

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

Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden für die Mikrofluidik

Daniel Günther

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang A. Wall

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Joachim Heinzl, em.

Die Dissertation wurde am 25.9.2007 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.2.2008
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1	ZIEL DER ARBEIT.....	1
1.2	AUFBAU DER ARBEIT	2
2.	STAND DER TECHNIK.....	4
2.1	WIRKPRINZIPIEN	4
2.1.1	<i>Piezoaktive Materialien.....</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Steigerung der Aktuation.....</i>	<i>7</i>
2.1.3	<i>Membranaktoren</i>	<i>10</i>
2.2	GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG VON PIEZOKERAMIK.....	14
2.2.1	<i>Kristallstruktur von PZT- Keramik</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Mathematische Linearisierung.....</i>	<i>16</i>
2.2.3	<i>Grundtypen von Piezoaktoren.....</i>	<i>19</i>
2.2.4	<i>Nichtlineare Effekte bei Piezokeramik</i>	<i>21</i>
3.	SIMULATION VON REFERENZSTRUKTUREN	24
3.1	AUFBAU DER WANDLER UND EINFÜHRUNG EINES REFERENZOBJEKTES.....	24
3.2	NUMERISCHE MODELLIERUNG	27
3.3	VERFORMUNG TECHNISCH RELEVANTER BAUFORMEN.....	29
3.3.1	<i>Kreisförmige Bauform.....</i>	<i>29</i>
3.3.2	<i>Quadratische Bauform</i>	<i>30</i>
3.3.3	<i>Längliche Wandler</i>	<i>31</i>
3.4	PARAMETERVARIATIONEN- AUSLENKUNG UND DRUCKERZEUGUNG.....	34
3.4.1	<i>Feldstärke.....</i>	<i>34</i>
3.4.2	<i>Materialien.....</i>	<i>35</i>
3.4.3	<i>Geometrische Abmessungen.....</i>	<i>36</i>
3.4.4	<i>Schichtstärken</i>	<i>37</i>
3.4.5	<i>Einfluss einer Klebeschicht</i>	<i>39</i>
3.5	FREQUENZVERHALTEN	41
3.6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM STANDARDWANDLER	43
3.6.1	<i>Statische Verformung</i>	<i>43</i>
3.6.2	<i>Dynamisches Verhalten.....</i>	<i>45</i>
3.6.3	<i>Nichtlineare Eigenschaften</i>	<i>47</i>
3.6.4	<i>Bipolare Ansteuerung.....</i>	<i>50</i>
4.	BIMORPH-PIEZOAKTOREN MIT STRUKTURIERTEN ELEKTRODEN.....	51
4.1	STRUKTURIERTE ELEKTRODEN ZUR GEZIELTEN FELD- UND POLARISATIONSFÜHRUNG	51
4.1.1	<i>Grundlagen des elektrischen Feldes</i>	<i>51</i>
4.1.2	<i>Simulation des elektrischen Feldes</i>	<i>54</i>
4.1.3	<i>Elektrodenformen zur gezielten Feldführung.....</i>	<i>54</i>
4.1.4	<i>Bedeutung von passiven Elektroden.....</i>	<i>57</i>
4.2	WANDLERFORMEN MIT STRUKTURIERTEN ELEKTRODEN	58
4.2.1	<i>Membran unter Innendruck.....</i>	<i>59</i>
4.2.2	<i>Biegemembranwandler mit Hilfelektrode.....</i>	<i>60</i>
4.2.3	<i>Wandler mit Hilfelektrode – Minimierung der Lagerreaktion</i>	<i>64</i>
4.2.4	<i>Längseffektwandler</i>	<i>65</i>
4.2.5	<i>Kombinierter Wandler.....</i>	<i>68</i>
4.3	ANALYTISCHE BERECHNUNG VON WANDLERN MIT UNGETEILTER KERAMIK....	70
4.4	PARAMETERVARIATIONEN	73

4.5	SKALENEFFEKTE BEI BIMORPH-PIEZOAKTOREN	78
4.5.1	<i>Vereinfachte Modellierung</i>	78
4.5.2	<i>Ableitungen für Tropfenerzeuger</i>	80
4.6	VERGLEICH DER WANDLER ANHAND DER REFERENZGEOMETRIE	82
4.7	EXPERIMENTE AN PIEZOAKTOREN MIT STRUKTURIERTEN ELEKTRODEN	83
4.7.1	<i>Biegemembranwandler mit Hilfelektrode</i>	83
4.7.2	<i>Längseffektwandler</i>	88
4.7.3	<i>Kombinierter Wandler</i>	90
5.	ANWENDUNGEN	93
5.1	TROPFENERZEUGUNG MIT PIEZODRUCKKÖPFEN	93
5.1.1	<i>Eindüsenkopf zur Dosierung unterschiedlicher Medien</i>	93
5.1.2	<i>Mehrdüsenkopf</i>	100
5.2	PIEZOELEKTRISCHES VENTIL	102
6.	ZUSAMMENFASSUNG	106
7.	LITERATUR	109
	ANHANG:	119
A.	FORMELZEICHEN	119
B.	PIEZOPARAMETER FÜR DIE NUMERISCHE SIMULATION	121
C.	ANALYSEMETHODEN	125
I.	<i>Impedanzmessung</i>	125
II.	<i>Laservibrometer</i>	126
D.	RAPID-PROTOTYPING DER VERSUCHSMUSTER	131
I.	<i>Erzeugung von Elektrodenstrukturen</i>	131
1.	Anforderungen an die Fertigung	131
2.	Mikrostrukturierungsverfahren für die Elektrodenfertigung	132
3.	Laserablation	133
4.	Laserablation von Elektrodenmaterial auf PZT-Keramik	136
5.	Produktion von Piezoplättchen mit strukturierten Elektroden	138
6.	Prüfung der Elektrodenstrukturen auf PZT-Keramik	140
II.	<i>Strukturierte Polarisierung</i>	143
III.	<i>Aufbau der Versuchssysteme</i>	147

1. Einleitung

Piezomembranaktoren sind häufig angewendete Bauteile in Mikrofluidiksystemen. Sie bilden elektrisch steuerbare Ventilmembranen und Elemente zur Volumenverdrängung für Einzeltropfenerzeuger (Druckköpfe) und Mikropumpen. Das Funktionsprinzip dieser Aktoren ist dem von Bimetallen ähnlich. Die Verformung wird aber nicht thermisch, sondern durch eine Keramik, die sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung dehnt oder zusammenzieht, erreicht. Die entstehende Verformung kann mit der Verformung einer Membran unter Innendruck verglichen werden.

Eine solche Membran, die am Rand drehsteif gelagert ist, weist zwei Bereiche mit unterschiedlichen Krümmungen auf. Bei Bimorphaktoren des Stand der Technik wird nur der Kernbereich der Membran mit einer plattenförmigen Keramik belegt, die aktiv zur Verformung beiträgt. Der Rest der Struktur verformt sich durch die entstehenden Reaktionskräfte.

Eine solche Struktur zeichnet sich durch ein großes Verformungsvermögen senkrecht zur Membranebene aus. Der nicht belegte Rand stellt aber eine Schwächung der Struktur dar. Deshalb wirkt die Membran weich gegenüber Druckkräften. Die Eigenfrequenz, eine wichtige Kenngröße für Pumpen, ist ebenso auf Grund der Schwächung am Rand vergleichsweise niedrig. Der Aufbau erfordert es, die Keramik je nach Membrangeometrie zu strukturieren. Bei Mehrkanalanordnungen, wie Tintendruckköpfen mit zahlreichen Düsen, stellt dies einen aufwändigen Fertigungsschritt dar. Im Anschluss an die Strukturierung der Piezokeramik müssen alle Kanäle der Anordnung einzeln kontaktiert werden.

Einen anderen Ansatz stellt der verformungsgerechte Einsatz der Keramik dar. Dazu werden die unterschiedlichen Krümmungsbereiche eines Membranaktors durch gezielte Deformation der Piezokeramik realisiert. Diese gezielte Deformation wird über strukturierte Elektroden auf der Keramik verwirklicht. Es werden unterschiedliche Effekte genutzt, die allein durch spezielle Elektrodenformen auf der Keramik erreicht werden können. Diese Grundidee, nur die Elektroden auf der Keramik, nicht aber die Keramik selbst zu strukturieren, ist der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist eine Beschreibung von Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden, die einen Vergleich mit Wandlerstrukturen des Stand der Technik ermöglicht. Dazu werden verschiedene Elektrodenstrukturen eingeführt und ihre Eigenschaften anhand von Berechnungen, Simulationen und Labormustern untersucht.

Die Teiluntersuchungsziele der Arbeit richten sich nach den folgenden für den Konstrukteur wichtigen Gesichtspunkten:

- Fertigungstechnik: Möglichkeiten der Erzeugung einer Vielzahl von separat ansteuerbaren Kanälen
- Systemintegration: Verbindung der einzelnen Kanäle mit der Ansteuerelektronik
- Montagetechnik: Handhabung der Piezoaktorik in typischen mikrotechnischen Fertigungsprozessen
- Verformungskennwerte: Erzielbare Maximalauslenkung und für Pumpmechanismen nutzbare Volumenverdrängung
- Druckerzeugung: Maximaldruck der durch die Strukturen in eine Flüssigkeit eingebracht werden kann
- Eigenfrequenzen: Kennwerte für die Erhöhung der Aktuation durch Resonanzerscheinungen oder Grenzwerte für Einzeltropfenerzeuger, die transient angesteuert werden.
- Lagerreaktion: Gegenseitige Beeinflussung nahe beieinander liegender Aktorkanäle
- Einsatzmöglichkeiten: Anwendungen der Wandler im Gebiet der Mikrofluidik

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen zeigen, in welchen Fällen der Einsatz von Wandlern mit strukturierten Elektroden sinnvoll ist und unter welchen Voraussetzungen Wandler des Stand der Technik eingesetzt werden sollten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel *Stand der Technik* werden die wichtigsten piezokeramischen Werkstoffe genannt. Zudem wird gezeigt, wie sich die derzeitige technische Realisierung einer Wegvergrößerung der Aktuation von Piezokeramik darstellt. Im Besonderen werden Wirkprinzipien von Piezomembranaktoren und deren Einsatz erläutert. In einem weiteren Abschnitt werden die bekannten, beschreibenden Gleichungen für Piezokeramik dargestellt.

In Abschnitt *Simulation von Referenzstrukturen* werden einführend anhand von Einsatzszenarien die wesentlichen Kenngrößen für einen Vergleich von unterschiedlichen Typen von Membranaktoren abgeleitet. Im Anschluss wird ein Referenzobjekt mit strukturierter Keramik definiert, dessen Geometrie die Grundlage für vergleichende Betrachtungen in der folgenden Arbeit bildet. Dieser Wandler wird daraufhin mit verschiedenen Simulationen in seinem Verhalten bei Parametervariationen charakterisiert. Die Ergebnisse der Simulation werden als Abschluss des Kapitels anhand von Labormustern einer kreisförmigen Struktur verifiziert.

Das Kapitel *Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden* zeigt, wie neuartige Aktorstrukturen mit Hilfe von strukturierten Elektroden gewonnen werden können. Dazu werden zuerst die Grundlagen der elektrischen Felder dargestellt. Es werden Feldverläufe gezeigt, die neue Aktorprinzipien ermöglichen. Beispielhaft werden hier zwei Wandler vorgestellt: Ein Wandler mit Hilfselektrode und ein kombinierter Wandler, der unterschiedliche Piezoeffekte nutzt. Für den Wandler mit Hilfselektrode wird ein analytischer Rechengang gezeigt. Dieser wird in einer weiteren Betrachtung genutzt, um Skaleneffekte bei der Variation der Hauptabmessungen anhand von Gleichungen abzuleiten. Darauf folgt ein Vergleich von allen bisher gezeigten Aktortypen, der wiederum auf Simulationsmodellen beruht. Im Anschluss werden die theoretischen Überlegungen an Labormustern überprüft.

Die Vorteile strukturierter Elektroden, werden im Kapitel *Anwendungen* an konkreten Beispielen gezeigt. Als Verifikationsbeispiele dienen verschiedene Einzeltropfenerzeuger und ein Flusssteuerungsventil.

Der Anhang gibt die Grundlagen für die Experimente mit der Simulation und den realen Aufbauten wieder. Unter anderem werden hier Methoden vorgestellt, wie die Verformungsgrößen von Bimorph-Piezoaktoren bestimmt werden können. Ein weiterer Anhang schildert den Aufbau von Labormustern mit Rapid-Prototyping Methoden.

2. Stand der Technik

2.1 Wirkprinzipien

2.1.1 Piezoaktive Materialien

Seit der Entdeckung des Piezoeffekts wurden zahlreiche Gruppen von Stoffen gefunden, die diese Eigenschaft aufweisen. Allen gemeinsam ist dabei eine polare Atomanordnung, die eine Kopplung von elektrischen Feldern und mechanischer Verformung bedingt. Es können durch eine Kraft und die damit verbundene Verformung des Materials elektrische Felder erzeugt werden. Ebenso verformt sich das Piezomaterial mechanisch, wenn es von einem elektrischen Feld durchflutet wird. Im ersten Fall spricht man historisch bedingt vom direkten, im zweiten Fall vom indirekten Piezoeffekt [JAF65].

Die Hauptgruppe technisch genutzter Stoffe besteht aus anorganischen Materialien mit kovalenten Atombindungen [JAF58]. Zu dieser Gruppe zählt beispielsweise Quarz. Abb. 1 zeigt den Aufbau aus Atomen und eine vereinfachte Darstellung der Elementarzelle eines Quarzkristalls. Bei einem Quetschen der Kristallzelle wird der Ladungsschwerpunkt verschoben und an den metallisierten Elektroden auf der Oberfläche können Ladungen abgegriffen werden [JAF65].

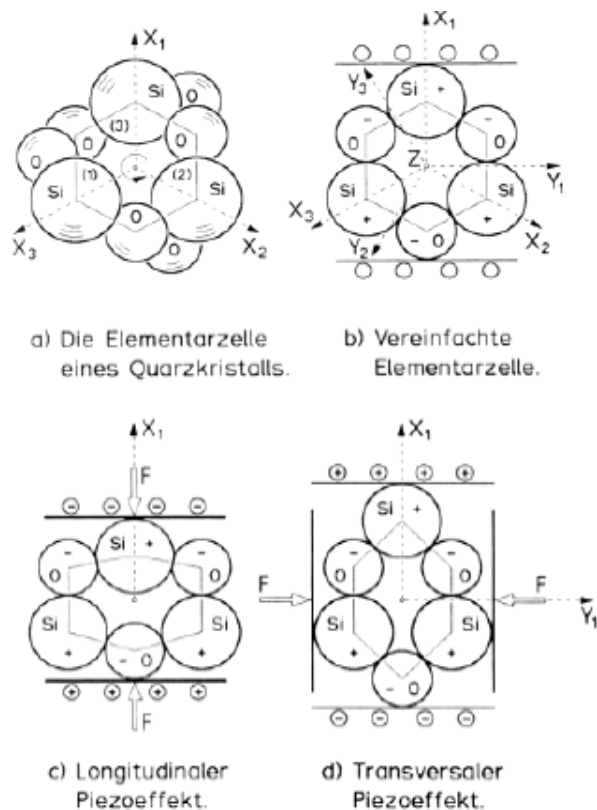


Abb. 1: Der Piezoeffekt bei Quarz (SiO_2). Räumliche Darstellung (a), 2D-Vereinfachung (b), longitudinaler Piezoeffekt (Piezolängenseffekt, c) und transversaler Piezoeffekt (Piezoquereffekt, d)[PIC05].

Quarz wird hauptsächlich als mechanischer Schwinger verwendet. Durch die Nutzung von einkristallinem und porenfreiem Quarz werden besondere Güten bei der Frequenzstabilität erreicht. Deshalb wird es im Allgemeinen als Zeitgeber in Uhren und Rechnern verwendet, ebenso in elektrischen Filterschaltungen. Hier werden die Resonanzeigenschaften genutzt, um in gewissen Frequenzbereichen das Eingangssignal abzuschwächen. Die vergleichsweise niedrige elektromechanische Kopplung macht Quarz für Aktoranwendungen wenig geeignet [JAF65].

Piezelektrische Eigenschaften können ebenso für die Kopplung von elektrischen und optischen Effekten genutzt werden. Ein wichtiger Werkstoff ist hier das Lithiumniobat (LiNbO_3) [NAK83]. Es wird für den Aufbau von akustooptischen Modulatoren verwendet. Durch gezieltes Erzeugen akustischer Wellen im Material wird ein Lichtbündel zerstreut, so dass beispielsweise ein Laserstrahl hochfrequent ein- und ausgeschaltet werden kann.

Sollen Piezeigenschaften hauptsächlich in eine mechanische Aktuation umgesetzt werden, kommen Keramiken mit einer Perovskit-Kristallstruktur zum Einsatz. Hauptvertreter dieser Gruppe sind das Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) und Bariumtitanat. Die Kopplung von mechanischen und elektrischen Eigenschaften ist hier besonders ausgeprägt, so dass sich schon bei geringen Ansteuerspannungen merkliche Verformungen ergeben. Die Steifigkeit des Werkstoffes führt zu großen nutzbaren Kräften [JAF65].

Sehr weit verbreitet ist das PZT. Es wird für zahlreiche Aktoren, wie beispielsweise Einspritzsysteme von Verbrennungsmaschinen, Ultraschallerzeugung für die Reinigung und Sonographie sowie Lautsprecher mit kleinen Abmessungen, verwendet [EGG02].

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Mikrofluidik. Hier wird das PZT als Aktor für Tintenschreibköpfe oder als Stellglied in Mikroventilen und Pumpen eingesetzt.

PZT wird im Allgemeinen als Sinterkeramik hergestellt. Dabei wird eine Mischung von PbO , TiO_2 und ZrO_2 in Pulverform zu einem Festkörper gebrannt. Das Mischungsverhältnis bestimmt die späteren Eigenschaften der Keramik, wie zum Beispiel die Curietemperatur oberhalb derer der Stoff seine piezoelektrischen Eigenschaften verliert. Der hierzu notwendige Prozess gliedert sich in folgende Schritte (siehe Abb. 2): Als erstes wird Schlicker im gewünschtem Mischungsverhältnis angerührt. Die Formgebung erfolgt durch Giessen oder Auswalzen des pastösen Schlickers. Alternativ dazu kann die Rohkeramik mit Sol-Gel-Prozessen, Zerstäubungsprozessen oder Sputtern geformt werden [SCH97][WAT94]. In einem weiteren Schritt wird die Flüssigkeit der Dispersion durch Erwärmen ausgedampft. Die Rohkeramik (Grünling) wird dann in einem zweistufigen Temperaturprozess zu einem Keramikteil gesintert. Um die chemischen Verhältnisse nicht zu verändern, werden unterschiedliche Atmosphären für die Hochtemperaturbehandlung genutzt. Je nach gewünschter Anordnung können die Elektroden zur späteren Ansteuerung in den Grünling mit eingebracht werden oder nach dem Sinterprozess getrennt erzeugt werden. Vor der Nutzung muss eine so erzeugte Keramik in einem weiteren Prozessschritt polarisiert werden. Dazu wird die Keramik erhitzt und ein starkes elektrisches Feld an die Elektroden angelegt [SCHI05].

Nach der Polarisierung kann die Keramik als Aktor verwendet werden. Wird nun ein elektrisches Feld in Richtung der Polarisierung angelegt, dehnt sich der Piezo in Feldrichtung und zieht sich senkrecht dazu zusammen (Längs- und Quereffekt). Wird das Feld senkrecht zur Polarisationsrichtung angelegt, verschert der Kristall (Schereffekt) [JAF65].

Dieser Typ von Keramik bildet die Grundlage der Untersuchungen in dieser Arbeit und wird in Kapitel 2.2 eingehend beschrieben.

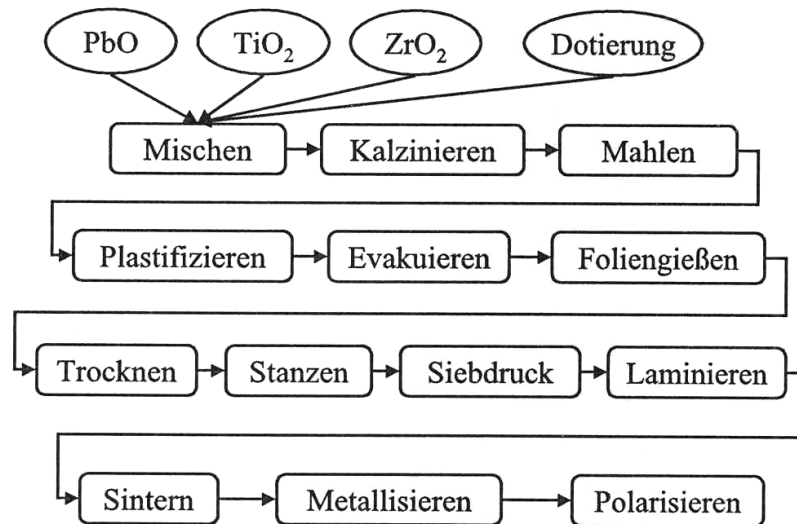


Abb. 2: Prozesskette bei der Herstellung von plattenförmiger Piezokeramik [SCH105]

In neueren Entwicklungen wird die Keramik nicht mehr als Sinterstoff, sondern als Einkristall gewonnen. Dieser Werkstoff besitzt gegenüber „normalen“ PZT zahlreiche Vorteile. Es können um den Faktor 10 gesteigerte Aktuationswerte erreicht werden. Dies wird zum Einen durch die optimale Polarisation und zum Anderen durch höhere mögliche Feldstärken erreicht. Der porenfreie Stoff ist mit wesentlich stärkeren elektrischen Feldern belastbar, bevor es zu einem elektrischen Durchschlag kommt. Nachteilig für einen Einsatz in Massenprodukten ist der derzeit noch sehr hohe Preis [LOP96] [LEV04] [PAR97].

2.1.2 Steigerung der Aktuation

Die nutzbare Verformung von Piezomaterialien liegt bei technisch beherrschbaren Anspannungen in der Größenordnung von einem Promille der geometrischen Abmessungen. Da diese Verformung in vielen Anwendungsfällen nicht ausreicht, werden verschiedene Prinzipien zur Vergrößerung der Aktuation angewendet [NIE01]:

Piezostapel:

Wird ein großer Block Keramik als Vollmaterial genutzt, um große Verformungen und Kräfte zu erzielen, sind sehr hohe Anspannungen erforderlich, um das Potential der Keramik voll auszuschöpfen. Zum Beispiel sind bereits bei 1 mm dickem Material Spannungen von über 1500 V zur Ansteuerung bei einer guten Materialausnutzung notwendig. Für noch leistungsstärkere Aktoren aus Vollmaterial werden die Spannungen so hoch, dass der elektronische Aufwand in keinem Verhältnis mehr zum Nutzen steht.

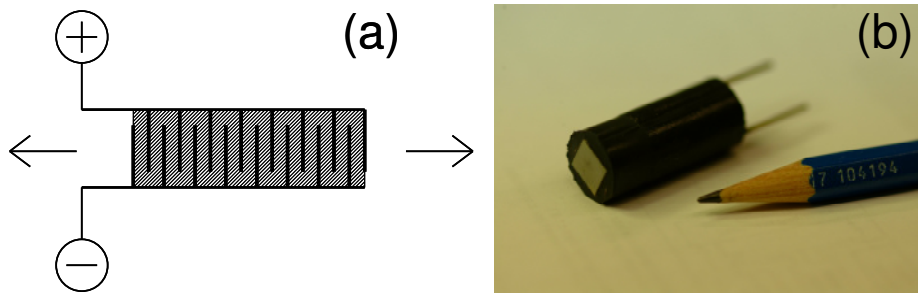


Abb. 3: Piezostapelaktor zur Wegvergrößerung. Schema (a) und Größenvergleich (b)

Dieses Problem kann umgangen werden, indem dünne Keramikplatten mit Elektroden aufeinander gestapelt werden (Abb. 3). Damit wird bei geringer Ansteuerspannung eine große Feldstärke erzielt. Es können Aktoren von hoher Steifigkeit aufgebaut werden, die große Verformungen und Kräfte vereinen. Solche Aktoren sind bei Schichtdicken von minimal 20 μm , bis zu einer Länge von 200 mm und einem Durchmesser bis zu 60 mm auf dem Markt. Sie werden mit Spannungen unter 200 V angesteuert. Die erreichbaren Hübe liegen etwa bei 300 μm und die verfügbare Kraft über 80 kN [PIC05].

Festkörpergelenke:

Für viele Anwendungen sind die so erzeugten Dehnungen nicht groß genug. Im Allgemeinen können Wege und Kräfte durch Hebel und Getriebe übersetzt werden. Es müssen allerdings besondere Maßnahmen getroffen werden, um die Wirkung der Piezoverformung nicht in den Gelenkpunkten von solchen Anordnungen zu verlieren [PIC05].

Die Lösung hierfür sind so genannte Festkörpergelenke. Bei diesen gleiten keine Teile aufeinander ab, sondern es werden elastische Verformungen zur Realisierung von Freiheitsgraden genutzt (Abb. 4).

Ein technisch besonders einfaches Bauteil ist ein Festkörperdrehgelenk. Bei dieser Konstruktion wird ein Gestell im später gewünschten Drehpunkt künstlich geschwächt. Dies kann über Einfräsungen oder Blattfedern erreicht werden. Ein solches Gelenk zeichnet sich durch eine reibungsfreie Übertragung und Spielfreiheit aus. Wird als Konstruktionswerkstoff ein monokristallines Material wie Silizium verwendet, ist die Anordnung zusätzlich ermüdungs- und verschleißfrei. Anders als bei herkömmlichen Drehgelenken kann hier aber nur ein kleiner Winkelbereich mit der Bewegung abgedeckt werden. Dieser Gelenktyp wird daher meist als Linearführung verwendet [WOL03].

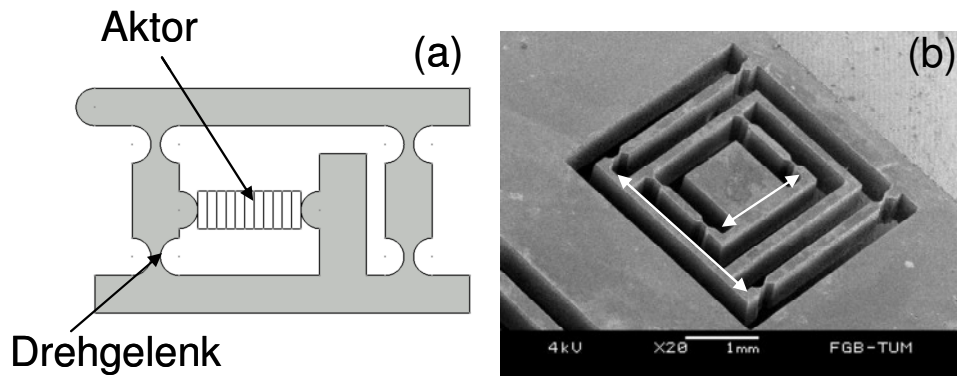


Abb. 4: Übersetzungsgetriebe mit Festkörpergelenken. Schema mit eingebautem Piezostapelaktor (a) und XY- Verstellkinematik in Silizium, ohne Aktorik [WOL03] (b).

Bimorphprinzipien:

Bimorphprinzipien stellen, abstrakt aufgefasst, eine weitere Form von Festkörpergelenken zur Wegübersetzung dar. Bekannt ist dieses Funktionsprinzip von thermischen Bimetallen. Hier werden zwei Metalle mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten miteinander verbunden. Wird der Verbund erwärmt, stellt sich durch die unterschiedlichen Dehnungen eine Verbiegung der Struktur ein. Die erreichbare Verformung der Einzelkomponenten durch die thermische Dehnung wird so bei Weitem übertroffen.

Dieser Effekt wird auch bei Piezokeramik angewandt. Die Keramik wird entweder mit einem passiven Träger oder mit einer gegenläufig arbeitenden Keramik verbunden. Die maximale Aktuation tritt dann an der freien Spitze der Struktur auf. Abb. 5 zeigt gängige Bauformen von „Biegefingern“. Den Einsatz solcher Anordnungen in Tropfenerzeugern und Pumpen zeigen z.B. Seitz, Ederer oder Wang [SEI04][EDE99][WANG98].

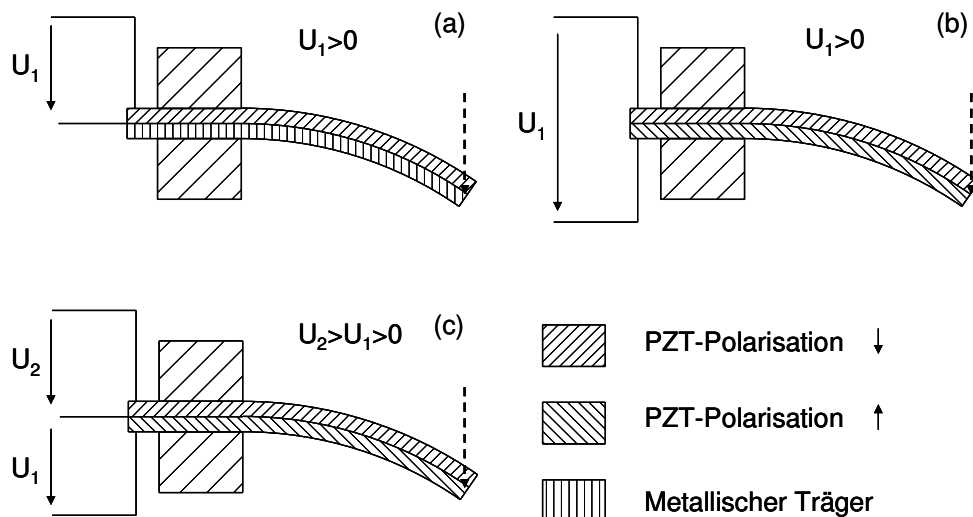


Abb. 5: Verschiedene Prinzipien zur Wegvergrößerung von Piezoaktoren durch Schichtaufbau. Piezobimorph mit passivem Träger (a), Serienbimorph (b) und Parallelbimorph (c).

Benjeddou zeigt zudem einen Biegewandler, bei dem der Schereffekt genutzt wird. Dabei wird ein Piezoplättchen zwischen zwei passive Träger geklebt. Durch das Ansteuerfeld wird

dieses Plättchen zu einem Parallelogramm verschert. Bedingt durch die Aktuierung gerät die obere Lage unter Druckspannung und die untere unter Zugspannung. Damit wird ein Biegemoment induziert, das eine ähnliche Verformung wie bei Bimorphprinzipien hervorruft [BEN00].

Ein weiteres Biegefingerringprinzip wird von Hong et al. beschrieben. Hier wird eine monolithische Keramik benutzt, in die ein inhomogenes Feld eingebracht wird. Durch unterschiedliche Feldstärken an der Ober- und Unterseite der Keramik entsteht das zur Verformung notwendige Biegemoment [HONG05].

Membranwandler:

Den gleichen Effekt nutzt man bei Membranaktoren. Hier können, ebenso wie bei Balkenstrukturen, Bimorphstrukturen aufgebaut werden. Gegenüber den Biegefingerringen liegen die Spitzenwerte bei der Aktuierung wesentlich niedriger. Die erzeugbaren Kräfte sind allerdings auf Grund der größeren Steifigkeit höher als bei Biegefingerringen mit gleichem Bauraum.

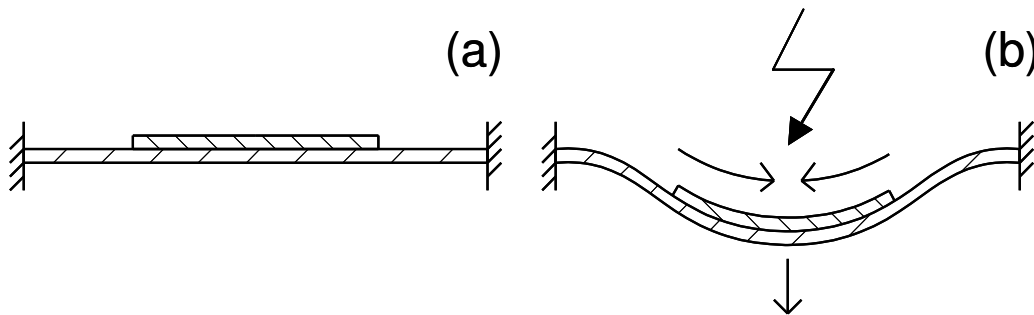


Abb. 6: Funktionsprinzip eines Membranwandlers. Ruhestellung (a) und Auslenkung durch die Aktuierung der Keramik (b).

2.1.3 Membranaktoren

Piezomembranwandler sind, neben dem Einsatz zur Schall- oder Ultraschallerzeugung, in zwei weiteren Anwendungsgebieten verbreitet. Der Mikrodosierttechnik, deren Ziel die exakte Bereitstellung kleinster Flüssigkeitsmengen ist, und der Mikrofluidik, die durch konsequente Anwendung kleinster Dimensionen neue Anwendungsfelder in der Verfahrens- und Automatisierungstechnik erschließt.

In beiden Anwendungsgebieten wird die Piezokeramik genutzt, indem eine vollflächige Elektrode aufgebracht und mit elektrischer Spannung beaufschlagt wird. Dies geschieht bei der Herstellung zur ersten Polarisierung. Im Betrieb wird zum Erzeugen einer Verformung ein Feld mit gleichem Richtungssinn an die dann separierten Einzelaktoren angelegt.

Mikrodosierttechnik

In der Drucktechnik spielen Piezomembranaktoren in der Bürodruckertechnik eine wichtige Rolle. Zusätzlich eröffnen sich im industriellen Einsatz neue Anwendungsfelder. Hier steht das Drucken oder das Dosieren von nicht wasserbasierten Flüssigkeiten im Vordergrund. Dies

ermöglicht einen breiten Einsatz der Technik (z.B. 3D-Drucken). Darüber hinaus ist für einen hohen Durchsatz eine große Düsenanzahl auf kleinem Raum erwünscht. Die Piezotechnik in Kombination mit Membranprinzipien eignet sich besonders, um diese Forderung zu erreichen [LE98].

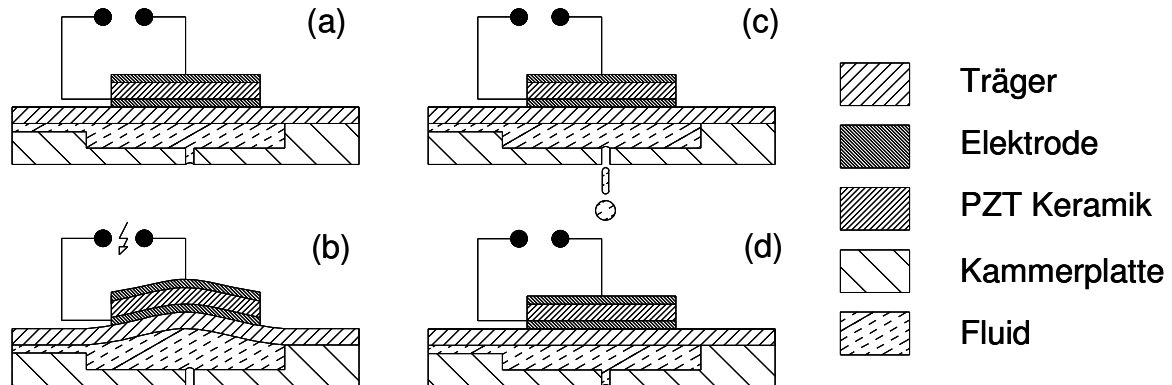


Abb. 7: Funktionsprinzip eines Piezomembrandruckkopfes. Ruhelage (a), Ansaugen von Flüssigkeit (b), Tropfenausstoß (c) und kapillare Füllung der Düse (d).

Vielen Verfahren mit Piezotechnik ist dabei gemein, dass eine dünne Membran eine Wand der mit Flüssigkeit gefüllten Kammer bildet. Diese Membran wird durch den Piezoaktor deformiert und somit das Volumen der Kammer geändert. Große Teile des Differenzvolumens werden durch die Düse als Tropfen ausgestoßen (Abb. 7) [LE98]. Im Folgenden werden die wesentlichen Fertigungsschritte bei Piezomembrandruckköpfen genannt:

Funktionsprinzip Bimorph (Piezo in Verbindung mit einer passiven Membran):

Da bei Druckköpfen eine Vielzahl von Aktoren benötigt werden, können folgende Verfahren angewendet werden: Zum Einen können die vorgeteilten Keramikplatten einzeln gehandhabt und aufgeklebt werden (Abb. 8(a)). Da dies sehr aufwändige Handhabungsschritte nach sich zieht, wird bei sehr vielen Düsenkanälen folgendes Prinzip angewendet: Es wird zuerst eine geschlossene Keramikplatte aufgeklebt, die alle Tintenkammern bedeckt. Die Entkopplung der Einzelaktoren wird im Anschluss mit einem mechanischen Verfahren (Schleifen oder Fräsen) oder einem Strahlprozess (z.B. Laser) erzeugt [LE04]. Dazu wird an den Randbereichen der Pumpkammer die Keramik entfernt (siehe Schema Abb. 7 oder Abb. 8(b)). Die Elektrode auf der Unterseite der Keramik muss dabei unversehrt bleiben. Die Aktoren sind dann sowohl mechanisch als auch elektrisch voneinander getrennt. Die elektrische Kontaktierung der einzelnen Druckkanäle erfolgt meist mit der Wire-Bond-Technik.

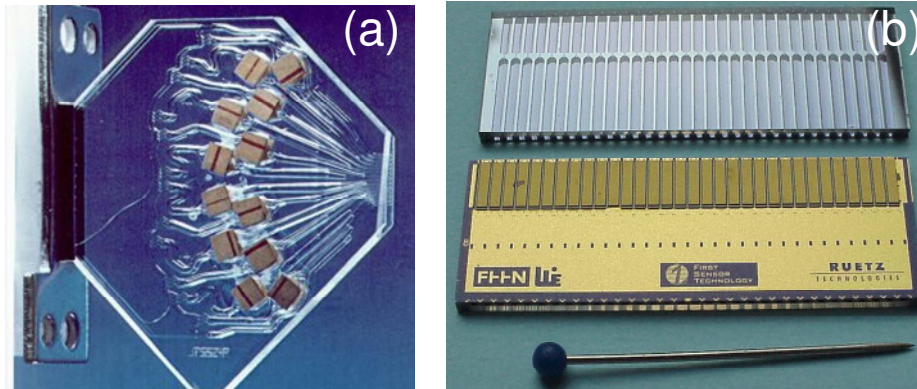


Abb. 8: Piezomembrandruckköpfe mit einer Vielzahl von Aktoren. Strukturierte Piezokeramik: Epson SQ-2550 (1995) mit „Einzel“-aktoren (a) und Druckkopf mit einer nach dem Aufkleben bearbeiteten Keramik (b) [WEHL02].

Ein ähnliches Aufbauprinzip wird bei Druckköpfen mit Dickschichtpiezokeramik verfolgt. Die Keramik wird hier als pastöser Schlicker auf die passive Membran mit einem Siebdruckverfahren aufgetragen [KOC97][DAR98]. Alternativ kann ein Aerosolverfahren angewendet werden [LEB00]. Es folgt ein Sinterprozess bei dem die Keramik bei derzeit gebräuchlichen Verfahren bei über 600°C gebrannt wird [DOR04]. Darauf muss in einem weiteren Maskenprozess eine Elektrode zur Ansteuerung erzeugt werden. Diese kann dann kontaktiert werden (siehe Abb. 9).

Die auf diese Weise gesinterte Keramik weist bei Weitem nicht die Kennwerte von Standardpiezokeramiken auf [WOL01]. Der Herstellungsprozess erfordert zudem, wie oben beschrieben, eine stark erhöhte Temperatur. Die Anzahl der Basismaterialien für die Druckköpfe sind daher stark eingeschränkt [DOR04].

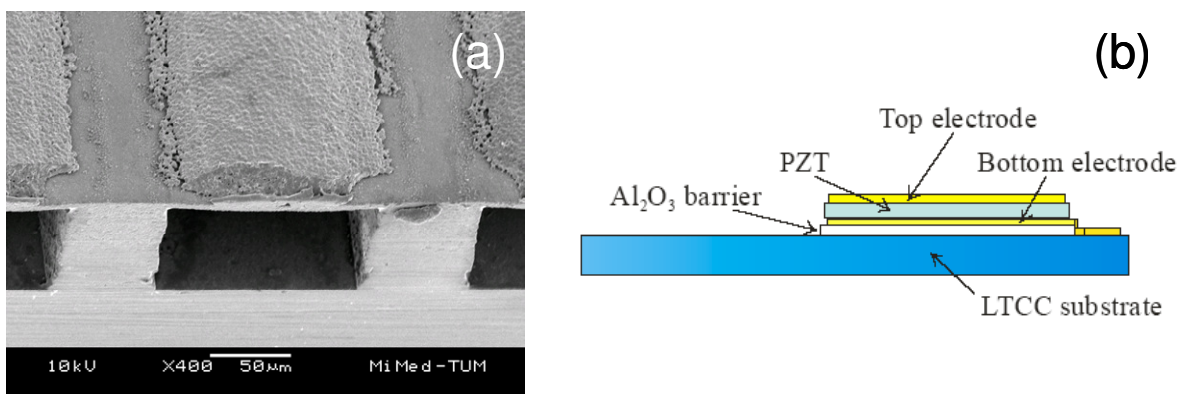


Abb. 9: Druckköpfe mit Siebdruckkeramik. Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) eines Schnittes durch einen Druckkopf (Epson) für den Officebereich (200X) (a) und Schichtfolge eines Wandlers mit Siebdruckkeramik (b) [DOR04].

Eine weitere Stufe in Richtung Miniaturisierung stellen Sol-Gel-Prozesse und gesputterte PZT-Keramik dar. Die hier erzielbaren minimalen Schichtdicken können weit unter einem Mikrometer liegen. In Kombination mit sehr dünnen Trägermembranen kann so bei kleinstem Flächenbedarf eine für die Tropfenerzeugung nutzbare Aktuation erzielt werden [USU00].

Zudem werden in der Literatur Aktoren beschrieben, die eine passive Membran aufweisen, aber den Piezolängseffekt nutzen, der im Allgemeinen stärker als der standardmäßig verwendete Quereffekt ist. Dazu werden die Elektroden auf der Keramik in kammartigen Strukturen ausgebildet. Diese Strukturen werden als Interdigitalstrukturen bezeichnet (z.B. [ZHA03], siehe dazu auch Kap. 5).

Funktionsprinzip Scherwandler:

Neben dem oben beschriebenen Längs- oder Quereffekt (die Polarisationsrichtung der Keramik liegt parallel zu elektrischer Feldrichtung, siehe Kapitel 3), gibt es eine weitere bekannte Technik eine Membran zu verformen: den Piezoschereffekt. Dabei kann auf einen passiven Träger verzichtet werden und die Piezoplatte selbst stellt die Wand der Pumpkammer dar. Der wesentliche Vorteil einer solchen Anordnung liegt darin, dass die Keramik nicht geteilt werden muss, sondern nur eine Elektrodenstruktur erhält, die dafür sorgt, dass elektrische Felder senkrecht zur Polarisationsrichtung der Keramik entstehen [FIS86][CHE04][CHE06] (siehe Abschnitt 4.1.3).

Der Schereffekt in einem solchen Aufbau weist einen erheblichen Nachteil auf: Die Auslenkung, die die Membran erfährt, ist gering und von den Konstruktionsparametern weitgehend nicht zu beeinflussen. Diese Eigenschaft schränkt die Anwendungsmöglichkeiten stark ein.

Ein weiteres Prinzip des Scherwandlers basiert darauf, die Seitenwände einer Druckkammer zu verformen. Dazu werden die Seitenwände der Pumpkammern durch im oberen Teil angebrachte Elektroden verschert. Der Aufbau ist allerdings in der Fertigung weit komplexer als der erstgenannte Scherwandlertropfenerzeuger. Eine schematische Darstellung dieses Funktionsprinzips zeigt Abb. 10 [BEU98][MAE04].

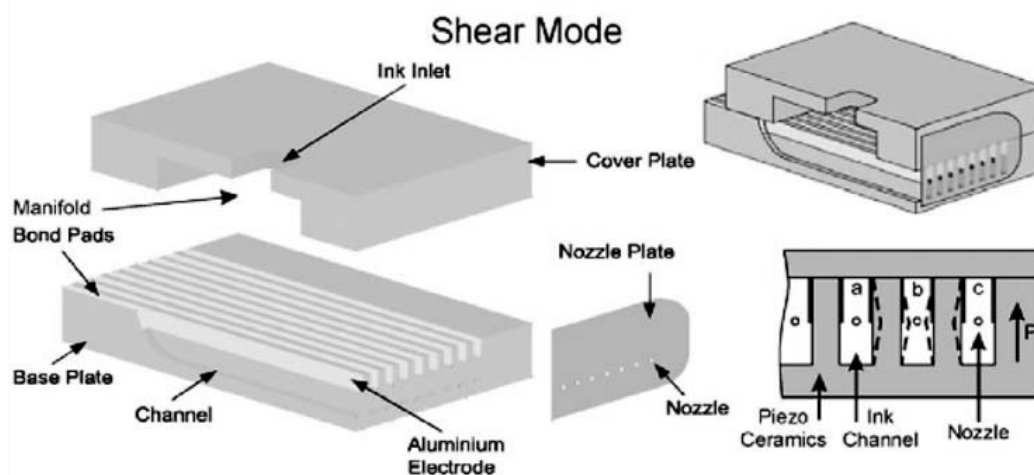


Abb. 10: Scherwandlertropfenerzeuger (XAAR Corporation) [MAE04].

Flusserzeugung und Steuerung in Mikrofluidiksystemen

Mikrofluidiksysteme bieten zahlreiche Möglichkeiten bisher nicht zu prozessierende Minimalmengen chemisch zu synthetisieren oder zu analysieren. Um die Vorgänge

anzutreiben und zu steuern, werden aktive Mikrokomponenten, vornehmlich Ventile und Pumpen, benötigt [NED04].

Wird die Idee vom Lab-On-Chip verfolgt, müssen alle Komponenten auf einem Chip integrierbar sein. Piezomembranaktoren sind hier ein möglicher Lösungsansatz. Gegenüber thermischen, magnetischen oder mit Druckluft betriebenen Systemen [LEE05] bieten solche Lösungen zahlreiche Vorteile. Sie sind einfach aufzubauen, wirken nicht thermisch auf das System und sind auf Grund der einfachen elektrischen Ansteuerung leicht in ein rechnergesteuertes System integrierbar.

Stand der Technik sind auch hier bimorphe Membranen mit bearbeiteter Piezokeramik. Die Membranen stellen Ventil- oder Pumpstößel dar. Wieder zeigt sich der Nachteil der Piezomontage und der Justage. Dieser Nachteil ist, wie bei Druckköpfen besonders deutlich, wenn bei Lab-On-Chip-Systemen eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Aktoren benötigt wird. Zudem müssen die einzelnen Aktoren durch zusätzliche Drahtverbindungen mit der Elektronik verbunden werden (Abb. 11) [YANG01][KLU01].

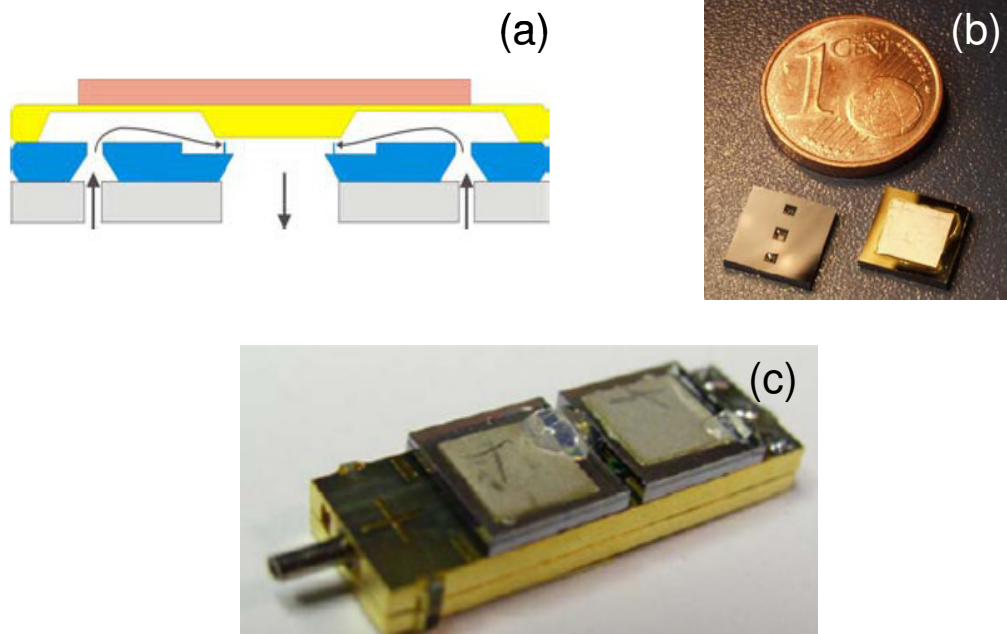


Abb. 11: Mikroventile des Fraunhoferinstituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. Aufbau und Funktionsschema (a), Siliziumchip mit geschnittener Piezokeramikplatte (b) und Montageträger mit einer montierten Mikropumpe (c) [HEIN05][RIC06].

2.2 Grundlagen der Modellierung von Piezokeramik

Die Funktion der in dieser Arbeit untersuchten Membranaktoren basiert auf dem reziproken piezoelektrischen Effekt. In diesem Kapitel wird die theoretische Beschreibung von Piezoaktoren gezeigt. Dazu werden zuerst die Kristallstruktur und die allgemeine Funktion erläutert. Im Anschluss wird das beschreibende Gleichungssystem vorgestellt. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine einführende Darstellung von nichtlinearen Effekten bei Piezokeramik.

2.2.1 Kristallstruktur von PZT- Keramik

Abb. 12 zeigt das Phasendiagramm für die Stoffmischung PZT (PbZrO_3 und PbTiO_3). Zusätzlich sind die jeweiligen von den Mischungsverhältnissen und der Temperatur abhängigen Formen der Elementarzellen dargestellt.

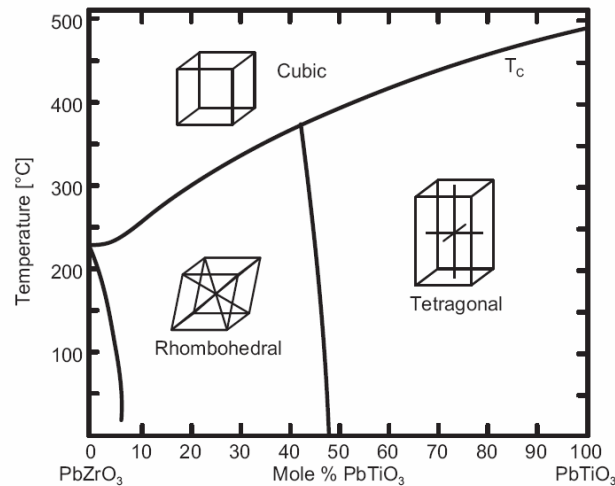


Abb. 12: Phasendiagramm und Elementarzellen für das System Blei- Zirkonat- Titanat [BAL06].

Unterhalb der Curietemperatur zeigt die Zelle eine Asymmetrie, oberhalb dieser ist sie symmetrisch aufgebaut. Das Zentralatom kann unterhalb der Curietemperatur sechs unterschiedliche stabile Positionen einnehmen. Für die Anwendung spielt das Zentralatom eine entscheidende Rolle, da es wie ein Dipol auf elektrische Felder reagiert. Die dadurch entstehende Deformation der Elementarzelle ist die technisch nutzbare Aktuation (siehe dazu Abb. 14) [JAF58].

Gesinterte Keramikwerkstoffe weisen statistisch verteilte Orientierungen der Körner auf. Auch die Orientierungen der Zentralatome unterliegen einer statistischen Verteilung. Ohne weitere Vorkehrungen entsteht durch das Anlegen eines elektrischen Feldes dem Zufolge keine makroskopische Aktuation. Erst durch einen Polarisierungsvorgang werden die Zentralatome ausgerichtet. Ein elektrisches Feld in Kombination mit erhöhter Temperatur ermöglicht eine Änderung der Orientierung des Atoms in der Elementarzelle. Alle Orientierungsänderungen finden immer in diskreten Bereichen statt. Diese Bereiche werden, wie bei magnetischen Werkstoffen, als Domänen bezeichnet (Abb. 13) [JAF65].

Bei jeder Ansteuerung kommt es zu einer gewissen Nachpolarisierung. Die Keramik weist dadurch bedingt eine Hysterese auf. Dies bedeutet, dass die Keramik sich nicht linear zu der angelegten Feldstärke verformt. Zudem ist die Richtung der Ansteuerung relevant. Bei der Steigerung der Ansteuerfeldstärke ist die Dehnung im Material nicht die gleiche wie bei der Senkung auf die gleiche Feldstärke (siehe Abschnitt 2.2.4) [REI03].

Des Weiteren ist der Effekt der Ausdehnung stark zeit- und temperaturabhängig (z.B. sog. Nachkriechen). Dies erschwert den Einsatz als Präzisionsstellglied [REI03].

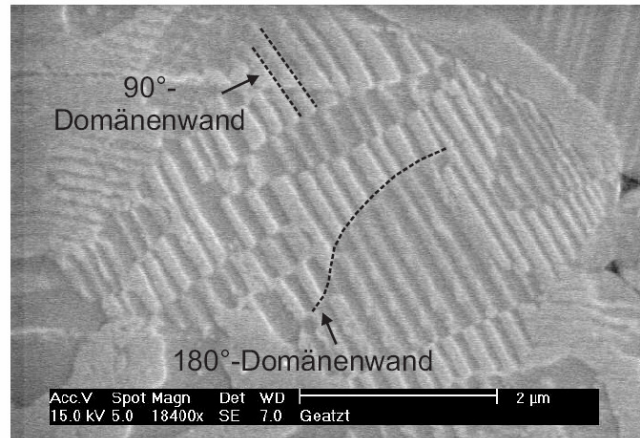


Abb. 13: Domänenstruktur innerhalb eines Kornes einer Piezokeramik [BAL06].

2.2.2 Mathematische Linearisierung

Das Verformungsverhalten von Piezokeramik kann durch ein lineares mathematisches Modell beschrieben werden [JAF65]. Diese Vereinfachung ist für Aktoren wie Pumpen, Ventile oder Verdrängern zulässig, die keiner exakten Stellbewegung folgen müssen.

Das Koordinatensystem für Piezokeramik wird in der Literatur wie folgt beschrieben: Die drei Raumrichtungen werden mit 1, 2 und 3 bezeichnet. Die Achsen sind zueinander senkrecht und bilden ein Rechtssystem. Die Polarisationsrichtung weist gegenüber den übrigen Richtungen im Materialverhalten andere Kennwerte auf. Sie wird in der einschlägigen Literatur mit der Achse 3 gekennzeichnet (Abb. 14). Solches Verhalten wird üblicherweise als orthotrop bezeichnet.

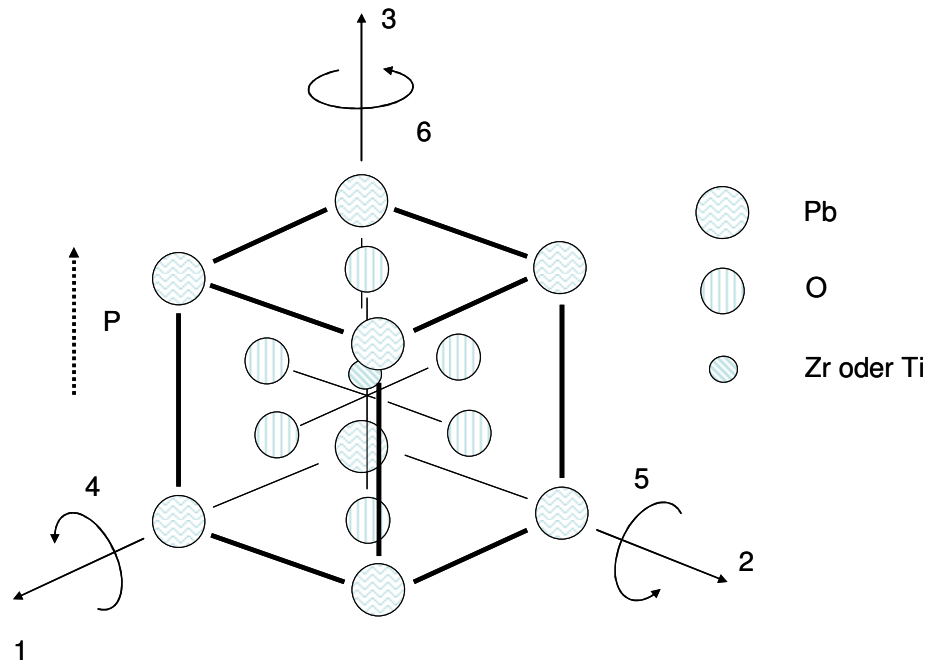


Abb. 14: Übliche Bezeichnungen der Koordinatenachsen an der Elementarzelle einer polarisierten PZT-Keramik.

