

## **Antrag auf Gewährung einer**

## **Sachbeihilfe (Normalverfahren)**

# **Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden für die Mikrofluidik und die Mikrodosier- technik**

## 1. Zusammenfassung:

Gegenstand der Untersuchung sind Antriebselemente, die membranartig ausgebildet sind und den piezoelektrischen Effekt zur Wandlung von elektrischer Energie in Bewegungen nutzen. Solche Aktoren zeichnen sich durch einen besonders kleinen Bauraum und eine einfache elektrische Ansteuerung aus. Damit ist die Integration in ein Mikrosystem, beispielsweise einem chemischen Mikroreaktor, einfach zu realisieren.

Problematisch bei einem System das viele Aktoren auf engem Raum beinhaltet, beispielsweise einem Druckkopf, ist die Entkopplung der einzelnen Aktoren. Die derzeitige Lösung besteht in einer mechanischen Trennung einer größeren Piezokeramikscheibe in einzelne Wandler hauptsächlich durch Trennschleifverfahren. Diese Bearbeitung schränkt die Freiheiten bei der Konstruktion und Miniaturisierung stark ein.

In diesem Forschungsprojekt soll untersucht werden, ob die gewünschte Entkopplung allein durch Polarisierung und Strukturierung der Elektroden erreicht werden kann. Dazu werden verschiedene Elektrodenanordnungen auf membranartigen Strukturen untersucht. Zusätzlich soll untersucht werden, ob durch eine gezielte Strukturierung der Elektroden neben der Entkopplung der Aktoren auch Anordnungen mit einer günstigeren Materialausnutzung zu erzeugen sind. Hierbei kann im Gegensatz zum Stand der Technik der jeweils stärkste Piezoeffekt für die Aktuation genutzt werden.

Die Erzeugung von Aufbauten mit vielen Aktoren, die durch strukturierte Elektroden angesteuert werden, ermöglicht erheblich einfachere Miniaturisierung von Mikrosystemen als bisher.

## 2. Stand der Technik und eigene Vorarbeiten

### 2.1 Stand der Forschung

Piezomembranwandler sind, neben dem Einsatz zur Schall- oder Ultraschallerzeugung, hauptsächlich in zwei Anwendungsgebieten verbreitet: der Mikrodosiertechnik, 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 zum einen bei der Herstellung zur ersten Polarisierung. Im Betrieb wird zum Erzeugen einer Verformung ein Feld mit gleichem Richtungssinn an die dann separierten Einzelaktoren angelegt.

#### 2.1.1 Mikrodosiertechnik

In der Drucktechnik spielen Piezomembranaktoren hauptsächlich außerhalb der hinlänglich bekannten Bürodrukertechnik im industriellen Einsatz eine wichtige Rolle. Hier steht das Drucken oder das Dosieren von nicht wasserbasierten Flüssigkeiten im Vordergrund. Dies ermöglicht einen breiten Einsatz der Technik (z.B. 3D-Drucken mit Zwei-Komponenten-

Polymeren). Darüber hinaus ist für einen hohen Durchsatz eine hohe Düsenanzahl auf kleinen Raum erwünscht. Die Piezotechnik in Kombination mit Membranprinzipien eignet sich besonders, um diese Forderung zu erreichen [1].

Vielen Verfahren mit Piezotechnik ist dabei gemein, dass eine dünne Membran eine Wand einer mit der Druckflüssigkeit gefüllten Kammer bildet. Diese Membran wird durch den Piezoaktor deformiert und somit das Volumen der Kammer geändert. Große Teile des Differenzvolumens werden durch eine Düse als Tropfen ausgestoßen (Abb. 1) [1] [2]. Im folgenden werden die wesentlichen Fertigungsschritte bei Piezomembrandruckköpfen genannt:

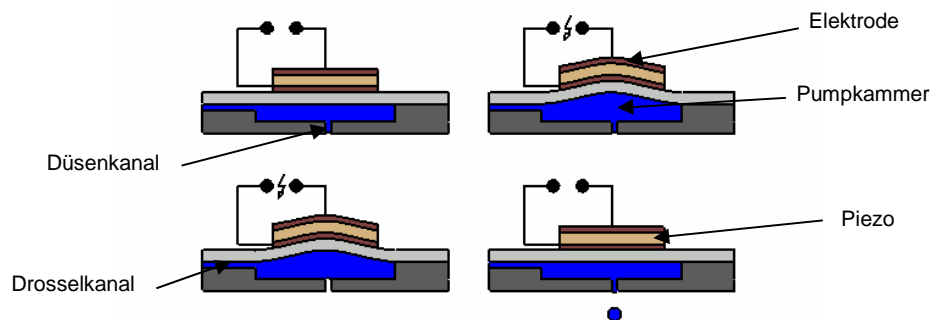


Abb. 1: Funktionsprinzip eines Piezomembrandruckkopfes. 1. Ruhestellung, 2. Ansaugen von Flüssigkeit, 3. Kapillare Füllung der Düse, 4. Tropfenausstoß

Fertigung beim Funktionsprinzip Unimorph (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. 2 links). Da dies sehr aufwendige 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) erzeugt. Dazu wird an den Randbereichen der Pumpkammer die Keramik entfernt (siehe Schema auf Abb. 1 und Abb. 2 rechts). Die Aktoren sind dann sowohl mechanisch als auch elektrisch voneinander getrennt. Die elektrische Kontaktierung der einzelnen Druckkanäle erfolgt mit oft der Wire-Bond-Technik. [3] [4]

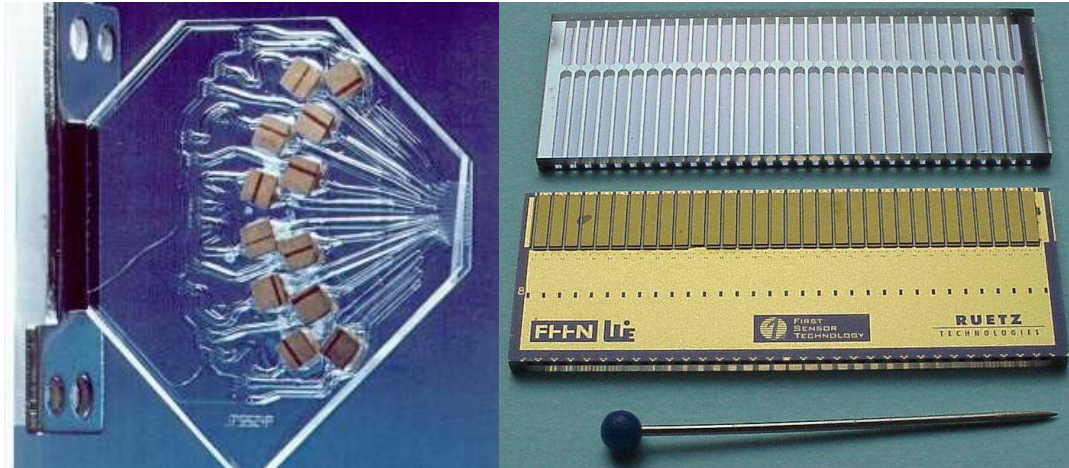


Abb. 2: Piezomembrandruckköpfe mit einer Vielzahl von Aktoren: Strukturierte Piezokeramik: links Epson SQ-2550 (1995) mit „Einzel“-aktoren, rechts Druckkopf im „Sniffman“ mit einer nach dem Aufkleben bearbeiteten Keramik[4]

