zum einen durch die Trennung der Zungen und zum anderen durch die Trennung der Basis von der Bodenelektrode.

Die Zungenkapazität besteht aus dem Bereich der Piezokeramik, welcher sich zwischen einer einzelnen Zunge und der Bodenelektrode befindet. Diese Kapazität besteht nur aus der Fläche einer einzelnen Elektrode und berechnet sich dementsprechend zu (4).

$$C_Z = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{b_Z \cdot l_Z}{d} \quad (4)$$

Analog hierzu berechnet sich die Kapazität des Kondensators unter der Basis zu (5).

$$C_B = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{b_B \cdot l_B}{d} \quad (5)$$

Gemäß der Serienschaltung von Kapazitäten ergibt sich die Gesamtkapazität zu (6).

$$C_{ges} = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_Z} + \frac{1}{C_B}\right)} \quad (6)$$

Somit ist nun die Gesamtkapazität eines Piezoaktors formelmäßig bekannt. Geht man vom quasistatischen Betrieb aus, so zeigt sich, dass bei maximaler Auslenkung ein gewisser Betrag an Energie geflossen ist, welcher sich durch die Kapazität begrenzt. Die in einem Kondensator gespeicherte Energie W , welcher auf eine Spannung U aufgeladen wurde beträgt (7).

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_{ges} \cdot U^2 \quad (7)$$

Zur maximalen Auslenkung der Membran über der Pumpkammer ist es also notwendig, den Energiebetrag W über eine Ansteuerung auf den Aktor zu übertragen. Zur Übertragung dieser Energie auf den Aktor fließt ein gewisser Strom. Ist die Zeit der Dauer bis zur maximalen Auslenkung bekannt so berechnet sich dieser zu (8).

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (8)$$

Hierbei wird klar, dass um einen ausreichend schnellen Stellvorgang der Membran zu bewirken, die Leistung der Stromquelle die begrenzende Größe ist. Dies ist bei der Auswahl des Verstärkers zu beachten.

7.2 Mathematische Linearisierung einer Piezokeramik

Das Verformungsverhalten einer Piezokeramik wird durch ein lineares mathematisches Modell beschrieben werden. Diese Vereinfachung ist für den vorliegenden Fall zulässig, da die Membran des verwendeten Tropfenerzeugers keinem exakten Stellweg folgt.

Die gängige Bezeichnung der Raumrichtungen einer Piezokeramik sind die Achsen 1, 2 und 3, wobei 3 die Polarisationsrichtung beschreibt (siehe hierzu Abbildung 26).

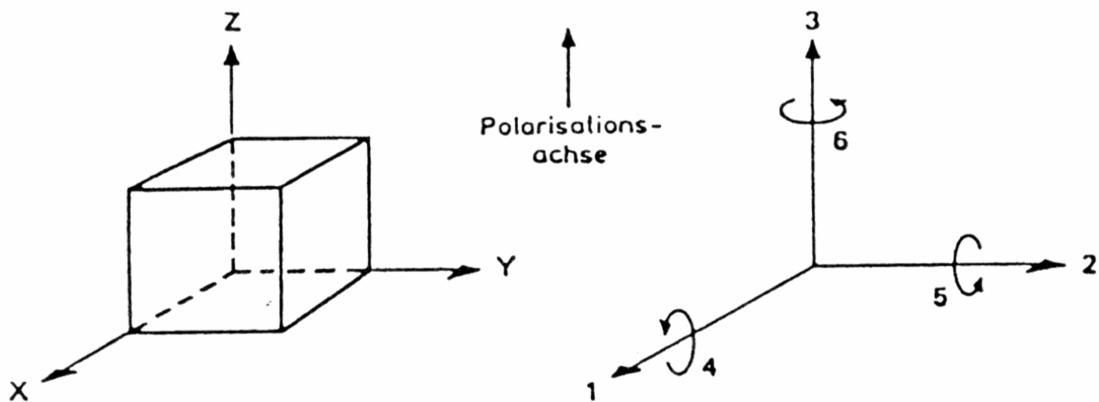


Abb. 26 Achsen in der Piezokeramik (entnommen aus: PI 2009).

Die Effekte der elektromechanischen Kopplung (Längs-, Quer- und Schereffekt) wurden in Kapitel 3 beschrieben. Diese können durch die nachstehenden Gleichungen beschrieben werden. Hierbei gibt ein tiefgestellter Index an, welche der Zustandsgrößen bei Ermittlung des Wertes konstant gehalten wird, ein hochgestellter Index t markiert eine transponierte Größe. Der Index i beschreibt die Richtung des wirkenden elektrischen Feldes und der Index j bezeichnet die Richtung der ausgeführten Verschiebung.

$$D = \varepsilon_T \cdot E + d_{ij} \cdot T \quad (9)$$

$$S = d_{ij}^t \cdot E + s_E \cdot T \quad (10)$$

$$D = \varepsilon_S \cdot E + e \cdot S \quad (11)$$

$$T = -e^t \cdot E + c_E \cdot S \quad (12)$$

Die Verwendeten Größen sind in Tabelle 1 erläutert

Tabelle 1: Physikalische Größen eines Piezoaktors (nach Günther 2008).

Bezeichnung	Symbol	Einheit
Dielektrische Verschiebung	D	C/m ²
Elektrische Feldstärke	E	V/m
Mechanische Spannung	T	N/m ²
Mechanische Dehnung	S	m/m
Elastizitätsmodul	c	N/m ²
Kehrwert des E-Moduls	s	m ² /N
Permeabilität	ε	F/m
Piezoelektrische Dehnung	d	C/N oder V/m
Piezoelektrische Spannung	e	C/m ² oder N/Vm

Nach diesen Gleichungen wird die Verformung des vorliegenden Aktors in seinen Richtungen vereinfacht beschrieben. Das elektrische Feld wirkt durch die Position der Elektroden stets in Polarisationsrichtung 3 auf den Aktor. Hierbei treten nur der Längs- und Quereffekt ein. Die Verformung des Aktors ohne Last berechnet sich zu (13) in der 3-Richtung.

$$\Delta l_3 = l_{3,0} \cdot E_3 \cdot d_{33} = l_{3,0} \cdot \frac{U}{d} \cdot d_{33} = U \cdot d_{33} \quad (13)$$

Die Größe $l_{3,0}$ beschreibt die Ausgangslänge des Piezos in 3 Richtung – also die Dicke d. Und zu (14) in 1-Richtung.

$$\Delta l_1 = l_{1,0} \cdot E_3 \cdot d_{31} = l_{1,0} \cdot \frac{U}{d} \cdot d_{31} \quad (14)$$

Die Aktorkenngrößen d_{31} und d_{33} sind dem Datenblatt zu entnehmen. Diese betragen im Fall der verwendeten Keramik Vibrit 1876 $d_{33} = 860 * 10^{-12} \text{ m/V}$ und $d_{31} = -385 * 10^{-12} \text{ m/V}$. Bei positiver Ansteuerung längt sich also der Aktor in 3-Richtung und verkürzt sich in 1-Richtung was sich in der Bimorph-Struktur (Aktor verklebt mit Pyrex) in einem Absenken der Membran in die Pumpkammer hinein zeigt.

Bei Veränderung der Breite der Piezoaktoren ist demnach zunächst keine direkte Veränderung des Hubs durch eine Vergrößerung der Aktuation zu erwarten. Die Dehnung in 3- und in 1-Richtung wird sich nicht verändern, da die Ausgangslänge in dieser Richtung die Dicke und die Länge der Keramik ist und konstant bleibt.

Wird nun der Parameter der Elektrodenbreite am Aktor variiert so ergibt sich eine Änderung in der Kapazität und damit auch in der maximal aufgenommenen Energie des Aktors. Dies liegt an der Breite der verformten Fläche. Die Membran hebt sich über die Breite der Elektrode. Wird diese nun vergrößert, so wächst auch die Basis der verformenden Fläche. Hierzu ist der höhere Energiebetrag notwendig. Ein Hub über eine größere Fläche bedeutet auch eine größere Ausdehnung über der Pumpkammer und eine größere Verdrängung des Volumens der Flüssigkeit (siehe Abschnitt 7.6).

Aus dieser Betrachtung ist zu schließen, dass eine Verbreiterung und der damit verbundenen erhöhten Energieaufnahme eine größere Energie dem gebildeten Tropfen zukommt, welche sich in Form von erhöhter Oberflächenenergie durch größere Tropfenvolumina widerspiegeln wird.

7.3 Mechanische Betrachtung der Deformation des Aktors

Der Aktor ist ein längliches Bimorph, das an beiden Seiten drehsteif gelagert ist. Eine analytische Berechnung der Verformung dieses Bimorphs unter der Ansteuerung ist in einem im Wesentlichen zweidimensionalen Modell zu berechnen. Die Grundlage hierfür ist die Literatur von Günther 2008. Zur Herleitung der verwendeten Gleichungen ist an den betreffenden Stellen hingewiesen. Auf Grund der Symmetrie ist die Membranstruktur als eine Kombination zweier Biegebalken zu sehen, welche sich unter einem Moment verformen. Abbildung 27 zeigt hierzu die vorgenommene Aufteilung des Balkens und die benutzen Abmessungen.

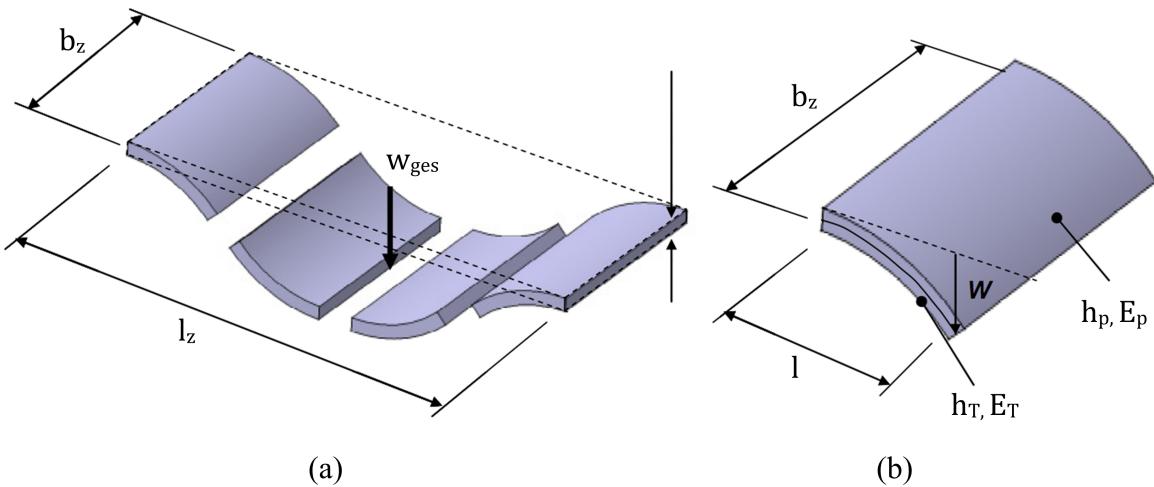


Abb. 27 3D-Struktur des Biegewandlers mit Abmessungen. Die Abmessungen entsprechen der Elektrodenbreite (b_z) und Länge (l_z) (vgl. hierzu Abb. 25). Die Größen der Piezo- und Trägerstruktur bezeichnen die jeweilige Höhe (h_p , h_T) bzw. den entsprechenden E-Modul (E_p , E_T) des Materials. Ebenfalls angegeben sind die Gesamtverschiebung (w_{ges}) und die Verschiebung (w) eines Elektrodenabschnitts der Länge l (entnommen aus: Günther 2008).

Die maximale Durchbiegung eines einzelnen Biegebalkens (siehe Abbildung 25) beschreibt (15).

$$w = \frac{l^2}{2EI} \cdot m \quad (15)$$

Hierbei ist w die maximale Durchbiegung, l die Länge des Balkens, m das Biegemoment und EI die Biegesteifigkeit des Balkens. Die zur Berechnung notwendige Biegesteifigkeit EI berechnet sich bei einer Bimorphstruktur aus Pyrex und Aktor nach (16) (Günther 2008).

$$EI_{ers} = \frac{b_z \cdot E_p \cdot h_p^3}{3} \cdot \left(1 + \left(\frac{h_T}{h_p} \right)^3 \cdot \frac{E_T}{E_p} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{h_T}{h_p} \right)^2 \cdot \frac{E_T}{E_p} \right)^2}{1 + \frac{h_T}{h_p} \cdot \frac{E_T}{E_p}} \right) \quad (16)$$

Hierbei beschreibt der erste Term das Flächenträgheitsmoment I und der zweite Term den kombinierten Elastizitätsmodul E . Um nun die Durchbiegung der Bimorphstruktur zu berechnen ist es notwendig, das durch den Piezoeffekt erzeugte Moment zu kennen. Um dieses zu berechnen, veranschaulichen wir uns das Entstehen des piezoelektrischen Moments am Beispiel zwei verklebter Piezostreifen. Diese werden gegensinnig mit einem elektrischen Feld angesteuert. Abbildung 28 zeigt eine schematische Darstellung Piezostreifen und deren Wirkrichtungen.

Nach Gleichung 14 längen oder verkürzen sich die Streifen um den Betrag (17).

$$\pm \Delta l = \pm E \cdot d_{31} \cdot l \quad (17)$$

Da die beiden Streifen miteinander verklebt sind und die Dehnungen unterdrückt ($S = 0$) werden entsteht im jeweiligen Streifen eine mechanische Spannung, welche der Blockierkraft T_1 entspricht (siehe Gleichung (10)) (18).

$$T_1 = E_3 \cdot \frac{d_{31}}{S_{11}} \quad (18)$$

An beiden Piezostreifen wirkt die Blockierkraft. An der Klebestelle ist der Hebel der angreifenden Kräfte Null, sodass sich der Verbund um diese Stelle biegt. Das resultierende Moment um diese neutrale Faser genannte Ebene ergibt nach (19).

$$m_{el0} = 2 \cdot \frac{h_p}{2} \cdot F_1 = h_p \cdot T_1 \cdot A_p = \frac{d_{31}}{S_{11}} \cdot E_3 \cdot b_z \cdot h_p^2 \quad (19)$$

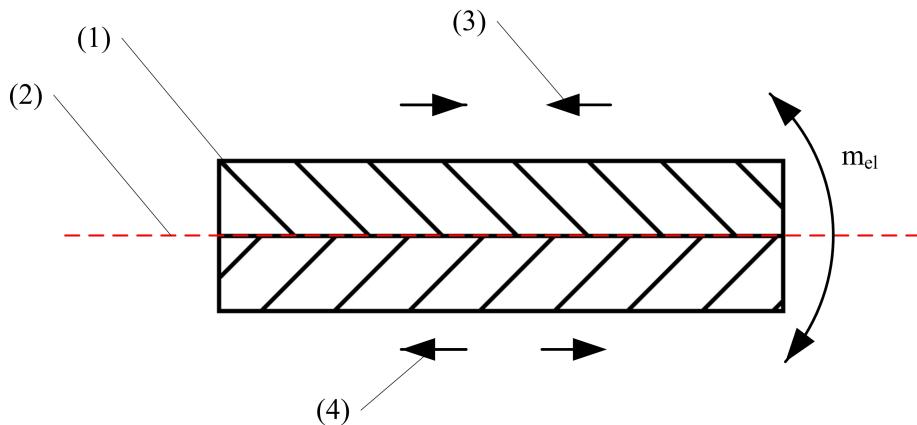


Abb. 28 Zwei miteinander verklebte Piezostreifen (1) werden mit gegensinnig gerichteten elektrischen Feldern angesteuert. Es ergeben sich die jeweiligen Wirkrichtungen (3) und (4) welche ein Moment m_{el} um die neutrale Faser (2) erzeugen.

Da es in unserem Fall nicht zwei aktive Streifen sind, sondern ein aktives Piezoelement auf einer passiven Membran ist, muss ein Korrekturfaktor angegeben werden (20) (Günther 2008).

$$f_m = \frac{\left(1 + \frac{h_T}{h_p}\right) \cdot \frac{h_T}{h_p} \cdot \frac{E_T}{E_p}}{2 \cdot \left(1 + \frac{h_T}{h_p} \cdot \frac{E_T}{E_p}\right)} \quad (20)$$

Mit diesem ergibt sich das korrigierte elektrische Moment m_{el} zu (21).

$$m_{el} = f_m \cdot m_{el0} \quad (21)$$

Durch die Aufteilung der Gesamtstruktur in 4 gleiche Streifen ergibt sich also zur Berechnung der gesamten Durchbiegung die Rücksichtnahme auf 4 wirkende Momente. Durch die Symmetrie der Struktur ist eine Vereinfachung auf zwei Streifen möglich. Dies bedeutet, dass das Maximum der Durchbiegung in der Mitte des Aktors erreicht wird. Bei dieser Aufteilung werden zwei wirkende Momente, das durch den Piezo auf den äußeren Streifen wirkende Moment m_{ela} und das auf den inneren Streifen wirkende Moment m_{eli} berücksichtigt. An der

Übergangsstelle der Balkenabschnitte beeinflussen diese sich. Das wirkende Schnittmoment wird als Reaktionsmoment m_R bezeichnet und wirkt in beiden Streifen der Verformung entgegen. Abbildung 29 zeigt das Wirken der Momente im zweigeteilten Biegewandler.

Durch den stetigen Übergang der beiden Biegestreifen gilt die Beziehung (22).

$$\varphi_a(l_a) = \varphi_i(l_i) \quad (22)$$

Der Winkel am freien Ende eines Biegebalkens, der mit den Momenten m_R und m_{el} belastet ist berechnet sich zu (23).

$$\varphi(l) = \frac{m_{el} - m_R}{EI} \cdot l \quad (23)$$

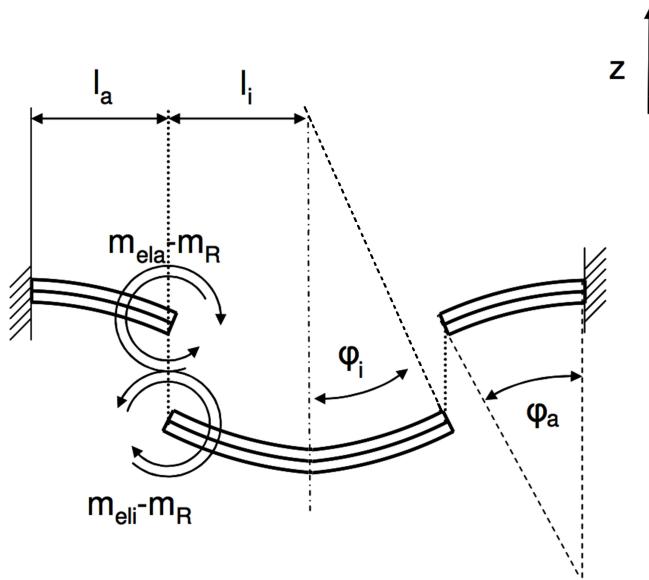


Abb. 29 Aufteilung des Balkens. Dargestellt sind die Teillängen l_a und l_i , die Verdrehwinkel am Ende der Balken φ_a und φ_i sowie die wirkenden Schnittmomente m_{ela} , m_{eli} , und m_R (nach: Günther 2008).

Da in diesem Fall der Balken in vier gleiche Teile geschnitten wird, ergibt sich für die Teillängen l_i und l_a jeweils eine Länge von $\frac{1}{4} l$. Auch sind die durch den Piezo erzeugten elektrischen Momente der gleichen Größe. Werden diese Größen nun in die Gleichungen (22) und (23) eingesetzt, so ergibt sich das wirkende Reaktionsmoment $m_R = 0$. Hierdurch ergibt sich nach einsetzen der Beziehung aus Gleichung (15) eine maximale Gesamtverschiebung der Membran in der Z-Achse (welche der 3-Richtung entspricht) zu (24).

$$w_{ges} = w_i + w_a = 2 \cdot \left(\frac{l}{4}\right)^2 \cdot \frac{m_{el}}{2EI} = \frac{l^2 \cdot m_{el}}{16EI} \quad (24)$$

Dies ist der theoretisch ausgeführte Hub des Aktors in der Mitte. Durch die Verbreiterung der Piezozungen vergrößert sich das entsprechende elektrische Moment nach Gleichung (19) proportional dazu. Jedoch vergrößert sich auch das Widerstandsmoment EI nach Gleichung (16) proportional zu Aktorbreite. Daraus folgt die Proportionalitätsbeziehung (25).

$$w_{ges} \sim \frac{l^2}{h_p} \quad (25)$$

Mit Hilfe dieser Betrachtungsweise ist also eine Vergrößerung des Hubs der Membran nicht zu erwarten.

7.4 Betrachtung der Wandsteifigkeit

Eine entscheidende Einflussgröße in der Maximalbewegung des Aktors stellt die Steifigkeit der Wand links und rechts der Elektroden dar. Das verwendete Modell bietet durch die analytische Betrachtung mittels des Balkenmodells keine Möglichkeit diese Wandsteifigkeit zu berechnen. Daher werden in den Versuchsreihen verschiedene Wandstärken getestet und ihr Einfluss auf die Verformung der Membran aufgezeichnet.

7.5 Energiebetrachtung der Ansteuerung

Die Ansteuerung des Piezos mit Hilfe eines Funktionsgenerators und eines Verstärkers ermöglicht die Energieübertragung in Form eines elektrischen Impulses. Diese Energie wird anhand der oben beschriebenen Prinzipien in mechanische Energie im Zuge einer Verformung umgewandelt und dient so dem Ausstoß eines Tropfens. Um die dem Aktor zugeführte Energie zu veranschaulichen, sind zunächst grundlegende Überlegungen zu stellen, wann und in welchen Beträgen Energie an den Aktor übergeben wird. Dies geschieht in Form eines Ladungstransfers auf die Piezokeramik.

Energie wird in der Einheit Joule gemessen, welche durch ihr Ausdrücken in den elektrischen SI-Einheiten bereits ein Gefühl der in diesem Fall wichtigen Größen vermittelt (26).

$$1J = 1W \cdot s = 1V \cdot A \cdot s \quad (26)$$

Also ist ein Joule die Energie die benötigt wird um bei einer Spannung von einem Volt einen Strom von einem Ampere für die Dauer von einer Sekunde fließen zu lassen.

Gehen wir nun von dem momentan verwendeten Impuls aus, welcher den Aktor mit einer Spannung von 200 V für einen Zeitraum von 100 μ s ansteuert. Fehlende Größe ist hier der Strom der fließt.

Über die durch die Abmessungen des Aktors gegebene Kapazität (siehe oben) wird die benötigte Energimenge berechnet, die in einem vollständig geladenen Piezo dieser Größe enthalten ist (27). Hierzu wird der aktuell verwendete Aktor mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm und einer Kapazität von 2,97 nF als Rechenbeispiel verwendet.

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,97 \text{ nF} \cdot (200 \text{ V})^2 = 59,4 \text{ } \mu\text{J} \quad (27)$$

Aus dieser Formel wird klar, welcher Energiebetrag für die volle Auslenkung der Membran benötigt wird. Nicht klar ist jedoch den Einfluss der kurzen Ansteuerungsdauer auf die Energieübertragung hat. Der in Abbildung 27 angegebene Verlauf überlagert die Ansteuerung des Aktors mittels eines Rechteckimpulses und des Hubs der Membran.

Wie in Abbildung 30 zu sehen, reagiert der Aktor prompt und folgt der Ansteuerspannung mit einer gewissen Verzögerung. Diese Verzögerung kommt einerseits durch den Innenwiderstand des Gesamtaufbaus und zum Anderen durch die Begrenzung des vom Verstärkers maximal zu leistenden Stroms. Die auf den Aktor übertragene Ladung ist das Integral des geflossenen Stroms über die Zeit.

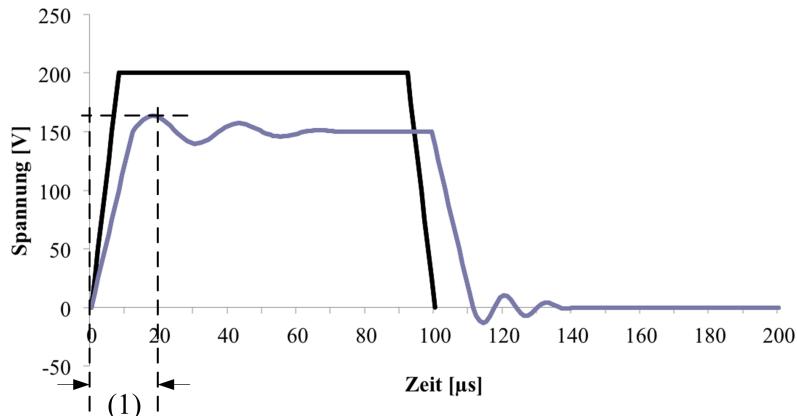


Abb. 30 Die schwarze Kurve stellt den Verlauf der Ansteuerspannung dar. Diese besitzt ihr Maximum bei 200 V. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Membranbewegung über die Zeit. Zu sehen ist, dass die Membran nach einer Zeit von $20 \mu s$ (1) ihre Maximalauslenkung erreicht und durch Zuge der Beschleunigung nachschwingt. Die Position wird während der Phase der Ansteuerung gehalten und geht nach Absinken der Spannung auf Null wieder zurück. Auch der Rückzug der Membran ist begleitet durch ein Nachschwingen bis diese in die Ausgangsposition zurückkehrt.

