

Neue Aktorsysteme auf Basis strukturierter Piezokeramik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Muhammed Abed Al-Wahab

geb. am 22.09.1964 in Amman

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Roland Kasper (Universität Magdeburg)

Prof. Dr. Kostadin Kostadinov (Bulgarian Academy of Sciences)

Promotionskolloquium am 22. Oktober 2004

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinem verehrten Doktorvater, Herrn Professor Kasper meinen ganz besonderen Dank aussprechen. Ohne seine wertvollen Ratschläge und kritischen Hinweise bei der Bearbeitung der Thematik wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Kostadin Kostadinov danke ich für die bereitwillige Übernahme der Begutachtung der Arbeit.

Weiter gilt mein Dank Dr. Heinemann und Dr. Weiser sowie allen Mitarbeitern des Institutes, wie auch meinen Freunden, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	i
1.1 Stand der Forschung	2
1.1.1 Herstellung von Piezokeramiken	2
1.1.2 Ausführungsformen von Piezoaktoren	7
1.1.3 Wegvergrößerungssysteme	9
1.1.4 Anwendungsbeispiele piezoelektrischer Antriebssysteme	12
1.2 Ziel der Arbeit	16
2. Neue Antriebssysteme mit strukturierten Piezokeramiken	17
2.1 Kinematische Prinzipien für strukturierte Systeme	17
2.1.1 Ebene Systeme	18
2.1.2 Räumliche Systeme	19
2.1.3 Kinematische Beschreibung	19
2.2 Entwicklung neuer Strukturen	21
2.3 Simulation	22
3. Realisierung	25
3.1 Wege zur Realisierung ebener Strukturen	25
3.2 Zweiseitig eingespanntes Hebelsystem	25
3.2.1 Berechnung der Ausgangsgeometrie	26
3.2.2 Optimierung	29
3.3 Piezoaktor-Strukturierung	30
3.4 Fertigung des zweiseitig eingespannten Hebelsystems	33
3.5 Messungen	34
3.5.1 Statische Messung	34
3.5.2 Quasistatische Messung	34
3.6 Wegaddition	36
3.6.1 Symmetrische Ausführung	36
3.6.2 Ergebnisse der Simulation	37
3.6.3 Realisierung der symmetrischen Ausführung	38

3.6.4 Mikroskopische Messung	39
3.7 Unsymmetrische Ausführung	39
3.7.1 Messergebnisse	40
4. Räumliche Systeme.....	42
4.1 Grundmodell der Piezo-Piezo-Bauweise	42
4.1.1 Ergebnisse der Simulation.....	43
4.1.2 Optimierung	44
4.1.3 Fertigung der Piezokeramikplatte mit Mittelsteg	44
4.1.4 Messung	45
4.2 Grundmodell der Hybridbauweise	45
4.2.1 Simulationsergebnisse	46
4.2.2 Realisierung der Hybridbauweise	47
4.2.3 Messungen	48
4.3 Grundaufbau der zweiseitigen Butterfly-Hybridform	49
4.4 Weitere hybride Bauformen.....	51
4.4.1 Simulation.....	52
4.4.2 Aufbau des Tellersystems	53
4.4.3 Messung	53
4.5 Zusammenstellung	54
5. Anwendung strukturierter Piezoaktoren in der Pneumatik	56
5.1 Ventile	56
5.2 Wegeventile	56
5.3 Konstruktive Auslegung.....	59
5.3.1 Ausführungsform normal offenes 2/2-Wegeventil.....	59
5.3.2 Aktorkraft zur Betätigung von 2/2-Wegeventilen	60
5.4 Antrieb eines Ventils mit Hybridsystem	61
5.5 FE-Strömungssimulation	62
5.5.1 Festlegen des Geometriemodells	63
5.5.2 Annahmen zur Berechnung der Fluideigenschaften.....	64
5.5.3 Vernetzung	65
5.5.4 Festlegen der Randbedingungen	66
5.5.5 Berechnung des Strömungsproblems	67
5.6 Ergebnisse der Fluidsimulation	68
5.6.1 Druckverteilung.....	68
5.6.2 Geschwindigkeitsverteilung	69
5.6.3 Temperatur- und Dichteverteilung	71
5.6.4 Berechnung des Volumenstroms.....	72

5.6.5 Berechnung der Druckkräfte.....	72
5.7 Herstellung der Funktionsmuster des 2/2-Wegeventils	74
5.7.1 Fertigung der Einzelkomponenten.....	74
5.8 Messungen.....	76
5.8.1 Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik	76
5.8.2 Volumenstrom vom Druck- zum Auslassanschluss	77
5.8.3 Vergleich Messung und Berechnung des Volumenstromes	78
5.8.4 Auswertung	79
5.9 Weitere Ausführungsform.....	79
5.9.1 2/2-Wege-Ventil mit doppelseitigem Tellersystem.....	79
5.9.2 Das scheibenförmige Grundmodell der Simulation.....	80
5.9.3 Netz des FE-Modells	81
5.9.4 Simulationsergebnisse	81
5.9.5 Vergleich der Messdaten mit den simulierten Werten	84
6. Zusammenfassung.....	86
Literaturverzeichnis	88
Bildverzeichnis	92
Formelzeichen und Indizes	95

1. Einleitung

Die Gebrüder Jacques und Pierre Curie machten im Jahre 1880 an eine wichtige Entdeckung. Bei Versuchen mit Turmalinen fanden sie heraus, dass beim Drücken auf bestimmte Flächen mancher Kristalle elektrische Ladungen entstehen (Bild 1.1.a). Nach dem griechischen Wort piezo („ich drücke“) nannten sie die Erscheinung Piezoeffekt. Der inverse piezoelektrische Effekt, bei dem durch Anlegen eines elektrischen Feldes Längenänderungen im Kristall auftreten (Bild 1.1.b), wurde zunächst 1881 vorausgesagt und kurz darauf-ebenfalls von den Brüdern Curie-experimentell nachgewiesen.

Damals konnten sie noch nicht ahnen, welche technischen Möglichkeiten in Zukunft diese Entdeckung nach sich ziehen würde [1].

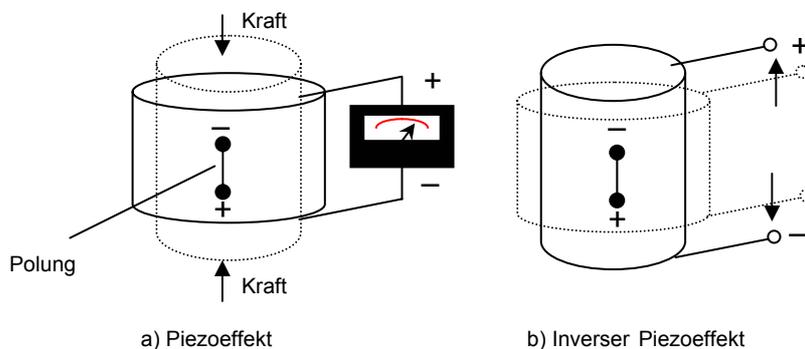


Bild 1.1:Piezoelektrischer Effekt

Heute sind Anwendungen von Piezokeramiken für jedermann in Gasanzündern oder Feuerzeugen selbstverständlich. Ein kleines Hämmerchen schlägt mit großer Geschwindigkeit auf eine Keramik, wodurch die entstehende hohe Spannung einen Funkenüberschlag herbeiführt. Auch im Tonabnehmer von Schallplattenspielern finden Piezokeramiken bereits lange Zeit Verwendung. In Form von Kraft-, Druck-, und Beschleunigungssensoren haben piezoelektrische Systeme bereits seit Jahrzehnten breite industrielle Anwendung gefunden.

Allen bis hierher aufgeführten Anwendungen liegt der piezoelektrische Effekt zugrunde. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Sensoranwendungen steht der Einsatz von

Piezokeramiken als Festkörperaktor, bei denen der inverse Effekt genutzt wird, noch weitgehend am Anfang.

Erst seit jüngster Vergangenheit sind leistungsfähige Keramiken und die erforderlichen elektrischen Interfacetechnologien verfügbar, um marktgerechte Produkte zu liefern.

1.1 Stand der Forschung

Die nachfolgenden Seiten geben einen ausführlichen Überblick über den Herstellungsprozess von Piezokeramiken sowie die derzeit verfügbaren Ausführungsformen von Aktoren und Piezo-Antriebssystemen.