Die elektromechanische Kopplung für Kristalle wie PZT wird in der Literatur folgendermaßen beschrieben:

Wird ein Feld durch Elektroden oben und unten am Kristall in der 1-2-Ebene, also in Polarisationsrichtung 3 angelegt, verlängert sich die Keramik ebenso in die 3-Richtung (Längseffekt). Zusätzlich werden die Abmessungen der Keramik durch die Querkontraktion in 1- und in 2-Richtung kleiner (Quereffekt). Wird ein Feld in 1- oder in 2-Richtung angelegt, versichert die Keramik in Richtung dieses Feldes. Die Verformung wird als Schereffekt bezeichnet [WNG96].

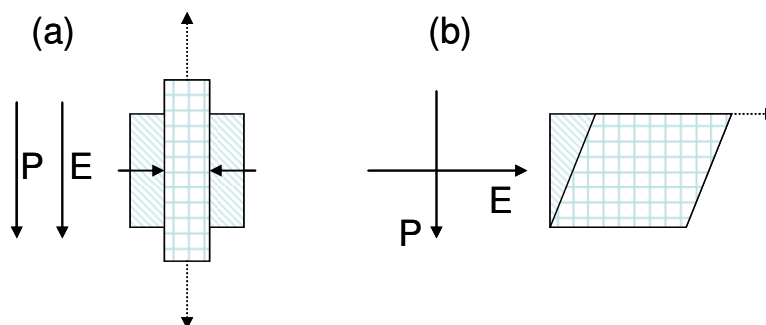


Abb. 15: Längs- und Quereffekt (a) und Schereffekt (b).

Die nachstehenden Gleichungen zeigen die Kopplung von mechanischen und elektrischen Größen. Die Ausgangsgröße wird jeweils durch eine Superposition von mechanischen und elektrischen Einflüssen zusammengesetzt. Ein tief gestellter Index gibt an, welche Zustandsgröße bei der Ermittlung des Wertes konstant gehalten wird. Der hochgestellte Index t markiert eine transponierte Größe.

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon_T E + dT, \\ S &= d^t E + s_E T. \end{aligned} \quad \mathbf{1}$$

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon_S E + eS, \\ T &= -e^t E + c_E S. \end{aligned} \quad \mathbf{2}$$

Tabelle 1 zeigt die enthaltenen Größen und die dazugehörigen Einheiten.

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 m/V
Piezoelektrische Spannung	e	C/m ² oder N/Vm

Tabelle 1: Bezeichnungen in den verwendeten Piezogleichungen [JAF65].

Die linearisierten Gleichungen können in ein Aktorschaubild übersetzt werden. Grundlage ist hier Gleichung 1. Besondere Kenngrößen sind die Freidehnung, die bei unbelastetem Aktor auftritt und die Blockierkraft, die erreicht wird, wenn der Aktor keine Bewegung ausführen kann. Diese Größen gelten jeweils für eine bestimmte elektrische Feldstärke. Zusätzlich wirkt eine Piezokeramik bei konstanter Feldstärke unter Belastung wie ein Hook'scher Körper. Abb. 16 zeigt das Schema eines Aktorschaubildes für diskrete Feldstärkewerte.

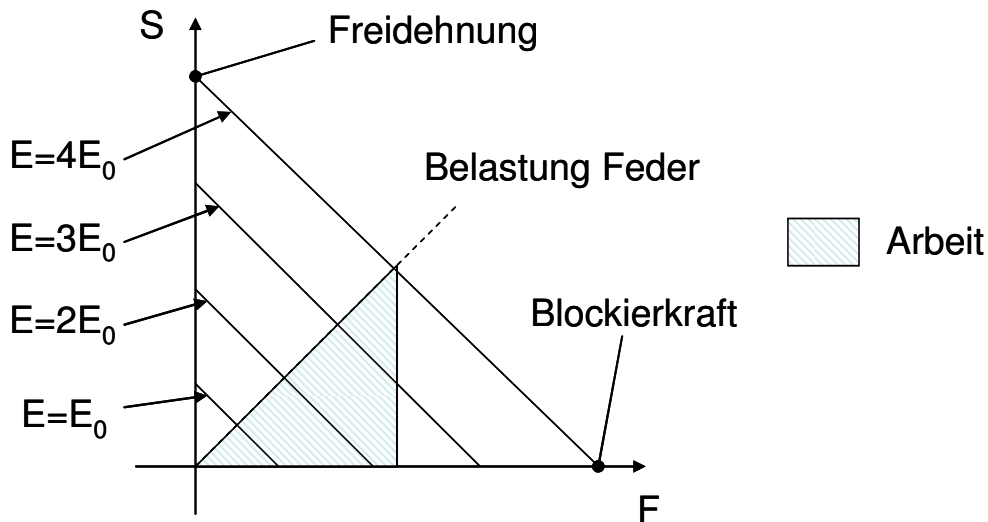


Abb. 16: Aktordiagramm für einen Piezoaktor bei verschiedenen Ansteuerfeldstärken. Die vom Aktor gegen eine Vorspannfeder geleistete Arbeit ist schraffiert dargestellt. Achsen: F Kraft am Piezo, S Dehnung der Keramik.

Anhand des Aktordiagramms kann bei bekannter Freidehnung und Steifigkeit des Aktors auf die zweite wichtige Kenngröße, die Blockierkraft, geschlossen werden. Dieses Modell ist auch auf Piezomembranaktoren übertragbar, da die kleinen Dehnungen lineare Betrachtungen zulassen. Damit kann die messtechnisch schwierig erfassbare Größe -Blockierkraft - abgeschätzt werden.

Energetische Betrachtungen sollen hier nicht vorgenommen werden. Bei der Anwendung in Tropfenerzeugern und Mikroventilen liegt der Fokus der Untersuchungen, auf Grund des ohnehin geringen Energiebedarfs im Vergleich zu makroskopischen Lösungen, auf den Verformungs- und Kraftkenngrößen.

2.2.3 Grundtypen von Piezoaktoren

Für die Interpretation der verschiedenen Effekte werden einzelne Kristall- und Feldrichtungen isoliert betrachtet. Dies ermöglicht eine Beschreibung der Grundtypen von Piezoaktoren.

d₃₃ – Längseffekt

Für den Längseffekt gilt folgende Gleichung für die Dehnung ohne Last:

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

Da der Elektrodenabstand d gleich der Anfangslänge $l_{3,0}$ ist, ist die Dehnung bei einem bestimmten Piezomaterial nur von der angelegten Spannung abhängig. Diese Eigenschaft wird bei Piezostapelaktoren ausgenutzt, in dem man sehr dünne Schichten übereinander stapelt und elektrisch parallel verbindet. Auf diese Weise kann die Ansteuerspannung für große Aktorhübe, im Vergleich zum nicht geschichteten Vollmaterial, auf ein technisch einfach zu beherrschendes Niveau gebracht werden.

d31 – Quereffekt

Hier wird die Querdehnung des Piezomaterials technisch genutzt. Die Ansteuerung ist gleich der des Längseffektes. Die Gleichung

$$\Delta l_1 = l_{1,0} \cdot E_3 \cdot d_{31} = l_{1,0} \cdot \frac{U}{d} \cdot d_{31} \quad 4$$

zeigt, dass hier der Aktorhub über die Anfangslänge beeinflusst werden kann. Zudem können durch dünnere Schichten die Feldstärken erhöht werden. Auch hier sind Stapelanordnungen üblich. Der Zweck ist allerdings eine Verstärkung des Querschnitts und damit eine Erhöhung der erzeugbaren Kräfte.

Der Längs- und Quereffekt sind nur in einer Feldrichtung nutzbar. Wird die Spannung umgepolt, dürfen gewisse Feldstärken nicht überschritten werden, da es sonst zu einer Umpolarisierung der Keramik kommen kann.

d15 – Schereffekt

Eine Sonderstellung nimmt der Schereffekt ein. Dieser Effekt kann in beiden Feldrichtungen genutzt werden. Bei diesem Effekt muss zusätzlich zur Feldrichtung die Einspannung des Aktors berücksichtigt werden. Es ergeben sich zwei unterschiedliche Konfigurationen (Abb. 17(a) und (b)).

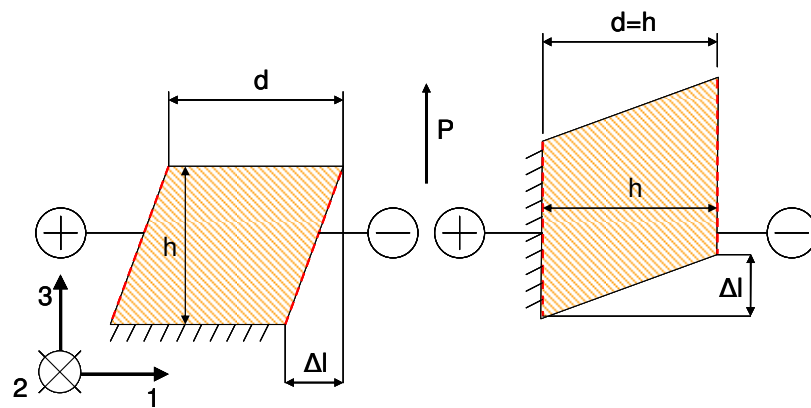


Abb. 17: Unterschiedliche Konfigurationen beim Scherwandler. Einspannung senkrecht zur Elektrode (a) und Einspannung an der Elektrode (b).

Die Einspannung senkrecht zur Elektrode ergibt:

$$\Delta l_1 = d_{15} \cdot \frac{U_1}{d} \cdot h. \quad 5$$

Die parallele Einspannung kann wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta l_3 = d_{15} \cdot \frac{U_1}{d} \cdot h = d_{15} \cdot U_1 \text{ mit } d = h. \quad 6$$

Die erste Gleichung zeigt, ähnlich dem Quereffekt, eine Abhängigkeit der Aktuation von der felddurchströmten Länge. Der zweiten Gleichung kann entnommen werden, dass sich die Auslenkung des Scherwandlers bei dieser Einspannung - wie beim Längseffekt - nicht durch den Elektrodenabstand beeinflussen lässt.

2.2.4 Nichtlineare Effekte bei Piezokeramik

Im Folgenden wird auf die nichtlinearen Effekte bei Piezokeramik, insbesondere die Hysterese, eingegangen. Die mathematischen und physikalischen Grundlagen werden dabei vereinfacht wiedergegeben. Dies ist für die hier untersuchten Aktoren zulässig, da mit ihnen keine Positionieraufgaben durchgeführt werden sollen. Eine Modellierung ist dennoch notwendig, um die Messungen an den Aktoren richtig deuten zu können. Ebenso kann mit einem vereinfachten Modell die Problematik exakter Positionierung erklärt werden. Weiterführende Überlegungen hierzu sind unter anderem bei Reiländer zu finden [REI03][ZHO03][MOA92][BAL06].

Generell kennzeichnet Hystereseverhalten in der mathematischen Beschreibung eine nicht eindeutige Zuordnung von Wertepaaren auf der Ordinate und der Abszisse, hier der Verformung und Feldstärke. Bekannt sind solche Verhaltensmodelle bei Magnetismus und dem Polarisierungsverhalten von Stoffen. Bei Piezokeramik ist die Verformung ebenfalls einer Hysterese unterworfen. Eine Abstraktion zeigt Abb. 18.

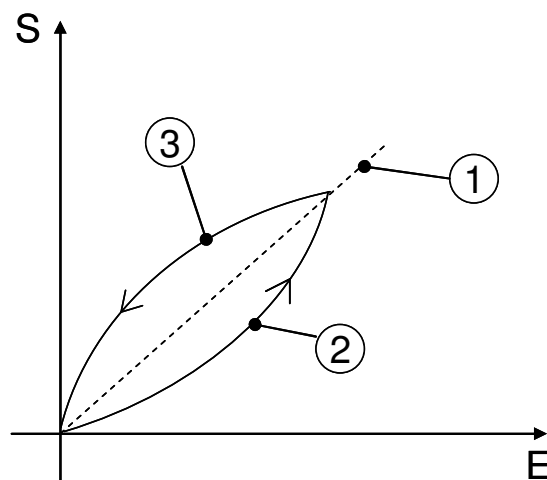


Abb. 18: Hysteresekurve bei sinusförmiger Ansteuerspannung am Piezoaktor. Kurve bei Steigerung der Spannung (2), bei Absenkung (3) und idealisierte Kennlinie (1).

Wird die Feldstärke erhöht, bleibt der Aktor stets unter einem linear idealisierten proportionalen Wert zurück (Gerade 1). Beim Zurücknehmen der Feldstärke bleibt die Verformung immer über der Geraden 1. Die Steigung der Geraden ist nach der linearen Gleichung ohne Belastung

$$S = d \cdot E$$

7

der Piezomodul d . Wird der Aktor mit einem Sinussignal angesteuert durchläuft er immer wiederkehrend die Kurven 2 und 3. Für unterschiedliche Maximalspannungen ergibt sich das auf Abb. 19 gezeigte Verhalten. Es müssen für die unterschiedlichen Ansteuerspannungen unterschiedliche Piezomodule angegeben werden. Die Verformung hängt von der Feldstärke in nicht linearer Weise ab. Im Allgemeinen werden vom Hersteller der Keramik Kleinsignalwerte für die Piezomodule angegeben. Die Parameter, die sich beim Einsatz der Keramik als Aktor unter hohen Feldstärken ergeben, müssen gegebenenfalls durch Versuche ermittelt werden. Ein Beispiel für die Steigerung der Piezomodule zeigt der Graph in Abb. 20. Die Daten gelten für den Werkstoff PIC255 des Herstellers PI Keramik.

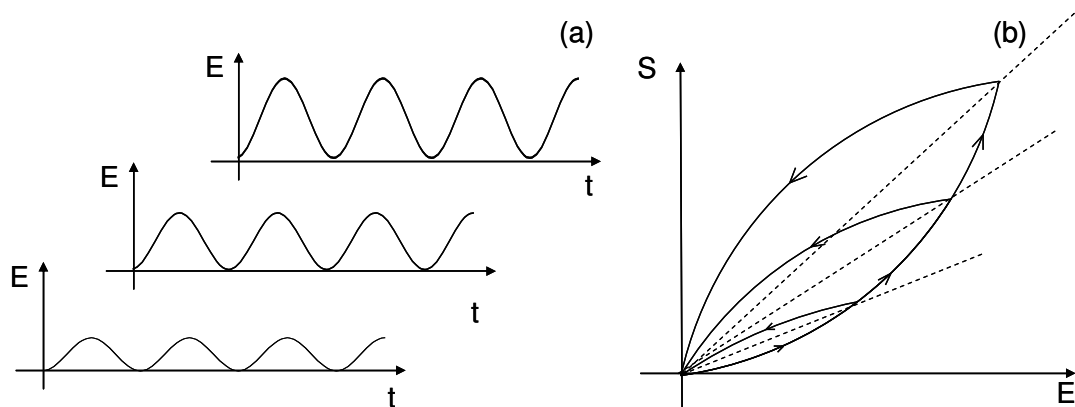


Abb. 19: Hysteresekurven bei unterschiedlichen hohen Ansteuerspannungen. Verlauf der Ansteuerfeldstärken über die Zeit (a) und Verformung über der Feldstärke (b).

Der Längseffekt steigert sich im Bereich von 0-0,5 MV/m auf ca. 140% des Kleinsignalwertes. Beim Schereffekt beträgt die Steigerung in diesem Bereich sogar ca. 200%.

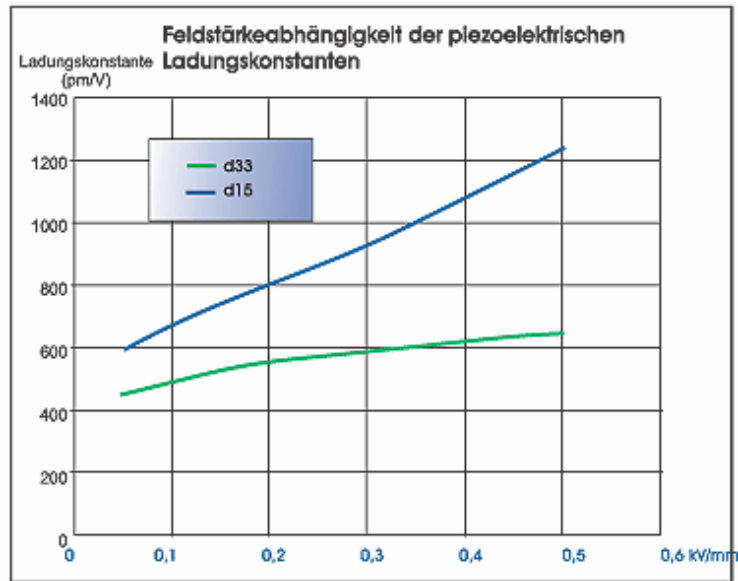


Abb. 20: Feldstärkeabhängigkeit der Ladungskonstanten bei PIC255 [PIC05]. Auftrag verschiedener Ladungskonstanten (d33 und d15) über der elektrischen Feldstärke.

Mit diesem Modell kann auch die Problematik von Positionieraufgaben veranschaulicht werden. Beispielsweise ist für Anwendungen in der Strömungssteuerung für Fluide das Verhalten bei einer beliebigen Folge von Ansteuerspannung relevant. Hier hat die Hysterese einen wesentlichen Einfluss. Abb. 21 zeigt eine solche Ansteuerung.

Problematisch sind dabei die folgenden Unsicherheiten: Bei einer Hysteresesteuerung muss jeweils die Vorgeschichte der Ansteuerung mit berücksichtigt werden. Durch die Serialisierung kummulieren sich die Unsicherheiten im Modell. Zudem muss das Kriechen berücksichtigt werden. Um gesicherte Stellbewegungen auszuführen, sollte ein geregelter Betrieb vorgesehen werden.

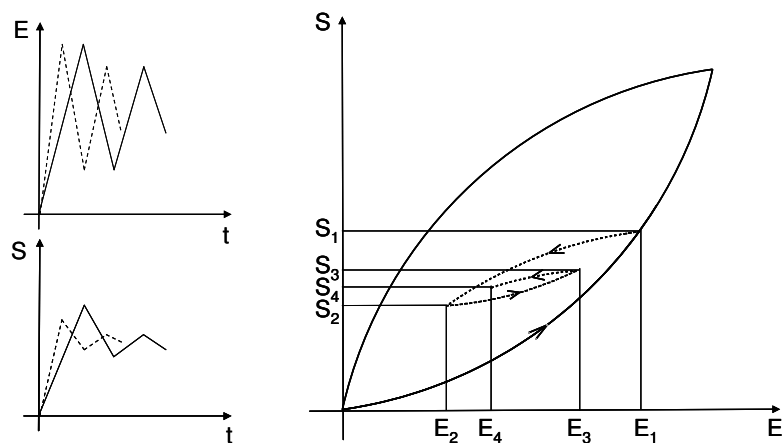


Abb. 21: Problematik des Einsatzes von Piezokeramik als nicht positionsgeregeltes Stellglied. Bei schneller Ansteuerung wird zudem ein kleinerer Stellweg erzielt (Kriechen, strichlierte Linie).

3. Simulation von Referenzstrukturen

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind Piezomembranwandler. Ihr Hauptmerkmal ist, neben der Steigerung des Aktorhubs Wege zu sperren und Drücke in Flüssigkeiten zu bringen, ohne dass Dichtungen für bewegliche Teile vorgesehen werden müssen. Hier werden nur Untersuchungen an solchen Aktoren gezeigt, die eine auf eine passive Membran aufgeklebte, ebene Piezokeramik besitzen. Membranaktoren, die durch einen Piezoaktor senkrecht zu ihrer Ebene gedrückt werden, werden nicht behandelt.

In diesem Abschnitt wird eine Simulation aufgebaut und durchgeführt, die verschiedene Wandler des Stand der Technik abbildet. Dadurch wird eine Vergleichsbasis für Wandler mit strukturierten Elektroden geschaffen.

Die Beschreibung beginnt mit der Erläuterung des Aufbaus der Wandler und der Definition eines Referenzobjektes dessen Geometrie die Grundlage für nachfolgende Vergleiche bildet. Im Anschluss wird das Simulationsmodell erläutert. Die Simulation wird dann auf verschiedene geometrische Grundformen angewendet. Der Einfluss der Konstruktionsparameter bildet den Inhalt des Abschnitts *Parametervariationen – maximale Auslenkung und Druckerzeugung*. Darauf folgend wird das - für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Wandler - wichtige Frequenzverhalten untersucht. Den Abschluss des Kapitels bilden experimentelle Untersuchungen an Labormustern.

3.1 Aufbau der Wandler und Einführung eines Referenzobjektes

Abb. 22 gibt das Schema der Verformung von Bimorph-Piezoaktoren und technisch relevante Bauformen wieder (Ähnliche Bauformen sind beispielsweise bei [BÖH99] und [WAK96] zu finden).

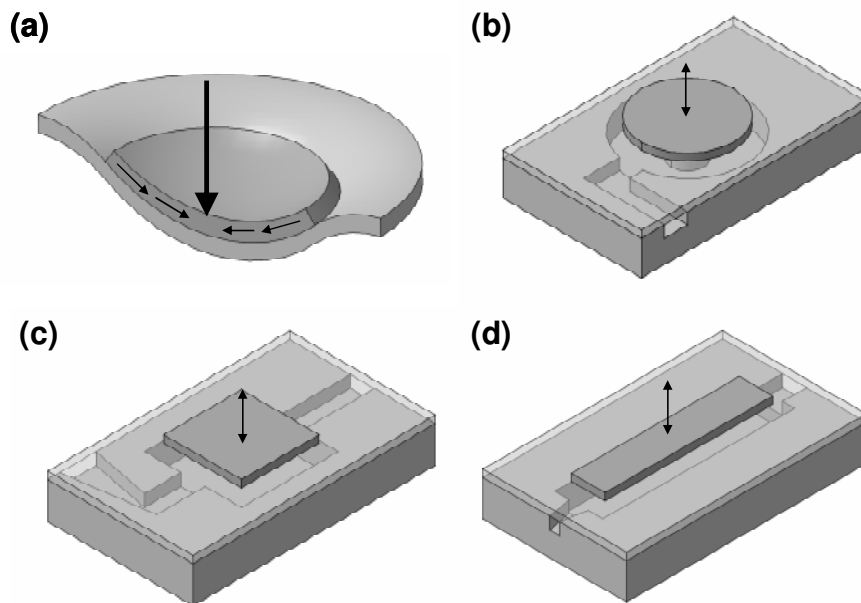


Abb. 22: Bimorphaktoren: Membranverformung (a), kreisförmige Membran (b) , quadratische Membran (c) und längliche Membran (d).

Alle Bauformen sind in ihrer Schichtstruktur gleich: Über dem Arbeitsraum befindet sich eine dünne Deckplatte (im Folgenden „passive Membran“ genannt). Auf dieser befindet sich zentrisch zum Arbeitsraum der eigentliche Aktor, die Piezokeramik. Sie ist bei den Wandlern der Stand der Technik flächenmäßig kleiner als der eigentliche Arbeitsraum. Dadurch entstehen zwischen dem mit Keramik belegten Bereich und den Auflagern Zonen, die im Sinne von Festkörpergelenken wirken.

Die Piezokeramik selbst ist oben und unten vollflächig mit Elektroden belegt. Die Polarisierung entspricht der Richtung des mit dieser Elektrodenanordnung erzeugbaren Feldes. Für die Aktuation wird der d31-Effekt genutzt. Zieht sich der Piezo zusammen, verformt sich das gesamte „Sandwich“ in Richtung der passiven Membran (Abb. 22(a)).

Die wesentlichen Konstruktionsparameter sind bei dieser Anordnung die freie Biegelänge zwischen den Auflagern, die Dicken der Keramik und der passiven Membran, die Überdeckung (definiert als Piezobreite/Membranbreite), die geometrische Form und die verwendeten Materialien.

Zwischen der passiven Membran kann sich je nach Methode der Fertigung eine Klebeschicht befinden. Da die Materialien oft sehr dünn ausgeführt werden, hat diese Klebeschicht einen erheblichen Einfluss auf die Verformungs- und Druckausgangsgrößen des Aktors.

Der gesamte Bimorphaktor ist zudem am Rand des Arbeitsraumes mit dem Funktionsteil verbunden. Bei dieser Verbindung sind aber, im Gegensatz zur Verbindung von passiver Membran und Keramik, Verbindungsmethoden der Stand der Technik, die keine zusätzliche Elastizität darstellen. Beispiele hierfür sind das anodische Bonden oder Reibschweißtechniken. Wird dennoch eine Klebeverbindung eingesetzt, wirkt sie sich, wenn

nur ein schmaler Bereich zur Verbindung vorgesehen ist, stark auf die Ausgangsgrößen des Aktors aus.

Die Zielgrößen der Simulation werden anhand der wesentlichen Einsatzmöglichkeiten ausgewählt. Folgende Szenarien stellen das Haupteinsatzfeld von Membranaktoren in der Mikrofluidik dar:

- *Pumpe (oder Einzeltropfenerzeuger):*

Eine Pumpe erzeugt aktiv eine Druckdifferenz in einer Flüssigkeitsleitung, die zu einer Strömung führt. Der erzeugte Druck kann genutzt werden, um Flüssigkeiten zu beschleunigen oder auf ein höheres Niveau zu bringen. Kennzeichnend für eine Pumpe sind Mechanismen die die Flussrichtung steuern. Diese Steuermechanismen können mechanisch als Ventile ausgeführt sein, dynamisch über Strömungsmechanismen realisiert werden oder können, bei Tropfenerzeugern, ein Grenzflächenphänomen darstellen. Abb. 23 zeigt den grundsätzlichen Ablauf.

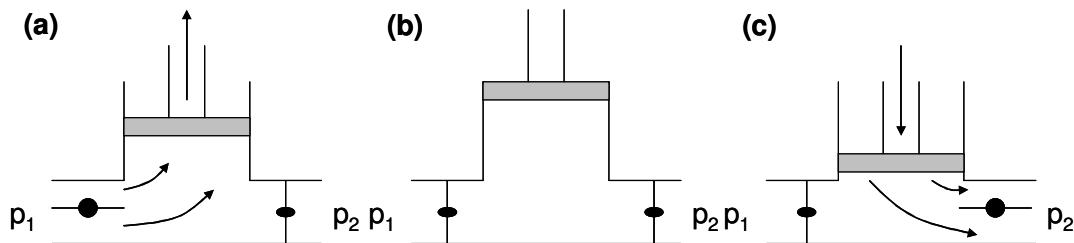


Abb. 23: Funktionsprinzip einer Pumpe: Ansaugen (a), Schließen des Einlasses (b), Ausschieben (c).

Für die Beschreibung der Druckerzeugung bei Membranaktoren ist der Übergang vom Zustand geschlossener Ventile zur Öffnung gegenüber dem erhöhten Druck relevant. Nach dem Öffnen des Auslassventils wird der Membranaktor durch den Druck deformiert und Fluid strömt in die Pumpkammer zurück. Durch die elektrische Aktuation wird die Membran um einen Wegbetrag verschoben, der unabhängig vom herrschenden Druck ist. Die Pumpe hat ihre Grenzdruckbelastung erreicht, wenn die Summe der Volumina durch Druckdeformation und elektrischer Ansteuerung gleich Null ist. Die Pumpe bringt keine Förderleistung mehr.

Gemäß diesem Prinzip kann eine Membranpumpe durch die Größen Freidehnung und Blockierkraft hinreichend beschrieben werden.

- *Ventil*

Ein Ventil ändert den Querschnitt eines Strömungskanals. Ein Membranventil kann, je nach Bauform, im Ruhezustand einen Kanal verschließen. Bei einer Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass wird die Membran deformiert und der Strömungsquerschnitt vergrößert sich. Durch die elektrische Aktuation kann der Kanal wieder verschlossen werden. Ist der mit einem Ventil erzeugbare Grenzdruck erreicht, sind die Deformation durch den Druck und die Verformung durch den Aktor gleich groß. Folglich kann ein Membranaktor, der als Ventil genutzt wird, ebenso wie

Pumpmembranen, durch die Größen Freidehnung und Blockierdruck beschrieben werden.

Im Folgenden werden anhand von Simulationen die Parameter variiert und mit den Ausgangsgrößen maximale Auslenkung der Membran und der maximalen Druckerzeugung in Beziehung gesetzt. Die Simulationen werden anhand einer **Referenzgeometrie** aufgebaut, die der Geometrie der später gezeigten Versuchsmuster entspricht. Es handelt sich um einen kreisrunden Aktor, der die Tabelle 2 zu entnehmenden Abmessungen aufweist. Zudem wird eine Grundfeldstärke im Material von 0,4 MV/m festgelegt.

Freie Biegelänge	d	10 mm	
Dicke des Trägers	h_T	150 μm	
Dicke der Piezoscheibe	h_P	250 μm	
Piezomaterial	-	PIC 151	
E-Modul PZT	E_P	59,4 GPa	
E-Modul des Trägers	E_T	70 GPa	
Trägermaterial		Pyrex	
Querkontraktion der passiven Membran	ν	0,2	
Überdeckung	$\ddot{U}=r_{\text{innen}}/d$	0,75	

Tabelle 2: Kenndaten und Schnittbild des Referenzobjektes anhand dessen die Vergleiche in der folgenden Arbeit dargestellt werden.

3.2 Numerische Modellierung

Zur Simulation der Aktoren wird eine Analyse auf Basis der Methode der finiten Elemente durchgeführt (FEM). Für eine solche Analyse eignet sich beispielsweise das Programm ANSYS 10.0 von ANSYS Inc. [NED04].

Die Struktur kann als vollständiges 3D-Volumenmodell abgebildet werden. Dadurch können die verschiedenen Bauformen bezüglich ihrer Verformung untersucht werden. Die passive Membran und Keramik werden als zwei getrennte Volumenkörper mit den jeweils unterschiedlichen Eigenschaften modelliert. Ohne die Berücksichtigung einer Klebeschicht werden diese Teile über eine „Boolesche“ Operation zusammengefügt. Dabei werden die Kontaktflächen so verbunden, dass die einzelnen Knotenpunkte im Kontakt der Berechnungsnetze keine Verschiebung gegeneinander ausführen können. Somit wird eine idealisierte Verbindung implementiert. Soll zusätzlich der Einfluss einer Klebeschicht betrachtet werden, wird auf die oben genannte Weise eine zusätzliche Schicht eingebracht.

Die Lagerung der Membran wird idealisiert abgebildet. Dabei werden die Berechnungsknoten am Rand der Struktur in ihrer Position festgehalten. Die Lagerung entspricht dann einem Festlager, das sowohl Kräfte als auch Momente aufnehmen kann.

Für die Struktursimulation in 3D steht in ANSYS 10.0 das Element 227 zur Verfügung, das die Eingabe von Piezomaterialparametern zulässt. Damit werden beim Aufbau der Simulation die beiden Volumenkörper vernetzt. Über die Materialparameter wird dann dem jeweiligen Volumenkörper das richtige Verhalten aufgeprägt. Zu Grunde gelegt wird den hier ausgeführten Simulationsmodellen die Keramik PIC 151. Sie weist für den Aufbau von Aktoren günstige Eigenschaften auf. Die wesentlichen Herstellerdaten zeigt Tabelle 3:

Herstellerdaten PIC151			
Elastizitätskonstanten bei konstantem Feld	Wert [$10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$]	Ladungs- konstanten	Wert [$10^{-12} \text{m}/\text{V}$]
S11	16,83	D31	-214
S12	-5,65	D33	423
S13	-7,1	D15	610
S33	19		
S55	50,96		

Tabelle 3: Wesentliche Kenndaten der Keramik des Typs PIC151 von PI Keramik [PIC05].

Da die vollständige Berechnung von Modellen in 3D bei den gegebenen Geometrieverhältnissen (Hauptabmessungen bezogen auf die Schichtdicke) erhebliche Rechenzeiten mit sich bringt, wird ein weiteres, vereinfachtes Modell für Parameterstudien benutzt.

Dieses Modell bildet nur kreisrunde Membranaktoren ab. Der Aktor wird als achsensymmetrisches Modell betrachtet. Wie in der dreidimensionalen Simulation werden die einzelnen Schichten idealisiert verbunden. Die Abbildung der Lagerung kann ebenso durch eine Fesselung der Knotenpunkte am Rand erfolgen.

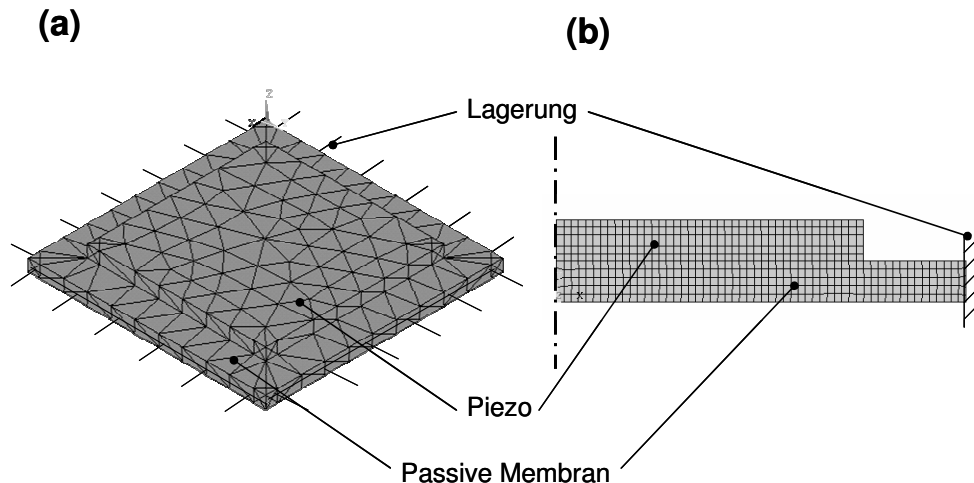


Abb. 24: Berechnungsgetze von Membranaktoren: 3D-Netz einer quadratischen Aktors (a) und 2D-Modell einer kreisförmigen Struktur (b).

Der Verformungswert kann bei 2D- und 3D-Simulationen direkt aus den Knotenverschiebungen abgelesen werden. Der Maximaldruck wird ermittelt, indem die verformte Membran mit einem Druck beaufschlagt wird. Der Druckwert, bei dem die im vorhergehenden Schritt ermittelte Verformung im Mittelpunkt der Membran wieder verschwindet, ist der gesuchte Kennwert.

3.3 Verformung technisch relevanter Bauformen

Im Folgenden werden wichtige Bauformen miteinander verglichen. Ziel der Darstellung ist eine grundsätzliche Untersuchung des Verformungsverhaltens und der Druckkennwerte. Die jeweiligen Muster orientieren sich auch beim Parameter Überdeckung an der oben aufgeführten Standardgeometrie. Ein Vergleich, der die Optima bei der Überdeckung mit berücksichtigt, wird in Abschnitt 4.6 dargestellt.

3.3.1 Kreisförmige Bauform

Abb. 25(a) zeigt das Ergebnis der 3D-Simulation. Dargestellt ist die Verschiebung der Knotenpunkte in z-Richtung, senkrecht zur Membranebene. Es ergibt sich für die gegebenen Abmessungen eine maximale Verschiebung in der Mitte der Membran von $-2,6 \mu\text{m}$. Die konkave Krümmung liegt in dem Bereich der mit Keramik belegt ist. Im Randbereich ist die Krümmung konvex.

In der Keramik treten Druck- und Zugspannungen auf (siehe Abb. 25(b)). Kritisch sind für keramische Werkstoffe besonders die Zugspannungen. Am unteren Rand der Keramik treten bei dieser Ansteuerfeldstärke für diese Konfiguration Spannung von ca. 5 N/mm^2 auf. Für diesen Typ von Keramik sind bei Zugbelastung ca. 30 N/mm^2 zulässig.

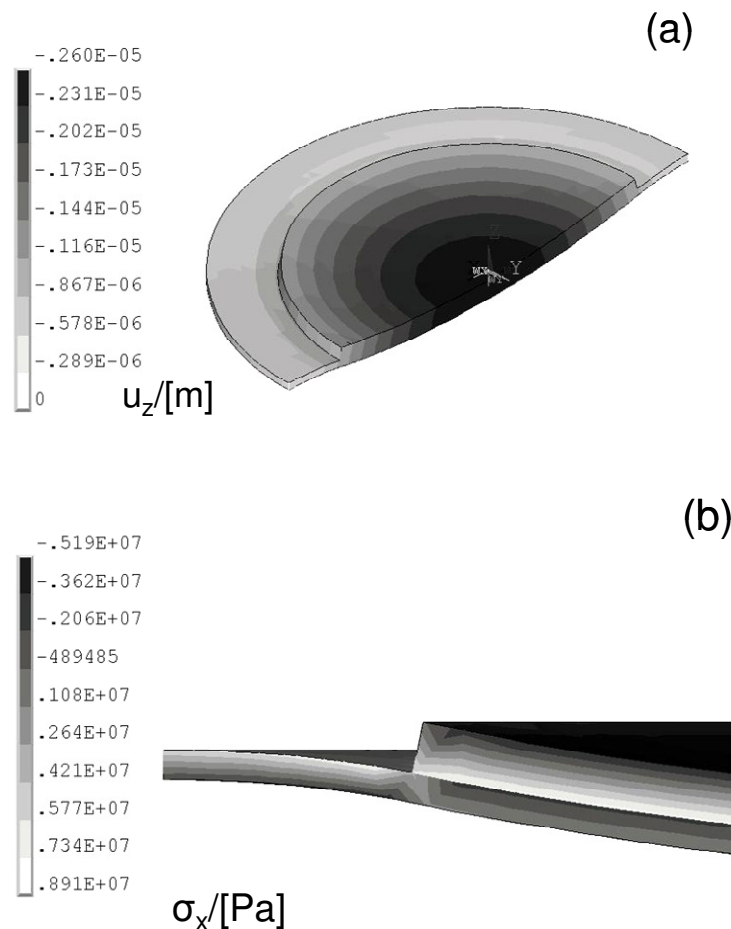


Abb. 25: Simulation: Verformungszustand bei Ansteuerung der kreisförmigen Referenzgeometrie (a) und Radialspannungen im Wandler (b) (Schnittdarstellung).

Beim kreisförmigen Aktor mit den gegebenen Abmessungen (im Folgenden Referenzaktor genannt) ergibt die Simulation einen Maximaldruck von 0,459 Bar.

3.3.2 Quadratische Bauform

Häufig werden Piezomembranwandler mit quadratischer Form aufgebaut. Dies ist hauptsächlich durch die einfache Herstellung begründet. Hier ergeben sich auf Grund der konzentrischen Aktuation Änderungen im Verformungsverlauf. Die Verformung in Abb. 26 gilt für einen Aktor, der in seinen Hauptabmessungen mit dem Kreiswandler, also mit einer Kantenlänge von 10 mm und einer Überdeckung von 75%, der in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist, vergleichbar ist.

Die Verformung erreicht hier $-2,9\mu\text{m}$ und übertrifft damit den kreisförmigen Wandler um ca. 11%. Dies kann auf die größere Gesamtfläche zurückgeführt werden. Damit ist die Struktur zum einen biegeweicher und kann zum anderen mehr Keramik für die Aktuation tragen. Für das Flächenverhältnis vom kreisförmigen zum quadratischen Aktor gilt: $\pi/4 = 0,785$.

Bedingt durch die insgesamt weichere Struktur erreicht der quadratische Aktor im Vergleich zur kreisförmigen Referenzaktor nur 0,407 Bar Maximaldruck. Dies entspricht 88,6% der kreisförmigen Struktur.

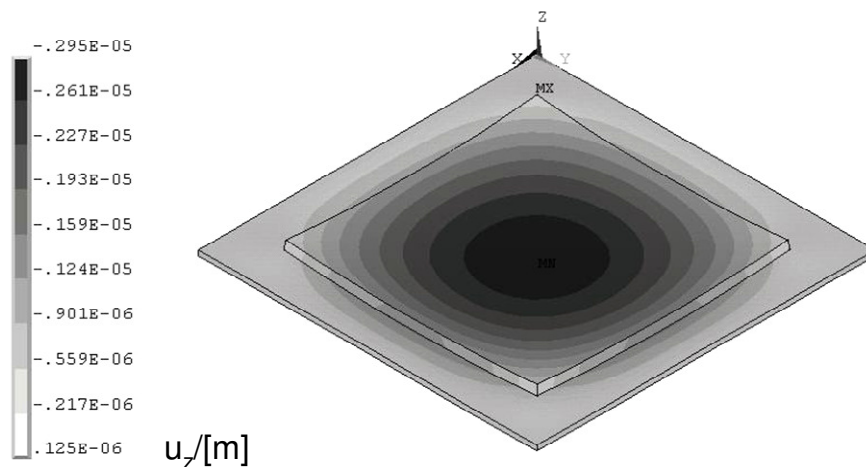


Abb. 26: Simulation: Verformung eines quadratischen Membranaktors.

3.3.3 Längliche Wandler

Besonders bei Anwendungen aus dem Bereich der Mikrotropfenerzeugung sind längliche Wandler verbreitet. Sie kennzeichnet ein besonderer Vorteil: Die Steifigkeit wird im Wesentlichen durch die kleinere Abmessung bestimmt. Dadurch können hohe Drücke und hohe Kennwerte bei der Dynamik erzielt werden. Durch die längliche Form wird zudem bei Einsatz in einem Tropfenerzeuger eine große Flüssigkeitsmenge verdrängt.

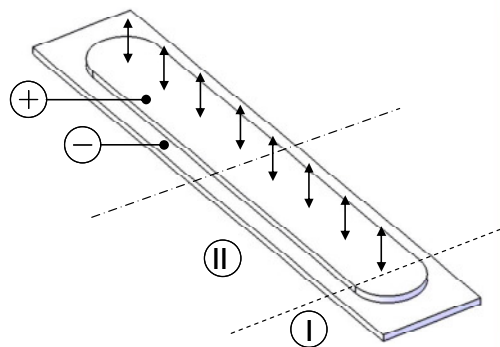


Abb. 27: Schema der Bereiche mit unterschiedlichem Verformungsverhalten beim länglichen Wandler.

Der längliche Wandler entspricht den vorher genannten Bauformen, wenn das Verhältnis von Länge zu Breite (im Folgenden Aspektverhältnis genannt) nahe 1 liegt (siehe Abb. 27, Aktor bei dem Bereich II fehlt). Im Randbereich können kreisförmige und rechteckige Lagerungen konstruiert werden. Wird das Aspektverhältnis deutlich vergrößert (durch eine längliche Struktur Bereich II), können die Randbereiche für die Funktion vernachlässigt werden. Das Verhalten der Verformung des Kernbereiches bei einer Variation des Aspektverhältnisses wird im Folgenden untersucht.

Für die Parametervariation wird eine 3D- Simulation verwendet, bei der die Randbereiche der Struktur sich frei verformen können. Damit kann die Simulation leicht auf ein später in Abschnitt 4.4 eingeführtes analytisches Rechenmodell abgebildet werden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass bei geringen Aspektverhältnissen die Verformungen denen quadratischer oder runder Membranen entsprechen. Ein Aspektverhältnis über eins, führt zu einer deutlichen Steigerung der Verformung. Sie erreicht bei einem Wert von drei ein Maximum und geht in ein Plateau über. Auf diesem Plateau werden ca. 40% mehr Verformung bei vergleichbarer Breite erzielt (Spitzenwert 46%).

In ähnlicher Weise verhält sich der Maximaldruck der Anordnung bei einem Aspektverhältnis von über drei. Eine Anordnung mit einer freien Biegelänge von 10 mm und den sonstigen Abmessungen des Referenzwandlers erzeugt nur einen Druck von 0,263 Bar. Damit werden nur 57% der Referenzstruktur erreicht. Dennoch ist ein Einsatz sinnvoll, da bei größeren Aspektverhältnissen günstige Verhältnisse von Druck zum Volumen erzielt werden können.

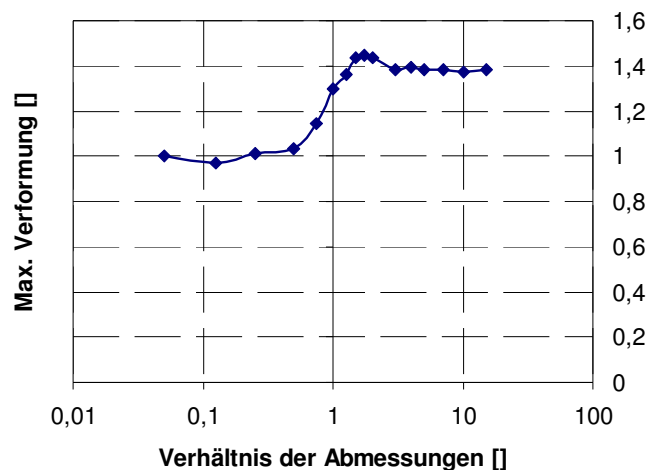


Abb. 28: Simulation: Variation des Verhältnis der Abmessungen (Freie Biegelänge/Breite). Die Werte sind auf ein Verhältnis von 0,05 normiert.

Um das Verhältnis der Drucksteifigkeit von kreisförmigen und länglichen Anordnungen weiter zu beschreiben, können analytische Gleichungen genutzt werden. Diese liefern Extremwerte zwischen deren Grenzen sich reale Anordnungen einordnen lassen. Die Vergleichsgröße ist die Verformung in der Mitte der Struktur bei einem gegebenen Druck. Die Durchbiegung einer kreisförmigen Anordnung wird beschrieben durch:

$$w_k = \frac{1}{64} \cdot \frac{p_0}{D} \cdot r^4. \quad 8$$

Eine längliche Struktur wird über einen Balken unter Belastung angenähert:

$$w_l = \frac{1}{384} \cdot \frac{p_0 \cdot b}{EI} \cdot l^4. \quad 9$$

Mit den jeweiligen Biegesteifigkeiten:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \text{ und } EI = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12} \quad 10$$

kann ein Verhältnis der Durchbiegung berechnet werden, wenn gleiche Hauptabmessungen vorliegen. Es ergibt sich

$$\frac{w_k}{w_l} = 0,3357. \quad 11$$

Im theoretischen Grenzfall eines unendlich langen Aktors bei dem die Verformung ca. 140% der kreisförmigen Anordnung erreicht, erzeugt der Wandler nur einen Maximaldruck von 46,9% des Referenzwandlers.

Abb. 29 zeigt die Verformung anhand einer 3D-Simulation für einen Wandler mit den Hauptabmessungen 10 mm, 30 mm und einer Dicke von 400µm (Schichtdickenverhältnis wie beim Referenzwandler). Dieser Wandler erreicht das Maximum mit 146% Verformung der kreisförmigen Struktur.

Das Verformungsprofil zeigt, dass bei einem Aspektverhältnis von drei bereits ein plateauartiges Verformungsmaximum auftritt. Die Randbereiche beeinflussen die Volumenverdrängung also nur noch wenig. Damit ergibt sich für die in Praxis noch wesentlich größer ausgeführten Aspektverhältnisse folgende Möglichkeit zur Abschätzung des mit diesem Aktor verdrängten Volumens:

$$\Delta V = \frac{1}{2} \cdot w_{\max} \cdot l \cdot b \cdot 1,4. \quad 12$$

Diese Berechnung geht von einem symmetrischen Verformungsprofil aus, das im Querschnitt durch ein Dreieck angenähert werden kann. Der Eingangswert w_{\max} kann anhand der Verformung eines kreisförmigen Wandlers gewonnen werden. Eine analytische Berechnungsmethode zeigt Abschnitt 4.3.

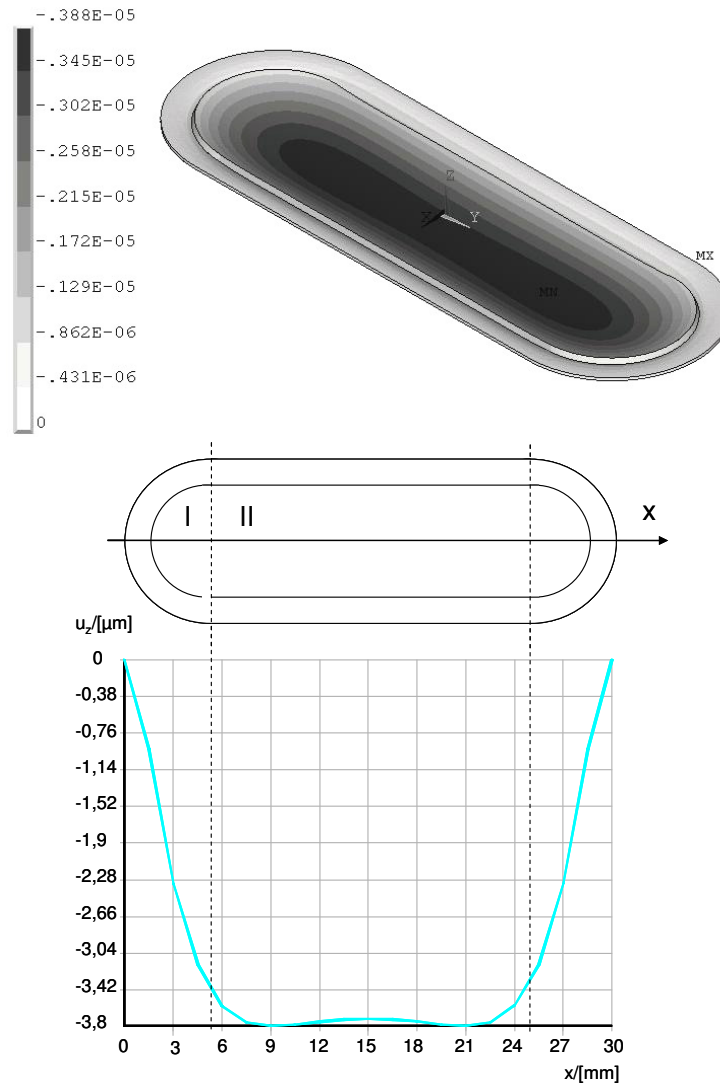


Abb. 29: Simulation: Verformung eines Wandlers mit stark abweichenden Hauptabmessungen.

3.4 Parametervariationen- Auslenkung und Druckerzeugung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der 2D-Simulationen von kreisförmigen Wandlern gezeigt.

3.4.1 Feldstärke

Die elektrische Ansteuerung ist der erste Parameter der variiert wird. Um eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Wandler mit strukturierten Elektroden zu gewährleisten, wird hier die Feldstärke und nicht die Ansteuerspannung verändert. Sie wird in $0,1 \text{ MV/m}$ Schritten von $0,1$ bis 1 MV/m gesteigert. Der Graph in Abb. 30 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der Auslenkung des Mittelpunktes der Struktur in Z-Richtung. Der erreichbare Maximaldruck ist ebenfalls linear von der Feldstärke abhängig. Wie in Kap. 2.2.4 beschrieben, gilt dieses Modell auf Grund der nicht linearen Eigenschaften der Piezokeramik nur eingeschränkt. Der Graph kann deshalb nicht als Ansteuerkennlinie aufgefasst werden.

Für den Vergleich der 2D mit der 3D-Simulation können aus dem Diagramm in Abb. 30 die Werte für die Verformung (2,8 μm) und den Maximaldruck (0,45 Bar) bei 0,4 MV/m abgelesen werden. Die Abweichung der verschiedenen Simulationsmodelle (2D und 3D) um 0,2 μm Verformung und 0,09 Bar Druck sind gering.

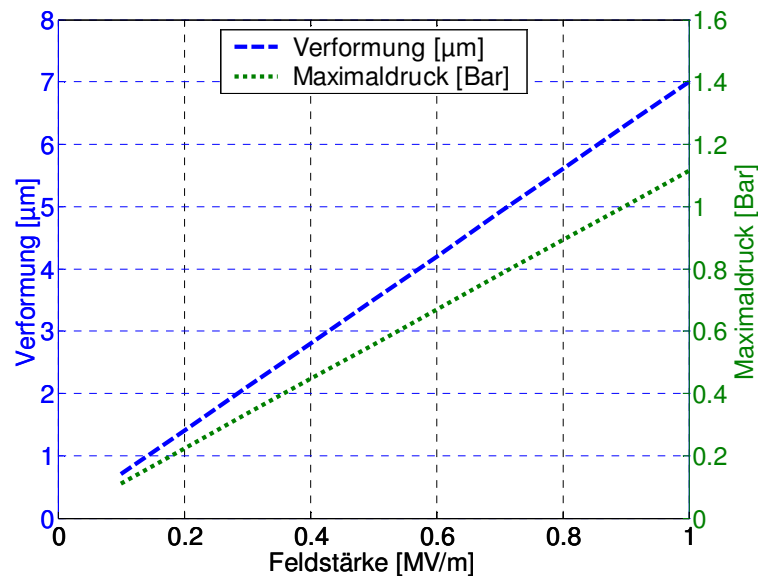


Abb. 30: Simulation: Variation der elektrischen Feldstärke für das Referenzobjekt. Einfluss auf die Verformung und Maximaldruck.

3.4.2 Materialien

Wichtig für die Konstruktion ist der Werkstoff der passiven Membran. Die entscheidende Kenngröße, bezogen auf den zu untersuchenden Verbund, ist der Elastizitätsmodul des passiven Trägers. Der E-Modul von Piezomaterialien des Typs PZT liegt im Allgemeinen bei ca. 60 GPa.

Die Simulation zeigt ein Maximum bei einem E-Modul von ca. 50 GPa für die oben angegebenen Geometrieverhältnisse. Der Einfluss dieses Parameters ist allerdings gering. Bei den gegebenen Dickenverhältnissen schwächen nur Materialien mit verschwindend geringen E-Moduli die Aktuation signifikant. Diese Ergebnisse gelten nur für die gegebenen Schichtdicken. Die gewählten Schichtdicken stellen, wie weiter unten dargestellt, einen günstigen Aufbau bezüglich der Verformungs- und Druckkennwerte dar.

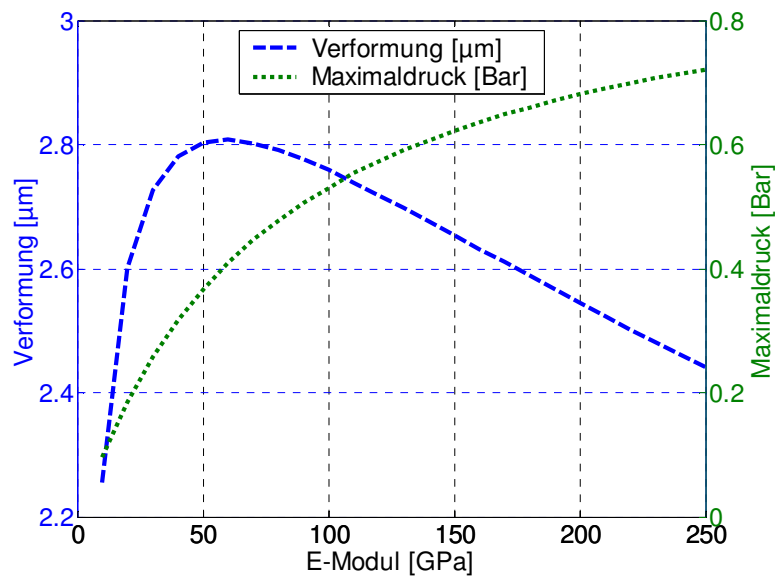


Abb. 31: Simulation: Einfluss des Elastizitätsmoduls des Trägermaterials auf Verformung und Druck beim Referenzobjekt.

3.4.3 Geometrische Abmessungen

Ein weiterer wichtiger Konstruktionsparameter ist der Durchmesser des Aktors. Er spielt für die Verformungs- und Druckkennwerte eine entscheidende Rolle, da er die Steifigkeit der Struktur maßgeblich beeinflusst. Zudem bestimmt der Durchmesser den Flächenbedarf der Struktur und damit die mögliche Packungsdichte von getrennt ansteuerbaren Kanälen auf einem Mikrosystem.

Die numerische Rechnung zeigt, dass die Verformung mit steigendem Durchmesser überproportional zunimmt. In ähnlichem Maße, wie die Verformung mit dem Durchmesser ansteigt, fällt der erreichbare Maximaldruck. Aus Sicht der Konstruktion muss also entschieden werden, ob die Anwendung hohe Drücke oder große Membranverformungen erfordert (siehe Abb. 32).