Ein ähnliches Aufbauprinzip wird bei Druckköpfen mit Dickschichtpiezokeramik verfolgt. Die Keramik wird hier als pastoser Schlicker auf die passive Membran mit einem Siebdruckverfahren aufgetragen. Im Anschluss folgt ein Sinterprozess bei dem die Keramik bei derzeit ca. 800°C gebrannt wird. Darauf muss in einem weiteren Maskenprozess eine Elektrode zur Ansteuerung erzeugt werden. Diese kann dann, wie oben beschrieben, mit Wire-Bond-Technik verbunden werden (siehe Abb. 3 links und rechts). [5]

Die auf diese Weise gesinterte Keramik weist bei Weitem nicht die Kennwerte von Standardpiezokeramiken auf. Der Herstellungsprozess erfordert zudem eine stark erhöhte Temperatur. Die Basismaterialien für die Druckköpfe sind damit stark einschränkt. [6]

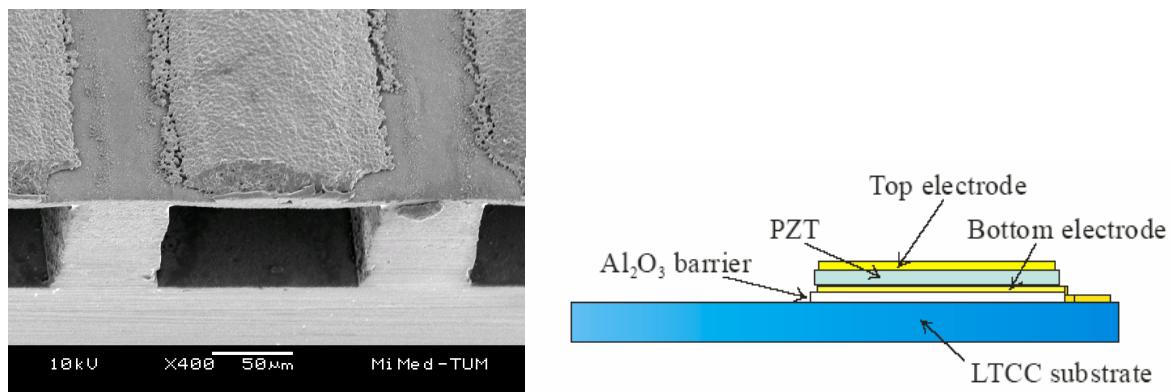


Abb. 3: Druckköpfe mit Siebdruckkeramik: REM Aufnahme eines Schnittes durch einen Druckkopf (Epson) für den Officebereich (200X)(links), Schichtfolge eines Wandlers mit Siebdruckkeramik[6]

Fertigung beim Funktionsprinzip Scherwandler:

Neben dem oben beschriebenen sog. Längs- oder Quereffekt (Die Polarisationsrichtung der Keramik liegt parallel zu elektrischen Feldrichtung) gibt es eine weitere bekannte Technik eine Membran zu verformen: den Piezoschereffekt. Dabei kann auf einen passiven Träger verzichtet werden und die Piezoplatte stellt selbst 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 das elektrische Felder senkrecht zur Polarisationsrichtung der Keramik entstehen. [7][8]

Der Schereffekt in einem solchen Aufbau weist allerdings auch 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. [9]

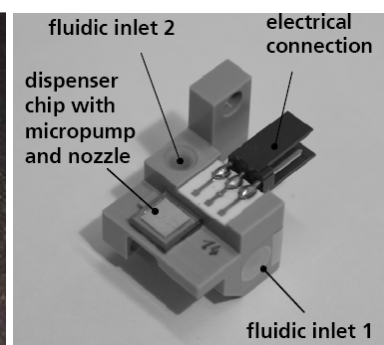
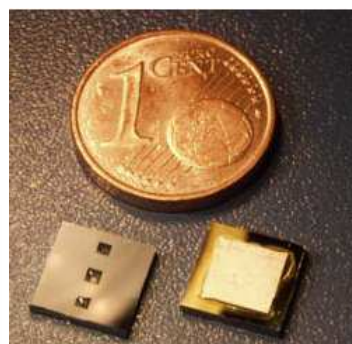
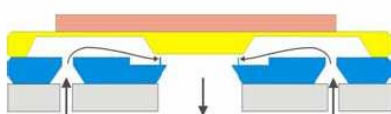
### 2.1.2 Flusserzeugung- und Steuerung in Mikrofluidiksystemen

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. [10]

Wird die Idee vom Lab-On-A-Chip verfolgt müssen alle Komponenten auf einen Chip integrierbar sein. Piezomembranaktoren sind hier ein möglicher Lösungsansatz. Gegenüber thermischen, magnetischen oder mit Druckluft betriebenen Systemen bieten solche Lösungen zahlreiche Vorteile [11][12][13]:

- einfacher Aufbau
- planare Struktur
- einfache Ansteuerung
- hohe Frequenzen
- kein Wärmeeintrag

Stand der Technik sind auch hier unimorphe Membranen mit einer strukturierten Piezokeramik. Die Membranen stellen hier gleichzeitig den Ventilsitz oder den Pumpstößel dar. Auch hier zeigt sich wieder der Nachteil der Piezomontage und der Justage. Dieser Nachteil ist wie bei Druckköpfen besonders deutlich, wenn bei Lab-On-A-Chip-Systemen eine Vielzahl von separat ansetzbaren Aktoren benötigt wird. Zudem müssen die einzelnen Aktoren wieder durch zusätzliche Drahtverbindungen an die Elektronik angebunden werden. [14][15]



*Abb. 4: Mikroventile des Fraunhoferinstituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: Aufbau und Funktionsschema (links), Siliziumchip mit geschnittener Piezokeramikplatte, Montageträger mit einer montierten Mikropumpe (rechts)[15]*