1.1.1 Herstellung von Piezokeramiken

Bild 1.2 zeigt den Herstellungsprozess von piezoelektrischen Keramiken. Die Eigenschaften dieser Keramiken werden in starkem Maße vom Herstellungsverfahren beeinflusst. Der chemischen Beschaffenheit nach handelt es sich bei den piezoelektrischen Keramiken um oxidische Systeme mit komplexer Zusammensetzung. Die chemischen Reaktionen erfolgen größtenteils in der festen Phase. Der keramische Prozeß gestattet die Synthese von Werkstoffen aus einfachen (oxidischen, karbonatischen) Pulvern. Dabei sind in gleicher Weise die chemische Zusammensetzung wie die Bildung des dichten polykristallinen Gefüges von Bedeutung. Innerhalb des Prozesses bietet sich die Möglichkeit der Herstellung einer Vielfalt von geometrischen Formen aus piezoelektrischen Keramiken mit unterschiedlichen Spezifikationen für unterschiedliche Anwendungen [2], [3].

Piezokeramiksynthese:

Innerhalb des technologischen Ablaufs existieren prinzipielle Gemeinsamkeiten in der Prozessfolge (Bild 1.2), obwohl die Materialien unterschiedlich aufgebaut sind. Die pulverförmigen Ausgangsstoffe werden entweder durch Pressen oder durch Foliengießen in Ihre Form gebracht und durch das Sintern verdichtet. Auf Basis von $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ wird für die Herstellung piezoelektrischer Keramiken eine zweistufige thermische Behandlung durchgeführt. Die notwendigen Bedingungen (Temperaturregimes) werden größtenteils durch die Beschaffenheit der Ausgangspulver bestimmt. Als Kalzinieren und Vorsintern bezeichnet man Reaktionen, die im Allgemeinen die Verbindungsbildung umfassen.

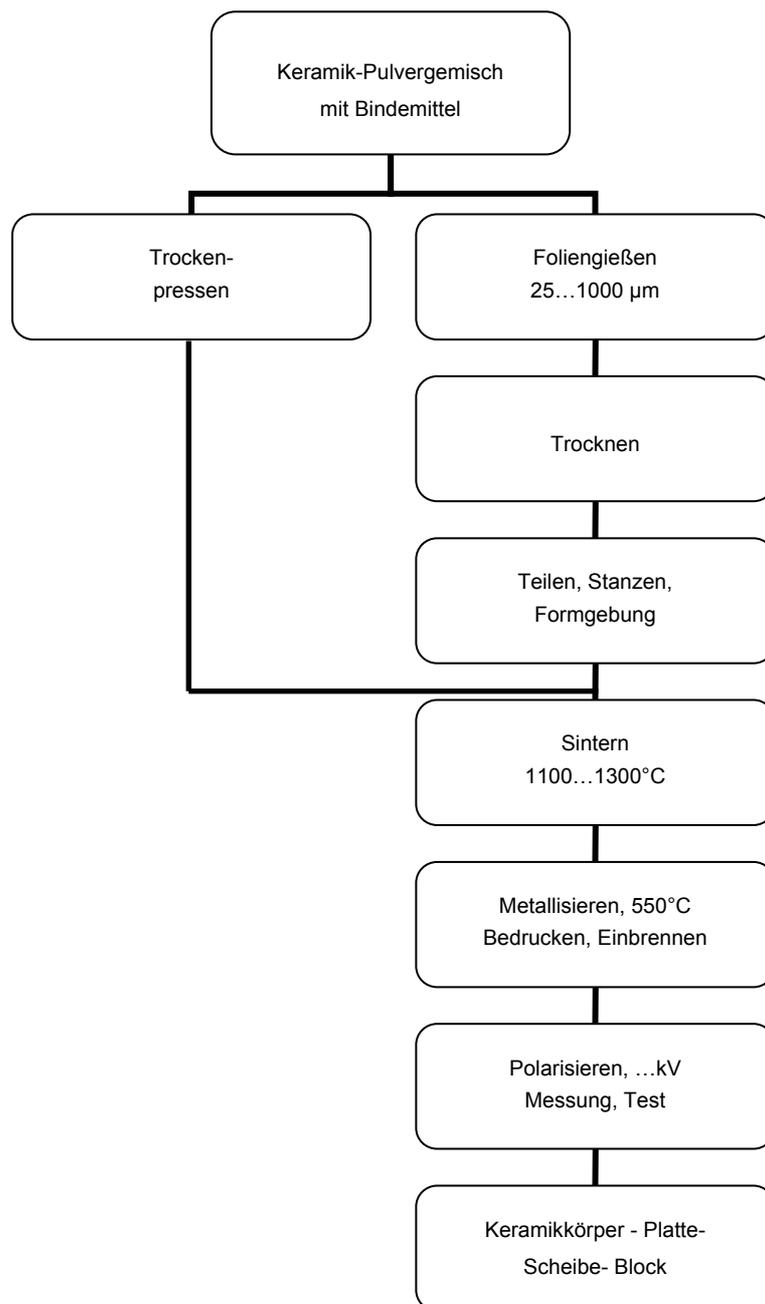
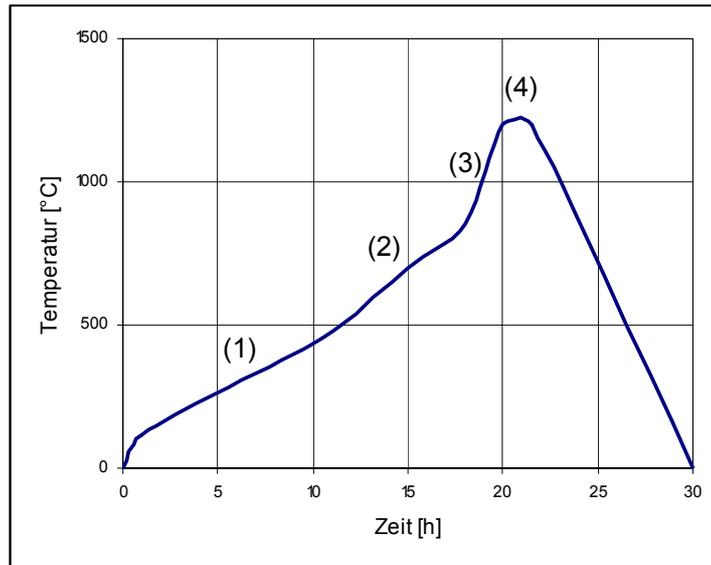


Bild 1.2: Herstellungsprozess von piezoelektrischen Keramiken [2]

Das Kalzinieren setzt sich aus mehreren Vorgängen zusammen: Zuerst führt die Zersetzung von Rohstoffen zur Absonderung gasförmiger Nebenprodukte. Die gewünschte Verbindung bildet sich dann bei der Reaktion des Vielphasen-Pulvergemisches. Dieses läuft vornehmlich in der festen Phase ab. Die chemische Reaktion, die bei atomarer Diffusion bei Temperaturen unterhalb der Schmelzpunkte der Rohstoffkomponenten abläuft, führt zur Synthese solch einer Zusammensetzung durch Festphasenreaktion.



- (1) Verdampfen von Feuchtigkeit, Ausbrennen von organischen Bindemitteln und Plastifikatoren, 20...500 °C
- (2) Vorbildung (Kalzinieren)
- (3) Schwindung und Vervollständigung der Festphasenreaktion 1100..1300 °C
- (4) Bildung des polykristallinen Gefüges (Kornwachstum, Verdichtung)

Bild 1.3: Typische Prozessfolge zur Herstellung von Bleizirkonat-Titanat($\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$) [3]

Formgebungsverfahren:

Die Herstellung von Halbzeugen für piezokeramische Bauteile mit größeren Abmessungen („Bulk“-Keramiken) geschieht überwiegend durch Trockenpressen von Pulvergranulaten. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung ist das Schlickergießen. Dieses vielseitige Verfahren der feuchten Formgebung beruht auf dem Gießen von Schlicker auf eine bewegliche Unterlage. Bei der Herstellung dünner Folien, d.h. mit einer Dicke von 25 bis 1000 μm (im gesinterten Zustand) aus Schlicker als Suspension muss auf enge Toleranzen geachtet werden, während der Schlicker unter einer Klinge (Rakel) auf der beweglichen Unterlage abgestrichen wird. Die Suspension besteht dabei aus keramischem Pulver sowie einem dichtwässrigen Flüssigkeitssystem von Lösemitteln, Plastifikatoren und Bindemitteln. Nach dem Verdampfen der Lösemittel erhält man die feinen Pulverteilchen in Form eines relativ festen, flexiblen Bandes. Dieses kann dann aufgerollt oder in kontinuierlicher Folge weiter verarbeitet werden. Beispielsweise können aus diesen großflächigen Bändern Halbzeuge beliebiger geometrischer Form gestanzt werden. Bei der späteren Weiterverarbeitung können

z. B. mit Innenelektroden bedruckte Folien noch laminiert werden. Dies geschieht unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur.