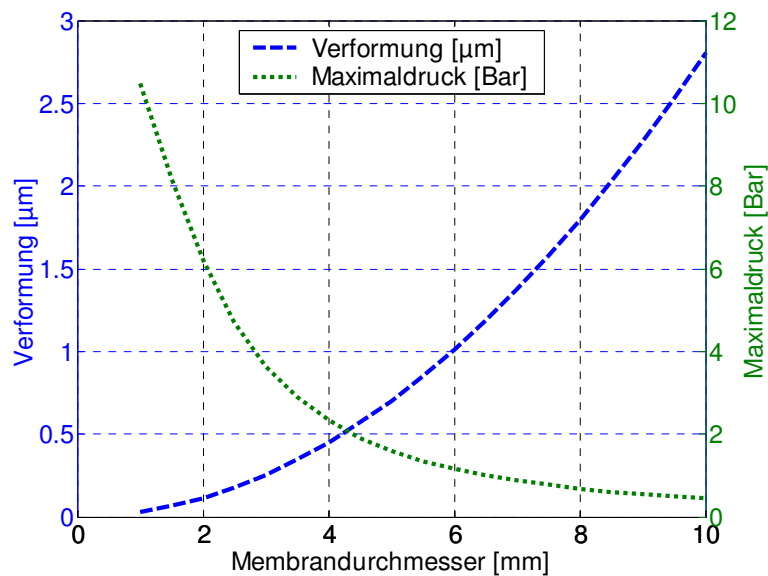


Abb. 32: Simulation: Einfluss des Gesamtdurchmessers der Membran auf Verformung und Druck beim Referenzobjekt.

Bei Aktoren mit getrennter Keramik ist der überdeckte Bereich der Membran ein wesentlicher Parameter. Die Simulation zeigt ein Optimum bei circa 85% Überdeckung. Der Maximaldruck zeigt ein leicht in Richtung 100% verschobenes Maximum. Dies ist durch zwei Ursachen bedingt: Zum Einen ist Druck an die Verformung gekoppelt. Zum Anderen hängt er von der Plattensteifigkeit des Aktors ab, die bei 100% ihr Maximum erreicht.

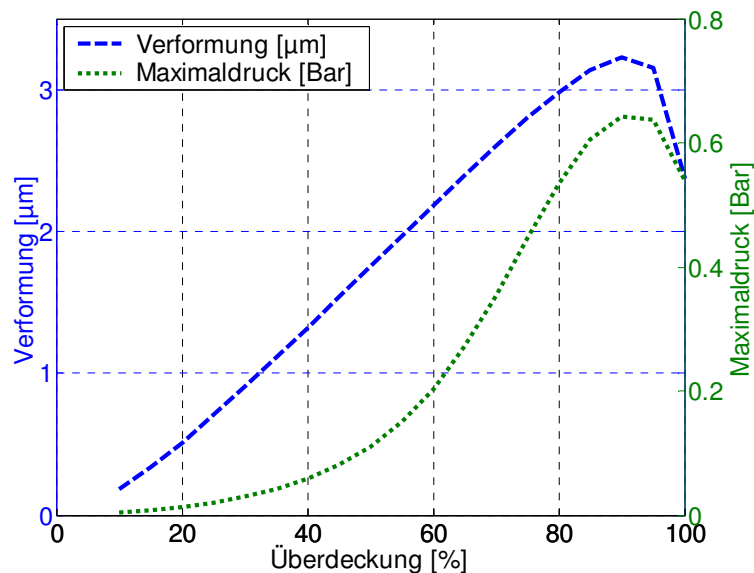


Abb. 33: Simulation: Einfluss der Überdeckung der Membran mit Piezokeramik auf Verformung und Druck beim Referenzobjekt.

3.4.4 Schichtstärken

Die Dickenverhältnisse und die Dicke des Gesamtverbundes sind, wie oben geschildert, wichtige Konstruktionsparameter. Abb. 34 zeigt die jeweilige Parametervariation.

Der Graph in Abb. 34 zeigt in Richtung abnehmender Dicken eine starke Zunahme der Verformung in Z-Richtung. Bedingt durch die sich erhöhenden Plattensteifigkeiten steigt der Druck mit zunehmender Dicke an. Für die Konstruktion ergibt sich, ähnlich wie beim Aktordurchmesser, eine starke Orientierung am Einsatzzweck des Membranaktors.

Für festgelegte E-Moduli und Gesamtdicken gibt es ein Maximum der Verformung bezüglich der Keramikdicke. Hier, beim Trägerwerkstoff Pyrex mit 150 μm Dicke, zeigt sich in der Simulation eine Piezodicke von ca. 250 μm als Optimum. Der Druckverlauf weist auf Grund seiner Koppelung an die Leerlaufverformung ebenfalls ein Maximum auf. Dieses liegt in Richtung kleinerer Piezodicken. Für die Konstruktion mit der Werkstoffkombination PZT und Pyrexglas bedeutet dies, dass die Schichten ähnliche Dicke aufweisen sollten.

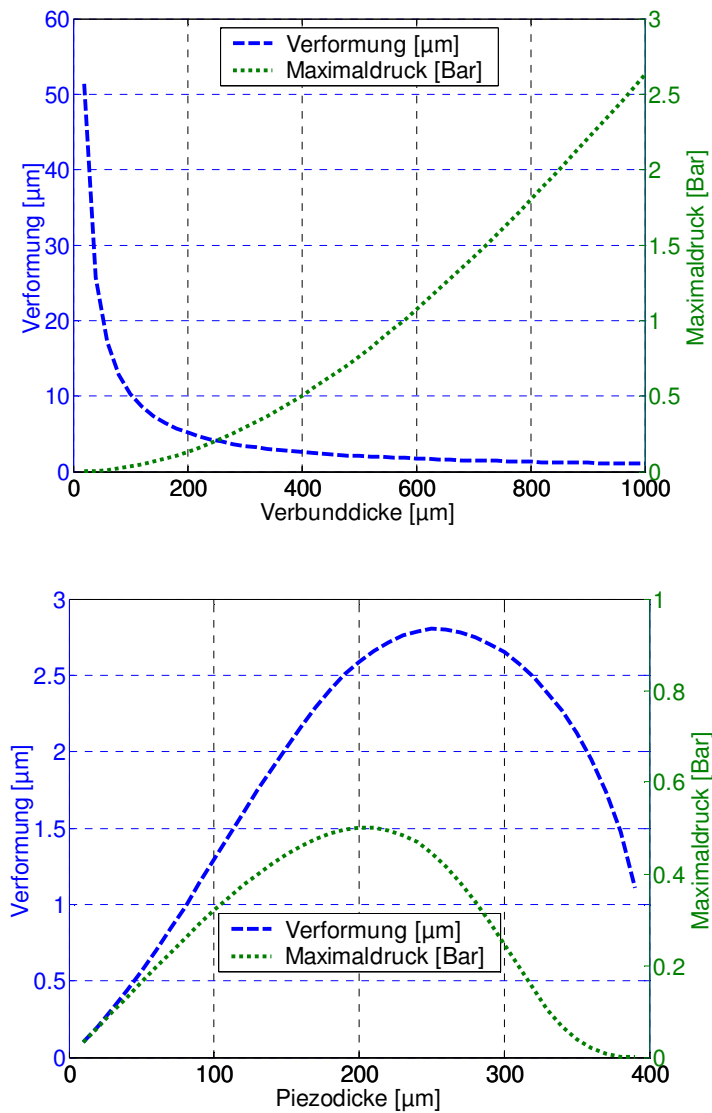


Abb. 34: Simulation: Parametervariation der Gesamtdicke bei einem Dickenverhältnis von eins und der Piezodicke bei einer Gesamtdicke von 400 μm bezogen auf das Referenzobjekt.

3.4.5 Einfluss einer Klebeschicht

Um Abschätzungen für die Fertigung und Vergleichswerte für die Labormuster in Abschnitt 3.6 zu erhalten, muss der Einfluss der Klebeschicht zwischen Piezokeramik und passiver Membran untersucht werden. Dazu wird das Modell um eine Schicht erweitert. Bei dieser werden die Eigenschaften von dem in der Fertigung verwendeten Epoxidharz-Klebstoffes angenommen. Die Verbindung der Schichten erfolgt wieder idealisiert über eine Verbindung der Kontaktflächen. Für den Kleber wird ein E-Modul von 3000 N/mm² und eine Querkontraktion von 0,3 angenommen.

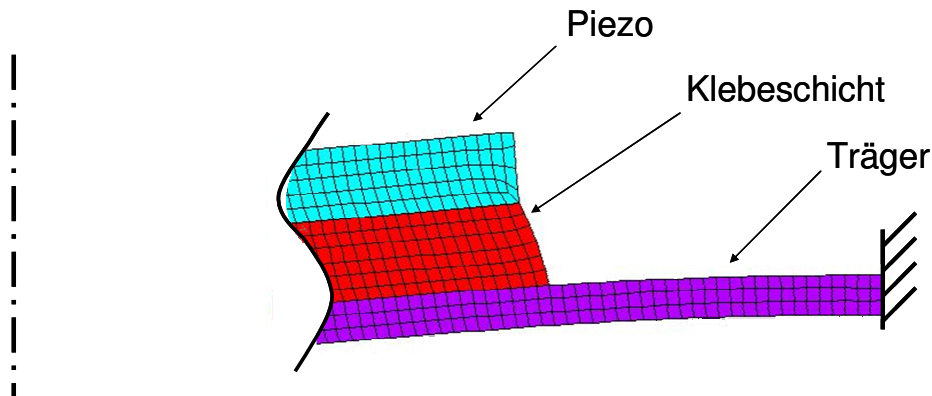


Abb. 35: Simulation: Verformung eines Membranwandlers mit extrem starker Klebeschicht. Der Bildausschnitt zeigt den Randbereich eines Membranwandlers.

Abb. 35 zeigt das Simulationsergebnis eines kreisförmigen Wandlers, der die Abmessungen der Referenzgeometrie aufweist und um eine Klebeschicht erweitert wurde. Hier wird eine für die Fertigung unrealistisch dicke Klebeschicht angenommen, um ein Worst-Case-Szenario zu erzeugen. Zusätzlich beträgt der E-Modul der Klebeschicht zur Verdeutlichung des Effektes 0,1 GPa. Die Abbildung zeigt die starke Deformation der Klebeschicht. Das Zusammenziehen des Piezoaktors kann nicht in vollem Maße zur Verwölbung der Verbundstruktur beitragen.

Abb. 36 zeigt die maximalen Verformungen bei unterschiedlichen Klebeschichtdicken. Wie Versuche zeigen, sind Klebeschichten unter 20 μm auf einfache Weise mit händischem Kleben zu erreichen (siehe Kap. D.III). Es ergibt sich bei 20 μm Klebeschicht eine Aktuation von ca. 92% der starren Verbindung. Der starke Einfluss der Klebeschicht kann allerdings bei unsicheren Fertigungsbedingungen zu einer starken Streuung der Verformung zwischen den Exemplaren von Membranaktoren führen.

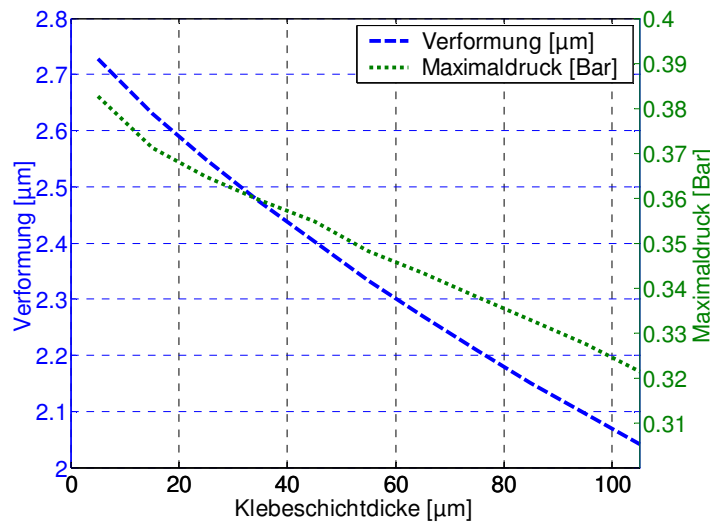


Abb. 36: Simulation: Variation der Klebeschichtdicke. Einfluss auf die Verformung und den Druck des Referenzobjektes.

3.5 Frequenzverhalten

Für den Einsatz der Wandler in der Mikrofluidik ist die Eigenfrequenz neben der Verformung und dem erzeugbaren Druck eine weitere wesentliche Größe, um die Leistungsfähigkeit von verschiedenen Membranaktoren zu vergleichen. Bei Pumpmembranen wird oft eine resonante Ansteuerung eingesetzt, um die pro Hub verdrängten Volumina zu steigern. Bei Einzeltropfenerzeugern sind Eigenfrequenzen bei der Ansteuerung zu vermeiden, da die veränderten Volumina beispielsweise in Druckprozessen nicht erwünscht sind.

Die Eigenfrequenz der Wandler kann mit Hilfe einer Modalanalyse aus der Simulation gewonnen werden. Die Struktur wird, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, als 3D-Modell abgebildet. Die Modalanalyse liefert die Eigenformen der Struktur mit den zugehörigen Eigenfrequenzen. Abb. 37 zeigt die ersten sechs Eigenformen eines Standardmembranwandlers. Dessen Geometrie entspricht dem oben aufgeführten Referenzwandler. Die Überdeckung wird dazu abweichend auf das Maximum der Verformung von 85% festgelegt.

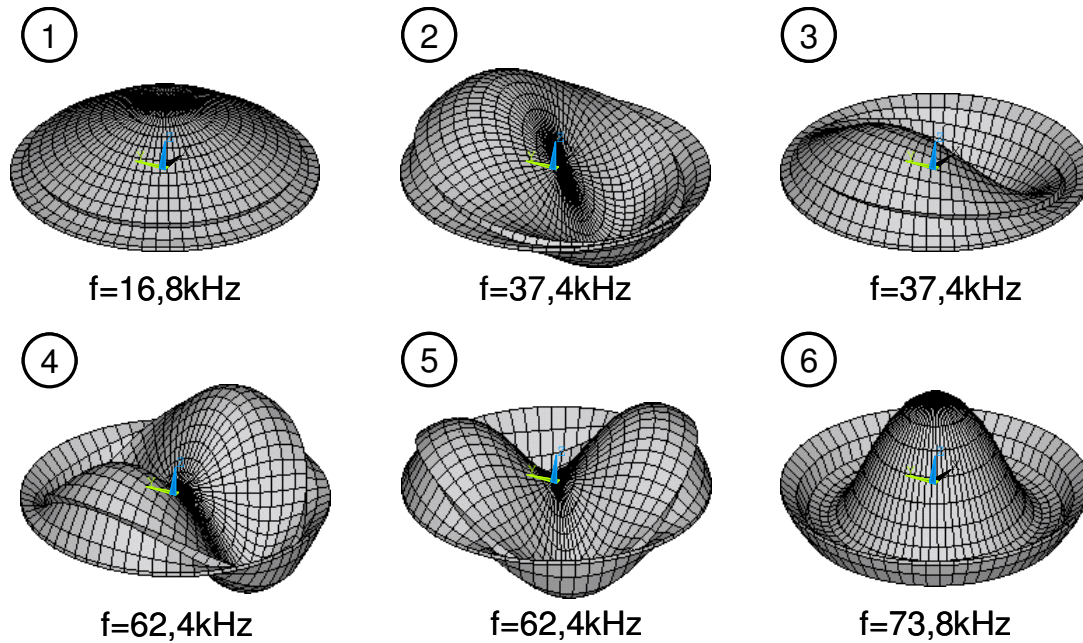


Abb. 37: Simulation: Die ersten sechs Eigenmoden eines kreisförmigen Standardmembranwandlers.

Beim Einsatz der Wandler als Aktor in Einzeltropfenerzeugern und Pumpen ist die Anregung höherer Eigenmoden nicht sinnvoll. Bedingt durch die Anordnung der Schwingungsknoten treten Schwingungstäler und -berge gleichzeitig auf. Die mögliche Volumenverdrängung höherer Eigenmoden ist immer geringer als die der ersten Eigenmode.

Das Schwingverhalten einer Plattenstruktur kann ebenso mit einer analytischen Gleichung beschrieben werden. Nach Voßkämper [VOS03] gilt für die erste Eigenfrequenz einer kreisförmigen Membran, die am Rand drehsteif gespannt ist, die Beziehung:

$$f = \frac{1,62}{r^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad 13$$

Anhand der Ergebnisse der Modalanalyse kann auf einfache Weise ein Ersatzwert für die Plattensteifigkeit des Standardwandlers angegeben werden. Dazu wird die obige Gleichung nach der Plattensteifigkeit aufgelöst:

$$D_{Ers} = \frac{h \cdot \rho \cdot r^4 \cdot f^2}{1,62^2} \quad 14$$

Diese Größe kann verwendet werden, um aus dem in Experimenten einfach bestimmbareren Kennwert erste Eigenfrequenz den Maximaldruck zu bestimmen. Dazu wird von Folgendem ausgegangen:

Wie oben beschrieben wird die Gesamtverformung wieder als Superposition zweier Zustände aufgefasst: Der Wandler verformt sich kraftfrei (maximale Verformung). Dem überlagert wird die Deformation durch die äußere Druckbelastung. Wird der Aktor als homogene Scheibe der

Plattensteifigkeit D betrachtet, erzeugt der Druck im Zentrum der Membran eine Durchbiegung von [VOS03]:

$$w_{ges} = \frac{1}{64} \cdot \frac{p_0}{D} \cdot r^4. \quad 15$$

Es folgt aus:

$$w_{ges} = \frac{1}{64} \cdot \frac{p_0}{D} \cdot r^4 - w_{max} = 0 \quad 16$$

die Gleichung für den Maximaldruck

$$p_{max} = \frac{w_{max} \cdot D \cdot 64}{r^4}. \quad 17$$

Anhand der Größen freie Verformung und Blockierdruck können Vergleiche, mit Hilfe auf einfacher Weise erfassbarer Messgrößen, unterschiedlicher Aktorkonzepte durchgeführt werden.

3.6 Experimentelle Untersuchungen am Standardwandler

Als Vergleich zu den Berechnungen und Wandlerformen mit strukturierten Elektroden werden im ersten Schritt Wandlertypen mit geschnittener Keramik untersucht. Der exakte fertigungstechnische Ablauf zur Erstellung der Labormuster ist in Anhang D wiedergegeben.

Das kreisförmige Labormuster besteht aus Abb. 38 zu entnehmenden Einzelschichten und Bestandteilen:

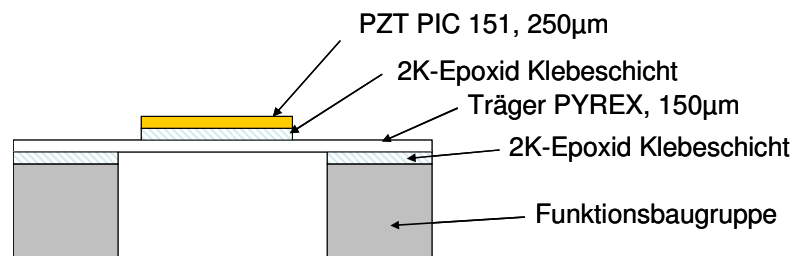


Abb. 38: Schichtstruktur des Funktionsmusters für den kreisförmigen Standardwandler.

Die Unterseite der Keramik wird, wie in Kap. 3.1 beschrieben, über den Träger kontaktiert. Dieser besteht aus Pyrex, um die gleichen Bedingungen für die im Folgenden aufgeführten Wandler zu erzielen. Die leitfähige Schicht zur Kontaktierung wird durch Aufspattern erzeugt.

3.6.1 Statische Verformung

Die Messmethoden zur Ermittlung der Verformungen der Membranwandler zeigt Anhang C.II.

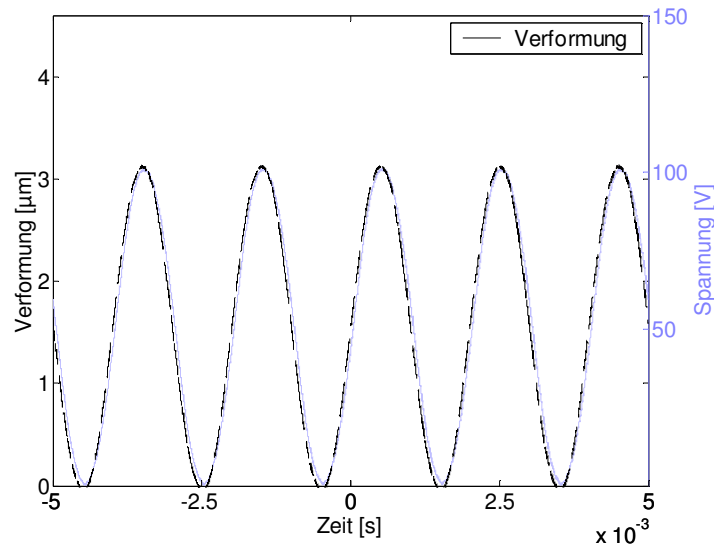


Abb. 39: Messung: Vergleich des Ansteuersignals bei einer sinusförmigen Anregung zur gemessenen Verformung.

Bei einer sinusförmigen Ansteuerspannung von 100 V entsteht eine maximale Verformung der Membran senkrecht zu ihrer Ebene von 3,15 μm (siehe Abb. 39). Die 3D-Simulation ergibt für die gleiche Konfiguration einen Aktuierungsspitzenwert von 2,6 μm . Der reale Aufbau übertrifft die Berechnungen folglich um 21%. Diese Überhöhung kann auf von den Herstellerdaten abweichende Piezoladungskonstanten zurückgeführt werden (nähere Untersuchungen werden in 3.6.3 gezeigt).

Der Maximalwert wird im Mittelpunkt des Wandlers gemessen. Gegenüber dem Verlauf der Ansteuerspannung ist bei den hier auftretenden Feldstärken von 0,4 MV/m noch keine starke Deformation des Verformungsverlaufes durch Hystereseeffekte über die Messdauer zu erkennen. Die auftretende Verschiebung der Kurvenverläufe gegeneinander ist auf die Totzeit der Messung durch das Laservibrometer zurückzuführen. Sie beträgt ca. 17 μs (siehe Anhang C.II).

Ein weiteres Kriterium für die Überprüfung der numerischen Ergebnisse ist die Verformungskennlinie der Membranaktoren. Abb. 40 zeigt Biegelinien für den oben charakterisierten Standardwandler. Die Biegelinien sind für verschiedene Spannungen aufgenommen, um ebenso nichtlineare Effekte, die zu Verzerrungen der Biegelinie führen könnten, zu erfassen (zur Methode siehe Anhang C.II).

Wie bei der Simulation liegen die Wendepunkte der Krümmung im Übergang von überdecktem und nicht überdecktem Bereich. Der Übergang der Verformungslinien verläuft in diesem Bereich stetig. Die Messung zeigt, dass die Aktuierung an den Rändern der Struktur bei 0 und 10 mm verschwindet. Folglich stimmt die freie Biegelänge mit den konstruktiven Vorgaben überein. Die Verklebung mit der Grundplatte (Funktionsbaugruppe) besitzt also eine ausreichende Steifigkeit. Zudem lassen die Biegelinien darauf schließen, dass bei einer

Anregung mit 500 Hz, keine höheren Eigenmoden der Verformung angeregt werden (siehe Abschnitt 3.5).

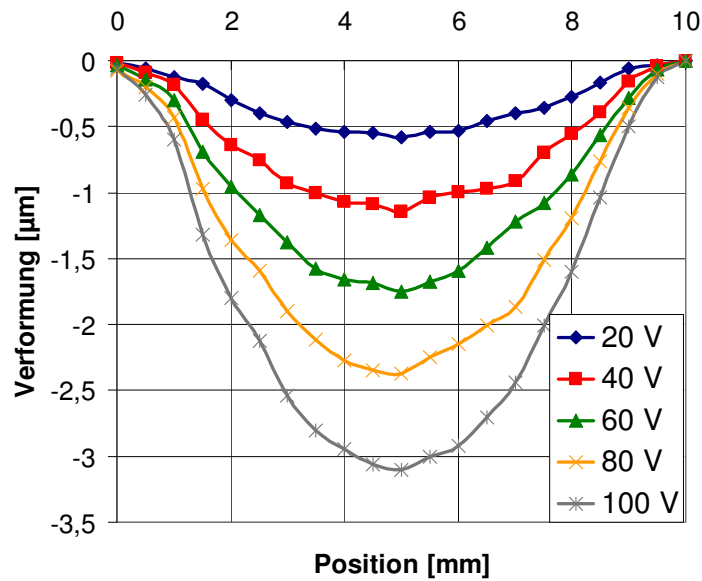


Abb. 40: Messung: Verformungsprofile der Referenzgeometrie bei unterschiedlichen Ansteuerspannungen.

3.6.2 Dynamisches Verhalten

Wird der kreisförmige Piezoaktor mit einem Impedanzmesssystem geprüft (siehe Anhang C.I), ohne mit dem passiven Träger verbunden zu sein, zeigt sich ein deutlicher Hub der Phase zwischen 260 und 330 kHz. Diese Anhebung wird durch Schwingung des Aktors in der Plattenebene verursacht (siehe Abb. 41).

Wird die Keramik mit dem Träger verklebt, verändert sich das Messergebnis erheblich. Die Querschwingung kann sich nicht mehr ungehindert ausbilden. Ihr Phasenhub wird deutlich abgeschwächt und ist insgesamt in Richtung höherer Frequenzen verschoben. Zusätzlich bilden sich im Bereich niedrigerer Frequenzen Spitzen bei der Phasenmessung, die die Membranschwingung wiedergeben.

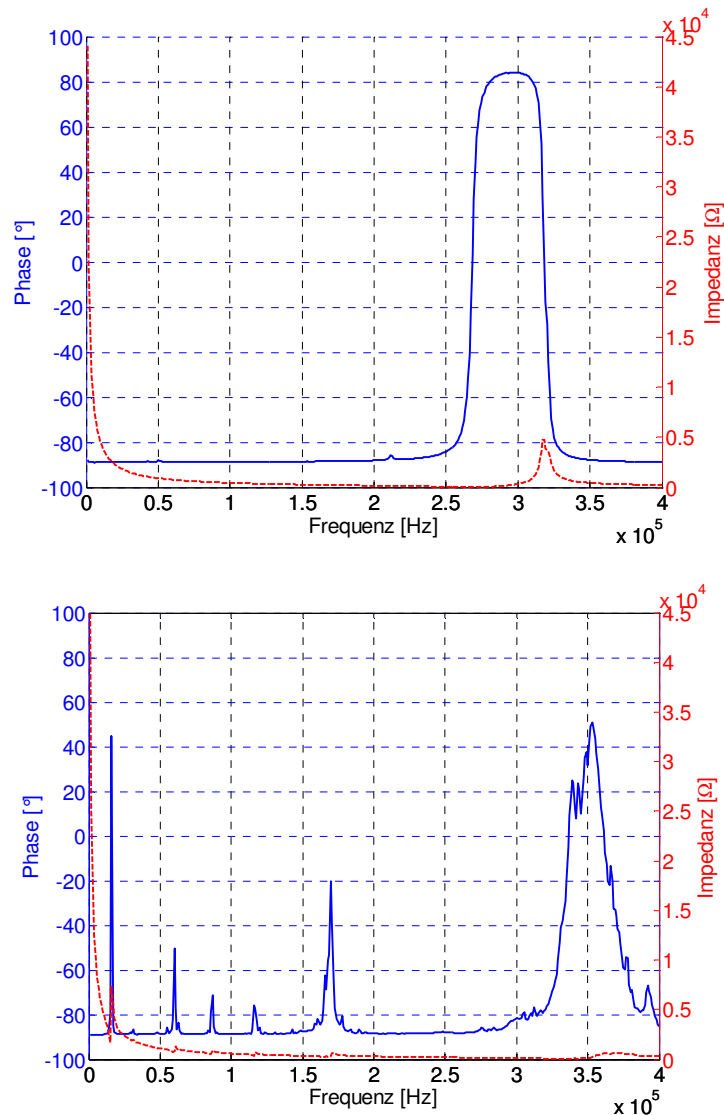


Abb. 41: Messung: Phase und Impedanz bei der elektrischen Ansteuerung von Piezowandlern mit einer sinusförmigen Spannung steigender Frequenz. Piezoscheibchen mit 7,5 mm Durchmesser und Referenzwandler.

Im Messschrieb sind lediglich zwei der im Abschnitt 3.5 gezeigten Eigenmoden sicher zu identifizieren. Bei ca. 15 kHz liegt die erste Eigenmode und bei ca. 65 kHz die Sechste (Referenzwerte der Simulation für 75% Überdeckung: 15,9 kHz und 65,3 kHz). Die Moden zwei bis fünf erzeugen auf Grund der gegenläufigen Krümmungen auf der schwingenden Membran keine signifikante elektromechanische Kopplung.

Für die Messung der Sprungantwort wird die Probe mit einem Rechtecksignal beaufschlagt. Der zeitliche Verlauf der gemessenen Verformung im Zentrum der Probe gibt in erster Näherung das Rechtecksignal wieder. Das Signal ist zusätzlich mit deutlich ausgeprägten, höherfrequenten Schwingungen überlagert. Aus diesen kann auf einfache Weise die Eigenfrequenz und die Dämpfung der Anordnung bestimmt werden. Für die Eigenfrequenz kann der Wert 15500 Hz abgelesen werden (siehe Abb. 42). Dieser Wert zeigt bis auf eine Abweichung von 2,5% eine gute Übereinstimmung mit der numerischen Simulation und dem Impedanzverfahren.

Das System unterliegt trotz der Wirkung des Luftwiderstandes, der Klebeschicht und der Piezohysterese einer sehr schwachen Dämpfung. Die Sprungantwort zeigt, dass die Schwingung selbst nach einer Millisekunde noch nicht abgeklungen ist. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß beträgt 0,01.

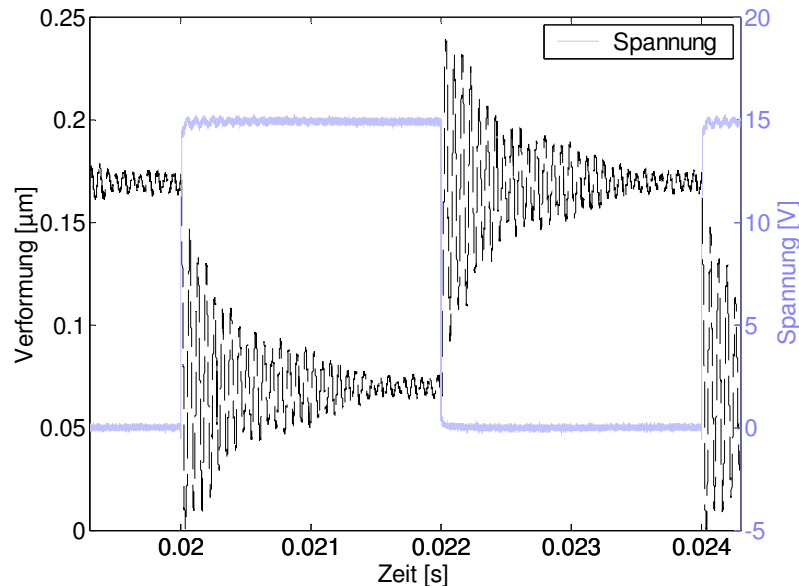


Abb. 42: Messung: Verformung des Referenzwandlers bei einer pulsförmigen Anregung (Sprungantwort) und dazugehöriges Ansteuersignal.

3.6.3 Nichtlineare Eigenschaften

Der Vergleich von den numerischen Ergebnissen mit dem Experiment zeigt, dass sich bei steigenden Ansteuerspannungen immer größere Abweichungen ergeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Berechnungen die so genannten Kleinsignalparameter zu Grunde gelegt werden. Für hohe Ansteuerspannungen steigen aber auf Grund der Hysterese der Piezokeramik die Piezoparameter an (Abschnitt 2.2.4). Abb. 43 zeigt die maximalen Verformungen für einen kreisförmigen Standardwandler über der Ansteuerspannung.

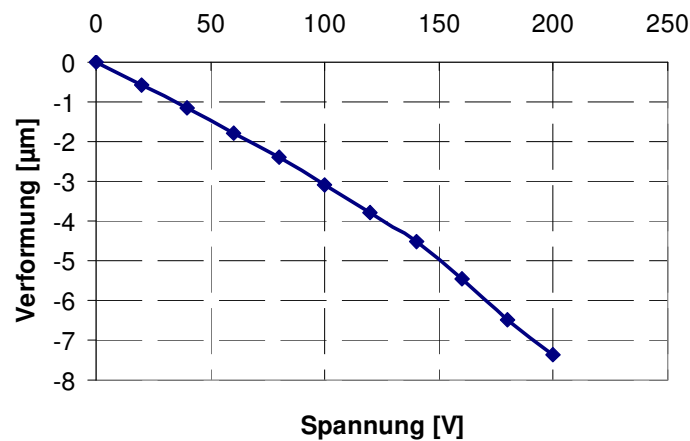


Abb. 43: Messung: Maximale Auslenkung des Membranaktors bei Sinusanregung mit unterschiedlichen Ansteuerspannungen.

Die Messung zeigt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Ansteuerspannung und Verformung. Die Kleinsignalparameter sind dem zu Folge für Aktorik, bei der die Keramik best möglich ausgenutzt werden soll, nicht gültig.

Um die für die Wandlerberechnung notwendigen Korrekturfaktoren zu ermitteln, wird eine Messung an einer Platte aus Piezo-Bulkmaterial durchgeführt. Als Material wird PIC 151 von PI Keramik benutzt. Es besitzt die Abmessungen 17 mm x 5 mm x 0,250 mm. Es wird mit der im Anhang C.II beschriebenen Methodik (Laservibrometer) vermessen und auf die d_{31} -Ladungskonstante zurückgerechnet. Ausgegangen wird auf Grund der Einspannung des Plättchens von einer freien Verformungslänge von 15 mm. Abb. 44 zeigt die zugehörige Verformungsmessung und die Rückrechnung auf den Kennwert d_{31} über der Feldstärke.

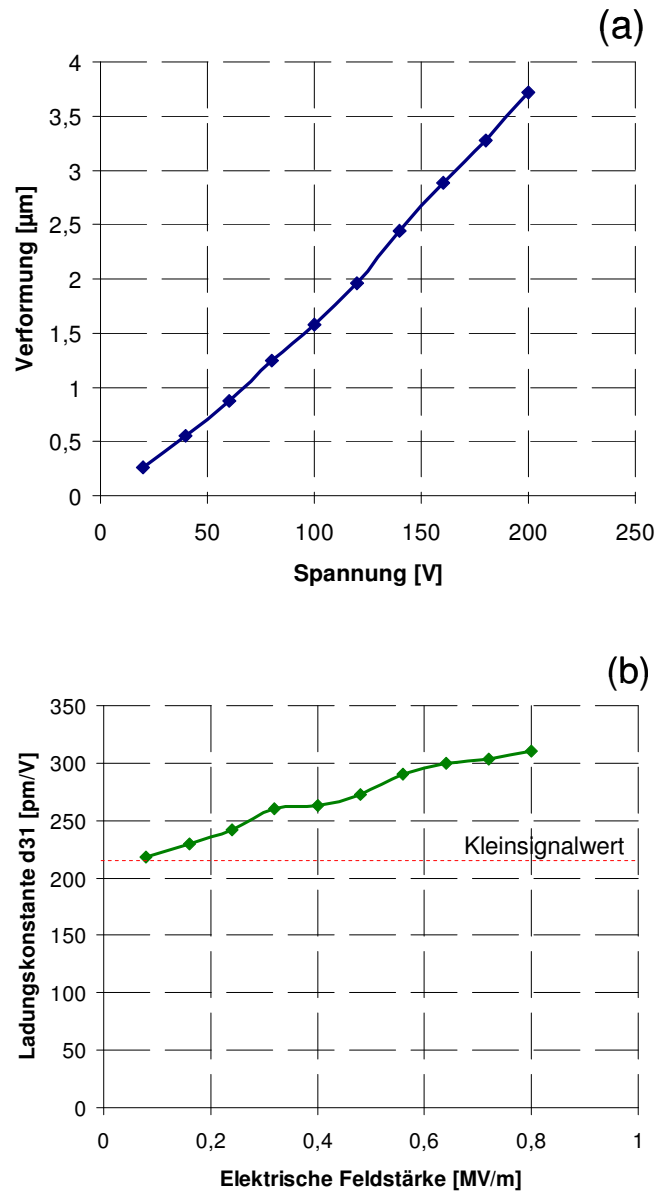


Abb. 44: Messung: Nichtlineare Verformung von Piezovollmaterial (d_{31}) bei unterschiedlichen Ansteuerspannungen (a). Rückrechnung auf den Parameter d_{31} (b).

Der Kleinsignalwert bei ca. 0,1 MV/m (218 pm/V) stimmt mit den Herstellerangaben bis auf eine Abweichung von 1,5% überein. Bei 0,8 MV/m liegt der Parameter mit 310 pm/V bereits bei 145%.

Da das Verhalten der Ladungskonstanten zur Feldstärke annähernd proportional ist, würde dies in der analytischen Rechnung insgesamt eine quadratische Abhängigkeit der Verformung zur Ansteuerspannung bedeuten. Es kann folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$\Delta l_1 = l_{1,0} \cdot E_3 \cdot d_{31} = l_{1,0} \cdot E_3 \cdot (E_3 \cdot k_{NL} + d_{31}) = l_{1,0} \cdot E_3^2 \cdot k_{NL} + l_{1,0} \cdot E_3 \cdot d_{31}. \quad 18$$

Für die Ansteuerfeldstärke 0,4 MV/m, die bei den Versuchen mit den Membranwandlern eingesetzt wird, ergibt sich eine Steigerung um 21,5%. Der oben untersuchte Standardwandler

zeigt bei Berücksichtigung dieses Korrekturwertes eine gute Übereinstimmung mit dem Simulationsmodell bezüglich der Verformung.

3.6.4 Bipolare Ansteuerung

Die Abb. 45 zeigt eine Messung, bei der ein kreisförmiger Standardwandler mit 10 mm freier Biegelänge voll bipolar angesteuert wird. Im Gegensatz zur Aufnahme der in der Piezotechnik verbreiteten Schmetterlingskurve wird keine veränderliche Gleichspannung gewählt. Die Ansteuerung erfolgt durch eine sinusförmige Spannung. Die Aktuation wird mit dem Laservibrometer (siehe Anhang C.II) vermessen. Die Kurve zeigt die Grenzen der mit diesem Keramiktypen sinnvollen Ansteuerparameter.

Ab einer gewissen Grenzfeldstärke gegen die Polarisationsrichtung (ca. 0,5 MV/m) tritt ein starker Abfall der Verformung ein. Ähnlich wie bei der Schmetterlingskurve ergeben sich bei einer weiteren Steigerung des Gegenfeldes wieder positive Verformungen. Die Keramik wird umpolarisiert. Der in diesem Bereich erreichte Maximalwert der Verformung entspricht 79% des Wertes in Polarisationsrichtung. Bei einem Zurücknehmen der Feldstärke in Gegenrichtung ergibt sich ein veränderter d_{31} -Kleinsignal-Wert gegenüber der Aussteuerung in Polarisationsrichtung. Dies ist auf eine unvollständige Polarisation zurückzuführen.

Wird der Aktor im Anschluss wieder in Polarisationsrichtung angesteuert, erreicht er bei einer gewissen Feldstärke einen Punkt, an dem die Verformungen in negative Koordinatenrichtung zurückgehen. Wird er weiterhin bis auf die Anfangsfeldstärke angesteuert, erzielt der Aktor annähernd die gleiche Verformung wie zu Beginn des Experiments.

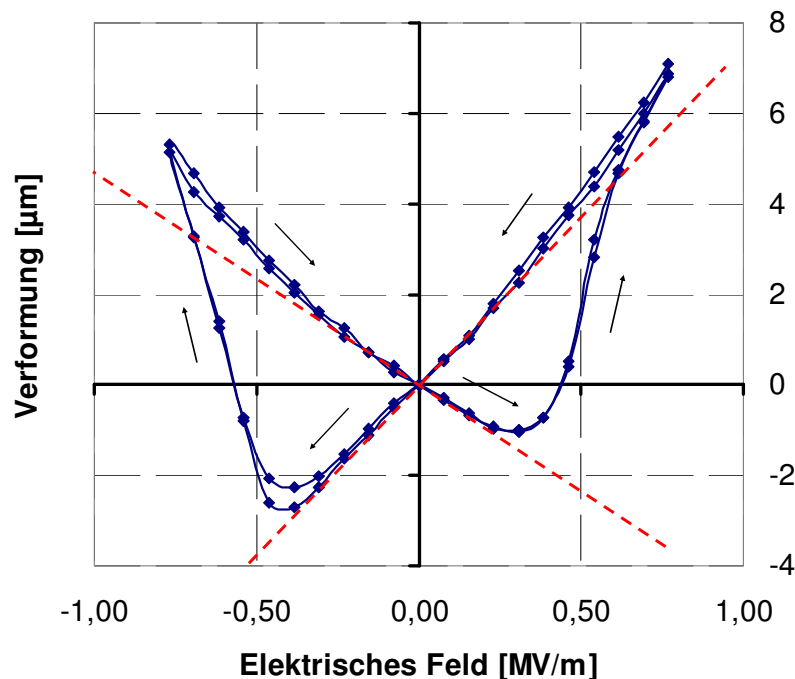


Abb. 45: Messung: Verformung bei bipolarer Ansteuerung der Referenzgeometrie.

4. Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie durch strukturierte Elektroden die Piezokeramik gezielt in unterschiedliche Aktuationsbereiche getrennt werden kann. Dazu werden zwei neuartige Konzepte eingeführt und eingehend untersucht. Zudem wird ein Vergleich zwischen Wandlern des Stand der Technik durchgeführt. Die Untersuchung von Labormustern, auf denen verschiedene Elektrodenstrukturen realisiert sind, bildet den Abschluss des Kapitels.

4.1 Strukturierte Elektroden zur gezielten Feld- und Polarisationsführung

Zur Realisierung der Konzepte müssen bestimmte elektrische Felder in das Piezomaterial eingebracht werden. Im Folgenden werden die Grundlagen und Untersuchungen verschiedener Elektrodenkonfigurationen gezeigt.

4.1.1 Grundlagen des elektrischen Feldes

Für die elektromechanische Energiekopplung in Piezoaktoren ist das elektrische Feld die entscheidende Kenngröße. Um das Feld in die Piezokeramik einzukoppeln, werden die Aktoren direkt mit einer metallischen Schicht überzogen. Bei kommerziell erhältlicher Bulkkeramik wird dieser Vorgang beim Hersteller durchgeführt. Es sind zudem Halbzeuge erhältlich, auf die später im Weiterverarbeitungsprozess Elektroden aufgebracht werden können. Als Elektrodenmaterialien sind folgende Metalle und Hilfsstoffe üblich:

Elektrodenmaterial	Herstellungsprozess	Übliche Schichtstärken
Silber/Glasfrit	Siebdruck, Sintern	0,5 – 10µm
Gold	Bedampfen, Sputtern, Lithographie	10 nm – 5µm
Kupfer/Nickel	Bedampfen, Galvanisieren	10 nm – 50µm
Kupfer/Chrom	Bedampfen, Galvanisieren	10 nm – 50µm

Einfache Piezoelektroden:

In vielen Fällen ist es ausreichend, das elektrische Feld in der Piezokeramik mit dem eines Plattenkondensators gleichzusetzen. Hier gilt die einfache Beziehung:

$$E = \frac{U}{d}. \quad 19$$

Diese Beschreibung trifft für eine Piezoplatte mit Elektroden auf der Ober- und Unterseite zu. Das Feld in der Keramik ist dann weitgehend homogen. Die Ladungen auf dieser, einem Kondensator ähnlicher Struktur können über

$$C = \frac{Q}{U} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_D \cdot \frac{A}{d} \text{ also mit } E = \frac{Q}{C \cdot d} = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_D \cdot A} \quad 20$$

mit der obigen Gleichung in Beziehung gesetzt werden.

Klebeschichten:

Diese Grundgleichung kann auf fertigungstechnische Aspekte bei Piezoaktoren angewendet werden. Eine einfache Methode strukturierte Elektroden auf die Piezokeramik aufzubringen, ist das Aufkleben einer Folie mit strukturierten Elektroden. Mit einem solchen Vorgehen wird der Strukturierungsprozess von der Keramik entkoppelt und kann keine schädigende Wirkung haben.

Als Modell dieses Aufbaus dienen in Serie geschaltete Kondensatoren. Beide Kondensatoren besitzen die gleiche wirksame Fläche. Unterschiede ergeben sich bei der Dicke der jeweiligen Schichten und deren Permeabilität. Es gelten die Gleichungen

$$Q_K = Q_P = C_K \cdot U_K = C_P \cdot U_P \quad 21$$

Die Indizes K und P bezeichnen jeweils Klebeschicht und Piezomaterial. Die Beziehungen der Spannungen zueinander können über

$$\frac{U_P}{U_K} = \frac{C_K}{C_P} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_K \cdot \frac{A}{d_K}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_P \cdot \frac{A}{d_P}} = \frac{\epsilon_K \cdot d_P}{\epsilon_P \cdot d_K} \quad 22$$

berechnet werden. Zusätzlich gilt für die Serienschaltung von Kondensatoren:

$$U_{Ges} = U_K + U_P \quad 23$$

Die für die Aktuation relevante Feldstärke im Material steht im Verhältnis:

$$\frac{E_P \cdot d_P}{E_K \cdot d_K} = \frac{\epsilon_K \cdot d_P}{\epsilon_P \cdot d_K} \rightarrow \frac{E_P}{E_K} = \frac{\epsilon_K}{\epsilon_P} \quad 24$$

Das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen liegt im Allgemeinen im Bereich von 0,001 bis 0,01. Dies zeigt, dass zwischen Piezo und Elektrode keine Schicht sein darf, da sonst über der Piezokeramik kein ausreichendes elektrisches Feld mehr abfällt.

Allgemeine Felder:

Das elektrische Feld kann bei strukturierten Elektroden nicht, wie im üblichen Fall, dem eines Plattenkondensators gleichgesetzt werden. Hierzu muss eine genauere Beschreibung anhand der von den Ladungen ausgehenden Feldlinien erfolgen. Für den Vektor des elektrischen Feldes mit dem Abstandsvektor \vec{r} zu einer Punktladung Q in einer Ebene gilt

$$\vec{E} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r}|^2} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix}. \quad 25$$

Es existieren positive und negative Ladungen, repräsentiert durch das Vorhandensein oder das Fehlen von Elektronen in einem gewissen Volumenbereich. Soll das Feld aus mehreren Ladungen berechnet werden, wird das Superpositionsprinzip angewendet. Dabei werden die jeweiligen Felder vektoriell addiert. Ergebnis ist die Feldverteilung im Raum (siehe Abb. 46).

Ebenso können mit einer solchen Betrachtung die so genannten Spitzeneffekte gezeigt werden. Die Feldstärke am Rand oder an konstruktiven Spitzen von Elektrodenstrukturen steigt hier stark an.

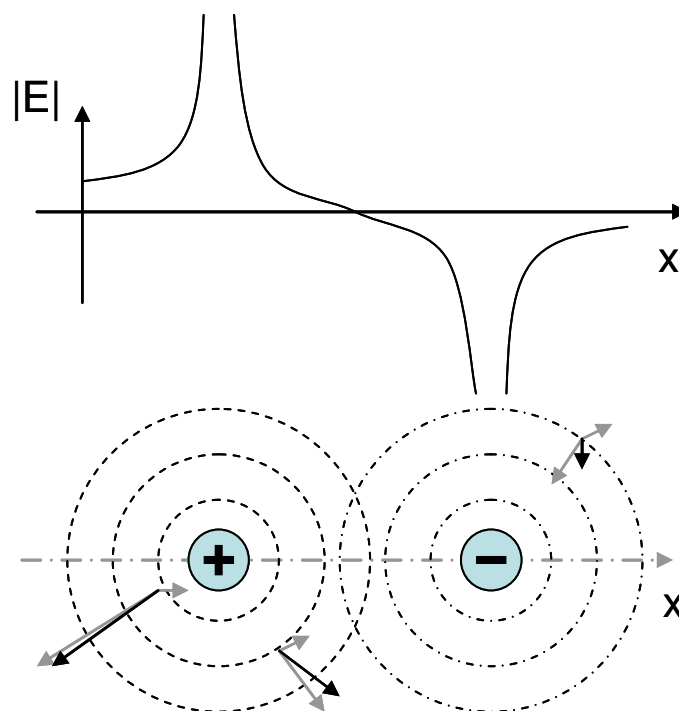


Abb. 46: Superposition von Feldstärkevektoren bei der Anwesenheit von Punktladungen.

Ein weiterer wichtiger Effekt, der bei der Berechnung elektrischer Felder beachtet werden muss, ist die Influenz. Bringt man in ein elektrisches Feld einen Leiter, werden auf diesem die Ladungen entsprechend des elektrischen Feldes getrennt. Der Leiter selbst bleibt definitionsgemäß feldfrei. Um den Leiter herum wird das Feld deformiert. Diese Veränderung kann, wie die gezielte Strukturierung der Ansteuerelektroden, genutzt werden, um das Feld aktiv zu führen.

Allgemeine Felder in Kombination mit Influenzerscheinungen entziehen sich der Möglichkeit einer analytischen Beschreibung.

4.1.2 Simulation des elektrischen Feldes

Sollen die Verformungen der Piezokeramik richtig beurteilt werden, muss die qualitative Feldverteilung im Material bekannt sein. Um diesen Feldverlauf zu simulieren, kann beispielsweise das ANSYS-Paket benutzt werden. Die Berechnungen werden zweidimensional ausgeführt, um anschauliche Ergebnisse zu erhalten.

Für die Implementierung der elektrostatischen Simulation wird das Element „PLANE223“ verwendet. Diesem Element kann sowohl der elektrische Widerstand als auch eine Dielektrizitätskonstante zugewiesen werden. Damit ist es für Feld- *und* Influenzbetrachtungen geeignet.

Für jede Simulation werden die Elektroden und die felddurchfluteten Teile als separate Blöcke modelliert. Diese werden im Anschluss mit einer booleschen Operation verbunden. Die Lasten werden in Form einer Randbedingung (hier die Spannung) gewissen Regionen aufgeprägt.

Der Freiheitsgrad der Simulation ist das elektrische Potential. Aus diesem können dann auch direkt die Vektoren des elektrischen Feldes abgelesen werden. Es gilt:

$$E = -\text{grad}\varphi. \quad 26$$

4.1.3 Elektrodenformen zur gezielten Feldführung

Die Elektroden können nach dem Sintern der Keramik nicht mehr in beliebiger Form in die Keramik eingebracht werden, sondern nur an der Oberfläche strukturiert werden. Um dennoch gewisse Freiheiten zu erhalten, kommen die Abb. 47 zu entnehmenden Konstruktionen zum Einsatz.

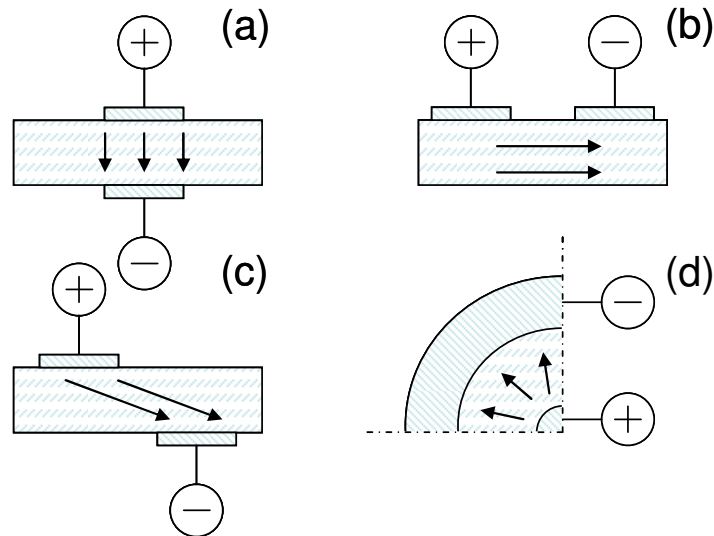


Abb. 47: Elektrodenformen zur gezielten Feldführung. Felder senkrecht zur Plattenebene (a), Felder in der Plattenebene (b), diagonale Felder (c) und radiale Felderzeugung (d).

Die erste Abbildung zeigt den einfachsten Fall. Das elektrische Feld steht senkrecht zur Ebene eines Keramikplättchens. Das Feld ist zwischen den Elektroden weitgehend homogen (Plattenkondensator). Abb. 48(a) zeigt das Ergebnis der Feldsimulation mit ANSYS. Der Spalt zwischen den Elektroden weist hier $150\ \mu\text{m}$ auf. Die Plättchendicke ist $130\ \mu\text{m}$ und die anliegende Spannung ist $100\ \text{V}$.

Die Simulation zeigt, dass für die Feldverteilung die zwei Größen Keramikdicke und Elektrodenbreite entscheidend sind. Breite Elektroden auf einer vergleichsweise dünnen Keramik erzeugen ein im Inneren homogenes Feld. Bei schmalen Elektroden kann das Streufeld außerhalb des mit Elektroden überdeckten Bereiches nicht vernachlässigt werden.

Des Weiteren zeigt die Simulation den Spitzeneffekt, der durch das Auffächern der Feldlinien verursacht wird. Im Bereich, in dem die Elektroden mit der Keramik verbunden sind, tritt dabei am Rand die doppelte Feldstärke - im Vergleich zur Berechnung über $E=U/d$ - auf. Wie Abb. 48(a) zeigt, treten neben den gewünschten Feldrichtungen auch Vektoren mit einer starken Komponente senkrecht zu dieser Richtung auf. Bei der Beurteilung der piezoelektrischen Verformung müssen diese Anteile mit berücksichtigt werden.

Werden Felder in der Ebene der Keramik gefordert, werden zwei nebeneinander liegende Elektroden verwendet (Siehe Abb. 47(b)). Hier ist die Felddausbildung komplexer als im ersten Fall. Das Verhältnis der Dicke der Keramik und des Elektrodenabstands bestimmt die Homogenität des Feldes. Bei sehr dicken Keramikplättchen wird der untere Teil kaum noch durchflutet (Eine Anwendung dieses Effektes zeigt Hong [HONG05]). Es ergibt sich ein starker Gradient senkrecht zur Plattenebene. Wie bei den gegenüberstehenden Elektroden, gibt es hier Bereiche, in denen das Feld stark von den gewünschten Resultaten abweicht. Beispielsweise sind unter den Elektroden starke senkrechte Komponenten zu finden. In vielen Anwendungsfällen ist es deshalb günstig, dass die Elektroden möglichst schmal ausgeführt werden.

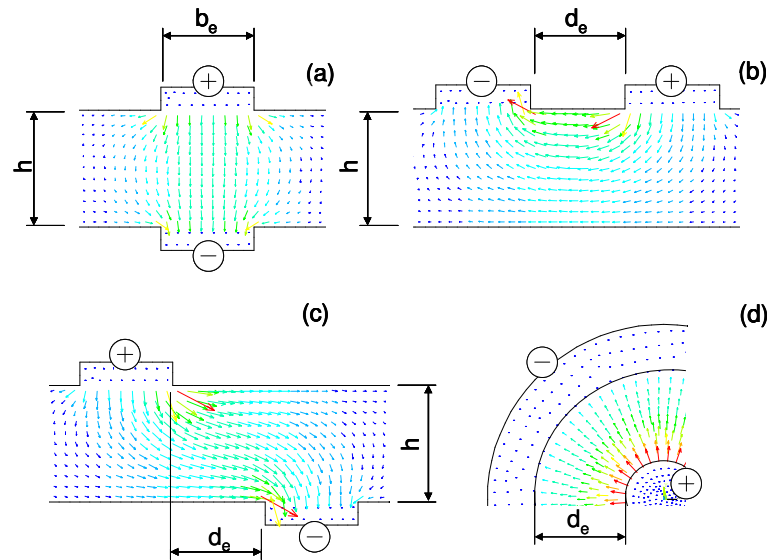


Abb. 48: FE- Simulation der Feldvektoren von verschiedener Elektrodenformen. Schnitt durch ein Keramikplättchen: Senkrechtes Feld (a), Feld in der Plattenebene (b) und diagonale Feldlinien (c). Draufsicht auf die Keramikfläche: Radialfeld (d).