Damit ist der gesamt geflossene Strom über die Zeit die Ableitung der Änderung der Spannung über die Zeit multipliziert mit der Kapazität des Aktors. In unserem Beispiel benötigt der Aktor eine Zeit von $20 \mu s$ in denen er zu seiner vollen Auslenkung kommt. Nach Gleichung 7 ist also der geflossene Strom (28).

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} = 2,97 \text{ nF} \cdot \frac{200 \text{ V}}{20 \mu s} = 29,7 \text{ mA} \quad (28)$$

Der verwendete Verstärker hat also über den Ladevorgang eine durchschnittliche Leistung von $200 \text{ V} * 29,7 \text{ mA} = 59,4 \text{ W}$ zu leisten. Mit dieser Betrachtung wird deutlich, dass um den Ladevorgang des Membranaktors zu verstehen die Zeiten bis zur vollen Auslenkung zu berücksichtigen sind. Wichtig ist nicht die Zeit über welche der Aktor in Position gehalten wird. Ein Strom fließt nur während einer Positionsveränderung. Die Haltezeiten einer gewissen Spannung dienen dazu dem Fluid in der Pumpkammer die nötige Zeit zum Beschleunigen aus der Düse zu geben.

Eine Betrachtung der Verformungsgeschwindigkeit des Aktors gibt Aufschluss über die erreichbare Tropfengeschwindigkeit. Wird der Ladevorgang innerhalb einer gewissen Zeit t durchgeführt, so hat der Aktor in dieser Zeit den maximal erreichbaren Weg w_{ges} ausgeführt. Die Verformungsgeschwindigkeit kann nun zu (29)

$$v_{Aktor} = \frac{w_{ges}}{t} \quad (29)$$

angenommen werden. Durch die Bewegung des Aktors wird also das Fluid durch den entstehenden Druck aus der Düse gepresst. Die begrenzende Maximalgeschwindigkeit ist hierbei die Verformungsgeschwindigkeit des Aktors v_{Aktor} .

7.6 Verformung des Aktors – Bedeutung für die Volumenänderung in der Pumpkammer

Eine Modellierung der Veränderung des Pumpkammervolumens ist im Zuge dieser Arbeit unausweichlich. Hierbei wird durch vereinfachende Annahmen auf die erreichbare Tropfengröße geschlossen. Eine Darstellung des Form der Pumpkammer mit den verwendeten Größen ist in Abbildung 32 zu sehen.

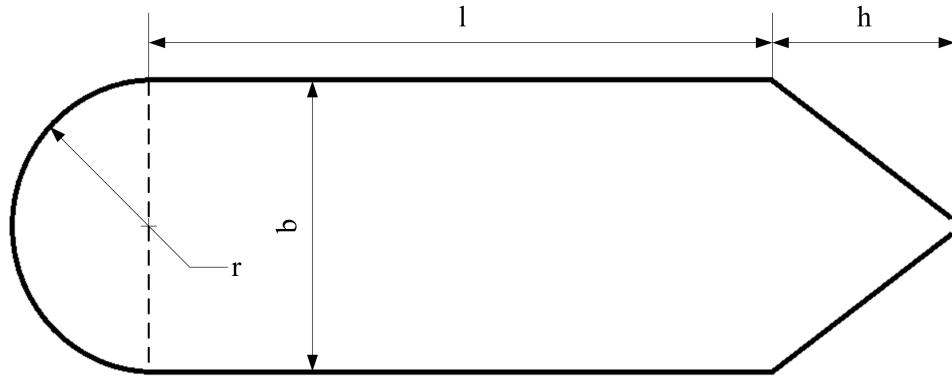


Abb. 31 Grundriss der Pumpkammer mit eingezeichneten Größen zur Berechnung der Grundfläche.

Zunächst ist das Ausgangsvolumen der vorliegenden Pumpkammer zu beschreiben, das aus drei Grundformen zusammengesetzt werden kann. Der hintere, der Drossel nahgelegene Teil besteht aus einem Halbkreis. Die Fläche lässt sich (mit bekanntem Radius $r=b/2$) berechnen zu (30).

$$O_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \quad (30)$$

Zudem kommt der rechteckförmige Hauptteil der Pumpkammer, welcher sich mit bekannten Abmessungen b und l berechnen lässt (31).

$$O_2 = b \cdot l \quad (31)$$

Zuletzt folgt die Spitze der Pumpkammer, welche als gleichseitiges Dreieck geformt ist und dessen Oberfläche (32)

$$O_3 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \quad (32)$$

ist. Zu beachten ist, dass der Düseneinschnitt an der Spitze des Dreiecks nicht abgezogen wird. Durch die relativ kleine Fläche ist der Einfluss zu vernachlässigen. Die Gesamtoberfläche bildet sich durch die Summe der drei beschriebenen Teilflächen und somit berechnet sich

das Grundvolumen der Pumpkammer bei unausgelenkter Membran zu (33), wobei t_p die Tiefe der Pumpkammer ist.

$$V_0 = (O_1 + O_2 + O_3) \cdot t_p \quad (33)$$

Senkt sich nun die Membran in die Pumpkammer herab kann die Volumenverdrängung mittels der Annäherung der Membranverdrängung durch ein Prisma von dreieckiger Grundfläche berechnet werden (Abbildung 32) (Günther 2008).

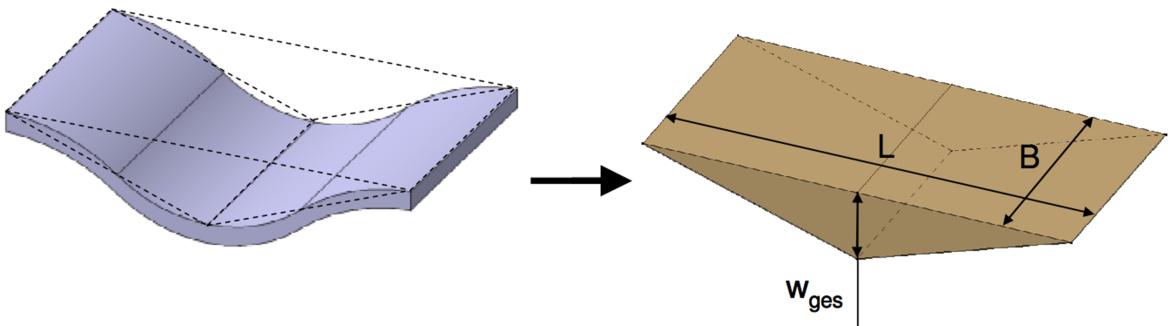


Abb. 32 Annäherung des durch die abgesenkten Membran verdrängten Volumens durch ein Prisma, die Größen L und B entsprechen der Elektrodenlänge (l_z) bzw. –breite (b_z) des Aktors (entnommen aus Günther 2008).

Das Volumen des Prismas berechnet sich zu (34).

$$V_{Prisma} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B \cdot w_{ges} \quad (34)$$

Mittels dieses Volumens kann die maximal erreichbare Tropfengröße abgeschätzt werden. Durch verschiedene Effekte (Rückfluss durch die Fluidzuführung) wird das maximal verdrängte Volumen jedoch nicht in Form eines Tropfens ausgestoßen werden.

Um die Veränderung der Tropfengröße bei Variation der Aktorparameter trotzdem einschätzen zu können kann das Verdrängungsvolumen übernommen werden (35).

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B \cdot w_{ges} \quad (35)$$

So ergibt sich die Proportionalitätsbeziehung für den Radius und den Aktor Parametern zu (36).

$$R^3 \sim \frac{1}{2} \cdot L \cdot B \cdot w_{ges} \quad (36)$$

7.7 Energiebetrachtung des Tropfen

Durch das Zusammenspiel der Pumpkammergeometrie und der Bewegung des Aktors entsteht letztendlich ein Tropfen. Die Beobachtung eines Solchen kann im Bezug auf seine Form und seine Geschwindigkeit erfolgen. Die Energie eines Tropfens zeigt sich in Form von Oberflächenspannung und kinetischer Energie. Die notwendige Energie zur Bildung eines Tropfens mit dem Durchmesser $d_{Tropfen}$ berechnet sich zu (37).

$$E_{Oberfläche} = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \sigma = \pi \cdot d^2 \cdot \sigma \quad (37)$$

Hierbei ist (σ) die fluidspezifische Oberflächenspannung. Die kinetische Energie eines Tropfens berechnet sich zudem durch (38).

$$E_{kinetisch} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (38)$$

Die Gesamtenergie zur Bildung eines Tropfens ergibt sich aus der Summe der zwei vorangegangenen Teilenergien.

7.8 Zusammenfassung der erwarteten Effekte

Durch die analytische Betrachtung der auf den Aktor wirkenden Effekte lassen sich die erwarteten Größenveränderungen zusammengefasst werden:

Variation der Spannung:

Der ausgeführte Hub des Aktors ist proportional zum ausübenden elektrischen Moment m_{el} . Dieses ist wiederum nach (19) proportional zu dem auf dem Aktor liegenden elektrischen Feldes. Da bei einem Aktor die Ladezeit t konstant bleibt erhöht sich die Geschwindigkeit der Aktorbewegung. Daraus ergibt sich die Proportionalitätsbeziehung (39).

$$v_{Aktor} \sim U_{max} \quad (39)$$

Variation der Wandstärke:

Durch das tiefere Einschneiden links und rechts der aktiven Elektroden wird der reale Aktor immer dem zuvor verwendeten analytischen Balkenmodell nähergebracht. Hiermit wird also erwartet, dass mit abnehmender Wandstärke der Hub wächst und dem berechneten Maximalwert annähert.

Vergrößerung des Tropfenvolumens durch Verbreiterung der Elektrodenbreite:

Da die Verbreiterung der Elektroden mit einer Vergrößerung des verdrängten Volumens in der Pumpkammer einhergeht wird die Tropfengröße dementsprechend größer werden (40).

$$V_{Tropfen} \sim b_z \quad (40)$$

8 Realisierung

8.1 Herstellung der Druckköpfe

Der wichtigste Manipulationsfaktor ist die Strukturierung des Aktors. Hierbei werden die bisher verwendeten Mechanismen soweit verändert, dass eine große Variation an Aktoren entsteht. Zur Strukturierung wird die Wafersäge „DAD 321“ von DISCO verwendet. Diese wird durch individuelle Schnitt-Programme gesteuert. Für die Strukturierung der Aktoren bestehen bereits Programme, welche aber in ihren Abmessungen und Abläufen auf die Herstellung von vier gleichartigen Aktoren auf einer Piezokeramik ausgelegt sind. Die Überlegung in dieser Bachelorarbeit ist es, nacheinander die Parameter der Herstellung zu variieren und dabei von jeder Aktorgeometrie, zwei gleichartige Chips zu erhalten um eventuellen Messfehlern vorzubeugen und ein Ersatzexemplar zu haben, wird das Andere zerstört.

Zunächst behandelt die Manipulation der Parameter die Breite der Aktorelektroden. Standardmäßig ist die Breite für den aktuellen Druckprozess bei 1,5 mm angesetzt. Diese wurde für die Untersuchungen zur Breite um 0,5 mm variiert. Tabelle 2 zeigt die Hauptabmessungen der gefertigten Druckköpfe mit Variation in der Elektrodenbreite. Veranschaulicht sind die Abmessungen in Abbildung 33.

Tabelle 2: Größen der hergestellten Aktoren.

Elektrodenbreite [mm]	1,0	1,5	2,0	2,5
Elektrodenabstand [mm]	2,0	1,5	1,0	0,5
Kapazität [nF]	2,12	2,97	3,12	4,37

Der nächste Schritt besteht nun darin nach der Manipulation der Schnittbreite die Schnitttiefe zu variieren und so eine möglichst weitgehende mechanische Entkopplung des Aktors von dem Rest der Piezokeramik zu erreichen. Um den Zusammenhang der Wandbreite und dem resultierenden Aktorhub zu erkennen werden nun Aktorenpaare hergestellt, welche bei gegebener Elektrodenbreite eine unterschiedliche Einschnitttiefe an den Seiten der Elektroden besitzen. Diese werden nun in 80 µm Schritten vertieft und getestet.

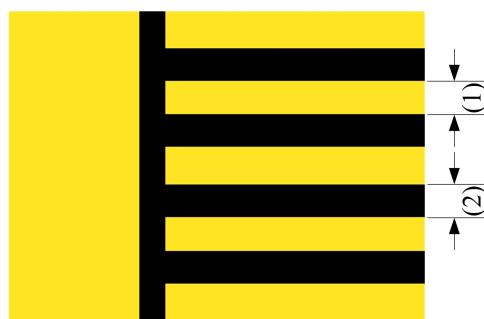


Abb. 33 Hauptabmessungen eines Aktors: Elektrodenbreite (1), Elektrodenabstand (2).

Hierbei ist zu beachten, dass die im jeweiligen Schnittprogramm eingestellte Tiefe von der tatsächlichen Tiefe abweicht (jeweils um 25 µm). Dieser Wert wurde in vorhergehenden Untersuchungen ermittelt und hat sich bei der Strukturierung der Aktoren als zweckmäßig erwiesen. Eine Erklärung für diesen Wert sind beispielsweise Abweichungen in der vom Hersteller angegebenen Dicke der Blaufolie. Da die Strukturierungsvorgänge gute Ergebnisse mit dieser Zugabe erzielten, wurde der Wert beibehalten.

Eine Besonderheit stellt die in der Tabelle 3 dargestellte letzte Spalte dar. Die Bezeichnung („260 µm Cut“) dieser Tiefe bezieht sich auf die spezielle Herstellungsart dieses Druckkopf-Designs. Hier wurden die Flächen der Elektroden nicht nach und nach abgetragen und flächig entfernt. Es wurden einzelne Einschnitte links- und rechts der Elektroden, vorgenommen um eine Trennung dieser vom Rest der Aktorfläche zu erreichen. Ein Vorteil dieser Herstellungsart ist eine Verkürzung der Dauer des Schnittvorgangs an der Wafersäge sowie eine höhere Genauigkeit in der Positionierung der Elektroden über den Pumpkammern.

Bei diesem Design wird der Aktor in seiner ursprünglichen Form auf die mit der Pumpkammer verbondeten Membran geklebt und dann mit der Wafersäge strukturiert. Hierbei kann die Positionierung der Wafersäge an die unten liegende Pumpkammer angepasst werden, so entstehen die Elektroden direkt über der Pumpkammer.

Tabelle 3: Einschnitttiefen der hergestellten Aktoren.

Einschnitttiefe [µm]	20	100	180	260	260 Cut
Eingestellte Tiefe [µm]	45	125	205	285	285
Wandstärke [µm]	240	160	80	0	0

Einstellungen der Wafersäge

Um die vorhergehend beschriebenen Änderungen in der Struktur der Aktoren zu erreichen, ist die Wafersäge, mit der die Bearbeitung durchgeführt wird mit einem Schnittablauf zu programmieren. Um eine Variation der Breite der Elektroden zu erreichen, wird das bestehende Schnittprogramm dahingehend verändert, dass die Anzahl der wiederholten Schnitte der Wafersäge zwischen den Elektroden vermindert (\rightarrow Verbreiterung der Elektroden) oder vergrößert wurde (\rightarrow Schmälerung der Elektroden). Zu beachten ist hierbei, welche Breite das verwendete Sägeblatt besitzt, um eine exakte Elektrodenbreite zu erhalten.

Da die Variation der Aktorgeometrie auch die Tiefe des abgetragenen Materials zwischen den Elektroden beinhaltet, ist der Auslauf des Sägeblattes zu beachten. In Abbildung 34 (a) ist die schematische Darstellung eines Sägeblattes gezeigt. Die eingetragenen Abmessungen bezeichnen den Radius des Sägeblattes (r), die Einschnitttiefe (t) und den benötigten Auslauf (a). In Abbildung 34 (b) sind die beschriebenen Größen noch einmal in einem rechtwinkligen Dreieck dargestellt um zu zeigen, dass nach dem Satz des Pythagoras Gleichung (40) den benötigten Auslauf a ergibt.

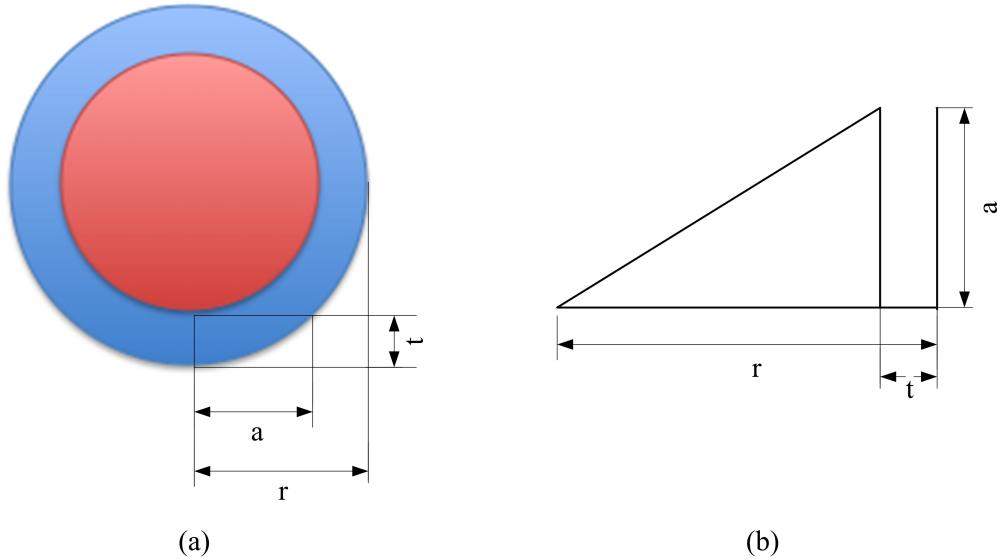


Abb. 34 Schematische Darstellung des Sägeblatts zur Verdeutlichung des Auslaufs. Hier steht t für die Einschnitttiefe und a für den benötigten Auslauf.

Bei tieferen Einschnitten ist also zu beachten, dass die Schnittlänge dementsprechend verkürzt wird. Der Auslauf berechnet sich nach (41).

$$a = \sqrt{2 \cdot r \cdot t - t^2} \quad (41)$$

Hierbei ist r der Radius des verwendeten Sägeblattes. In Tabelle 4 sind die entsprechend angepassten Schnittlängen der Wafersäge für die jeweilige Einschnitttiefe angegeben. Zu den Werten ist zu erklären, dass die Schnittlänge eine Zugabe von 1 mm erhält, da der Bereich zwischen den Elektroden und der Basiselektrode im weiteren Prozess ebenfalls abgetragen wird.

Tabelle 4: Angepasste Schnittlängen.

Einschnitttiefe [µm]	20	100	180	260
Elektrodenlänge [mm]	10			
Schnittlänge [mm]	9,95	8,65	7,84	7,21

Bei dem bereits angesprochenen Design „260 µm Cut“ musste ein speziell angepasstes Wafersägenprogramm geschrieben werden, da anstelle der kontinuierlichen Abtragung der Dielektrikumsfläche, einzelne Schnitte links und rechts der Elektroden durchgeführt werden. Hierzu wurde eine Exceltabelle erstellt welche die erforderlichen Schritte in der korrekten Reihenfolge und mit den dazugehörigen Werten darstellt und dann in der Wafersäge übernommen werden kann. Als Eingangsparameter zur Erstellung des Programms dienen die in Tabelle 5 aufgeführten Größen.

Tabelle 5: Eingangsparameter zur Erstellung des Wafersägenprogramms.

Parameter	Einheit	Erklärung (verwendete Werte)
Einschnitttiefe	µm	Einschnitttiefe des Dielektrikums (260)
Aktorbreite	mm	Breite eines Aktors (12)
Aktorlänge	mm	Länge eines Aktors (16)
Zungenbreite	mm	Zu strukturierende Breite der Elektrode (1,0; 1,5; 2,0; 2,5)
Zungenlänge	mm	Länge der Elektrode (10)
Randbreite	mm	Breite des verwendeten Randbereichs (1,5)
Sägeblattbreite	mm	Schnittbreite des verwendeten Sägeblattes (120)
Versatzbreite	µm	Versatzbreite zwischen Schnitten (bei flächigem Abtragen)
Absenkgeschwindigkeit	nm/s	Geschwindigkeit des Sägeblattes beim Absenken zum Schnitt (1000000)
Schnittgeschwindigkeit	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit des Materials beim Schneiden (1,5)
Blaufolienüberstand	µm	Restdicke der Blaufolie nach dem Schnitt (60)
Aktorhöhe	µm	Gemessene Aktorhöhe (250 ± 25)
Blaufoliendicke	µm	Herstellerangabe der Dicke der Blaufolie (130)

Beispielhaft zeigt Abbildung (35) ein Schnittprogramm für die Wafersäge welches mit der oben genannten Tabelle erstellt wurde. Die verwendeten Befehle und dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 6 verzeichnet. Das beschriebene Programm führt einen Strukturierungsvorgang mit einer Dauer von 6 Minuten und 10 Sekunden durch. Hierbei werden jeweils abgesetzte Schnitte durchgeführt, welche nacheinander vier gleichartige Aktores erzeugen.

Die Abbildungen 36 (a) bis (k) zeigen die hergestellten Einschnitttiefen von 20 bis 260 µm. Abbildung 37 zeigt das beschriebene „Cut“-Design. Hierbei sind jeweils zwei Druckköpfe nebeneinander dargestellt, welche im Teil (a) eine Elektrode mit einer Breite von 1,5 mm und in Teil (b) eine Elektrode mit einer Breite von 2,0 mm besitzen. Die entstandenen Bilder wurden mit dem am Lehrstuhl verfügbaren Raster-Elektronenmikroskop bei einer 30-fachen Vergrößerung erstellt.

Tabelle 6: Einschnitttiefen der hergestellten Aktoren ("-,; nicht genutzt).

Befehl	Ali_p	Idx_X / Idx_Y	Achop	Loop
Funktion	Verfährt die ausgewählte Achse an die Ursprungposition	Verfährt die X- / Y-Achse	Führt einen Schnitt entlang der X-Achse aus	Springt zu einer ausgewählten Stelle und wiederholt die Schritte
PARA_1	-	-	Absenkgeschwindigkeit in nm/s	Anzahl der Wiederholungen
PARA_2	-	-	-	Sprungpunkt im Programm
PARA_3	Achsenbezeichnung (X, Y, Theta)	-	-	-
HEIGHT	-	-	Höhe des ange setzten 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	-

	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	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	2,2000	R
3	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	1,5	0,0000	R
4	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	22,12	R
5	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	0,0	0,0000	R
6	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	-22,1200	R
7	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	1,6000	R
8	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	1,5	0,0000	R
9	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	22,1200	R
10	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	0,0	0,0000	R
11	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	-22,1200	R
12	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	1,4000	R
13	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	1,5	0,0000	R
14	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	22,1200	R
15	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	0,0	0,0000	R
16	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	-22,1200	R
17	Loop	2	7	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
18	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	1,6000	R
19	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	1,5	0,0000	R
20	Idx_X	0	0	0	0,0000	H	0,0	22,1200	R
21	Achop	1000000	7844433	0	0,7800	H	0,0	0,0000	R
22	Idx_X	2	2	0	0,0000	H	0,0	-22,1200	R
23	Idx_Y	0	0	0	0,0000	H	0,0	2,0600	R
24	Loop	2	2	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
25	End	2	2	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
26	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
27	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
28	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
29	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R
30	End	0	0	0	0,0000	H	0,0	0,0000	R

Abb. 35 Beispielprogramm für die Strukturierung eines Piezoaktors mit einer Einschnitttiefe von 260 µm mittels Einschnitten links und rechts der Elektroden und einer Elektrodenbreite von 1,5 mm.