Sintern:

Beim Sintervorgang setzt sich die beim Kalzinieren begonnene chemische Reaktion bis zur Vervollständigung der PZT-Phase fort. In einer so genannten Rekristallisationsphase erfolgt danach das Wachstum der Kristallite im keramischen Gefüge. Von ihrer Größe hängen die strukturellen und damit auch die ferroelektrischen Eigenschaften ab. Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Keramiken werden sowohl durch die Wahl der Zusammensetzung, als auch durch die Parameter des keramischen Bildungsprozesses bestimmt. Jedoch ist der Einfluss von Prozessparametern auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften nicht einfach zu separieren. Wichtig bei den piezoelektrischen Keramiken als oxidische Systeme ist, dass sie in neutraler oder schwach oxidierender Atmosphäre gebrannt werden. Der Vorgang des Sinterns erfolgt in Elektroöfen bei Temperaturen von 1150–1250°C. Bei Produktionen geringen Umfangs eignen sich jedoch Kammeröfen (Muffeln) besser. Wird andererseits Wert auf einen kontinuierlichen Betrieb mit zeitlich konstantem Temperaturregime gelegt, bietet sich wiederum die Arbeit mit Tunnelöfen an. Da beim Sintern mit relativ hohen Temperaturen gearbeitet wird, müssen Vorkehrungen zur Vermeidung von Bleiverlusten getroffen werden, da sonst durch Verdampfung die Stöchiometrie gestört wird. Um eben diese Bleiverdampfung zu reduzieren, werden die keramischen Formkörper in der Serienproduktion in geschlossenen Al₂O₃- Kapseln gesintert. Mit welchen Sinter-temperaturen letztendlich gearbeitet wird, hängt nicht nur von der Zusammensetzung ab, sondern auch vom Aktivierungsgrad des Materials und von der Größe des Primärkorns. Spezielle Verfahren der Pulverkonditionierung ermöglichen schließlich das Cofiring von Laminaten mit Innenmetallisierung für monolithische Vielschicht-Aktoren bei 1000 °C.

Mechanische Bearbeitung:

Die Form der jeweiligen piezoelektrischen Keramiken wird vor dem Sinterprozess entsprechend den angewandten Verfahren wie Trockenpressen und Foliengießen bestimmt. Die in ihrer Gestalt beim Sintern erhaltenen piezoelektrischen Keramiken müssen zum überwiegenden Teil mechanisch nachbearbeitet werden, um geometrische Abmessungen und Oberflächenbeschaffenheit in engen Toleranzen zu gewährleisten. Diese Nachbearbeitung kann beispielsweise durch Schleifen, Läppen und Polieren

erfolgen sowie durch Trennsägen unter Verwendung von Siliziumcarbid-, Korund- und Diamant-Schleifkörpern (Schleifscheiben, Schleifpulver unterschiedlicher Körnung).

Metallisierung:

Fester Bestandteil piezoelektrischer Keramiken sind die elektrisch leitenden Beläge, die Elektroden. Mit deren Hilfe wird die Gleichspannung für die Polung angelegt. Als Materialien für die Elektroden werden hauptsächlich Silberbeläge verwendet. In der Massenproduktion erfolgt zum Aufbringen solcher Beläge der Siebdruck von pastenförmigen Silberpräparaten. Derartige Präparate enthalten neben Silberverbindungen (z.B. Ag_2O) eine Glaskomponente (Fritte) und organische Löse- und Bindemittel. Durch Einbrennen der Paste bei 500 bis 800 °C entsteht aus der Silberverbindung metallisches Silber, das in der geschmolzenen Fritte eingebettet wird. Daraus kommt dann nach dem Abkühlen über die Fritte eine feste Verbindung mit der Piezokeramik- Unterlage zustande. Von der Qualität der Metallbeläge (Leitfähigkeit, Haftfestigkeit) hängt die Qualität der Piezokeramiken in starkem Maße ab. Typische Schichtdicken, die sich durch Siebdruckpasten realisieren lassen, liegen bei etwa 5 bis 10 μm , die Haftfestigkeit erreicht etwa 10 MPa. Alternative Verfahren zum Silbereinbrennen sind die stromlose Abscheidung (electroless plating) von Nickel-Gold, Bedampfung im Vakuum mit Silber, Gold oder Platin, Kathodenzerstäubung (Sputtern) von Kupfer, Kupfer-Nickel oder Aluminium.

Polarisierung:

Sind die Elektroden aufgebracht, muss noch die remanente Polarisierung der Keramiken erzeugt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Polarisierung. Dabei werden die bis dahin isotropen ferroelektrischen Domänen nach einer bestimmten Richtung innerhalb des Materials ausgerichtet. Die anzulegende elektrische Feldstärke muss oberhalb der Koerzitivfeldstärke des Materials liegen. Dies impliziert, dass für unterschiedliche Zusammensetzungen die erforderliche Feldstärke natürlich sehr verschieden sein kann. Der genaue Wert hängt von der "Beweglichkeit" der ferroelektrischen Domänen im jeweiligen keramischen Gefüge ab. Generell verringert sich mit steigender Temperatur die Polungsfeldstärke, und die Polung verläuft mehr oder weniger in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer des elektrischen Feldes. Kommerzielle Zusammensetzungen für verschiedene Anwendungen können in wenigen Sekunden bei 2 kV/mm und Raumtemperatur bis zu Sättigungswerten gepolt werden ("weiche" piezoelektrische Keramiken). Andere hingegen zeigen erst bei doppelter Feldstärke bei erhöhter

Temperatur (100 bis 150° C) und nach einer längeren Zeit von 10 Minuten eine nennenswerte Remanenz ("harte" piezoelektrische Keramiken). Da Luft nur eine geringe Durchschlagsfestigkeit hat, erfolgt die Polung insbesondere "harter" piezoelektrischer Keramiken in Ölbädern.

1.1.2 Ausführungsformen von Piezoaktoren

Für die Realisierung von dynamischen, leistungs- und systemfähigen Antrieben werden Aktoren in sehr unterschiedlichen Formen und Ausführungen benötigt. Piezoaktoren zeichnen sich vor allem durch hohe Stellkräfte, hohe Betriebsfrequenzen und eine relativ kompakte Bauweise aus [4].

Seit der Entwicklung leistungsfähiger keramischer und anderer Werkstoffe werden Piezoaktoren in einer ganzen Reihe von technischen und wirtschaftlichen Produkten eingesetzt. Piezoaktoren generieren je nach Bauform Kräfte von wenigen mN bis zu mehreren kN bei Ausdehnungen im μm - Bereich bis zu Stellwegen von einigen Millimetern. Charakteristisch ist die Verbundstruktur aus piezoelektrisch aktiver isolierender Keramik und elektrisch leitenden Materialien. Um elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln als auch umgekehrt, werden für den Aktorbau besonders Blei-Zirkonium-Titanit (PZT)-Sinterkeramiken verwendet [1].

Die Hauptbauformen piezoelektrischer Antriebselemente sind Stapelaktoren, Biegeaktoren und Tubusse. Doch die Auswahl reicht noch über Bi- und Trimorphbauweise, hybriden Bauformen bis hin zu neueren Bauformen mit Multilayerstruktur. Im Weiteren folgt eine Beschreibung der geläufigsten Aktorbauformen:

Stapelaktoren:

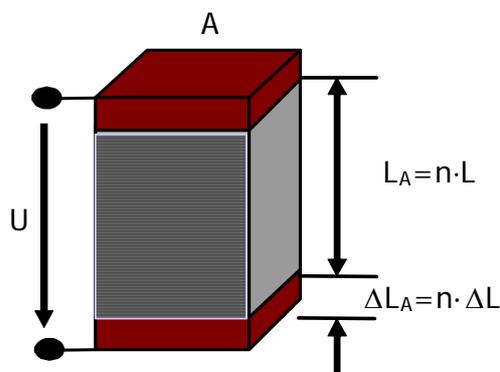


Bild 1.4: Stapelaktor aus n Volumenelementen

Der aktive Teil des Stapelaktors besteht aus einem Stapel einzelner keramischer Scheiben der Dicke L sowie der Fläche A , die durch dünne metallische Elektroden getrennt sind. Durch eine mechanische Reihenschaltung dieser dünnen Volumenelemente findet mithilfe des (3,3)-Effektes für eine Längenänderung um ΔL eine Addition des Stellweges statt, siehe Bild 1.4.

$$\Delta L_A = n \cdot \Delta L \quad (1.1)$$

Aufgrund der Flächengleichheit bleibt die Kraft F erhalten. Elektrisch sind die Elemente parallel geschaltet, so dass an jedem die gleiche Spannung U anliegt. Lediglich die Gesamtladung $Q_A = n \cdot Q$ und damit die Gesamtkapazität $C_A = n \cdot C$ vergrößern sich entsprechend der Anzahl der Elemente n . Die Zunahme der Kapazität stellt eine der Schwierigkeiten beim Betrieb dieser Aktoren dar. Die maximale zulässige Spannung ist proportional zur Dicke der Scheiben. Da die Stapelbauweise keine Zugkräfte aufnehmen kann, ist für eine externe Vorspannung zu sorgen [8], [9], [10].