Werden die Elektroden aus Abb. 47(a) gegeneinander verschoben, können auch Feldlinien mit verschiedenen Winkeln zur Plattenebene erzielt werden. In Abb. 48(c) ist ein solches Feld dargestellt. Auch hier spielt wieder der Elektrodenabstand und Plattendicke die entscheidende Rolle für die Felddarstellung. Bei großem Elektrodenabstand entstehen hauptsächlich in der Plattenebene liegende Komponenten. Das Feld zwischen den Elektroden kann mit Abb. 48(b) verglichen werden.

Bei Membranaktoren ist oft auch eine radialsymmetrische Verteilung von Feldern wichtig. Hier werden auf einer Seite der Keramik Elektroden, deren Form Abb. 48(d) zu entnehmen ist, aufgebracht. In der Keramikebene, also senkrecht zur Ebene der Abbildung, bilden so gestaltete Elektroden wieder eine Feldverteilung wie in Abb. 48(b). Zusätzlich nimmt aber die Feldstärke mit zunehmenden Elektrodenradius ab (Abb. 48(d)). Dadurch entstehen beim Piezoeffekt unterschiedlich starke Dehnungen.

Um geringe Ansteuerspannungen bei den Aktoren zu erzielen, können die oben genannten Elektrodenformen als verschachtelte Strukturen aufgebaut werden. Vorbild ist hier die Schichtbauweise von Piezostacks. Abb. 49 zeigt die Draufsicht auf die Elektroden einer so genannten Interdigitalstruktur [JEO05][LEV04][ZHA03]. Durch die nahe beieinander liegenden Elektroden werden hohe Feldstärken im Material und ein annähernd homogenes Feld in den Elektrodenspalten erzielt. Diese Struktur kann auch bei runden Aktoren zum Einsatz kommen. Es ergibt sich eine abwechselnd angesteuerte Anordnung von Ringen.

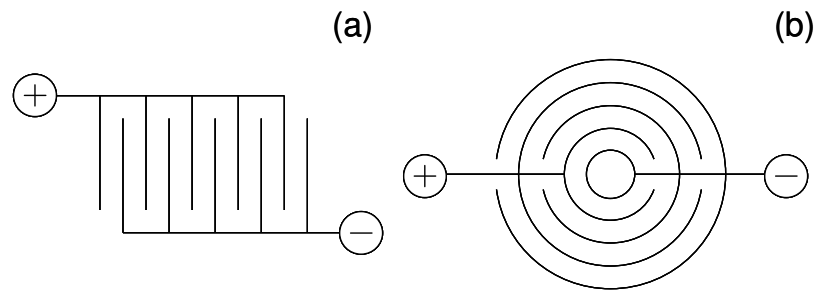


Abb. 49: Draufsicht auf Elektroden mit Interdigitalstruktur. Gerade Ausführung (a) und Ringstruktur für kreisförmige Membranwandler (b).

4.1.4 Bedeutung von passiven Elektroden

Eine besondere Rolle bei der Gestaltung von Piezomembranaktoren mit strukturierten Elektroden spielen nicht kontaktierte Elektroden. Auf diesen kommt es bei der Ansteuerung der nahe liegenden Elektroden zu Ladungsverschiebungen durch Influenz. Die notwendigen Grundlagen werden im Folgenden erklärt.

Bringt man einen leitfähigen Körper zwischen die Platten eines Kondensators, werden die Ladungen auf ihm getrennt. Das entstandene Gebilde kann als eine Serienschaltung von Plattenkondensatoren betrachtet werden. Es gilt wie bereits dargestellt

$$Q_{ges} = Q_1 = Q_2 \quad 27$$

Abb. 50 zeigt drei Fälle mit idealisierten Feldverläufen. Im Fall von übereinander liegenden Elektroden (a), in die eine Weitere, mit der Spannungsversorgung nicht kontaktierte, eingebracht wird, verändert sich der Feldverlauf und die Feldstärke nicht. Werden die beiden entstandenen Kondensatoren voneinander räumlich getrennt, bleiben aber elektrisch kontaktiert, bildet sich das Feld wie in Abbildung (b) gezeigt aus. Ohne passive Elektrode würden die Feldlinien jetzt diagonal verlaufen.

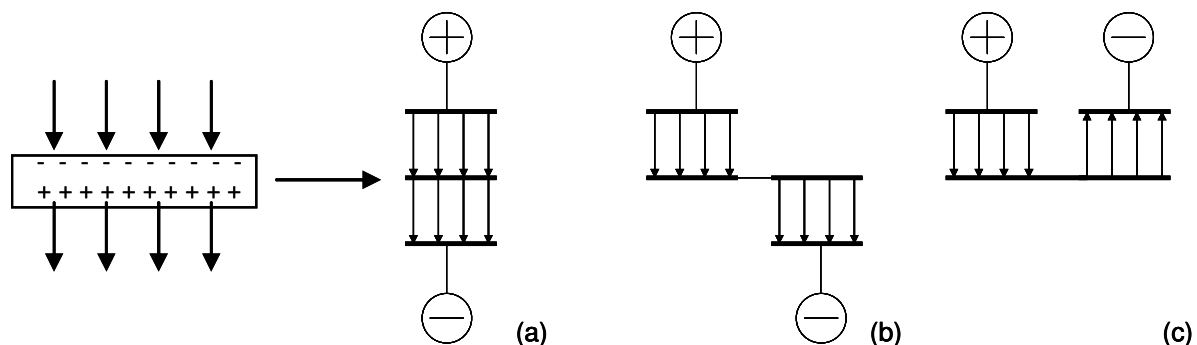


Abb. 50: Feldverläufe in unterschiedlichen Doppelkondensatoranordnungen. Übergang von der Struktur eines Doppelkondensators zu einer Anordnung mit passiver Elektrode.

Betrachtet man, wie Abb. 50(c) zeigt, nebeneinander liegende Elektroden auf einem Dielektrikum mit einer Gegenelektrode, verändert sich der Feldlinienverlauf räumlich noch stärker. Die Felder einer solchen Anordnung verlaufen im entgegengesetzten Richtungssinn.

Die Untersuchung anhand einer Simulation zur Wirkung der passiven Elektroden zeigt Abb. 51. Das Modell besteht aus drei Elektroden auf der Oberseite und einer auf der Unterseite einer Keramikplatte. Die untere Elektrode wirkt nur im linken Teil der Struktur. Die beiden äußeren Elektroden der Oberseite liegen auf dem gleichen Potential. Die mittlere Elektrode liegt auf einem tieferen Potential, so dass sich Felder von außen nach innen ausbilden können.

Abb. 51(a) zeigt die Feldstärkeverteilung im Material. Es zeigt sich im Elektrodenspalt, dass sich rechts ein wesentlich höheres und annähernd homogenes Feld ausbildet. Links, unter der Einwirkung der passiven Elektrode, wird das Feld geschwächt und ist senkrecht zur Plattenebene stark inhomogen. Die vektorielle Darstellung (Abb. 51(b)) zeigt unter den Elektroden im linken Bereich annähernd senkrecht zur Plattenebene verlaufende Felder. Abb. 51(c) kann entnommen werden, dass, bedingt durch die Influenz, die passive Elektrode auf ein Potential relativ zu den Ansteuerspannungen gehoben wird, das zwischen den Potentialen der oberen Elektroden liegt. Auf Grund der Geometrieverhältnisse (Elektrodenflächen) entspricht die relative Spannung der halben Ansteuerspannung.

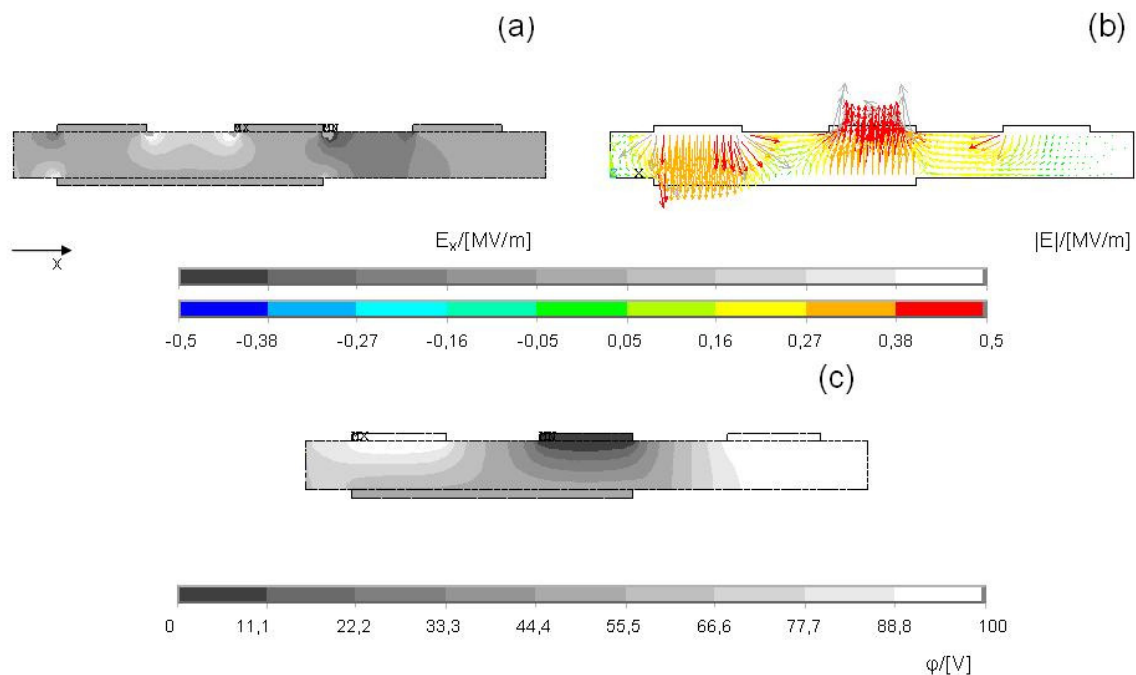


Abb. 51: Simulation: Vergleich der Feldverläufe (a) und Feldvektoren (b) von nebeneinander liegenden Elektroden mit und ohne passiver Elektrode. Potentialverlauf in der Keramik (c).

4.2 Wandlerformen mit strukturierten Elektroden

In diesem Abschnitt werden Wandlerformen gezeigt, die die oben genannten Überlegungen zur Anwendung bringen. Die Basis der Überlegungen zur Elektrodenstrukturierung ist das Verformungsbild einer Membran unter Innendruck. Es wird ein Wandler mit Hilfeelektroden gezeigt, der diese Verformung über die Elektrodenstruktur nachbildet. Da dieser im Randbereich gegen die Polarisationsrichtung angesteuert werden muss, wird darauf folgend das aus der Literatur bekannte Prinzip gezeigt, wie der Piezolängseffekt in der Membranebene genutzt werden kann. Darauf aufbauend wird abschließend ein Wandler mit

Elektrodenstruktur vorgestellt, bei dem der Piezolängs- und der Piezoquereffekt in Kombination eingesetzt wird.

4.2.1 Membran unter Innendruck

Diese Art der Belastung ist sowohl für Tropfenerzeuger als auch für Mikroventile und Pumpen relevant (siehe Abschnitt 3.1). Abb. 52 zeigt die Simulation einer solchen Verformung. Der Wandler mit 10 mm Durchmesser wird mit einem Bar Druck (100000Pa) beaufschlagt.

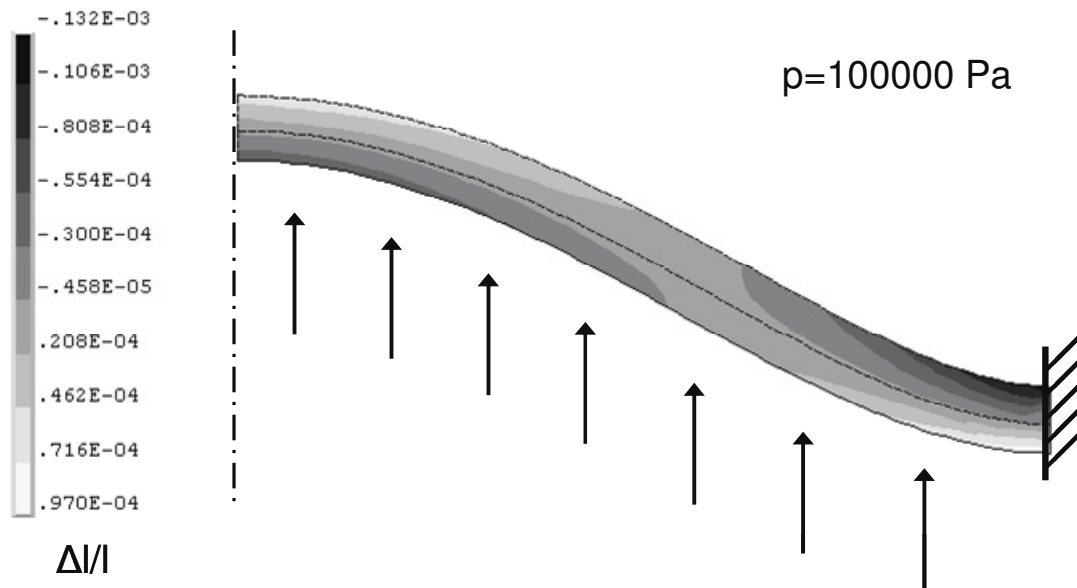


Abb. 52: Simulation: Radialdehnungen in einer Membran die durch einen Innendruck belastet wird.

Es ist zu erkennen, dass bei einer festen Einspannung am Rand der Membran verschiedene Verformungsbereiche vorliegen. Je nach Belegung einer Struktur mit Keramik ergeben sich Bereiche, die Zugspannungen und Bereiche, die Druckspannungen aufbauen müssen. Dies legt die Verwendung von strukturierten Elektroden zur gezielten Verformung nahe.

Dazu ist es sinnvoll die in Kap. 2.2.3 genannten Grundtypen und die in Kap. 4.1.3 genannten Elektrodenformen zu einer Systematik zu verknüpfen. Es ergeben sich bei zwei möglichen Richtungen des Ansteuerfeldes, zwei möglichen Polarisationsrichtungen und zwei verschiedenen Winkeln zwischen Feld und Polarisierung 16 mögliche Verformungskombinationen bei ebenen Wandlern.

Abb. 53 zeigt diese Permutation. Es wird jeweils die Feldrichtung, die Polarisationsrichtung und die Verformungsrichtung dargestellt. Für jeden Effekt gibt es dabei unterschiedliche Kombinationen, die zur gleichen Verformung führen. Diese Typen sind prinzipiell austauschbar, aber bei besonderen Anordnungen mit Interdigitalelektroden interessant. Die Elektroden, die senkrecht im Material liegen, können bei einem realen Aufbau nach Abb. 47 ausgeführt werden.

Die unter „d15“ auf Abb. 53 gezeigten Scherwandler sind für die oben dargestellte Verformung nicht einsetzbar. Scherwandler können Bewegungen senkrecht zur Membranebene ohne passiven Träger ausführen. Die Verformungen erreichen ein sehr geringes absolutes Niveau. So können beispielsweise Mikroventile mit großen Öffnungshüben in dieser Technik nicht realisiert werden. Da aber die Verformung unabhängig von den lateralen Abmessungen der Anordnung ist, eignen sich Scherwandler gut als Pumpmembranen in Druckköpfen mit hoher Düsenanzahl auf kleinem Raum. Dieses Prinzip wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

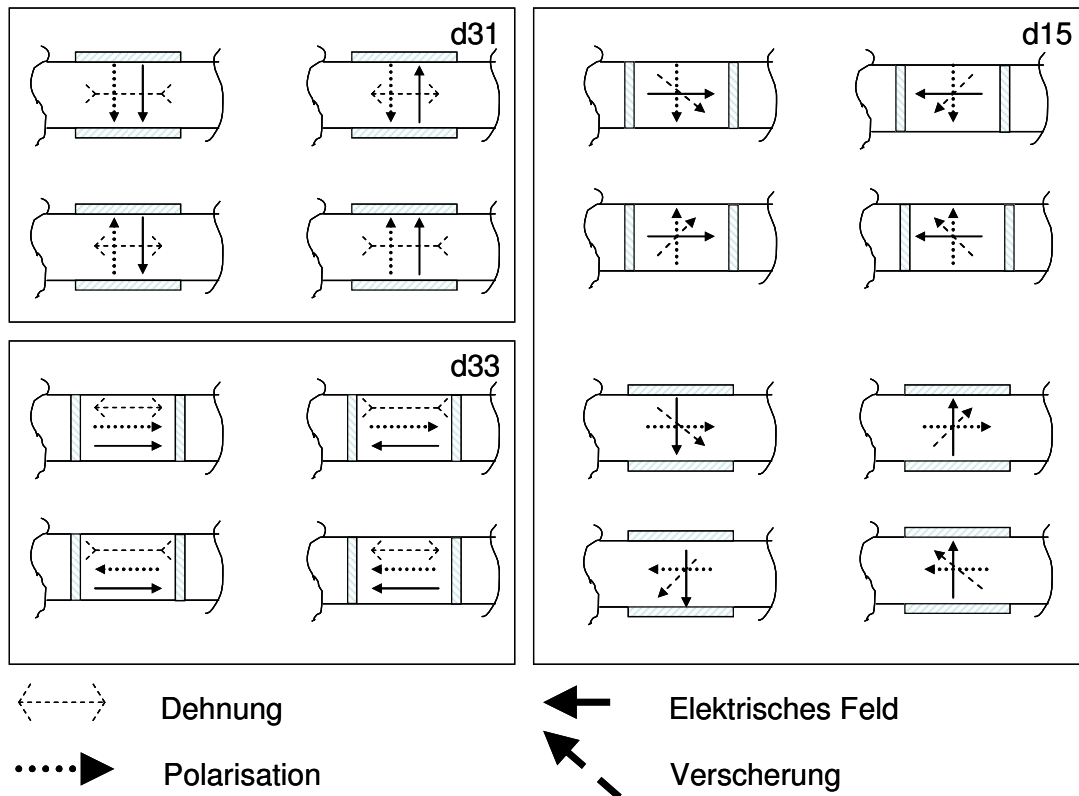


Abb. 53: Mögliche Verformungen bei ebenen Piezowandlern.

4.2.2 Biegemembranwandler mit Hilfselektrode

Im Folgenden wird ein Wandler mit Hilfselektrode im Randbereich der Membran vorgestellt. Diese wird gegen die Polarisationsrichtung angesteuert, um ein Verformungsprofil nach Abb. 52 zu begünstigen. Dieser Wandler stellt eine Weiterentwicklung des oben gezeigten Standardbimorphs dar. Es werden folgende Nachteile aufgegriffen und verbessert:

Nachteil	Vorteil des Wandlers mit Hilfselektrode
Die Membran ist nicht vollständig mit Keramikmaterial bedeckt. Dies führt zu einem Verlust an Steifigkeit.	Vollflächige Belegung. Die Aktuation im Außenbereich der Membran erfolgt durch Ansteuerung gegen die Polarisationsrichtung.
Eine Strukturierung der Keramik ist notwendig.	Einfache Strukturierung der Elektroden in einem Batchprozess.
Die Kontaktierung erfolgt über Wire-Bonds. Dies ist nicht bei allen Elektrodenmaterialien und Materialdicken möglich.	Es werden Leiterbahnen mit separaten Kontaktpads mit aufgebracht. Die Kontaktierung kann durch Löten erfolgen.
Die Bauteile müssen bei Anwendungen mit vielen Kanälen einzeln gehandhabt und präzise positioniert werden.	Einmalige Positionierung eines größeren und damit leichter handhabbaren Bauteils.

Tabelle 4: Verbesserungen der Nachteile von Standardmembranwandlern durch Hilfselektroden.

Ein Schema des Aufbaus kann Abb. 54 entnommen werden. Die Piezokeramik ist über die gesamte Struktur homogen senkrecht zur Plattenebene polarisiert. Zusätzlich zeigt Abb. 54 (b) den einfachen Aufbau einer Mehrkanalanordnung, wenn Wandler mit strukturierten Elektroden aufgebaut werden.

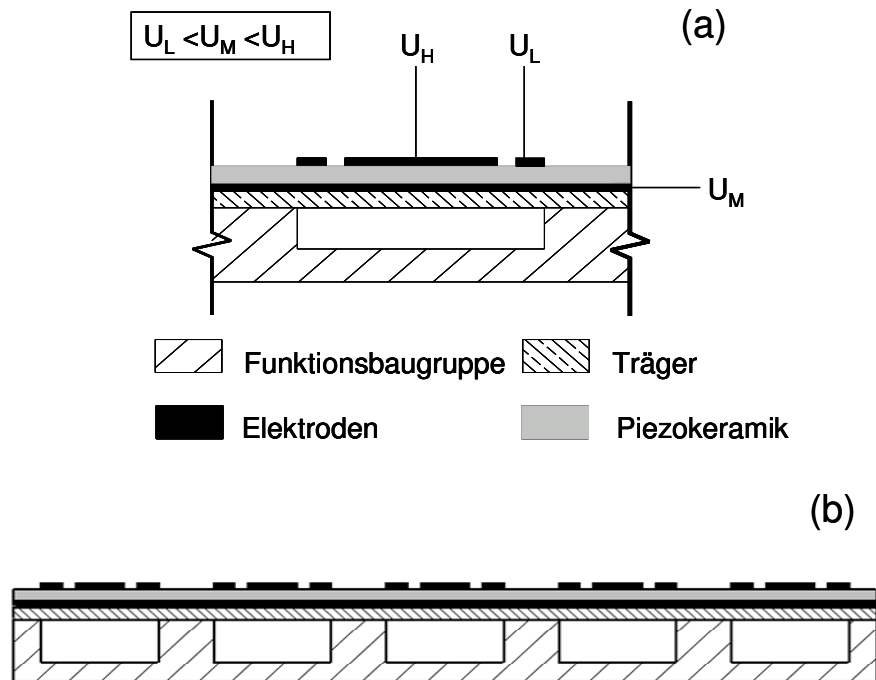


Abb. 54: Wandler mit Hilfelektrode im Schnitt (a) und Mehrkanalanordnung mit durchgehender Keramik (b).

Die obere Elektrode wird in zwei Bereiche unterteilt. Zum Einen in den Bereich in der Mitte der freien Biegelänge, der dem oben beschriebenen Standardwandler entspricht. Zusätzlich wird aber in dem Bereich, der beim Standardwandler ein biegeweiches Gelenk darstellt, die Keramik nicht entfernt und mit einer separaten Elektrode versehen. Die Bodenelektrode ist durchgehend unter dem jeweiligen Kanal angeordnet.

Außen- und Innenbereich werden mit unterschiedlichen elektrischen Feldern durchflutet. Dies führt auf das Verformungsbild, das Abb. 52 wiedergibt.

Für die Bodenelektrode können zwei unterschiedliche Methoden zur Ansteuerung gewählt werden:

- Die Bodenelektrode wird gemäß der gewünschten Feldstärke auf ein Potential zwischen den Ansteuerspannungen U_L und U_H gelegt.

Zu beachten ist die Ansteuerung des Randbereiches gegen die Polarisationsrichtung. Hier müssen Werte unter $1/3$ der Koerzitivfeldstärke (im Allgemeinen ca. $0,3 \text{ MV/m}$) eingehalten werden. Größere Werte führen zu einer Umpolarisierung. Die Aktuation findet über die ganze Länge mit gleichem Richtungssinn statt und damit kommt es zu einem Verlust der Aktuation (siehe Abb. 33 in Abschnitt 3.4.3 bei einer Überdeckung von 100%). Diese Methode der Ansteuerung bedingt eine gesonderte Kontaktierung der Bodenelektrode. Dies stellt einen aufwändigen Fertigungsschritt dar, der mit dem im Folgenden beschriebenen Aufbau vermieden werden kann.

- Die Bodenelektrode wird für die jeweiligen Kanäle getrennt, aber nicht kontaktiert. Die Elektrode ist also potentialfrei.

Wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben kommt es durch Influenzerscheinungen zu einer Feldverteilung, bei der im Kernbereich mit und im Randbereich gegen die Polarisationsrichtung angesteuert wird. Maßgeblich für die Feldverteilung sind die gegebenen Flächenverhältnisse. So kann beispielsweise das Verhältnis der Spannungen für einen runden Aktor mit den Gleichungen für einen Plattenkondensator berechnet werden. Es gilt auf Grund der gleichen Ladungen auf beiden „Kondensatoren“:

$$C_I \cdot U_I = C_A \cdot U_A \quad 28$$

Die Kapazitäten C_A und C_I enthalten die Flächen A_A und A_I . Es gilt:

$$\frac{U_I}{U_A} = \frac{C_A}{C_I} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_A}{d}}{\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_I}{d}} = \frac{A_A}{A_I} = \frac{(r_{ges}^2 - r_I^2)\pi}{r_I^2 \pi} = \frac{r_{ges}^2 - r_I^2}{r_I^2} = \frac{r_{ges}^2}{r_I^2} - 1 \quad 29$$

Die Absolutwerte sind über

$$U_{Ges} = U_I + U_A \quad 30$$

einfach zu bestimmen. Abb. 55 zeigt die jeweiligen relativen Spannungen in Abhängigkeit der Lage von der Trennstelle zwischen Innen- und Außenelektrode. Ein Verhältnis der Spannungen von eins ergibt sich bei $r_{ges}/r_I = \sqrt{2}$.

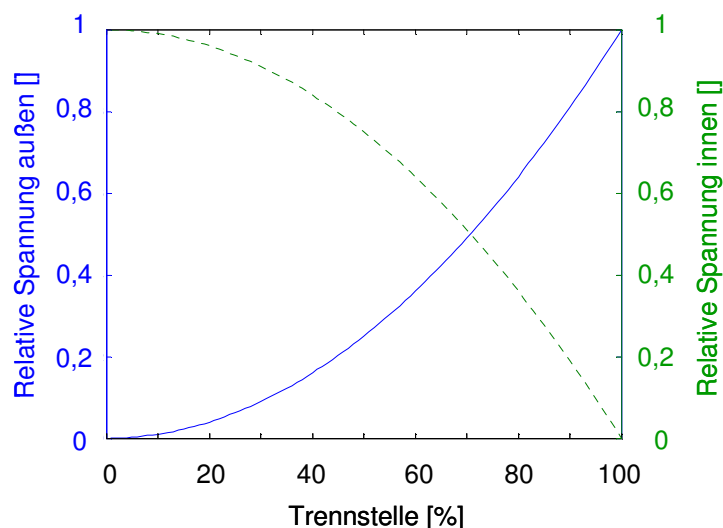


Abb. 55: Berechnung: Spannung an der Haupt- und der Hilfselektrode bei kreisförmigen Anordnungen.

Dieser Wandler ist vor allem für den Bau von Funktionsmustern interessant. Nur die Oberseite des Piezos muss bearbeitet werden. Die Polarisation aus dem Herstellungsprozess wird nicht verändert. Die so erhaltene Keramikplatte kann in einem einzigen Zentrierschritt

auf die Funktionsstruktur aufgeklebt werden. Die Ansteuerung gegen die Polarisationsrichtung stellt aber eine Einschränkung in der Leistungsfähigkeit der Aktoren dar.

Ein weiterer Vorteil für Funktionsmuster ist die Nutzung der Piezofläche als Leiterplatte. Es kann ein Leiterbahnbild aufgebracht und gesonderte Kontaktpads vorgesehen werden. Diese werden dann über Lötverbindungen kontaktiert, da man die Löt pads in für die Aktuation unkritische Bereiche legen kann. So wird eine thermische Depolarisierung vermieden. Eine Kontaktierung der Unterseite der Keramik entfällt komplett, da die passive Elektrode diese Funktion übernimmt. Mit diesem Vorteil wird eine hohe Betriebssicherheit erreicht, da die Kontaktierung der unteren Elektrode mit technischen Schwierigkeiten verbunden ist (siehe dazu Kapitel 5).

4.2.3 Wandler mit Hilfselektrode – Minimierung der Lagerreaktion

Beim Standardwandler wirkt die nicht mit Keramik belegte Zone im Außenbereich als biegeweiches Gelenk. Die entgegengesetzte Krümmung zum belegten Bereich bedingt ein Reaktionsmoment an der Lagerstelle. Dieses Lagermoment muss bei Mehrkanalanordnungen über breite Stege aufgenommen werden, damit die Membranen benachbarter Kanäle nicht ebenso verformt werden. Diese „Übersprechen“ genannte Reaktion ist besonders bei Tropfenerzeugern unerwünscht, da sich je nach Ansteuermuster der unterschiedlichen Kanäle abweichende Tropfenparameter ergeben.

Membranwandler mit strukturierten Elektroden können so verformt werden, dass das Lagermoment verschwindet. Dadurch können die Stege zwischen den Aktoren dünn ausgeführt werden. Es erhöht sich die mögliche Packungsdichte von Aktoren, die die Leistungsfähigkeit beispielsweise eines Tropfenerzeugungssystems maßgeblich beeinflusst. Zusätzlich kann für die Verbindung zwischen der Funktionsbaugruppe mit der Fluidstruktur und dem Wandler eine Verbindungstechnik mit niedrigen Festigkeitswerten, wie beispielsweise Kleben, gewählt werden.

Für den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Membranwandler mit Hilfselektrode ist, bei der Annahme gleicher Biegemomente im Kern- und Randbereich, die Überdeckung bzw. die Lage der Elektrodentrennung maßgeblich für die resultierende Lagerreaktion. Die Simulation zeigt, dass für einen Wert von 70% des Durchmessers eines kreisförmigen Wandlers die Lagerreaktion minimal wird (den vergleichbaren Kennwert für längliche Strukturen zeigt Abschnitt 4.4).

Um den Effekt zu verdeutlichen wird eine Struktur untersucht, bei der die Membran auf einem extrem dünnen Steg gelagert ist. Abb. 56 zeigt die Verformung einer solchen Struktur am Standardwandler und am Wandler mit Hilfselektrode. Es zeigt sich, dass das Lagermoment beim Standardwandler eine starke Deformation des Steges bewirkt. Zwischen der Membranebene am Rand und der horizontalen Lage entsteht ein großer Winkel. Dies indiziert, dass die Verformung an einen benachbarten Kanal weitergegeben wird. Der Wandler mit Hilfselektroden bewirkt nur eine minimale Reaktion. Die Packungsdichte kann deshalb mit Hilfe der strukturierten Elektroden erhöht werden.

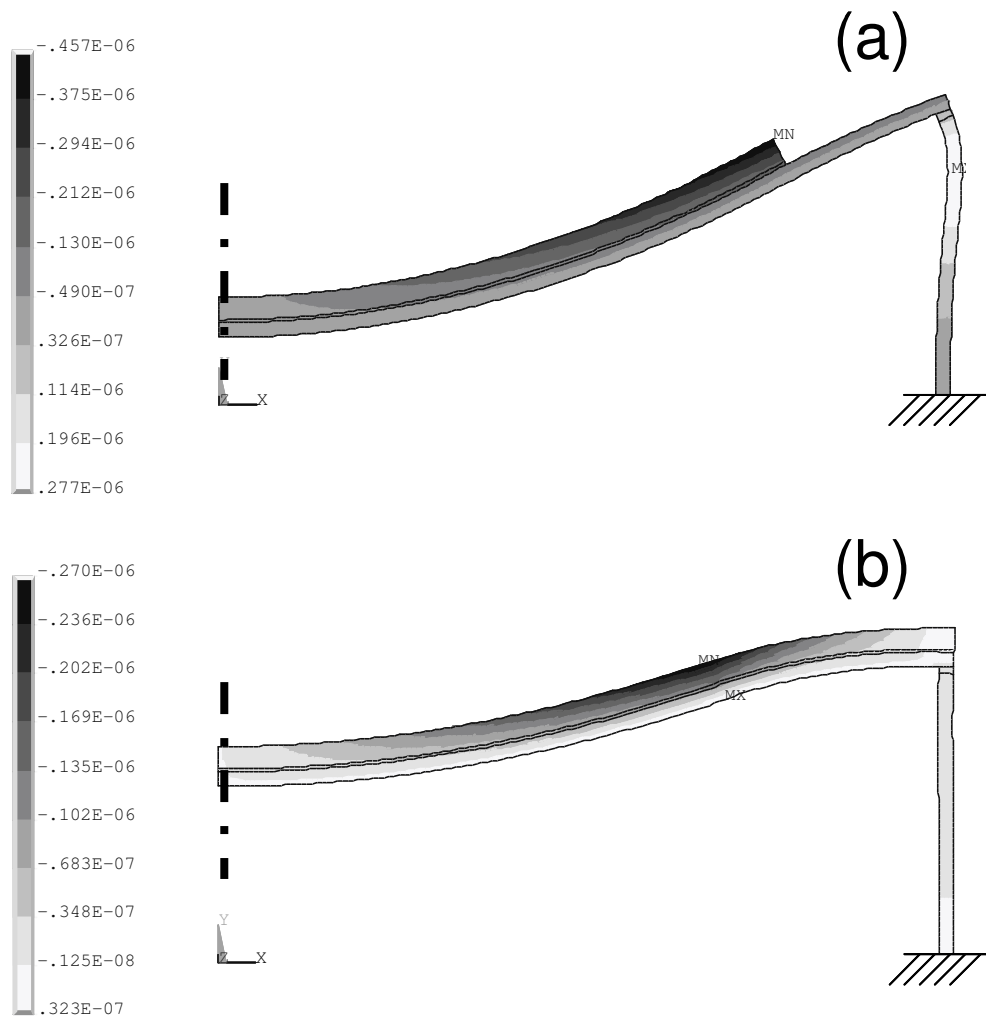


Abb. 56: Simulation: Lagerreaktionen bei Membranwandlern. Standardwandler (a) und Wandler mit Hilfselektrode (b).

4.2.4 Längseffektwandler

Der dominante Effekt bei PZT-Keramik ist der d_{33} -Effekt. In Zahlenwerten erreicht er meist das Doppelte von d_{31} . Deshalb ist es sinnvoll, diesen Effekt auch für Membranwandler zu nutzen [HON06].

Eine Problemstellung ist hier, die Polarisationsrichtung in die Ebene der Keramik zu legen. Um die elektrischen Spannungen bei der Polarisierung und der Ansteuerung gering zu halten, werden bei großen lateralen Abmessungen die oben genannten Interdigitalstrukturen verwendet. Abb. 57 zeigt das Schema eines kreisrunden Membranwandlers und eines Brückenwandlers, auf denen solche Strukturen verwirklicht sind. Die Strukturen kennzeichnen folgende Parameter, die sich aus der Verknüpfung der oben genannten Feldverteilung und den jeweils wirksamen Piezoeffekten ergeben:

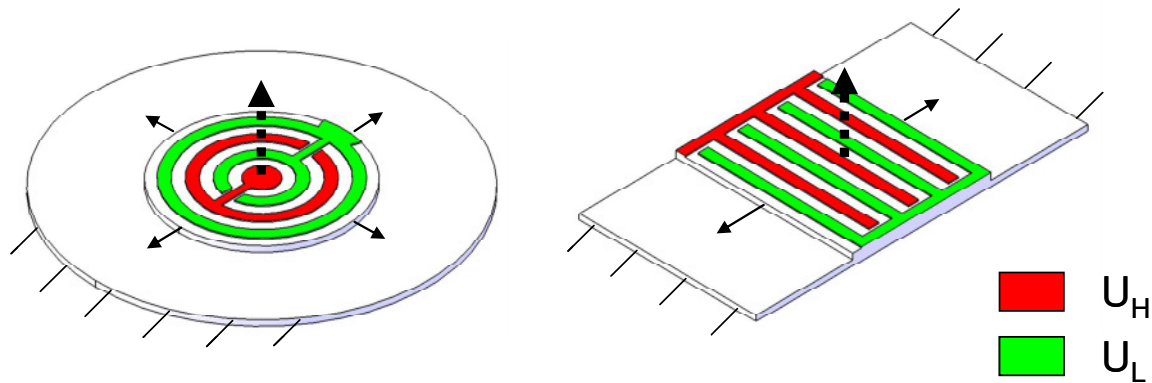


Abb. 57: Elektrodenstruktur und Aufbau eines kreisförmigen und länglichen Längseffektwandlers.

Der Elektrodenabstand bestimmt die Feldstärke im Material. Für schmale Abmessungen stellt auch für Kreiswandler die Gleichung $E=U/d$ eine mögliche Näherung dar. Bei größeren Abständen muss der Feldstärkeabfall in radialer Richtung mit berücksichtigt werden.

Ein weiterer Parameter ist die Elektrodenbreite. Unter der Elektrode sind, wie in Abschnitt 4.1.3 ausgeführt, die Feldlinien zu einem großen Anteil senkrecht zur Keramikebene. Dies gilt sowohl für die Polarisations- als auch für die Feldvektoren. Daraus folgt, dass unter der Elektrode d31-Effekte in der Keramikebene wirksam werden. Diese wirken der gewünschten d33-Verformung entgegen. Zudem sind wenig durchflutete Bereiche zu finden, die nicht zur Aktuation beitragen [BOW06].

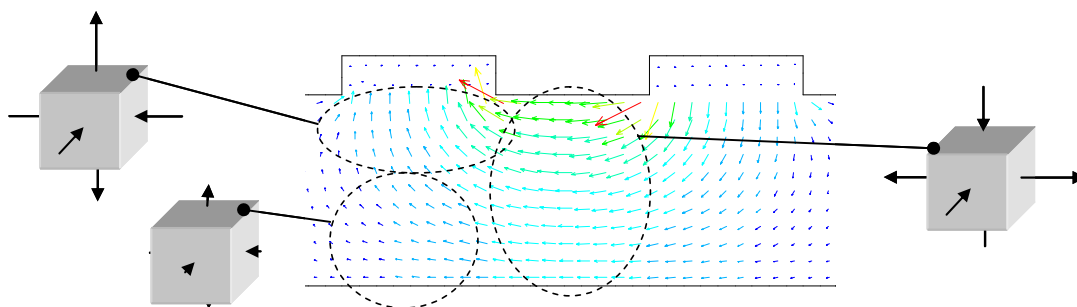


Abb. 58: Aktuationsbereiche bei strukturierter Polarisation. Abgeleitet aus einer Simulation.

Richtwerte zur Dimensionierung von Interdigitalstrukturen können bei Bowen [BOW06] gefunden werden. Demnach erreicht die Wirksamkeit der Struktur für Elektroden der Breite, die der Dicke der Keramik entspricht, ein Optimum. Der Einfluss des zweiten Parameters, Abstand der Elektroden, kann wie folgt beschrieben werden: Ein zu 100% homogenes Feld wird nur durch einen unendlichen Elektrodenabstand erreicht. Allerdings können 80% des Kennwertes von d33 bereits bei einer Dimensionierung von Spaltbreite/Keramikdicke > 4 erreicht werden.

Besondere Aufmerksamkeit muss bei diesen Strukturen dem kreisförmigen Wandler geschenkt werden. Die Polarisationsrichtung liegt bei diesen Wandlern in der Keramikebene. Ihr Vektor zeigt immer vom Zentrum der konzentrischen Ringe weg. Senkrecht dazu liegt jeweils eine Richtung, die einen d31-Effekt bei einer Ansteuerung erzeugt. Abb. 59 zeigt Elementarzellen aus einer radialsymmetrisch polarisierten Scheibe. Bei einer Ansteuerung mit

einem elektrischen Feld wirkt dieser Effekt der Verformung entgegen. Durch die Zugspannung, die der d31-Effekt in tangentialer Richtung induziert, wird die Ausdehnung in radialer Richtung geschwächt.

Zur Untersuchung der Größenordnung des Effektes wird eine Simulation dieser radial-anisotropen Struktur mit einer einfachen in 3-Richtung polarisierten Piezoscheibe verglichen. Als Idealisierung der Interdigitalstruktur der Elektroden wird ein konstantes elektrisches Feld dem Piezomaterial aufgeprägt. Beide Scheiben besitzen einen Radius von 10 mm und werden mit einem elektrischen Feld von 1 MV/m angesteuert. Am äußeren Rand ergeben sich für den d31-Piezowandler $-2,3 \mu\text{m}$ und für die d33-Struktur $1,35 \mu\text{m}$ Verschiebung. Damit ist die d33-Struktur selbst bei dieser idealisierten Anordnung unterlegen. Es ist zu erkennen, dass die Verformung nicht wie beim d31-Plättchen über die Länge homogen bleibt. Es treten sogar Bereiche auf, in denen die Verformung entgegen der d33-Richtung liegt (siehe Abb. 59). In der Literatur werden deshalb d33-Membranwandler beschrieben, die im Zentrum keine Elektrodenstruktur aufweisen [HON06]. Damit sinkt allerdings der Grad der Ausnutzung der Keramik.

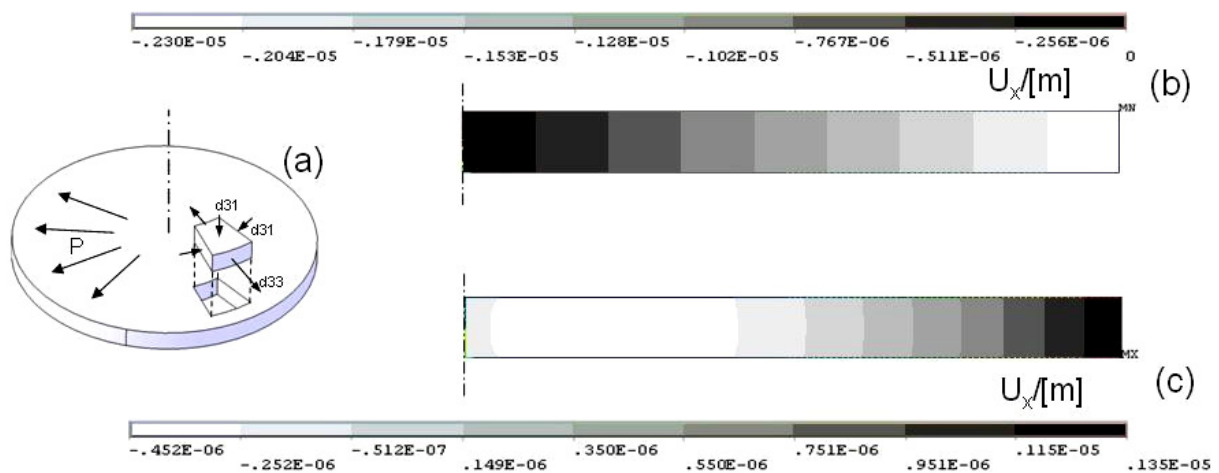


Abb. 59: Simulation: Besonderheiten der Verformung bei radialer Polarisation. Wirkende Effekte (a), Schnitt durch ein Piezoscheibchen d31 (b) und Schnitt durch ein d33- Piezoscheibchen (c).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass durch die Radialanisotropie Spannungen im Material auftreten, obwohl keine äußeren Zwänge vorliegen. Im Randbereich ergibt sich beispielsweise bei dem oben genannten Piezoplättchen in tangentialer Richtung eine erhebliche Zugspannung von $23,5 \text{ N/mm}^2$ (siehe auch Abschnitt D.II.).

Durch die kreisförmigen Elektroden kommt ein weiterer Effekt hinzu. Die Feldstärke nimmt mit steigendem Radius ab. Ein extremes Beispiel, das die Verhältnisse zeigt, ist ein Aufbau mit einer Elektrode in der Mitte und am Rand.

Wird dieser Umstand mit in die Simulation eingebracht, also eine Struktur ohne Interdigitalelektroden betrachtet, erreicht der Außenrand nur noch eine Verformung von $0,319 \mu\text{m}$. Die Ansteuerspannung wird hier analog zu einer geraden Anordnung mit $E=1\text{MV/m}$ d.h. $10 \text{ kV pro } 10 \text{ mm}$ gewählt.

Das Ergebnis einer Simulation der Verformung eines Membranwandlers mit Längseffektnutzung zeigt Abb. 60. Qualitativ kann die Umsetzung der Verformung der Piezoscheibe aus Abb. 59 nachvollzogen werden. Die Maximalverformung liegt hier nicht in der Mitte der Struktur.

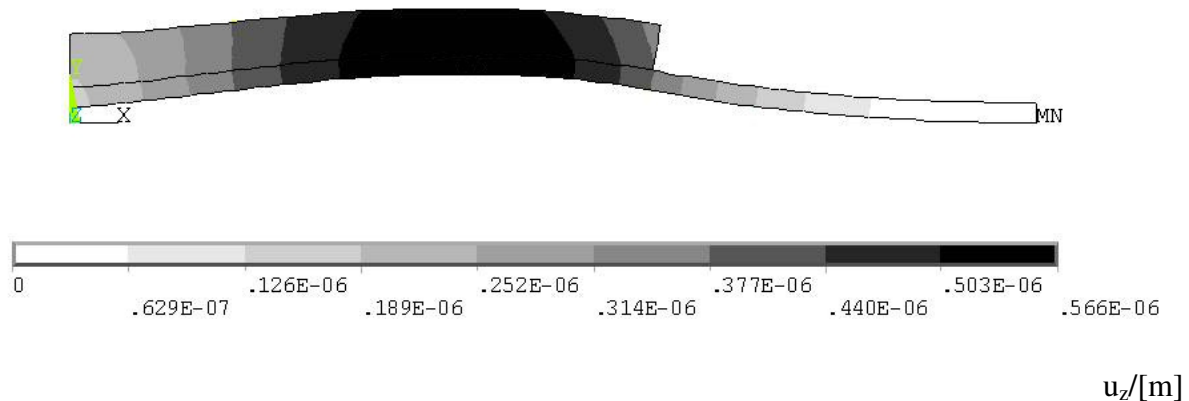


Abb. 60: Simulation: Membranverformung eines kreisförmigen Wandler unter Nutzung des Piezolängseffektes (Verschiebung in z-Richtung).

Bei Brückenwandlern, die Interdigitalelektroden aufweisen, ergibt sich diese Problematik nicht. Für Strukturen, die in der Mitte mit d33-Effekten betrieben werden sollen, sind dem zu Folge konstruktiv längliche Strukturen vorzusehen.

Der bei Hong [HON06] beschriebene Aufbau kann, wie beschrieben, nicht das volle Potential der Keramik ausnutzen. Deshalb wird im Folgenden eine Struktur vorgeschlagen, bei der der Längseffektwandler im Randbereich liegt. Durch den Quereffektwandler im Zentrum kann das gesamte Keramikvolumen genutzt werden. Die Struktur ist dazu für kreisförmige und Brückenwandler in gleichem Maß geeignet.

4.2.5 Kombiniertes Wandler

Mögliche Konstruktionen, die eine kombinierte Nutzung von Längs- und Quereffekt ermöglichen, zeigt Abb. 61. Der Längseffekt im Außenbereich wird je nach freier Biegelänge der Struktur mit zwei parallel auf der Keramik verlaufenden Elektroden oder durch eine Interdigitalstruktur erzeugt. Im Zentrum der Membran wird der Piezo wie beim Bimorph nach dem Stand der Technik oder dem oben beschriebenen Wandler mit Hilfelektrode angesteuert.

Auf der Unterseite der Interdigitalstruktur darf sich keine Elektrode befinden, die den Feldverlauf stören kann. In diesem Bereich wird die Elektrode entfernt.

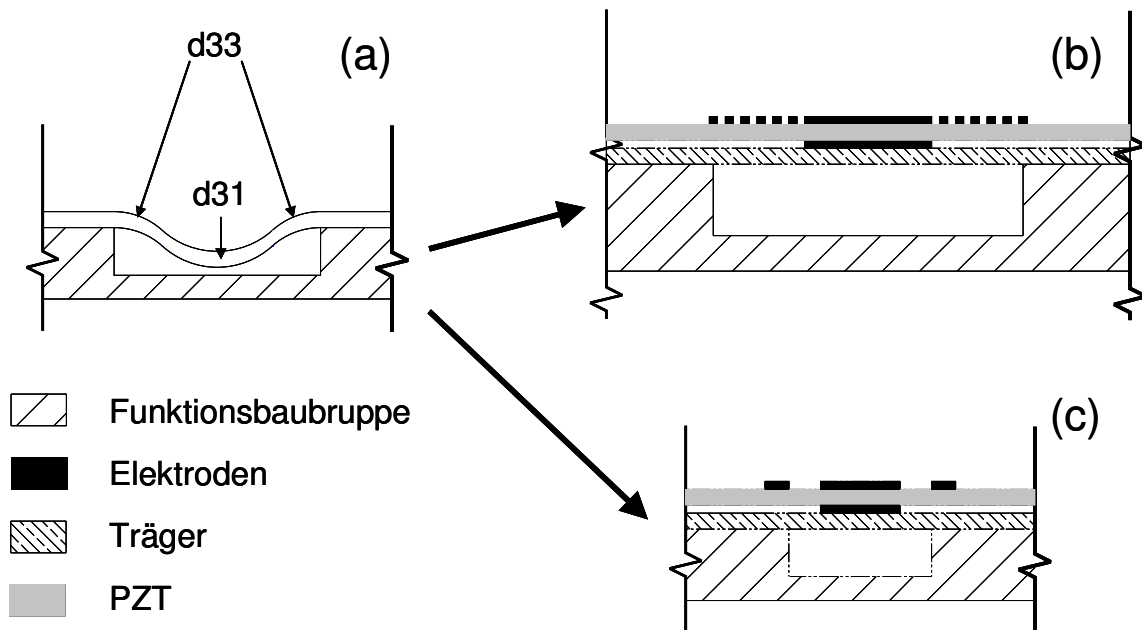


Abb. 61: Schematischer Aufbau eines kombinierten Wandlers (Längs- und Quereffekt).

Als passive Membran eignen sich deshalb leitfähige Materialien nicht. Eine dünne Klebeschicht würde dann zu einer dem Wandlertypen mit Hilfselektrode ähnlichen Reaktion führen.

Beim kombinierten Wandler ist es notwendig, die Bodenelektrode für den Quereffektwandler zu kontaktieren. Strukturierte Elektroden bieten hier zwei Möglichkeiten:

- Die Keramikplatte kann über den Bereich der Funktionsstruktur verlängert werden. Dadurch wird die Elektrode für eine Verbindung durch Lötten oder Wire-Bonds zugänglich.
- Wie beim Wandler mit Hilfselektroden wird ein Doppelkondensatorprinzip angewendet.

Maßgeblich für eine Beurteilung der Wirksamkeit des Einsatzes von der Längseffektstruktur im Randbereich ist ein Vergleich mit dem Membranwandler mit Hilfselektrode. Die Berechnung zeigt, dass selbst schlecht optimierte Strukturen, bedingt durch die wesentlich höheren nutzbaren Feldstärken, einem Quereffektwandler, der gegen die Polarisationsrichtung angesteuert wird, überlegen sind. Die Interdigitalstruktur kann mit ca. 1,5 MV/m in Luft sicher betrieben werden. Der Quereffektwandler sollte nicht weiter als 0,5 MV/m angesteuert werden. Es ergibt sich damit, dass eine solche Struktur selbst bei

$$d_{ges} = \frac{1}{5} \cdot d_{31} \quad 31$$

noch sinnvoll eingesetzt werden kann.

Da der Wandler nicht gegen die Polarisationsrichtung betrieben wird, eignet er sich nicht nur zum Bau von Funktionsmustern. Am Rand des Aktors über der Lagerfläche wird nur ein schmaler Elektrodenstreifen benötigt. Deshalb kann eine mit gewöhnlichen Membranaktoren vergleichbare Packungsdichte erreicht werden. Die Lagerreaktionen fallen zudem durch die günstigere Verformung geringer aus. Dies äußert sich im geringeren mechanischen Übersprechen. Die äußeren Elektroden können auf ein Potenzial gelegt und damit eine wirtschaftliche Verbindungstechnik erreicht werden.

4.3 Analytische Berechnung von Wandlern mit ungeteilter Keramik

Um eine einfache Auslegung der Membranaktoren mit strukturierten Elektroden zu ermöglichen, wird eine analytische Berechnung eingeführt. Diese wird aus den Beschreibungen von Pfeiffer abgeleitet, der den Wandler mit strukturierter Keramik beschreibt [PFE82]. Im Folgenden ist der Rechengang dargestellt, ohne die Gleichungen vollständig herzuleiten. Für eine weiterführende Beschreibung wird auf die Literatur verwiesen [PFE82][EDE99][CHO05b][ROG01]. Im Gegensatz zu den Herleitungen in der Literatur sind ausschließlich Zweischichtstrukturen aufgeführt, die einen passiven Träger aufweisen. Die Berechnung wird für den Wandlertypen mit Hilfselektrode ausgeführt. Sie lässt sich aber durch ein angepasstes elektrisches Moment im Außenbereich als Näherung auf den kombinierten Wandler übertragen.

Die Ableitungen werden anhand von, in ihrer Form oben bereits beschriebenen, länglichen Aktorstrukturen durchgeführt. Diese werden im Wesentlichen zweidimensional modelliert. Die Übertragung auf andere geometrische Strukturen ist mit Faktoren möglich, die aus Simulationsmodellen gewonnen werden können.

Die Modellierung erfolgt, ausgehend von der Elektrodenstruktur, die unterschiedliche Krümmungsbereiche erzeugt, anhand von vier Biegestreifen (siehe Abb. 62(a)). Auf Grund der Symmetrie ist es für die Rechnung aber ausreichend nur zwei Biegestreifen zu betrachten.

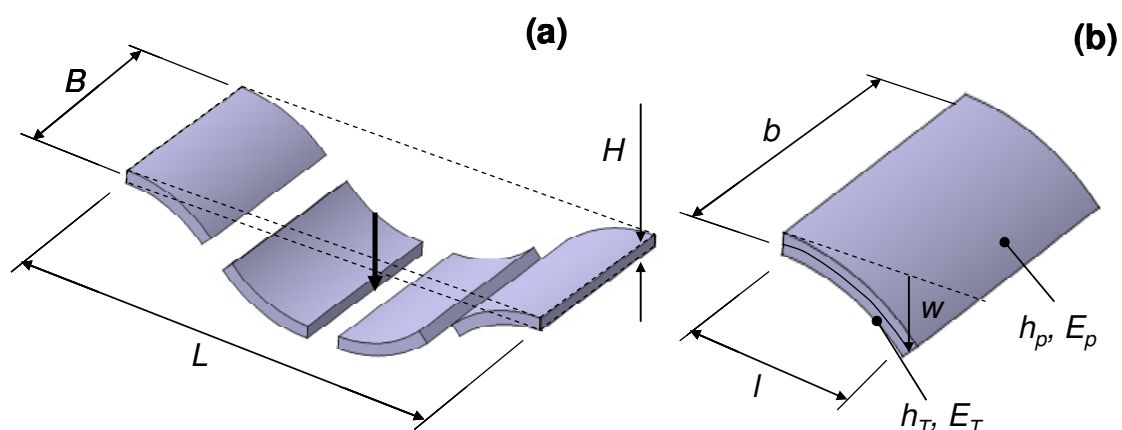


Abb. 62: Zerlegung von einem länglichen Membranwandler in einfache Biegebalken.

Im ersten Schritt wird die Berechnung der Verformung durch die Piezoaktuation beschrieben. Die Aktuation bewirkt das Entstehen eines Biegemomentes, das die Struktur, den Biegestreifen verformt (siehe Abb. 62 (b)). Das über der gesamten freien Länge l entstehende

Moment kann als äußeres Belastungsmoment m aufgefasst werden. Die Größe der Verformung beschreibt [HÜT00]:

$$w = \frac{l^2}{2 \cdot EI} \cdot m. \quad 32$$

Das Widerstandmoment EI bestimmt ebenso wie die Länge die Durchbiegung der Struktur. Da im Fall von Bimorph-Piezoaktoren eine Schichtstruktur vorliegt, muss dies bei der Berechnung von EI berücksichtigt werden (siehe [PFE82], S.12).

$$(EI)_{Ers} = \frac{b \cdot E_p \cdot h_p^3}{3} \cdot \left(1 + \left(\frac{h_T}{h_p} \right)^3 \cdot \frac{E_T}{E_p} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{h_T}{h_p} \right)^2 \cdot \frac{E_T}{E_p} \right)^2}{1 + \frac{h_T}{h_p} \cdot \frac{E_T}{E_p}} \right). \quad 33$$

Die zweite Größe die ermittelt werden muss, um die Durchbiegung zu berechnen, ist das durch den Piezoeffekt erzeugte Moment.

Sehr anschaulich kann die Entstehung des piezoelektrischen Momentes an einem Biegestreifen aus zwei getrennt ansteuerbaren Piezostreifen erläutert werden. Beide Streifen werden gegensinnig mit einem elektrischen Feld E_3 senkrecht zur Streifenebene angesteuert. Die unverbundenen Streifen würden sich jeweils um den Betrag (analog Gleichung 17)

$$\pm \Delta l = \pm E_3 \cdot d_{31} \cdot l \quad 34$$

dehnen oder zusammenziehen.