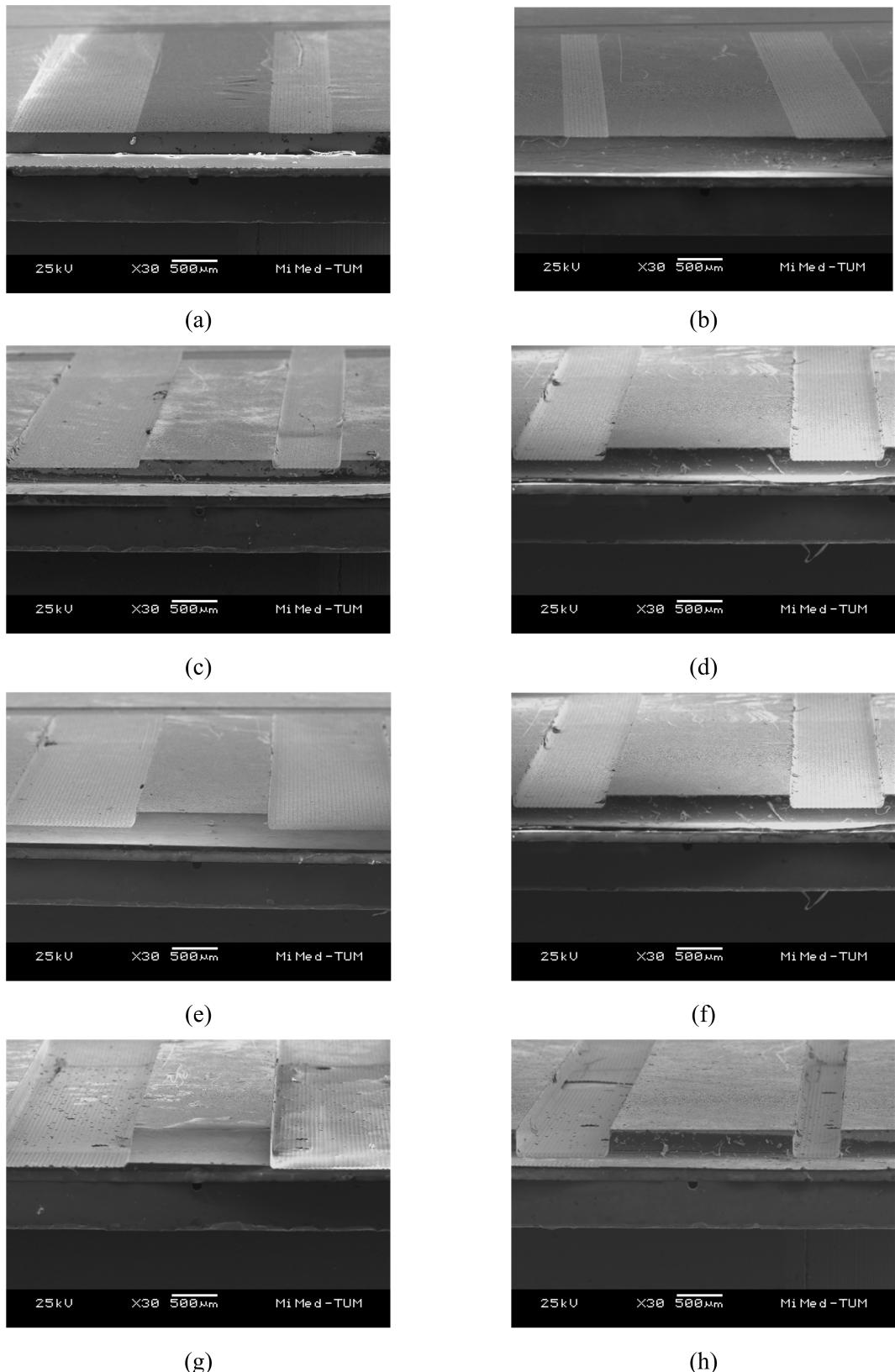


Abb. 36 Aufnahme des Raster-Elektronenmikroskops bei 30-facher Vergrößerung. Zu sehen sind unterschiedliche Einschnitttiefen. (a) und (b): 20 µm; (c), (d): 100 µm; (e), (f): 180 µm; (g), (h): 260 µm. In der linken Spalte sind jeweils Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm, in der rechten Spalte 2,0 mm dargestellt.

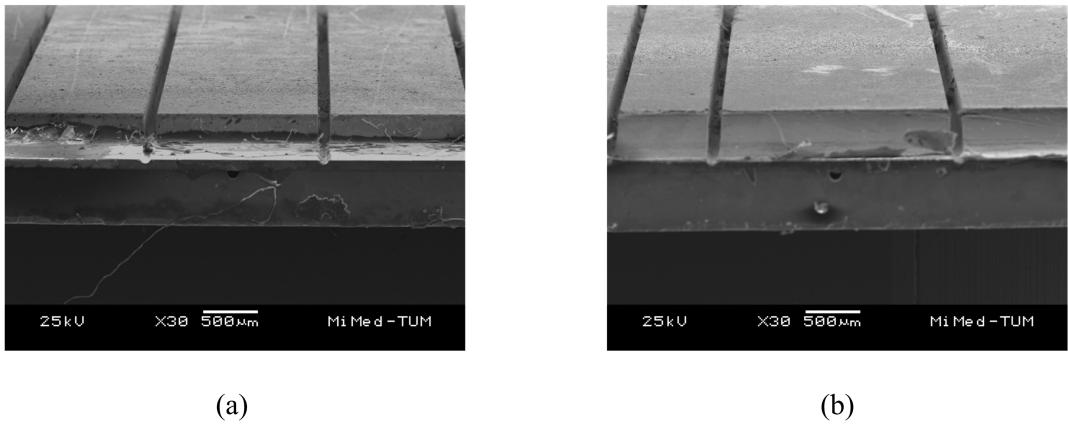


Abb. 37 Aufnahme des Raster-Elektronenmikroskops bei 30-facher Vergrößerung. Zu sehen sind zwei Aktoren, welche mit jeweils einem rechts- und linksseitig der Elektrode platzierten Schnitt gefertigt wurden. Teil (a) zeigt hier eine Elektrodenbreite von 1,5 mm und Teil (b) eine Breite von 2,0 mm. Die Einschnitttiefe beträgt bei beiden Modellen 260 μm .

8.2 Labor- und Geräteaufbau

Die Untersuchung der getroffenen Hypothesen findet am Lehrstuhl MiMed einem Versuchsaufbau statt. Zum einen gibt es das Hub-Messstation, in welcher unter bestimmter Ansteuerung der Hub des Piezos mittels eines Laservibrometers untersucht wird. Die genauen Aufbauten der Geräte und deren Funktionsweise wird im Folgenden erklärt.

8.2.1 Ansteuerungseinheit

Die Ansteuerung des Druckkopfes geschieht mittels eines Funktionsgenerators. Dieser stellt eine zuvor eingegebene Impulsform bereit und gibt damit die auszuführende Bewegung der Membran vor. Da dieser jedoch nur einen Ausgang von $\pm 5 \text{ V}$ erzeugt, ist es notwendig das ausgegebene Signal zu verstärken, um so die notwendige Spannung für den Tropfenbildungsvorgang bereitzustellen. Dies geschieht über einen Verstärker des Typs „PZD350a“ der Marke „Trek“. Dieser bietet folgende technische Daten (Trek 2012):

- Verstärkungsfaktor: 100
- Spannungsbereich des Ausgangs: $\pm 350 \text{ V}$
- Maximale Leistung: 70 Watt
- Minimale Anstiegszeit: $500 \text{ V}/\mu\text{s}$

Mittels eines Oszilloskops „waveRunner 6030A“ des Herstellers „LeCroy“, das an den Ausgang des Verstärkers und an den Signalausgang des Funktionsgenerators angeschlossen ist, wird stetig überprüft, dass der ausgegebene Impuls den Vorgaben entspricht. Der Druckkopf selbst ist direkt mit dem Ausgang des Verstärkers verbunden und erhält über diesen seine Energie.

8.2.2 Hub-Beobachtungsstand

Für die Hub-Messstation befindet sich im Erdgeschoss des Gebäudes ein schwingungsentkoppelter Tisch, da es auf Grund der hohen Empfindlichkeit der Geräte hohe Anforderung

gibt, um eine ausreichende Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten. Abbildung 38 zeigt den Gesamtaufbau der Versuchsanordnung.

Zu sehen ist der Messkopf des Laservibrometers, die Aufnahme und Kontaktierung für den Druckkopf, der Controller des Laservibrometers, der Aufbau zur Ansteuerung des Druckkopfes und das Oszilloskop zur Auswertung der Hubmessungen. An diesem Versuchsstand wird der Ansteuerungsimpuls über den im Signalgenerator vorhandenen Trigger ausgelöst. Dieser Ausgang ist mit dem Reset-Eingang des Laservibrometers verbunden womit die Beobachtungen ohne die Hilfe eines taktgebenden Computers möglich sind.

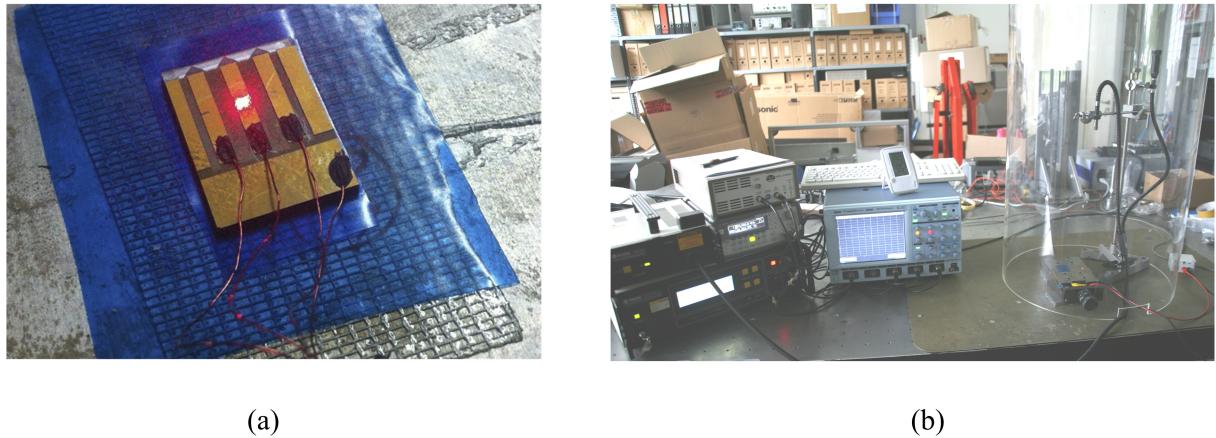


Abb. 38 Aktor im Experiment (a): Die Kontaktierung mittels WireGlue befindet sich an den Enden der Elektroden, der Messpunkt des Laservibrometers befindet sich in der Mitte der Elektrode; (b) der Gesamtaufbau der Messstation: Im linken Teil sind Laservibrometer, Funktionsgenerator und Verstärker angeordnet, in der Mitte befindet sich das Oszilloskop und auf der rechten Seite ist der Messkopf des Vibrometers, die Plattform zur Befestigung der Akto- ren sowie die Schutzhülle aus Plexiglas zu sehen.

8.2.3 Funktionsprinzip Laser-Vibrometer

Der Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Verschiebung der Membran des Aktors. Da diese im Mikrometer-Bereich liegt, eignet sich die Interferenz-Messtechnik um ausreichende Auflösungen in diesem Bereich zu erreichen. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch das berührungslose Messen keine Verfälschungen der Ergebnisse durch Krafteinwirkung entstehen. Im Folgenden wird das Prinzip eines Laser-Doppler-Interferometers (in Abbildung 39 zu sehen) vorgestellt.

Funktionstragender Teil dieser Technik ist ein Strahlteiler. Dieser teilt einen Laserstrahl bekannter Wellenlänge in zwei Strahlen auf, den Messstrahl und den Referenzstrahl. Der Referenzstrahl wird nun durch einen Spiegel reflektiert und gelangt unverändert auf den Detektor. Der Messstrahl hingegen trifft auf die Probe und wird wegen des durch Bewegung eintretenden Dopplereffekts in seiner Frequenz verändert und trifft so auf den Detektor. Über die von den beiden Strahlen gebildeten Interferenzen wird die Geschwindigkeit des reflektierenden Objekts berechnet. Dies ist eine dynamische Messmethode, nach der nur die Geschwindigkeit des Objekts gemessen wird. Durch die Integration über die Zeit wird die Information über den zurückgelegten Weg ermittelt.

Ein großer Vorteil dieses Messverfahrens bietet die hohe Unempfindlichkeit gegenüber der Probenoberfläche. Die Oberflächenrauhigkeit wird über den Messfleck integriert und somit eignet sich die Messmethode, um direkt auf der Oberfläche der Keramik zu messen.

Ein Nachteil des Systems ist der Drift der Integration auf Grund von Gleichanteilen im Geschwindigkeitssignal. Eine Korrekturmöglichkeit bietet hier ein periodisches Zurücksetzen des Integrators zum Beginn einer Ansteuerungskurve.

Das in diesem Fall verwendete Laser-Doppler-Interferometer ist ein Polytec OFV3001 mit einem OFV512 Messkopf. Diese Messeinheit bietet folgende Daten:

- Maximal erfassbare Geschwindigkeit: 1000 mm/s
- Minimal auflösbarer Hub: 10 nm
- Totzeit: 17 ms
- Wellenlänge des Messstrahls: 655 nm, rot, sichtbar

Um ein möglichst unverfälschtes Messergebnis zu erhalten und von äußeren Einflüssen unabhängig zu sein ist der Versuchsaufbau auf einer Granitplatte ausgeführt, welche über ein eigenes Fundament verfügt. Vorhergehende Tests in einer anderen Umgebung haben Ungenauigkeiten, die durch minimale Vibratoren durch beispielsweise eine einfahrende U-Bahn hervorgerufen wurden. Auch wurden weitere Störungen durch Luftbewegungen im Raum festgestellt. Diese werden durch das Schützen des Versuchsaufbaus mittels einer Plexiglas-Röhre minimiert.

Ausgewertet wird das Signal des Laservibrometers mit Hilfe des Oszilloskops, das den Messausgang aufnimmt und grafisch darstellt. An dieses ist auch der Messausgang des Verstärkers angeschlossen um einen Vergleich zwischen gegebenen Signal und ausgeführten Hub zu ermöglichen.

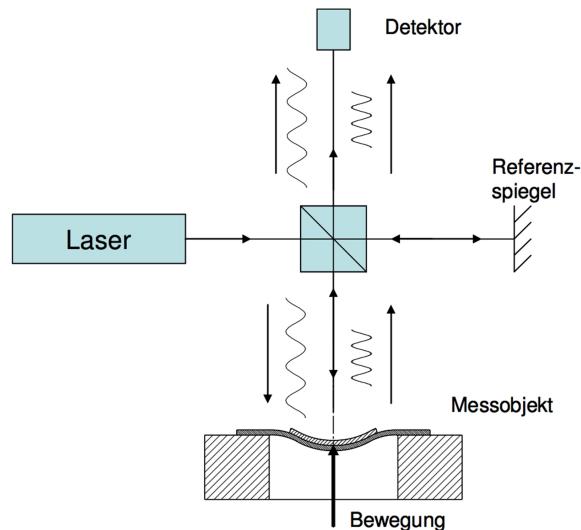


Abb. 39 Schematischer Strahlengang des Laserdopplerinterferometers (Entnommen aus: Günther 2008).

9 Experiment

9.1 Beschreibung des Experiments

Das Experiment besteht aus einer Reihe von Messungen, welche die den maximalen Hub der Membran und die Zeit bis zu derer maximalen Auslenkung behandeln. Hierbei durchläuft jede der drei auf den gefertigten Aktoren befindlichen Elektroden die nachgehend beschriebenen Messreihen. Die Ergebnisse werden durch im Oszilloskop integrierte Messfunktionen und einem Screenshot festgehalten und in einem Messprotokoll (siehe Anhang) vermerkt. Die zusammengetragenen Werte werden in eine Exceltabelle eingetragen. Es werden 32 Aktoren mit jeweils drei Elektroden untersucht. Da jede Geometrievariation zweimal vorhanden ist, wird das arithmetische Mittel der 6 untersuchten Elektroden berechnet.

Maximaler Hub:

Der gemessene Maximalhub wird im Fertigungsprotokoll in der Einheit mV, welche dem Ausgangssignal des Laservibrometers entspricht vermerkt. Durch die Umrechnung mittels der am Vibrometer eingestellten Skala wird der ausgeführte Hub in nm gewonnen.

Ladezeit:

Die Ladezeit bezeichnet die vergangene Zeit vom Beginn der Anregung bis zum Zeitpunkt des Maximalhubs. Da am Punkt des maximalen Hubs der Aktor seine maximale Energie aufgenommen hat kann über die Ladezeit auf den geflossenen Strom geschlossen werden.

9.2 Vorgehen

Der zu untersuchende Druckkopf wird auf einen verfahrbaren Tisch mittels doppelseitigem Klebeband befestigt. Die Kontaktierung der einzelnen Elektroden geschieht über dünne Lack-Drähte, welche mit Hilfe von „Wire-Glue“ leitend befestigt werden. Die Verbindungstechnik mittels Leitkleber wurde gewählt, um den Temperatureinfluss auf das Piezomaterial zu vermeiden. Durch das Aufsetzen eines Lötpunktes mit einer Temperatur von ca. 350 °C entsteht die Gefahr einer lokalen Depolarisation der Piezokeramik. Daher wurde entschieden dies zu umgehen und die temperaturneutrale Verbindung zu bevorzugen. Auch ist es möglich im späteren Arbeitsprozess die geklebten Drähte mit einem Messer abzulösen und verbleibende Rückstände mit Aceton abzuspülen. Durch die rückstandslose Entfernung der Kontaktierung sind die Druckköpfe noch weiter verwendbar um beispielsweise in der Tropfenbeobachtung eingesetzt zu werden.

Ein weiterer Grund für Nichtverwendung der vorhandenen Kontaktiereinheit ist die Notwendigkeit der freien Sicht auf die zu beobachtende Piezo-Zunge. Da mit einem optischen Verfahren gemessen wird, ist es notwendig, die volle Fläche der Zunge zur Reflexion des Messstrahls zu nutzen. Hierbei würden die auf dem Aktor liegenden Kontakte den Strahlengang behindern und eine Messung unmöglich machen. Auch wird in diesem Versuch keine Fluidzuführung benötigt, da die Beobachtung des Tropfenbildungsprozesses an anderer Stelle geschieht.

Die Dimensionen der zeitlichen Abläufe der Ansteuerungskurve sind nach ihrem Zweck und den vorliegenden Pumpkammerdimensionen zu wählen. Eine wichtige Rolle kommt hierbei

dem Effekt des verwendeten Impulses zu. Es werden zwei Impulsformen ausgewählt, welche sich in ihrer Form voneinander unterscheiden:

9.2.1 Einteiliger Impuls

Die erste verwendete Ansteuerung wird den momentan benutzten Impuls repräsentieren. Dieser besteht aus einem monopolaren Rechtecksignal mit einer Haltezeit von $100 \mu\text{s}$. Die Anstiegszeit ist hierbei minimal gewählt (5 ns). Der Verlauf der Spannung über die Zeit ist in Abbildung 40 zu sehen.

9.2.2 Zweiteiliger Impuls als fill-before-fire Action

Hierbei wird die Membran zunächst nach außen gewölbt wodurch das Pumpkammervolumen vergrößert wird und weitere Flüssigkeit einströmt. Nach einem Wechsel des Vorzeichens wird nun die Membran in die Pumpkammer gepresst und drückt einen Tropfen aus der Düse heraus. Der Tropfenabriss geschieht durch das Abschalten der Spannung und das Zurückkehren der Membran in ihre Ausgangsposition.

Die Steuerzeiten werden bei diesem Impuls ähnlich der Steuerzeiten des Ausgangsimpulses gewählt. Die Rückzugzeit des Meniskus wird auf $50 \mu\text{s}$ festgelegt und die Austoßzeit der Flüssigkeit wird variiert. Der Wechsel des Vorzeichens erfolgt unmittelbar nach Beendigung des Füll-Impulses. Abbildung 41 zeigt den Verlauf der Spannung über die Zeit.

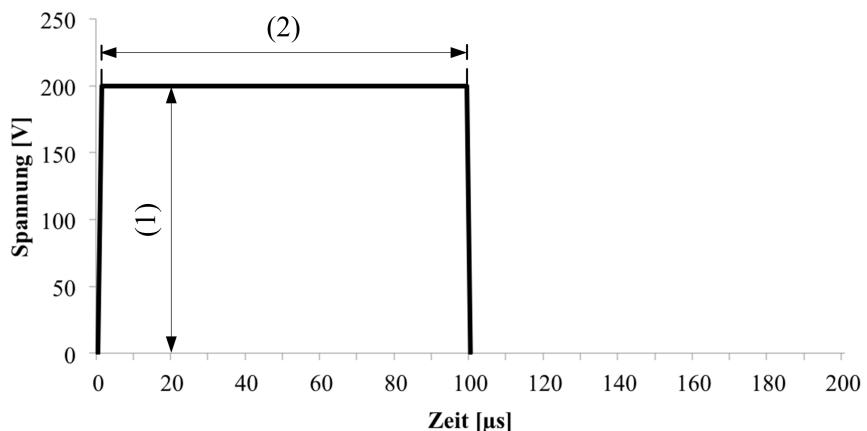


Abb. 40 Monopolarer Impuls, wie er im Experiment verwendet wird. Nach einer sehr kurzen Anstiegszeit (5 ns) wird das maximale Spannungsniveau (1) erreicht. Nach einer Haltezeit von $100 \mu\text{s}$ (2) fällt die Spannung wieder auf das Nullniveau herab.

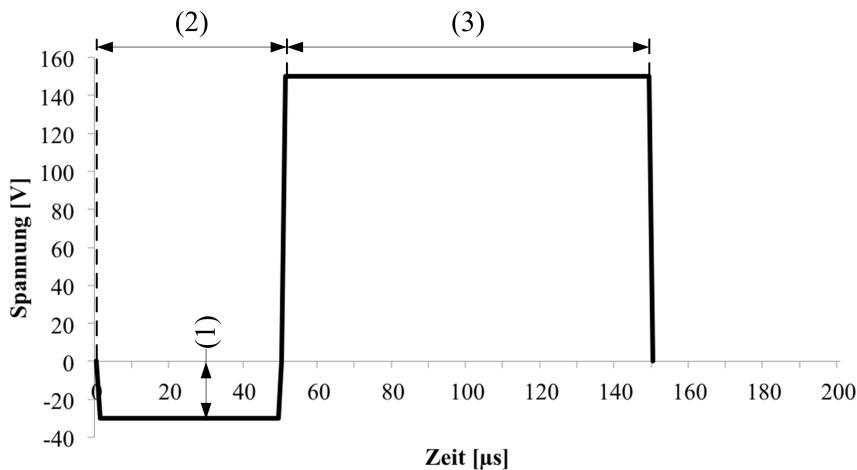


Abb. 41 Bipolarer Impuls, wie er im Experiment verwendet wird. Ein negativer Impuls mit einer Spannungsamplitude von 30 V (1) wird über eine Zeit von 50 μ s (2) gehalten. Die Polung der Ansteuerspannung wechselt und steigt auf das positive Maximalniveau (3). Nach einer Haltezeit von 100 μ s (3) fällt die Spannung wieder auf 0 ab.

9.3 Spannungvariation (Messreihe 1 – 3):

Eine Ansteuerung des Aktors unter verschiedenen Spannungen ist die hauptsächliche Variation des Impulses. Hierbei kann die dem Aktor zugeführte Energie direkt verändert werden.

Die Durchführung der Messreihe 1 sieht eine Verwendung des oben genannten monopolaren Impulses vor. Bei diesem werden die Ansteuerungsspannungen von 50 V bis 200 V in 50 V Schritten gewählt.

Messreihe 2 verwendet den beschriebenen bipolaren Impuls. Da die negative Ansteuerung des Piezoaktors zu einer Depolarisation des Materials führt, ist zu beachten, dass die durch das Datenblatt gegebene Koezitivfeldstärke nicht überschritten wird. Vom Hersteller wird empfohlen dem Aktor rund ein Drittel der Koezitivfeldstärke im negativen Bereich aufzuerlegen. Dies führt zu einer minimalen Ansteuerspannung von -30 V. Dieser Wert wurde für den bipolaren Impuls als negative Flanke festgelegt. Ebenso ist die Peak-to-Peak-Belastung des Piezomaterials in Erwägung zu ziehen, daher wurden in dieser Messreihe positive Spannungen im Bereich von 50 V bis 150 V gewählt, sodass sich eine maximale Peak-to-Peak-Belastung von 180 V ergibt.