Technische Grenzen werden durch die begrenzte Aktorlänge gesteckt, die durch die Kosten und die zunehmende Knickempfindlichkeit entstehen. Auch können keine Querkräfte und nur in geringem Maße Biegemomente aufgenommen werden. Stapelaktoren können große Stellkräfte erzeugen, jedoch wird ihr Einsatz durch die relativ kleinen verfügbaren Stellwege häufig erschwert oder ganz verhindert.

Biegeaktoren:

Bei Biegewandlern macht man sich den (3,1)-Effekt zunutze, um eine Längenänderung eines relativ langen dünnen Streifens zu erreichen. In einem bimetalähnlichen Aufbau werden mindestens zwei dieser Streifen verbunden, um aus beiden Längenänderungen eine Biegung zu erzeugen (Bild 1.5).

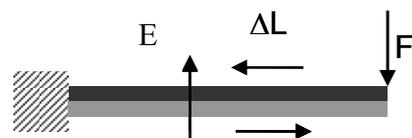


Bild 1.5: Aufbau Biegewandler

Die klassische Bauform der Biegeaktoren besteht aus Metall- und Piezokeramik-Streifen. Den Vorteilen des sehr einfachen Aktoraufbaus, der geringen benötigten Versorgungsspannungen ($<30V$) und der beachtlich erreichbaren Stellwege ($>1mm$) stehen hier allerdings die sehr kleinen Stellkräfte ($<1N$) gegenüber. Diese verhindern viele Anwendungen.

Tubusse:

Eine weitere Ausführungsform (Bild 1.6) von Piezoaktoren sind die monolithischen Keramik-Rohre. Tubusse werden von innen und außen versilbert. Durch eine angelegte elektrische Spannung zwischen dem inneren und äußeren Durchmesser erfolgt eine axiale und radiale Kontraktion. Der Markt bietet unterschiedliche Bauformen von Piezoaktoren an, die ein weites Feld von Kräften und Stellwegen abdecken (Bild 1.7) [11].

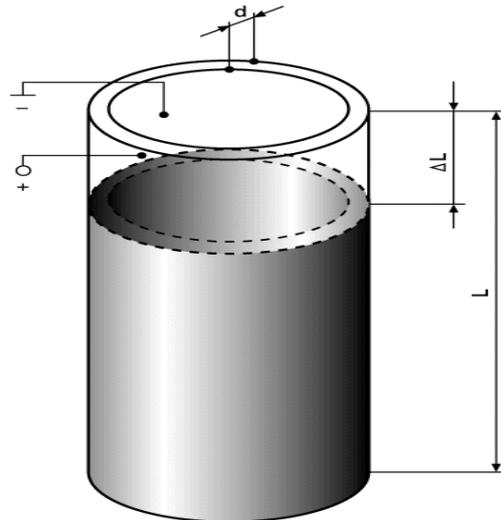


Bild 1.6: Tubusbauform [4]

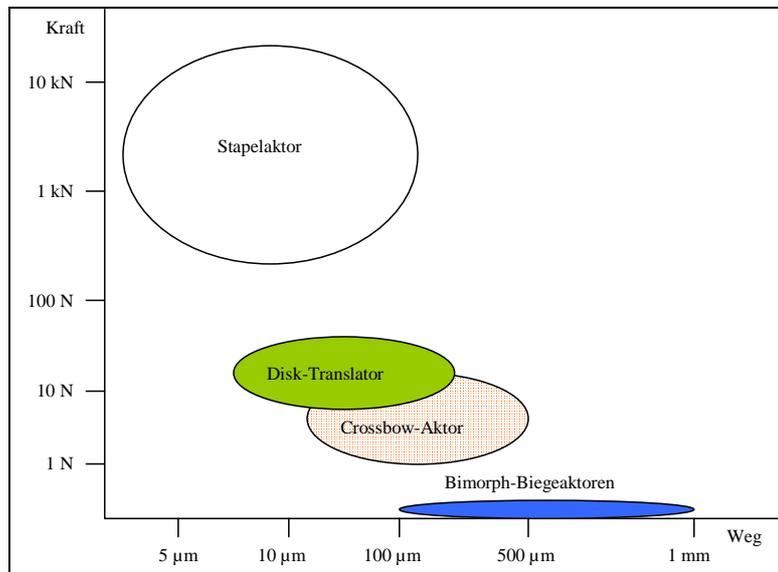


Bild 1.7: Wege und Kräfte von Piezoaktoren

1.1.3 Wegvergrößerungssysteme

Eine Analyse der Anwendungen piezoelektrischer Aktoren lässt die Einteilung in unmittelbar wirkende piezoelektrische Aktoren und mittelbar wirkende Aktoren zu. Bei den unmittelbar wirkenden Aktoren werden ihre Längenänderungen für einen Effekt direkt genutzt, wie es bei der Schwingungserzeugung im Lautsprecher der Fall ist. Für die meisten antriebstechnischen Anwendungen sind die direkt erreichbaren Stellwege allerdings zu klein. Bei der mittelbaren Wirkung sind für einen gewünschten Effekt Zwischenglieder, Elementgruppen oder Medien erforderlich, die zusätzlich zum Hub des

Aktors das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems beeinflussen. Diese Beeinflussung kann durch Wegvergrößerungssysteme für Hub oder Winkel erfolgen. Hier kommen plastisch oder elastisch veränderbare Elemente, Flüssigkeiten, Gase oder Magnetkräfte zum Einsatz. Mechanische Zwischenglieder sind oft als Gelenkelemente ausgebildet. Drehgelenke (Bolzen/Bohrung) oder Feststoffgelenke (zur Vermeidung von Spiel) sind hier typisch. Die einfachste Art einer Wegübersetzung erfolgt mit einem Hebel. Auch hydrostatische Wegvergrößerungssysteme sind bekannt und werden z. B. in direktgesteuerten Hydraulikventilen eingesetzt.

Mechanische Hebelsysteme:

Die mechanischen Wegvergrößerungssysteme nutzen in unterschiedlichen Ausprägungen das Hebelgesetz [12].

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \quad \text{und} \quad \frac{x_1}{l_1} = \frac{x_2}{l_2} \quad (1.2)$$

wobei F die Kraft, x den Weg, l den wirksamen Hebel, der Index 1 die Primär- und der Index 2 die Sekundärseite bezeichnet. Bild 1.8 gibt einen prinzipiellen Überblick über elementare ebene und räumliche Hebelsysteme. Ihre Vorteile liegen in einem einfachen Aufbau.