Sind beide Streifen aber miteinander verklebt, werden die jeweiligen Dehnungen unterdrückt. Es entsteht im einzelnen Streifen eine mechanische Spannung T_1 in der Plattenebene, die der Blockierkraft entspricht (siehe Gleichung 1):

$$T_1 = \frac{E_3 \cdot d_{31}}{s_{11}}. \quad 35$$

Das resultierende Drehmoment m_{el0} um die neutrale Faser

$$m_{el0} = 2 \cdot \frac{h_p}{2} \cdot F_1 = h_p \cdot T_1 \cdot A_p = d_{31} \cdot \frac{1}{s_{11}} \cdot E_3 \cdot b \cdot h_p^2 \quad 36$$

ist für die Verkrümmung der Struktur verantwortlich. Für eine Bimorphstruktur mit passivem Träger kann wieder ein Korrekturfaktor angegeben werden ([PFE82], S. 13)

$$f_m = \frac{\left(1 + \frac{h_T}{h_P}\right) \cdot \frac{h_T}{h_P} \cdot \frac{E_T}{E_P}}{2 \cdot \left(1 + \frac{h_T}{h_P} \cdot \frac{E_T}{E_P}\right)} \quad 37$$

Das korrigierte elektrische Moment m_{el} wird über

$$m_{el} = m_{el0} \cdot f_m \quad 38$$

berechnet.

Um die Gesamtverformung des Wandlers zu berechnen, müssen die zwei Biegestreifen gekoppelt werden (siehe Abb. 63). Der Streifen am Rand ist einseitig drehsteif gelagert. Er wird durch das elektrische Moment m_{ela} und das Reaktionsmoment m_R deformiert. Das Moment m_R wirkt ebenso auf den zweiten Streifen, der zusätzlich durch das elektrische Moment m_{eli} im Inneren belastet wird. Beide Durchbiegungen summieren sich zur maximalen Auslenkung des Membranwandlers (Verschiebung des Mittelpunktes in z-Richtung).

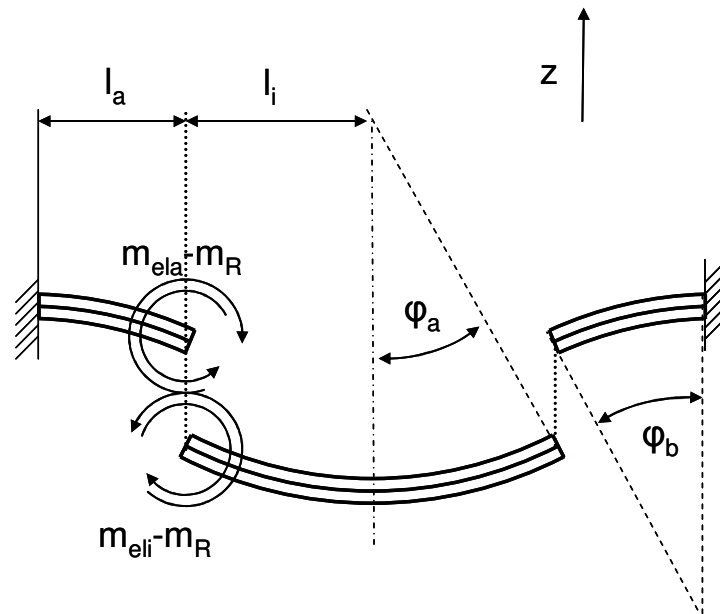


Abb. 63: Winkel und Momente an den Teilbereichen eines Wandlers mit Hilfselektrode.

Das Reaktionsmoment m_R kann über die Bedingung eines stetigen Übergangs zwischen den beiden Biegestreifen gewonnen werden. Für Neigungen und damit auch für die Winkel an dieser Stelle gilt:

$$\varphi_a(l_a) = \varphi_i(l_i) \quad 39$$

Ein Biegestreifen der über die Momente m_R und m_{el} belastet wird, weist den folgenden Winkel am freien Ende auf:

$$\varphi(l) = \frac{m_{el} - m_R}{EI} \cdot l \quad 40$$

Wird diese Beziehung in Gleichung 37 eingesetzt und nach m_R aufgelöst, ergibt sich der Zusammenhang:

$$m_R = \frac{m_{ela} \cdot l_a - m_{eli} \cdot l_i}{l_a + l_i} \quad 41$$

Die Durchbiegungen der Streifen beträgt jeweils:

$$w_i = \frac{l_i^2}{2(EI)_{Ers}} \cdot (m_{eli} + m_R) \text{ und } w_a = \frac{l_a^2}{2(EI)_{Ers}} \cdot (m_{ela} - m_R). \quad 42$$

Diese Verformungen addieren sich zur gesuchten Auslenkung in der Mitte der Struktur:

$$w_{ges} = w_a + w_i. \quad 43$$

Für die Berechnung des Maximaldrucks wird wieder von dem Modell der Superposition der Verformung durch die elektrische Aktuation und der Verformung durch Innendruck ausgegangen. Die gesamte Struktur wird als Balken mit zweiseitiger drehsteifer Lagerung betrachtet. Durch eine Streckenlast q wird ein solcher Balken um den Betrag [HÜT00]

$$w = \frac{q \cdot l^4}{384 \cdot EI} \quad 44$$

verformt. Die Streckenlast kann unter Berücksichtigung der Tiefe b der Struktur mit einem Druck p in Beziehung gesetzt werden. Es gilt:

$$q = \frac{F}{l} = \frac{p \cdot A}{l} = p \cdot b. \quad 45$$

Der erzeugbare maximale Druck wird durch Gleichsetzen der Beziehungen für die Verformung durch die Ansteuerung und die obige Beziehung für den Druck ermittelt:

$$p_{Max} = \frac{w_{ges} \cdot EI \cdot 384}{b \cdot l^4}. \quad 46$$

4.4 Parametervariationen

Um die skalaren Parameter zu erhalten, die die Verformungsvergrößerung durch die steigende Aktortiefe B wiedergeben, wird zuerst eine Simulationsreihe von Wandlern mit Hilfselektrode durchgeführt. Abb. 64 zeigt abweichend vom Ergebnis für längliche Wandler mit geschnittener Keramik, dass das Plateau der Verformung beim Wandler mit Hilfselektrode nur einen Wert von 1,2 erreicht.

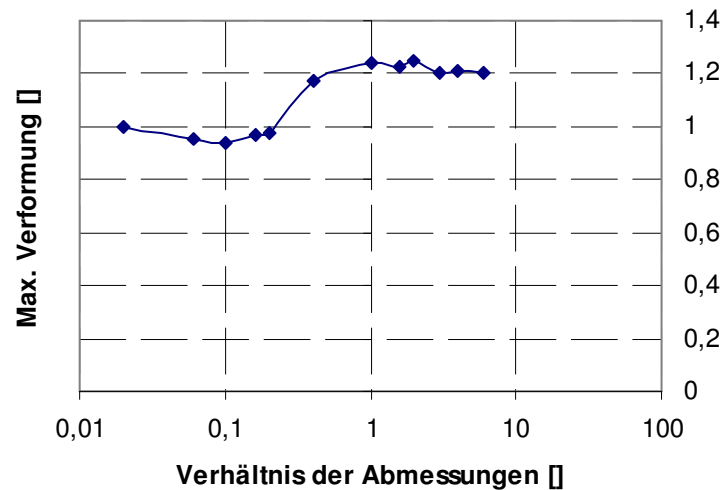


Abb. 64: Simulation: Verformungsüberhöhung bei Wandlern mit Hilfelektrode (Einfluss der Wandlerlänge auf die maximale Verformung, normierte Darstellung).

Für die Aktordimensionierung ist die Lage der Trennstelle zwischen Mittelelektrode und Hilfelektrode eine wichtige Größe (im Folgenden analog zu 3.4.3 Überdeckung genannt). Durch die zusätzliche Ansteuerung des Randbereiches ergibt sich ein anderes Verhalten als bei den Wandlern des Stand der Technik. Die Berechnung zeigt für einen Brückenwandler mit den Dimensionen des Referenzwandlers, dass das Maximum sowohl für die Verformung als auch für den Druck bei 50% liegt (siehe Abb. 65). Wie die Gleichungen zeigen, nimmt die Schichtstruktur keinen Einfluss auf die Lage des Maximums.

Das Ergebnis für die Verformung aus der analytischen Berechnung im Maximum bei 50% Überdeckung weicht von den Simulationsergebnissen eines Aktors mit vernachlässigbarer Tiefe B (0,1 mm) ab (Simulation: 1,74 μm und Berechnung: 1,9 μm). Für einen Aktor mit einem Aspektverhältnis von über eins ist das Ergebnis der Berechnung um 0,2 μm zu niedrig. Der mit der analytischen Berechnung ermittelte Wert muss also für diese Aktoren um einen Faktor von 1,105 korrigiert werden. Der Vergleich des Verhaltens bei Parametervariationen rechtfertigt dieses Vorgehen (siehe unten).

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Ausgangsgrößen dienen deshalb für einen prinzipiellen Vergleich. Werte für einen direkten Vergleich der Aktorprinzipien liefert Abschnitt 4.6.

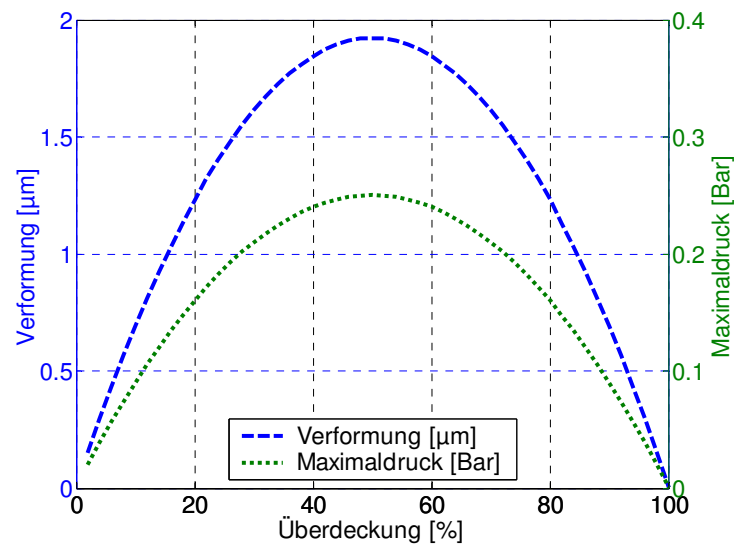


Abb. 65: Berechnung: Variation des Parameters Überdeckung bei einem länglichen Wandler mit strukturierten Elektroden. Einfluss auf die Größen Verformung und Druck.

Abb. 66 zeigt die Verformung unter der Variation der Parameter E-Modul des Trägers und der Dicke der Keramik. Wie den Gleichungen zu entnehmen ist, sind diese Faktoren verknüpft. Die gewählten Größenordnungen für den E-Modul entsprechen der Bandbreite technisch relevanter Werkstoffe. Die Dicken werden um den Wert des Referenzwandlers (250 μm) variiert. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass jedem gegebenen Trägerwerkstoff eine optimale Schichtdicke für die Keramik zugeordnet werden kann.

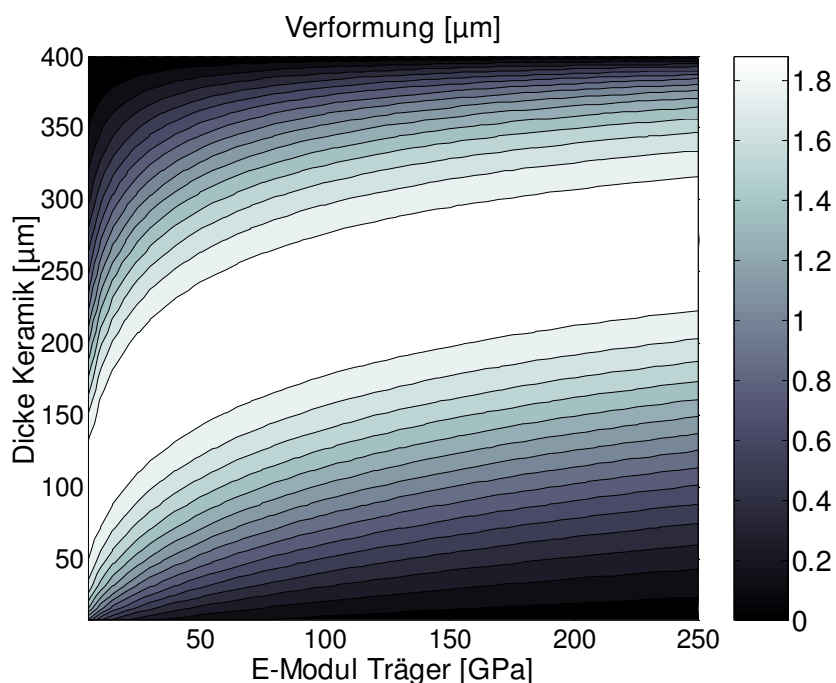


Abb. 66: Berechnung: Gegenseitige Beeinflussung der Parameter E-Modul des Trägers und Schichtdicke der Keramik (Einfluss auf die Verformung).

Wird der Maximaldruck untersucht, zeigt sich, dass Werkstoffe mit hohem E-Modul grundsätzlich vorzuziehen sind. Bei einem gegebenen Trägerwerkstoff gibt es aber, wie oben

beschrieben, ein Optimum für die Keramikdicke. Dieses Optimum verschiebt sich mit steigendem E-Modul im betrachteten Bereich von einem Verhältnis der Keramikdicke zur Gesamtdicke von ca. 0,5 auf 0,75.

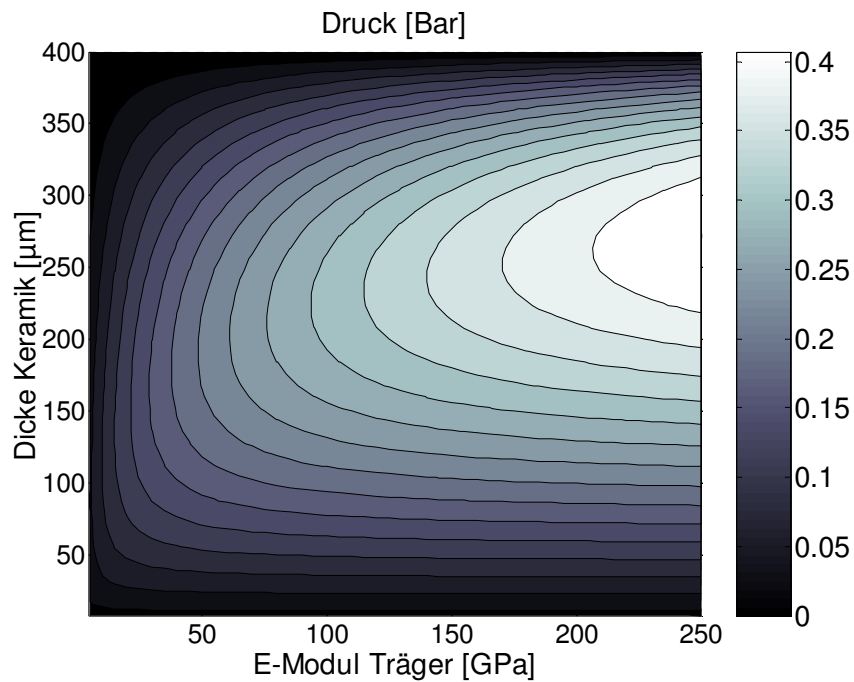


Abb. 67: Berechnung: Gegenseitige Beeinflussung der Parameter E-Modul des Trägers und Schichtdicke der Keramik (Einfluss auf den Maximaldruck).

Bei Wandlern mit strukturierten Elektroden zeigt sich, wie bei dem oben beschriebenen, Wandler des Stand der Technik, eine starke Veränderung der Ausgangsgrößen bei Variation der freien Biegelänge und der Verbunddicke. Wird die freie Biegelänge vergrößert, steigt die Verformung überproportional an. Der erreichbare Maximaldruck sinkt dabei stark ab (siehe Abb. 68).

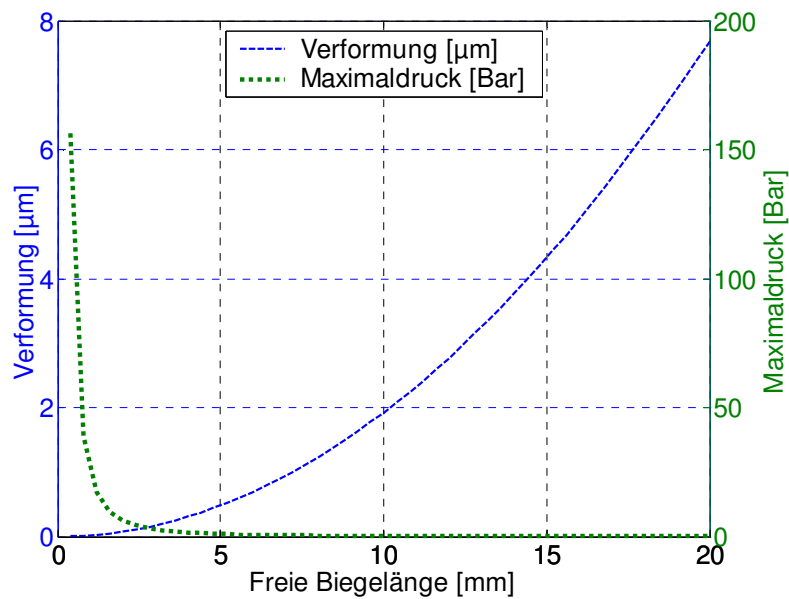


Abb. 68: Berechnung: Einfluss der freien Biegelänge auf die Kennwerte Verformung und Maximaldruck.

Bei Änderung der Verbunddicke zeigt sich das umgekehrte Verhältnis. Hier steigt der Druck bei zunehmender Dicke stark an. Die Verformung geht überproportional zurück.

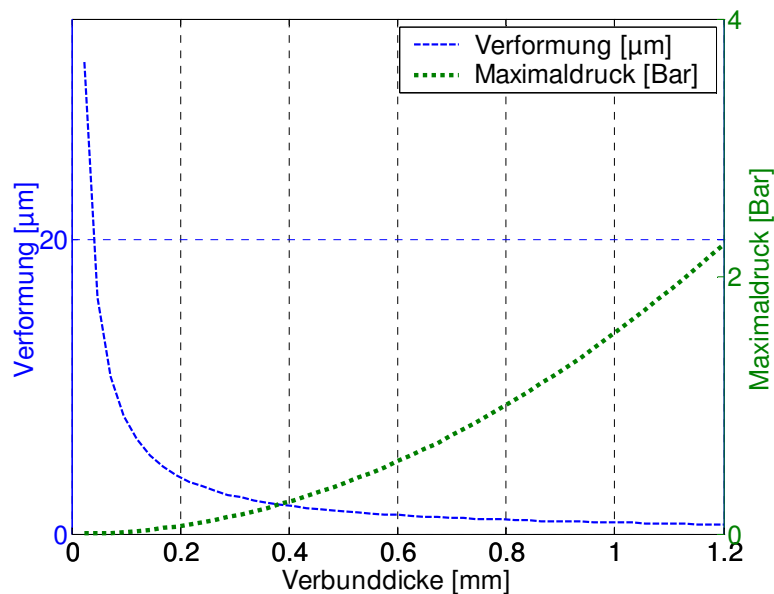


Abb. 69: Berechnung: Einfluss der Verbunddicke auf die Verformung und den Maximaldruck.

Das Moment m_R aus Gleichung 41 entspricht dem Lagermoment und damit der Lagerbelastung. Die Variation der Lage der Trennstelle zeigt, dass bei einem länglichen Wandler mit Hilfselektrode die Lagerreaktion, abweichend zum oben mit der Simulation untersuchten kreisförmigen Wandler, bei einem Wert von 50% verschwindet. An den Extremstellen entsteht keine nutzbare Verformung mehr. Hier tritt die maximale Lagerlast auf. Zwischen den Extremwerten verläuft das Lagermoment linear.

Ebenso kann der kombinierte Wandler beschrieben werden. In den Gleichungen 41 und 42 muss lediglich das elektrische Moment im Randbereich um das Verhältnis von d_{33}/d_{31} korrigiert werden. Bei der Annahme eines Verhältnisses von zwei verschiebt sich die Lage der Trennstelle, bei der das Lagermoment verschwindet auf 66%.

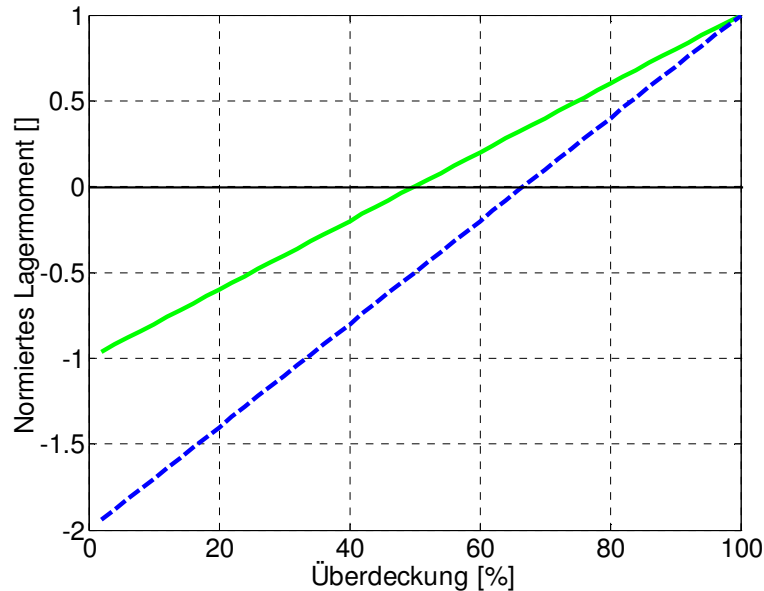


Abb. 70: Berechnung: Normiertes Lagermoment in Abhängigkeit von der Lage der unterschiedlichen Bereiche der Aktuation (Wandler mit Hilfelektrode durchgehend, kombinierter Wandler strichliert).

4.5 Skaleneffekte bei Bimorph-Piezoaktoren

Die obigen Ableitungen zeigen, dass die Konstruktion zwei wesentliche Freiheitsgrade besitzt: Die Hauptabmessungen r oder l , je nach geometrischer Grundform, und die Gesamtdicke der Struktur. Die restlichen Parameter sind anhand der Optima zu bestimmen. Zusätzlich ist beim länglichen Wandler noch die Tiefe der Struktur relevant. Im Folgenden wird die oben dargestellte Rechnung auf Gleichungen, die den Einfluss der Hauptabmessungen zeigen, reduziert.

4.5.1 Vereinfachte Modellierung

Die Gleichungen aus Abschnitt 4.3 können auf Proportionalitätsbeziehungen vereinfacht werden. Dazu wird der jeweilige Parameter im Rechengang verfolgt und skalare Konstanten werden für die weitere Betrachtung weggelassen. Die Zielgrößen sind die Verformung und der Maximaldruck. Die Variationsparameter sind die freie Biegelänge, die Aktortiefe und die Verbunddicke. Zur deutlichen Kennzeichnung werden die oben eingeführten Größen l , b und h_{ges} durch L , B und H ersetzt (siehe Abb. 71).

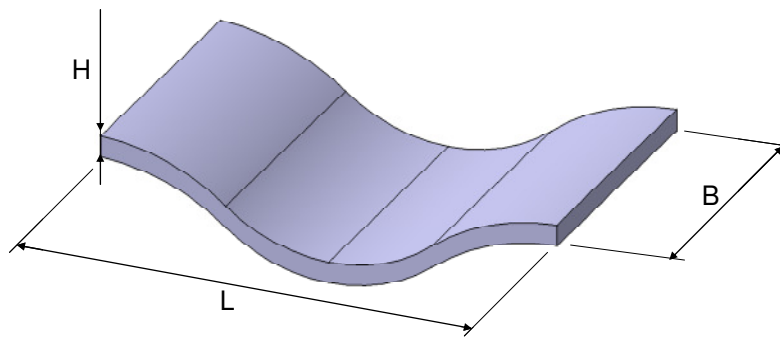


Abb. 71: Bezeichnung der Hauptabmessungen.

Die Gesamtverformung ist die Summe aus der Durchbiegung zweier Biegestreifen. Die reduzierte Gleichung lautet also:

$$w_{ges} \sim \frac{L^2}{I} \cdot m_{el} \text{ mit } I \sim BH^3. \quad 47$$

Das elektrische Moment m_{el} ist mit den gesuchten Größen wie folgt verknüpft:

$$m_{el} \sim B \cdot H^2. \quad 48$$

Der Schichtaufbau wirkt sich auf die Proportionalitätsverhältnisse nicht aus. Gemäß diesen Gleichungen kann der Einfluss der Faktoren auf die Durchbiegung des Aktors zusammengefasst werden:

$$w_{ges} \sim L^2 \text{ und } w_{ges} \sim \frac{1}{H}. \quad 49$$

Die Tiefe des Aktors B geht, bis auf die in Abschnitt 3.3.3 beschriebene Überhöhung ab dem Aspektverhältnis von ca. drei, nicht in die Beziehung ein.

Der Maximaldruck reduziert sich bei der Untersuchung der beschreibenden Gleichungen auf folgende Proportionalität:

$$p_{max} \sim \frac{w_{ges} \cdot I}{B \cdot L^4}. \quad 50$$

Unter Berücksichtigung der abgeleiteten Beziehungen für die Verformung, kann auch für den Druck die beschreibende Vereinfachung angegeben werden:

$$p_{max} \sim \frac{1}{L^2} \text{ und } p_{max} \sim H^2. \quad 51$$

Wie bei der Verformung wirkt sich die Aktortiefe nicht aus.

4.5.2 Ableitungen für Tropfenerzeuger

Bei Tropfenerzeugern und Pumpmembranen spielt die Volumenverdrängung eine wichtige Rolle. Die Ableitung der Volumenverdrängung geht von der Annahme aus, dass durch die Aktuation der Keramik eine symmetrische Verformung entsteht, deren gekrümmte Bereiche linear angenähert werden können. Das in der Realität kuppelartige Verformungsvolumen, kann dann als Prisma mit dreieckiger Grundfläche aufgefasst werden (siehe Abb. 72).

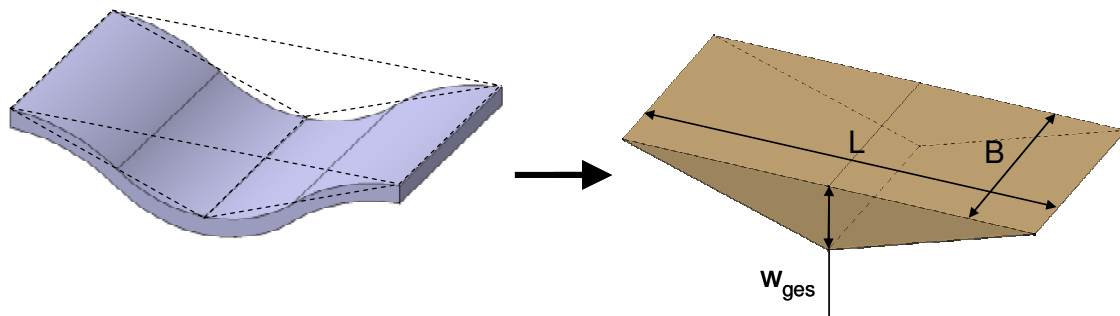


Abb. 72: Annäherung des verdrängten Volumens durch ein Prisma mit dreieckiger Grundfläche.

Die Gleichung für das Volumen

$$V = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B \cdot w_{ges} \quad 52$$

führt demgemäß nach obigen Proportionalitätsbeziehungen zu:

$$V \sim \frac{B \cdot L^3}{H} \quad 53$$

Für einen Tropfenerzeuger stellt dieses Volumen das Maximalvolumen dar, das ein damit erzeugter Tropfen erreichen kann. Je nach Konstruktionsprinzip müssen zusätzlich Faktoren eingeführt werden, die dieses Volumen reduzieren (beispielsweise Abfluss durch die Fluidzuleitung). Für die Proportionalitätsbetrachtung kann aber über das Gleichsetzen von

$$V_{Tropfen} = V$$

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B \cdot w_{ges} \quad 54$$

eine Beschreibung

$$R^3 \sim \frac{L^3 \cdot B}{H} \leftrightarrow R \sim L \left(\frac{B}{H} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 55$$

für die Änderung des Tropfenparameters R bei Variation der Aktorgeometrie gefunden werden.

Bei Tropfenerzeugern ist zudem die Tropfengeschwindigkeit ein wesentlicher Kennwert. Um eine Beziehung zu den Aktorkonstruktionsparametern zu erhalten, kann folgende vereinfachende Überlegung herangezogen werden:

Die Erzeugung von Mikrotropfen basiert auf der Beschleunigung einer Flüssigkeitsmenge in einer Düse. Diese kann als Strömungskanal aufgefasst werden, für den die aus der Fluidmechanik bekannte Beschreibung

$$\Delta p = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad 56$$

benutzt wird. Die Strömungsgröße Re (Reynoldszahl), die Kanalgeometrie l (durchströmte Länge), der hydraulische Durchmesser D und die Dichte ρ können wieder vernachlässigt werden. Es folgt für einen Tropfen dessen Geschwindigkeit der mittleren Geschwindigkeit im Strömungskanal entspricht (mit $\Delta p = p_{\max}$ und $v = w$):

$$v \propto \sqrt{p_{\max}} = \frac{H}{B} \quad 57$$

Damit kann der Einfluss der Geometrieparameter auf die wichtigsten Tropfenparameter abgeschätzt werden. Tabelle 5 zeigt die Ausgangsgrößen bei der Variation der normierten Größen L , B und H .

Variation Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
L	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00	0,50
B	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50
H	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50
A_{Aktor}	1,00	1,00	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25
V_{Aktor}	1,00	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,13
ΔV_{Aktor}	1,00	2,00	1,00	0,25	0,06	0,13	0,50	0,13
p_{\max}	1,00	0,25	0,25	1,00	4,00	4,00	1,00	1,00
R	1,00	1,26	1,00	0,63	0,40	0,50	0,79	0,50
v	1,00	0,50	1,00	0,50	2,00	1,00	2,00	1,00

Tabelle 5: Variation der Geometrieparameter und Ausgangsgrößen.

Zusätzlich zu den oben berechneten Werten sind das Bauvolumen V_{Aktor} und der Flächenbedarf A_{Aktor} eines Piezoaktors angegeben.

Abb. 73 stellt die Variation der Geometrieverhältnisse anschaulich dar. Die unterschiedlichen erzeugbaren Tropfengrößen zeigen verschieden große Kugeln an. Die Position der Kugeln stellt die Tropfengeschwindigkeit dar. Die Aktoren sind als Blöcke mit variierenden Dimensionen wiedergegeben.

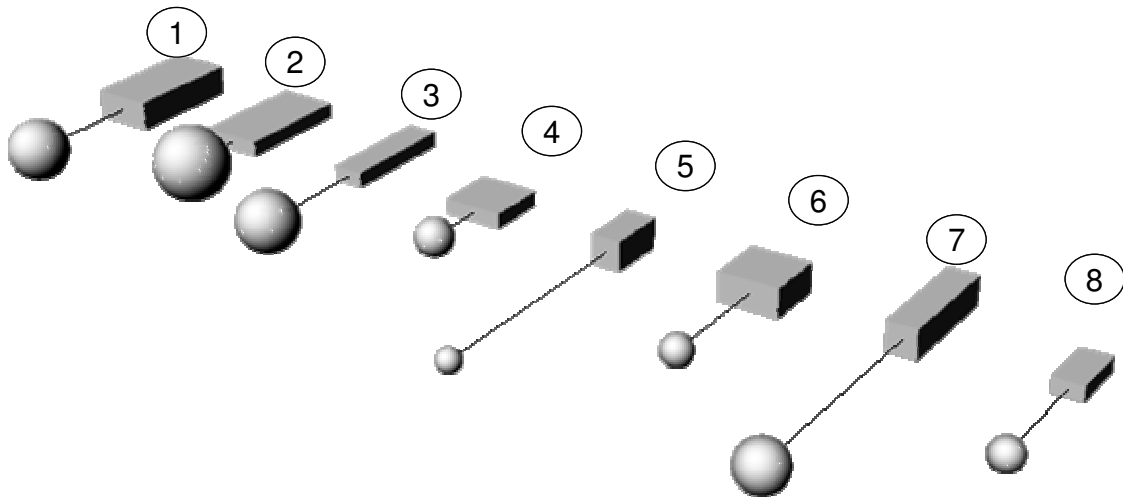


Abb. 73: Visualisierung der Tropfenparameter Größe und Geschwindigkeit bei Variation der Hauptabmessungen der Aktorik.

4.6 Vergleich der Wandler anhand der Referenzgeometrie

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse von 3D-Simulationen der verschiedenen Wandler zusammen. Die Ansteuerfeldstärke wird auf 0,4 MV/m festgelegt.

Grundlage für die Geometrie ist der Referenzwandler aus Abschnitt 3.1. Abweichend zu den obigen Beschreibungen wird die Überdeckung für die jeweiligen Wandler in das Optimum bezüglich der Verformung gelegt. Deshalb ergeben sich in diesem Vergleich zum Teil andere Ausgangsgrößen als oben beschrieben. Anhand dieser Geometriedaten wird dann eine Modalanalyse zur Gewinnung der Steifigkeit durchgeführt. Der Vergleich wird in zwei Bereiche unterteilt. Es werden die verschiedenen Kennwerte von Standardwandlern verglichen, um den Einfluss der geometrischen Bauform zu zeigen. Die in dieser Arbeit untersuchten Wandler werden anhand einer länglichen Struktur verglichen, da die kreisförmigen und quadratischen Bauformen bei den Wandlern mit strukturierten Elektroden die oben genannten Nachteile aufweisen.

Der Vergleich der Standardwandler zeigt, dass die längliche Bauform gegenüber dem einfachen Flächenzuwachs und damit einem Zuwachs des verdrängten Volumens weitere Vorteile aufweist. Die Verformung liegt gegenüber der runden und der quadratischen Bauform wesentlich höher. Der Maximaldruck fällt nicht in gleichem Maße ab. Dadurch ist der Einsatz in Anordnungen begünstigt, die hohe Verformungen bei großen Drücken erfordern (beispielsweise Mikroventile). Die Eigenfrequenz ist allerdings gegenüber runden und quadratischen Bauformen niedriger.

Die Wandler mit strukturierten Elektroden verdrängen weniger Volumen als der Wandler mit strukturierter Keramik. Der erzielbare Maximaldruck ist auf Grund der höheren Steifigkeit größer. Aus demselben Grund ist auch die Eigenfrequenz größer. Dies spielt besonders bei Einzeltropfenerzeugern eine wichtige Rolle. Diese werden grundsätzlich unter der Eigenfrequenz betrieben. Wird ein Vergleich anhand des Kennwertes Eigenfrequenz mal

verdrängtes Volumen durchgeführt, können von Standardwandlern und von Wandlern strukturierten Elektroden die gleichen Kennwerte erreicht werden. Der Vorteil der Wandler mit strukturierten Elektroden liegt hier in der größeren Druckerzeugung.

Wandler typ	Überdeckung [%]	Verformung [μm]	Maximaldruck [Bar]	Eigenfrequenz [kHz]	Volumenverdrängung [nl]	Grundfläche [mm^2]
Standardwandler rund	0,85	2,95	0,637	16,8	77	78,5
Standardwandler quadratisch	0,80	2,97	0,463	15,2	99	100
Standardwandler länglich	0,85	3,83	0,219	9,6	574	300
Wandler mit Hilfselektrode länglich	0,5	2,17	0,303	14,4	325	300
Kombinierter Wandler länglich	0,5	2,39	0,324	14,4	358	300

Tabelle 6: Vergleich der Wandlertypen anhand der Referenzgeometrie mit Hilfe der Simulation. Die jeweiligen Überdeckungen werden für die maximale Verformung ausgelegt.

4.7 Experimente an Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden

4.7.1 Biegemembranwandler mit Hilfselektrode

Der Wandler mit vollständiger Keramikabdeckung und einer Hilfselektrode im Außenbereich, der zur Untersuchung der strukturierten Elektroden und den Eigenschaften der passiven Elektrode eingesetzt wird, weist den in Abb. 74 dargestellten Aufbau auf. Die Bodenelektrode kann *optional* für bestimmte Untersuchungen ebenfalls kontaktiert werden. Dabei kommt die in Abschnitt 3.6 genannte Technik zum Einsatz. Die Elektroden werden, um die gleiche Feldstärke in beiden Bereichen zu erzielen, bei 70% des Durchmessers getrennt. Die Untersuchungen bezüglich der Dynamik können auf Grund der vollflächigen Keramik direkt auf den in Abschnitt 4.7.3 aufgebauten, kombinierten Wandler übertragen werden. Beide Strukturen weisen die gleiche Plattensteifigkeit auf. Der fertigungstechnische Aufbau ist dem Anhang D zu entnehmen.

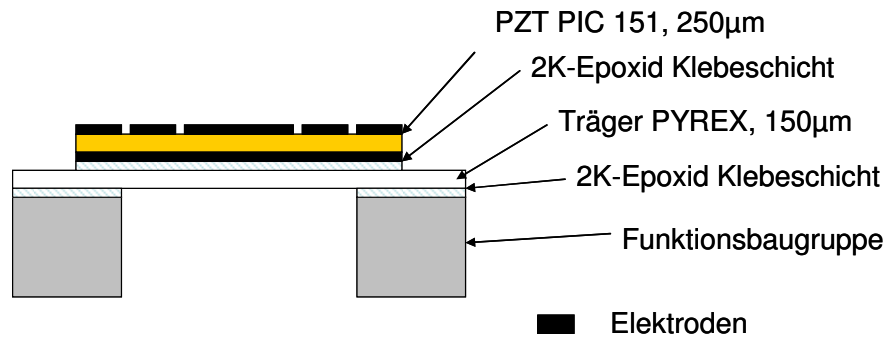


Abb. 74: Aufbau des Labormusters mit Hilfeelektroden.

• Statische Kennwerte

Die Ansteuerung mit einem Sinussignal von 200 V Gesamtamplitude bringt eine maximale Verformung von ca. 1,825 μm und damit 58% des Standardwandlers gleicher Baugröße (siehe Abb. 75). Der Vergleich basiert auf der Einbringung der gleichen Feldstärken in das Material. Der Vergleichswert der Simulation liegt bei 1,54 μm . Wieder zeigt sich bei einer Berücksichtigung der Korrekturwerte eine hohe Übereinstimmung mit dem numerischen Modell.

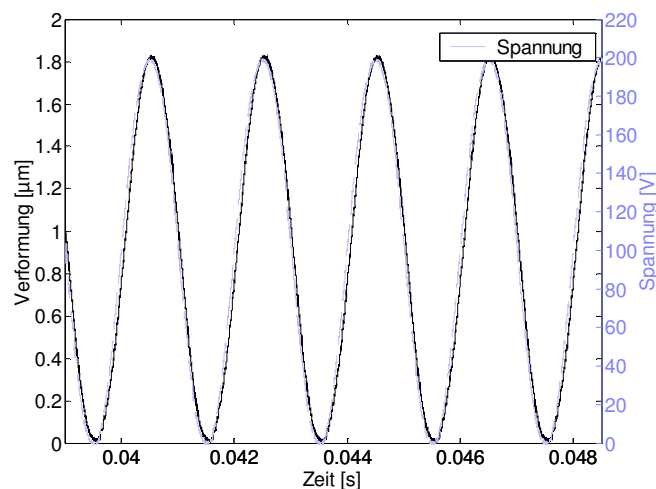


Abb. 75: Messung: Verformungsmessungen am Wandler mit Hilfeelektrode. Antwort auf ein sinusförmiges Signal mit 100 V Amplitude pro Wandlerteil.

Für den Aktor mit Hilfeelektrode wird ebenfalls eine Biegelinie aufgezeichnet. Der unterschiedliche Steifigkeitsverlauf im Vergleich zum Standardwandler lässt auf eine veränderte Biegelinie schließen. Abb. 76 zeigt die Verformungsverläufe bei unterschiedlichen Spannungen. Die Wendepunkte der Krümmung sind gegenüber dem Standardwandler mit 75% Überdeckung leicht in Richtung Zentrum der Struktur verschoben.

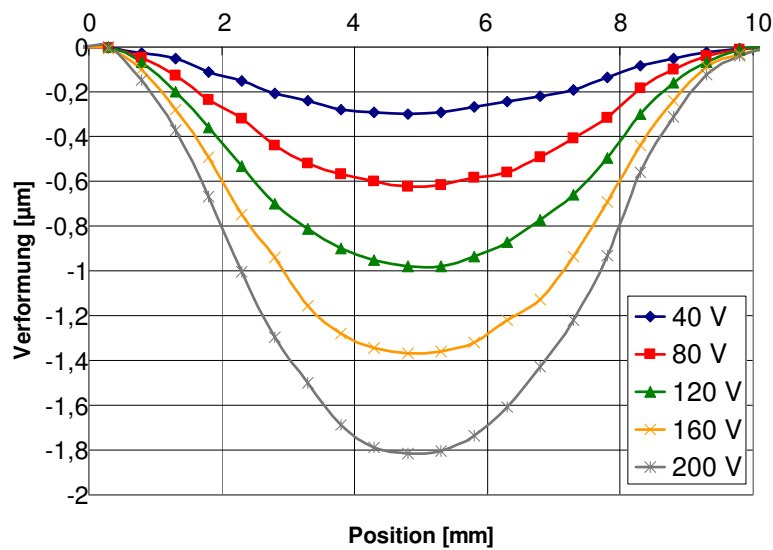


Abb. 76: Messung: Verformungsprofile des Wandlers mit Hilfselektrode bei unterschiedlichen Ansteuerspannungen.

• Dynamisches Verhalten

Für die Dämpfung kann hier ein mittleres Lehr'sches Dämpfungsmaß von 0,0075 angegeben werden. Das System wird aber bei hohen Amplituden schwächer als der Standardwandler gedämpft. Die Eigenfrequenz beträgt für diesen Aufbau ca. 23,5 kHz (151% des Standardwandlers).

Der Wandler mit Hilfselektrode ohne kontaktierte Bodenelektrode basiert auf einem Doppelkondensatorprinzip. Hier ist zusätzlich die Spannung, die an der Bodenelektrode anliegt, interessant. Sind die Flächen wie im geschilderten Aufbau gleich dimensioniert, muss der Kondensator wie ein statischer Spannungsteiler mit Teilungsverhältnis 1:1 wirken.

Zur Erfassung dieses Effektes wird zusätzlich ein Aufbau untersucht, bei dem die Bodenelektrode für eine Messung kontaktiert ist. Die passive Membran besteht hier aus Gründen des vereinfachten Aufbaus aus Kupfer. Bei sinusförmiger Anregung zeigt der Messschrieb ebenfalls einen sinusförmigen Verlauf. Die Amplitude erreicht den Wert $U_{an}/2$ und es bestätigt sich somit die Wirksamkeit der Dimensionierung. Eine Drift des Potentials an der nicht mit der Spannungsquelle verbundenen Elektrode kann nicht festgestellt werden.

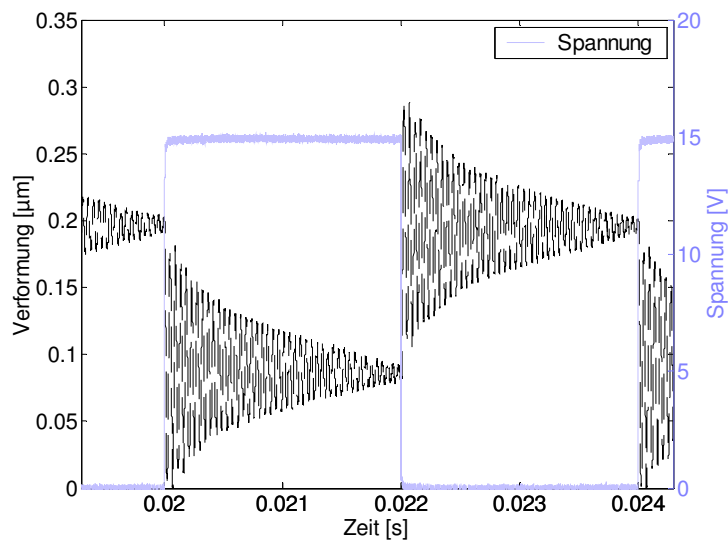


Abb. 77: Messung: Verformung des Wandlers mit Hilfelektrode bei einer pulsformigen Anregung (Sprungantwort) und dazugehöriges Ansteuersignal.

• Aktor- Sensor Eigenschaften

Eine Besonderheit zeigt die Messung der Spannung an der Bodenelektrode bei einer sprungförmigen Anregung. In diesem Messsignal sind die Oberwellen zu erkennen, die durch die sprungförmige Anregung entstehen. Die Zusatzelektrode wirkt wie ein Sensor, da ihr keine Spannungen aufgeprägt werden, sondern der Spannungsverlauf durch die von der Verformung erzeugten Ladungen überlagert wird. Eine Messung des Verlaufs der Betriebsspannung würde eine sehr viel geringere Schwankung zeigen. Abb. 78 zeigt einen Messschrieb bei einer Ansteuerung mit 4,5 V, 500 Hz und einem Tastverhältnis von 20%. Verglichen werden die Spannung an der passiven Elektrode und eine Messung der Verformung mit dem Laservibrometer. Die Übereinstimmung der Signale in den Oberwellen ist deutlich zu erkennen. Die Höhe des Sprungs ist allerdings im Spannungssignal wesentlich größer, da hier zusätzlich die äußere rechteckförmige Spannung wirkt. Dieses Verfahren eignet sich, um die Eigenfrequenzen der Membranaktoren im Einsatz zu ermitteln. Beispielsweise kann der Druckverlauf in einem Druckkopf durch die Messung der Spannung an der passiven Elektrode gut nachvollzogen werden (siehe hierzu auch Kap. 5).

Durch die Messungen an der passiven Elektrode fließen nach dem Anlegen einer Spannung ständig Ladungen ab. Dieser Umstand erklärt die Verschiebung der Messung in Richtung negativer Spannungen. Es muss beachtet werden, dass dieser Spannungsabfall nicht zu stark ausfällt, da es sonst zu einer Depolarisierung der Keramik durch die Messung kommen kann.

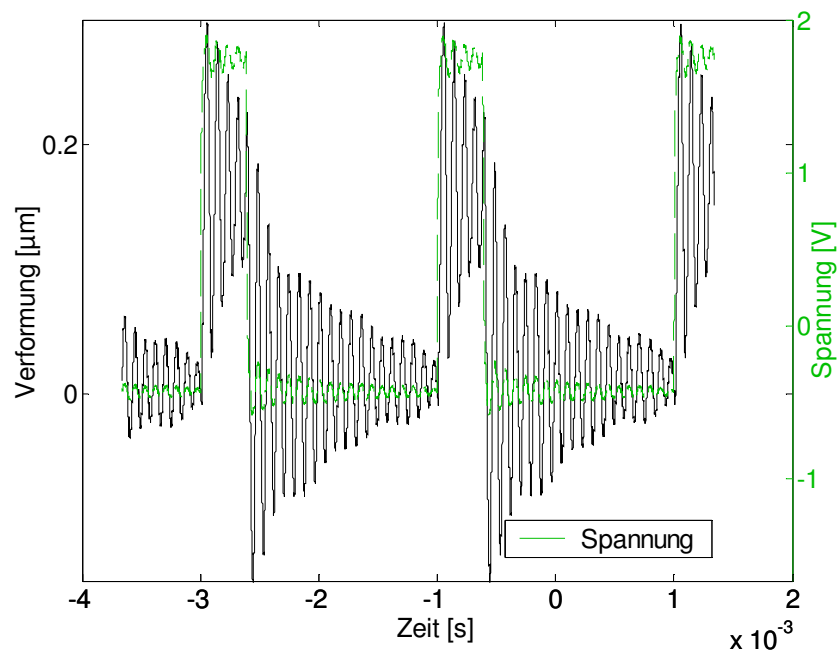


Abb. 78: Messung: Spannungsverlauf an der passiven Elektrode und Verlauf der Verformung (gemessen mit dem Laservibrometer) bei einer pulsformigen Anregung.

Da das Signal durch die Ansteuerspannung überlagert wird, ist es bei einer solchen Messung schwierig, die durch den direkten Piezoeffekt erzeugte Spannung und damit die Aktuation zu isolieren. Sollen genauere Aussagen über die Verformung gemacht werden, kann mit Hilfe der Elektrodenstrukturierung ein separater Sensor aufgebaut werden. Dieser besitzt im Prinzip den gleichen Aufbau wie der Aktor. Für die Messung der Verformung wird die Struktur aber in zwei Teilbereiche getrennt. Die Hilfselektrode wird im Sensorbereich über die gesamte Verformungsstruktur gezogen um die starken elektrischen Einkopplungen der Ansteuerspannung des Aktors abzuschirmen. Abb. 79(a) zeigt ein Labormuster, auf dem diese Funktionsstruktur realisiert ist. Zudem ist ein Vergleich einer Laservibrometermessung und der Sensorspannung zu sehen (b).

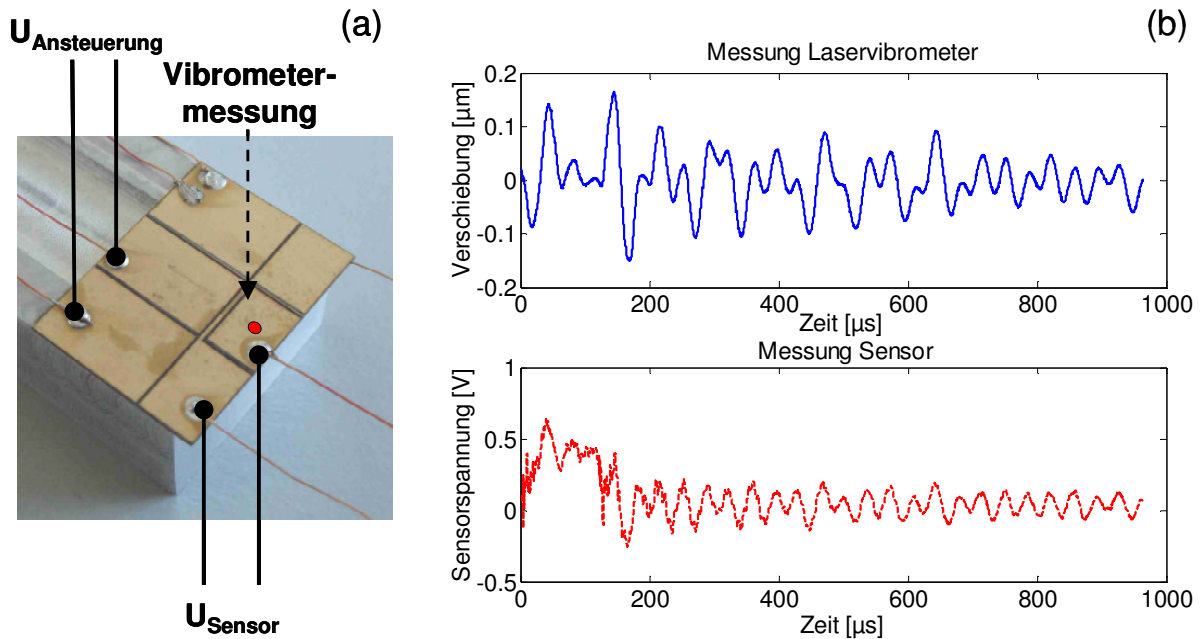


Abb. 79: Brückenwandler mit Sensorareal (a) und Vergleich der Messung mit dem Laservibrometer und dem Sensorsignal (b).

Die Messung zeigt qualitativ die gleichen Schwingungen. Es ergeben sich allerdings lokale Abweichungen. Diese können dadurch verursacht werden, dass das Laservibrometer die Bewegung eines Punktes mit einem Durchmesser von ca. 0,5 mm wiedergibt. Der Piezosensor zeigt eine integrierte Messung der Aktuation über dem gesamten Sensorbereich. Die Verformung wird nicht vollständig bis zum Rand der Struktur auf den Sensor übertragen. Zudem ergibt sich durch die Verformung quer zur Hauptrichtung des Brückenwandlers eine Schwächung der Aktuation im Randbereich, in dem der Sensor aufgebracht ist. Dadurch wird das Sensorsignal, bezogen auf die Ansteuerspannung, stark geschwächt. Die unterschiedliche Verformung über dem Sensorareal bedingt ein in seiner Form gegenüber dem Vibrometer verändertes Signal. Das Sensorsignal zeigt zudem ein Plateau in der Form des rechteckigen Ansteuerpulses. Die Abschirmung gegen die Aktorspannung ist nicht vollständig. Der Spannungshub ist aber gegenüber der Sensierung über die Bodenelektrode (Abb. 78) sehr viel geringer.

4.7.2 Längseffektwandler

Die Effizienz des Einsatzes von Interdigitalstrukturen zur Nutzung des Piezolängseffektes wird anhand eines Brückenwandlers untersucht. Kreisförmige Wandler eignen sich für diese Untersuchung wenig, da der Vergleich mit Quereffektwandlern durch die radiale Polarisation erschwert wird. Ziel der Messung am Labormuster ist ein Vergleichswert für die Piezoadmissionskonstante. Anhand dieses Wertes kann entschieden werden, ob Interdigitalstrukturen bei den hier angewandten Fertigungsverfahren und Piezomaterialdicken sinnvoll realisiert werden können.

Die Dimensionierung des Labormusters richtet sich nach den zur Verfügung stehenden Spannungsquellen. Die Hochspannungsquelle Typ Heinziger 1200 liefert eine Spannung von

1200 V. Die Polarisation findet Abschnitt D.II zu Folge bei 3,5 MV/m statt. Der Elektrodenabstand dafür beträgt $400\ \mu\text{m}$. Das gelaserte Labormuster weist bei der Vermessung einen Elektrodenabstand von $420\ \mu\text{m}$ auf. Die Breite der Elektroden sollte gering sein, um unwirksame Bereiche im Material klein zu halten. Es wird eine Breite von $80\ \mu\text{m}$ gewählt, um eine sichere und einfache Bearbeitung mit dem Laser zu ermöglichen.

Das PZT-Material wird auf $170\ \mu\text{m}$ geschliffen, um günstigere Verhältnisse für die Interdigitalstruktur zu schaffen, wobei auch die untere Elektrode entfernt wird. Abb. 80 fasst alle weiteren Geometrieparameter zusammen.

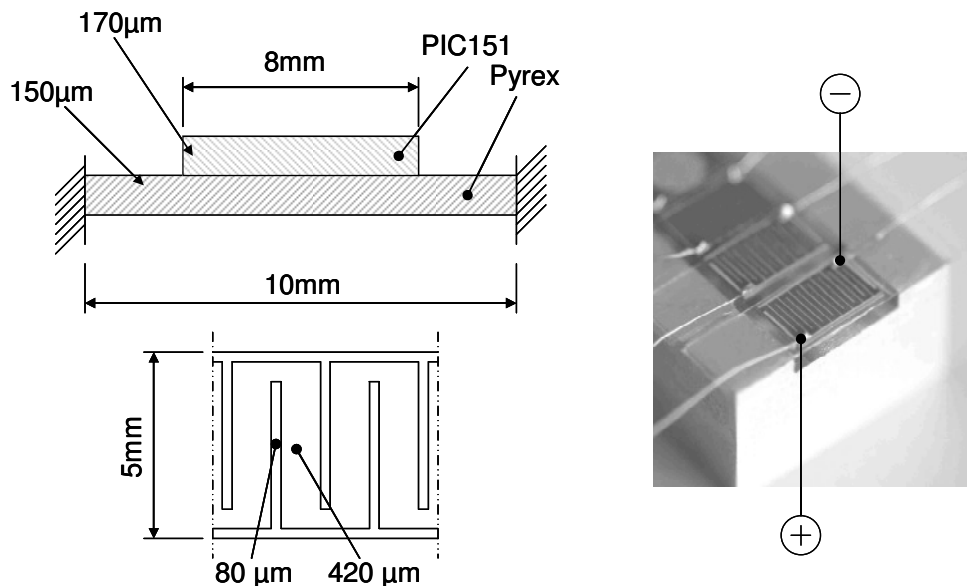


Abb. 80: Geometrieparameter des Brückenwandler mit Interdigitalelektroden.