Messreihe 3 untersucht das Verhalten des Piezos unter negativer Spannung. Durch die bereits angesprochene Limitierung der Minimalspannung wurden für diese Reihe 2 Spannungsniveaus von -15 V und -30 V ausgewählt.

9.4 Frequenzvariation (Messreihe 4 und 5)

Da die Dynamik des Aktors sich bei der Ansteuerung mit unterschiedlichen Frequenzen zeigt, wird zur Komplettierung der vorliegenden Messreihe die Ansteuerfrequenz im Bereich von 1000 Hz bis 10000 Hz in 2000 Hz-Schritten variiert. Hierbei gilt es zu untersuchen wie stabil sich der Aktor innerhalb des vorgesehenen Frequenzspektrums verhält. Ein stabiler Aktor weist bei unterschiedlichen Ansteuerungsfrequenzen keine oder wenig Abweichungen bei der Membranbewegung auf.

10 Auswertung der Messergebnisse

Die Durchführung der Experimente hat eine Datenbasis von 1824 Messwerten zusammengetragen. Diese sind für jeden Druckkopf unter möglichst konstanten Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) entstanden, um eine hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Es wurden Trends festgestellt, durch welche der Herstellungs- und Betriebsprozess des Tropfenerzeugers verkürzt und optimiert wird.

Das wichtigste Merkmal der Messungen ist die Gesamtverschiebung der Membran in Z-Richtung in Relation zur angelegten Spannung. Je höher die Steigung ist, desto effizienter arbeitet der Aktor. In den Messreihen zeigt sich ein eindeutiger Trend, welcher die Hypothese des linearen Zusammenhangs aus angelegter Spannung und ausgeführtem Gesamthub festigt. Durch die direkte Proportionalität von Spannung und zugeührter Energie ist damit der Zusammenhang zwischen Hub und Energie dargelegt.

10.1 Veränderungen der Einschnitttiefe

Zunächst wird eine Betrachtung der Messdatenbasis nach dem Aspekt der Veränderung der Einschnitttiefe vorgenommen. Die getroffene Hypothese bezüglich dieser Veränderung ist, dass sich die Gesamtverschiebung der Membran mit zunehmender Einschnitttiefe vergrößert. Wie in Abschnitt 7.8 vermutet, nähert sich der Maximalwert der Auslenkung dem berechneten Maximum an.

Wie in Abbildung 42 zu sehen, steigt der ausgeführte Hub linear mit der angelegten Spannung. Das Diagramm stellt das Verhalten der untersuchten Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm dar. Diese Breite wurde im bisherigen Tropfenerzeuger verwendet und dient in der Auswertung als Referenz, um Verbesserungen zu erkennen und darzustellen. Es ist zu erkennen, dass eine größere Einschnitttiefe einen größeren Hub bei gleicher Spannung ermöglicht, allerdings wird diese Hypothese für die aktuelle Elektrodenbreite nicht für die größten Einschnitttiefen (siehe 180 µm und 260 µm) bestätigt.

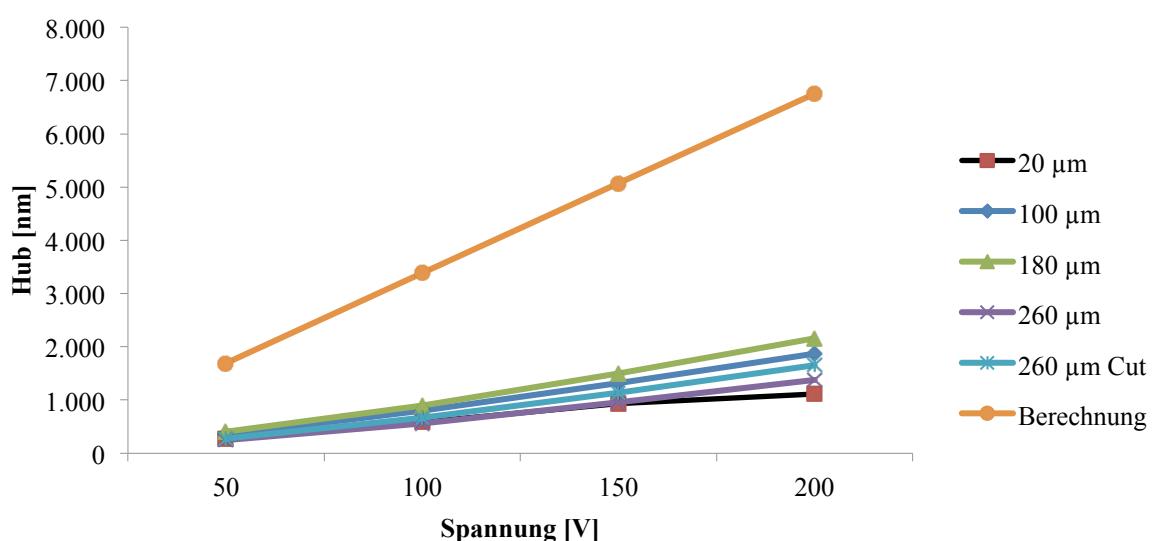


Abb. 42 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran der Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm bei einer Spannung von 50 bis 200 V.

Im Diagramm in Abbildung 43 ist das Verhalten der Aktoren mit 2,0 mm Elektrodenbreite dargestellt. Auch hier zeigt sich der lineare Trend zwischen dem ausgeführten Gesamthub und der zugeführten Energie. Bei der Darstellung zeigt sich, dass die Einschnitttiefe „260 µm Cut“ die relativ höchste Steigung aufweist.

Mit den hier gefundenen Zusammenhängen wird gezeigt, dass das Abtragen der Fläche des Dielektrikums zwischen den Elektroden nicht nur auf der Ebene der Goldschicht, sondern auch tiefergehend eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung zur Folge hat. Die Hypothese des Vorteils eines größeren Einschnitts und der damit verbundenen Verringerung der Wandstärke hat sich somit als richtig herausgestellt. Das in Abbildung 38 dargestellte Design (hellblaue Kurve) zeigt mit die höchste Steigung. In diesem Design ist keine Wand mehr vorhanden und die einzelnen Elektroden-Finger schwingen durch die maximal erreichbare mechanische Entkopplung frei.

Es zeigt sich jedoch auch, dass die theoretischen Werte nach dem in Abschnitt 7.3 betrachteten Modell (vergleiche orange Kurve in beiden Diagrammen) nicht annähernd erreicht werden. Zurückzuführen ist dies auf eine Übersimplifizierung des Modells durch Verwenden der Balkentheorie. Hinzu kommt, dass die Membran an den Seiten links und rechts der Pumpkammer weiterhin besteht und mit dem Silizium der Pumpkammer verbunden ist, hierdurch wird die Membranbewegung eingeschränkt. Eine Elastizität im Kleber zwischen Membran und Aktor, durch welche die Streckung bzw. die Stauchung des Aktors nicht direkt in ein Biegemoment gewandelt wird, ist ein zusätzlicher Faktor.

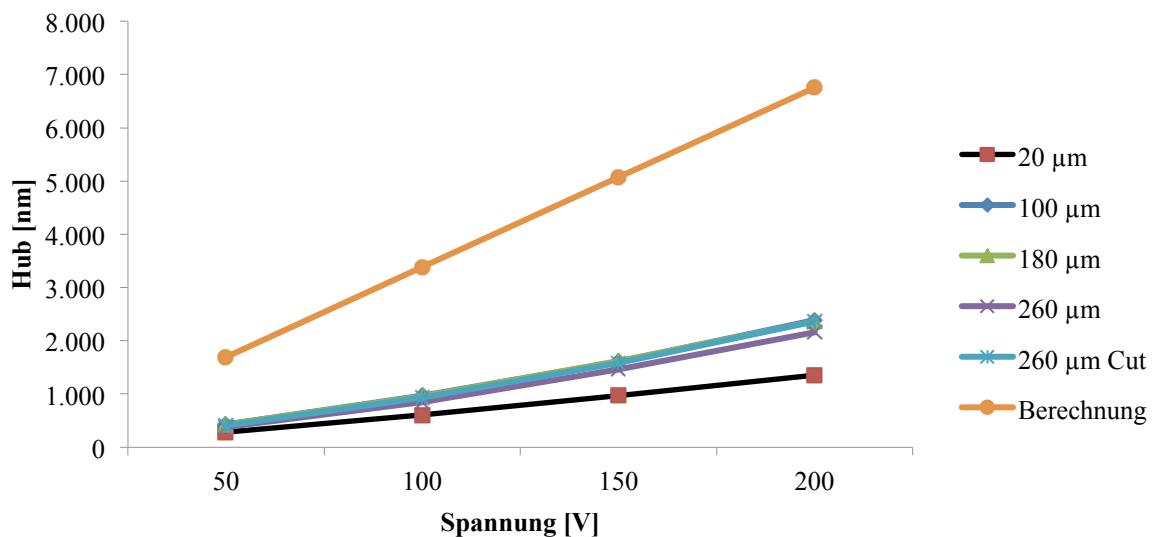


Abb. 43 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran der Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 2,0 mm bei einer Spannung von 50 bis 200 V.

10.2 Veränderung der Elektrodenbreite

Im Folgenden wird die Gesamtverschiebung der Membran unter Veränderung der Elektrodenbreite betrachtet. Die Hypothese hierzu lautet, dass sich der Hub der Membran bei Vergrößerung der Elektrodenbreite nicht verändern wird.

In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind erneut zwei Aktordesigns gegenübergestellt. Die gegebenen Diagramme stellen die Gesamtverschiebung der Membran unter Veränderung der Elektrodenbreite dar. Jede der Kurven repräsentiert eine jeweilig konstante Ansteuerspannung.

Im Diagramm in Abbildung 44 wird das aktuelle Aktordesign mit einer Einschnitttiefe von 20 µm dargestellt. 20 µm Einschnitttiefe bedeuten, dass zwischen den Elektroden leicht angeschliffen wurde um die Goldschicht zu entfernen – hierbei wird die galvanische Trennung der einzelnen Elektroden erreicht, die mechanische Entkopplung ist hierbei minimal.

Wie im Diagramm aus Abbildung 44 zu sehen, führt eine Verbreiterung der Elektroden bei dieser Einschnitttiefe nur zu minimalen Veränderungen der Gesamtverschiebung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer breiteren Elektrode zwar die zuzuführende Energie größer ist, jedoch die zu verschiebende Fläche proportional wächst. Der Aktor dehnt und staucht sich also im gleichen Maß.

Eine interessante Beobachtung ist Diagramm in Abbildung 45 zu sehen. Hier dargestellt ist, dass das „260 µm Cut“ Design eine Neuerung im Herstellungsprozess bietet, auf welche später noch eingegangen wird.

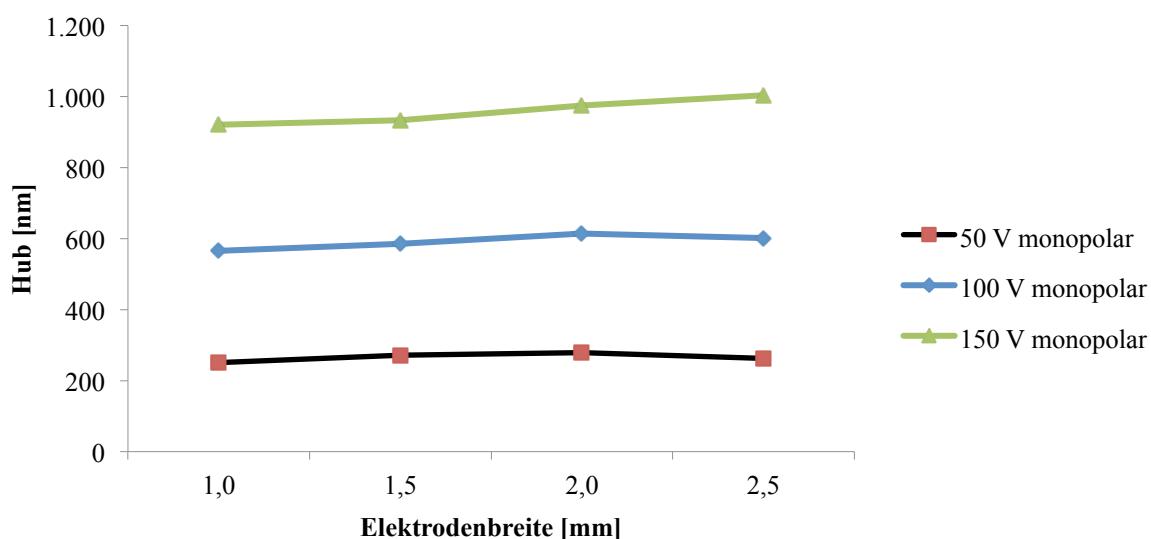


Abb. 44 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran über die Variation der Elektrodenbreite von 1,0 bis 2,5 mm. Die Einschnitttiefe beträgt hier 20 µm.

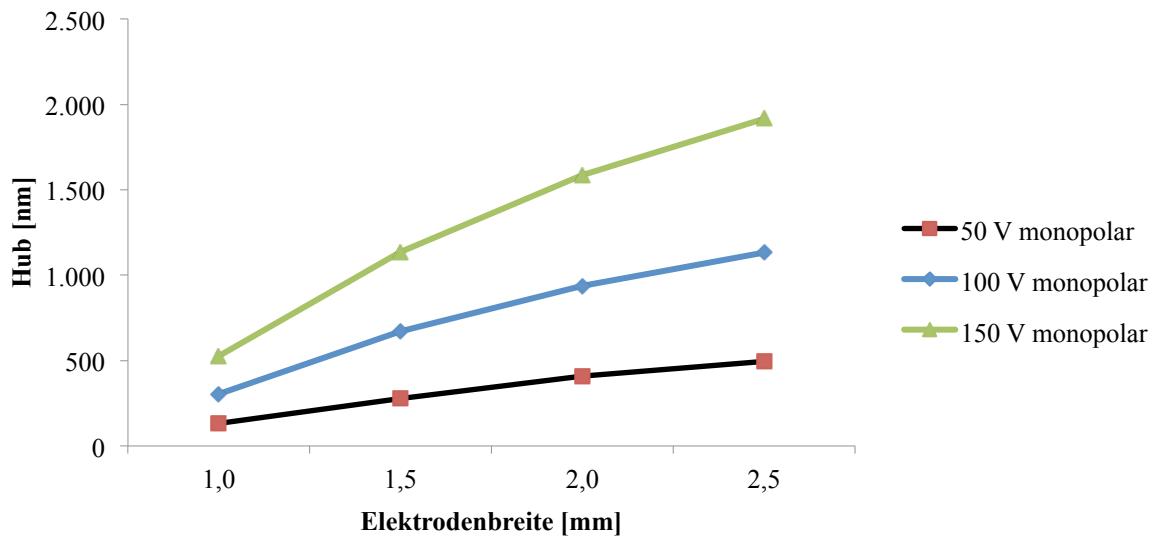


Abb. 45 Dargestellt ist die Gesamtverschiebung der Membran über die Variation der Elektrodenbreiten von 1,0 bis 2,5 mm. Die Einschnitttiefe beträgt 260 µm ausgeführt mit Schnitten links und rechts der Elektrode („Cut“-Design).

Wie im Diagramm zu sehen, steigt die Gesamtverschiebung der Membran mit wachsender Elektrodenbreite. Diese Beobachtung steht sowohl im Kontrast zur getroffenen Hypothese als auch zur Beobachtung des vorhergehend betrachteten Designs mit einem Einschnitt von 20 µm. Zurückzuführen ist dieser Anstieg auf dynamische Effekte im Schwingverhalten. Durch die größere Masse einer einzelnen Zunge schwingt diese sich höher ein als eine schmale Zunge niedrigerer Masse.

Um einen Aufschluss über die vom Aktor aufgenommene elektrische Energie zu erhalten ist es notwendig, die angelegte Maximalspannung in Bezug zu seiner Kapazität zu setzen. Hierbei werden wieder die beiden Elektrodenbreiten von 1,5 mm und 2,0 mm betrachtet.

Im Diagramm in Abbildung 46 ist die energiebezogene Verschiebung der beiden Aktoren aufgezeichnet. Hier ist zu sehen, dass das neue Design stets effizienter ist. Die Gesamtverschiebung pro aufgenommenem Joule Energie bei jeder der vier Spannungsniveaus größer als die des 1,5 mm breiten Aktors.

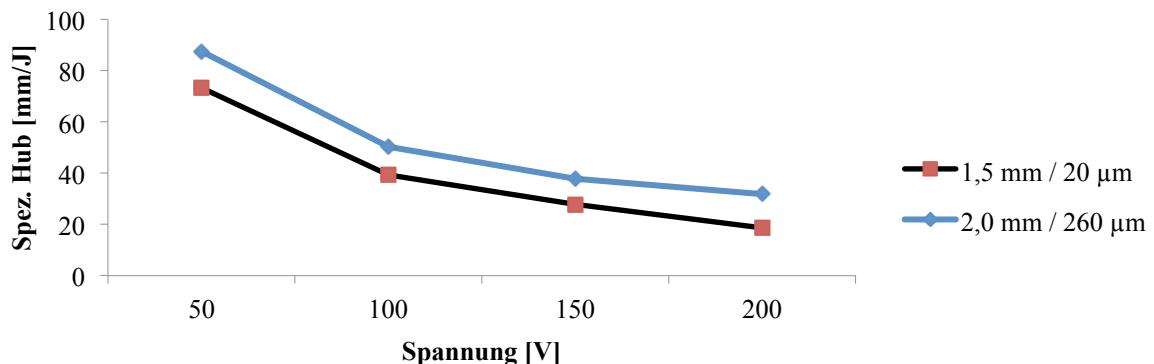


Abb. 46 Vergleich der Effizienz der beiden Designs. Hierbei ist die Effizienz in der Verschiebung (mm) pro aufgenommener Energiemenge (Joule) angegeben.

Nach Formel (5) berechnen sich die Kapazitäten der betrachteten Aktoren jeweils zu: 2,97 nF und 3,72 nF. Die dem Aktor zugeführte Energie bei einer bestimmten Spannung berechnet sich nach Formel 6. Im Diagramm (Abb. 46) wird die Gesamtverschiebung der Membran auf die aufgenommene Energie bezogen, damit erhält man einen vergleichbaren Wert mit der Einheit mm/J.

10.3 Veränderung des Ansteuerungsimpulses

Im Experiment wurde neben der klassischen, bisher verwendeten Ansteuerung mittels eines monopolaren Impulses, ein bipolarer Impuls angewendet und untersucht. Diese Untersuchungen wurden erst durch einen neuen Spannungsverstärker möglich, welcher in der Lage ist, bipolare Signale exakt zu verstärken und die notwendige Leistung für die vom Aktor benötigte Energie bereitzustellen. Die Hypothese hinter dem verwendeten Impuls ist, dass durch ein vorhergehendes Anheben der Membran eine größere Maximalauslenkung erreicht wird. Es galt herauszufinden, ob unter der Zunahme der Gesamtauslenkung die Geschwindigkeit der Membran ebenfalls steigt. Diese kann im Tropfenbildungsprozess genutzt werden um eine höhere Tropfengeschwindigkeit und einen besseren Tropfenabriß zu ermöglichen.

In Abbildung 47 und Abbildung 48 ist der Vergleich der erreichten Gesamtverschiebung zwischen der monopolaren und der bipolaren Ansteuerung zu sehen. Die hier gezeigten Diagramme beziehen sich auf das Aktordesign „260 µm Cut“.

Zu sehen ist in Abbildung 47 der Vergleich einer bipolaren zu einer monopolaren Ansteuerung über die hergestellten Elektrodenbreiten. Erneut in diesem Diagramm zu sehen ist die Eigenschaft dieses Einschnitt-Designs, dass mit steigender Elektrodenbreite eine größere Gesamtverschiebung ausgeführt wird. Die paarweise geordneten Kurven stellen jeweils die gleiche Maximalansteuerspannung dar, wobei bei dem bipolaren Impulsmuster der positiven Amplitude ein negativer Impuls mit einer Spannung von -30 V vorgeschaltet ist. Betrachten wir nun die einzelnen Paare, so zeigt sich eindeutig, dass eine bipolare Ansteuerung eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung hervorruft. Diese beträgt bis zu 30,7 % (2,0 mm Elektrodenbreite, 50 V Ansteuerung).

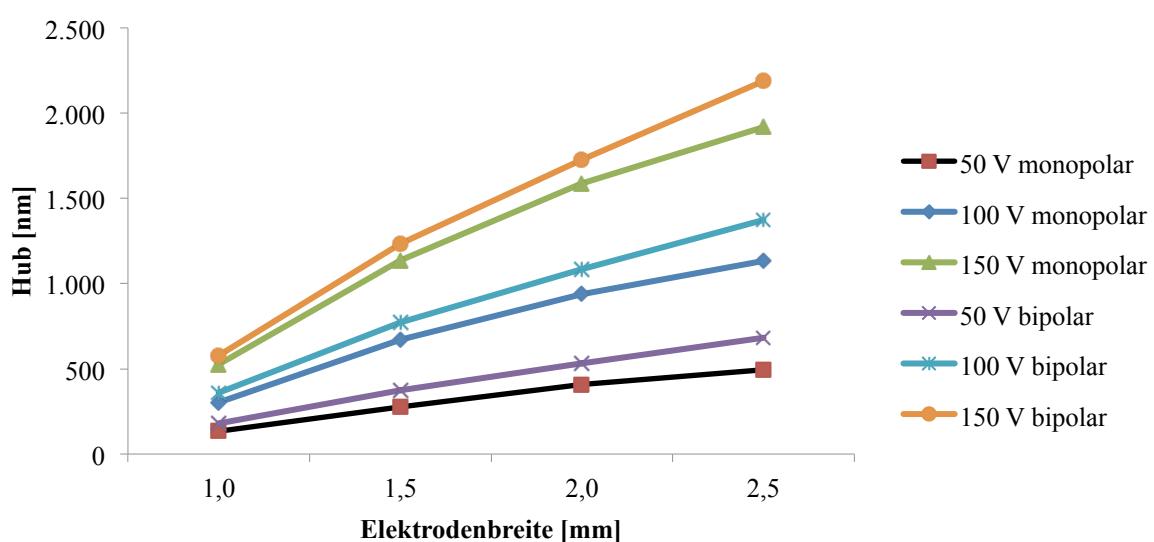


Abb. 47 Verdeutlichung der Vergrößerung der Gesamtverschiebung durch eine bipolare Ansteuerung. Bei jeder Elektrodenbreite bietet die bipolare Ansteuerung einen Vorteil gegenüber der monopolaren Anregung. Die Einschnitttiefe beträgt 260 µm im „Cut“-Design.

In Abbildung 48 wird das Verhalten des Aktordesigns mit dem größten Plus an Gesamtverschiebung noch einmal über die Variation der Ansteuerspannung dargestellt. Auch hier ordnen sich die Kurven jeweils der monopolaren und der bipolaren Ansteuerung zu. Wie zu sehen bleibt der bipolaren Ansteuerung ein Vorteil von 8,2 bis zu 30,7 %.

Dies bedeutet nun, dass eine bipolare Ansteuerung eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung der Membran zur Folge hat. Zurückzuführen ist dies auf den vorhergehenden negativen Impuls, durch den die Membran kurzzeitig nach außen gewölbt wird, um dann mit dem Wechsel der Polarität in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt zu werden. Dieses Phänomen wird im Folgenden entsprechend der Ähnlichkeit als „Trampolin-Effekt“ bezeichnet.

Die Vergrößerung der Gesamtverschiebung ist ein Aspekt, den die bipolare Ansteuerung mit dem Trampolin-Effekt mit sich bringt, im Bezug auf den Druckprozess jedoch ist eine größere Auslenkung der Membran nicht immer mit einer Verbesserung der Tropfenbildung verbunden. Um eine größere Auslenkung zu erreichen ist auch die Erhöhung der Ansteuerspannung denkbar, um dem Aktor mehr Energie zuzuführen. Dies würde, wie in Abschnitt 7.3 gezeigt zu einem linearen Anstieg der Gesamtverschiebung führen. Ein Vorteil ist nun, dass mit niedrigeren Ansteuerspannungen und damit auch mit einer geringeren Energie die gleiche Verschiebung erreicht wird. Piezoaktoren werden häufig mit Spannungen von mehreren hundert Volt angesteuert, jedoch birgt ein Betrieb eines elektrischen Gerätes mit solchen Spannungen Gefahren, welchen durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen entgegen zu wirken ist. Ebenso sind Bauteile, die höhere Spannungen vertragen im allgemeinen teuer. Es sind genug Vorteile und Gründe vorhanden die Ansteuerspannung möglichst gering zu halten.