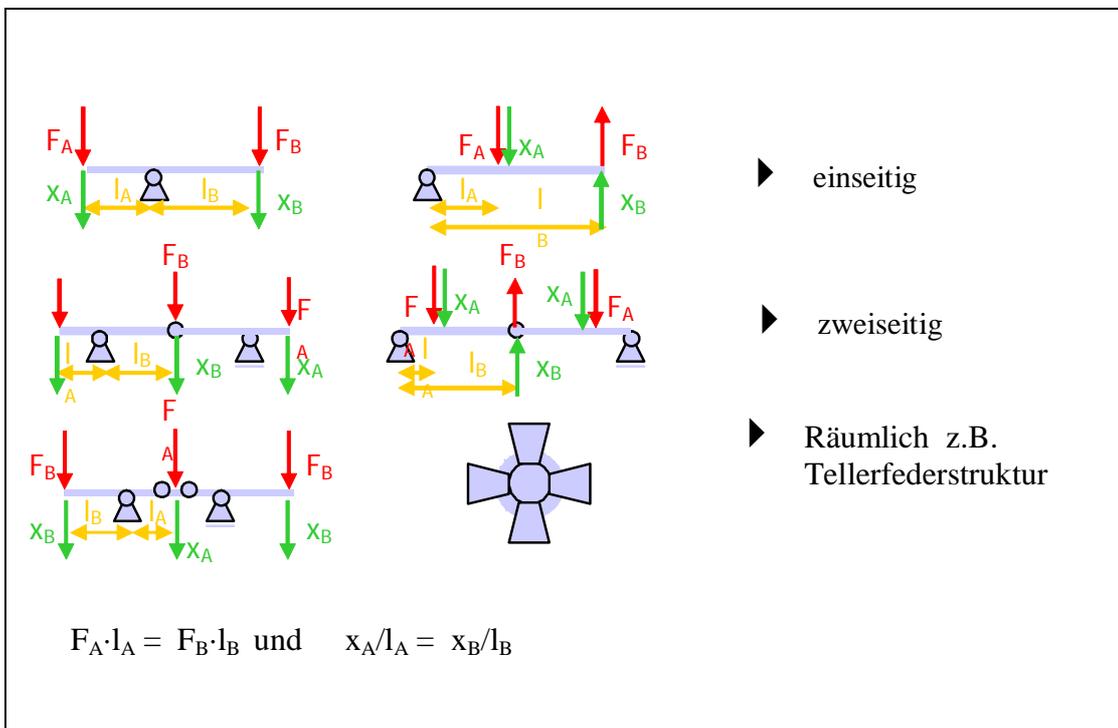


Bild 1.8: Prinzipielle ebene und räumliche Hebelsysteme [12]

Typisch für die ebenen Strukturen ist die Flachbauweise, welche einen relativ einfachen Aufbau von Aktor- und Wegübersetzungsstruktur ermöglicht. Nachteilig wirkt sich bei Verstärkung der Übersetzungswirkung der erhöhte Flächenbedarf aus. Daneben gibt es Einschränkungen der erreichbaren Steifigkeit des Systems.

Für größere Wandlereffekte bietet sich die räumliche Bauweise an. Wenn man von der Vielzahl der Piezo- Motorvarianten absieht, sind räumliche Stellwegvergrößerungssysteme allerdings selten zu finden, obwohl sie sich durch eine kompakte und sehr steife Bauweise auszeichnen. Allerdings ist die Auslegung und Herstellung räumlicher Strukturen, insbesondere auf der Aktorseite, ein bis heute ungelöstes Problem. Bild 1.9 zeigt ein Wegvergrößerungssystem (APAsP) das durch CEDRAT TECHNOLOGIES entwickelt wurde [13].



Bild 1.9: Amplified Piezo Actuators [14]

Die Hebel sind ellipsenartig ausgeführt und bilden ein verteiltes ebenes Gelenk. Gleichzeitig wird die ellipsoide Struktur zur Vorspannung der Aktoren verwendet. In Bild 1.10 sind dagegen diskrete

Gelenkpunkte ausgebildet, wodurch die eigentlichen Hebel sehr steif gestaltet werden können. Die Vorspannung der Aktoren erfolgt durch externe, seitlich angreifende Zuganker mit Tellerfedern, die eine sehr hohe Vorspannung der Aktoren und damit hochdynamischen Betrieb ohne Beanspruchung des eigentlichen Wegvergrößerung-Hebelsystems gestatten.

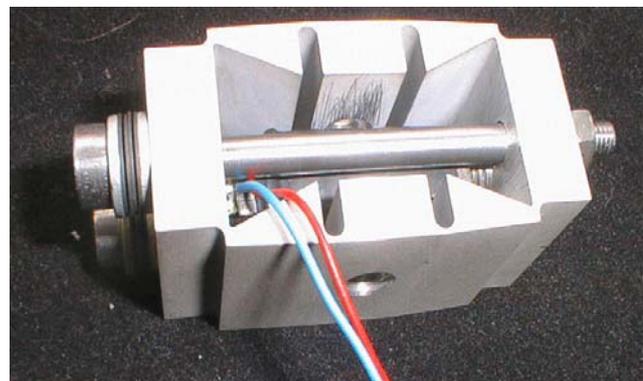


Bild 1.10: Translatorisches System mit Wegvergrößerung [15]

Hydrostatisches Prinzip:

Nach dem hydrostatischen Prinzip arbeitende WVS (Bild 1.11) nutzen den Druck eines eingeschlossenen Fluids oder elastischen Volumens, um den bei großer Kraft erzeugten Stellweg des Aktors entsprechend eines vorgegebenen Flächenverhältnisses zu vergrößern, wobei die Kraft entsprechend reduziert wird. Ihre Vorteile liegen in der

absoluten Spielfreiheit, den äußerst geringen Reibungen und der kompakten Bauweise. Praktisch lassen sich Übersetzungsverhältnisse bis 1:25 erreichen.

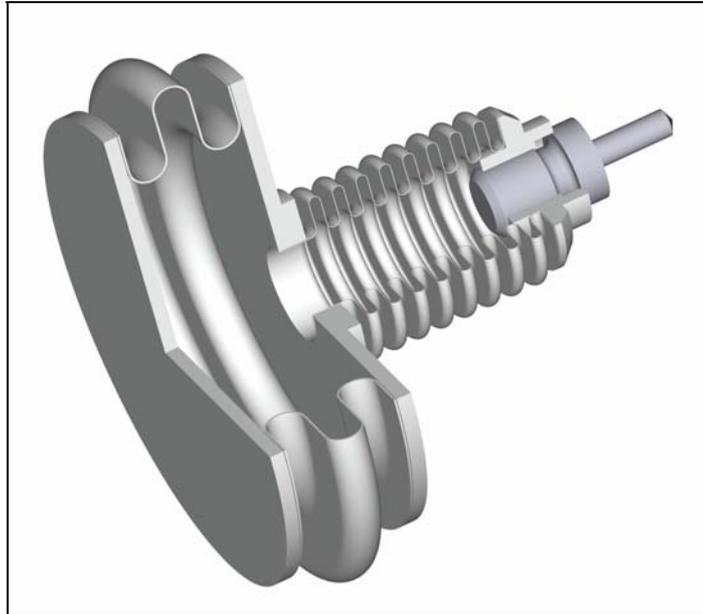


Bild 1.11: 3D-Modell-Hydrostatischer Wegübersetzer [16]

Die Schwierigkeit besteht darin, ein absolut dichtes Druckvolumen mit möglichst geringer Kompressibilität herzustellen.

1.1.4 Anwendungsbeispiele piezoelektrischer Antriebssysteme

Während die Nutzung des Piezoeffektes in sensorischen Anwendungen seit vielen Jahrzehnten weit verbreitet ist, sind leistungsfähige Aktoren auf der Grundlage des inversen piezoelektrischen Effektes erst relativ kurze Zeit verfügbar.

Haupthinderungsgründe für einen breiteren Einsatz sind zum einen der durch gering automatisierte Kleinserienproduktion bedingte hohe Preis der Aktoren.

Eine weitere Hemmschwelle liegt in der sehr begrenzten Auswahl von Bauformen piezokeramischer Aktoren, die heute verfügbar sind. Nachteilig beim Einsatz der Piezoaktorik wirkt sich auch der verhältnismäßig hohe Aufwand seitens der elektrischen Ansteuerung bei hohen Betriebsspannungen von 100-250 V bei Niederspannungssystemen und einigen Kilovolt bei den Hochspannungssystemen aus. Erst seit kurzem sind durch verbesserte Herstellungstechnologien mit dünneren Schichten Niederspannung-Stapelaktoren (Stacks) für Betriebsspannungen von 40 bzw. 60 V verfügbar (Fa. Noliac).

Zusammen mit der Notwendigkeit einer betriebssicheren mechanischen Einspannung des Aktors und eventuell notwendiger Sensorik oder Stellwegvergrößerungssysteme

werden Bauvolumen und Kosten des Gesamtsystems Piezoaktorantrieb signifikant erhöht. Trotz der erwähnten Nachteile haben piezoaktorisches Antriebssysteme schon in einer Reihe von Industriezweigen Anwendungen gefunden. Ihre komplette Auflistung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Nachfolgend sollen deshalb stellvertretend für die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Piezoaktoren als Antriebselement bzw. -system einige Beispiele aufgeführt werden.

Die in der japanischen Automobilindustrie eingesetzten Ultraschallwandlerwellenmotoren zeigen, dass mit einer Großserienproduktion wettbewerbsfähige Preise erreicht werden können. Große Erfolge wurden durch eine von EPCOS entwickelte Vielschichttechnologie erzielt, welche den Einsatz der Piezotechnik für die Revolutionierung der Dieseleinspritzsysteme einleitete. Heute werden Millionen von Stacks zu relativ kleinem Preis produziert, ihr Serieneinsatz für piezoaktorisches betriebene Kraftfahrzeug-Einspritzsysteme (Bild 1.12) macht Dieselantriebe wirtschaftlicher und umweltfreundlicher [5], [6].