Die Probe wird mit $120\ \text{V}$ angesteuert. Im Material ergibt sich bei der gegebenen Geometrie eine Feldstärke von $0,28\ \text{MV/m}$. Die Vermessung der Probe im Zentrum der Verformung von $1,52\ \mu\text{m}$. Dieser Wert kann mit einem Quereffektbrückenwandler verglichen werden. Dabei wird vereinfachend die Annahme getroffen, dass der Quereffektwandler von einem homogenen Feld mit $0,28\ \text{MV/m}$ angesteuert wird. Soll der Wandler bei ansonsten gleicher Geometrie ebenso eine Verformung von $1,52\ \mu\text{m}$ erzeugen, muss, der Rechnung in Kap 3.3.3 zu Folge, eine d_{31} -Piezokonstante von $166,8\ \text{pm/V}$ zu Grunde gelegt werden. Bezogen auf den d_{33} -Wert nach Herstellerangabe $423\ \text{pm/V}$ werden durch die Interdigitalstruktur nur 39% erreicht. Mit dünnerem Piezomaterial und einer angepassten Elektrodenstruktur kann dieser Wert noch gesteigert werden. Zudem sind auf dem Labormuster Strukturen zur Leiterbahnführung und Lötstellen vorhanden. Dadurch wird der Wandler gegenüber dem Quereffektwandler geschwächt. Abb. 81 zeigt Teilbereiche, die die Interdigitalstruktur stören.

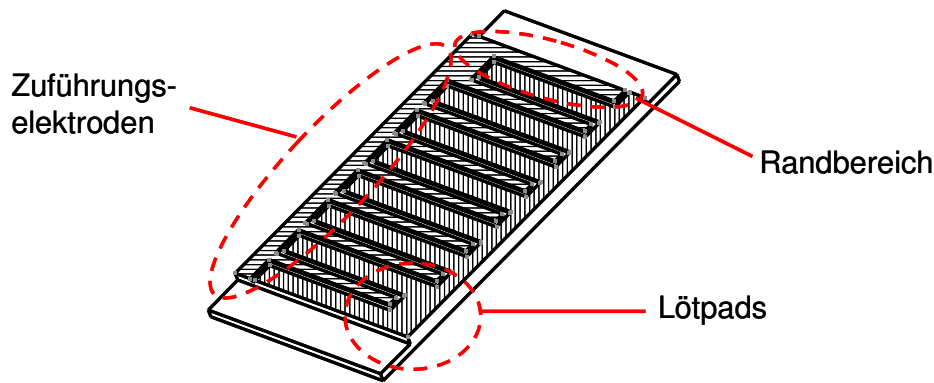


Abb. 81: Störbereiche beim Brückenwandler mit Interdigitalelektroden.

Der Vergleich mit dem Quereffekt des Materials zeigt, dass die Struktur 77,9% des d_{31} -Wertes nach Herstellerangabe erreicht. Da die Verformung einer Membran bei einem d_{31} -Wandler mit Hilfelektrode nach Kap. 4.2.2 eine Ansteuerung gegen die Polarisationsrichtung erfordert, ist es sinnvoll, diesen Wert zu einem Vergleich heranzuziehen. Da bei der Ansteuerung gegen die Polarisationsrichtung, wie in Abschnitt 0 gezeigt wurde, keine Steigerung der Piezokonstanten bei erhöhter Feldstärke möglich ist und zudem nur mit $1/3$ der Koerzitivfeldstärke angesteuert werden darf, ist die Interdigitalstruktur dem Quereffektwandler im Randbereich überlegen.

4.7.3 Kombiniertes Wandler

Der optimale Biegemembranwandler mit strukturierten Elektroden besitzt, wie oben beschrieben, im Randbereich eine Interdigitalstruktur und im Kernbereich wird ein Quereffektwandler eingesetzt. Um den Nutzen dieser Überlegungen zu überprüfen, wird ein Labormuster mit einer solchen Struktur messtechnisch untersucht.

Basis ist eine $250\ \mu\text{m}$ starke Platte aus der Piezokeramik und ein Träger aus $150\ \mu\text{m}$ starkem Pyrex. Die lichte Weite der Struktur beträgt $10\ \text{mm}$. Die Elektrodenstruktur wird gemäß Abschnitt 4.7.2 ausgelegt. Bei einer Überdeckung von ca. 70% ergeben sich drei $420\ \mu\text{m}$ breite Spalten in denen sich der Piezolängseffekt ausbilden kann. Zusätzlich wird auf der Unterseite eine Gegenelektrode mit $7\ \text{mm}$ Durchmesser für den Quereffektwandler mit Leiterbahnführung realisiert. Im Außenbereich der Struktur ist ein Löt pad für die elektrische Kontaktierung realisiert. Der Probenhalter weist eine Aussparung auf, aus der die Lötverbindung und das Anschlusskabel herausgeführt werden. Ein Schema der Anordnung und eine Photographie des Aufbaus zeigt Abb. 82.

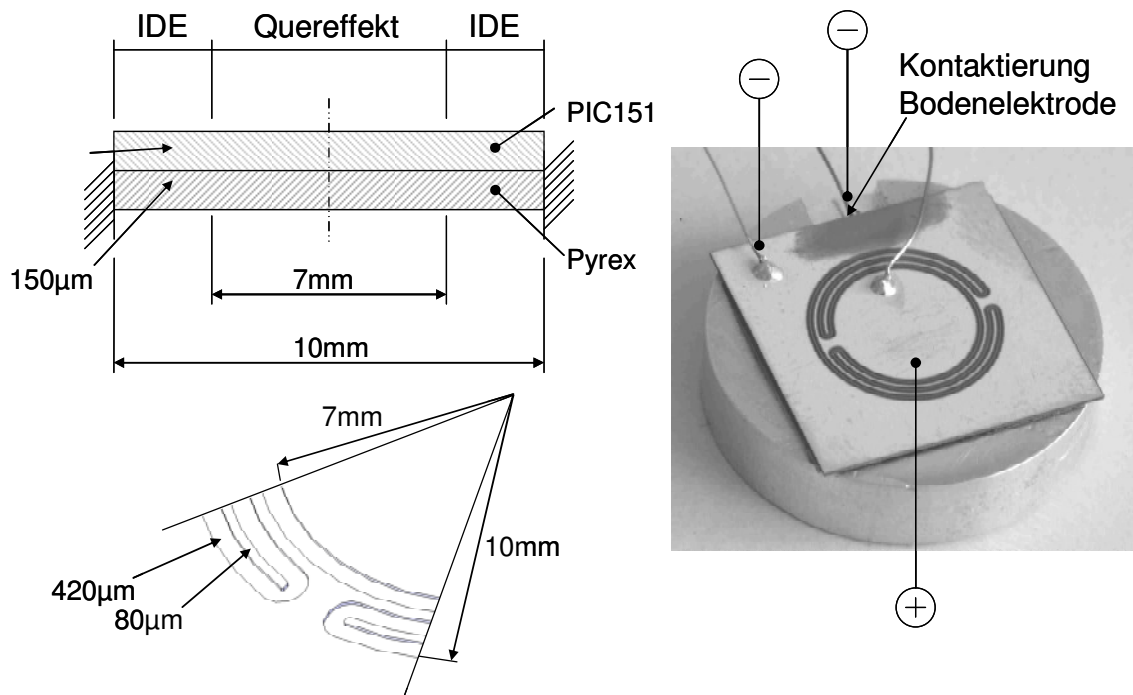


Abb. 82: Dimensionen beim Labormuster des kombinierten Wandlers.

Die Polarisierung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird der Quereffektwandler mit der Spannungsquelle verbunden. Im Anschluss wird die Interdigitalstruktur polarisiert.

Bedingt durch die, gegenüber Abschnitt 4.7.2 um 47% stärkere Piezoplatte, wird die Wirksamkeit der Interdigitalstruktur geschwächt. Da auf Grund einer einfachen Fertigung die herstellerseitig aufbrachten Elektroden genutzt werden sollen und auf der Unterseite der Elektrodenstrukturen notwendig sind, kann die Keramik nicht durch einen Schleifvorgang in ihrer Dicke verändert werden. Eine solche Keramik mit Interdigitalstruktur wird deshalb nach Abschnitt 4.7.2 als Brückenwandler aufgebaut und vermessen. Es ergibt sich eine angepasste Ladungskonstante von $46,8 \text{ pm/V}$. Im Randbereich der Struktur ist dieser Wert maßgeblich für Berechnungen.

Eine Verformungsmessung am Aktor zeigt bei 60 V Ansteuerspannung eine maximale Auslenkung der Membran von $0,507 \text{ µm}$. Wird die Hilfselektrode nicht angesteuert, ergeben sich $0,441 \text{ µm}$. Für diese Messung wird die Randlelektrode auf das Potential der Elektrode im Kernbereich gelegt, um eine Aktuation im Randbereich durch parasitäre Kondensatoren auszuschließen. Die Hilfselektrode bewirkt eine Steigerung der Aktuation um $14,9\%$. Dies kann auf die schwache Wirkung der Interdigitalstruktur auf Grund der Elektrodenkonfiguration zurückgeführt werden.

Für einen Vergleich wird eine Simulation herangezogen. Bei dieser wird ein Kernbereich definiert, in dem der Quereffekt wirksam ist. Hier werden die normalen Herstellerangaben implementiert. Im Randbereich wird eine radial polarisierte Keramik angenommen. Zusätzlich wird in Polarisationsrichtung der Wert für die Interdigitalstruktur korrigiert. In der tangentialen Richtung kann näherungsweise wieder die Herstellerangabe für den Quereffekt

benutzt werden. Die Simulation zeigt eine maximale Verformung in der Mitte der Struktur von $0,485\ \mu\text{m}$ unter Einsatz der Hilfselektrode. Ohne diese reduziert sich die Verformung auf $0,431\ \mu\text{m}$. Hier ist wie bei der Messung der Effekt der Elektrode mit 11% gering. Bei den gegebenen Feldstärkewerten kommen nicht lineare Effekte noch nicht zu tragen. Deshalb ergibt sich eine hohe Übereinstimmung von Messung und Simulation.

Die Messung zeigt die grundsätzliche Eignung der Interdigitalstruktur im Randbereich. Bei höheren Ansteuerfeldstärken von ca. $1,5\text{MV/m}$ ist die Struktur trotz der fehlenden Optimierung einem Quereffektwandler im Randbereich überlegen. Eine wesentliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der Anordnung kann durch die Verwendung von dünnerer Keramik und einer optimierten Elektrodenstruktur erreicht werden. Noch stärker sind die Auswirkungen der Konstruktion bei Strukturen, die auf Grund ihrer Gesamtgröße keine Interdigitalstruktur im Randbereich zur Ansteuerspannungssenkung erfordern. Hier wird nahezu das gesamte theoretische Potenzial des Piezolängseffektes wirksam.

5. Anwendungen

In diesem Abschnitt werden die oben genannten Prinzipien zur Anwendung gebracht. Dabei wird auf zwei wesentliche Anwendungsgebiete von Piezotechnik eingegangen: die Tropfenerzeugung und die Mikrofluidik. Aus beiden Gebieten werden jeweils Funktionsmuster aufgebaut und untersucht, die Piezokeramik mit strukturierten Elektroden aufweisen.

5.1 Tropfenerzeugung mit Piezodruckköpfen

5.1.1 Eindüsenkopf zur Dosierung unterschiedlicher Medien

In vielen Gebieten werden Tropfenerzeuger immer wichtiger, die auf unterschiedliche Fluide anpassbar sind [JON05] [GAN04] [PAT05]. Dies können, beispielsweise im 3D-Druck, aggressive Medien wie Säuren oder Lösungsmittel sein [CAR05] [HAR05]. In der Medizintechnik spielen oft Flüssigkeiten, die mit Partikeln versetzt sind, eine große Rolle [DER05]. Piezosysteme eignen sich für eine solche Aufgabe besonders. Da bei Membransystemen die Trägermaterialien frei wählbar sind, können chemisch sehr stabile Systeme aufgebaut werden. Im Gegensatz zum so genannten thermischen Tropfenerzeuger, bei dem der Tropfen durch eine Dampfblase aus der Düse getrieben wird, stellt das Piezoprinzip keine besonderen Anforderungen an das Fluid. Zur Einstellung der Eigenschaften des Tropfenerzeugungssystems sind Prototypen sinnvoll. Es wird ein System mit strukturierten Elektroden vorgestellt, das mit sehr geringem Zeitaufwand erstellt werden kann. Das Funktionsprinzip kann Abb. 7 in Kapitel 2.1.3 entnommen werden (siehe auch [YAN97]).

Der gesamte Druckkopf kann mit Hilfe von Laserablation gefertigt werden [SCHE06]. Eine gelaserte Fluidstrukturplatte aus Silizium, eine passive Membran aus Pyrexglas und die Piezoplatte mit strukturierten Elektroden bilden die für die Tropfenerzeugung notwendige Struktur. Die Fertigungsdauer vom CAD-Entwurf bis zum einsatzfähigen System reduziert sich durch die hier vorgestellte Anordnung auf wenige Stunden. Dadurch werden direkte Parameterstudien bzgl. der Konstruktionsparameter möglich. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Dimensionierung und Fertigung:

Die gesamte Fluidstruktur ist in ein Siliziumplättchen mit dem Laser eingearbeitet. Abb. 83 zeigt ein Schema. Vorne an der Struktur ist ein Kanal eingebracht, der die Düse bildet. Aus fertigungstechnischen Gründen ist dieser Kanal nicht bis zur Plattenkante durchgezogen. Die Düsenöffnung selbst wird erst in einem späteren Fertigungsschritt erzeugt. Die zentrale Struktur ist die Kammer, in der die Druckerzeugung stattfindet. Am hinteren Ende dieser Kammer befindet sich ein weiterer Kanal, der die Drossel des Tropfenerzeugers bildet. Dieser mündet in einer Bohrung für die Flüssigkeitszuführung von unten.

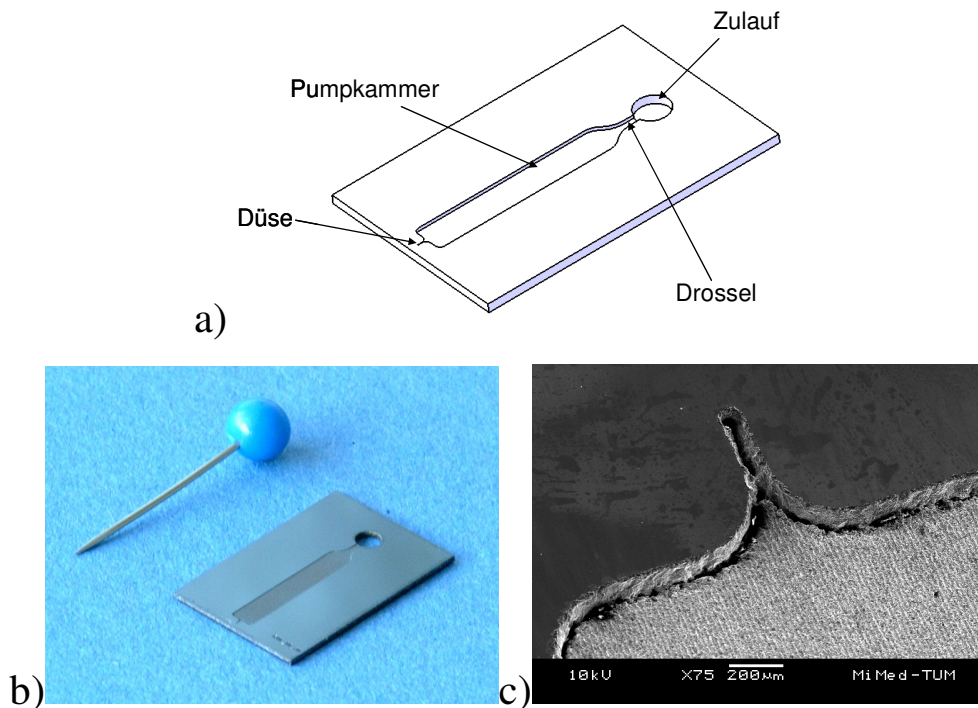


Abb. 83: Pumpkammerplatte des Eindüsendruckkopfes. Schema (a), fotografierte Siliziumplatte (b) und REM-Aufnahme des Düsenbereichs (c).

Die Dimensionierung der Funktionsstrukturen erfolgt anhand von Anhaltswerten aus der Literatur. Durch Parameterstudien können dann Verbesserungen vorgenommen werden und das Tropfenerzeugungssystem an die jeweils gestellte Aufgabe angepasst werden. Eine genaue Beschreibung eines solchen Membransystems kann bei Berchthold [BER91] gefunden werden. Ein Kompaktmodell, das für diese Aufgabe anpassbar ist, beschreibt Scheicher [SCHEI04].

Der Düsenkanalquerschnitt richtet sich ungefähr nach den zu erzeugenden Tropfendimensionen. Der Durchmesser des entstehenden Tropfens entspricht, bei Standardansteuerung, ungefähr dem Düsendurchmesser. Für hohe Grenzfrequenzen ist ein kleiner Düsendurchmesser vorzusehen. Damit reduziert sich die schwingende Masse im Düsenkanal und die Oberflächenspannung kommt stärker zu Geltung. Beide Aspekte steigern die Eigenfrequenz des Systems.

Der Düsenkanal wird möglichst kurz gestaltet. Dies senkt die Verluste durch die viskose Reibung und steigert wiederum die Grenzfrequenz. Unterschreitet er aber eine gewisse Länge, zieht der Druckkopf während des Betriebs Luft. Durch die hohe Kompressibilität einer Luftblase in der Kammer wird der Druckaufbau verhindert, und der Druckkopf fällt aus.

Ein weiterer zu dimensionierender Teil ist die Pumpkammer. Hier stehen zwei Aspekte im Vordergrund: der zu erzeugende Tropfen und die gewünschte Grenzfrequenz des Systems. Die Volumenverdrängung, die hier durch den Membranwandler erzeugt wird, ist entscheidend für das erreichbare Tropfenvolumen. Das Verhältnis von Volumenverdrängung zum Tropfenvolumen wird entscheidend durch das Verhältnis der Strömungswiderstände von

Düse und Drossel bestimmt. Dieses Verhältnis kann mit Hilfe von Experimenten bestimmt werden.

Der Aktor in diesem System hat eine Breite von 2mm und eine Länge von 10mm. Auf Grund dieses Verhältnisses ist eine Berechnung nach Kapitel 4.2.2 als Brückenwandler zulässig. Die passive Membran aus Pyrex besitzt eine Dicke von 250 μ m. Die Bewegung wird durch einen 250 μ m starken Aktor aus PZT/AG 1876 erzeugt. Nach Kapitel 4.2.2 ergibt sich somit eine Leerlaufverformung von 38,7 μ m. Damit kann, zufolge der Näherungsrechnung aus Abschnitt. 3.3.3, ein Volumen von 387 pl verdrängt werden.

Nach der Laserbearbeitung der Bauteile erfolgt die Montage. Die Pyrexplatte wird mit der Grundplatte über anodisches Bonden verbunden. Dieser Prozess ist für die Aufgabe, kleine Strukturen zu Kanälen zu verschließen, besonders geeignet, da keine Zusatzstoffe notwendig sind. Die Silizium- und die Pyrexplatte verbinden sich unter Temperatur und einem elektrischen Feld unlösbar miteinander. Der Prozess verläuft zudem weit unter Schmelztemperatur, so dass nur geringe Verformungen im Material auftreten. Beim Bonden besteht keine Gefahr, dass die Kanäle durch Fremdstoffe oder Verformungen zugesetzt werden.

Da die Düse nach dem Bonden durch den Verbund geschützt ist, kann die Piezoplatte aufgeklebt werden, ohne ein Zusetzen der Düse mit Klebstoff zu riskieren.

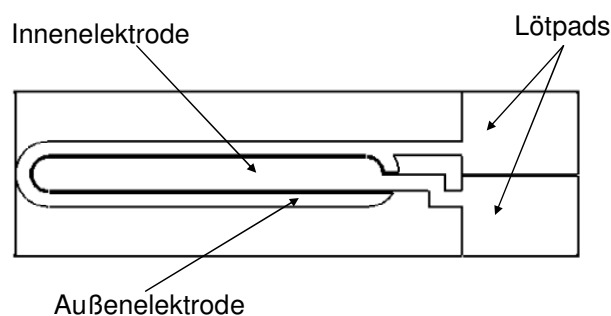


Abb. 84: Piezoplatte mit strukturierten Elektroden. Wandler mit Hilfelektrode und nicht kontaktierter Bodenelektrode.

Die Düse wird erst nach diesem kritischen Schritt freigelegt. Das Öffnen der Düse kann beispielsweise durch händisches Schleifen stattfinden. Die optische Kontrolle ermöglicht ein Einstellen der Länge des Düsenkanals. Alternativ kann der Silizium-Pyrex-Verbund mit einer Wafersäge, einem Trennschleifverfahren, senkrecht zur Düsenrichtung aufgeschnitten werden. Die Wafersäge hinterlässt eine feinst geschliffene Oberfläche, die dann die Düsenplatte bildet. Gegenüber dem händischen Schleifen entstehen durch die geringen Schnittkräfte keine Ausbrüche am Rand der Düse.

Folgende Tabelle fasst die konstruktiven Parameter des Eindüsendruckkopfes zusammen:

Bauteil	Stoff	Abmessungen
Düse	Silizium	50 μm^2 x 50 μm
Drossel	Silizium	70 μm^2 x 250 μm
Pumpkammer	Silizium	70 μm x 2 mm x 10 mm
Pumpkammerplatte	Silizium	525 μm x 12 mm x 18 mm
Passive Membran	Pyrex- Borosilkatglas	250 μm x 12 mm x 18 mm
PZT- Keramik	AG 1867	250 μm x 4 mm x 16 mm
Elektroentrenngraben	PZT- Elektrode	100 μm
Ansteuerspannung		<100 V

Tabelle 7: Konstruktionsparameter beim Eindüsenkopf.

Die Montage dieses Druckkopfes erfolgt auf einer Plattform die einen Flüssigkeitstank, die Zuführung und die Möglichkeiten zur elektrischen Kontaktierung vorsieht. Dazu wird der Kopf mit einem Joch auf eine Silikondichtung gepresst. Im Anschluss werden die Anschlussdrähte auf die vorgesehenen Pads gelötet. Abb. 85 zeigt die einzelnen Bestandteile der Vorrichtung und ein Bild des komplett montierten Aufbaus.

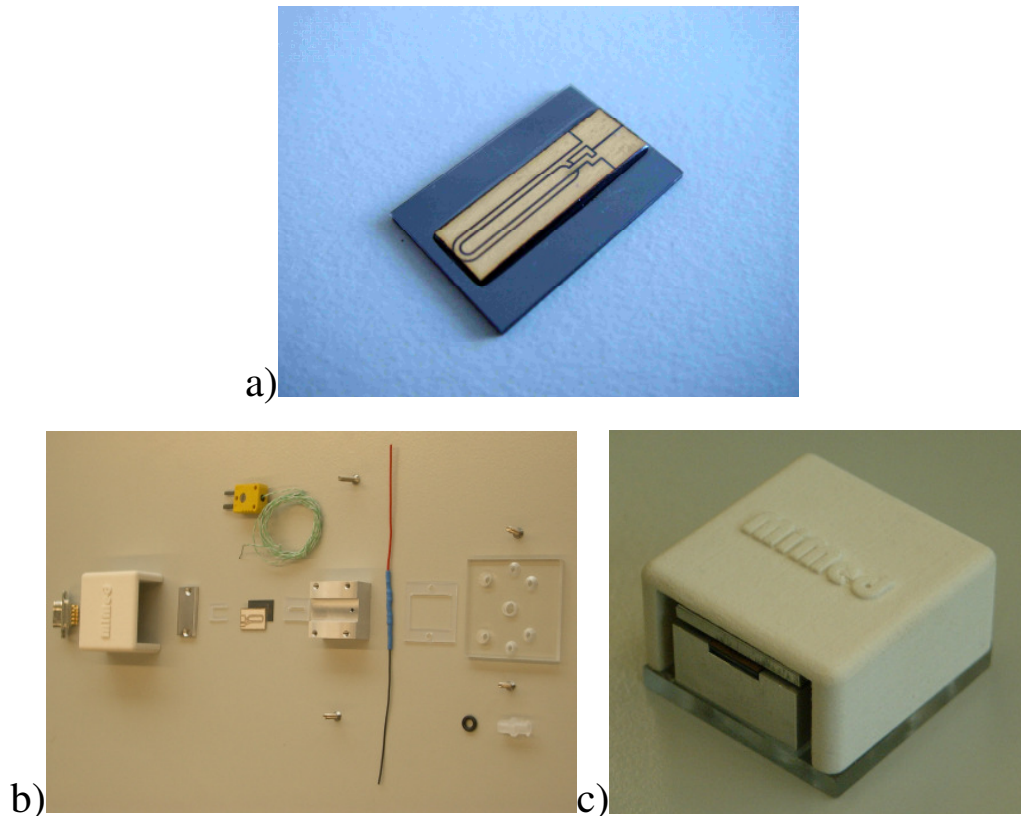


Abb. 85: Montagevorrichtung für den Tropfenerzeuger. Fertiger Druckkopf (a), Einzelteile der Montagevorrichtung (b) und fertig montierter Druckkopf (c).

Die wesentlichen Vorteile der strukturierten Piezoelektroden bei diesem Aufbau sind:

- Schnelle Herstellung der Elektroden mittels Laserablation
- Batchfähigkeit der Piezokeramik
- Einfache Handhabung des Piezobauteils
- Leiterbahnführung auf der Keramik selbst
- Einfache Verbindung über Löt pads
- Hohe Grenzfrequenz durch hohe Steifigkeit
- Große Verformung durch die Hilfselektrode
- Durchgehende Laserfertigung aller Druckkopfbauteile

Messungen am Eindüsenkopf und Parametervariationen:

Der Druckkopf zeigt bei einer Ansteuerspannung von 80 V und 40 μ s Pulsbreite bis 16,8 kHz einen Tropfenausstoß. Über die Frequenz variieren die Tropfenparameter Tropfenvolumen und Tropfengeschwindigkeit stark. Für die Nutzung als Tintendrucker sind diese Werte für

die Performance und die Ausdruckqualität die maßgeblichen Parameter. Abb. 86 zeigt die Messung bei verschiedenen Frequenzen.

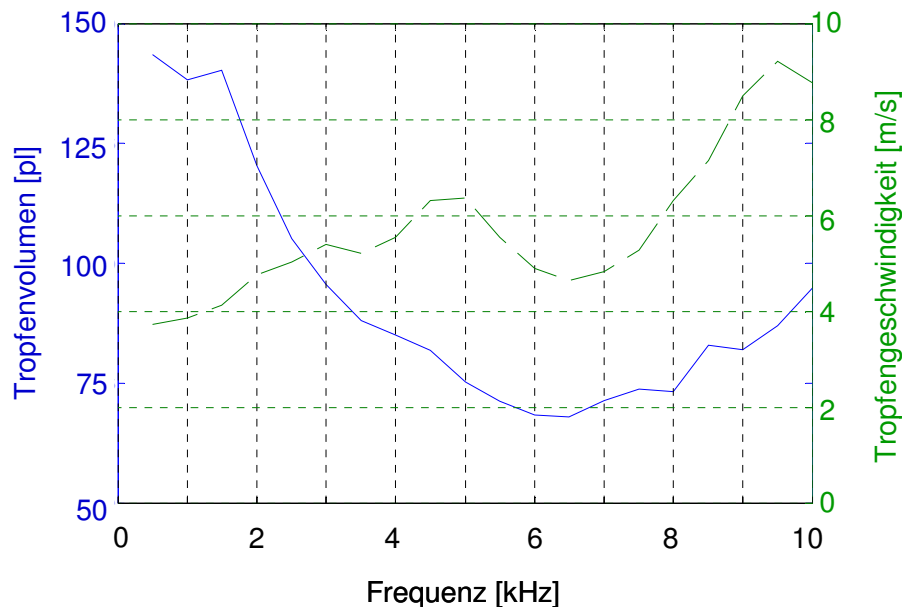


Abb. 86: Messung: Frequenzgang des Eindüsendruckkopfes. Erzeugtes Tropfenvolumen und Tropfengeschwindigkeit bei unterschiedlichen Frequenzen.

Zur Verifikation der Modellrechnungen wird eine Verformungsmessung am Druckkopf im Betrieb vorgenommen. Dazu ist eine Bohrung im Montageträger eingebracht, durch die die Membran mit dem Laservibrometer vermessen werden kann.

Untersucht werden die beiden Zustände befüllter und unbefüllter Druckkopf. Beide Messungen zeigen eine maximale Verformung von ca. 40 nm. Die geringen Membrandurchbiegungen erfordern hierbei die Berücksichtigung des Längseffektes bei der Messung. Dieser liegt mit ca. 72 nm aus der Berechnung in der Größenordnung der Membrandurchbiegung. Dieser Wert muss bei der hier erzeugten Bewegungsrichtung vom Messwert subtrahiert werden. Es ergibt sich damit eine Verformung im Inneren der Pumpkammer von 32 nm. Dieser Wert beträgt 82% des oben berechneten Wertes. Damit beträgt die gesamte Volumenänderung in der Kammer pro Aktuation ca. 320 pl. Bei einer Frequenz von 1 kHz beträgt das Tropfenvolumen 140 pl. Damit werden 43% des verdrängten Volumens durch die Düse als Tropfen ausgestoßen.

Durch die sprungförmige Anregung wird der gesamte Druckkopf in Schwingungen versetzt. Im Signal der Messung des unbefüllten Druckkopfes kann nach dem Plateau durch die Sprunganregung die Eigenfrequenz des Systems abgelesen werden. Sie beträgt ca. 16 kHz.

Die Messung am befüllten Tropfenerzeuger zeigt ein vom leeren System abweichendes Bild. Die Verformung der Membran kann, durch das bezüglich der zu bewegenden Masse und der Dämpfung durch die Flüssigkeit veränderte System, nicht dem Ansteuerimpuls folgen. Die Steifigkeit der Membran ist nicht ausreichend, um die Flüssigkeit stark zu komprimieren. Akustische Schallwellen bestimmen dieses Tropfenerzeugungssystem nicht maßgeblich.

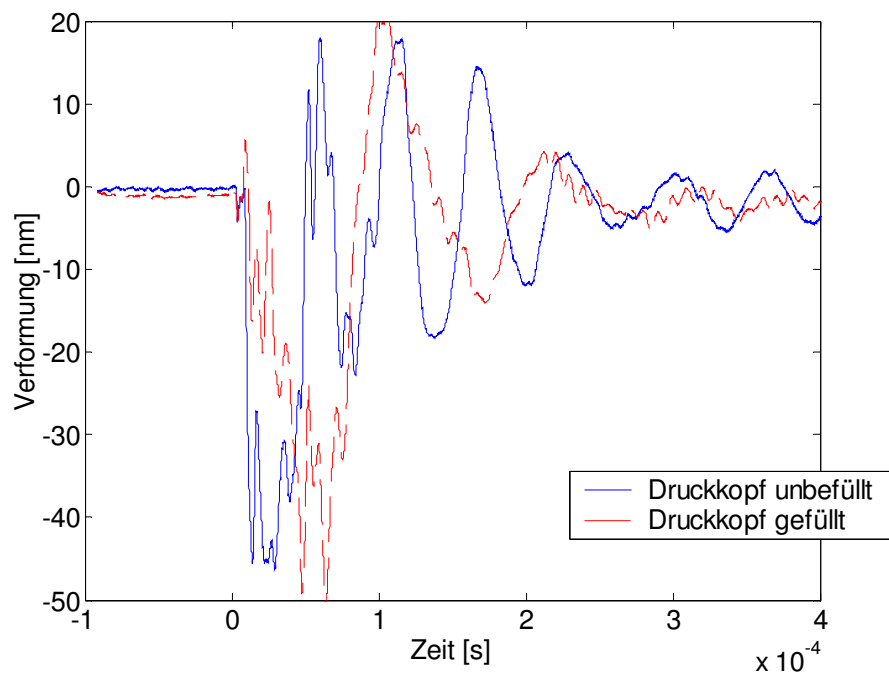


Abb. 87: Messung: Verformung an einem Druckkopf während des Betriebs.

Abb. 88 zeigt das Ergebnis einer Parameterstudie mit dem Eindüsendruckkopf. Die Tropfen wurden mit einem Stroboskopmessplatz aufgezeichnet und vermessen. Dong beschreibt einen solchen Messaufbau [DON06]. Als Parameter wird hier die Düsenfläche variiert. Es werden Düsen mit $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ und $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ untersucht. Als Ergebnis zeigt sich, dass für unterschiedliche Tropfengrößen verschiedene Einflussgrößen des Druckkopfes verändert werden müssen. Hierzu zählt auch der Aktor, der mit den strukturierten Elektroden konstruktiv schnell angepasst werden kann.

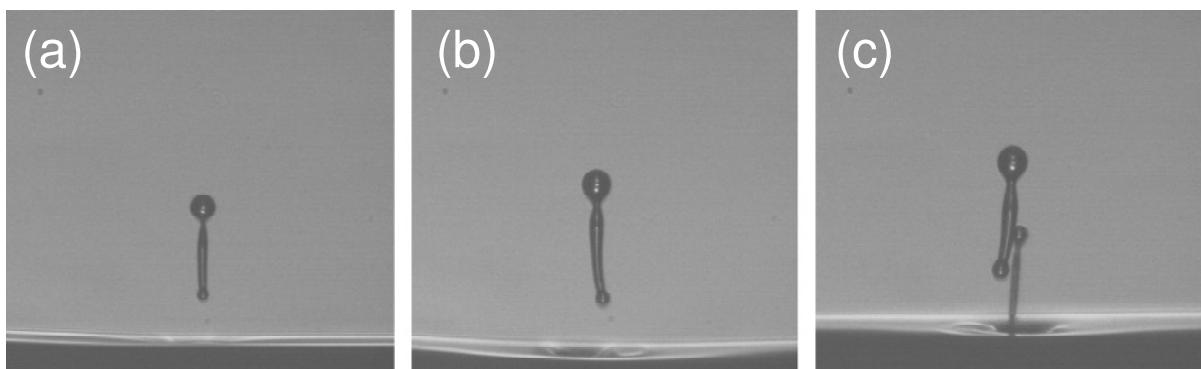


Abb. 88: Stroboskopische Mikroskopaufnahme der Tropfen aus dem Eindüsendruckkopf. Für die Tropfenerzeugung gut angepasste Aktormembran (a), größere Düse (b) und starke Fehlanpassung von Aktor und Düse (c).

Dieses Drucksystem eignet sich für den Einsatz mit chemisch aggressiven Flüssigkeiten. Der Aufbau des Aktors erlaubt es hier nicht leitende Materialien für die passive Membran zu verwenden, da die Bodenelektrode nicht kontaktiert werden muss. Dadurch wird der besonders einfache Silizium-Pyrex-Verbund ermöglicht. Als Membran wird Pyrex in einer

einfach geschnittenen Form verwendet. Es muss nicht aufwändig bearbeitet werden. Die Bearbeitung des Siliziums kann in Standardprozessen durchgeführt werden.

Abb. 89 zeigt zur Funktionsverifikation den Druckkopf beim Einsatz mit flüssigem Wachs. Die Aktorik, hier eine Variante aus der Keramik AG1334, kann bis zu Temperaturen von 100° C störungsfrei betrieben werden.

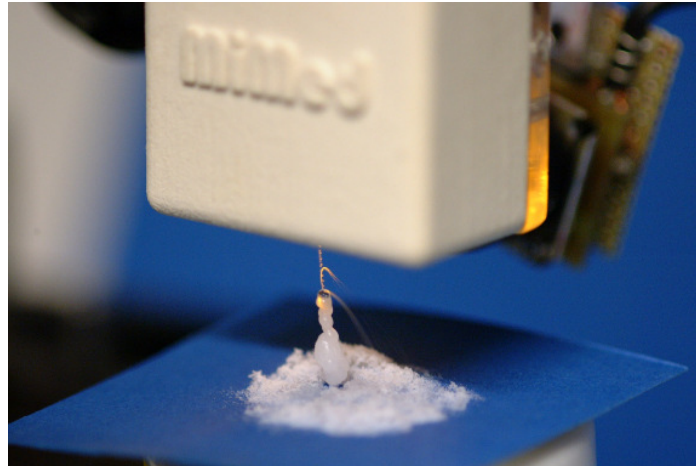


Abb. 89: Piezodruckkopf beim Einsatz mit Wachs.

5.1.2 Mehrdüsenkopf

Zur Überprüfung der Eignung des Prinzips, mit strukturierten Elektroden eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Einzelkanälen zu erzeugen, ohne die Keramik mechanisch zu trennen, wird ein Druckkopf mit drei nebeneinander liegenden Pumpkammern aufgebaut.

Die Konstruktion weist wieder drei Schichten auf: die Pumpkammerplatte mit der verdreifachten Fluidstruktur, eine durchgehende passive Membran aus Pyrex und die Keramikplatte. Die Bestandteile werden wie im Fall des Eindüsenkopfes mit dem Laser gefertigt.

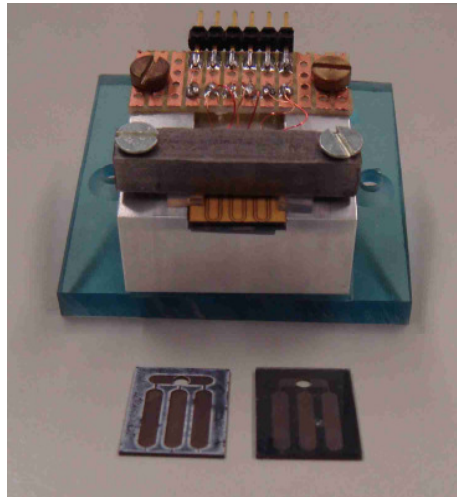


Abb. 90: Mehrdüsenkopf.

Im Versuch zeigt sich, wenn die Kanäle einzeln angesteuert werden, ein Verhalten, das dem oben beschriebenen Eindüsenkopf gleicht. Die Tropfenparameter weichen nur geringfügig von den Werten der einfachen Anordnung ab. Der Aufbau mit einer durchgehenden unteren Elektrode zeigt, bei gleichzeitiger Ansteuerung mehrerer Kanäle, ein stark verändertes Verhalten. Die Tropfen unterschiedlicher Düsen weichen in Geschwindigkeit und Volumen stark ab. Nach einer gewissen Betriebszeit ergibt sich eine instabile Tropfenbildung bis hin zum Ausfall von Kanälen. Dies kann auf die gemeinsame nicht kontaktierte Elektrode zurückgeführt werden. Die Mehrkanalansteuerung bedingt dann ein nicht determiniertes Potenzial. Der Versuch zeigt, dass die Bodenelektrode ebenso strukturiert werden muss, um die einzelnen Kanäle sicher zu trennen. Werden dabei nur unter den jeweiligen Ansteuerelektroden der Oberseite leitfähige Strukturen erzeugt, unterscheidet sich die Mehrkanalstruktur in der Aktorik nicht von der des oben gezeigten Eindüsenkopfs.

Alle Teile können ebenso auf einem kompletten Wafer in einem Batchprozess gefertigt werden. Abb. 91 zeigt die notwendigen Prozessschritte:

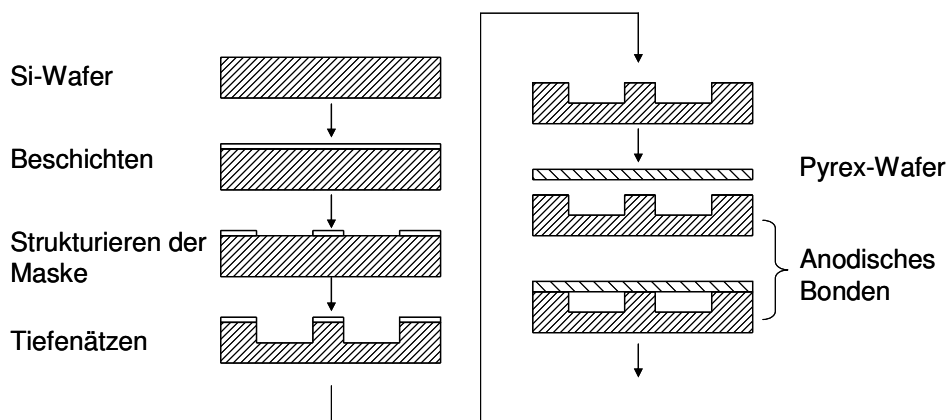


Abb. 91: Mögliche Fertigungsschritte der Basis von Druckköpfen.

Je nach den erforderlichen Kammergrößen und Membranwandlerdicken kann der Prozess mit einer durchgehenden Platte aus PZT oder mit Sol-Gel-Prozessen weitergeführt werden. Die

dann erforderlichen unterschiedlichen Prozessschritte bis zum einsatzfähigen Druckchip zeigt Abb. 92.

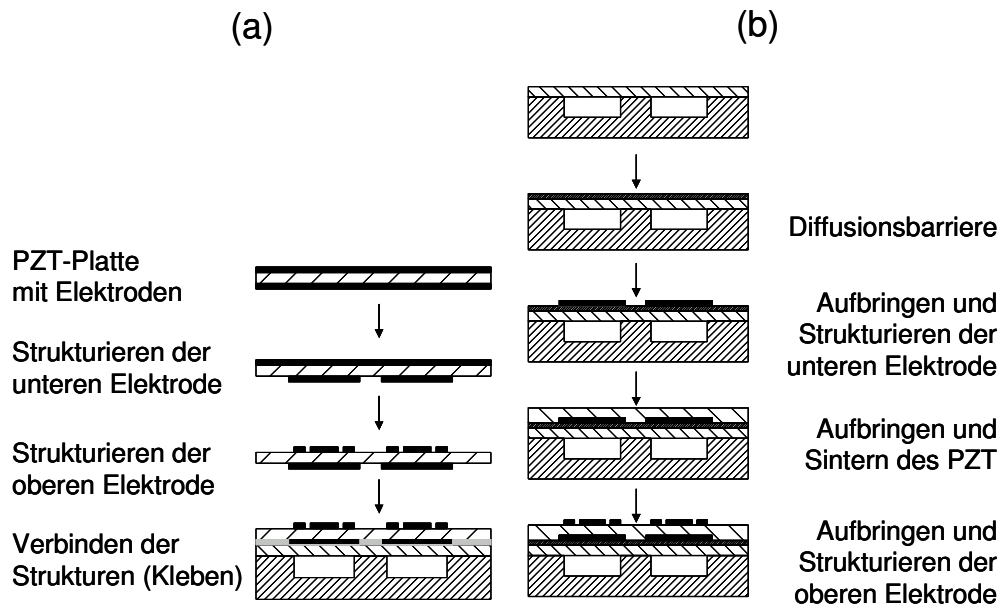


Abb. 92: Prozessschritte zum Aufbau der Aktorik mit strukturierten Elektroden. PZT-plattenförmig (a) und Fertigung mit Sol-Gel-Verfahren (b).

5.2 Piezoelektrisches Ventil

Mikrofluidische Systeme beinhalten eine Vielzahl von Teilfunktionen, die beispielsweise eine schrittweise chemische Synthese ermöglicht. Durch den Einsatz von strukturierten Elektroden können auf solchen Systemen mit einem rationellen Fertigungsaufwand einzelne Aktuationskanäle elektrisch und mechanisch getrennt, Leiterbahnen geführt und sogar Sensorfunktionen integriert werden. Die Kombination mit Silizium-Pyrex-Strukturen ermöglicht wieder eine durchgehende Prozesskette, die von der CAD-Zeichnung zum einsatzfähigen Bauteil in wenigen Stunden führt.

Zur Flusssteuerung werden Ventile benötigt, die die Strömungsbahnen des Fluids in ihrem Querschnitt verändern können und somit unterschiedliche Durchflüsse nach Wunsch des Anwenders erzeugen können. Für diese Aufgabe sind eine Vielzahl von Systemen bekannt [ROB03]. Einfache Systeme weisen dabei nur zwei Grenzstellungen auf: Sie können sperren oder freigeben.

Im Vergleich zu Druckköpfen stellen Ventile besondere Anforderungen an die Aktorik. Hier reicht es nicht eine Verschiebung zu erreichen, sondern durch die Aktorik müssen definierte Lagen im Raum erzielt werden können.

Abb. 93 zeigt den Aufbau eines Mikroventils. Die Funktionsweise entspricht einem klassischen Membranventil. Die Aktorik wird durch einen Piezo mit strukturierten Elektroden gebildet.

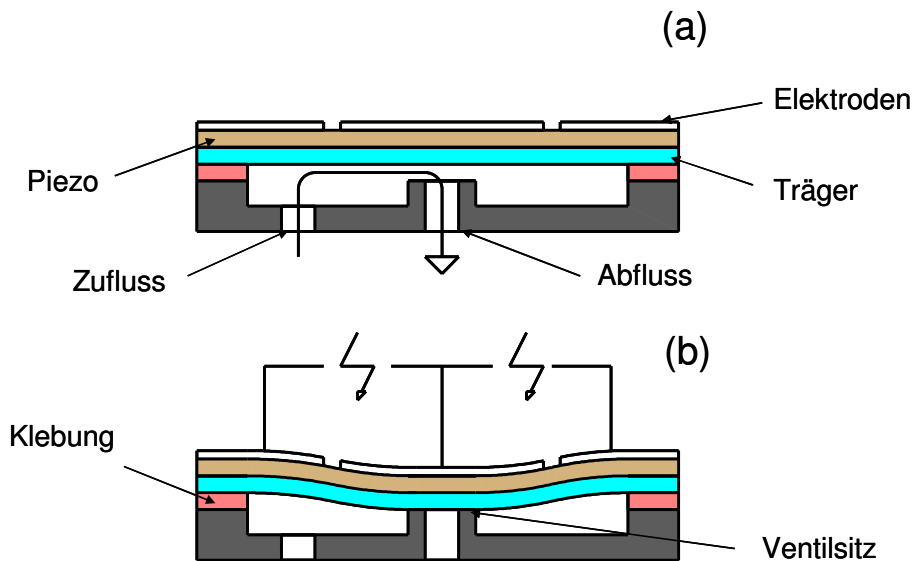


Abb. 93: Schema eines Mikroventils mit Piezoantrieb und strukturierten Elektroden. Ruhestellung (a) und geschlossenes Ventil (b).

Das Mikroventil besteht aus einer Kammer, die den Zu- und Ablauf enthält. In der Mitte der Struktur befindet sich eine Erhöhung, die den Ventilsitz bildet. Er wird über die darüber liegende, bewegliche Piezomembran geöffnet und verschlossen.

Das Funktionsmuster wird für hohe Durchflüsse ausgelegt. Dazu wird, ausgehend von einer $130\ \mu\text{m}$ Piezokeramik auf einer $150\ \mu\text{m}$ Pyrexträger, ein Hub von $20\ \mu\text{m}$ angestrebt. Nach der Berechnung ergibt sich für die zur Verfügung stehende Ansteuerspannung von $100\ \text{V}$ die Hauptabmessung von $15\ \text{mm}$ zwischen den Lagerpunkten.

Die Konzeption des Ventils sieht vor, dass die Membran nach dem Aufbau auf dem Ventilsitz aufliegt. Das Ventil wird durch den Arbeitsdruck geöffnet. Die aktive Schließung erfolgt durch den Piezo.

Die Klebeverbindung zwischen Ventilkörper und Membranaktor stellt eine Unsicherheit in der Fertigung dar, die durch einen möglichst großen Ventilhub ausgeglichen werden muss. Die zweite Schwierigkeit bei der Fertigung ist die thermische Durchbiegung des Aktors. Um die Auswirkungen dieses Effektes möglichst gering zu halten, wird der Piezo mit der Membran bei Raumtemperatur verklebt. Im Einsatz muss diese Temperatur genau eingehalten werden, da sich sonst die Durchflusscharakteristik ändert.

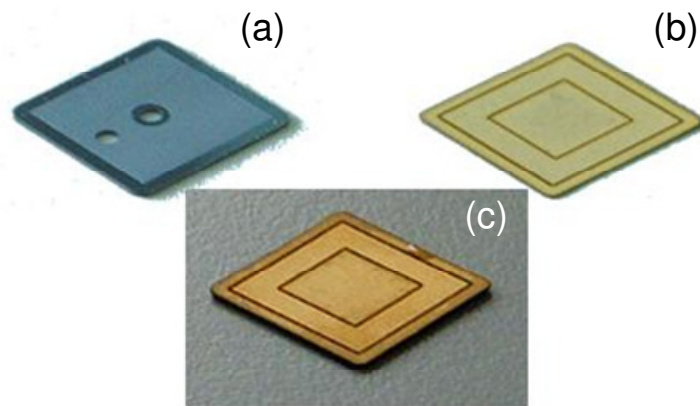


Abb. 94: Piezoelektrisch betriebenes Ventil: Kammerplatte (a), Piezo (b) und Zusammenbau (c).

Für eine Funktionsverifikation wird das Piezovenil vermessen: Die wesentliche Kenngröße ist der Durchfluss bei einem bestimmten Ansteuerdruck, bezogen auf die elektrische Spannung (siehe auch [EMM92]). Ein Testblock ermöglicht es, das Ventil auf eine Silikondichtung zu pressen und damit einen dichten Anschluss an die Versorgungs- und Messeinheiten zu realisieren.

Das Ventil wird mit Druckluft beaufschlagt. Die Ansteuerspannung am Ventil wird zyklisch von einer Maximalspannung von 100 V auf 0 V abgesenkt und im Anschluss wieder gesteigert. Der Bereich wird in 10 V Schritten von einem automatischen Messprogramm durchlaufen. Zwischen den einzelnen Spannungsschritten wird jeweils eine Wartezeit von 20 s eingehalten. Dies ist erforderlich, da als Flussmesser ein Hitzdrahtinstrument mit großer Ansprechdauer eingesetzt wird. Diese Messreihe wird für unterschiedliche Drücke durchgeführt.

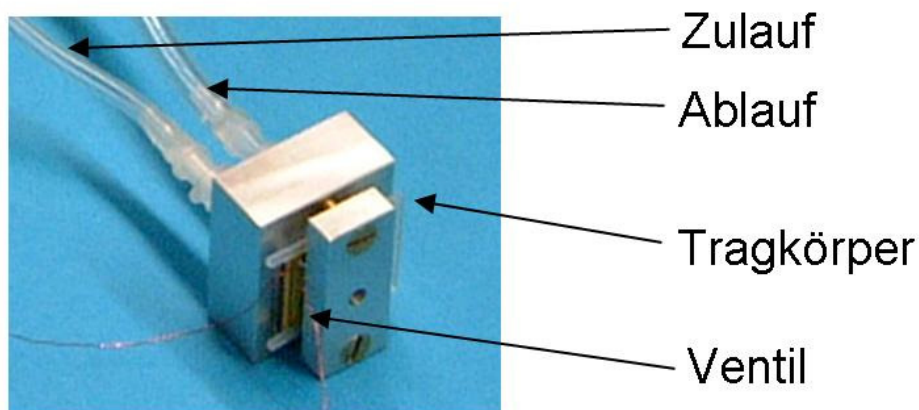


Abb. 95: Teststand mit Piezovenil.

Abb. 96 zeigt, dass das Ventil mit strukturierten Elektroden gegen Drücke bis 0,4 Bar sicher sperren kann. Der maximale Durchfluss liegt bei 1,3 nl/min. Die Ansteuerkurven zeigen dabei extreme Nichtlinearitäten. Zum Einen sind die Durchflüsse nicht proportional zu den

Ansteuerspannungen. Zum anderen ist eine starke Hysterese vorhanden, die auf Grund ihrer Größe nicht durch die Piezohysterese erklärt werden kann. Vielmehr sind hierfür die strömungsmechanischen Vorgänge am Spalt des Ventilsitzes verantwortlich. Betrachtet man die Kurve für 0,4 Bar Druck kann man erkennen, dass das Ventil erst ab einer Spannung von 90 V sperrt. Zwischen 80 und 90 V wird die Membran plötzlich auf das Ventil gezogen. Bei erneutem Reduzieren der Spannung öffnet das Ventil erst unter 40 V. In der Phase der Öffnung zeigen sich die Strömungseffekte noch deutlicher. Das Ventil öffnet bei einer Spannungsänderung von 10 V fast vollständig.

Der Aufbau des Mikroventils zeigt, dass mit Hilfe des Membranwandlers mit strukturierten Elektroden ein funktionsfähiger Prototyp realisiert werden kann. Die gezeigte Aufbautechnik ermöglicht, besonders unter Zuhilfenahme des Prinzips der strukturierten Elektroden, äußerst kurze Entwicklungszyklen. Die schnelle Iteration von Design, Aufbau und Test lässt es zu, ohne aufwändige Simulationen ein Mikroventil für spezielle Anwendungen anzupassen.

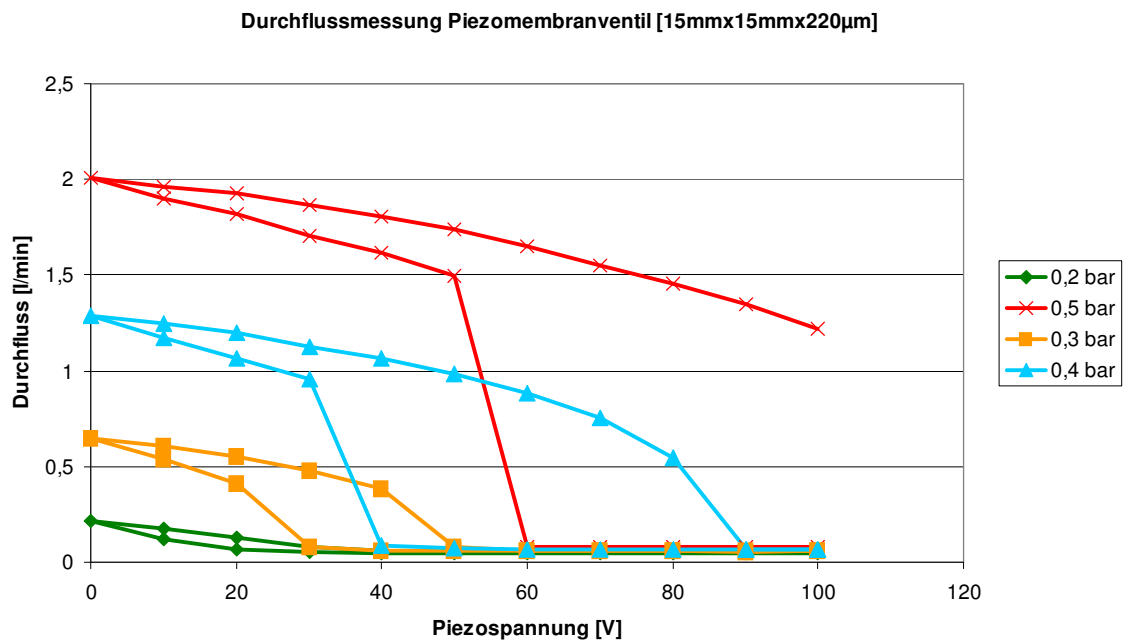


Abb. 96: Messung: Durchflusscharakteristik des Ventils bei unterschiedlichen Drücken. Für die Messung wird der Durchfluss von Luft bei verschiedenen Spannungen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung bestimmt.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Piezomembranwandler mit strukturierten Elektroden für mikrofluidische Anwendungen untersucht. Mit solchen Wandlern können beispielsweise Mikrosysteme für medizinische und pharmazeutische Anwendungen oder Einzeltropfenerzeuger in Anwendungen wie dem dreidimensionalen Drucken realisiert werden.

Mikrosysteme zeichnen sich durch eine Vielzahl von getrennt steuerbaren Einzelkanälen aus. Bei Wandlern des Stand der Technik, die den Piezoquereffekt nutzen, werden die Einzelkanäle durch Schneiden oder lokalen Auftrag der Keramik gebildet. Ziel dieser Arbeit ist es zu zeigen, dass sich Vorteile bei der Fertigung und eine Verschiebung des Leistungsbereichs von Membranwandlern ergeben, wenn die Keramik nicht geschnitten wird, sondern eine spezielle Elektrodenstruktur für die Bildung einzelner Kanäle aufgebracht wird.

Die Untersuchung dieses Prinzips wird anhand eines Vergleichs zu Wandlern des Stand der Technik durchgeführt. Besonders im Fokus steht die Frage, welche Leistungsdaten mit solchen Aktoren im Vergleich mit Standardmembranaktoren erzielt werden können. Die Vorteile bei der Fertigung ergeben sich beim Vergleich der jeweiligen notwendigen Prozessschritte.

Mit der in dieser Arbeit durchgeführten FEM-Simulation von Standardmembranaktoren wird eine Vergleichsbasis geschaffen. Die Untersuchung zeigt zudem die wesentlichen Konstruktionsparameter: Für die Materialpaarungen und Materialdicken einer Piezokeramik/Metall-Verbundstruktur ergeben sich jeweils Optima, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Wird die Überdeckung der Struktur mit Keramik in der Simulation variiert, zeigt sich ebenso ein Maximum bei der Verformung. Die Abmessungen freie Biegelänge und Gesamtdicke des Aktors bestimmen maßgeblich die Verformungs- und Druckgrößen. Die Verformung steigt bei einer Vergrößerung der freien Biegelänge quadratisch an. Dabei fällt der erzielbare Maximaldruck überproportional. Wird die Konstruktion in ihrer Dicke verändert, ist die Verformung proportional zum Reziprokwert der Dicke. Eine Steigerung bedeutet einen quadratischen Anstieg des Maximaldrucks. Diese Ergebnisse können auch für Wandlerformen mit strukturierten Elektroden verifiziert werden.