Den zweiten Aspekt bei der Betrachtung bewegter Membranen stellt die Geschwindigkeit dar. Da der Tropfen durch die Absenkung der Membran aus der Düse ausgestoßen wird ist die Ausstoßgeschwindigkeit der Flüssigkeit proportional zu der Geschwindigkeit der Membran. Bewegt sich die Membran nun zu langsam, kommt es zu Störungen im Tropfenbildungsprozess. Die ausgestoßenen Tropfen sind unförmig und Satellitentropfen entstehen.

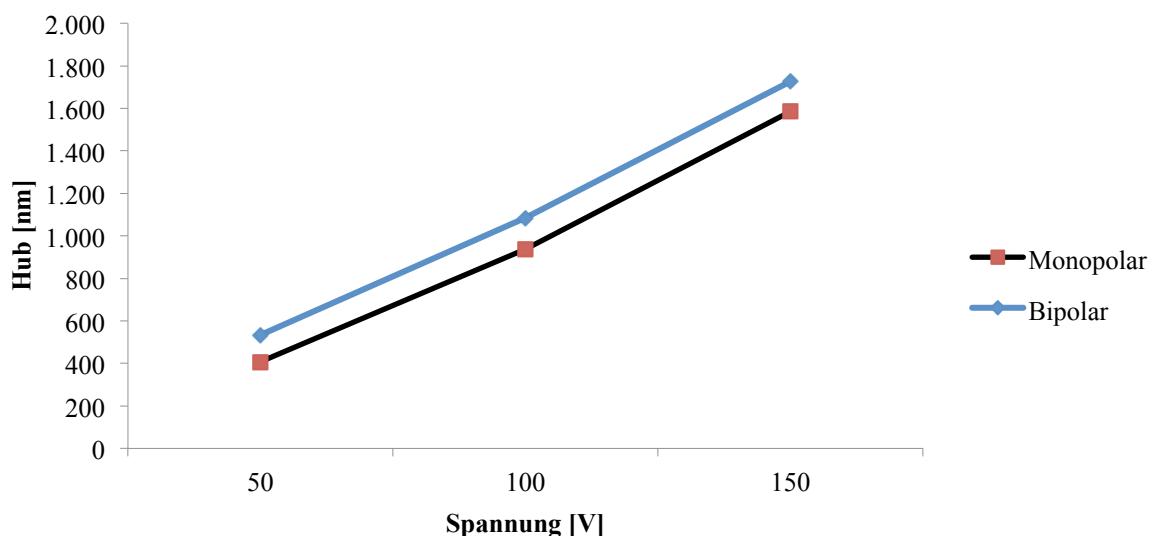


Abb. 48 Der Vorteil der bipolaren Ansteuerung ist über die Spannungsniveaus 50, 100 und 150 V stetig. Der dargestellte Aktor besitzt eine Elektrode mit 2,0 mm Breite und eine Einschnitttiefe von 260 µm im „Cut“-Design.

Im Folgenden wird untersucht ob der Trampolin-Effekt das geforderte Kriterium der gleichbleibenden Geschwindigkeit erfüllt oder sogar übertrifft.

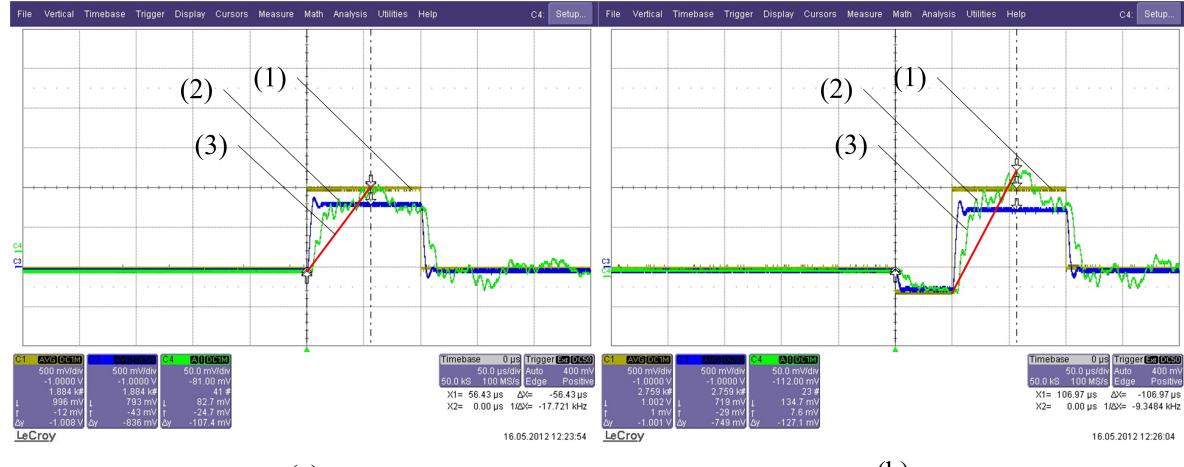


Abb. 49 Screenshot des Oszilloskops aus zwei Messungen. Monopolare Ansteuerung (a) und bipolare Ansteuerung (b). Dargestellt sind: (1) Verlauf der Ansteuerspannung; (2) Messkurve des Oszilloskops, welche die Membranverschiebung widerspiegelt; (3) durchschnittliche Verschiebung der Membran über die Zeit.

Abbildung 49 zeigt einen Screenshot des LeCroy-Oszilloskops mit welchem die vorliegenden Messungen aufgenommen wurden. Zu sehen sind in blau und gelb die Verläufe der Spannung über der Zeit (1), der Kanal 3, welcher durch die grün gefärbte Kurve dargestellt wird repräsentiert die Verschiebung der Membran (2). Die eingezeichnete rote Gerade (3) beschreibt die durchschnittliche Verschiebung der Membran über die Zeit und wird im Folgenden Beispiel genutzt, um die Geschwindigkeiten der Membran unter den beiden gegebenen Ansteuerungsprofilen zu vergleichen. Beide Bilder stellen für den direkten Vergleich das bisher oft besprochene „260 µm Cut“-Design bei einer Elektrodenbreite von 2,0 mm dar. Es wurde eine Ansteuerspannung von 100 V gewählt.

Im Diagramm in Abbildung 49 (a) ist zu sehen, dass die Membran nach einer kurzen Verzögerung aus ihrer Ruhelage dem Verlauf der Ansteuerspannung folgt und nach einer Zeit von 56,43 µs ihr Maximum erreicht. Dieses liegt bei einem Spannungsunterschied von 107,4 mV. Bei einer eingestellten Skala des Laservibrometers von 8 µm/V beträgt der ausgeführte Hub 859,2 nm. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Membran berechnet sich zu (42).

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{859,2 \text{ nm}}{56,43 \mu\text{s}} = 15,23 \text{ mm/s} \quad (42)$$

Zum Vergleich dessen steht das Diagramm in Abbildung 49 (b). Hierbei handelt es sich um einen bipolaren Impuls. Zu erkennen ist dieser an der vorhergehenden negativen Vorbelastung des Aktors, welcher (am Verlauf der grünen Kurve zu sehen) zu einer Absenkung der Membran führt. Diese beträgt im vorliegenden Fall eine Spannung von -34,0 mV und damit eine Verschiebung von -272 nm. Diese Absenkung bleibt bis zum Wechsel der Polarität bestehen und der Aktor wird nun durch die entgegengesetzte Spannung und den Trampolin-Effekt in die andere Richtung beschleunigt. Der Aktor erreicht nach einer Zeit von 106,97 µs das Maximum in der entgegengesetzten Richtung, welches einen Betrag von 134,7 mV und damit eine

Verschiebung 1077,6 nm besitzt. Schon am höheren Betrag stellen wir erneut fest, dass der Trampolin-Effekt eine Vergrößerung der Membranbewegung in Z-Richtung bewirkt. Errechnen wir nun erneut die durchschnittliche Geschwindigkeit der Membran im betrachteten Zeitraum (43).

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(272 \text{ nm} + 1077,6 \text{ nm})}{56,97 \mu\text{s}} = \frac{1349,6 \text{ nm}}{56,97 \mu\text{s}} = 23,69 \text{ mm/s} \quad (43)$$

Das entspricht einem Geschwindigkeitsunterschied von 8,46 mm/s und einem Zuwachs von 55,5 %.

Es wurde gezeigt, dass der Trampolin-Effekt nicht nur die Membranauslenkung erhöht, durch den vorgeschalteten negativen Impuls erhöht sich zudem die Gesamtamplitude, da hier die Summe der beiden Auslenkungen betrachtet werden muss. Ein verblüffender Effekt der bipolaren Ansteuerung ist es, dass die Zeit, welche die Membran für die Auslenkung braucht nicht signifikant steigt. Bedingt durch diesen Effekt ist der Geschwindigkeitszuwachs enorm.

Abbildung 45 zeigt für jede gemessene Elektrode die Differenz der durchschnittlichen Ladezeiten bei monopolarer und bipolarer Ansteuerung. Die Standardabweichung dieser Verteilung liegt bei 3,25 μs . Dies ist im Rahmen der Vergrößerung der Gesamtverschiebung sehr gut zu verkraften. Der Geschwindigkeitszuwachs durch die Verwendung des bipolaren Impulses ist gegeben.

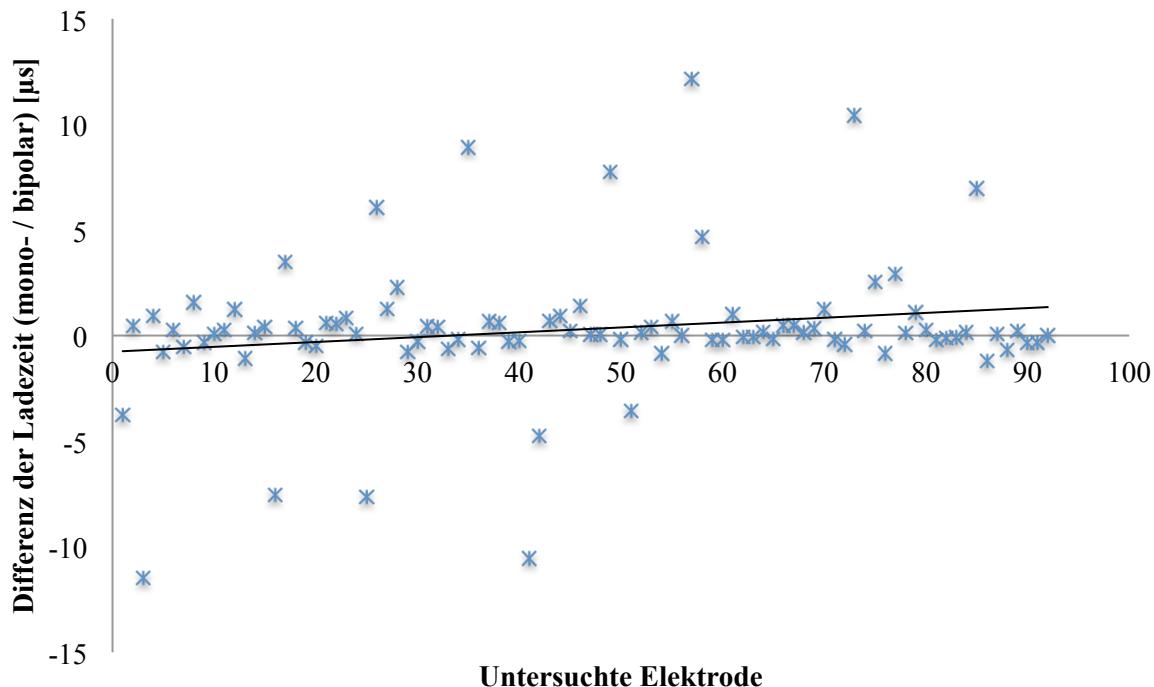


Abb. 50 Dargestellt sind die Abweichungen der Ladezeiten von monopolarer zu bipolarer Ansteuerung jeder Elektrode. Durch die geringen Abweichungen wird der Vorteil des Trampolin-Effektes verdeutlicht. Die Abszisse zeigt die Nummer der gemessenen Elektrode.

10.4 Verhalten der Elektroden bei verschiedenen Frequenzen

Im letzten Teil der Experimente wurde die Gesamtverschiebung der Membran bei der Veränderung der Ansteuerfrequenzen untersucht. Hierbei gilt es eine Aussage über die Stabilität der Membranbewegung innerhalb eines Frequenzspektrums zu treffen und einen Bereich der optimalen Ansteuerungsfrequenz zu ermitteln.

In Abbildung 46 und Abbildung 47 ist das Frequenzverhalten der Aktoren mit einer Einschnitttiefe von 20 µm festgehalten. Bei einer monopolaren Ansteuerung (Abbildung 46) kommt es bei einer Elektrodenbreite von 1,5 mm bereit bei einer Ansteuerungsfrequenz von 2 kHz zu einer Abweichung von über 200 nm. Die 2,5 mm breite Elektrode zeigt bei einer Frequenz von 4 kHz eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung von über 200 nm. Die Elektroden mit Breiten von 2,0 mm und 1,0 mm verhalten sich bis zu 8 kHz fast neutral und weisen erst ab dieser Marke sichtbaren Knick auf.

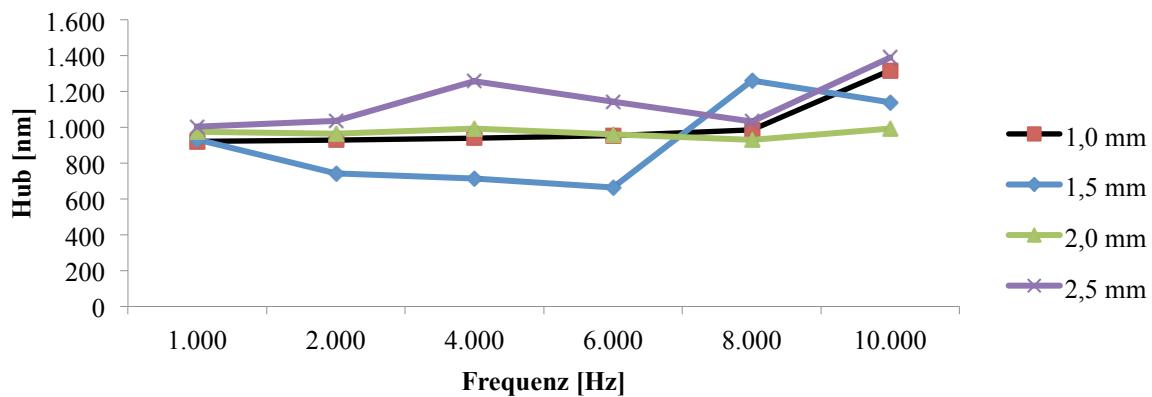


Abb. 51 Darstellung des Frequenzverhaltens der Aktoren der Einschnitttiefe 20 µm. Die Ansteuerung erfolgt hier monopolar bei einer Spannung von 150 V.

Abbildung 47 bezieht sich ebenfalls auf Aktoren mit einer Einschnitttiefe von 20 µm, welche aber mittels des bipolaren Impulses angesteuert wurden. Auch hier Verhalten sich die Aktoren aller Elektrodenbreiten bis 2 kHz neutral. Ab einer Frequenz von 2 kHz beginnt die Elektrode der Breite 1,5 mm im Hub anzusteigen während die übrigen Elektroden keine signifikanten Abweichungen zeigen. Bei einer Ansteuerungsfrequenz von 10 kHz brechen alle Aktoren ein und fallen auf einen sehr geringen Wert ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Aufbau aus Aktor und Membran einer so hohen Ansteuerungsfrequenz nicht mehr folgt und nur noch ein Minimum an Schwingung ausführt.

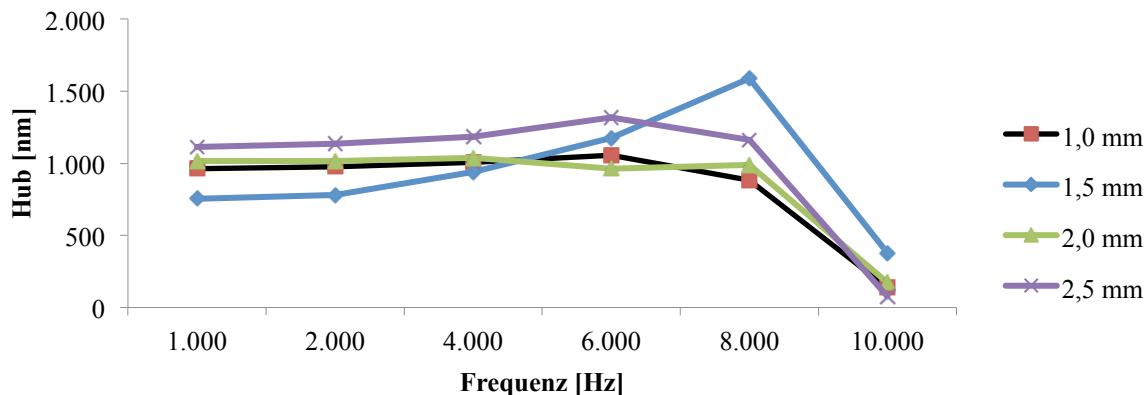


Abb. 52 Darstellung des Frequenzverhaltens der Aktoren mit einer Einschnitttiefe von 20 µm. Angesteuert wird mit einem bipolaren Impuls mit einer positiven Spannungsspitze von 150 V.

Auch in Abbildung 48 und Abbildung 49 ist dargestellt wie sich die Aktoren des gewählten Einschnitt-Designs „260 µm Cut“ unter Veränderung der Ansteuerungsfrequenz verhalten.

In Abbildung 48 ist erneut die monopolare Ansteuerung dargestellt. Bis 2 kHz ist die Gesamtverschiebung konstant. Ab einer Frequenz von 3 kHz weicht die Elektrode mit einer Breite von 2,5 mm erheblich vom Anfangswert ab. Dieser Abweichung steigt weiter und findet ihr Maximum bei 10 kHz, an dieser Stelle weicht sie um 75 % von ihrem Ausgangswert ab – Es ist von einer Fehlmessung auszugehen. Die übrigen Elektroden verhalten sich bis zu einer Frequenz von 4 kHz stabil und weichen auch dann stark von ihren Anfangswerten ab.

Bei der bipolaren Ansteuerung (Abbildung 49) verhalten sich sämtliche Elektroden bis zu einer Frequenz von 2 kHz ohne nennenswerte Abweichungen. Die Elektrode der Breite 2,0 mm zeigt ab einer Frequenz von 3 kHz einen Anstieg in der Gesamtverschiebung um 315 nm. Wie auch bei der vorhergehenden Einschnitttiefe fällt die Gesamtverschiebung bei 10 kHz auf ein Minimum, fast auf null.

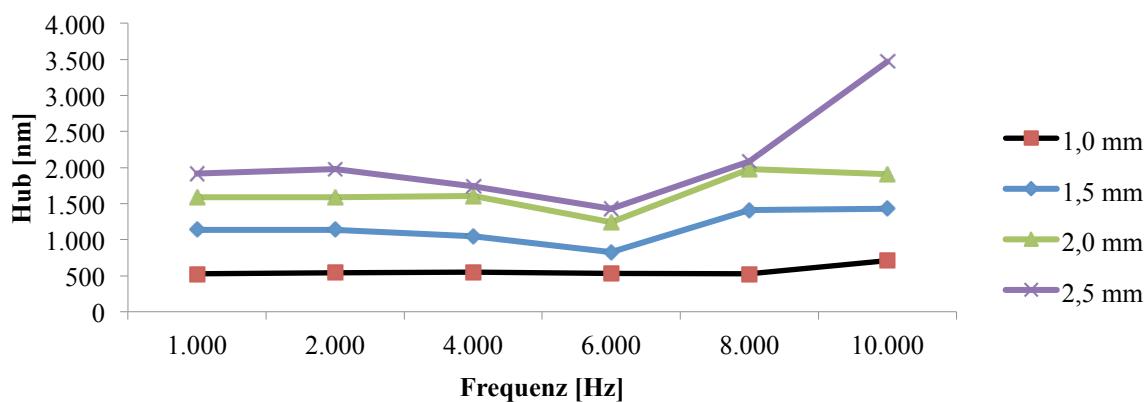


Abb. 53 Gezeigt ist das Frequenzverhalten der Aktoren der Einschnitttiefe 260 µm im „Cut“-Design. Die Ansteuerung erfolgt mittels eines monopolaren Impulses bei einer Spannung von 150 V.

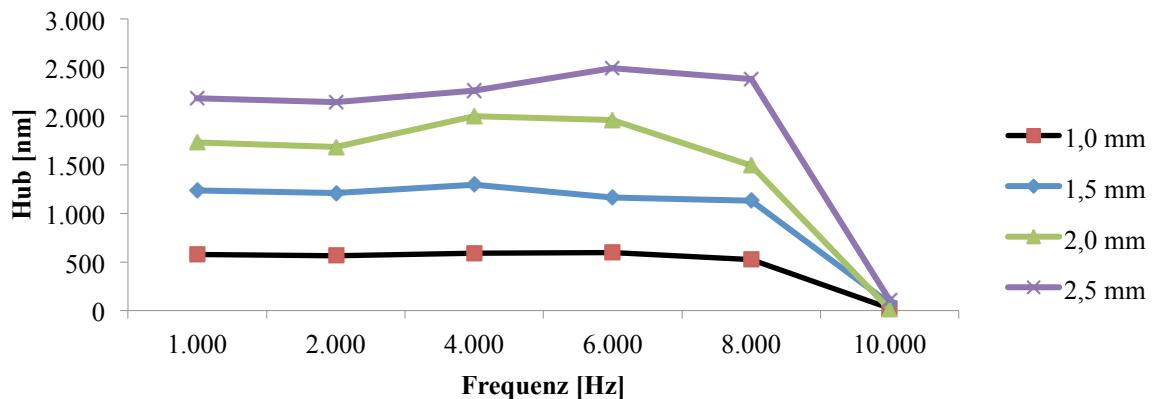


Abb. 54 Dargestellt ist die Maximalverschiebung der Membran bei unterschiedlichen Frequenzen. Die Aktoren unterschiedlicher Breite besitzen eine Einschnitttiefe von 260 µm im „Cut“-Design. Die Ansteuerung erfolgt bipolar mit einem positiven Spannungsniveau von 150 V.

Das Verhalten der verschiedenen Aktoren-Designs bei veränderter Ansteuerungsspannung zeigt, dass die Betriebsfrequenz keineswegs frei wählbar ist. Die Auswertung zeigt, dass ein stabiles Schwingverhalten im Bereich zwischen 1 kHz und 3 kHz gewährleistet ist. Im Betrieb ist also zu beachten, dass diese Frequenz nicht überschritten wird, da es ansonsten zu unvorhersehbaren Abweichungen vom erwarteten Verhalten kommt.

11 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde das Design des piezoelektrischen Wandlers eines am Lehrstuhl entwickelten Piezomembran-Druckkopfes untersucht und in seinen Struktur- und Ansteuerungsparametern verändert. Zu diesen Strukturparametern gehören die Breite und Einschnitttiefe der auf dem Piezo-Material eingebrachten Elektroden. Die Ansteuerungsparameter umfassen die Ansteuerspannung sowie deren Verlauf über die Zeit (Impulsform). Es wurden Hypothesen gestellt, nach welchen sich der Aktor verhalten wird. Diese wurden in einer Reihe von Experimenten an unterschiedlichen Aktor-Designs untersucht und die Ergebnisse wurden miteinander verglichen und ausgewertet.

Ziel war es eine Optimierung der Ansteuerung zu erreichen sowie ein optimales Design der Elektroden zu erhalten. In den in Kapitel 10 ausgeführten Auswertungen wird bestätigt, dass eine Veränderung der Breite und Tiefe der Elektroden zu einem verbesserten Verhalten der Gesamtverschiebung auf eine gegebene Ansteuerung führt.

Bei der Herstellung der unterschiedlichen Aktoren-Designs (eine Variation von 4 Elektrodenbreiten und 4 Einschnitttiefen) kam der Gedanke eine weitere Form des Einschnitts zu realisieren: Ein einzelner Einschnitt links und rechts der Elektrode, welcher die Funktion der mechanischen und elektrischen Entkopplung vereint. Ein Vorteil dieses einzelnen Einschnitts ist eine reduzierte Bearbeitungszeit mit der Wafersäge, diese wurde von 20,5 Minuten auf 6 Minuten und 10 Sekunden reduziert werden.