Bild 1.12: Piezoaktorisches betriebenes Kraftfahrzeug-Einspritzsystem

Völlig neue Anwendungen haben Piezoaktoren in der Feinmechanik und Optik ermöglicht. Mit ihrer Hilfe lassen sich Positionieraufgaben mit extremen Genauigkeiten im Sub-Nanometerbereich realisieren. Ein Mikro- und Nano-positioniersystem mit 6 Freiheitsgraden für Zellen Manipulation ist in [43-45] vorgestellt. Verbreitet sind ein- und mehrachsige Positionier- und Scansysteme für Anwendungen in der Atomic-Force-(AFM) und Rasterelektronenmikroskopie, Kippspiegelsysteme, für optische Tische und Mikrobänke sowie Positioniersysteme für Faseroptiken, um nur einige zu nennen (Bild 1.13).

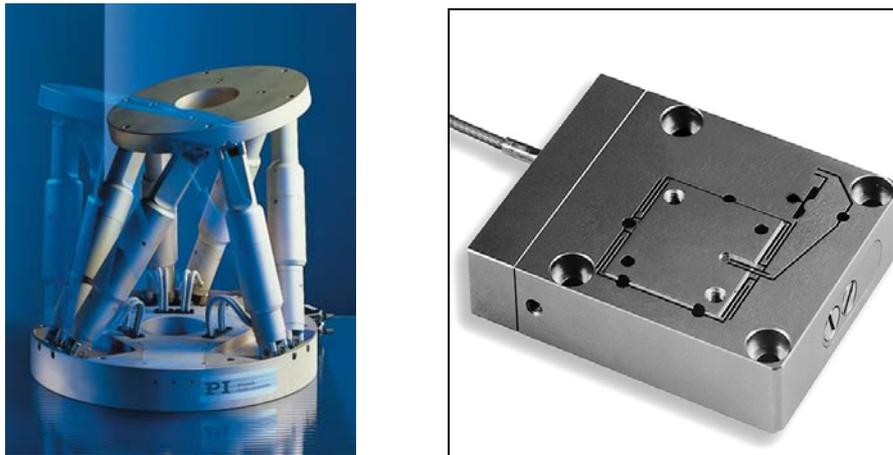


Bild 1.13: Positioniersysteme: Hexapod und Flexure NanoPositioner [8]

Die aufgeführten Beispiele und Anwendungen stehen stellvertretend für zahlreiche weitere Anwendungen, welche die Vorzüge der Piezoaktorik für industrielle Anwendungen nutzen. Fasst man die Einsatzgebiete von Piezoaktoren zusammen, so ergeben sich folgende Einsatzschwerpunkte:

- Positionierungsaufgaben (Mikro- und Nanopositionierung in Feinmechanik und Optik; Bearbeitungsgenauigkeit beim Zerpanen, Schnitttiefeinstellung; Ventile, Klemm- und Spannvorrichtungen, Schalter, künstliche Muskeln für die Medizintechnik, chirurgische Instrumente, Maschinenachslagenausgleich, Mikropositioniertische, Kippwinkeleinstellungen, Montagehilfen usw.)
- Schwingungserzeuger (z.B. Vibratoren, Oszillatoren, Schwingförderer, Lautsprecher, Buzzer)
- Schwingungs- und Schallreduktion (Anwendungen in der Optik, Lasertechnik, Atomic Force Mikroskopie)
- Ultraschallbearbeitung (z.B. Ultraschallschweißen, -schwinglappen, -trennen und Ultraschallreinigung)
- Rotations- und Translationsmotoren (z.B. Ultraschallmotoren verschiedenster Bauformen, Wanderwellenmotor, Inch-Worm-Antriebe)
- Pumpen (z.B. Mikropumpen und Dosiereinrichtungen), Auftragvorrichtungen

Anwendungsbeispiele in der Hydraulik und Pneumatik:

Für die Anwendung eines Pneumatik- oder Hydraulikvorsteuerventils reichen die Stellkräfte der Aktoren meist aus, hier sind zahlreiche Beispiele bekannt. Die Fa. ASCO Joucomatic stellt serienmäßig ein Piezoventil mit Biegewandler her [18]. Ebenso wie das Pneumatikventil der Fa. Hoerbiger Fluidtechnik [19] öffnet und schließt der Piezobiegewandler die Ventilöffnung. Ähnlich, jedoch mit vorgespanntem Biegewandler

arbeitet das Ventil der Festo AG & Co. [20]. Die konstruktive Auslegung der Piezoaktoreinspannung und die Realisierung der Ventilfunktion bei geringem Kraftaufwand sind kritische Punkte eines mit Piezobiegewandler betriebenen Ventils. Große Kräfte generieren Stapeltranslatoren. Um deren kurzen Wege für direkte Ventilbetätigungen im Hydraulikbereich nutzbar zu machen, sind mechanische und hydraulische Wegübersetzer entwickelt worden. Diese vergrößern den Bauraum eines Ventils allerdings erheblich. Bekannte Ventile dieser Art sind in [21] und [22] vorgestellt worden. Die Fa. marco Systemanalyse produziert Piezoventile in Form von proportional arbeitenden Vorsteuerventilen und Dosierventile für unterschiedliche Anwendungen [23]. Der mechanische Aufbau ist dabei sehr kompakt. Ein Hebelsystem dient der Übertragung der Aktuatorbewegung auf die Stößel der Kugelsitzventile. Ein miniaturisiertes Pneumatikventil wird in [24] vorgestellt. Hier ist der Piezoaktor in eine Siliconstruktur eingebettet.

Moderne Produkte verlangen eine Gesamtoptimierung aller enthaltenen Komponenten und Funktionen, um in einer globalen Wettbewerbssituation erfolgreich am Markt bestehen zu können. Diese Forderung trifft insbesondere die Aktorik, die häufig zu den kostenintensiven Komponenten eines Produkts zählt und maßgeblichen Anteil an Baugröße, Gewicht und Funktionalität hat. Diese Zusammenhänge sollen konkret am Beispiel eines Piezoventils für die Hydraulik aufgezeigt werden, wie es in Bild 1.14 dargestellt ist [16], [17].

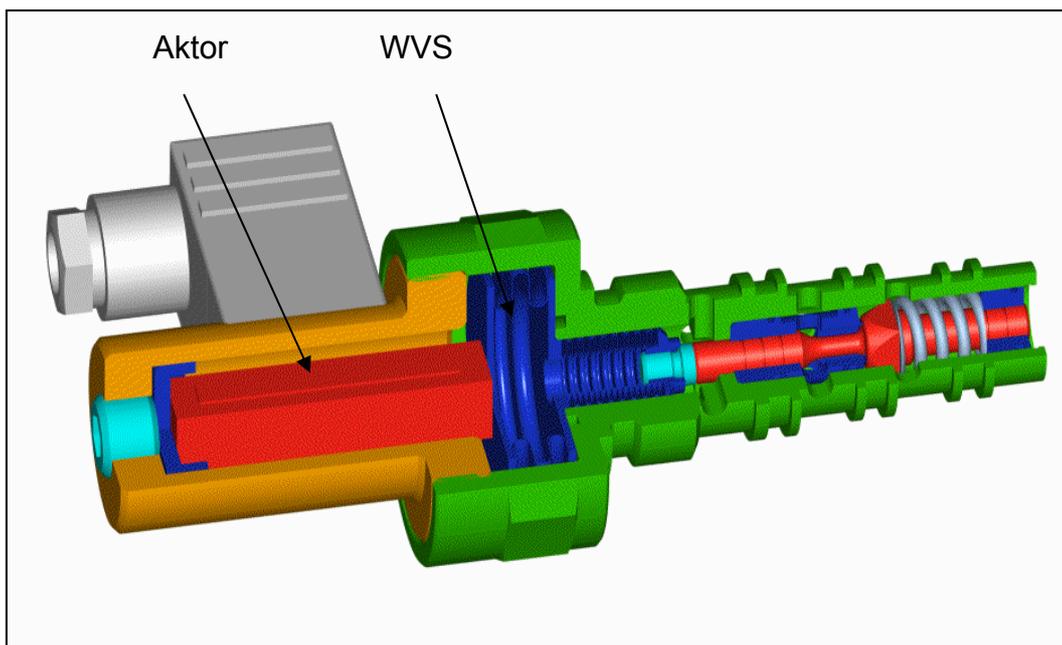


Bild 1.14: Piezoaktorgetriebenes direktgesteuertes Hydraulikventil [16], [17]