Die Ausweitung der Simulation auf verschiedene geometrische Grundformen zeigt: Mit quadratischen Wandlern können die gleichen Verformungen wie bei kreisrunden erreicht werden (unter Anpassung der Überdeckung). Der Druck und die Steifigkeit sind allerdings bei quadratischen Strukturen geringer (72%). Die runde Struktur weist zudem die höchste Eigenfrequenz auf. Des Weiteren können durch längliche Aktoren größere Verformungen erzielt werden, wenn die freie Biegelänge des länglichen Aktors mit dem Durchmesser eines kreisrunden verglichen wird. Überschreitet das Verhältnis von freier Biegelänge zur Tiefe eines Aktors einen Wert von drei, werden 40% des Aktuationswertes eines kreisförmigen Wandlers erreicht. Der erzeugbare Druck erreicht allerdings nur noch 34% der kreisförmigen Struktur.

Die Elektrodenformen für die in dieser Arbeit vorgestellten Wandlertypen können durch folgende Überlegungen abgeleitet werden: Die lokalen Verformungen, die durch die Piezoaktorik erzeugt werden müssen, um eine Membran effizient zu verformen, können dem Modell einer Membran unter Innendruck entnommen werden. Hiernach müssen im Innen- und Außenbereich jeweils gegensätzliche Krümmungen durch die Piezos erzeugt werden. Bei einem Bimorphprinzip mit einfachem Schichtaufbau kann dies nur durch unterschiedlich angesteuerte Bereiche erzielt werden. Diese werden durch Elektrodenstrukturen realisiert.

Beispielhaft werden zwei Elektrodenformen gezeigt, die den Piezoquer- oder Piezolängseffekt nutzen. Die Bildung eines Wandlers wird möglich, der im Kernbereich dem Wandler des Stand der Technik entspricht, im Randbereich aber eine Hilfselektrode nutzt, die gegen die Polarisationsrichtung angesteuert wird (*Wandler mit Hilfselektrode*). Auf Grund der biegesteiferen Struktur werden bei diesem Wandlertyp zwar nur 56% der Verformung des Standardwandlers mit gleichen Hauptabmessungen erreicht. Der erzeugbare Maximaldruck liegt aber auf Grund der erhöhten Steifigkeit um 38% höher. Die Ansteuerung im Außenbereich gegen die Polarisationsrichtung stellt aber eine Einschränkung dar.

Diese Einschränkung wird durch eine Konstruktion mit Piezolängseffekt im Außenbereich und Piezoquereffekt im Kernbereich verringert (*Kombinierter Wandler*). Dadurch sind ebenfalls bereichsweise unterschiedliche Krümmungen zu erzielen. Es muss aber nicht gegen die Polarisationsrichtung angesteuert werden. Ein solcher Wandler erzeugt, verglichen mit einem Standardwandler, 62% Verformung im Mittelpunkt der Struktur. Der Blockierdruck steigt auf Grund der steiferen Struktur auf 148% des Standardwandlers.

Der kombinierte Wandler ermöglicht somit bei einem geringen Verlust an Verformung eine wesentlich höhere Druckerzeugung. Beim Einsatz in Einzeltropfenerzeugern und Pumpen, bei denen die Pumpmembran gegen Drücke arbeitet, kann somit je nach konstruktiver Auslegung sogar ein größeres Volumen pro Aktuation gegenüber dem Standardwandler verdrängt werden. Zudem ermöglicht die steifere Membran eine um 50% höhere Grenzfrequenz.

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von Wandlern mit strukturierten Elektroden liegt in der Möglichkeit, die Lagerreaktionen zu minimieren. Auf Grund der verformungsgerechten Aktuation wird bei geeigneter Dimensionierung, wie die Simulationsergebnisse zeigen, kein Biegemoment in das Lager eingeleitet. Dadurch können einzelne Wandlerkanäle räumlich dichter angeordnet werden. Damit steigert sich die Leistungsdichte von Tropfenerzeugern oder Pumpen.

Anhand von Versuchen können die theoretischen Ergebnisse bestätigt werden. Wichtig für den Vergleich von Simulations- oder Berechnungsergebnissen mit den realen Mustern ist die Einbeziehung des nichtlinearen Anstiegs der Piezoadmissionskonstanten. Der kombinierte Wandler benötigt bei großflächigen Strukturen im Randbereich Interdigitalelektroden, um die Ansteuerspannungen gering zu halten. Im Experiment zeigt sich, dass die geometrischen Abmessungen die Leistungsdaten wesentlich beeinflussen. Es können nicht für alle Verhältnisse von Keramikdicke zur Aktuationsbreite bei gegebenen Ansteuerspannungen

optimierte Strukturen aufgebaut werden, die das Potential des Piezolängseffektes voll ausnutzen.

Weitere Versuche zeigen, dass die Konstruktionen mit strukturierten Elektroden die Ausnutzung von Aktor-Sensor-Eigenschaften von Piezokeramik erleichtern. Messungen können beispielsweise an der Bodenelektrode des Wandlers mit Hilfelektrode durchgeführt werden oder es können separate Sensorstrukturen auf einfache Weise integriert werden.

Durch die Anwendungen, einem Tropfenerzeuger und einem Mikroventil, kann das Konzept der strukturierten im Einsatz verifiziert werden. Besonders die einfachere Fertigung ermöglicht eine Eingliederung in einen Rapid-Prototyping-Prozess. Bedingt durch die kurzen Aufbauzeiten können Funktionsmuster gewonnen werden, die dazu beitragen können, vereinfachte Modelle kompletter Mikrosysteme zu verifizieren und theoretisch schwer zu erfassende Größen messtechnisch zugänglich zu machen.

7. Literatur

- [BAL06] Balke, N.: Ermüdung von Pb(Zr,Ti)O₃ für unterschiedliche elektrische Belastungsformen; Dissertation; Technische Universität Darmstadt; Fachbereich Material- und Geowissenschaften; 2006
- [BEN00] Benjeddou, A.; Trindade, M.A.; Ohayon, R.: Piezoelectric actuation mechanisms for intelligent sandwich structures; Journal of Smart Materials and Structures; IOP Publishing Ltd.; Vol. 9; S. 328-335; 2000
- [BER91] Berchtold, A.: Simulation und Optimierung von Tintenschriebwerken mit planaren piezoelektrischen Aktoren; Dissertation; Technische Universität München; Fakultät für Maschinenwesen; 1991
- [BEU98] Beurer, G.; Kretschmer, J.: Function and Performance of a Shear Mode Piezo Printhead; IS&T's 14th International Conference on Digital Printing Technologies; Seattle; S. 621ff. ;1998
- [BIN05] Bintoro, J.S.; Hesketh, P.J.: An electromagnetic actuated on/off microvalve fabricated on top of a single wafer; Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 15, S. 1157-1173; 2005
- [BRI91] Brissaud, M.: Characterisation of Piezoceramics; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE, Vol. 38, No. 6, S. 603-617; 1991
- [BÖH99] Böhm, S.; Olthuis, W.; Bergveld, P.: A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials; Sensors and Actuators: A Physical; Elsevier; Vol. 77; S. 223-228; 1999
- [BOW06] Bowen, C.R.; Nelson, L.J.; Stevens, R. et al.: Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites; Journal of Electroceramics; Springer; Vol. 16; S. 263-269; 2006
- [CAR05] Carluccio, M.K.: Advances in UV-Curable Ink Jet; IMI Europe – Commercialisation of the ink jet as a manufacturing process; Genf; 2005
- [CHE04] Cheng, C.H.; Chen, S.C.: The Simulation of Diaphragm Deflection Actuated by Shear Mode Piezoelectric Actuator in Microdroplet Ejector; Journal of

- Computer, Materials & Continua; Tech Science Press; Vol. 1; NO. 3; S. 205-212; 2004
- [CHE06] Cheng, C.H.; Chen, S.C.; Young, S.W. et al.: Effect of poling conditions on out-of-plane displacement for a shear mode PZT actuator; Sensors and Actuators A: Physical; Elsevier; Vol. 126; S. 386-395; 2006
- [CHO05a] Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. Modelling; Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 15, S. 1797-1803; 2005
- [CHO05b] Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: II. Experiment; Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 15, S. 1804-1809; 2005
- [DAR98] Dargie, P.; Sion, R.; Atkinson, J. et al.: An investigation of the effect of poling conditions on the characteristics of screen-printed piezoceramics; Microelectronics International; MCB University Press; Vol. 15; No. 2; S. 6-10; 1998
- [DER05] Derby, B.: Applications for Ink Jet in Biology & Medicine: Progress Towards Organ Printing; IMI Europe – Commercialisation of the ink jet as a manufacturing process; Genf; 2005
- [DON06] Dong, H.; Carr, W.; Morris, J.F.: Visualization of drop-on-demand inkjet: Drop formation and deposition; Review of Scientific Instruments; American Institute of Physics; Vol. 77; S. 085101-1-085101-8; 2006
- [DOR04] Dorey, R.A.; Whatmore, R.W.: Electroceramic Thick Film Fabrication for MEMS; Journal of Electroceramics, Kluwer Academic Pub.; Vol. 12; S. 19-32, 2004
- [EDE99] Ederer, I.: Berechnung und Anwendung eines Piezo-Biege wandlers zur Flüssigkeitszerstäubung; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 1999
- [EGG02] Egger, K.; Warga, J.; Klügl, W.: Neues Common Rail Einspritzsystem mit Piezoaktorik für Dieselmotoren; MTZ; 63; Vieweg Verlag; 2002
- [EMM92] Emmer, A.; Jansson, M.; Roerade, J.: Fabrication and Characterisation of a Silicon Microvalve; Journal of Microcolumn Separations; Vol. 4; S 13-15; 1992

- [FIS86] Fischbeck, K.H.: Shear mode transducer for drop-on-demand liquid ejector; US Pat. 4,584,590
- [GAL87] Gallo, C.A.; Schulze, W.A.: Alternating-Current-Assisted Poling of Lead Zirconate Titante (PZT); Journal of the American Ceramics Society; Vol. 70[2], S. 33-34; 1987
- [GAN04] Gans, B.; Kazancioglu, E.; Meyer, W. et al.: Ink-jet Printing Polymers and Polymer Libraries Using Micropipettes; Journal of Micromolecular Rapid Communcations; Wiley Verlag; Vol. 25, S. 292-296; 2004
- [GOL97] Goll, C.: Entwicklung, Herstellung und Test von aktiven Mikroventilen für pneumatische Anwendungen; Dissertation; Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, 1997
- [GRÜ05] Grünwald, S.: Berührungsloses Dispensen hochviskoser Flüssigkeiten; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2005
- [HAG89] Hagedorn, P.: Technische Schwingungslehre; Band 2; Lineare Schwingungen kontinuierlicher mechanischer Systeme; Springer-Verlag; Berlin; 1989
- [HAR05] Harrysson, U.: High Volume manufacturing of structural parts using ink-jet technology; IMI Europe – Commercialisation of the ink jet as a manufacturing process; Genf; 2005
- [HEI77] Heinzl, J.; Piezoelektrisches Antriebselement für Schreibdüsen; DP 2537767
- [HEI04] Heinzl, J.; Paspas, R.: Rapid prototyping in Microsystems technology; International Journal of Product Development; Vol. 1; No. 2; S. 155ff.; 2004
- [HEI07] Heinzl, J.; Günther, D.; Kraus, T.: Piezoelektrisch betriebener Tropfenerzeuger; Offenlegungsschrift, DE 10 2005 031646 A1
- [HEIN05] Heinrich, K.: Mikroventil „Normal Offen“; Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; München; Infoblatt 05/02; 2005
- [HIR05] Hirsch, S.; Doerner, S.; Salazar Vélez, D.J. et al.: Thick-film PZT transducers for silicon micro machined sensor arrays; IEEE Sensors 2005; IEEE; S. 444-447; 2005
- [HON06] Hong, E.; Troler-McKinstry, S.; Snith, R.L.: Design of MEMS PZT Circular Diaphragm Actuators to Generate Large Deflections; Journal of Microelectromechanical Systems; IEEE; Vol. 15; No. 4; S 832-839; 2006

- [HONG05] Hong, Y.K.; Moon, K.S.; Levy, M.: Interdigitated single crystal piezoelectric actuator; Proceedings of SPIE: Optomechatronic Actuators and Manipulation; SPIE – The International Society for Optical Engineering; Vol. 6048, S. 161-167; 2005
- [HOS00] Hosokawa, K.; Maeda, R.: A pneumatically-actuated three-way microvalve fabricated with polydimethylsiloxane using the membrane transfer technique; Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 10, S. 415-420; 2000
- [JAF58] Jaffe, H.: Piezoelectric Ceramics; Journal of the American Ceramic Society; Vol. 41; No. 11; S. 494-498; 1958
- [JAF65] Jaffe, H.; Berlincourt, D.A.: Piezoelectric Transducer Materials; Proceedings of the IEEE; IEEE; Vol. 53; No. 10; S. 1372-1386; 1965
- [JEO05] Jeon, Y.B.; Sood, R.; Jeong, J.H. et al.: MEMS power generator with transverse mode thin film PZT; Sensors and Actuators A: Physical; Vol. A122; No.1, S. 16-22; 2005
- [JON05] Jones, S.: Direct Writing of Printed Circuit Boards; IMI Europe – Commercialisation of the ink jet as a manufacturing process; Genf; 2005
- [JOR01] Jordan, T.L.; Ounaies, Z.: Piezoelectric Ceramics Characterization; NASA Langley Research Center, NASA/CR-2001-211225, ICASE 2001-28
- [JUU05] Juuti, J.; Jantunen, H.; Moilanen, V.: Poling Conditions of Pre-Stressed Piezoelectric Actuators and Their Displacement; Journal of Electroceramics, Springer, Vol. 15.; S. 57-64.; 2005
- [KLU01] Kluge, S.; Neumayer, G.; Schaber, U.; Wackerle, M.; Maichl, M.; Post, P.; Weinmann, M.; Wanner, R.; Pneumatic silicon microvalves with piezoelectric actuation; Transducers '01 / Eurosensors XV. Digest of technical papers: The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Berlin; Springer; S.924-927; 2001
- [KOC97] Koch, M.; Harris, N.; Evans, G.R. et al.: Screen Printing of Thick Piezoelectric PZT Layers Onto Silicon Micromachined Membranes; The Institution of Electrical Engineers; IEE; UK; 1997

- [KOG98] Koganezawa, S.; Uematsu, Y.; Yamada, T. et al.: Shear Mode Piezoelectric Microactuator for Magnetic Disk Drives; IEEE Transactions on Magnetics, IEEE; Vol. 34; No. 4; S. 1910-1912, 1998
- [LAW95] Law, H.H.; Rossiter, P.L.; Simon, G.P. et al.: A model for the structural hysteresis in poling and thermal depoling of PZT ceramics; Journal of Materials Science; Vol. 30; S. 4901-4905; 1995
- [LE98] Le, H.; Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology; Journal of Imaging Science and Technology; IS&T; Vol. 42, No. 1, S.49ff.; 1998
- [LE04] Le, H.P.; Le, H.P.; Le, T.P.: Microfluid device and ultrasonic bonding process; United States Patent; US 6,783,213 B2
- [LEE05] Lee, C.; Guodong, S.; Arkadij, E. et al.: Multistep Synthesis of a Radiolabeled Imaging Probe Using Integrated Microfluidics; Science Magazine; Vol. 310, S. 1793ff.; 2005
- [LEB00] Lebedev, M.; Akedo, J.; Akiyama, Y.: Actuation Properties of Lead Zirconate Titanate Thick Films Structured on Si Membrane by the Aerosol Deposition Method; Japanese Journal of Applied Physics; The Japan Society of Applied Physics, Vol. 39; S. 5600-5603; 2000
- [LEM06] Lemmermeyer, B.: Ein hochtemperaturbeständiger Tropfenerzeuger für flüssige Metalle; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2006
- [LEV04] Levy, M.; Vanga, R.; Moon, K. et al.: Single-Crystal Relaxor Ferroelectric Piezoactuators with Interdigitated Electrodes; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control; Vol. 51, No. 12, S. 1593- 1599
- [LIE05] Liess, H.: Untersuchung von Laser-, Funkenerosions- und Räumverfahren zur Herstellung von zykloidalen Mikroverzahnungen; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2005
- [LOP96] Lopath, P.D.; Park, S.; Shung, K. et al.: Ultrasonic Transducers Using Piezoelectric Single Crystalperovskites; Symposium on Applications of Ferroelectrics, ISAF '96;IEEE; Vol. 2; S. 543-546; 1996
- [LOV01] Love, J.C.; Wolfe, D.B.; Jacobs, H.O. et al.: Microscope Projection Photolithography for Rapid Prototyping of Masters with Micron Scale Features

- for Use in Soft Lithography; Langmuir - Journal of the American Chemical Society: Vol. 17; S. 6005-6012; 2001
- [MAE04] Maeda, R., Tsaur, J.J.; Lee, S.H. et al.: Piezoelectric Microactuator Devices; Journal of Electroceramics; Kluwer Academic Publications; Vol. 12; S.89-100; 2004
- [MES00] Messner, S.: Elektrostatisch angetriebenes 3/2-Wege-Mikroventil für pneumatische Anwendungen; Dissertation; Albert-Ludwig-Universität-Freiburg; Fakultät für angewandte Wissenschaften; 2000
- [MOA92] Moazzami, R.; Hu, C.; Shepher, W.: Electrical Characteristics of Ferroelectric PZT Films for DRAM Applications; In: IEEE Transactions on Electron Devices; IEEE; Vol. 39, No. 9, S. 2004-2049; 1992
- [MOR00] Morris, C.J.; Forster, F.K.: Optimization of a circular piezoelectric bimorph for a micropump driver; Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 10, S. 459-465; 2000
- [NAN99] Naniwa, I.; Nakamura, S.; Saequsa, S.; Sato, K.: Low voltage driven piggy-back actuator of hard disk drives; In: Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS 1999; IEEE; S 49-52; 1999
- [NAK83] Nakamura, K.; Shimizu, H.: Poling of Ferroelectric Crystals by Using Interdigital Electrodes and its Application to Bulk-Wave Transducers; 1983 Ultrasonics Symposium; IEEE, S. 527-530; 1983
- [NED04] Nedelcu, O.T.; Moagar-Poladian, V.: Modelling of the Piezoelectric Micropump for Improving the Working Parameters; 2004 NSTI Nanotechnology Conference; NSTI; 2004
- [NIE01] Niezrecki, C.; Brei, D.; Balakrishnan, S. et al.: Piezoelectric Actuation: State of the Art; The Shock and Vibration Digest; Sage Publications; Vol. 33; No. 4; S. 269-280; 2001
- [PAR97] Park, S.; Shrout, T.R.: Ultrahigh strain and piezoelectric behaviour in relaxor based ferroelectric single crystals; Journal of Applied Physics; American Institute of Physics; Vol. 82; No. 4; S. 1804-1811; 1997

- [PAT05] Patterson, P.: The Commercialisation of Inkjet Technology in the Electronics Industry; IMI Europe – Commercialisation of the ink jet as a manufacturing process; Genf; 2005
- [PEL05] Pelzer, R.: Auslegung von besiedelbaren Knochenimplantaten und deren Herstellung mittels 3D-Druckverfahren; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2005
- [PIC05] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Gesamtkatalog 05
- [PIE01] Piefort, V.: Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures; Dissertation; Université Libre de Bruxelles; Faculty of Applied Sciences; 2001
- [PFE82] Pfeiffer, G.: Piezoelektrische lineare Stellantriebe; Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt; 1982
- [REI03] Reiländer, U.; Das Großsignalverhalten piezoelektrischer Aktoren; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf, 2003
- [RIC97] Richter, M.; Prak, A.; Naundorf, J. et al.: A Chemical Microanalysis System as a Microfluid System Demonstrator; Transducers 1997; International Conference on Solid State Sensors and Actuators; IEEE; Vol. 1; S. 303-306; 1997
- [RIC06] Richter, M.: Applications and Technologies of Microfluidic Actuators; Workshop Microdosing Systems : Micropumps - the beating heart of microfluidics; Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; München; 2006
- [ROB03] Roberts, D.C.; Li, H.; Steyn, J.L.: A Piezoelectric Microvalve for Compact High-Frequency, High-Differential Pressure Hydraulic Micropumping Systems; Journal of Microelectromechanical Systems, IEEE, Vol. 12, No. 1, S. 81-92
- [ROBI06] Robinson, M.C.; Morris, D.J.; Hayenga, P.D. et al.: Structural and electrical characterization of PZT on gold for micromachined piezoelectric membranes; Applied Physics A: Material Science and Processing; Springer; Vol. 85, S. 135-140; 2006
- [ROD99] Rodrigues, R.P.; Hwang, J.; Dravid, V.P.: 4- Probe Micropatterning and Electrical Measurements Across Individual Grain Boundaries in Electroceramics; Journal of Electroceramics; Kluwer Academic Publications; Vol. 3; No. 3; S. 245-254; 1999

- [ROG01] Rogge, T.: Entwicklung eines piezogetriebenen Mikroventils – von der Idee bis zur Vorserienfertigung; Dissertation; Universität Karlsruhe; Fakultät für Maschinenbau; 2001
- [SCH97] Schroth, A.; Ichiki, M.; Akedo, J. et al.: Properties and Application of Jet Printed Piezoelectric PZT Films for Actuation Purposes; International Symposium on Micromechatronics and Human Science; IEEE; S. 67-72; 1997
- [SCHEI04] Scheicher, R.: Kompaktmodell zur Systemsimulation eines Tropfenerzeugers mit Piezobiegewandlern; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2004
- [SCHE06] Scheuenpflug, M.; Günther, D.; Kraus, T. et al.: Rapid prototyping procedure for custom-designed dosing systems; Workshop Microdosing Systems : Micropumps - the beating heart of microfluidics; Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; München; 2006
- [SCHI05] Schindler, M.: Produktionsnahe Qualitätssicherung für Piezobiegeaktoren; Dissertation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2005
- [SEI04] Seitz, H.; Heinzl, J.: Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators: Journal of Micromechanics and Microengineering; IOP Publishing Ltd.; Vol. 14, S. 1140-1147; 2004
- [USU00] Usui, M.; Shimada, M.; Murai, M. et al.: Laminiertes Druckkopf für das Tintenstrahlzeichnen; Europäische Patentschrift; EP 0782923 B1
- [VOS03] Voßkämper, M.: Kohärente Layoutsynthese und Modellbildung von skalierbaren mikroelektromechanischen Strukturen; Dissertation; Gerhard-Mercator-Universität Duisburg; Fachbereich Elektrotechnik; 2003
- [YAN97] Yang, J.C.; Chien, W.; King M. et al.: A simple piezoelectric droplet generator; Experiments in Fluids; Vol. 23; Springer-Verlag, S. 445-447; 1997
- [YANG01] Yang, Z.; Matsumoto, S.; Goto, H. et al.: Ultrasonic micromixer for microfluidic systems; Sensors and Actuators A: Physical; Elsevier; Vol. 93; S. 266-272; 2001
- [YU01] YU, H.G.; Wolf, R.; Deng, K. et al.: Fabrication and performance of d33-mode lead-zirconate-titanate (PZT) MEMS accelerometers; Proceedings of SPIE; Vol. 4559; S. 130-137; 2001

- [WAC02] Wackerle, M.; Dorst, A.; Richter, M.: A Novel Device For High Frequency Ejection of Nanoliter Jets; Actuator – 8th International Conference on New Actuators; Bremen; 2002
- [WAK96] Wakabayashi, S.; Sakata, M., Goto, H.: Static Characteristics of Piezoelectric Thin Film Buckling Actuator; Japanese Journal of Applied Physics; Japanese Society of Applied Physics; Vol. 35; S. 5012-5014; 1996
- [WAN89] Wang, H.; Cheng, S.; Wang, C.: Optimization of Poling Process for Piezoelectric PZT Ceramics; '89 Japan IEMT Symposium; IEEE; S. 263-266; 1989
- [WAT94] Watanabe, S.; Fujiu, T.; Fujiu, T.: Effect of poling on piezoelectric properties of lead zirconate titanate films formed by sputtering; Applied Physics Letters; American Institute of Physics; Vol. 66(12); S. 1481-1483; 1995
- [WANG98] Wang, X.; Zhou, Z.; Ye, X. et al.: A PZT-driven Micropump; International Symposium on Micromechatronics and Human Science; IEEE; S. 269-272; 1998
- [WEH03] Wehr, J.: Temperaturabhängige Untersuchungen zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donatordotierten PZT-Keramiken; Dissertation; Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, 2003
- [WEHL02] Wehl, W.; Krause, P.; Kloeser, J.; Bump-Herstellung mit einem Drop-On-Demand Flüssigmetalldrucker; Herbstkonferenz der International Microelectronic and Packaging Society Deutschland; München; 2002
- [WOL03] Wolf, R.: Rapid Prototyping in der Mikrotechnik mittels Laserablation; Fortschritt-Berichte VDI; VDI Verlag Düsseldorf; 2003
- [WNG96] Wang, Q.; Xu, B.; Kugel, V.D. et al.: Characteristics of shear mode piezoelectric actuators; Symposium on Applications of Ferroelectrics –ISAF'96; IEEE; Vol. 2; S. 767-770; 1996
- [WOL01] Wolny, W.W.: Piezoceramic thick films-technology and applications: state of the art in Europe; 12th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, IEEE, 2000
- [ZHA03] Zhang, Q.Q.; Gross, S.J.; Tadigadapa, S. et al.: Lead zirconate films for d33 mode cantilever actuators; Sensors and actuators A: Physical; Elsevier; Vol. 105; S. 91-97; 2003

- [ZHO98] Zhou, Y.: Measurement of the Displacement of a Shear Mode Piezoelectric Transducer Using Laser Doppler Vibrometer; IS&Ts NIP 14: 1998 International Conference on Digital Printing Technologies; S. 23- 26, 1998
- [ZHO03] Zhou, D.: Experimental Investigation of Non-linear Constitutive Behaviour of PZT Piezoceramics; Dissertation; Forschungszentrum Karlsruhe; Wissenschaftliche Berichte; FZKA 6869; 2003

Anhang:**A. Formelzeichen**

Symbol	Definition	Einheit
(EI)	<i>Widerstandsmoment</i>	$[Nm^2]$
ε	<i>Permeabilität</i>	$[F/m]$
ζ	<i>Logarithmisches Dekrement</i>	$[-]$
ν	<i>Querkontraktion</i>	$[-]$
φ	<i>Biegeneigung</i>	$[m/m]$
ϕ	<i>elektrisches Potential</i>	$[V]$
b	<i>Breite</i>	$[m]$
c	<i>Elastizitätsmodul (E-Modul)</i>	$[N/m^2]$
d	<i>Piezoelektrische Dehnung</i>	$[C/N][m/V]$
d	<i>Platten- /Elektrodenabstand</i>	$[m]$
e	<i>Piezoelektrische Spannung</i>	$[C/m^2][N/Vm]$
f_n	<i>Korrekturfaktor Steifigkeit</i>	$[-]$
f_m	<i>Korrekturfaktor Moment</i>	$[-]$
f	<i>Frequenz</i>	$[Hz]$
h	<i>Dicke einer Struktur</i>	$[m]$
k_{NL}	<i>Korrekturfaktor für nichtlineares Piezoverhalten</i>	$[-]$
l	<i>Länge</i>	$[m]$
l_0	<i>Unverformte Länge</i>	$[m]$
m_{el}	<i>Piezobiegemoment</i>	$[Nm]$
m_i	<i>Reaktionsmoment</i>	$[Nm]$
p	<i>Druck</i>	$[Pa]$
q	<i>Streckenlast</i>	$[N/m]$
r	<i>Radius</i>	$[m]$
r_X	<i>Abstand X-Richtung</i>	$[m]$
s	<i>Kehrwert des E-Moduls</i>	$[m^2/N]$
v_s	<i>Schallgeschwindigkeit</i>	$[m/s]$
v	<i>Tropfengeschwindigkeit</i>	$[m/s]$
w	<i>Durchsenkung</i>	$[m]$
y	<i>Allgemeine Amplitude</i>	$[-]$
A	<i>Wirksame Fläche</i>	$[m^2]$
B	<i>Hauptabmessung Tiefe</i>	$[m]$
C	<i>Elektrische Kapazität</i>	$[F]$

<i>D</i>	<i>Dielektrische Verschiebung</i>	<i>[C/m²]</i>
<i>D</i>	<i>Plattensteifigkeit</i>	<i>[Nm]</i>
<i>D</i>	<i>Lehr'sches Dämpfungsmaß</i>	<i>[-]</i>
<i>E</i>	<i>Elektrische Feldstärke</i>	<i>[V/m]</i>
<i>E</i>	<i>Elastizitätsmodul</i>	<i>[N/mm²]</i>
<i>F</i>	<i>Kraft</i>	<i>[N]</i>
<i>H</i>	<i>Hauptabmessung Gesamtdicke</i>	<i>[m]</i>
<i>I</i>	<i>Flächenträgheitsmoment</i>	<i>[m⁴]</i>
<i>L</i>	<i>Hauptabmessung freie Biegelänge</i>	<i>[m]</i>
<i>N</i>	<i>Frequenzkonstante</i>	<i>[m/s]</i>
<i>Q</i>	<i>Elektrische Ladung</i>	<i>[C]</i>
<i>R</i>	<i>Tropfenradius</i>	<i>[m]</i>
<i>Re</i>	<i>Reynoldszahl</i>	<i>[-]</i>
<i>S</i>	<i>Mechanische Dehnung</i>	<i>[m/m]</i>
<i>T</i>	<i>Mechanische Spannung</i>	<i>[N/m²]</i>
<i>T</i>	<i>Periodendauer</i>	<i>[s]</i>
<i>U</i>	<i>Elektrische Spannung</i>	<i>[V]</i>
<i>Ü</i>	<i>Überdeckung</i>	<i>[-]</i>
<i>V</i>	<i>Volumen</i>	<i>[m³]</i>

B. Piezoparameter für die numerische Simulation

Die Zustandsgrößen besitzen materialunabhängig die folgende Form: Die mechanische Spannung und das elektrische Feld werden durch die Vektoren

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad 58$$

repräsentiert. Die Größen T_4 , T_5 und T_6 sind Schubspannungen. Weitere Zustandsgrößen sind die dielektrische Verschiebung und mechanische Dehnung:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad 59$$

Die Verformungen S_4 , S_5 und S_6 sind Verscherungen des Kristalls. Ihr Wert kennzeichnet aber jeweils eine Verschiebung (siehe Abb. 17).

Die Konstanten in den Gleichungen sind Matrizen, deren Einträge von den jeweiligen betrachteten Kristallstrukturen abhängen. Für orthotrope Materialien haben die Matrizen s , d und ε folgende Koeffizienten:

$$s = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix} \quad 60$$

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad 61$$

und

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad 62$$

Bei der Matrix für die piezoelektrische Ladungskonstante d gelten folgende Festlegungen: Der erste Index bezeichnet die Richtung des elektrischen Ansteuerfeldes. Der zweite Index kennzeichnet die Richtung der dadurch verursachten mechanischen Verformung.

Auf Grund der Symmetrien im PZT-Kristall (Kristallklasse 6mm) ergeben sich zusätzliche Vereinfachungen [PIE01]:

$$s_{22} = s_{11}; s_{21} = s_{12}; s_{31} = s_{13}; s_{23} = s_{13}; s_{32} = s_{23}; s_{44} = s_{55}; s_{66} = 2 \cdot (s_{11} - s_{12}), \quad 63$$

$$d_{32} = d_{31}; d_{24} = d_{15} \text{ und} \quad 64$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} \quad 65$$

S , d und ε sind die am häufigsten verwendeten Größen um Piezokeramik zu charakterisieren. In FE-Programmen wird jedoch oft zur Darstellung die Gleichung 2 verwendet. Dazu werden die Größen e und c mit Hilfe der Matrizenalgebra aus den obigen Größen gewonnen:

$$e^t = (s_E)^{-1} \cdot d^t \quad 66$$

und

$$c_E = (s_E)^{-1}. \quad 67$$

Für das Material PIC 151 ergeben sich folgende Piezomatrizen:

$$c = \begin{pmatrix} 1,07 & 0,63 & 0,63 & 0 & 0 & 0 \\ 0,63 & 1,07 & 0,63 & 0 & 0 & 0 \\ 0,63 & 0,63 & 1,00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,22 \end{pmatrix} \cdot 10^{11} \frac{N}{m^2}, \quad e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -9,52 \\ 0 & 0 & -9,52 \\ 0 & 0 & 15,13 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 11,97 & 0 \\ 11,97 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{C}{m^2} \quad 68$$

Für die Simulation von Piezoaktoren mit FE-Programmen ist es oft notwendig, Darstellungen von Piezomatrizen zu verwenden, bei denen nicht die z-Richtung die Polarisationsrichtung darstellt. Abb. 97 (a) zeigt die anschauliche Darstellung der Piezomatrix mit Polarisation in z-Richtung. In Abb. 97 (b) ist die 90 Grad um die Y-Achse gedrehte Elementarzelle des Piezokristall zu sehen. Die Dreibeine der Piezomatrix bleiben auf der Elementarzelle inertial fest. Die Darstellungen zeigen ein globales Koordinatensystem XYZ. Die Koordinaten der gedrehten Piezomatrix können jetzt direkt abgelesen werden und es können damit die notwendigen Matrizen erstellt werden.

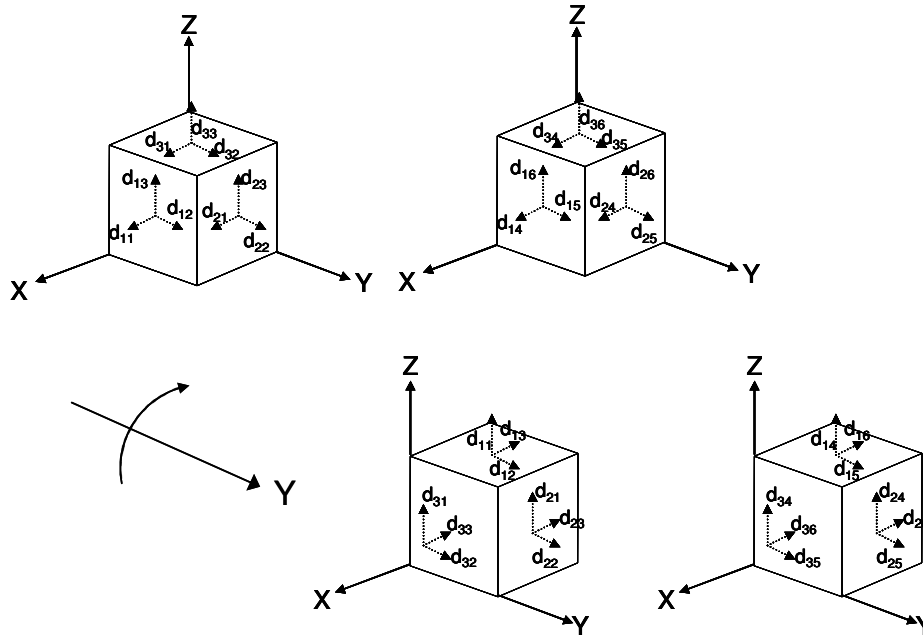


Abb. 97: Anschauliche Gewinnung von Piezomatrizen zur Darstellung anderer Polarisationsrichtungen als der 3-Richtung. Darstellung mit Polarisation 3 (a) und gedrehte Elementarzelle mit Richtung 1 (b).

Beispielsweise kann diese Darstellung für Simulationen von Wandlern mit radialer Polarisation verwendet werden (siehe Abschnitt 4.2.4). Dies können Piezoröhrchen oder Membranwandler mit Interdigitalstruktur sein. Zweckmäßigerweise wird hier mit Zylinderkoordinaten gerechnet, wobei die Polarisationsrichtung in radialer Richtung (R-, X- oder 1-Richtung) liegt. Die Steifigkeitsmatrix besitzt in einem solchen Koordinatensystem folgende Darstellung:

$$s = \begin{pmatrix} s_{33} & s_{32} & s_{31} & 0 & 0 & 0 \\ s_{23} & s_{22} & s_{21} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{pmatrix}. \quad 69$$

Die Piezomatrix ändert sich wie folgt:

$$d = \begin{pmatrix} d_{33} & d_{32} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \end{pmatrix}. \quad 70$$

Zusätzlich muss die Drehung der Matrix der Dielektrizitätskonstanten beachtet werden:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{11} \end{pmatrix}.$$

71

C. Analysemethoden

I. Impedanzmessung

Zur Verifikation von elektromechanischen Koppelungen kann die Impedanz von Bauteilen bei unterschiedlichen Frequenzen vermessen werden [CHO05b][JOR01]. Es wird ein Durchlauf durch unterschiedliche Frequenzen durchgeführt und der dabei sich einstellende Strom und die Phase zur treibenden Spannung aufgezeichnet. Eine solche Anordnung eignet sich grundsätzlich, um das Frequenzverhalten verschiedenster elektronischer Bauteile zu klären. Die folgenden Verhaltenserscheinungen charakterisieren die elektrischen Grundbauelemente:

Widerstand – Rein ohmsche Bauteile wirken sich nicht auf die Phasenlage zwischen Strom und Spannung aus. Die Phase bleibt bei konstant 0 Grad. Die Impedanz ist gleich dem reinen ohmschen Gleichwiderstand.

- Kapazität – Die Phasenlage beginnt bei -90 Grad, da der Strom der Spannung vorausseilt. Die Impedanz nimmt allgemein mit steigender Frequenz ab.
- Induktivität – Beim Aufbau eines magnetischen Feldes bildet sich der Strom nach dem Anlegen einer Spannung aus. Die Phasenlage ist bei +90 Grad. Die Impedanz nimmt allgemein mit steigender Frequenz zu.

Diese idealisierten physikalischen Grundelemente können für reale Bauteile nur in sehr begrenzten Frequenzbereichen angenommen werden. Über ein breites Frequenzband mischen sich die Eigenschaften der Elemente immer zu einem komplexeren Impedanzbild. Piezokeramische Bauelemente zeigen im Frequenzverhalten Besonderheiten. Durch die Kopplung von mechanischer und elektrischer Energie bildet sich ein, einem elektrischen Schwingkreis ähnliches System [BRI91].

Wie beim Schwingkreis besitzt auch das Piezosystem eine charakteristische Eigenfrequenz. Diese äußert sich als scharfer Sprung der Messwerte der Impedanz und als lokales Maximum im Phasenverlauf. Anders als beim elektrischen Schwingkreis ergeben sich aber schon bei einfachst geformten Bauteilen komplexe Antwortbilder, da sich verschiedene Eigenmoden der mechanischen Schwingung ausbilden. Zu den Grundfrequenzen kommen oft auch noch zahlreiche Harmonische, die das Bild des Impedanzschriebs verkomplizieren.

Dennoch können aus dem Impedanzverhalten wichtige Aussagen über die Funktion von Piezoaktoren getroffen werden:

Die Eigenfrequenz der dominanten Schwingung kann auf Grund ihres lokal sehr großen Absolutwertes der Phase sicher erkannt werden. Dies ist besonders bei Membranwandlern von Vorteil, da die Eigenfrequenz direkt abgelesen werden kann.

Sollen Bauteile in einem Fertigungsschritt depolarisiert werden, kann der Erfolg des Vorgangs anhand der Kennlinie überprüft werden. Die Impedanzmessung zeigt einen Verlauf, der auch beim einfachen Kondensator zu erwarten ist.

Verfügt man über einen funktionstüchtigen Wandler, kann über einen Vergleich der Messschriebe auf Defekte baugleicher Wandler geschlossen werden. Beispielsweise können Risse in der Keramik durch ein stark verrauschtes Antwortbild erkannt werden. Solche Risse können durch eine optische Kontrolle oft nur schwer entdeckt werden.

Es können über die einzelnen Fertigungsschritte die Verschiebungen der Eigenfrequenzen beobachtet werden. Dies ermöglicht eine schnelle Verifikation der einzelnen Abläufe.

II. Laservibrometer

Der Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die erreichbare Aktuation von Membranwandlern. Die maximale Auslenkung ist der Vergleichswert.

Da die Messwerte im Mikrometerbereich liegen, eignet sich Interferenzmesstechnik, um eine ausreichende Auflösung der Messung zu erreichen [CHE06]. Zudem wird berührungslos gemessen, wodurch sich keine Verfälschung der Ergebnisse durch Krafteinwirkung ergeben kann. Im Folgenden wird das Prinzip des Laserdopplerinterferometers dargestellt (zur Methodik siehe auch [ZHO98]).

Hauptbestandteil ist, wie bei einem Michelsoninterferometer ein Strahlteiler, der einen Laserstrahl von bekannter Wellenlänge in zwei Strahlen, den Messstrahl und einen Referenzstrahl, aufteilt. Der Messstrahl trifft auf die Probe und wird dort durch deren Bewegung in seiner Frequenz geändert (Dopplereffekt) und zum Strahlteiler zurückreflektiert. Der Referenzstrahl wird von einem Spiegel reflektiert und unverändert zum Strahlteiler zurückgeworfen. Beide Strahlen interferieren auf einem Detektor. Eine schematische Darstellung gibt die Abb. 98 wieder.

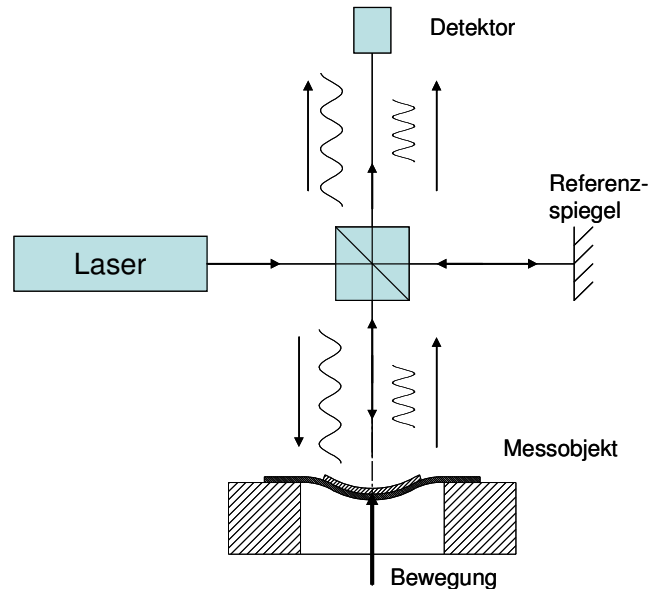


Abb. 98: Funktionsprinzip des Laserdopplerinterferometers.

Anders als beim Laserinterferometer ergibt sich hier kein statisches Bild, das den relativen Abstand der Probe zum Messgerät wiedergibt. Im Laserdopplerinterferometer wird die Geschwindigkeit der Probe als Schwebung der Intensität auf dem Detektor ausgewertet. Die Weginformation kann aus dieser Information mit einer Integration über die Zeit gewonnen werden.

Dieses Verfahren weist als Hauptvorteil die Unempfindlichkeit der Messung gegenüber der Probenoberfläche auf. Der Messfleck integriert die Oberflächenrauigkeit. Aus diesem Grund eignet sich die Anordnung, um direkt auf die Oberfläche der Keramik zu messen.

Der zweite Vorteil liegt in der hohen Dynamik der Messung. Es können Verformungen bis in den MHz-Bereich erfasst werden. Diese Eigenschaft ist besonders bei der Beurteilung der Eigenfrequenzen mit Hilfe einer Sprunganregung von Vorteil.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die Drift der Integration auf Grund von Gleichanteilen im Geschwindigkeitssignal. Die Messung muss deshalb anhand des Oszilloskopschriebs beurteilt und gegebenenfalls um einen konstanten Wert über die Zeit korrigiert werden.

Das für die Versuche verwendete Faser-Laserdopplervibrometer Polytec OFV 512/OFV 3001 besitzt die folgenden Daten:

- Maximale Probengeschwindigkeit: 1000 mm/s
- Minimal auflösbare Verformung: 10 nm
- Totzeit: 17 ms
- Wellenlänge des Messstrahls: 655nm, rot, sichtbar

Da das Messverfahren auf der Bewegung der Probe basiert, wird diese kontinuierlich bewegt. Dazu wird ein periodisches elektrisches Signal angelegt. Es kommen die Abb. 99 zu entnehmenden Messaufbauten zum Einsatz.

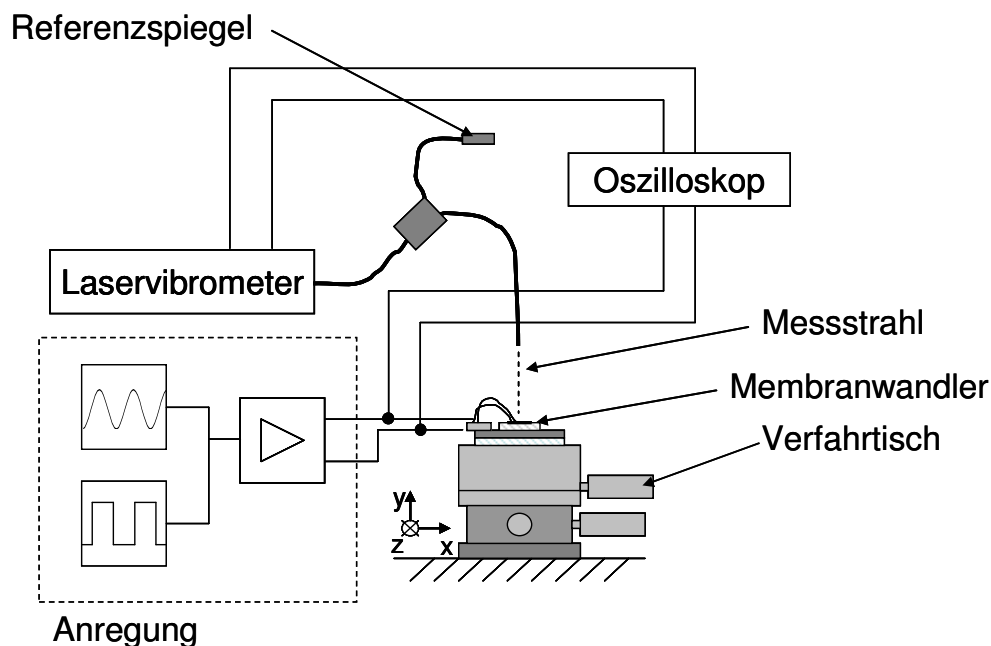


Abb. 99: Vermessung der Membranwandler mit einem faseroptischen Laservibrometer.

Die Probe kann für die Messung auf unterschiedliche Weise angeregt werden:

Sinusförmige Anregung

Über einen Funktionsgenerator und einem linearen Verstärker wird die zu untersuchende Piezokeramik mit einer Spannung mit einem Sinusförmigen Verlauf angeregt. Hier wird mit einer Spitzenspannung $U_A=100\text{ V}$ angesteuert. Der eingesetzte Analogverstärker DASS AVU 200/5 liefert Spannungen bis 200 V . Bei den durch die Piezoproben vorgegebenen Kapazitäten können sinusförmige Signale bis 10 kHz ohne Verzerrungen aufgeprägt werden. Um die Probe nicht zu depolarisieren, wird das Signal mit einem Gleichspannungsoffset von $U_A/2$ beaufschlagt. Wird eine im Vergleich zur Eigenfrequenz niedrige Ansteuerfrequenz gewählt, können die Maximalwerte der Messung analog zu einer statischen Messung aufgefasst werden. Dabei ist die Drift des Vibrometers zu berücksichtigen. Liegt die Ansteuerfrequenz zu niedrig, ergeben sich im Verlauf der Messung über eine Periode erhebliche Abweichungen. Die Frequenz für diese Messung wird deshalb auf 500 Hz festgelegt.

Anregung mit Rechteckimpulsen

Eine zweite praxisrelevante Form der Anregung ist eine Pulsanregung mit Rechteckimpulsen der Spitzenspannung $U_A=100\text{ V}$. Dazu wird ein Schaltverstärker verwendet, der Spannungen von bis zu 200 V schalten kann. Der innere Aufbau besteht aus MOSFET-Transistoren in Form einer Halbbrücke. Mit diesem Aufbau können Schaltflankenzeiten bei den Proben von unter einer Mikrosekunde erreicht werden. Bezogen auf die Dynamik der Membranwandler

kann dadurch in guter Näherung eine Sprungantwort erzwungen werden. Aus dem Messsignal können folgende Werte abgelesen werden:

- Maximale Aktuation – Anhand des sich einstellenden Verschiebungsplateaus
- Eigenfrequenz – Bestimmung der Frequenz der hochfrequenten Überlagerungen im Signal
- Dämpfung – Bestimmung der Abklingzeitkonstante der hochfrequenten Überlagerung

Abb. 100 zeigt einen idealisierten Messschrieb mit den zugehörigen Parametern.

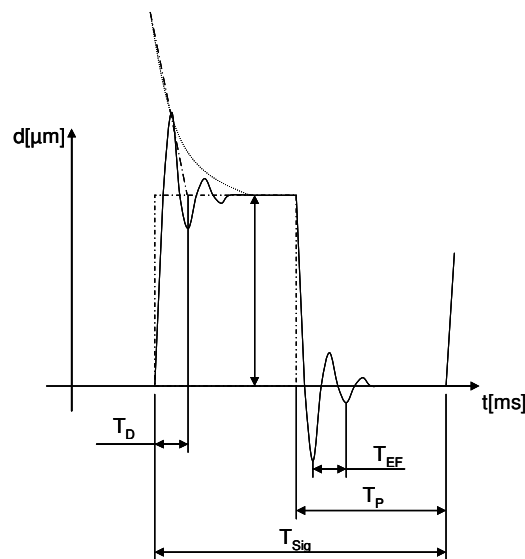


Abb. 100: Idealisierte Sprungantwort.

Die erste Eigenmode der Membranschwingung weist die größte Amplitude auf. Sie ist von zahlreichen weiteren Schwingungen überdeckt. Die grundsätzliche Signalform kann aber sicher extrahiert werden. Die Eigenfrequenz kann durch

$$f = \frac{1}{T_{EP}} \quad 72$$

ermittelt werden. Anhand dieses Wertes kann nach Abschnitt 3.5 auf die Plattensteifigkeit der Struktur zurück geschlossen werden.

Zur Ermittlung der Dämpfung wird eine Idealisierung vorgenommen. Die Struktur wird als Einmassenschwinger betrachtet. Hier gilt für die Dämpfung:

$$D = \frac{\vartheta}{\sqrt{4\pi^2 + \vartheta^2}} = \frac{\ln\left(\frac{y_m}{y_{m+1}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{y_m}{y_{m+1}}\right)\right)^2}} \quad 73$$

y_m und y_{m+1} sind jeweils zeitlich aufeinander folgende Maxima der Verformung. Das Maß D kennzeichnet den Rückgang dieser Amplitude.

Profilschnitte:

Eine weitere wichtige Größe zur Verifikation der theoretischen Aussagen ist die Verformungskennlinie über den Durchmesser oder die Länge der Wandler. Dazu kann die Probe in verschiedene Raumrichtungen verfahren werden. Die Wegdifferenzen werden mit einem Taster mit hoher Genauigkeit erfasst (Auflösung $<1\mu\text{m}$). Es werden Messreihen mit einem Punktabstand von $0,5\text{mm}$ durchgeführt. Der Messwert an der jeweiligen Position wird mit dem Laservibrometer erfasst. Der Aufbau kann Abb. 101 entnommen werden.

Die Messung lässt Rückschlüsse auf die Wendepunkte der Krümmung und damit auf die richtige Lage der strukturierten Elektroden zu. Zudem kann die Ausbildung höherer Eigenmoden auf Grund der charakteristischen Verformungsprofile untersucht werden. Besonders bei der Erfassung der maximalen Verformung müssen bei einer dynamischen Messung höhere Eigenmoden sicher ausgeschlossen werden.



Abb. 101: Messaufbau zur Aktuationsvermessung.

D. Rapid-Prototyping der Versuchsmuster

In diesem Abschnitt werden die Schritte bei der Fertigung für die Labormuster der Membranwandler erklärt. Dazu wird im Besonderen auf die Strukturierung der Elektroden eingegangen. Die Oberfläche der Piezokeramik und die verwendeten Werkstoffe stellen hier eine besondere Herausforderung dar.

Ein wesentlicher Schritt bei der Herstellung der Aktoren ist die Aufbringung einer strukturierten Polarisation. Die Maßnahmen hierzu und die messtechnische Untersuchung werden in einem weiteren Abschnitt erläutert.

Im Anschluss daran wird die Montage bis zum einsatzfähigen Wandler beschrieben. Die Konstruktion des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Verformungen der Aktoren wird in Abschnitt III erläutert.

I. Erzeugung von Elektrodenstrukturen

1. Anforderungen an die Fertigung

Die dominierenden Anforderungen an die Fertigung stellen die Interdigitalstrukturen. Das Ziel ist hier die Herabsetzung der Ansteuerspannung. Dafür müssen die Spalten zwischen den Elektroden klein gehalten werden. Zudem ist es notwendig, beispielsweise für die Interdigitalelektroden des Längseffektwandlers, die Elektroden selbst sehr dünn auszuführen (siehe Abschnitt 4.2.4).

Die jeweilige Fertigungstechnik der Keramik bestimmt die Dicke des aktiven Teils der Wandler. Um homogene und hohe Felddurchflutungen zu erzielen, müssen für Interdigitalstrukturen bestimmte Verhältnisse von Dicke zum Elektrodenspalt erzielt werden. Tabelle 8 zeigt für verschiedene Fertigungsverfahren günstige Verhältnisse (Richtwerte nach [BOW06]).

Fertigungstechnik	Dicke der Keramik	Elektrodenbreite	Elektrodenspalt
Sol-Gel	<5 μm	$\approx 5\mu\text{m}$	$\approx 20\mu\text{m}$
Siebdruck	20-50 μm	$\approx 20\text{-}50\mu\text{m}$	$\approx 80\text{-}200\mu\text{m}$
Bulkkeramik	>100 μm	$\approx 100\mu\text{m}$	$\approx 400\mu\text{m}$

Tabelle 8: Günstige Elektrodenspaltbreiten für Längseffektwandler bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren für Piezokeramik.

Um für den Aufbau von Labormustern, die Anforderung an die Strukturierung der Elektroden zu erfassen, können folgende Abschätzungen getroffen werden:

Als PZT-Basismaterial wird eine Bulkkeramik mit 250 μm Dicke verwendet. Die hier eingesetzten Schalt- und Analogverstärker liefern Spannungen bis zu 200 V. Damit können Felder senkrecht zur Keramikebene von ca. 0,8 MV/m erzielt werden. Für Felder in der Keramikebene, die über die Elektrodenstruktur erzeugt werden, ist die Durchschlagsfestigkeit der Luft maßgeblich. Sie beträgt ebenfalls ca. 1,5 MV/m (Worst-Case). Damit sollten die Elektrodenabstände nicht kleiner als 130 μm ausgeführt werden.

Um eine den theoretischen Berechnungen nahe kommende Verformung zu erhalten, ist es notwendig, so wenig wie möglich der Keramik beim Strukturierungsprozess zu beschädigen. Deshalb ist bei abtragenden Verfahren die Strukturierungstiefe ein entscheidendes Kriterium. Zudem spielt der Wärmeeintrag bezüglich der Polarisierung und der Zerstörung der Keramik durch Spannungen eine Rolle und muss so gering wie möglich ausfallen.

2. Mikrostrukturierungsverfahren für die Elektrodenfertigung

Für die Elektrodenfertigung eignen sich grundsätzlich verschiedene Verfahren, die in der Mikrotechnik eingesetzt werden. Die Mikrostrukturierungsverfahren können grundsätzlich in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1. Additive Verfahren:

Hierzu werden alle Verfahren gezählt, die einen Werkstoff zum Volumen hinzufügen. Hauptsächlich werden diese Verfahren als Vorstufe für einen subtraktiven Prozess genutzt. Im Einzelnen sind folgende Verfahren Stand der Technik:

- *Aufdampfen* (Physical Vapor Deposition, Chemical Vapor Deposition) – Metall wird im Vakuum verdampft und schlägt sich am zu beschichtenden Bauteil nieder. Es können Schichtdicken von mehreren hundert Mikrometern erreicht werden. Die Maskierung für einen direkten Auftrag von Strukturen ist allerdings aufwändig. Sie lässt zudem für die hier gestellten Anforderungen nicht die notwendige Formfreiheit und Auflösung zu [ZHA03].
- *Sputtern* (Kathodenstrahlzerstäubung) – Ein Metall wird hier als Anode geladen und durch einen Kathodenstrahl zerstäubt der hochenergetische Teilchen enthält. Der so erzeugte metallische Niederschlag kann über den Strom und die Prozesszeit gesteuert werden. Die Abscheidungsraten liegen im Vergleich zu PVD/CVD sehr niedrig und die notwendigen Schichtdicken von mehreren Mikrometern ergeben sich erst nach einer langen Bearbeitungszeit (>Stunden) [LEV04].
- *Siebdruck* (Sinterprozess) – Hier wird eine mit Metallpartikeln versetzte Paste durch ein Sieb auf das Werkstück aufgetragen. Die Formfreiheit und das Auflösungsvermögen liegen im Bereich weniger Mikrometer. Die Schichtdicke kann über die verwendete Paste oder mehrfache Wiederholung des Vorgangs gesteuert werden. Nach dem Aufbringen der Paste wird die Schicht gesintert. Für ein selektives Aufbringen kann ein mit einem Lithographieverfahren strukturiertes Sieb verwendet werden[LAW95] [HIR05].