Kritik am Stand der Forschung:

Die bisherigen Bauformen von Piezomembranaktoren weisen folgende Nachteile auf:

- Bearbeitung von sehr abrasiver Keramik zur Entkopplung der Aktoren ist zeit- und kostenintensiv.
- Die Formfreiheit ist durch die notwendige meist schleifende Bearbeitung stark eingeschränkt.
- Als physikalisch wirksamer Effekt wird meist nur der vergleichsweise schwache Quereffekt genutzt
- Die Handhabung von kleinen und spröden Bauteilen ist aufwendig.
- Bei mehreren Aktoren pro Bauteil sind bei Einzelmontage mehrere Positionierschritte notwendig.
- Ein Zusatzschritt zur Kontaktierung der Elektrode, die mit dem Bauteil verklebt wird, ist notwendig.
- Zusätzliche Arbeitsschritte entstehen wegen der elektrischen Kontaktierung mit Wire-Bond-Technik.
- Dickschichtkeramik weist zu geringe Leistungskennwerte auf.
- Die hohen Herstellungstemperaturen bei Dickschichttechnik legen auf bestimmte Grundkörpermaterialien fest.

## **Literatur zum Stand der Technik**

[1] Le,H; Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology; Journal of Imaging Science and Technology; Vol. 42, Number 1, 1998, S.49ff

[2] Wehl, W; Tintendrucktechnologie: Paradigma und Motor der Mikrosystemtechnik; F&M 103; Carl-Hanser Verlag München, 1995, S. 318ff. und S. 486ff.

[3] Kyser, E.L.; Sears, S.B.; Method and apparatus for recording with writing fluids and drop projection means therefore; US Pat. 3,946,398

[4] Wehl, W.; Krause, P.; Kloeser, J.; Bump-Herstellung mit einem Drop-On-Demand Flüssigmetalldrucker; Herbstkonferenz der International Microelectronic and Packaging Society Deutschland; Oktober 2002; München

[5] Europäische Patentschrift: EP 0709200A1



- [6] Zarnik, M.; Belavic, D.; A Feasibility Study for a Thick-film PZT Bending-Mode Actuator; XXIX International Conference of IMAPS Poland Chapter; Koszalin-Darlowko, 2005,
- [7] Fischbeck, K. H.; Spectra Inc.; US Pat. 4,584,590; 1986
- [8] Beurer, G.; Kretschmer, J.; Function and Performance of a Shear Mode Piezo Printhead; IS&T's 14th International Conference on Digital Printing Technologies, Seattle, 1998, S. 621ff.
- [9] Zhou, Y.; Mesurement of the Displacement of a Shear Mode Piezoelectric Transducer Using Laser Doppler Vibrometer; IS&T's 14th International Conference on Digital Printing Technologies, Seattle, 1998, S. 23ff.
- [10] Ducr e, J.; Zengerle, R.; FlowMap- Microfluidics Roadmap for Life Sciences; Flow-Map consortium & EC; 2004
- [11] Carlen, E; Mastrangelo, C; Surface Micromachined Paraffin-Actuated Microvalve; Journal of Microelectromechanical Systems; IEEE ; Vol 11; 2002; S. 408ff.
- [12] D pper, J.; Untersuchungen zur Auslegung und Fertigung von Mikropumpen; VDI Verlag GmbH; Düsseldorf; 1997; S. 32ff.
- [13] Lee, C.; Guodong, S.; Arkadij, E. et al.; Multistep Synthesis of a Radiolabeled Imaging Probe Using Integrated Microfluidics; Science Magazine; Vol. 310, 2005, S. 1793ff.
- [14] 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
- [15] 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; 2001; S.924-927

## 2.2 Eigene Vorarbeiten

Der Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (vormals Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik, Prof. Heinzl) verfügt über langjährige Erfahrungen im Bereich der Mikrofluidik und Mikrodosiertechnik. Insbesondere wurden am Lehrstuhl bereits sehr früh die Einsatzmöglichkeiten von Piezokeramik zur Dosierung von Flüssigkeiten untersucht. Die Tintendrucktechnik ist ein wichtiges Betätigungsfeld am Lehrstuhl und wurde in zahlreichen Forschungsprojekten erforscht und weiterentwickelt.

### 2.2.1 Mikrodosierung mit Piezotechnik

Durch die Antragssteller wurden die unterschiedlichsten Dosiersysteme mit piezokeramischen Aktoren realisiert [16]. Dabei sind die Grundlagen für den Einsatz und den Umgang mit Piezokeramik gelegt worden (siehe hierzu auch [17]):

Ein Piezodruckkopf mit Piezoröhrchen. Dabei bilden die Röhrchen die oben beschriebene Kammer die mit Tinte gef llt ist. Wird an das Piezoröhrchen eine Spannung angelegt, kontra-

hiert es und stößt durch die entstehende Volumenänderung einen Tropfen aus. Die Keramik ist in einen Kunststoffkörper eingebettet der die Kanäle und die Düse bildet. Schwerpunkte wurden hier auf die Kontaktierung mit Elektroden und unterschiedliche Polarisierung von Keramik gelegt (Abb. 5) [18][19].

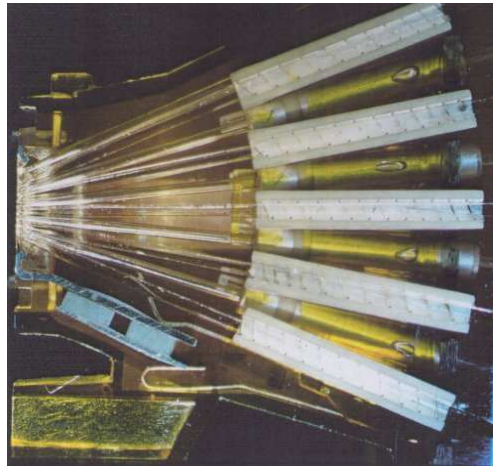


Abb. 5: Druckkopf mit Piezoröhrchen nach Heinzl: 5 Röhrchen sind geschnitten und es zeigt sich die spiralförmige Kontaktierung für die Elektrode

Im Forschungsprojekt INTEGER (Industrie Tauglicher EinzeltropfenerzeuGER) wurde ein Tropfenerzeuger mit Piezobiegefinger realisiert. Hier arbeiten zur Tropfenerzeugung Biegebalken die sich aus Silizium als passiver und PZT als aktiver Schicht zusammensetzen. Beide Bestandteile werden als Platten verklebt und anschließend mit der Wafersäge in einzelne Balken geschnitten. Hier wurden grundlegende Erkenntnisse zum Einfluss der Klebung und zum Strukturieren von Keramik gesammelt. Der Biegebalken stellt eine einfache unimorphe Struktur dar, die dem Membranwandler im Verhalten stark ähnlich ist (Abb. 6). [20][21] [22]