Der Piezoaktor ist das eigentliche Antriebselement und wird steif im Gehäuse befestigt. Die Kraft des Aktors wirkt auf das WVS, welches der nötigen Weg- und Kraftanpassung dient. Sowohl den ebenen als auch den räumlichen Wegvergrößerungssystemen wird der eigentliche Funktionsmechanismus mechanisch nachgeschaltet. Hier ist der Mengensteller in Verbindung mit einer Vorspann- Rückstellfeder das eigentliche Betätigungselement, das eine Ringspaltöffnung für den Ölstrom steuert. Das Gehäuse führt den Ölstrom in Kanälen. Für einen weg-, kraft-, winkel- o. a. geregelten Betrieb ist der Einsatz von entsprechender Kraft- und oder Wegsensorik unerlässlich, d.h. geeignete Sensorik muss mechanisch und elektrisch in das System eingefügt werden. Weiterhin sind exakt justierte Führungen mit möglichst geringer Reibung erforderlich

1.2 Ziel der Arbeit

Allen beispielhaft aufgeführten Lösungen ist eines gemeinsam: jedes Element des Antriebssystems steht für sich allein, integrierte Lösungen auf Basis einer funktionellen Piezoaktorstruktur sind noch nicht verfügbar. Jede der Aktorbewegung zusätzliche Funktion, ob Wegvergrößerung, -messung (z.B. durch Dehnungsmessstreifen), Greif- oder Ventulfunktion muss zusätzlich in das Gehäuse eingefügt werden.

Noch erfolgreichere Systeme sind auf dem Markt zu erwarten, wenn es gelingt, die Systemintegration piezoelektrischer Antriebe weiter zu erhöhen. Neben der Integration von Wegübersetzung, Vorspannung und Sensorik ist in Zukunft auch die heute noch im großen separaten Gehäuse untergebrachte Leistungsansteuerung in die Anwendung bzw. direkt in den Aktor zu integrieren.

Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Aufhebung der Trennung von Aktor, Sensor, Wegvergrößerungssystem und Funktionseinheit durch Integration in die Piezokeramik und Schaffung neuartiger mit Piezoaktoren betriebener Antriebssysteme, die sich im Integrationsgrad, ihrer Funktion, Formgebung und den erreichbaren Leistungsparametern wesentlich von den zur Zeit am Markt erhältlichen Systemen unterscheiden und die sich zum Beispiel als Antrieb für direkt gesteuerte pneumatische Ventile einsetzen lassen.

2. Neue Antriebssysteme mit strukturierten Piezokeramiken

Ausgehend von der Analyse eines seriellen piezoelektrischen Antriebssystems ist es naheliegend, zunächst die Integration von Aktor und Wegvergrößerungssystem (WVS) voranzutreiben. Beide Elemente besitzen eine kritische Schnittstelle, an der sehr kleine Wege auf hohem Kraftniveau übertragen werden müssen.

2.1 Kinematische Prinzipien für strukturierte Systeme

Es ist ersichtlich, dass diesen Wegvergrößerungssystemen getriebetechnische Strukturen unterlegt werden können, deren bekanntlich unendliche Vielfalt für den Einsatz von Aktoren einer systematischen Untersuchung bedarf. Dabei betrachtet man die Funktion, eine möglichst geringe Gliederzahl und Masse, einfache Gelenke, möglicher Verstellbereich, günstige Kraftübertragung bei gutem Wirkungsgrad sowie den Form- und Stoffschluss bei den Übertragungsgliedern, um eine optimale Wahl des WVS vornehmen zu können.

Erforderlich sind nun geeignete WVS, in die die Aktoren so integriert sind, dass die Gesamtkomponente als eine selbständige Antriebseinheit erscheint. Hierbei ist die Wegübersetzung mittels gelenkgetriebenen Mechanismen grundsätzlich für die Umformung der Bewegung geeignet [25]. In Bereichen hoher Übersetzungsverhältnisse kann die ungleichförmige Bewegungsübertragung zwischen gestellgelagerten Gliedern genutzt werden, oder aber die Bahnen geeigneter Punkte bewegter Ebenen bei ebenen und räumlichen Getrieben (auch Kombinationen aus diesen) werden zur Umformung der Antriebsbewegung der Aktoren in eine gewünschte Antriebsbewegung herangezogen, wobei die Keramiken selbst die Funktion von Gliedern einnehmen können. Von der Vielzahl verschiedener kinematischer Ketten bieten einige Grundmodule von ebenen und räumlichen Systemen die Möglichkeit einer direkten

Integration von Aktor und Wegvergrößerungssystem. Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick über ausgewählte Grundformen gegeben werden [25], [26], [27], [28].

2.1.1 Ebene Systeme

Die einfachste Art der Wegübersetzung erfolgt mit einem Hebel bei nicht auf einer Geraden liegendem Lager, Antriebs-, und Abtriebspunkt, allgemein Winkelhebel genannt. Da ein piezoelektrischer Aktor nur mit seiner Längsdehnung genutzt werden soll, ist schon ein Getriebe mit der geringsten möglichen Gliederzahl vorhanden.

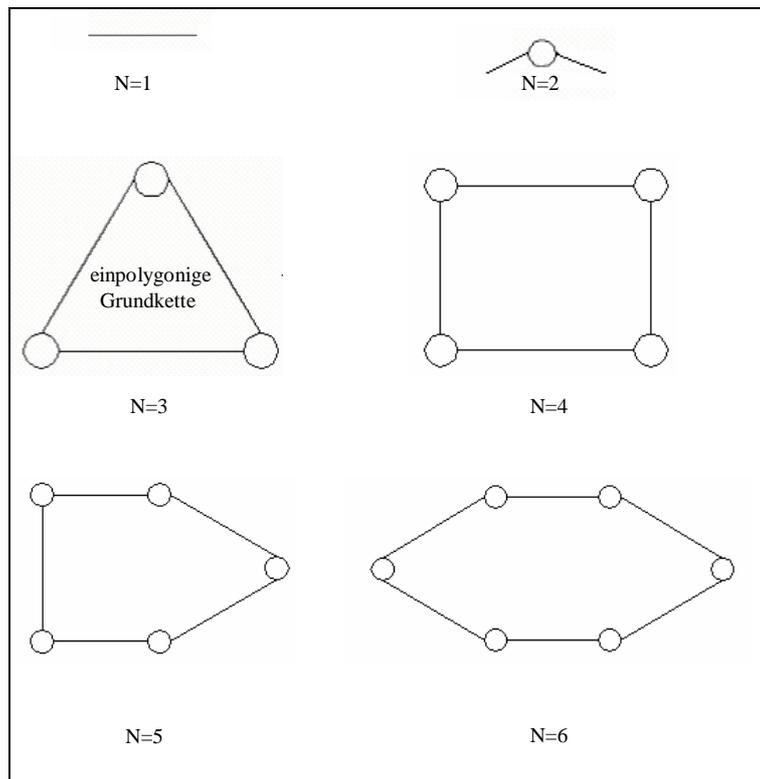


Bild 2.1: Kinematische Ketten - Grundmodule von ebenen Systemen

In Bild 2.1 ist als gewähltes Grundmodul die einpolygonige Grundkette dargestellt, wobei N die Anzahl der Gelenke ist. Neue Variationen erhält man beispielsweise durch Trennen eines Gelenks und Einfügen eines binären Gliedes (Stab) mit beliebiger Verteilung der Gelenkfreiheitsgrade des getrennten Gelenkes auf die beiden neu entstehenden Gelenke, wie in Bild 2.1 zu sehen.

Ebene Wegvergrößerungssysteme bieten den Vorteil, dass alle Komponenten innerhalb einer physikalischen Wirkebene liegen. Sie lassen sich somit einfach aus platten- oder scheibenförmigem Ausgangsmaterial in einem Strukturierungsprozess herstellen.

2.1.2 Räumliche Systeme

Die einpolygonige Grundkette wird in dieser Arbeit auch für räumliche Systeme als Grundkette für die Wegübersetzung verwendet. Somit entspricht die kinematische Struktur räumlicher Ketten dann der ebener Ketten.