Als Referenzmodell dient das aktuell verwendete Aktordesign, das eine Elektrodenbreite von 1,5 mm bei einer Einschnitttiefe von 20 µm besitzt. Im Laufe der Messungen wurden Unterschiede zu jenem Referenzdesign ermittelt, welche es erlauben einen Wechsel zu einem neuen Design zu rechtfertigen. Eine gute Mischung aus Leistungsvorteil und Herstellungszeit bietet das Design bei dem die Elektroden durch einzelne, abgesetzte Schnitte strukturiert werden. Unter gleicher Ansteuerspannung kann mit diesen Aktoren eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung der Membran von bis zu 73 % erreicht werden (siehe Abschnitt 10.1).

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Manipulation des Ansteuerungsimpulses. Teil der Experimente war es, einen bipolaren Impuls zu verwenden und das Verhalten der Gesamtverschiebung zu beobachten und zu bewerten. Es zeigt sich, dass diese Impulsform ein erhebliches Plus erreicht. Der Grund für dieses Plus in der Gesamtverschiebung wird der Beschleunigung der Membran aus ihrem zurückgezogenen Zustand (erster Impuls) in die Pumpkammer hinein zugeschrieben. Dieser „Trampolin-Effekt“ (nach Abschnitt 10.3) bietet einen großen Vorteil bei der Ansteuerung. Durch ihn ist es möglich bei geringeren Spannungen ähnliche Gesamtverschiebungen zu erreichen und so die Gefahr und Kosten durch Hochspannungen zu reduzieren.

In Abbildung 50 sind das „alte“ und das neue Design in einer Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zu sehen. Zu sehen ist der Vorteil der einzelnen abgesetzten Schnitte (b) im Vergleich zu der flächenhaften Abtragung der Goldschicht (a).

In Abbildung 51 ist ein Vergleich des neuen und des alten Aktordesigns dargestellt. Hierbei wird mit der blauen Kurve der alte Aktor gezeigt wie er sich unter der Ansteuerung mittels monopolaren Impuls verhält. Die lila Kurve spiegelt das Verhalten des neuen Aktors unter einer bipolaren Ansteuerung wider.

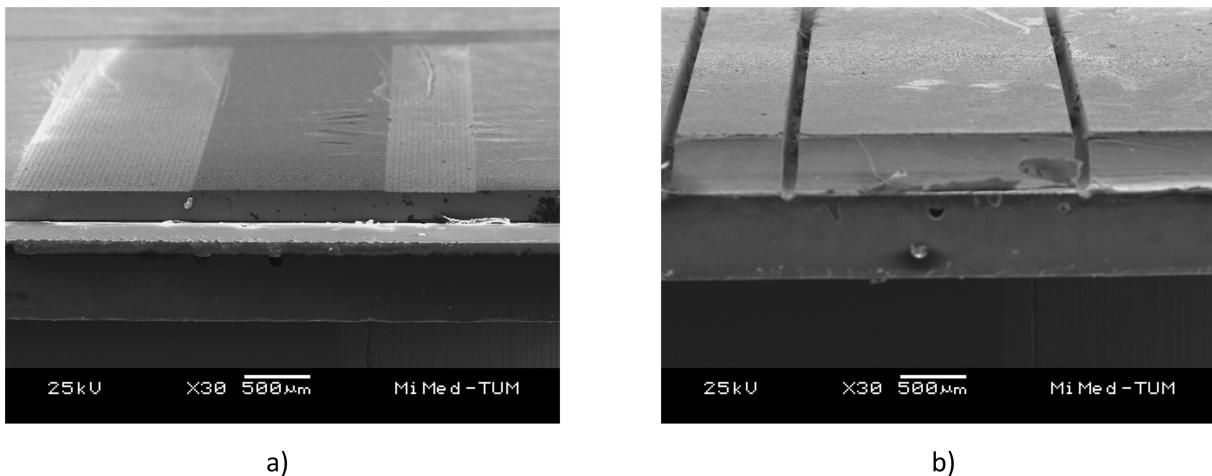


Abb. 55 Vergleich der Leistungsfähigkeit des Referenzdesigns mit der des neuen Designs.

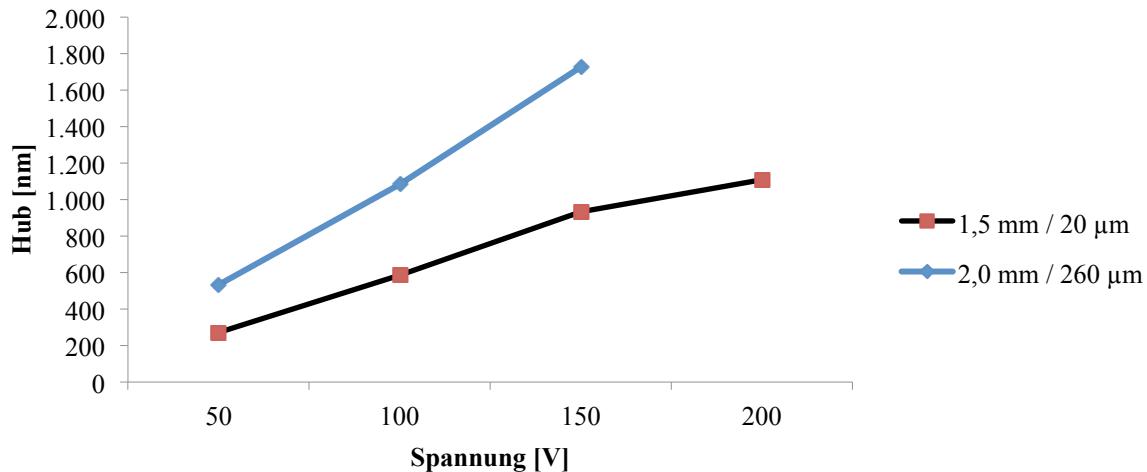


Abb. 56 Vergleich der Leistungsfähigkeit des Referenzdesigns mit der des neuen Designs. Dargestellt ist die maximale Membranverschiebung des 1,5 mm breiten Aktors mit einer Einschnitttiefe von 20 μm bei monopolarer Ansteuerung (schwarze Linie) und die maximale Verschiebung des Aktors mit einer Elektrodenbreite von 2,0 mm und einer Einschnitttiefe von 260 μm im „Cut“-Design bei bipolarer Ansteuerung (blaue Linie).

In Tabelle 7 ist der Vorteil des neuen Aktordesigns in Zahlen zu sehen. Mit dem neuen Design und dem bipolaren Impuls wird eine Vergrößerung der Gesamtverschiebung von mindestens 84 % gegenüber dem Referenzdesign erreicht.

Tabelle 7: Vergleich des ausgeführten Gesamthubs nach Referenzdesign und neuem Design.

Ansteuerspannung [V]	50	100	150
1,5 mm / 20 μm	272 nm	585 nm	934 nm
2,0 mm / 260 μm Cut	533 nm	1086 nm	1727 nm

Da im Zuge der Auswertung der Ergebnisse ein neues Aktordesign für den Druckkopf gefunden wurde, gilt es dies im Druckprozess zu bestätigen. Hierbei ist die Stabilität der Tropfenqualität zu beobachten. Zu untersuchen bleibt, ob bei niedrigeren Ansteuerspannungen mittels bipolarem Impuls ähnliche Tropfen (Größe, Geschwindigkeit, Qualität) erzeugt werden, wie es mit dem alten Aktor und dem monopolaren Impuls bei höheren Spannungen möglich war.

Es galt unter den Aspekten des elektrischen Verhaltens der Piezokeramik das bestehende Design des Aktors zu verbessern oder zu bestätigen. Unter zwanzig unterschiedlichen Druckkopfdesigns wurde ein Design gefunden, welches im Bezug auf den Maximalhub und der Herstellungszeit dem Bestehenden deutlich überlegen ist.

Im Laufe der Experimente zeigte sich zudem, dass durch die Verwendung eines bipolaren Impulses die Aktuation noch weiter gesteigert wird. Dies wurde erst durch die Anschaffung von neuen Geräten möglich.

In Zukunft wird der gewählte Aktor am Lehrstuhl hergestellt werden und mit dem bestehenden Pumpkammer-Design verwendet werden. Mittels der bipolaren Ansteuerungen können weitere Experimente gemacht werden, welche die Eignung des Druckkopfes für den Druck von Phasenübergang behafteten untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Chen, A. & Basaran, O. 2002, "A new method for significantly reducing drop radius without reducing nozzle radius in drop-on-demand drop production", *Physics of Fluids*, vol. 14 no. 1
- Eiler, K. 2012, *Optimierung eines piezoelektrischen Drop-on-Demand Mikrotropfenerzeugers*, Diplomarbeit, Technische Universität München.
- Elsner, C. 2009, *3D-Drucktechnologie – Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit graduierten Werkstoffeigenschaften*, Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Günther, D. 2008, *Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden für die Mikrofluidik*, Dissertation, Technische Universität München.
- Johnson Matthey AG 2009, *Datenblatt Piezokeramische Massen*, Johnson Matthey AG, Redwitz.
- Kagerer, M., Rumschoettel, D., Irlinger, F. & Lueth, T. 2011, "Fabrication and Application of a Chemical Resistant Low-Cost Microdrop Generator", *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Denver, USA.
- Lee, E. R. 2003, *Microdrop Generation*, Stanford Linear Accellerator Center, Stanford University.
- Lemmermeyer, B. 2006, *Ein hochtemperaturbeständiger Einzeltropfenerzeuger für flüssige Metalle*, Dissertation, Technische Universität München.
- Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2009, *Produktgesamtkatalog 2009*, PI GmbH, Karlsruhe/Palmbach.
- Seitz, H. & Heinzl, J. 2004, "Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 1140 – 1147.
- Wehl, W. 1984, *Akustik und Fluidmechanik in Kanälen und Düsen von Tintenschreibwerken*, Dissertation, Technische Universität München.
- Wijshoff, H. 2008, *Structure- and Fluid-Dynamics in Piezo Inkjet Printheads*, PhD Thesis, Technische Universität Eindhoven.
- Xaar plc 2011, *Datasheet Xaar 1001*, Xaar plc, Cambridge UK.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Unterteilung verschiedener Designs zur Mikrotropfenerzeugung.	5
Abb. 2 Funktionsprinzip des Continuous-Jet-Verfahrens (entnommen aus: Lee 2003).....	6
Abb. 3 Grundfunktionsprinzip eines Drop-on-Demand-Druckkopfes: Die Membran wird aus ihrem Ruhezustand ausgelenkt und zieht Flüssigkeit in die Pumpkammer hinein. Bei Wechsel der Polung wird die Membran in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt und drückt das Fluid aus der Düse. Ist die Ansteuerspannung auf Null abgefallen, findet der Tropfenabriß statt und die Membran nimmt ihre Ursprungsposition ein (entnommen aus: Elsner 2009).	7
Abb. 4 Bubble-Jet Tropfenerzeuger: Ein Tropfen aus Flüssigkeit wird durch das Heizelement erhitzt. Die hierbei entstehende Dampfblase drückt das restliche Fluid aus der Düse. Nach Abschalten des Heizelements fällt die Dampfblase zusammen und ein einzelner Tropfen entsteht. (entnommen aus: Elsner 2009).	7
Abb. 5 Elemente eines Quarzkristalls (a); Vereinfachte Elementarzelle (b) (entnommen aus: PI 2009).	8
Abb. 6 Unpolarisierte Keramik mit strukturloser Anordnung der Kristalle (a). Unter Anwesenheit eines E-Feldes polarisierte Keramik (b) in der sich die Kristalle strukturiert angeordnet bleiben (c) (entnommen aus: PI 2009).	9
Abb. 7 Unter Anlegen eines elektrischen Feldes bildet sich in einer Piezokeramik je nach Richtung eine Verformung aus. Der Longitudinaleffekt, welcher sich parallel zur Polarisationsrichtung bei angelegtem E-Feld zeigt (a). Der Transversaleffekt, welcher sich senkrecht zur Polarisationsrichtung ausbildet (b). Der Schereffekt, welcher bei einem elektrischen Feld senkrecht zur Polarisationsrichtung auftritt und eine Scherung des Materials hervorruft (c).	10
Abb. 8 (a) Prinzip eines Piezostapelaktors: (1) Aktives Piezomaterial; (2) Positive Elektrode; (3) Negative Elektrode (entnommen aus: Günther 2008); (b) Kommerziell erhältliche Stapelaktoren (entnommen aus: PI 2009).	11
Abb. 9 Prinzip des Membranaktors in seiner Ruhelage (a) und unter Belegung mit einer Ansteuerspannung im verformten Zustand (b). Dargestellt ist der Aktor (1) und die passive Membran (2) (entnommen aus: Günther 2008).	11
Abb. 10 Strukturierter Aktor: (1) Basiselektrode; (2) Einzelne Aktorzunge.	12
Abb. 11 Klassifizierung piezobasierender Aktordesigns im Drop-On-Demand-Verfahren....	13
Abb. 12 Mikrotropfenerzeuger nach dem Rohrwandler-Prinzip im Schnitt: (1) Aktives Piezokeramikrörchen; (2) Fluidgefüllte Pumpkammer; (3) Düse (entnommen aus: Wijshoff 2008).	13
Abb. 13 Piezoaktuierter Paddelwandler: Der in der Pumpkammer liegende Aktor (1) biegt sich unter Ansteuerung und gibt so einen die Fluidströmung zur Düse frei (2). Nach Abschalten der Spannung schnellt der Aktor zurück auf seine Ausgangsposition (3) und drückt einen einzelnen Tropfen aus der Düse heraus (4) (entnommen aus: Seitz & Heinzl 2004).	14
Abb. 14 Scherwandler-Prinzip (entnommen aus: Seitz & Heinzl 2004).	15
Abb. 15 Prinzip eines Membranwandlers: Vor der Ansteuerung befindet sich der Aktor in Ruhelage (a). Wird eine zunächst negative Ansteuerspannung auf den Aktor gegeben, so wölbt sich dieser nach außen (b). Nach einem Polaritätswechsel biegt sich der bimorphe Aufbau nach innen und stößt so einen Tropfen aus (c). Nach Abschalten der	

Ansteuerspannung befindet sich der Aktor wieder in Ruhelage und ist für einen nächsten Zyklus bereit (d) (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).	16
Abb. 16 Monopolarer (a) und bipolarer (b) Impuls im Vergleich. Bei dem monopolaren Impuls sind drei Teilzeiten zu unterscheiden: (1) Steigzeit; (2) Haltezeit; (3) Fallzeit. Bei dem bipolaren Impuls werden dieselben Zeitabschnitte der Polungssphasen (negativ und positiv) und deren Abstand unterschieden (4).	17
Abb. 17 Konsekutive Folge monopolarer Impulse. Zwei aufeinander abgestimmte Impulse folgen in einer gewissen Zeit (1) aufeinander. Ziel dieser Ansteuerung ist die Verbesserung des Tropfenabisses.....	18
Abb. 18 Abfolge von zwei Impulsen unterschiedlicher Polung. Der zeitliche Abstand zwischen den Impulsen (1) ist nach Formel (2) zu wählen um den Effekt der Dämpfung der residualen Membranschwingungen zu erreichen.....	18
Abb. 19 Form und Auswirkungen einer speziell angepassten Impulsform: Die Impulsform ist ein dreiteiliges Konstrukt verschiedener Spannungen, welche nacheinander auf den Aktor gegeben werden (a). Es bildet sich eine Flüssigkeitssäule am Düsenaustritt (b). Durch den kurzzeitigen Vorschub des Meniskus entsteht ein kleinerer Tropfen in der Mitte der Düse (c). Der letzte Rückzug der Membran bewirkt eine Ablösung des kleinen Tropfens von der Düse (d) (entnommen aus: Chen 2002).	19
Abb. 20 Der am Lehrstuhl MiMed entwickelte Tropfenerzeuger: (1) Strukturierte Aktokeramik; (2) Membran aus Pyrex; (3) Pumpkammerstrukturen auf Silizium. ...	20
Abb. 21 Am Lehrstuhl entwickelte Aufnahmeverrichtung für Druckchips: (1) Kontaktiereinheit; (2) Befestigungseinheit; (3) Einschub für Heizelement; (4) Fluidzuführung; (5) Druckchip.	23
Abb. 22 Tropfenbildungsprozess mit dem am Lehrstuhl benutzten Druckkopf. In der letzten Sequenz ($460 \mu\text{s}$) ist ein gebildeter Satellitentropfen zu erkennen. Dieser beeinflusst das Druckbild und ist zu vermeiden (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).	23
Abb. 23 Zusammenhang zwischen Ansteuerungsspannung und Tropfengeschwindigkeit. Wie in Kapitel 7 erläutert, ist die Geschwindigkeit des Tropfens linear abhängig von der Ansteuerspannung. Der Einbruch ab einer Spannung von 200 V entsteht durch eine unkontrolliert schnelle Bewegung der Membran (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).	24
Abb. 24 Ersatzschaltbild Serienschaltung der Kondensatoren im Aktor und elektromechanisches Koppelsystem. Die Größen C_s und C_p repräsentieren die Basis-, bzw. Elektrodenkapazität. Die mechanische Kraft (F_m) und der elektrische Strom (I_{el}) stehen mit der applizierten Spannung (U_{el}), bzw. der Verformungsgeschwindigkeit (v_m) mit einem Koppelfaktor (k) in proportionaler Beziehung. Die Bewegung der Membran ist durch ein mechanisches Feder- (L_m), Masse- (C_m), Dämpfer-System (R_m) dargestellt (entnommen aus: Kagerer et al. 2011).	30
Abb. 25 Strukturierter Aktor mit eingetragenen Abmessungen: (1) Breite der Bodenelektrode (b_B); (2) Länge einer Zungenelektrode (l_Z); (3) Breite einer Elektrode (b_Z); (4) Breite des Dielektrikums an den Seiten der Elektroden.	31
Abb. 26 Achsen in der Piezokeramik (entnommen aus: PI 2009).	32
Abb. 27 3D-Struktur des Biegewandlers mit Abmessungen. Die Abmessungen entsprechen der Elektrodenbreite (b_z) und Länge (l_z) (vgl. hierzu Abb. 25). Die Größen der Piezo- und Trägerstruktur bezeichnen die jeweilige Höhe (h_p , h_T) bzw. den entsprechenden E-Modul (E_p , E_T) des Materials. Ebenfalls angegeben sind die Gesamtverschiebung (w_{ges}) und die Verschiebung (w) eines Elektrodenabschnitts der Länge 1 (entnommen aus: Günther 2008).	35
Abb. 28 Zwei miteinander verklebte Piezostreifen (1) werden mit gegensinnig gerichteten elektrischen Feldern angesteuert. Es ergeben sich die jeweiligen Wirkrichtungen (3) und (4) welche ein Moment m_{el} um die neutrale Faser (2) erzeugen.....	36

Abb. 29 Aufteilung des Balkens. Dargestellt sind die Teillängen l_a und l_i , die Verdrehwinkel am Ende der Balken ϕ_a und ϕ_i sowie die wirkenden Schnittmomente m_{ela} , m_{eli} , und m_R (nach: Günther 2008).	37
Abb. 30 Die schwarze Kurve stellt den Verlauf der Ansteuerspannung dar. Diese besitzt ihr Maximum bei 200 V. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Membranbewegung über die Zeit. Zu sehen ist, dass die Membran nach einer Zeit von 20 μs (1) ihre Maximalauslenkung erreicht und durch Zuge der Beschleunigung nachschwingt. Die Position wird während der Phase der Ansteuerung gehalten und geht nach Absinken der Spannung auf Null wieder zurück. Auch der Rückzug der Membran ist begleitet durch ein Nachschwingen bis diese in die Ausgangsposition zurückkehrt.	39
Abb. 31 Grundriss der Pumpkammer mit eingezeichneten Größen zur Berechnung der Grundfläche.....	40
Abb. 32 Annäherung des durch die abgesenkten Membran verdrängten Volumens durch ein Prisma, die Größen L und B entsprechen der Elektrodenlänge (l_z) bzw. -breite (b_z) des Aktors (entnommen aus Günther 2008).	41
Abb. 33 Hauptabmessungen eines Aktors: Elektrodenbreite (1), Elektrodenabstand (2).	43
Abb. 34 Schematische Darstellung des Sägeblatts zur Verdeutlichung des Auslaufs. Hier steht t für die Einschnitttiefe und a für den benötigten Auslauf.....	45
Abb. 35 Beispielprogramm für die Strukturierung eines Piezoaktors mit einer Einschnitttiefe von 260 μm mittels Einschnitten links und rechts der Elektroden und einer Elektrodenbreite von 1,5 mm.....	48
Abb. 36 Aufnahme des Raster-Elektronenmikroskops bei 30-facher Vergrößerung. Zu sehen sind unterschiedliche Einschnitttiefen. (a) und (b): 20 μm ; (c), (d): 100 μm ; (e), (f): 180 μm ; (g), (h): 260 μm . In der linken Spalte sind jeweils Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm, in der rechten Spalte 2,0 mm dargestellt.	49
Abb. 37 Aufnahme des Raster-Elektronenmikroskops bei 30-facher Vergrößerung. Zu sehen sind zwei Aktoren, welche mit jeweils einem rechts- und linksseitig der Elektrode platzierten Schnitt gefertigt wurden. Teil (a) zeigt hier eine Elektrodenbreite von 1,5 mm und Teil (b) eine Breite von 2,0 mm. Die Einschnitttiefe beträgt bei beiden Modellen 260 μm	50
Abb. 38 Aktor im Experiment (a): Die Kontaktierung mittels WireGlue befindet sich an den Enden der Elektroden, der Messpunkt des Laservibrometers befindet sich in der Mitte der Elektrode; (b) der Gesamtaufbau der Messstation: Im linken Teil sind Laservibrometer, Funktionsgenerator und Verstärker angeordnet, in der Mitte befindet sich das Oszilloskop und auf der rechten Seite ist der Messkopf des Vibrometers, die Plattform zur Befestigung der Aktoren sowie die Schutzhaube aus Plexiglas zu sehen.....	51
Abb. 39 Schematischer Strahlengang des Laserdopplerinterferometers (Entnommen aus: Günther 2008).	52
Abb. 40 Monopolarer Impuls, wie er im Experiment verwendet wird. Nach einer sehr kurzen Anstiegszeit (5 ns) wird das maximale Spannungsniveau (1) erreicht. Nach einer Haltezeit von 100 μs (2) fällt die Spannung wieder auf das Nullniveau herab.	54
Abb. 41 Bipolarer Impuls, wie er im Experiment verwendet wird. Ein negativer Impuls mit einer Spannungsamplitude von 30 V (1) wird über eine Zeit von 50 μs (2) gehalten. Die Polung der Ansteuerspannung wechselt und steigt auf das positive Maximalniveau (3). Nach einer Haltezeit von 100 μs (3) fällt die Spannung wieder auf 0 ab.....	55
Abb. 42 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran der Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 1,5 mm bei einer Spannung von 50 bis 200 V.	56
Abb. 43 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran der Aktoren mit einer Elektrodenbreite von 2,0 mm bei einer Spannung von 50 bis 200 V.	57