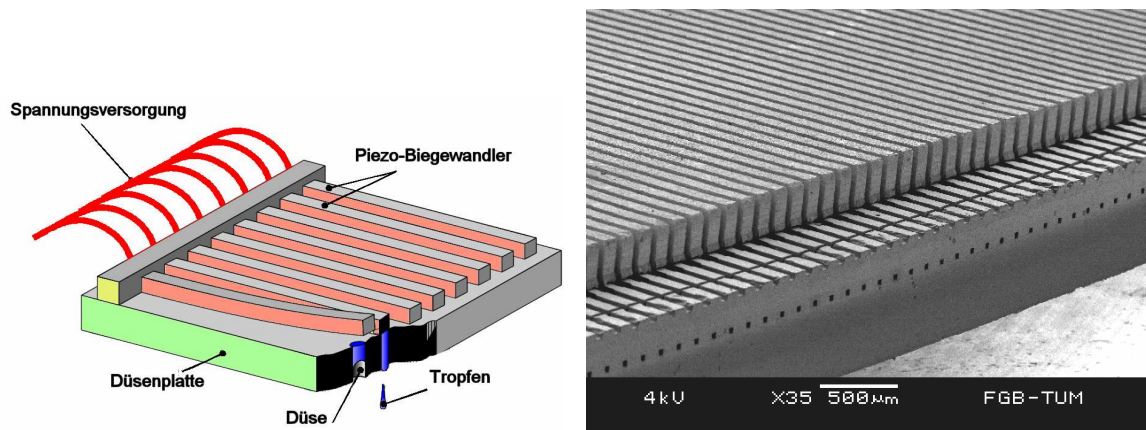
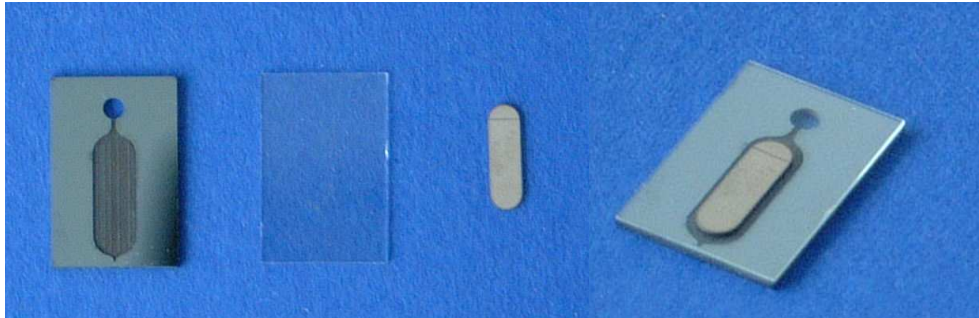


Abb. 6: Druckkopf im Projekt INTEGER: Funktionsprinzip (links), REM-Aufnahme (rechts)

Ein weiteres Thema dieser Forschungen war die Qualitätssicherung von piezoelektrischen Plattenmaterial als Bulk- oder Multilayerkeramik. Die mikrotechnische Topographievermessung von Bauteilen kann seitdem am Lehrstuhl präzise und schnell durchgeführt werden. Des weiteren sind Prüfmöglichkeiten für die Piezobiegefinger erstellt worden, die die elektromechanische Kopplung ausnutzen. So kann anhand der elektrischen Sprungantwort auf Bauteildefekte geschlossen werden. Diese Techniken können direkt auf Piezomembranaktoren übertragen werden. [23]



Am Lehrstuhl wurde eine Versuchsplattform aufgebaut, die es erlaubt Druckköpfe und andere Fluidstrukturen aufzunehmen. Diese gestattet es aufgebaute Funktionsmuster sehr schnell in einem Teststand zu beobachten und zu vermessen. Damit ergibt sich die Möglichkeit die Membranwandler nicht nur bzgl. ihrer Aktuation zu vermessen, sondern auch ihre Eignung bzgl. der wichtigen Anwendung Mikrodosierung direkt zu untersuchen. Ein Druckkopf dessen Aktuator sehr schnell ersetzt werden kann, steht ebenso zu Verfügung (Abb. 7). [24][25]



*Abb. 7: Druckkopf mit strukturierter Keramik für eine schnelle Evaluation von Aktorprinzipien in der Mikrodosiertechnik.*

### 2.2.2 Fertigungstechnik

Am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik sind RP- Verfahren wie Laserstrukturierung und das Bearbeiten mit einer Wafersäge etablierte Fertigungsverfahren für die Strukturierung unterschiedlicher Mikrobauteile. Damit können Glas und Silizium (als Beispiele für sehr harte Stoffe), normale Metalle und Kunststoffe bearbeitet werden. In verschiedenen Versuchen wurde bereits die Erzeugung von Elektroden in Silber und Kupfer gezeigt. [26][27]

### 2.2.3 Simulation von Mikrosystemen

Bezüglich der besonderen Schwierigkeiten die Mikrosysteme bei der Simulation mit sich bringen existieren am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik umfangreiche Erfahrungen. Alle in 2.2.1 beschriebenen Systeme wurden auch durch Simulationen modelliert. Dabei wurden sowohl die Fluidsysteme als auch die Piezoaktoren erfasst. Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Kopplung der unterschiedlichen physikalischen Domänen, Fluidmechanik, Mechanik und Elektrik. [28][29]

### 2.2.4 Mikrofluidiksysteme

Das RP-Verfahren Laserstrukturierung bietet zudem die Möglichkeit verschiedenste Fluidsysteme zu realisieren. Es wurden bereits zahlreiche Fluidsystemelemente realisiert: Kanäle, Mischer, Filter, Ventilsitze und Pumpkammern. Damit können Basisplattformen entwickelt werden, die es ermöglichen die zu untersuchenden Wandler direkt im jeweiligen Anwendungsfeld zu beobachten. Hierzu können spezielle Geometrien verwendet werden, die eine besonders einfache messtechnische Beobachtbarkeit ermöglichen. [30][31][32]