- *Aufdrucken* (Sinterprozess)– Mit Tintendruckköpfen können Tinten mit Metallnanopartikeln verdruckt werden. Diese müssen im Anschluss wie beim Siebdruck gesintert werden. Dieser Prozess kann komplett CAD- gesteuert durchgeführt werden. Damit eignet er sich für schnelle Bauteilgeometrieänderungen. Die Auflösungen sind mit Officedruck vergleichbar [JON05].

2. Subtraktive Verfahren:

Bei den subtraktiven Verfahren wird Material vom vorhandenen Bauteil oder Halbzeug entfernt. Sie erfordern eine Grundsicht, die mit einem additiven Verfahren erzeugt wird. Zu den Wichtigsten zählen hier:

- *Lithographie* – Im ersten Schritt wird eine Maske aufgebracht und strukturiert. Im Anschluss wird im Allgemeinen durch einen ätztechnischen Prozess das darunter liegende Werkstück strukturiert. Dieses Verfahren ist die Basis für die Halbleitertechnologie und ist deshalb sehr weit entwickelt. Die Auflösungen überschreiten bei weitem die in der Mikrotechnik notwendigen Anforderungen. Nachteilig für den Prototypenbau ist hier der Schritt der Maskenerstellung. Das Verfahren ist allerdings für die Großserienfertigung Stand der Technik [ROD99] [LOV01] [ROBI06].
- *Mechanische Bearbeitung* – Durch die Bearbeitung mit rotieren Werkzeugen im schleifenden oder schneidenden Prozess sind Strukturen kleiner als 50 µm möglich. Die Daten der Geometrie können direkt aus CAD-Programmen ausgeleitet werden. Das Verfahren ist allerdings vergleichsweise langsam.
- *Strahlbearbeitung* – Die Strukturierung durch einen energiereichen Strahl bietet ebenso den Vorteil der rechnergestützten Fertigung. Zudem können die Prozessparameter sehr genau eingestellt werden. Besonders Laser- und Elektronenstrahlen können extrem genau fokussiert werden. Es können Bearbeitungsdurchmesser unter einem Mikrometer erreicht werden [LEV04].

3. Laserablation

Der Laser bietet für die angestrebte Aufgabe besonders günstige Eigenschaften. Die Elektrodenstrukturen können rechnergestützt freigelegt werden. Damit ergibt sich gegenüber den maskenbasierten Verfahren ein Geschwindigkeitsvorteil bei der Fertigung kleiner Serien. Durch eine gezielte Wahl der Laserparameter kann eine geringe Schädigung des Keramikmaterials unter der Metallschicht erreicht werden, die auch von mechanischen Trennverfahren nicht erreicht wird. Zudem können Keramikplatten bearbeitet werden, ohne die vorhandene Polarisierung zu zerstören. Dies stellt einen Vorteil gegenüber den Sinterprozessen dar.

Für derartige Bearbeitungsaufgaben im Mikrobereich sind Nd:YAG weit verbreitet. Sie zeichnen sich durch eine besonders hohe Strahlgüte aus. Der Laserstrahl, der meist gepulst verwendet wird, kann durch einen Ablenkspiegel und eine Optik auf der Werkstückoberfläche

in zwei Richtungen verfahren werden. Dies ermöglicht eine so genannte 2,5 D Bearbeitung mit nahezu unbegrenzter Formfreiheit in einer Ebene. Die Tiefe der Abtragung wird durch die Anzahl von Bearbeitungswiederholungen gesteuert. Nd:YAG Laser besitzen zusätzlich den Vorteil, dass durch Frequenzvervielfachung verschiedene Ausgangswellenlängen möglich sind. Hierbei sind verschiedene Lasergeräte mit 1064 nm, 532nm und 355 nm üblich. Damit ergeben sich Vorteile für die Fokussierung und Vielfalt der bearbeitbaren Werkstoffe [LIE05].

Der für den Elektrodenabtrag in dieser Untersuchung verwendete Laser weist die in Tabelle 9 wiedergegebenen Kenndaten auf. Die Eignung, um Elektroden von Piezokeramik abzutragen wurde von *Wolf* grundsätzlich untersucht und nachgewiesen [WOL03].

Typ	LS8000/LS2000 (LS Laser Systems GmbH)
Lasermedium	Nd:YAG, gütegeschaltet
Wellenlänge	1064nm
Pulsintensität	1200 MW/cm ²
Pulsfrequenz	4kHz
Pulsdauer	>100ns

Tabelle 9: Eigenschaften der Laseranlage LS8000/LS2000 [WOL03].

Die Laserablation wird durch die Verwendung von fokussierter Strahlung erreicht. In Kombination mit so genannten Güteschaltungen werden hier Pulsbeleuchtungsstärken von über 1 GW/cm² erreicht. Dabei erhitzt sich das bestrahlte Material so stark, dass es sublimiert. Da die Wärmeeinflusszone aufgrund der Energiegradienten und der Pulszeiten extrem klein ist, kann von einem „kalten“ Abtrag gesprochen werden. Das bedeutet, dass wenig umliegendes Volumen geschädigt wird. Abb. 102 zeigt eine schematische Darstellung des Laserabtrags [LIE05].

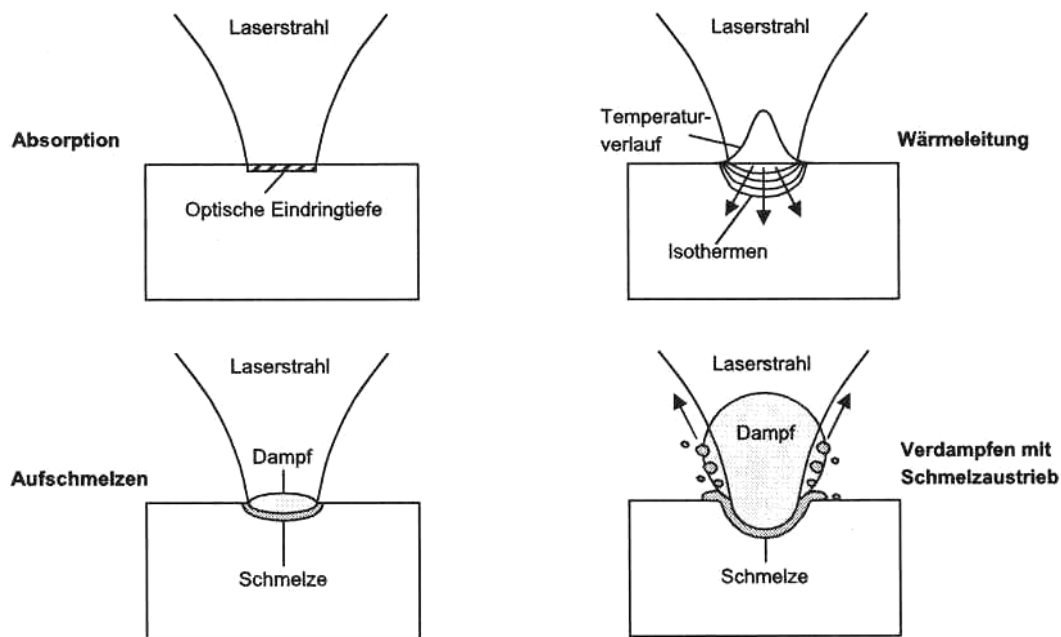


Abb. 102: Vorgänge beim Materialabtrag durch Laserablation [LIE05].

Durch einen Laserpuls entstehen, wie Abb. 102 zu entnehmen ist, Materialabträge die die Form von „Näpfchen“ aufweisen. Setzt man mehrere Pulse durch eine örtliche Verstellung des Laserstrahls nebeneinander, kann man auf diese Weise Gräben in das Werkstück ziehen. Wird dieser Vorgang auch für die zweite Raumrichtung durchgeführt, können flächige Vertiefungen erreicht werden. Die Anzahl der Wiederholungen dieses Vorgangs bestimmt die Tiefe der Bearbeitung.

Für die Laserablation von Metallelektroden spielen, gemäß diesem Fertigungsablauf, folgende Parameter eine wesentliche Rolle (Abb. 103) [LIE05]:

- **Laserleistung** – Die Laserleistung bestimmt das pro Puls abgetragene Volumen in einem nichtlinearen Zusammenhang. Das Verhältnis von Tiefe zu Breite der Abtragsstelle variiert ebenso mit der Laserleistung.
- **Verfahrgeschwindigkeit und Pulsfrequenz** – Diese Werte bestimmen die Überlappung der einzelnen Abtragsstellen. Die Wertkombination bestimmt damit maßgeblich die Tiefe einer abgetragenen Linie.
- **Linienversatz** – Der Abstand zwischen den einzelnen gelaserten Linien bestimmt für flächigen Abtrag das Überlappen von Abtragsstellen. Durch diesen Parameter wird ebenfalls die Tiefe der Struktur beeinflusst.

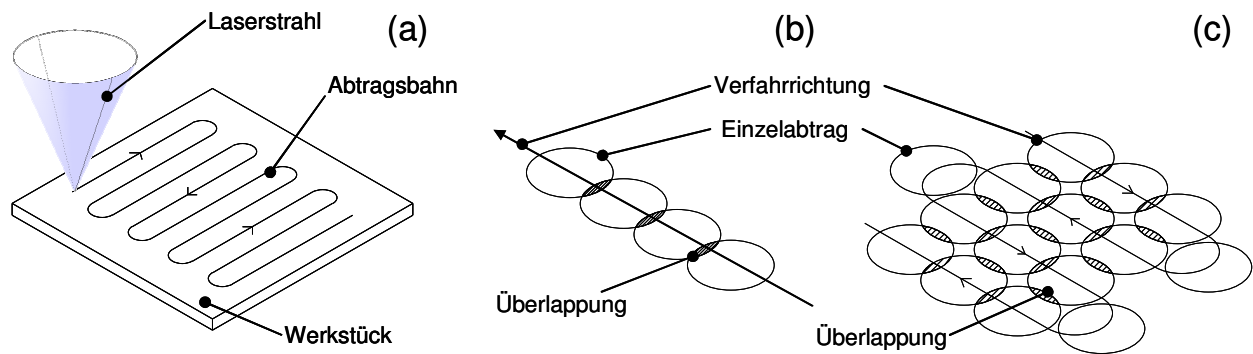


Abb. 103: Prozessablauf bei der Bearbeitung durch einzelne Laserpulse.

4. Laserablation von Elektrodenmaterial auf PZT-Keramik

Ziel der Bearbeitung ist eine sichere Trennung von Elektrodenbereichen bei einem optimal niedrigen Abtrag und Beschädigung der Keramik. Um die erforderlichen Parameter zu ermitteln, wird die Elektrode auf einem Piezoplättchen durch Linien in einzelne Bereiche unterteilt. Es werden die Keramiktypen PIC151 mit einer CuNi-Elektrode und AG 1876 mit Goldelektrode untersucht. Das Keramikplättchen selbst wird mit dem Laser aus dem Halbzeug vereinzelt.

Um Effekte durch das Austrennen der Probe mit dem Laser zu beobachten, wird die Probe ohne zusätzliche Unterteilungen vermessen. Die Messstrecke stellt der Bereich zwischen der Elektrode oben und unten auf der Platte dar. Eine Widerstandsmessung mit einem HP 4194A Digitalmultimeter zeigt sowohl für PIC151 als auch AG 1876 einen Widerstand über 120 Megaohm. Da die Messung bei 5 V und Raumtemperatur durchgeführt wird, kann sie die Anforderungen der Polarisierung nicht abbilden. Deshalb wird die Probe zusätzlich mit einer Hochspannungsquelle und einem Amperemeter untersucht. Das PZT wird zudem auf 200°C erhitzt. Der Vorgang wird in einem Bad mit Silikonöl durchgeführt, um elektrische Überschlüge durch die Luft zu verhindern. Bei diesem Versuch zeigt sich, dass die lasergeschnittene Probe aus AG1876 mit Goldelektrode bereits ab elektrischen Feldern unter 1,5 MV/m elektrisch durchbricht. Bei einer baugleichen Probe aus PIC 151 mit CuNi-Elektrode kommt es zur Leistungsgrenze der Hochspannungsquelle (1200 V, entsprechend 4,8 MV/m) zu keinem Durchbruch.

Wird die goldbedampfte Probe an den Schnittkanten geschliffen, können auch hier Felder über 4,8 MV/m angelegt werden, ohne dass es zu Überschlügen kommt. Deshalb muss auf eine Einwirkung des Lasers auf die Leitfähigkeit der Probe geschlossen werden. Der Ausschneidvorgang wird Schichtweise durchgeführt. Beim Durchdringen des letzten Materials verdampft der Laser dabei die Bodenelektrode. Diese kann sich dann an den Schnittkanten festsetzen und eine schwach leitfähige Schicht bilden. Die CuNi-Elektrode der PIC151 Probe würde bei diesem Vorgang oxidieren und ihre Leitfähigkeit verlieren.

In einem weiteren Versuch wird die minimale Elektrodenbreite ermittelt, die mit der Laseranlage erreichbar ist. Maßgeblich ist hier die Pulsleistung, die über den Lampenstrom

variiert werden kann. Es wird eine einzelne Linie über die Struktur gelegt. Diese wird mit einer konstanten Pulsüberdeckung und konstanter Pulsfrequenz gelasert.

Die Variation des Lampenstroms zeigt, dass ab einer bestimmten Schwelle eine optisch sichtbare Veränderung stattfindet. Die gelaserte Linie verfärbt sich sowohl bei AG1867 als auch bei PIC151 dunkel. Nahe am Schwellstrom der Laserlampe für den Abtrag können auf der Linie vereinzelt Punkte beobachtet werden, auf denen Abtrag stattgefunden hat.

Die Widerstandmessung über die Linie zeigt, dass im Falle einer optisch durchgängigen Linie der Widerstand bereits außerhalb des Bereichs des Messgerätes liegt ($>120 \text{ M}\Omega$). Im Falle der unregelmäßig bearbeiteten Linie in der Nähe des Schwellstromes liegt wie bei unbearbeiteter Elektrode ein Kurzschluss vor.

Die minimale Linienbreite mit sicherer Trennung der Elektrodenbereiche beträgt beim verwendeten Lasersystem $40 \text{ }\mu\text{m}$. Eine Ablation im Sinne einer Vertiefung im bearbeiteten Spalt kann nicht festgestellt werden. Eine Rauheitsmessung zeigt nur eine Glättung der Keramikoberfläche. Dieser Befund lässt auf ein Anschmelzen der Piezokeramik schließen. Bestätigt werden kann dieses Bild durch eine REM Aufnahme. Bereiche, die mit dem Laser unter den angegebenen Bedingungen bearbeitet wurden, zeigen eine verschmolzene Struktur. Im nicht bearbeiteten Bereich sind deutlich die Körner der gesinterten Keramik zu sehen. Ein Abtrag in die Tiefe kann auch optisch nicht festgestellt werden (siehe Abb. 104).

Zur weiteren Charakterisierung wird die Durchschlagsspannung mit der Hochspannungsquelle ermittelt. Die Probe wird kalt und auf der erhöhten Temperatur von 200°C vermessen, um wieder eine Übertragbarkeit auf Polarisierungsvorgänge zu ermöglichen. Im Ergebnis zeigen sich starke Streuungen. Trotz der optisch gleichen Trennbreiten ergeben sich Messungen der Durchschlagsspannung von 350 bis 800 V. Dies kann zum Einen auf Spitzeneffekte durch den rauen Rand der Trennung und zum Anderen auf in der Trennfuge zurückgebliebene leitfähige Partikel zurückgeführt werden. Die Durchschlagsspannungen entsprechen Feldstärken von ca. $10 - 20 \text{ MV/m}$ und stellen bei Raumtemperatur für die Betriebsfeldstärke von bis zu $1,5 \text{ MV/m}$ keine Einschränkung dar. Bei erhöhter Temperatur zeigt sich, dass bei der goldbelegten Probe die Durchschlagsspannung fällt. Hier können bereits Feldstärken von weniger als 3 MV/m zu einem elektrischen Durchschlag führen. Damit ist ein vollständiges Polarisieren nicht möglich.

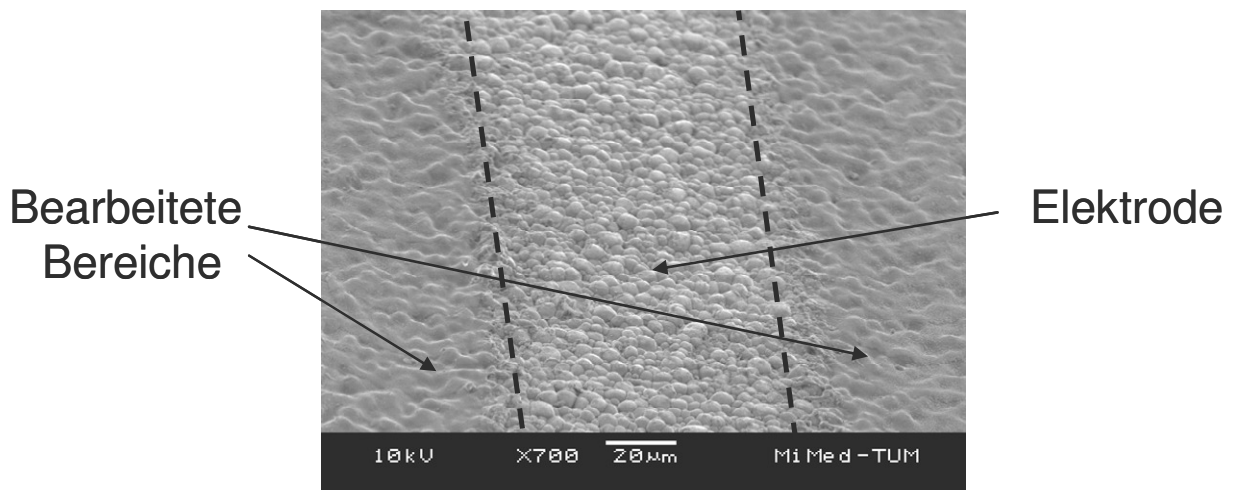


Abb. 104: Rasterelektronenmikroskopie einer mit dem Laserstrahl abgetragenen Goldelektrode auf PZT-Keramik.

Auch eine Vertiefung der Trennung durch mehrmaliges Überfahren ist im Sinne einer Minimierung der Schädigung der Keramik nicht zweckdienlich. Für Labormuster mit strukturierter Polarisierung wird auf Grund dieses Ergebnisses Keramik mit CuNi-Elektrode verwendet.

5. Produktion von Piezoplättchen mit strukturierten Elektroden

Die ermittelten Laserparameter können nun eingesetzt werden, um die verschiedenen Wandlerstrukturen zu erzeugen. Die Grundlage bildet eine CAD-Datei der zu erzeugenden Anordnung. Die Elektrodenstrukturen werden anhand von parallel versetzten Linien erzeugt. Der Abstand wird gemäß dem gewünschten Pulsüberlapp gewählt. Für eine gleichmäßige Struktur wird er gleich dem Pulsabstand in Bearbeitungsrichtung gewählt. Automatische Schraffuren sind auf Grund der stark abweichenden Linienlängen wenig geeignet. Zahlreiche Positioniervorgänge führen hier zu erheblichen Bearbeitungszeiten. Zudem erzeugt die Laseranlage nach Positioniervorgängen einen so genannten Erstimpuls. Dieser ist im Allgemeinen wesentlich stärker als die Pulse bei kontinuierlicher Bearbeitung. Dadurch entstehen tiefere Gräben, die die Struktur schwächen. Bei der Erstellung der Struktur kann der Erstimpuls berücksichtigt werden und in unkritische Bereiche gelegt werden.

Besonders sehr dünne PZT-Plättchen zeigen im Anlieferungszustand teilweise eine starke, bereits optisch wahrnehmbare Krümmung. Eine Messung an einer Probe AG 1334 mit 130 µm Dicke zeigt auf eine Länge von 9 mm eine maximale Durchbiegung von ca. 25 µm (Abb. 105). Diese Durchbiegung liegt in der Größenordnung der Klebeschichtdicke, die zur Verbindung mit dem passiven Träger gebraucht wird. Wird die Keramik mit einfachem händischen Kleben auf den Träger aufgebracht, ergibt sich dadurch ein über die Breite des Aktors variabler Klebespalt. Für die Leistung der Aktoren hat dies entscheidenden Einfluss, da die Klebeschicht die Aktuation verringert. Zudem ergibt sich eine starke Streuung der Exemplare je nach Position des Schnittes auf dem Halbzeug. Platten mit zu großem Verzug werden vor der Fertigung von Labormustern aussortiert.

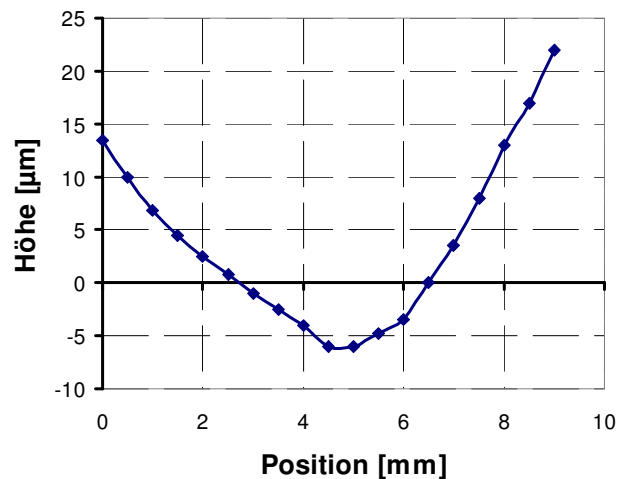


Abb. 105: Messung: Fertigungsbedingte Verformung einer 10x10 mm Probe PZT mit 130µm Dicke.

Der in Kapitel 4.2.2 beschriebene Wandler mit Hilfselektrode kann in wenigen Fertigungsschritten aus einem Keramikplättchen erzeugt werden (siehe Abb. 106). Er eignet sich deshalb besonders um mikrotechnische Funktionsmuster aufzubauen.

Die CAD-Datei enthält die Struktur der Elektroden. Diese kann in einer einfachen Überführung erzeugt werden. Eine weitere Datei enthält die Kontur der Wandlerstruktur. Um das Bauteil auszuschneiden, wird die Kontur mehrfach abgefahren. Die Außenkontur des Wandlers kann genutzt werden, um den Wandler über der Funktionsstruktur zu zentrieren. Im Anschluss an die Bearbeitung schließt sich ein Reinigungsschritt an, der die dann folgende optische Kontrolle erlaubt.

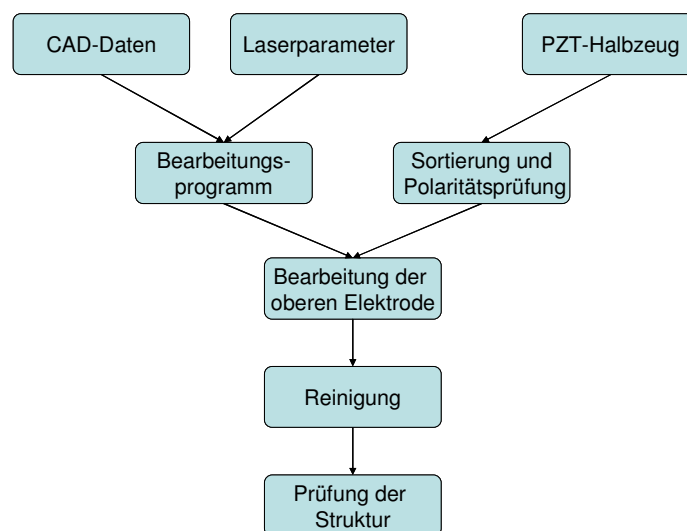


Abb. 106: Ablauf bei der Bearbeitung eines Wandlers mit Hilfselektrode

Bei Wandlern mit doppelseitiger Struktur kommt folgendes abgewandeltes Fertigungsverfahren zum Einsatz (Abb. 107):

Im ersten Schritt wird die Außenkontur des Piezoaktors aus einer Piezoplatte geschnitten. Es muss keine Positionierung beachtet werden.

Die Ausrichtung der Elektrodenstruktur erfolgt dann über einen Anschlagwinkel. Wesentlich dabei ist eine exakte Ausrichtung zum Bearbeitungskoordinatensystem der Laseranlage, Dazu ist nicht nur eine exakte Bestimmung des Nullpunktes wichtig, sondern auch die Winkelstellung des Anschlags gegenüber den Koordinatenachsen. Damit es nicht zu Positionierfehlern durch Schmutzpartikel kommt, werden allen folgenden Schritten Reinigungsschritte zwischengeschaltet.

Das Bauteil kann jetzt mit Hilfe des Anschlagwinkels auf der Vorder- und Rückseite bearbeitet werden. Den Abschluss bildet wieder eine Prüfung der Bearbeitungsergebnisse. Die Keramik kann jetzt den notwendigen Polarisierungsschritten unterzogen werden.

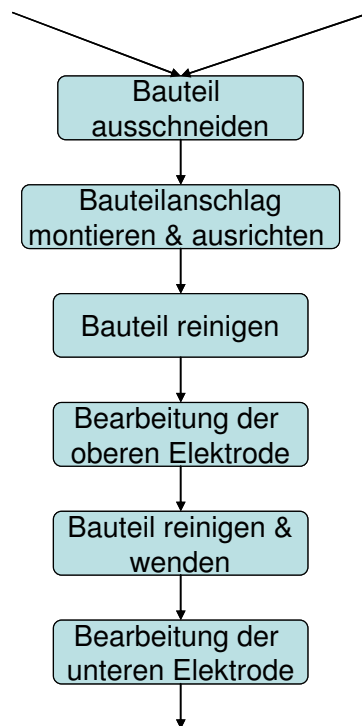


Abb. 107: Prozessablauf bei der Bearbeitung zweiseitiger Elektrodenstrukturen

6. Prüfung der Elektrodenstrukturen auf PZT-Keramik

Eine erste Untersuchung der Elektroden erfolgt unter dem Lichtmikroskop. Dabei wird die Probe je nach Bauteiltyp entweder im Auflicht- oder im Durchlichtverfahren betrachtet.

Auflichtverfahren:

Im Auflicht zeigen sich grobe Fehler bei der Strukturierung. Abb. 108 zeigt eine mikroskopische Aufnahme einer Wandlerstruktur. Hier sind im Übergangsbereich von den Versorgungsleitungen zu den Interdigitalelektroden Schwächungen der Elektrodenbreiten durch Laserfehler zu erkennen. Diese Schwächungen können später zu Funktionsstörungen führen und erfordern eine Anpassung der Laserparameter.

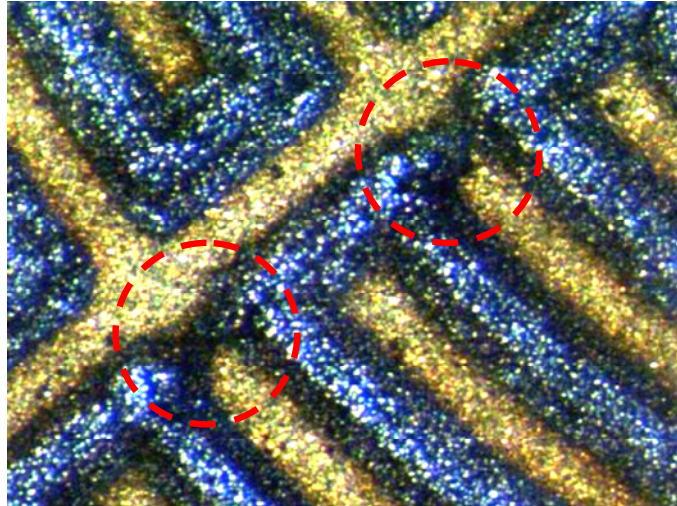


Abb. 108: Fehler bei der Elektrodenstrukturierung in der Auflichtmikroskopie

Durchlichtverfahren:

Wandler, die auf ihrer Unterseite keine Elektrode aufweisen, können auf Elektrodenbrüche auch im Durchlicht untersucht werden. Dies wird ermöglicht, da die Keramik in einem gewissen Maß für sichtbares Licht durchlässig ist. Abb. 109 zeigt die Elektrodenfehler des bereits im Auflicht gezeigten Wändlers in einer Durchlichtmikroskopie (DLM).

Zusätzlich kann die DLM bei Wandlern mit beidseitiger Elektrodenanordnung eingesetzt werden. Hier ist die Zentrierung der Strukturen zueinander ein wichtiges Kriterium und ist wesentlich für die im Betrieb erreichbare Aktuation. Im Durchlichtverfahren kann die Zentrierung direkt beobachtet und der Versatz vermessen werden.

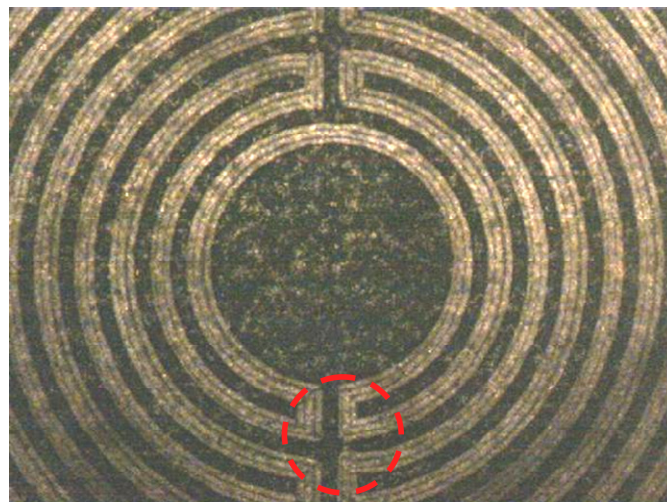


Abb. 109: Mikroskopische Durchlichtaufnahme einer gelaserten Elektrodenstruktur mit einem Laserfehler.

Bei großen Strukturen kann eine Funktionsprüfung mit einem Durchgangsprüfer durchgeführt werden. Dazu müssen alle Teile, beispielsweise einer Interdigitalstruktur, einzeln kontaktiert werden. Zudem wird durch eine Widerstandsmessung geprüft, ob eine vollständige Trennung der Elektroden erfolgt ist. Beide Vorgänge bringen durch Kontaktierprobleme aber eine

gewisse Unsicherheit mit sich. Deshalb wird im Folgenden ein Verfahren gezeigt, bei dem die Proben mit der für den Betrieb der Wandler eingesetzten Kontaktierung geprüft werden können. Deshalb gibt dieses Verfahren sofort Aufschluss, welche Bereiche beim Betrieb der Wandler einem elektrischen Feld ausgesetzt sind.

Funktionsfähige Elektroden laden sich beim Anlegen einer Gleichspannung auf. Diese Aufladung kann im REM mit Hilfe des Potentialkontrastverfahrens direkt sichtbar gemacht werden. Dazu werden Leitungsdurchführungen in den Druckbehälter (Hochvakuum) eingebracht. Werden die Elektroden geladen, verändert sich das Rückstreuverhalten der Sekundärelektronen, die von der Probe ausgehen. Da diese Elektronen zur Generierung der Bildinformationen im REM genutzt werden, verändert sich der optische Eindruck. Positiv geladene Flächen werden deutlich heller und negativ geladene dunkler als im Normalbild dargestellt. Die Schaltung in Abb. 110 zeigt die Anordnung zur Bauteilprüfung (nach [SCHI05]).

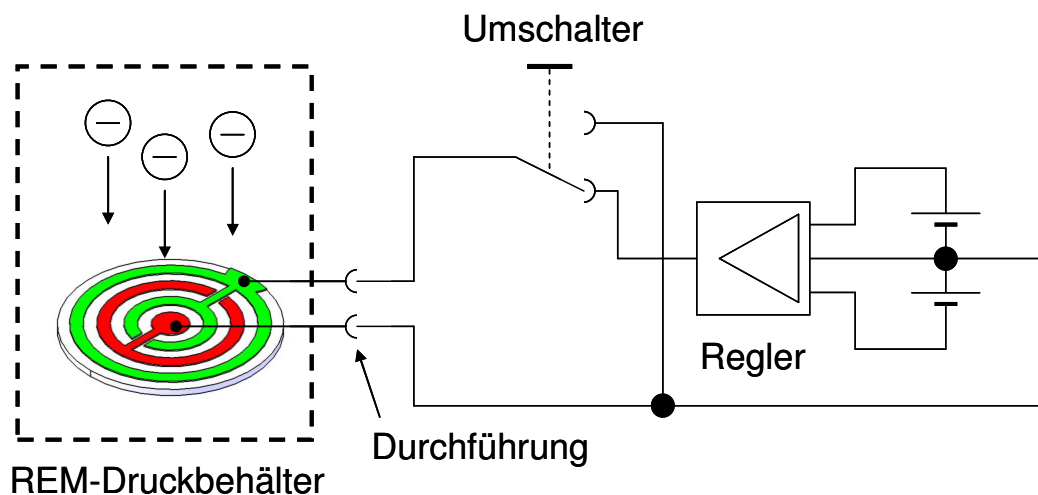


Abb. 110: Schematische Abbildung der elektrischen Schaltung für das Potentialkontrastverfahren

Die Elektroden können bipolar angesteuert werden. Jeweils ein Elektrodenteil wird mit der Masse des REM verbunden (Verbindung mit dem Probenstisch). Der andere Elektrodenteil ist über einen Spannungsregler zur stufenlosen Verstellung mit der bipolaren Spannungsquelle verbunden. Die Spannungsquelle liefert Spannungen von -40V bis +40V.

Die Abb. 111 zeigt die Ergebnisse für einen Wandler nach dem in Kap. 4.2.4 beschriebenen Aufbau. Bei bipolarer Ansteuerung sind deutlich Fehler zu erkennen. Eine Elektrode im Bereich der Interdigitalstruktur ist durch einen Fertigungsfehler nicht mit den übrigen verbunden (Abb. 111(b)). Zusätzlich kann man Bereiche erkennen, die eine niedrigere Helligkeit als die übrigen Elektroden aufweisen. Hier stellt ein Laserfehler (Engstelle) offensichtlich einen hohen Widerstand dar. Folge ist, dass die Elektrode auf einem anderen Potential als die Übrigen am selben Leiterzug liegt.

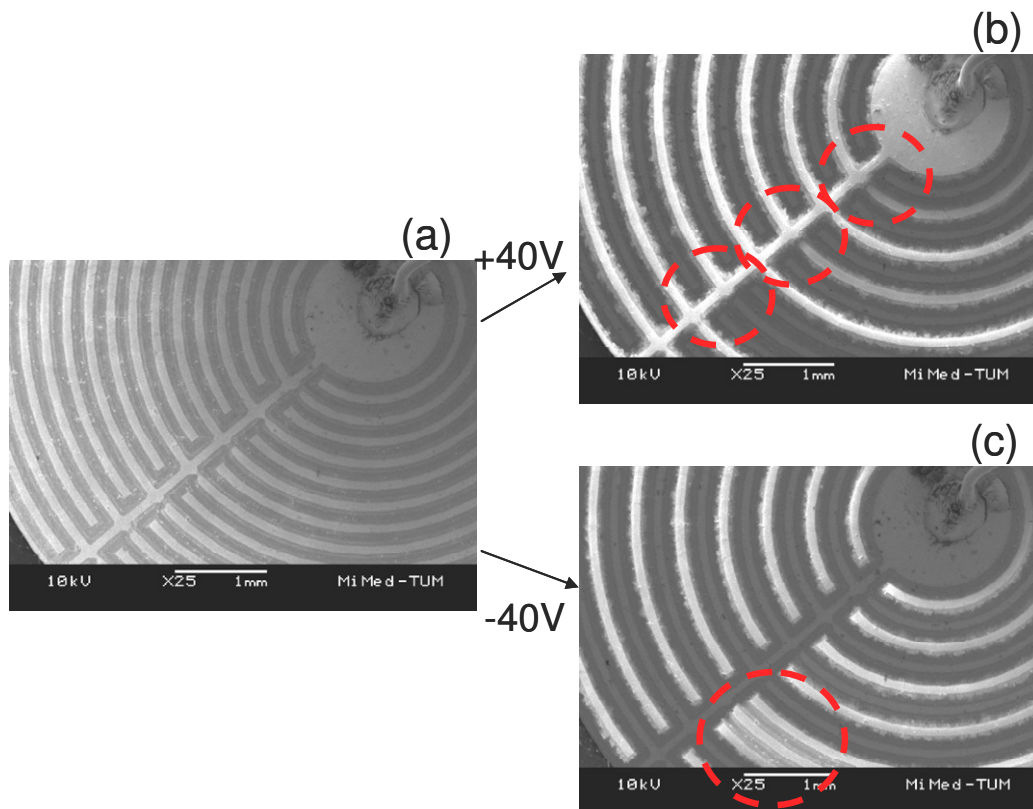


Abb. 111: Untersuchung der Elektrodenstrukturen mit dem Potentialkontrastverfahren. Normale REM-Aufnahme (a), positive Spannung (getrennte Elektroden und hohe Widerstände) (b) und induktiv beeinflusste Elektrode (c)

Das Bild mit negativer Spannung zeigt einen anderen Fehler: Hier sind drei nebeneinander liegende Elektroden hell. Die Elektrode ist, wie oben beschrieben, vom Leiterzug abgetrennt. Eine Ursache für die Aufladung könnte eine induktive Beeinflussung durch die Nachbarelektroden sein.

II. Strukturierte Polarisierung

Für Längseffektwandler ist eine Änderung der vom Hersteller vorgegebenen Polarisierung notwendig. In der Literatur werden verschiedene Prozesse für die Polarisierung gezeigt [JUU05] [WAN89] [LAW95] [DAR98]. Für die Labormuster wird die Keramik des Typs PIC 151 eingesetzt. Anhand der Kennwerte aus der Literatur werden Polarisierungsversuche an einfachen Probengeometrien durchgeführt, um die Wirksamkeit des Verfahrens zu prüfen.

Dazu werden verschiedene Zustände der Keramik messtechnisch erfasst und miteinander verglichen:

Ausgangszustand – Im ersten Schritt wird der Anlieferungszustand der Keramik erfasst. Hierzu wird ein lasergeschnittenes Piezoscheibchen mit 10 mm Durchmesser mit einem Impedanzprüfstand vermessen. Abb. 112 zeigt den Messschrieb.

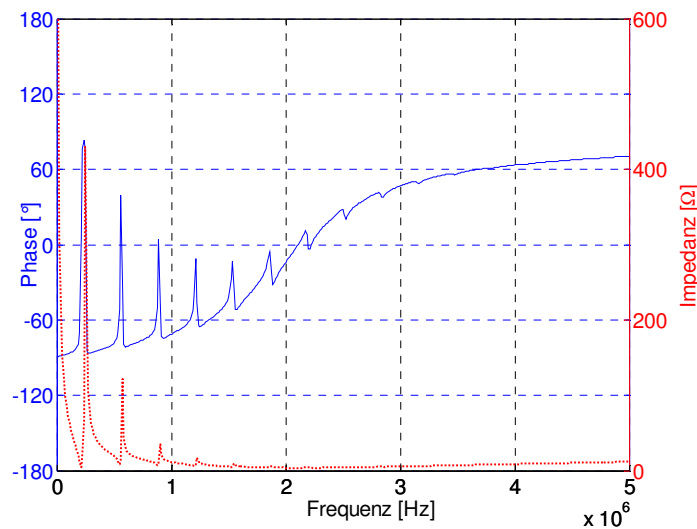


Abb. 112: Messung: Impedanz und Phase einer kreisrunden Piezoscheibe mit der vom Hersteller aufgetragenen Polarisation

Im Phasengang ist deutlich die Eigenfrequenz der d31-Schwingung bei 250 kHz zu sehen. Ebenso charakteristisch sind die Harmonischen. Bei hohen Frequenzen werden die Phasenhübe erwartungsgemäß geringer. Zusätzlich wird eine rechteckige Probe der Abmessung 17x5 mm mit dem Laservibrometer untersucht. Die freie Aktuationslänge für den d31-Effekt beträgt, bedingt durch die Einspannung, 15 mm. Um Kleinsignalparameter zu erhalten, wird die Probe mit 0,1 MV/m angesteuert. Die Messung ergibt eine Verformung von 316 nm. Zurück gerechnet auf den Kennwert d31 ergeben sich -210,6 pm/V. Die Abweichung zu den Herstellerangaben bezüglich d31 beträgt 1,5 Prozent.

Depolarisierung – Die Keramikproben werden bis über die Curietemperatur erhitzt (für PIC 151 ca. 250° C). Um die Temperatur gleichmäßig in die Keramik einzubringen, wird sie in Silikonöl erhitzt (Silikonöl AK350, Bender&Hobein GmbH). Die erhöhte Temperatur wird eine gewisse Zeit gehalten, um eine vollständige Depolarisierung zu erreichen. Die Versuche zeigen, dass nach einer Zeitspanne von 10 Min. die Polarisierung vollständig zurückgegangen ist. Abb. 113 zeigt die Impedanz und Phase nach der Temperierung.

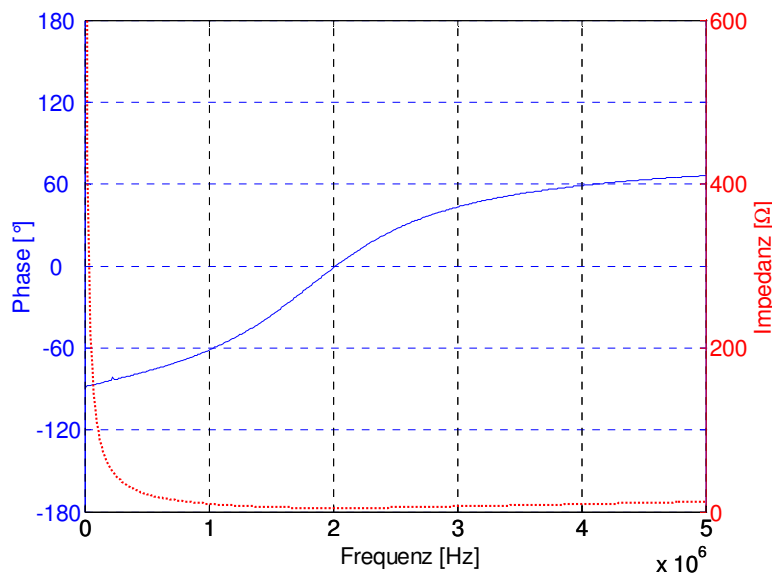


Abb. 113: Messung: Phase und Impedanz einer kreisrunden Piezoscheibe nach der Depolarisierung bei 250° C

Der Impedanzschrieb zeigt keine Sprünge bei der Phaselage. Dies lässt darauf schließen, dass keine elektromechanische Kopplung, also ein Piezoeffekt vorliegt. Die Depolarisierung ist folglich vollständig ausgeprägt. Auch eine Vermessung mit dem Laservibrometer zeigt die Wirksamkeit des Vorgangs.

Repolarisierung – Wie bei der Depolarisierung, wird auch bei der Polarisierung mit erhöhter Temperatur gearbeitet (hier 170° C), um die Domänenneuorientierung zu erleichtern. Zusätzlich wird an die Probe ein elektrisches Feld mit 3,5 MV/m angelegt. Um elektrische Durchschläge in der Luft zu vermeiden, wird die Probe unter Silikonöl kontaktiert. Für die Kontaktierung der unteren Elektrodenhälfte wird die Keramik auf ein Plättchen aus Edelstahl gelegt. Die elektrische Verbindung mit der Hochspannungsquelle erfolgt durch Waferprober. Bei der Vermessung einer mit der gleichen Methode repolarisierten, rechteckigen Probe mit dem Laservibrometer ergeben sich für den d31-Wert 206,6 pm/V. Dies entspricht 98,1% des Wertes, der für die Herstellerpolarisierung ermittelt wurde.

Abb. 114 zeigt den Impedanzmessschrieb einer repolarisierten Piezokeramik. Dieses Beispiel zeigt einen unvollständigen Polarisierungsvorgang. Bei vollständiger Polarisierung weicht die Messung nicht von den in Abb. 112 gezeigten Graphen ab.

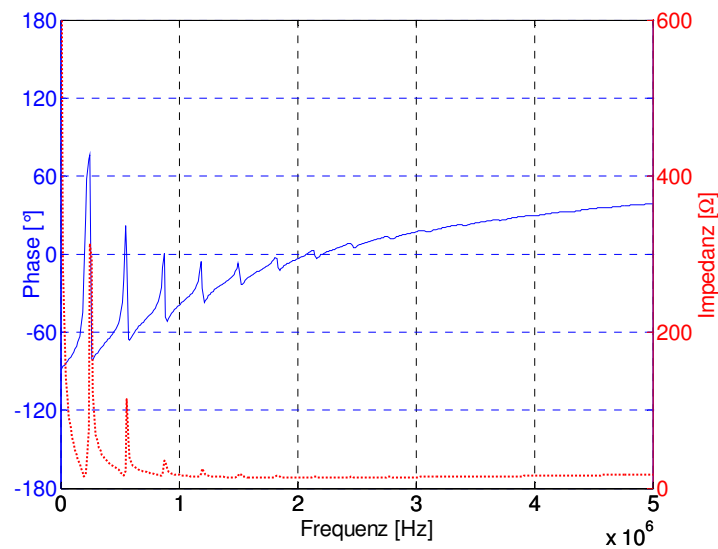


Abb. 114: Messung: Phase und Impedanz bei der Prüfung einer unvollständig repolarisierten Probe

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der strukturierten Polarisierung sind die in der Ebene der Keramik auftretenden Zugspannungen (siehe Abschnitt 4.2.4.). Bei „normaler“ Polarisierung zieht sich das Material in der Ebene auf Grund des zugleich wirkenden d31- und des d32-Effektes zusammen. Basierend auf der Orthotropie des Materials ergeben sich, wie bei der freien Temperaturdehnung isotroper Stoffe, keine Spannungen im Material.

Bei einer Polarisierung mit kreisrund strukturierten Elektroden dehnt sich die Keramik in radialer Richtung. Zudem wirkt in axialer Richtung eine Zugspannung. Die Ebene der Orthotropie liegt jetzt nicht mehr in der Keramikebene. Dies führt besonders am Rand der Struktur zu gefährlichen Spannungszuständen. Verstärkt wird der Effekt durch die Domänenneuorientierung. Hierbei werden durch die Änderung der Geometrie der Elementarzellen, bezogen auf den Anlieferungszustand, erhebliche Spannungen in das Material induziert (90°-Umpolarisierung, siehe dazu [LAW95]). Zudem wird die Polarisierung bei stark erhöhter Temperatur ausgeführt. Die Thermospannungen, die die gleiche orthotrope Ausprägung wie die Piezoaktuation aufweisen, überlagern sich diesem Effekt zusätzlich. Die Abb. 115(a) zeigt den charakteristischen Riss, der auf einen solchen Spannungszustand zurückzuführen ist, in einer Durchlichtaufnahme.

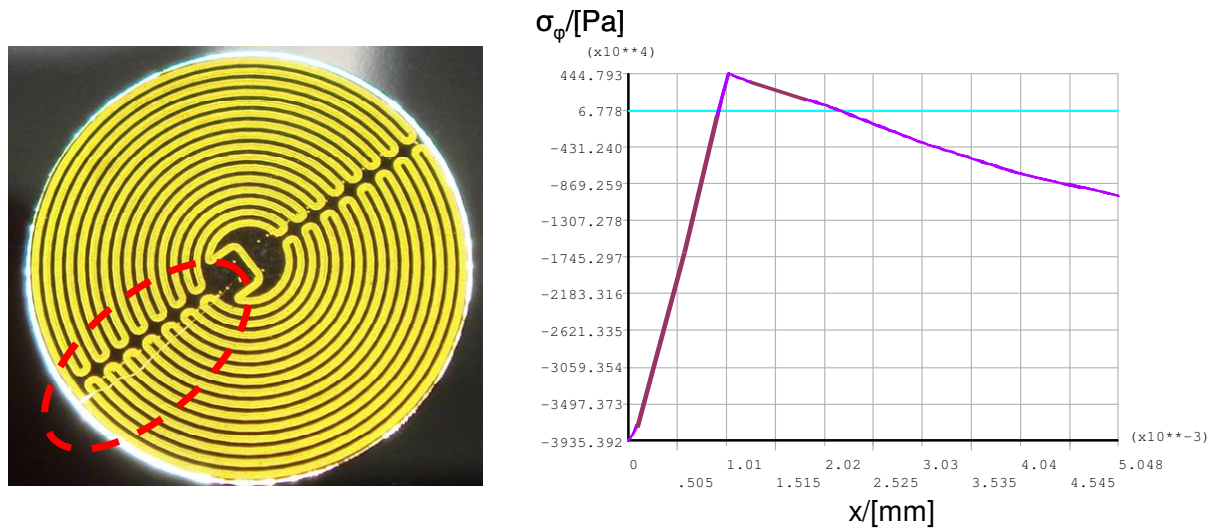


Abb. 115: Riss in einer Piezoscheibe durch mechanische Spannungen bei der Polarisierung. Riss in einer Durchlichtmikroskopie (a) und Simulation der Tangentialspannungen in der Struktur (b).

III. Aufbau der Versuchssysteme

Im Folgenden werden die Verklebung der Piezoplaten mit dem passiven Träger und der weitere Aufbau zur messtechnischen Untersuchung beschrieben:

Im ersten Schritt wird die Keramikplatte mit einem passiven Träger verbunden. Die Trägerplatten werden wie die Keramik selbst mit dem Laser bearbeitet. Für die hier aufgebauten Funktionsmuster kommt Pyrex zum Einsatz. Die Pyrexbauteile werden auf Grund der geringen Einkopplung infraroter Strahlung mit einem frequenzverdreifachten UV-Laser bearbeitet.

Wesentlichen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Verformung der Funktionsmuster und den Berechnungen hat die Klebeschicht zwischen der Piezoplatte und dem passiven Träger. Hier ist die Dicke maßgeblich. Nach Kapitel 3.4.5 nimmt die Verformung mit steigender Klebeschichtdicke ab. Die Wandler werden mit einem Zwei-Komponenten-Epoxidharz verklebt, das nach der vollständigen Aushärtung einen E-Modul von 3 GPa erreicht.

Zur Ermittlung der mit händischem Kleben erreichbaren Klebeschichtdicken, werden Versuchgeometrien mit Piezokeramik untersucht. Die Piezoscheiben, die die Außenabmessungen der Funktionsmuster aufweisen und die Träger (Pyrex- Glas), werden unverklebt und verklebt mit einer Bügelmessschraube bzgl. ihrer Dicke vermessen.

Die Verklebung wird von Hand bei erhöhter Temperatur (60° C) durchgeführt. Durch die Temperatur verliert der Klebstoff seine zähflüssige Konsistenz und überschüssiger Klebstoff kann durch leichte Bewegungen aus dem Klebespalt gedrückt werden. Nach der Belastung durch das Drücken mit der Hand zieht sich durch Kapillarwirkung wieder ein Teil des Klebstoffs in den Fügspalt und bestimmt damit dessen Dicke.

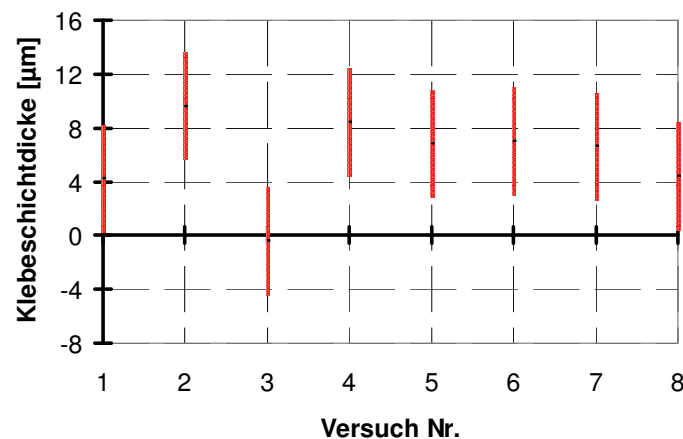


Abb. 116: Messung: Streubreite der Dicken händisch erzeugter Klebeschichten

Abb. 116 zeigt Messergebnisse für die Klebeschichtdicke. Die Dicke der Schicht berechnet sich, indem von der Dicke des verklebten Verbundes die Summe von Trägerdicke und Piezodicke abgezogen wird. Die Messunsicherheit bedingt, dass negative Klebeschichten ermittelt werden können. Die acht Muster zeigen aber, dass mit diesem Klebverfahren Bauteile mit einer Klebeschichtdicke von unter $15 \mu\text{m}$ mit hoher Wahrscheinlichkeit erzeugt werden können. Es ergibt sich dennoch eine starke Streuung, die es erforderlich macht die Funktionsmuster einzeln auf ihre Klebeschichtdicke zu vermessen und die Ergebnisse gegebenenfalls zu korrigieren.

Die Zentrierung der Labormuster erfolgt unter dem Mikroskop anhand der Außenkontur der Piezoplatte und des passiven Trägers. Die Aushärtezeit des Epoxidharzes ermöglicht eine ausreichende Zeitspanne zur Repositionierung.

Der so erzeugte Membranwandler wird auf einen Träger, der die Funktionsbaugruppe repräsentiert, aufgeklebt. Er erfüllt folgende Anforderungen:

- Einfache Handhabung der Wandler
- Große Steifigkeit gegenüber der Piezomembran
- Einfacher Zugang für Messmittel zum Wandler

Die Verbindung von Membranwandler und Träger erfolgt wieder durch händisches Kleben. Auch hier ist eine dünne Klebeschicht erforderlich, damit die Lagerung biegesteif ist. So kann sichergestellt werden, dass die freie Biegelänge des Aufbaus in guter Näherung den konstruktiven Vorgaben entspricht.

Die elektrische Kontaktierung der Aktoren erfolgt über eine Lötverbindung, da die dünne Elektrodenschicht in Verbindung mit der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Keramik der Hitzeeinwirkung beim Wirebonden nicht widersteht.

Da auch die Lötung die darunter liegende Polarisation schädigt, ist es wichtig die Lötstellen in unkritische Bereiche zu verlegen. Bei Wandlerformen mit strukturierten Elektroden kann die Lötstelle über der Lagerung ausgeführt werden. Die Referenzwandler werden an, für die Aktuation untergeordneten Stellen verbunden. Hierzu werden Bereiche gewählt, die im Betrieb einer geringen Krümmung unterliegen. Beim Standardwandler ist dies der Rand der Keramik.

Das Labormuster wird mit einem Verfahrtsch verschraubt. Dieser dient der Ausrichtung der Probe unter dem Messstrahl des Laservibrometers. Der Tisch kann in x- und y-Richtung (siehe Abb. 117) verstellt werden. Der Weg kann zusätzlich mit einem Taster erfasst werden, um Profilschnitte zu ermöglichen. Eine Verstellmöglichkeit in z-Richtung ermöglicht eine exakte Fokuseinstellung bei der Messung.

Der Verfahrtsch besitzt Klemmen für die elektrische Kontaktierung der Labormuster über die Anschlussdrähte. Gegenüber der Grundplatte existiert eine Isolierung, um Kurzschlüsse über die optische Bank zu vermeiden.

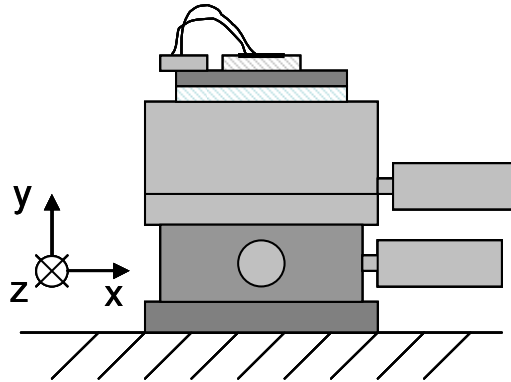


Abb. 117: Einrichtung zur Vermessung der Labormuster (schematisch).