Abb. 44 Darstellung der Gesamtverschiebung der Membran über die Variation der Elektrodenbreite von 1,0 bis 2,5 mm. Die Einschnitttiefe beträgt hier 20 μm	58
Abb. 45 Dargestellt ist die Gesamtverschiebung der Membran über die Variation der Elektrodenbreiten von 1,0 bis 2,5 mm. Die Einschnitttiefe beträgt 260 μm ausgeführt mit Schnitten links und rechts der Elektrode („Cut“-Design).....	59
Abb. 46 Vergleich der Effizienz der beiden Designs. Hierbei ist die Effizienz in der Verschiebung (mm) pro aufgenommener Energiemenge (Joule) angegeben.....	59
Abb. 47 Verdeutlichung der Vergrößerung der Gesamtverschiebung durch eine bipolare Ansteuerung. Bei jeder Elektrodenbreite bietet die bipolare Ansteuerung einen Vorteil gegenüber der monopolaren Anregung. Die Einschnitttiefe beträgt 260 μm im „Cut“-Design.....	60
Abb. 48 Der Vorteil der bipolaren Ansteuerung ist über die Spannungsniveaus 50, 100 und 150 V stetig. Der dargestellte Aktor besitzt eine Elektrode mit 2,0 mm Breite und eine Einschnitttiefe von 260 μm im „Cut“-Design.....	61
Abb. 49 Screenshot des Oszilloskops aus zwei Messungen. Monopolare Ansteuerung (a) und bipolare Ansteuerung (b). Dargestellt sind: (1) Verlauf der Ansteuerspannung; (2) Messkurve des Oszilloskops, welche die Membranverschiebung widerspiegelt; (3) durchschnittliche Verschiebung der Membran über die Zeit.....	62
Abb. 45 Dargestellt sind die Abweichungen der Ladezeiten von monopolarer zu bipolarer Ansteuerung jeder Elektrode. Durch die geringen Abweichungen wird der Vorteil des Trampolin-Effektes verdeutlicht. Die Abszisse zeigt die Nummer der gemessenen Elektrode.	63
Abb. 46 Darstellung des Frequenzverhaltens der Aktoren der Einschnitttiefe 20 μm . Die Ansteuerung erfolgt hier monopolar bei einer Spannung von 150 V.	64
Abb. 47 Darstellung des Frequenzverhaltens der Aktoren mit einer Einschnitttiefe von 20 μm . Angesteuert wird mit einem bipolaren Impuls mit einer positiven Spannungsspitze von 150 V.....	65
Abb. 48 Gezeigt ist das Frequenzverhalten der Aktoren der Einschnitttiefe 260 μm im „Cut“-Design. Die Ansteuerung erfolgt mittels eines monopolaren Impulses bei einer Spannung von 150 V.....	65
Abb. 49 Dargestellt ist die Maximalverschiebung der Membran bei unterschiedlichen Frequenzen. Die Aktoren unterschiedlicher Breite besitzen eine Einschnitttiefe von 260 μm im „Cut“-Design. Die Ansteuerung erfolgt bipolar mit einem positiven Spannungsniveau von 150 V.....	66
Abb. 50 Vergleich der Leistungsfähigkeit des Referenzdesigns mit der des neuen Designs. .68	
Abb. 51 Vergleich der Leistungsfähigkeit des Referenzdesigns mit der des neuen Designs. Dargestellt ist die maximale Membranverschiebung des 1,5 mm breiten Aktors mit einer Einschnitttiefe von 20 μm bei monopolärer Ansteuerung (schwarze Linie) und die maximale Verschiebung des Aktors mit einer Elektrodenbreite von 2,0 mm und einer Einschnitttiefe von 260 μm im „Cut“-Design bei bipolarer Ansteuerung (blaue Linie).	68

12 Anhang

12.1 Datenblatt VIBRIT 1876

 Johnson Matthey		Datenblatt Piezokeramische Massen								Datum: März 2009 Seite 1/1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Piezokeramik wurde bei Johnson Matthey Piezoproducts (ehemals Argillon GmbH) aus der Grundlagenforschung heraus zu serienreifen Werkstoffen entwickelt, die unter dem Namen VIBRIT® patentiert sind.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Die hier angegebenen Keramikmassen werden von uns in Großserien hergestellt.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Kenngröße</th> <th colspan="2">Keramikklassse</th> <th colspan="8">VIBRIT</th> <th rowspan="2">Symbol</th> <th rowspan="2">Einheit</th> </tr> <tr> <th>420</th> <th>524.5</th> <th>1100</th> <th>202</th> <th>455</th> <th>1599</th> <th>1224</th> <th>1334</th> <th>1876</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Elektrische Daten</td> <td colspan="11" rowspan="2"></td></tr> </tbody> </table>											Kenngröße	Keramikklassse		VIBRIT								Symbol	Einheit	420	524.5	1100	202	455	1599	1224	1334	1876	Elektrische Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Kenngröße	Keramikklassse		VIBRIT									Symbol	Einheit																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	420	524.5	1100	202	455	1599	1224	1334	1876																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Elektrische Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dielektrizitätszahlen ($\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$)</th> <th>$\epsilon_{r11}^T$</th> <th></th> <th>1.600</th> <th>---</th> <th>4.750</th> <th>960</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>700</th> <th>---</th> <th>6.500</th> </tr> <tr> <th></th> <th>ϵ_{r33}^T</th> <th></th> <th>1.600</th> <th>2.400</th> <th>4.500</th> <th>1.000</th> <th>1.450</th> <th>250</th> <th>550</th> <th>3.500</th> <th>7.000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dielektr. Verlustfaktor</td> <td>$\tan \delta$</td> <td>10^{-3}</td> <td>20</td> <td>19</td> <td>25</td> <td>7</td> <td>5</td> <td>7</td> <td>30</td> <td>7</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Koefizitivfeldstärke</td> <td>E_c</td> <td>10^3 V/m</td> <td>900</td> <td>1.200</td> <td>570</td> <td>2.400</td> <td>1.280</td> <td>---</td> <td>730</td> <td>615</td> <td>390</td> </tr> <tr> <td>Elektr. Leitfähigkeit</td> <td>σ</td> <td>$10^{-12} \text{ 1/}\Omega\text{m}$</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> <td><1</td> </tr> </tbody> </table>												Dielektrizitätszahlen ($\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$)	ϵ_{r11}^T		1.600	---	4.750	960	---	---	700	---	6.500		ϵ_{r33}^T		1.600	2.400	4.500	1.000	1.450	250	550	3.500	7.000	Dielektr. Verlustfaktor	$\tan \delta$	10^{-3}	20	19	25	7	5	7	30	7	25	Koefizitivfeldstärke	E_c	10^3 V/m	900	1.200	570	2.400	1.280	---	730	615	390	Elektr. Leitfähigkeit	σ	$10^{-12} \text{ 1/}\Omega\text{m}$	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Dielektrizitätszahlen ($\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$)	ϵ_{r11}^T		1.600	---	4.750	960	---	---	700	---	6.500																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	ϵ_{r33}^T		1.600	2.400	4.500	1.000	1.450	250	550	3.500	7.000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Dielektr. Verlustfaktor	$\tan \delta$	10^{-3}	20	19	25	7	5	7	30	7	25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Koefizitivfeldstärke	E_c	10^3 V/m	900	1.200	570	2.400	1.280	---	730	615	390																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Elektr. Leitfähigkeit	σ	$10^{-12} \text{ 1/}\Omega\text{m}$	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elektromechanische Daten</th> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <th>Piezoelektrische Kopplungsfaktoren</th> <td>k_p</td> <td></td> <td>0,60</td> <td>0,64</td> <td>0,70</td> <td>0,50</td> <td>0,57</td> <td>0,07</td> <td>0,45</td> <td>0,64</td> <td>0,67</td> </tr> <tr> <th></th> <td>k_{31}</td> <td></td> <td>0,34</td> <td>0,36</td> <td>0,42</td> <td>0,28</td> <td>0,31</td> <td>0,03</td> <td>0,24</td> <td>0,33</td> <td>0,38</td> </tr> <tr> <th></th> <td>k_t</td> <td></td> <td>0,48</td> <td>0,44</td> <td>0,50</td> <td>0,45</td> <td>0,47</td> <td>0,50</td> <td>0,55</td> <td>0,47</td> <td>0,48</td> </tr> <tr> <th></th> <td>k_{33}</td> <td></td> <td>0,69</td> <td>0,69</td> <td>0,71</td> <td>0,60</td> <td>0,60</td> <td>0,24</td> <td>0,45</td> <td>0,67</td> <td>0,75</td> </tr> <tr> <th></th> <td>k_{15}</td> <td></td> <td>0,66</td> <td>0,72</td> <td>0,67</td> <td>0,57</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>0,64</td> <td>0,67</td> <td>0,76</td> </tr> <tr> <th>Piezoelektrische Ladungskonstanten</th> <td>d_{31}</td> <td>10^{-12} C/N</td> <td>-160</td> <td>-230</td> <td>-315</td> <td>-90</td> <td>-120</td> <td>-3,80</td> <td>-58</td> <td>-230</td> <td>-385</td> </tr> <tr> <th></th> <td>d_{33}</td> <td>$= 10^{-12} \text{ m/V}$</td> <td>355</td> <td>430</td> <td>640</td> <td>205</td> <td>125</td> <td>31</td> <td>115</td> <td>500</td> <td>860</td> </tr> <tr> <th></th> <td>d_{15}</td> <td></td> <td>525</td> <td>690</td> <td>895</td> <td>295</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>310</td> <td>740</td> <td>1160</td> </tr> <tr> <th>Piezoelektrische Spannungskonstanten</th> <td>g_{31}</td> <td>$10^{-3} (\text{V/m})/\text{N}$</td> <td>-11,00</td> <td>-9,00</td> <td>-7,90</td> <td>-10,00</td> <td>-9,70</td> <td>-1,70</td> <td>-12,00</td> <td>-7,00</td> <td>-5,90</td> </tr> <tr> <th></th> <td>g_{33}</td> <td></td> <td>25,00</td> <td>17,00</td> <td>16,00</td> <td>27,00</td> <td>9,90</td> <td>14,10</td> <td>23,80</td> <td>15,50</td> <td>13,30</td> </tr> <tr> <th></th> <td>g_{15}</td> <td></td> <td>37,00</td> <td>30,00</td> <td>21,00</td> <td>35,00</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>50,70</td> <td>25,00</td> <td>20,00</td> </tr> <tr> <th>Mechanische Daten</th> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <th>Elastizitätskoefizienten</th> <td>S_{11}^E</td> <td></td> <td>15,40</td> <td>14,90</td> <td>14,20</td> <td>11,80</td> <td>12,70</td> <td>7,40</td> <td>12,00</td> <td>15,50</td> <td>15,80</td> </tr> <tr> <th></th> <td>S_{12}^E</td> <td></td> <td>-5,70</td> <td>-4,80</td> <td>-3,70</td> <td>-4,50</td> <td>-5,10</td> <td>-2,70</td> <td>-5,50</td> <td>-6,10</td> <td>-5,60</td> </tr> <tr> <th></th> <td>S_{13}^E</td> <td></td> <td>-6,50</td> <td>-6,00</td> <td>-6,50</td> <td>---</td> <td>-6,70</td> <td>-4,20</td> <td>-3,70</td> <td>-6,50</td> <td>-8,00</td> </tr> <tr> <th></th> <td>S_{33}^E</td> <td></td> <td>18,70</td> <td>17,20</td> <td>20,60</td> <td>13,80</td> <td>12,50</td> <td>7,60</td> <td>13,50</td> <td>17,50</td> <td>20,50</td> </tr> <tr> <th></th> <td>S_{55}^E</td> <td></td> <td>45,00</td> <td>45,00</td> <td>43,00</td> <td>31,00</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>39,50</td> <td>44,50</td> <td>57,80</td> </tr> <tr> <th>Frequenzkonstanten</th> <td>N_{11}^E</td> <td>$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$</td> <td>2.000</td> <td>2.030</td> <td>1.940</td> <td>2.290</td> <td>2.260</td> <td>2.900</td> <td>2.280</td> <td>2.050</td> <td>1.970</td> </tr> <tr> <th>(Schallgeschwindigkeit)</th> <td>$N_{11}^E = 0.5v_s^E$</td> <td></td> <td>1.460</td> <td>1.460</td> <td>1.470</td> <td>1.660</td> <td>1.595</td> <td>2.200</td> <td>1.640</td> <td>1.440</td> <td>1.400</td> </tr> <tr> <th></th> <td>N_t</td> <td>m/s</td> <td>1.940</td> <td>2.120</td> <td>2.070</td> <td>---</td> <td>2.100</td> <td>2.200</td> <td>1.930</td> <td>2.050</td> <td>2.030</td> </tr> <tr> <th></th> <td>$N_{33}^D = 0.5v_s^D$</td> <td></td> <td>1.830</td> <td>1.870</td> <td>1.870</td> <td>1.920</td> <td>1.700</td> <td>2.250</td> <td>1.740</td> <td>1.800</td> <td>1.860</td> </tr> <tr> <th></th> <td>$N_{55}^D = 0.5v_s^D$</td> <td></td> <td>1.140</td> <td>1.200</td> <td>1.140</td> <td>1.240</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>1.190</td> <td>1.130</td> <td>1.130</td> </tr> <tr> <th>Mechanische Schwinggüte</th> <td>Q</td> <td></td> <td>100</td> <td>80</td> <td>50</td> <td>800</td> <td>890</td> <td>1200</td> <td>135</td> <td>220</td> <td>45</td> </tr> <tr> <th>Dichte</th> <td>ρ</td> <td>10^3 kg/m^3</td> <td>7,60</td> <td>7,90</td> <td>8,10</td> <td>7,70</td> <td>7,70</td> <td>6,90</td> <td>7,60</td> <td>7,90</td> <td>8,00</td> </tr> <tr> <th>Depolarisationsdruck (5% Depolarisation)</th> <td></td> <td></td> <td>30</td> <td>70</td> <td>30</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <th>Druckfestigkeit</th> <td></td> <td>10^6 N/m^2</td> <td>>600</td> <td>>600</td> <td>>600</td> <td>>600</td> <td>>600</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <th>Zugfestigkeit</th> <td></td> <td></td> <td>-80</td> <td>-80</td> <td>-80</td> <td>-80</td> <td>-80</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <th>Temperaturverhalten</th> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <th>Temperaturkoefizienten</th> <td>TK_{r33}^T</td> <td>$10^{-6} 1/\text{K}$</td> <td>3.500</td> <td>2.500</td> <td>6.000</td> <td>3.000</td> <td>2.400</td> <td>3.500</td> <td>4.800</td> <td>2.500</td> <td>6.700</td> </tr> <tr> <th>der: Dielektrizitätszahl</th> <td>TKN_p</td> <td></td> <td>-100</td> <td>150</td> <td>400</td> <td>100</td> <td>250</td> <td>---</td> <td>-170</td> <td>400</td> <td>---</td> </tr> <tr> <th>Frequenzkonstanten</th> <td></td> </tr> <tr> <th>Thermische Daten</th> <td colspan="11" rowspan="2"></td></tr> <tr> <td colspan="12"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Curetemperatur</th> <th>θ_c</th> <th>°C</th> <th>320</th> <th>290</th> <th>177</th> <th>330</th> <th>300</th> <th>245</th> <th>305</th> <th>200</th> <th>121</th> </tr> <tr> <th>Pyroelektrischer Koefizient</th> <th>ρ</th> <th>$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$</th> <th>420</th> <th>---</th> <th>430</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> <tr> <th>Spezifische Wärme</th> <th>c</th> <th>Ws/kgK</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> </tr> <tr> <th>Wärmeleitfähigkeit</th> <th>λ</th> <th>W/K · m</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> </tr> <tr> <th>Thermische Ausdehnung</th> <th>α^E</th> <th>$10^{-6} 1/\text{K}$</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Johnson Matthey</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Piezoproducts</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Postfach 60</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>D-96254 Redwitz</td> <td colspan="11"></td></tr> </tbody> </table> </td></tr> </thead></table>	Elektromechanische Daten												Piezoelektrische Kopplungsfaktoren	k_p		0,60	0,64	0,70	0,50	0,57	0,07	0,45	0,64	0,67		k_{31}		0,34	0,36	0,42	0,28	0,31	0,03	0,24	0,33	0,38		k_t		0,48	0,44	0,50	0,45	0,47	0,50	0,55	0,47	0,48		k_{33}		0,69	0,69	0,71	0,60	0,60	0,24	0,45	0,67	0,75		k_{15}		0,66	0,72	0,67	0,57	---	---	0,64	0,67	0,76	Piezoelektrische Ladungskonstanten	d_{31}	10^{-12} C/N	-160	-230	-315	-90	-120	-3,80	-58	-230	-385		d_{33}	$= 10^{-12} \text{ m/V}$	355	430	640	205	125	31	115	500	860		d_{15}		525	690	895	295	---	---	310	740	1160	Piezoelektrische Spannungskonstanten	g_{31}	$10^{-3} (\text{V/m})/\text{N}$	-11,00	-9,00	-7,90	-10,00	-9,70	-1,70	-12,00	-7,00	-5,90		g_{33}		25,00	17,00	16,00	27,00	9,90	14,10	23,80	15,50	13,30		g_{15}		37,00	30,00	21,00	35,00	---	---	50,70	25,00	20,00	Mechanische Daten												Elastizitätskoefizienten	S_{11}^E		15,40	14,90	14,20	11,80	12,70	7,40	12,00	15,50	15,80		S_{12}^E		-5,70	-4,80	-3,70	-4,50	-5,10	-2,70	-5,50	-6,10	-5,60		S_{13}^E		-6,50	-6,00	-6,50	---	-6,70	-4,20	-3,70	-6,50	-8,00		S_{33}^E		18,70	17,20	20,60	13,80	12,50	7,60	13,50	17,50	20,50		S_{55}^E		45,00	45,00	43,00	31,00	---	---	39,50	44,50	57,80	Frequenzkonstanten	N_{11}^E	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	2.000	2.030	1.940	2.290	2.260	2.900	2.280	2.050	1.970	(Schallgeschwindigkeit)	$N_{11}^E = 0.5v_s^E$		1.460	1.460	1.470	1.660	1.595	2.200	1.640	1.440	1.400		N_t	m/s	1.940	2.120	2.070	---	2.100	2.200	1.930	2.050	2.030		$N_{33}^D = 0.5v_s^D$		1.830	1.870	1.870	1.920	1.700	2.250	1.740	1.800	1.860		$N_{55}^D = 0.5v_s^D$		1.140	1.200	1.140	1.240	---	---	1.190	1.130	1.130	Mechanische Schwinggüte	Q		100	80	50	800	890	1200	135	220	45	Dichte	ρ	10^3 kg/m^3	7,60	7,90	8,10	7,70	7,70	6,90	7,60	7,90	8,00	Depolarisationsdruck (5% Depolarisation)			30	70	30	120	120	---	---	---	---	Druckfestigkeit		10^6 N/m^2	>600	>600	>600	>600	>600	---	---	---	---	Zugfestigkeit			-80	-80	-80	-80	-80	---	---	---	---	Temperaturverhalten												Temperaturkoefizienten	TK_{r33}^T	$10^{-6} 1/\text{K}$	3.500	2.500	6.000	3.000	2.400	3.500	4.800	2.500	6.700	der: Dielektrizitätszahl	TKN_p		-100	150	400	100	250	---	-170	400	---	Frequenzkonstanten												Thermische Daten												<table border="1"> <thead> <tr> <th>Curetemperatur</th> <th>θ_c</th> <th>°C</th> <th>320</th> <th>290</th> <th>177</th> <th>330</th> <th>300</th> <th>245</th> <th>305</th> <th>200</th> <th>121</th> </tr> <tr> <th>Pyroelektrischer Koefizient</th> <th>ρ</th> <th>$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$</th> <th>420</th> <th>---</th> <th>430</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> <tr> <th>Spezifische Wärme</th> <th>c</th> <th>Ws/kgK</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> </tr> <tr> <th>Wärmeleitfähigkeit</th> <th>λ</th> <th>W/K · m</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> </tr> <tr> <th>Thermische Ausdehnung</th> <th>α^E</th> <th>$10^{-6} 1/\text{K}$</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Johnson Matthey</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Piezoproducts</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Postfach 60</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>D-96254 Redwitz</td> <td colspan="11"></td></tr> </tbody> </table>												Curetemperatur	θ_c	°C	320	290	177	330	300	245	305	200	121	Pyroelektrischer Koefizient	ρ	$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$	420	---	430	---	---	---	---	---	---	Spezifische Wärme	c	Ws/kgK	380	380	380	380	380	380	380	380	380	Wärmeleitfähigkeit	λ	W/K · m	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	Thermische Ausdehnung	α^E	$10^{-6} 1/\text{K}$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	Johnson Matthey												Piezoproducts												Postfach 60												D-96254 Redwitz											
Elektromechanische Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Piezoelektrische Kopplungsfaktoren	k_p		0,60	0,64	0,70	0,50	0,57	0,07	0,45	0,64	0,67																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	k_{31}		0,34	0,36	0,42	0,28	0,31	0,03	0,24	0,33	0,38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	k_t		0,48	0,44	0,50	0,45	0,47	0,50	0,55	0,47	0,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	k_{33}		0,69	0,69	0,71	0,60	0,60	0,24	0,45	0,67	0,75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	k_{15}		0,66	0,72	0,67	0,57	---	---	0,64	0,67	0,76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Piezoelektrische Ladungskonstanten	d_{31}	10^{-12} C/N	-160	-230	-315	-90	-120	-3,80	-58	-230	-385																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	d_{33}	$= 10^{-12} \text{ m/V}$	355	430	640	205	125	31	115	500	860																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	d_{15}		525	690	895	295	---	---	310	740	1160																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Piezoelektrische Spannungskonstanten	g_{31}	$10^{-3} (\text{V/m})/\text{N}$	-11,00	-9,00	-7,90	-10,00	-9,70	-1,70	-12,00	-7,00	-5,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	g_{33}		25,00	17,00	16,00	27,00	9,90	14,10	23,80	15,50	13,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	g_{15}		37,00	30,00	21,00	35,00	---	---	50,70	25,00	20,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Mechanische Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Elastizitätskoefizienten	S_{11}^E		15,40	14,90	14,20	11,80	12,70	7,40	12,00	15,50	15,80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	S_{12}^E		-5,70	-4,80	-3,70	-4,50	-5,10	-2,70	-5,50	-6,10	-5,60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	S_{13}^E		-6,50	-6,00	-6,50	---	-6,70	-4,20	-3,70	-6,50	-8,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	S_{33}^E		18,70	17,20	20,60	13,80	12,50	7,60	13,50	17,50	20,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	S_{55}^E		45,00	45,00	43,00	31,00	---	---	39,50	44,50	57,80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Frequenzkonstanten	N_{11}^E	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	2.000	2.030	1.940	2.290	2.260	2.900	2.280	2.050	1.970																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
(Schallgeschwindigkeit)	$N_{11}^E = 0.5v_s^E$		1.460	1.460	1.470	1.660	1.595	2.200	1.640	1.440	1.400																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	N_t	m/s	1.940	2.120	2.070	---	2.100	2.200	1.930	2.050	2.030																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	$N_{33}^D = 0.5v_s^D$		1.830	1.870	1.870	1.920	1.700	2.250	1.740	1.800	1.860																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	$N_{55}^D = 0.5v_s^D$		1.140	1.200	1.140	1.240	---	---	1.190	1.130	1.130																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Mechanische Schwinggüte	Q		100	80	50	800	890	1200	135	220	45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Dichte	ρ	10^3 kg/m^3	7,60	7,90	8,10	7,70	7,70	6,90	7,60	7,90	8,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Depolarisationsdruck (5% Depolarisation)			30	70	30	120	120	---	---	---	---																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Druckfestigkeit		10^6 N/m^2	>600	>600	>600	>600	>600	---	---	---	---																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Zugfestigkeit			-80	-80	-80	-80	-80	---	---	---	---																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Temperaturverhalten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Temperaturkoefizienten	TK_{r33}^T	$10^{-6} 1/\text{K}$	3.500	2.500	6.000	3.000	2.400	3.500	4.800	2.500	6.700																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
der: Dielektrizitätszahl	TKN_p		-100	150	400	100	250	---	-170	400	---																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Frequenzkonstanten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Thermische Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Curetemperatur</th> <th>θ_c</th> <th>°C</th> <th>320</th> <th>290</th> <th>177</th> <th>330</th> <th>300</th> <th>245</th> <th>305</th> <th>200</th> <th>121</th> </tr> <tr> <th>Pyroelektrischer Koefizient</th> <th>ρ</th> <th>$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$</th> <th>420</th> <th>---</th> <th>430</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> <tr> <th>Spezifische Wärme</th> <th>c</th> <th>Ws/kgK</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> <th>380</th> </tr> <tr> <th>Wärmeleitfähigkeit</th> <th>λ</th> <th>W/K · m</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> <th>1,2</th> </tr> <tr> <th>Thermische Ausdehnung</th> <th>α^E</th> <th>$10^{-6} 1/\text{K}$</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Johnson Matthey</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Piezoproducts</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>Postfach 60</td> <td colspan="11"></td></tr> <tr> <td>D-96254 Redwitz</td> <td colspan="11"></td></tr> </tbody> </table>												Curetemperatur	θ_c	°C	320	290	177	330	300	245	305	200	121	Pyroelektrischer Koefizient	ρ	$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$	420	---	430	---	---	---	---	---	---	Spezifische Wärme	c	Ws/kgK	380	380	380	380	380	380	380	380	380	Wärmeleitfähigkeit	λ	W/K · m	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	Thermische Ausdehnung	α^E	$10^{-6} 1/\text{K}$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	Johnson Matthey												Piezoproducts												Postfach 60												D-96254 Redwitz																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Curetemperatur	θ_c	°C	320	290	177	330	300	245	305	200	121																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Pyroelektrischer Koefizient	ρ	$10^{-6} \text{ As/cm}^2\text{K}$	420	---	430	---	---	---	---	---	---																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Spezifische Wärme	c	Ws/kgK	380	380	380	380	380	380	380	380	380																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/K · m	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Thermische Ausdehnung	α^E	$10^{-6} 1/\text{K}$	7	7	7	7	7	7	7	7	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Johnson Matthey																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Piezoproducts																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Postfach 60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D-96254 Redwitz																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

12.2 Messwerte des Experiments

Druckkopf

8.1.