## Themenbezogene Veröffentlichungen Antragsteller

- [16] Heinzl, J.; Entwicklung der Tintendrucktechnik; Beiträge zur Verleihung des Aachener und Münchener Preises für Technik und angewandte Naturwissenschaften an Joachim Heinzl; Aachen; 2003; S.16-28
- [17] Reiländer, U.; Das Großsignalverhalten piezoelektrischer Aktoren; VDI-Fortschritt-Berichte; Reihe 8; Nr. 985; VDI Verlag; Düsseldorf; 2003
- [18] Heinzl, J.; Piezoelektrisches Antriebselement für Schreibdüsen; DP 2537767
- [19] Heinzl, J.; Wehl, W.; Rosenstock, G.; Kattner, E.; Drop-on-demand and acoustic Drop Shaping; SID 82 Digest; Vol. 13; CA; 1982; S. 152ff.
- [20] Scheicher, R.; Heinzl, J.; Ott, A.; Dynamical behaviour of piezoelectrical cantilever beams in an inkjet printhead; In: Proceedings of ESDA 04, 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis; Manchester, United Kingdom; July 19 – 22; 2004; S. 1 – 8
- [21] Ederer, I.; Mühlbauer, W.; Schullerus, W.; Tille, C.; Zollner, A.; Ink-Jet Printheads as Microdosing Pumps: Properties and Applications; Electrochemical Microsystem Technologies '96; Grevenbroich; 1996
- [22] Seitz, H.; Welisch, A.; A Fast SFF Process Using A Multijet Printhead; In: 27th ICC&IC; Beijing; China; 2000.
- [23] Schindler, M.; Rucha, J.; Heinzl, J.; A New Quality Management System for PZT Bending Actuators; In: Proceedings Microtec; 2003- 2nd VDE World Microtechnologies Congress, Hrsg.: VDE Verlag Berlin Offenbach; 2003; S. 335-339
- [24] Scheuenpflug, M.; Günther, D.; Kraus, T.; Irlinger, F.; Lüth, T.; 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
- [25] Irlinger, F.: Rapid Prototyping von Funktionsmustern in der Mikrotechnik; Habilitationssvortrag; Fakultät Maschinenwesen; Technische Universität München; 1.6.2006
- [26] Wolf, R.; Rapid Prototyping in der Mikrotechnik mittels Laserablation; VDI Fortschritt-Berichte; Reihe 2; Nr. 634; VDI Verlag; Düsseldorf; 2003
- [27] Heinzl, J.; Schulz, B.; Ederer, I.; Strukturierung von Mikrofluidsystemen am Lehrstuhl für Feingerätebau der TU-München - Rapid-Prototyping mittels Laserbearbeitung; Maschinenbau in Bayern - Partner der Welt; FB- Werbeservice München; 2002; S. 60 - 63.
- [28] Scheicher, R.; Kompaktmodell zur Systemsimulation eines Tropfenerzeugers mit Piezobiegewandlern; VDI Fortschritt-Berichte; Reihe 8; Nr. 1053; VDI Verlag; Düsseldorf; 2004

[29] Seitz, H.; Heinzl, J.; Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators; Journal of Micromechanics and Microengineering; Vol. 14; Issue 8; 2004; S. 1140ff.

[30] Grasegger, J.; Rapid Prototyping of Microfluidic Structures with Nd:YAG-Ablation; In: Proceedings of the 6th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components; Potsdam; 1998, S. 439ff.

[31] Irlinger, F.; Development strategy for innovative Microsystems; Workshop Microdosing Systems : Micropumps - the beating heart of microfluidics; Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; München; 2006

[32] Heinzl, J.; Paspas, R.; Rapid prototyping in Microsystems technology; Int. J. Product Development; Vol. I; No. 2; 2004; S. 155ff.

### 3. Ziele und Arbeitsprogramm

#### 3.1 Ziele

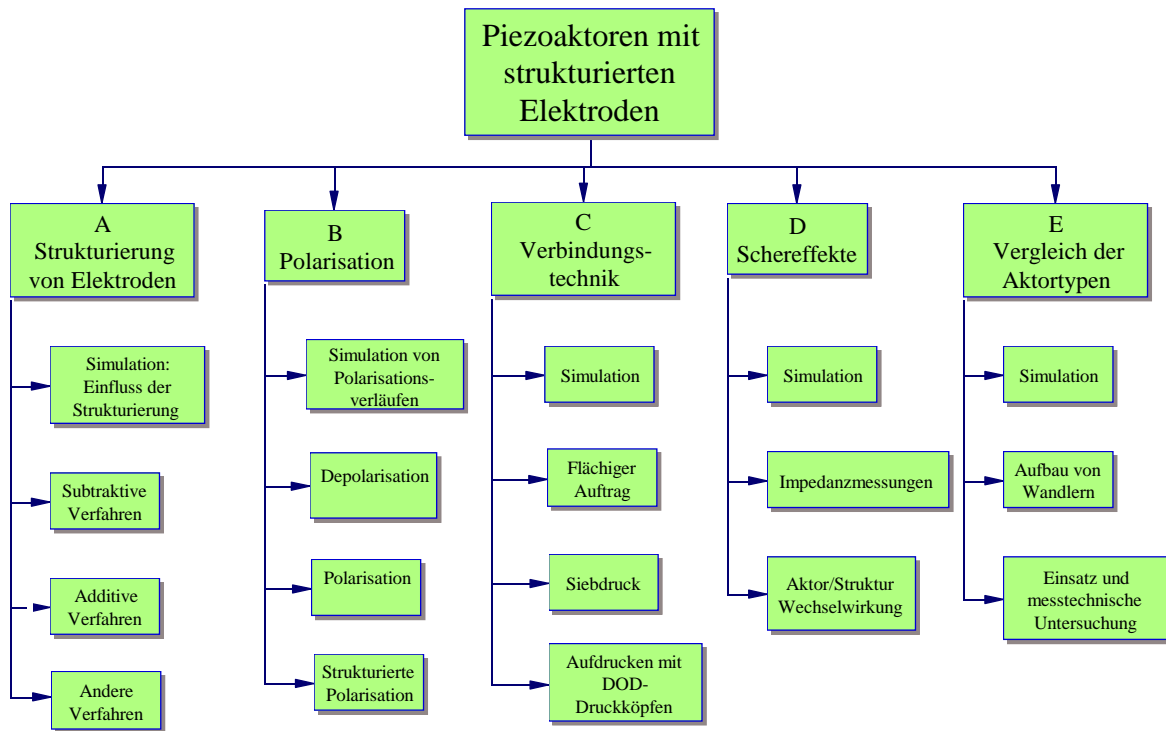
Die Untersuchung soll die Eignung von Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden als Membranaktoren zeigen. Dabei sollen durch die Elektroden- und Polarisationsstruktur Aktoren entwickelt werden, die die Leistungsfähigkeit von den Aktoren mit flächigen Elektroden und strukturierter, also vereinzelter, Keramik übertreffen. Zudem werden die Vorteile einer konstruktiv beeinflussbaren Verformung untersucht.

Die Fertigung und Handhabung der neuartigen Bauelemente wird mit den Aktoren des Stand der Technik verglichen. Zudem wird beurteilt, welche Neuerungen oder Vorteile im konstruktiven Umfeld eines Mikrosystems (z.B. Lagerreaktionen) zu berücksichtigen sind.

Um diese Forschungsfragen zu beantworten, werden folgende Einzelaspekte zentrale Aspekte der Untersuchungen:

- Mit welchen Verfahren können strukturierte Elektroden erzeugt werden? Welches Verfahren eignet sich am besten?
- Welche Vorteile bringt die strukturierte Polarisation und wie kann diese realisiert werden?
- Wie wird die Keramik mit einer passiven Membran verbunden? Welche speziellen Schwierigkeiten ergeben aufgrund der strukturierten Elektroden?
- Welche Besonderheiten bringt die Nutzung des Piezoschereffektes mit sich? Kann wie beim Längs- und Quereffekt eine Serienschaltung (Piezostapel) die erreichbare Verformung erhöhen?
- Welcher Aktortyp ist für welchen Anwendungsfall am geeignetsten?

## 3.2 Arbeitsprogramm



AP	Beschreibung	Zeit
A	<p>Strukturierung von Elektroden</p> <p>Die Strukturierung der Elektroden soll bzgl. der Herstellung untersucht werden. Hierbei stehen die Strukturfreiheit und evtl. schädigende Einflüsse im Vordergrund der Untersuchungen (Schädigung der Polarisation oder der mechanischen Struktur). Ziel des Arbeitspaketes ist die Auswahl eines Strukturierungsverfahrens anhand folgender Kriterien: Beste Auflösung, minimale Schädigung und einfache Anwendbarkeit.</p>	10 MM
A1	<p>Simulation von Membranaktoren mit strukturierten Elektroden. Dabei sollen folgende Punkte geklärt werden, um Parameter für die späteren Versuchsaufbauten zu gewinnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation theoretisch idealer Elektrodenanordnungen. Ziel: Leistungskennwert <i>maximale Verformung</i>.</li> <li>• Vergleich des Kennwertes <i>maximale Verformung</i> mit Wandlern die nur d31 oder d15-Effekte nutzen.</li> <li>• Schädigung durch die Strukturierung: Der zu ermittelte Kennwert ist der prozentuale Verlust an <i>maximaler Verformung</i>.</li> </ul>	2 MM

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulation von den auftretenden Feldstärken zur Ermittlung der technisch sinnvollen <i>Elektroden- und Schnittbreiten</i></li> </ul>	
A2	<p>Thema hier ist die Strukturierung von Elektroden auf Piezokeramik durch subtraktive Verfahren. Folgende Verfahren sind hierbei Stand der Technik in der mikrotechnischen Fertigung und eignen sich deshalb auch zur Elektrodenstrukturierung:</p> <p><b>LASER- Ablation:</b> Die Elektroden auf Piezokeramiken werden mit einem IR- und einem UV-LASER strukturiert. Dabei wird die mögliche laterale Auflösung untersucht. Ziel der Untersuchung sind die Kennwerte <i>minimale Elektroden- und Schnittbreite</i>. Zur Analyse werden die Proben mit dem REM und dem Digitalmikroskop untersucht. Zusätzlich soll die Tiefe der Schädigung in der Keramik analysiert werden. Dabei werden die Proben mit dem LASER- Vibrometer auf ihre <i>maximale Verformung</i> vermessen. Eine Aussage über Brüche oder andere sichtbare Schädigungen wird durch das Licht- und Rasterelektronenmikroskop ermittelt.</p> <p>Zusätzlich soll geprüft werden, ob der Vorgang des Elektrodenabtrags bei diesem Verfahren sicher während der Bearbeitung anhand einer Widerstandsverlaufsmessung erfasst werden kann. Somit kann eine Qualitätskontrolle entfallen. Es wird immer so wenig Material wie möglich entfernt.</p> <p><b>Lithographie:</b> Auf der Elektrode der Keramik wird eine Schicht Photolack durch Spin Coating aufgebracht. Diese wird im Anschluss mit dem UV-Laser belichtet. Der Wärmeeintrag kann dadurch geringer gehalten werden als bei der Ablation. Nach dem Entwickeln und Ätzen soll die Keramik bezüglich der in "LASER - Ablation" genannten Kriterien beurteilt werden. Die für den ätztechnischen Vorgang notwendigen Parameter (<i>Ätzmittel, Konzentration, Temperatur und Ätzdauer</i>) die speziell diesen Prozess charakterisieren, sollen für verschiedene Elektrodenmaterialien katalogisiert werden.</p> <p><b>Spanende Fertigung:</b> Eine weitere Versuchsreihe soll zeigen, ob eine spanende Fertigung Vorteile gegenüber den genannten Verfahren bringen kann. Die Arbeiten werden auf einer Mikrofräsmaschine mit Stirnfräsern ausgeführt. Es werden wieder die in „LASER-Ablation“ genannten Kriterien zur Analyse herangezogen.</p> <p>Zudem sollen Bauteile mit der Wafersäge schleifend bearbeitet werden. Hier ist Formfreiheit eingeschränkt. Bzgl. der Bearbeitungsgeschwindigkeit ist dieses Verfahren dem Stirnfräsen aber deutlich überlegen. Zudem lassen sich feinste Schnitte mit einer Breite von ca. 20µm erzielen. Ziel dieses Versuchs ist ein Vergleich der <i>Produktionszeiten</i> mit der Fräsbearbeitung unter Berücksichtigung der Ergebnisse beim Kennwert maximale Verformung.</p>	4 MM