Datum	18. Mai		
Elektrodenbreite [mm]:	1,00		
Einschnitttiefe [μm]:	100		
Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]:	23,7		
Luftfeuchteigkeit [% rel]:	33		
Elektrode:	1	2	3
Messreihe 1 (Maximalhub) [mV]:			
50 V	41,7	47,9	35,1
100 V	91,7	107,7	91,1
150 V	153,5	173,4	142
200 V	213,6	243,8	199
Messreihe 1 (Ladezeit) [μs]:			
50 V	44,65	54,7	54,39
100 V	55,85	54,19	38
150 V	45,05	54,3	55,26
200 V	44,46		38,48
Messreihe 2 (Maximalhub) [mV]:			
50 V	52,3	64,7	46,2
100 V	110,7	126	97,6
150 V	167,4	190	151,7
Messreihe 2 (Ladezeit) [μs]:			
50 V	95,3	104,37	87,58
100 V	94,48	104,6	87,71
150 V	94,5	105,54	87,91
Messreihe 3 (Maximalhub) [mV]:			
-15 V	10,7	13,1	11,8
-30 V	23,1	26,6	20,2
Messreihe 3 (Ladezeit) [μs]:			
-15 V	45,62	53,77	38,23
-30 V	45,09	54,17	38
Messreihe 4 (Maximalhub) [mV]:			
2000 Hz	150,3	167,8	137,7
4000 Hz	144,4	166,2	134,6
6000 Hz	146,5	167,9	122,7
8000 Hz	124	134,4	123,2
10000 Hz	240,4	244	202,2
Messreihe 5 (Maximalhub) [mV]:			
2000 Hz	165	182,5	141,4
4000 Hz	165,5	198,4	154,2
6000 Hz	182,4	196,5	145,4
8000 Hz	177,4	164,5	137,3
10000 Hz	34,1	49,3	25,5

8.2.

8.3.

18. Mai			18. Mai		
1	2	3	1	2	3
40,1	55,1	60,4	55,7	55,1	53,6
96,4	124,5	139,3	123,5	127,5	128,6
169	211,3	235,5	202,2	211	214
263	339	370	285,9	293,5	317
41,72	41,62	41,33	37,8	38,77	45,68
42,08	38,79	40,7	38,91	44,58	46,09
42,81	40,04	40,24	37,88	44,69	47,53
43,55	40,54	40,24	37,88	45,03	47,62
59,1	67,4	70,3	73,5	75,3	77,7
117,6	142,4	151,4	144,4	147,5	164,4
194,3	233,2	250,6	217,7	230,4	233,6
93,34	89,13	91,04	87,58	94,09	95,92
93,02	89,12	91,02	87,65	94,26	95,86
93,1	89,8	91,02	87,68	94,43	96,55
13,4	15,8	16,7	15,4	16,1	16
25,6	30,4	34,9	30,6	31,8	31,2
40,59	38,79	42,32	38,39	44,21	48,41
41,15	40,67	41,37	37,63	44,74	48,41
178,4	221,7	241,8	204,9	207,9	211,4
189,8	223,8	238,5	200,7	198	198,3
198,5	252,4	275,6	195,9	192,4	187,7
167	201,6	214,1	192	218,4	227,8
216,9	256,2	245	322	341	405
194,8	235,3	249	223,8	230	236,6
194,1	245,3	272,8	227,9	243	260,4
219,4	250	231,9	232,3	256	287,5
162,3	202,9	222,2	251,8	206	238,6
43,1	67	64,1	24,6	26	3,5

8.4.

9.1.

18. Mai			21. Mai		
1	2	3	1	2	3
62,7	64,4	61,3	30	27,5	16,3
153,3	143,3	140,5	70,7	64,8	36,9
248,4	240,7	234,9	117,7	103,9	60,5
371	364	360	163,1	122,4	75,7
37,12	44,81	45,93	25	16,31	22,42
37,23	45,55	46,35	24,9	16,77	22,33
37,22	45,67	46,4	24,87	17,02	22,31
37,22	45,67		24,74	17,27	22,33
91	85,5	87,5	40,5	37,3	17,1
177	170	168,9	83,4	70,8	38,7
279	261,3	261	125,1	100,9	60,3
87,34	95,63	97,33	74,31	66,38	72,82
87,31	95,63	97,34	73,32	66,85	72,74
87,22	95,62	97,74	73,83	67,26	72,69
18,3	18,7	17,3	9,1	8	5,8
39,4	36,2	34,1	19	15,6	9,3
37,14	45,25	46,37	24,77	17,84	22,63
37,04	45,5	46,71	24,1	16,58	21,97
259	247	241	118,5	90,7	55,6
251	230	212	118,4	87,4	55,2
247	212	185	120,4	85,4	54,2
243	281	286	124,5	95,2	55,2
383	397	426	92	71,2	51,5
283	269	262	128,7	94,1	58,4
288	279	286	123,6	92,5	57,9
280	290	321	130,7	89,6	56,4
345	265	262	156,4	86,7	51,1
37	23	10	61,7	46,2	20,8

9.2.

9.3.

18. Mai			21. Mai		
1	2	3	1	2	3
2,50			1,50		
100			100		
23,9			24,9		
39			41		
66,2	69,8	69,7	27,7	34,2	35
145,9	155,6	155	63,2	79,7	79,9
230	255,6	262	103,9	129,9	125,7
343	393	390	142	182,8	177,8
43,36	46,37		14,03	15,83	15,41
45,48	46,9	52,83	13,51	15,8	15,43
46,04	47,68	52,84	14,55	15,8	15,43
36,88	51,88	54,58	14,55	15,9	15,95
77,3	91	98,4	31,5	41	41,4
155,9	178	186,3	67,8	86,5	88,5
246,7	281	287,8	107,9	136,7	136,1
86,74	98,9	103,18	63,68	65,05	66,04
86,77	101,25	103,18	63,6	65,05	66,03
88,73	101,21	103,19	63,77	65,87	66,04
16,6	21,3	20,7	7,7	10,2	9,5
33,2	43	39,2	14,9	20,9	19,9
45,09	46,66	50,78	14,2	16,35	15,83
45,72	46,36	52,18	13,5	15,97	15,72
230	262	262	100,8	128	127,7
240	273	262	103,7	128,3	130
241	273	251	102,1	129	127,3
212	267	271	102,3	129,2	132,5
363	405	494	99,2	119,5	117,3
256	290	301	106,4	133,7	136,8
264	310	339	106,1	132,9	137,2
267	337	394	106,1	139,7	142,2
310	272	287	107,8	118,7	117,4
42	6	25	18,9	45,3	45,3

9.4.

10.1.

21. Mai			21. Mai		
1	2	3	1	2	3
45,9	50,2	32,4	34,8	56,3	48
102,6	111,7	76,7	80,2	123,6	107,4
170,2	186,6	126,7	128	197,4	179,3
246,6	270,8	177,3	179,7	282,6	233,3
22,64	15,87	23,27	37,5	19,5	85,43
22,61	15,87	23,88	14,3	19,5	85,45
22,61	15,93	23,39	14,3	19,5	86,39
23,54	16,09	23,59	14,3	19,5	87,52
57,2	62,1	40,6	39,2	62,5	46,3
117,4	127,4	85,1	86,6	129	99,5
186,2	201,7	132,1	134,6	215,2	165,3
73,23	66,74	73,64	64,8	67,5	137,2
73,12	66,73	73,46	64	69	136,99
73,1	66,73	73,67	64,4	90,2	136,9
12,7	13,5	9,8	9,9	15,5	11,8
27,3	29,1	18,9	21	31	24,4
22,58	16,47	23,81	14,5	41,3	38,03
22,4	16,44	23,41	37,8	40,3	37,68
175	189,4	126,4	128,4	204,8	161,4
177,1	190,2	126,5	132,1	208	164,8
176,6	190	128,5	124,3	199,3	153,2
180,6	193,5	130,8	115,8	215,4	139,7
155,3	160,9	121,2	102,1	190,5	171,2
184,8	200,2	133,9	133,7	218,2	162,7
186	199,1	134,1	133,9	227,2	171,4
195	206,7	135,9	131,6	206,6	140
219,9	219,2	145,7	98,5	241,4	179,6
72,5	68,3	40,7	41,1	55,9	2,9

10.2.

10.3.

14. Mai			21. Mai		
1	2	3	1	2	3
40,4	24,9	36,7	8,2	8,6	18,8
93,2	52,7	73,6	20,3	19,1	44,4
149,4	77,4	123,4	32,6	32,4	72,8
137,7	95,5	182,6	43,2	43,5	125,2
49,15	25,51	49,96	13,2	14,75	11,22
51,07	25,25	49,81	13,3	14,75	12,23
52,53	24,69	41,52	13,3	14,73	12,21
53,37	25,38	41,24	13,38	14,7	12,23
44,5	25,1	41,5	12,8	11	22,9
72,5	37	82,6	23,1	19,9	45,9
102,3	48	132,9	35,1	34,4	81,4
102,82	75,34	99,42	63,7	65,17	60,45
103,41	74,23	100,15	63,7	65,1	61,26
103,32	73,48	90,9	63,7	65,1	62,03
9,7	9,9	10,6	2,6	2,3	6
20,6	17,6	20,5	5,6	5,6	12
54	25,91	48,47	13,4	16	10,67
56,32	25,71	49,1	13,5	15,3	9,81
99,6	58,9	120,4	32,1	30,9	72,9
80,5	68	120	33,7	33,3	74,6
70,7	93,4	84,7	32,1	31,2	75,2
126,6	166,1	180,3	33,4	31,4	77,5
175,5	69,4	182,7	35,5	34,6	80,4
109,1	55,1	127,9	36,3	33,4	83,5
127,3	85,1	139,4	37,5	33,9	83,1
137,7	146,9	155,6	36,4	33	81,7
174	260,9	161,3	35,3	26,6	79,8
105,7	9,7	26,4	19,5	10,5	16

10.4.

11.1.

14. Mai			07. Mai		
1	2	3	1	2	3
32	35	37,5	28,6	25,15	29,8
74,6	80,3	87,3	59,6	51	70,8
124	133,6	145,6	89,6	78,3	119,4
173,3	185,4	201,5	122	98,1	169
35,29	36,89	35,84	54,02	19,83	47,14
35,93	40,06	35,85	54,77	19,83	47,14
35,9	16,01	35,85	55,49	19,91	48,64
35,88	40,12	35,68	56,17	20,48	48,64
43,1	44,7	47,5	38	39,4	45,5
86	90,9	97,5	63,8	62,3	82,9
134,5	138,8	153,9	90	82,9	120,3
85,4	89,14	84,63	105,14	70,47	96,41
85,49	89,99	85,87	105,36	70,47	97,7
85,65	90,58	85,31	105,78	70,47	97,98
9,4	10,1	10,6	8,22	8,04	9,1
19,3	21,5	22	16	17,68	18,1
35,66	39,59	41,76	55,82	20,49	45,9
35,63	38,8	34,98	55,82	20,46	45,9
126,3	131,1	144,5	96,1	75,7	123
133,7	137	146,2	90,3	76,8	121,5
148,2	141,6	156	87,1	68,4	114,8
125,2	147,8	144,6	102,7	96,6	123
178,8	174,3	200,2	133,8	114,4	186,5
133,9	141,1	153,8	95,5	82,9	124
135,4	141,8	154,9	101,4	88,7	131,9
141,3	148,6	159,4	109,1	97	136,8
111,9	103,8	137,4	74,5	109,4	124,1
32	16	25,7	15	5,5	9

11.2.

11.3.

08. Mai			08. Mai		
1	2	3	1	2	3
18,3	25	26,5	66,2	57,4	37,1
42,5	50,8	55,7	151	130,5	86,5
59	76,3	90,6	257,1	222,1	135,9
87,1	106,5	129,3	407,8	336	209,4
39,06	47,08	45,16	45,97	43,78	48,01
39,13	47,08	44,54	46,46	43,84	48,32
40,73	54,71	36,67	46,51	44,95	48,27
40,73	39,14	52,77	48,03	45,74	48,31
29	33,4	38,6	101,7	91	56,3
46,4	57,5	67	181,8	163,9	102,1
66,7	82,6	96,7	288,1	243,5	154
89,28	89,17	87,89	96,62	95,87	97,67
89,25	89,01	85,85	96,31	94,28	98,93
89,68	89,01	88,38	98,07	95,2	98,67
5,38	6,6	7,99	20,3	16,1	10,7
10,64	13,33	15,16	39,8	33,2	21,5
38,22	48,66	44,94	46,58	44,27	47,62
39,26	47,43	44,68	46,6	43,96	48,32
60,8	75,6	93,6	274,4	228,5	137,9
62,3	81,5	97,2	301,4	242,1	256,9
63,6	77	102,2	310,9	248,2	160,6
58,7	85,8	82,1	275,9	223,7	133,7
70,5	91,3	119,1	407,4	274,4	208,7
63,9	82,8	99,5	298,4	244	156,3
64,2	82,2	98	315,15	255,3	162,4
62,8	78,5	102,4	339,8	295,7	201,8
68,9	69,3	83,4	333,6	250,8	146,6
10,9	7,6	10,9	5	6,1	0,103

12.3. Cut			12.4. Cut		
16. Mai			16. Mai		
1	2	3	1	2	3
54,3	45,3	53,2	74,5	59,2	51,8
122,8	107,4	121,1	165	140,2	119,5
209,2	182,3	203,3	278	232,7	208
303	271,7	311	415	363	331
51,54	56,18	50,49	46,15	60,43	44,02
51,51	56,43	50,38	46,54	59,48	44,1
51,17	56,58	50,87	46,38	59,71	44,36
52,78	58,12	51,34	46,92	61,43	46,55
72,3	61,6	65,8	99	85,5	70,8
142,7	127,1	137,5	201	168,7	144,7
226,7	199,3	221,5	317	268,5	234,7
101,59	106,24	98,9	97,11	109,62	106,57
101,58	106,97	100,28	96,67	109,7	106,72
101,53	107,19	99,99	97,3	110,28	105,64
15,5	13,4	14,3	22,8	17,1	15,8
31,3	26,7	29,5	45,2	33,1	30,5
51,59	56,14	50,78	46,7	54,17	43,91
51,04	48,55	50,63	46,68	53,96	43,16
209,9	177,4	208,1	288	235	219,1
214,2	180,4	207,6	257	211	183,7
182,5	143,9	138,2	221	166	148,3
226,8	249,4	266,1	326	221	234
259,5	222,9	231,8	548	383	371
225,3	188,7	217,9	319	252	234
221,1	293,2	236,1	345	262	243
256,4	242,1	237,2	380	306	249
192,6	187,6	180,3	338	283	271
2,8	1	0,738	9	27	5

16.1.

16.2.

15. Mai			15. Mai		
1	2	3	1	2	3
32,4	33,1	36	39,9	46,9	39,7
74,6	78,9	87,2	102,1	108	93,6
121,8	129,6	142,9	168,8	183,6	159,3
175,4	181,3	204,4	251,6	273,5	235,2
53,38	41,06	39,32	29,43	20,19	34,23
38,89	40,54	39,54	30,5	19,92	34,18
39,15	40,83	39,81	30,52	19,92	33,86
53,27	56,78	39,5	30,52	21,11	35,58
40,2	41,8	43,5	58,2	62,4	61,3
84,3	88,5	93,2	114,7	126,4	115,6
133,8	135,8	146,1	184,7	204,5	183,9
102,76	90,42	89,07	81,2	69,57	83,63
89,38	90,51	88,77	81,14	70,15	83,74
103,29	90,88	90,2	81,12	70,15	84,74
9,2	9,6	10,4	11,7	13,5	10,9
19,9	20	21,8	24,5	26,7	23,5
53,75	40,02	40,1	31,38	19,55	34,75
53,32	41,88	39,57	30,68	19,67	33,89
128	131,8	143,2	169,1	184,09	159,9
127,9	130,5	145,7	175,5	184	141,3
132	136,1	161	193,7	202,2	153,1
126,9	133,2	118,4	167,9	200,7	224,1
182	174,7	170,1	163,1	147,2	251,9
134,7	137,1	144,1	188,6	208,1	184,7
143	146,6	176,8	203,4	221,1	181,4
167,1	139,9	120,9	142,2	234,9	213,1
120,4	106,9	117,7	225,6	228,9	224,2
22,8	17,6	22,3	73,8	93,5	37,7

16.3.

16.4.

16. Mai			14. Mai		
1	2	3	1	2	3
57,5	57,5	58,3	46,5	44,8	46,7
128,8	127	126,2	103,7	98,3	105,3
208,2	214	213,2	169,5	167,2	175,5
278,8	315	314	248,2	240,4	261,3
48,76	50,41	44,71	15,75	16,28	70,09
49,21	50,41	44,74	15,32	16,28	70,4
49,2	51,45	45,2	15,32	16,27	70,4
49,45	51,39	44,55	15,81	15,99	71,1
73,4	78	78,1	61,1	54	53,2
137,3	155	150,2	125,8	108,2	117,5
216,5	242	231,5	193,7	176,9	196,9
99,07	99,53	95,31	65,93	65,89	120,06
99,18	101,08	95,43	66	66,73	120,53
99,49	101,19	95,33	65,91	66,65	121,29
15	16,2	15,8	13,4	11,6	13,4
32,3	31,7	30,8	28,3	25	24,9
49,24	51,43	44,84	14,89	15,75	55,7
48,7	50,43	44,85	15,71	16,13	55,25
196,6	211,6	209,8	178,2	167,7	165,6
190,7	209,7	199,6	176,1	157,6	148,5
177,9	217	196,3	158,3	151	156,9
193,9	214,4	211,3	117,4	135,9	145,4
351	446	384	165,4	140,1	123,6
221,5	242,2	238,8	192	184,9	162,5
245,5	283,7	253,6	210,1	187,3	172,7
245,6	250,1	270,2	148	139,7	116,5
244,4	278,6	229,5	173,2	143,8	85,5
0,558	2,2	36,6	128,5	125,7	56,3

17.1.

17.2.

08. Mai			15. Mai		
1	2	3	1	2	3
10,4	13,4	30,4	70,4	58	54,8
25,3	30,1	70,4	155,7	135	129,6
39,9	46,5	110,3	260,4	232	220
55,1	66,8	111,7	402	350	337
16,96	16,82	15,91	25,96	43,36	52,91
15,67	16,48	16,86	26,94	43,24	58,46
15,68	16,5	16,97	42,3	43,24	59,94
15,68	16,52	16,34	42,62	44,52	55,96
16,7	20,4	30,1	85,9	75	76
30,1	37,3	55,6	179,8	156	155
43,1	53,4	88,9	287,1	252	247
72,27	66,45	66,22	91,99	93,37	109,66
64,76	66,41	66,37	92,25	93,44	109,34
65,04	66,37	65,88	92,27	93,63	109,94
3,92	3,41	7,7	20	18,7	16
7,53	7,65	15,9	42	36,5	34,4
16,46	16,29	16,29	41,95	44,02	53,52
14,46	16,66	16	41,26	42,59	52,61
40,2	47,8	81,6	273	236	222
39,4	45	76,4	269	229	204
44,2	59,1	62	244	185	150
36,6	38,7	99,7	297	266	251
40	64,2	63,9	333	256	317
45,7	54,8	89,1	298	251	245
44,4	53,8	88,7	309	261	253
39,9	47,1	81,8	313	287	304
56,9	60,6	92,9	377	295	275
33,4	34,8	55,3	33	26	45

17.3.

17.4.

09. Mai			09. Mai		
1	2	3	1	2	3
47,9	35,5	47	42,2	95,4	42,1
102,7	85	107	92,6	217,5	100,1
168,7	141,6	181,8	157,1	370	177,9
240,8	211,4	263,2	205,1	551	270
44,52	37,46	43,29	43,52	26,31	40,27
44,48	45,76	43,19	43,28	27,03	40,25
44,24	45,76	43,19	43,16	27,03	40,27
44,24	45,76	44,11	43,12	27,56	40,27
56,7	44,9	59,6	50	111	53,2
114,6	96,6	124	94,9	245	119
182,4	155,1	196,2	152,2	398	191,2
93,57	95,79	93,24	92,72	77,91	90,25
93,29	95,8	93,39	92,93	77,87	90,68
93,84	96,15	93,41	92,93	77,88	90,7
13,2	10,1	14,5	11,2	29	12,5
26,1	21	27,5	24,6	54,7	25,5
43,61	37,47	37,84	42,68	28,09	40,89
42,74	45,83	37,25	42,71	26,59	40,42
171,4	147	190,9	140,6	370	177,3
178,6	153,3	192,3	157,5	369	181,9
185,1	157,1	195,5	177,1	357	174,9
154,2	136,3	167,5	118,6	494	214,9
198,3	179	249,7	163,9	280	141
182,2	157,4	198,2	156,5	403	189,5
180,2	158,4	201,3	131,6	409	186,8
180,4	167,9	207,2	140,3	486	221,7
180,4	127,1	193,9	150	461	178,9
24,2	8	22	82,9	461	178,9

18.1.

18.2.

10. Mai			10. Mai		
1	2	3	1	2	3
35,7	29,2	33,6	36,3	34	45
80,1	68,3	75,2	84,9	87,4	104,5
152	113,7	130,4	142	151,9	181,4
207,8	166	186,7	211,1	239,2	278,8
47,48	48,29	46,03	41,14	38,3	42,09
46,27	48,96	46,16	41,12	59,33	42,1
47,03	47,82	46,19	41,09	59,7	
47,15	48,38	46,19	41,14	61,06	42,98
52,7	39,3	43,8	47,4	46,7	60,7
104,3	80,2	89,5	98,2	102,7	125
163,3	124,8	141,1	160,3	170,4	202,1
96,87	97,58	95,96	91,15	108,2	90,67
96,61	98	96,09	91,08	109,86	90,97
96,67	99,1	96,09	91,54	110,19	91,02
11	9,2	9,5	11,3	11,6	13,8
21,3	17,8	20,1	22,6	20,1	26,5
47,92	49,38	45,78	41,68	55,7	40,8
47,17	47,81	45,82	41,02	54,73	42,32
146,6	116	133,6	148,6	147,9	190,2
149,4	117,2	134	153,8	147,2	191,3
145,1	115,2	131,8	156,9	142,3	188,7
126,1	119,2	130,1	153,9	149,8	189,9
191,4	154,1	152	183,8	171,3	246
125,1	126,7	142,6	161,7	159,1	203,3
131	130,5	143,9	165,2	165,8	205,6
133,2	133,9	134	184,2	184,1	227,4
90,3	110,7	141,3	143,4	143,6	188,9
0,343	4,2	20,7	41,4	29,3	35,7

18.3.

18.4.

09. Mai			10. Mai		
1	2	3	1	2	3
33,1	29,1	30,5	52,4	40,6	47,7
77,8	64,7	69,5	119,4	91,4	109,5
129,3	109,9	117,8	200,4	159	189,8
186,9	160,2	167,8	292,1	231,8	286,7
39,4	37,35	39,45	40,06	39,43	42,8
40,71	39,79	39,52	40,44	42,53	42,91
40,31	37,04	39,92	40,37	44,2	43,09
40,31	37,42	39,92	41,86	43,76	43,03
45,2	38	37,2	72,6	52,6	62,3
93,6	77,5	80,2	140,9	108	129,6
143,4	120,7	126,5	222,8	173,7	207,6
90,22	87,05	89,63	90,06	90,43	92,87
90,24	87,05	89,7	89,84	92,17	92,77
90,22	88,05	90,22	89,84	92,54	93,15
10,2	8,4	10	15	12,3	14,3
20,1	17,4	18,3	30,4	24,2	28,1
40,34	38,01	40,5	39,26	41,24	42,65
39,87	37,8	40,27	39,54	40,25	42,73
133,9	112,9	121,6	205,9	163,1	197,7
132,8	111,4	123,1	223,3	173,4	204,9
127,6	101,8	105,9	236,5	178,8	209,7
134,7	116,3	104,3	188,7	154,6	179,1
158,1	131,5	130,3	297,2	205,3	246,8
145,7	122,1	128,1	227,5	173,7	208,1
145,9	121,5	133,6	228,3	176,5	209
160,7	115,2	109,9	245,1	189,4	221,8
104,3	125,4	114	196,4	126,2	191,7
28,9	43,4	62,5	42,1	25,8	33,8