A3	<p>Additive Verfahren zur Elektrodenstrukturierung: Es sollen zwei Verfahren mit Metaldampf untersucht werden: Aufdampfen und Aufspütern von leitfähigen Materialien. Dazu werden unterschiedliche Maskenverfahren angewendet und bezüglich der erzielbaren Auflösungen untersucht. Die erreichten Ergebnisse werden mit den in AP A1 genannten Methoden bewertet.</p> <p>Zudem soll das Aufdrucken von Silberleitlack untersucht werden. Dazu wird Lack mit Silbernanopartikeln durch einen Druckkopf in Form von Leiterbahnen aufgebracht und im Anschluss zu leitfähigem Silber gesintert. Mit den unter AP A1 genannten Methoden soll zeigen, inwieweit der Sinterprozess die Keramik oder die Polarisierung schädigt.</p>	2 MM
A4	<p>Andere Verfahren: Es wird untersucht ob die Elektrode als Zusatzschicht auf die Piezokeramik aufgebracht werden kann. Dazu wird eine Folie mit der strukturierten Elektroden auf die Piezokeramik geklebt. Hierbei würde keine Bearbeitung und damit keine Beschädigung der Keramik auftreten. Diese Art der Gestaltung bringt die höchste Freiheit der Konstruktion mit sich. Zusätzlich können elektronische Komponenten auf der „Platine“ aufgebracht werden. Das Ergebnis wird anhand der in AP A1 genannten Kriterien beurteilt.</p>	2 MM
B	<p>Polarisierung</p> <p>Die Polarisierung ist entscheidend für die erreichbare Verformung der Keramik. Eine strukturierte Polarisierung stellt eine Möglichkeit dar, die effektive Felddurchflutung der Keramik zu verbessern. Zudem können dadurch Effekte mit stärkerer Wirkung gezielt für die Aktuation ausgewählt werden (z.B. d33 statt d31). Eine maximale Ausnutzung der Keramik durch eine strukturierte Polarisierung ist das Ziel des Arbeitspaketes.</p>	8 MM
B1	<p>Die Möglichkeiten strukturierte Polarisierung mit einem Simulationsmodell abzubilden, sollen untersucht werden. Hierbei sollen ,anhand der Kriterien in AP A1, zuerst theoretisch ideale Wandler analysiert werden.</p> <p>Die <i>prozentuale Schwächung</i> die sich durch die technische Ausführung oder Fehler bei der Polarisierung und der Feldführung ergibt, ist hier die zweite wichtige Kenngröße.</p>	4 MM
B2	<p>Depolarisation von Piezokeramik: Verschiedene kommerzielle Bulkkeramiken werden zuerst thermisch depolarisiert. Während dieses Vorgangs wird die Temperatur aufgezeichnet und kontinuierlich die <i>maximale Verformung</i> am Laservibrometer gemessen. Ziel ist sichere Depolarisierung der Keramik für die nachfolgenden Polarisierungsversuche.</p> <p>Zusätzlich wird die Depolarisation durch hohe Gegenfelder in der Keramik untersucht. Dazu wird die Spannung angelegt und schrittweise erhöht. Zwischen den einzelnen Stufen wird jeweils wieder die <i>maximale Verformung</i> vermessen.</p>	1 MM
B3	<p>Polarisation von Keramik: Verschiedene depolarisierte Keramiken werden polarisiert. Messtechnisch wird dazu wie in B2 beschrieben vorgegangen. Ziel ist es, die erreichbaren</p>	1 MM

	Polarisationen zu beurteilen und diese mit den Prozessparametern ( <i>Temperatur, Dauer und Spannung</i> ) in Beziehung zu setzen.	
B4	<p>Strukturierte Polarisation:</p> <p>Auf die Keramiken werden strukturierte Elektroden aufgebracht. Diese werden als Polarisations- und Betriebselektroden genutzt. Es werden geeignete Wandler aufgebaut die eine Beobachtung der Verformung und damit der Polarisation zulassen. Dazu werden die Proben punktuell mit dem Laservibrometer vermessen. Die lokale Aktuation erlaubt bei bekanntem Feld Rückschlüsse auf die Polarisation.</p> <p>Es werden die zwei für die Gesamtverformung wichtigen Größen <i>Stärke der Polarisierung</i> und <i>räumliches Auflösungsvermögen</i> ermittelt.</p>	2 MM
C	<p>Verbindungstechnik</p> <p>Die Klebung stellt eine Grundlage für die Verbindung so unterschiedlicher Materialien wie Keramik und z.B. Glas dar. Die Porösität und die damit entstehende Oberfläche der Keramik, stellt hier eine Besonderheit dar. Die strukturierten Elektroden erzeugen hier aufgrund der Größe der Piezoplatte und Topologie der Oberfläche veränderte Anforderungen bei der Klebetechnik. Ziel des Arbeitspaketes ist eine Minimierung der negativen Einflüsse der Klebeverbindung (auf die <i>maximale Verformung</i>), die sich Vergleich zu einer theoretischen, direkten Verbindung von Piezo und einer passiven Membran ergeben.</p>	6 MM
C1	<p>Bei unimorphen Aktoren ist die Verbindungstechnik von Aktoren entscheidend. Die Klebung ist das bisher einzige Verfahren das die Verbindung realisieren kann.</p> <p>In einem ersten Schritt soll hier wieder ein Simulationsmodell erstellt werden, das die Parametrierung der verschiedenen Aufbauten ermöglicht. Als Einflussgrößen werden <i>Klebeschichtdicke</i> und <i>E-Modul</i> des Klebers untersucht. Als Ergebnis wird die Kenngröße <i>maximale Verformung</i> für spätere Vergleiche festgehalten.</p> <p>Zudem soll die Möglichkeit geschaffen werden, ungleichmäßige Klebeschichten zu simulieren, um den Einfluss und die Relevanz von Fehlern bei der Klebung zu ermitteln.</p>	2 MM
C2	<p>Händisches Erzeugen von Klebschichten:</p> <p>Es werden Funktionsmuster aufgebaut bei denen die Klebeschicht händisch aufbracht ist. Diese kann durch Aufstreichen mit einem Pinsel oder einer Rakel erzeugt werden. Dazu werden Reihen mit dem gleichem Verfahren erzeugt, um die Streuung der Ergebnisse abschätzen zu können. Es folgt ein Vergleich mit dem Ergebnis von C1.</p> <p>Händisch erzeugte Klebeschichten stellen für den Funktionsmuster- und Prototypenbau eine wichtige Herstellungstechnik dar.</p>	1 MM

C3	<p>Siebdruck:</p> <p>Hier wird der Kleber durch feine Gitter auf die passive Membran oder den Piezo gepresst. Dabei entsteht eine gleichmäßige Schicht. Durch die Strukturierung des Gitter kann im Vergleich zum händischen auftragen auch eine selektive Verklebung erreicht werden. Durch einen variablen Lochdurchmesser und Abstand kann hier die Klebeschichtdicke in gewissen Grenzen eingestellt werden. Die Ergebnisse werden mit C1 verglichen.</p>	1 MM
C4	<p>Aufdrucken:</p> <p>Es soll untersucht werden, ob das Aufdrucken des Klebers Vorteile in Fertigung mit sich bringt. Durch das berührungsfreie Verfahren kann die Piezooberfläche gleichmäßig beschichtet werden. Auch hier ergeben sich wie beim Siebdruck Möglichkeiten zur selektiven Klebung und Beschichtung. Die Ergebnisse werden mit C1 verglichen.</p>	2 MM
D	<p>Schereffekt</p> <p>Der Schereffekt zeigt gegenüber dem Längs- und Quereffekt die größten Verformungen. Zudem kann er bipolar betrieben werden und ist damit noch effizienter. Es sollen Aufbauprinzipien untersucht werden, die die größtmögliche Ausnutzung des Effektes realisieren und damit herkömmliche Wandler bzgl. der Verformungskennwerte übertreffen. Dazu wird eine Serialisierung von hintereinander geschalteten Wandlern ähnlich einem Piezostapel (unter Nutzung des Längs- oder Quereffektes) untersucht.</p>	4 MM
D1	<p>Die Wirksamkeit des Schereffektes soll untersucht werden, um einen Vergleich zu den transversalen Effekten zu ermöglichen (Kennwert: maximale Aktuation). Das Simulationsmodell soll so aufgebaut werden, dass ein reales Funktionsmodell des Scherwandlerpiezos einfache Messungen mit dem Laservibrometer ermöglicht. Anhand von Parameterstudien soll dann eine Optimierung der Geometrie stattfinden. Besonderes Augenmerk liegt hier in der günstigsten Elektrodenanordnung. Ziel ist ein Aktuationsprinzip, das durch addieren von Einzeleffekten, ähnlich einem Piezostapel, eine makroskopisch nutzbare Verformung der Membran ermöglicht.</p>	2 MM
D2	<p>Impedanzmessungen an Scherwandlern:</p> <p>Die oben genannten Effekte sollen zusätzlich durch Impedanzmessungen untersucht werden. Diese lassen über die Resonanzfrequenz auf die Größe der Aktuation schließen. Zusätzlich kann erkannt werden, ob der Aktuator in den durch die Simulation vorhergesagten Moden schwingt. Die Messung kann mit dem Simulationsmodell gekoppelt werden und kann damit als Eingangskontrolle für die Piezoaktoren dienen. Ziel ist eine Aussage über die erreichbaren Kennwerte beim <math>d_{15}/d_{24}</math>-Effekt.</p>	1 MM

D3	<p>Mechanische Belastungen im Scherwandler: Es werden verschiedene Simulationen bzgl. der mechanischen Belastungen in Piezoaktoren durchgeführt. Hierbei sollen Grenzwerte ermittelt werden, die Grundlage für eine Dimensionierung und eine Lebensdaueraussage sind. Sie sollen später in einen Vergleich zu anderen Wandlertypen gesetzt werden. Für die Verifikation sollen Versuchsmodelle erzeugt werden, die bis an ihre mechanische Belastungsgrenze gebracht werden.</p> <p>Zusätzlich werden die Lagerreaktionen untersucht. Diese spielen bei Druckköpfen eine Rolle. Zum Einen sind diese Lasten für die Lebensdauer beschränkend. Andererseits ist die Lagerreaktion für das Übersprechverhalten eines Druckkopfs von Bedeutung. Dieses Beschreibt die Wechselwirkung einzelner Kanäle im Druckkopf und ist eine wichtige Qualitätskenngröße für das sich ergebende Druckbild. Die Breite der notwendigen Lagerung ist entscheidend dafür, wie nah die einzelnen Pumpkammern in einem Drop-On-Demand- Druckkopf oder einer Mikropumpe gesetzt werden können. In diesem Arbeitspaket werden die notwendigen Kenndaten ermittelt: Lagerbelastung und notwendige Lagerbreite.</p>	1 MM
E	<p>Vergleich der Aktortypen</p> <p>Hier sollen die unterschiedlichen Konzepte für Membranaktoren miteinander verglichen werden. Dazu werden verschiedene Typen mit und ohne Strukturierung der Elektroden realisiert. Ziel des Arbeitspaketes ist ein Konstruktionskatalog der spezifischen Anwendungen den jeweils geeignetsten Wandlertypen zuordnet.</p>	8 MM
E1	<p>Simulation:</p> <p>Es wird zu jedem untersuchten Bautyp ein parametrierbares Modell aufgestellt. Dieses Modell wird dann jeweils Parametervariationen unterzogen, um die Konstruktionsoptima zu finden. Die einzelnen Typen werden dann bzgl. der Daten maximale Verformung, Lagerreaktion und Fertigungstechnik verglichen.</p>	2 MM
E2	<p>Die einzelnen Typen werden aufgebaut. Dazu wird eine Plattform entwickelt, die es ermöglicht die verschiedenen Typen aufzunehmen und für jeden einzelnen die gleichen Randbedingungen schafft. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Zugänglichkeit aller relevanten Punkte für Messungen zu ermöglichen.</p> <p>Die einzelnen Wandler werden dann bezüglich der in E1 genannten Kriterien beurteilt.</p>	2 MM

E3	<p>Anwendungsspezifischer Aufbau von Funktionsmodellen:</p> <p>Hier werden die Aktoren im Umfeld ihres vorgesehenen Einsatzes verbaut. Dazu wird eine Druckkopf, ein Ventil und eine Mikropositioniereinrichtung aufgebaut. Die jeweils verschiedenen Aktoren werden dann bzgl. der gewünschten Systemfunktion beurteilt. Dazu werden folgende Messinstrumente oder Vorrichtungen eingesetzt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laservibrometer zur Vermessung von Verschiebungen</li> <li>• Impedanzmessung zur Bestimmung der Resonanzeigenschaften des Systems</li> <li>• Stroboskopmessplatz zur Visualisierung der Ergebnisse bei Tropfenerzeugern</li> </ul> <p>Ziel dieses Arbeitspakets ist ein Konstruktionskatalog der die Eignung der einzelnen Aktoren bzw. der sinnvollen Elektrodenstrukturierung anwendungsspezifisch wiedergibt.</p>	4 MM
----	---	------



### 3.3 Zeitplan

	I-07	II-07	III-07	IV-07	I-08	II-08	III-08	IV-08	
A1	2								2
A2		3	1						4
A3				2					2
A4			2						2
B1				3	1				4
B2	1								1
B3					1				1
B4					1	1			2
C1	2								2
C2		1							1
C3		1							1
C4			2						2
D1	1	1							2
D2			1						1
D3				1					1
E1						2			2
E2							2		2
E3							1	3	4
	6	6	6	6	3	3	3	3	36