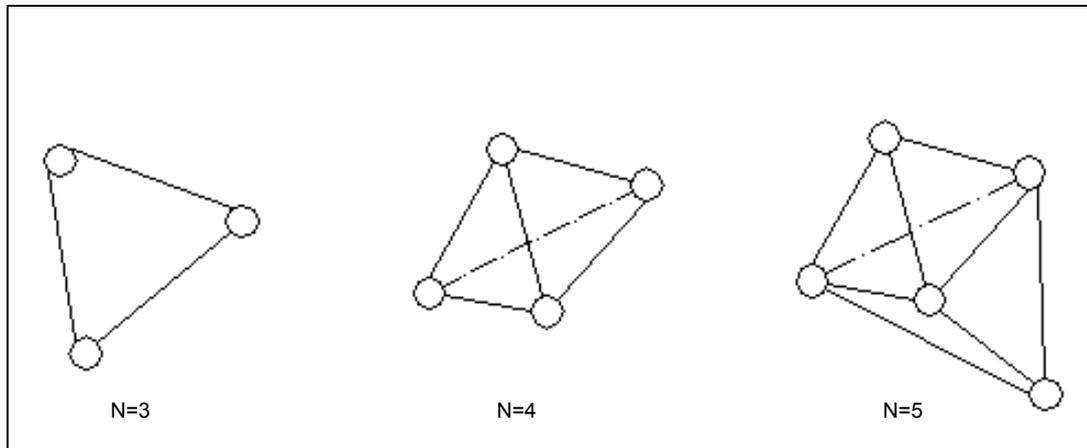


Bild 2.2: kinematische Ketten - räumliche Systeme

Bei räumlichen Systemen liegen Teile des WVS außerhalb der Aktor- Wirkebene (Bild 2.2). Der kleine konstruktive Mehraufwand zahlt sich jedoch durch eine wesentlich reduzierte Querkraftempfindlichkeit und durch einen insgesamt robusteren Aufbau wieder aus.

2.1.3 Kinematische Beschreibung

Wie oben bereits erwähnt, erfolgt nun eine exemplarische Betrachtung für $N = 2$ einer einfachen Wegübersetzung mittels eines Hebelsystems. Im Bild 2.3 ist das Prinzip eines doppelt wirkenden Hebelsystems dargestellt [29]. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern werden wie folgt beschrieben:

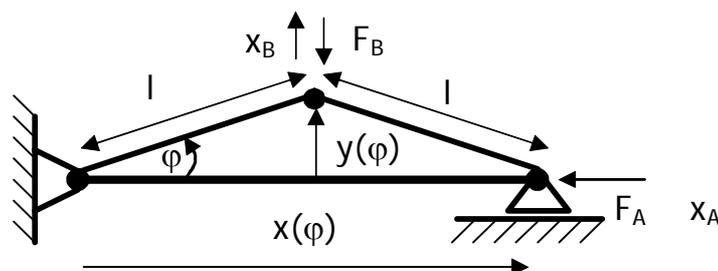


Bild 2.3: Doppelt wirkendes Hebelsystem

Aus der Kinematik ergibt sich:

$$x(\varphi) = 2 \cdot l \cdot \cos\varphi = 2 \cdot l - x_A \quad \Rightarrow \quad \cos\varphi = 1 - \frac{x_A}{2 \cdot l} \quad (2.1)$$

$$\dot{x}_A(\varphi) = -\dot{x}(\varphi) = 2 \cdot l \cdot \sin\varphi \cdot \dot{\varphi}$$

$$y(\varphi) = x_B(\varphi) = l \cdot \sin\varphi \quad \Rightarrow \quad \ddot{u} = \frac{\dot{x}_A}{\dot{x}_B} = 2 \cdot \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = 2 \cdot \tan\varphi \quad (2.2)$$

$$\dot{x}_B(\varphi) = \dot{y}(\varphi) = l \cdot \cos\varphi \cdot \dot{\varphi}$$

wobei mit \ddot{u} das Übertragungsverhältnis bezeichnet wird.

Die Kräfte folgen aus einer Leistungsbetrachtung (keine Verluste)

$$F_A \cdot \dot{x}_A = F_B \cdot \dot{x}_B \quad \Rightarrow \quad \frac{F_B}{F_A} = \frac{\dot{x}_A}{\dot{x}_B} = \ddot{u} \quad (2.3)$$

Im Bild 2.4 ist die Kurve des betriebspunktabhängigen Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} in Abhängigkeit von der Verschiebung $\frac{x_A}{l}$ aufgetragen. Man erkennt, dass an der Stelle $x_A = 0$ eine Singularität auftritt, da hier das Übersetzungsverhältnis gleich Null ist. Daraus ergibt sich auch, dass gleichzeitig die Kraft $F_B = 0$ ist. Aus Bild 2.4 lässt sich weiter ablesen, dass die Kraft mit wachsendem Stellweg ansteigt. Dies ist eine günstige Voraussetzung für z. B. Halte- und Ventilanwendungen.

Eventuell lässt sich mit dieser Anordnung auch ein zweiseitiger Betrieb (mit Durchschlagen) vorstellen. In diesem Fall hätte man zwei Positionen mit hoher Kraftwirkung.

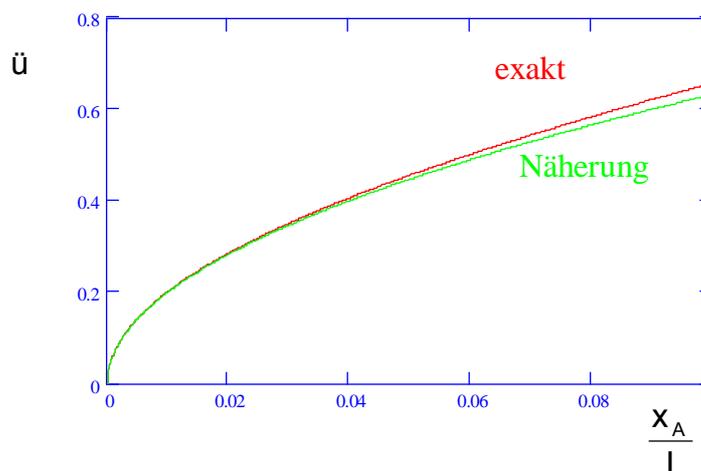


Bild 2.4: Übersetzungsverhältnis [29]

Bisher erfolgte nur eine rein statische Betrachtung eines ideal starren Systems. Praktisch wirken sich jedoch Trägheiten und Elastizitäten durch die aufzunehmenden hohen Aktorkräfte aus. Dies wird bei der nun folgenden Simulation, die sich auf die oben hergeleiteten mathematischen Grundlagen stützt, berücksichtigt.

2.2 Entwicklung neuer Strukturen

Wie bereits erwähnt, nutzen heutige Piezoaktoren im Wesentlichen zwei Prinzipien, um Stellweg und Stellkraft zu erzeugen. Biegewandler nutzen den (3,1)-Effekt, um bei relativ geringen Versorgungsspannungen Stellgrößen im mm-Bereich zu erzeugen. Da die Bewegungsumsetzung über eine Biegung des gesamten Piezomaterials vorgenommen wird und der Kraftangriffspunkt mit einem sehr großen Hebelarm auf diese Biegung wirkt, liegen die nutzbaren Kräfte unterhalb 1 N. Stapelaktoren (Stacks) dagegen nutzen den (3,3)-Effekt um sehr hohe Kräfte im kN-Bereich zu erzeugen. Die Längenänderung wird jedoch letztlich in sehr dünnen Schichten erzeugt und aufaddiert, was die erreichbaren Stellwege auf den μm -Bereich begrenzt.

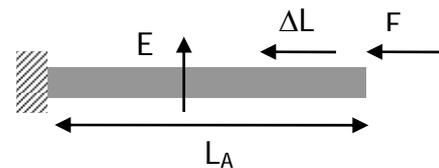


Bild 2.5: Planarer Piezoaktor

Ein alternativer Ansatz kann darin bestehen, ähnlich wie der Biegewandler den (3,1)-Effekt zu nutzen, um über eine große Länge zunächst einen relativ großen Stellweg zu erzeugen. Wie Bild 2.5 zeigt kann der Aktor planar ausgeführt werden. Der Stellweg ΔL resultiert aus der Gesamtlänge des Aktors L_A und der aufgebauten elektrischen Feldstärke E . Die erforderliche Versorgungsspannung ergibt sich somit aus der Dicke des Aktors. Zur Verkleinerung der Versorgungsspannung kann auch dieser Aktor mehrlagig ausgeführt werden. Praktisch werden jedoch immer nur relativ wenige Lagen benötigt.

Die Integration eines WVS kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal verschiedener WVS ist ihre Integration in dieselbe Ebene oder das räumliche Verlassen dieser Ebene senkrecht zur erzeugten Bewegung.

2.3 Simulation

Die Untersuchung ebener und räumlicher Systeme wurde mit Hilfe des Programmpakets ANSYS durchgeführt. Hierbei stellt ANSYS die Tools zur Berechnung mechanischer FE-Probleme, sowie auch für den Piezo-Effekt zur Verfügung.

Folgende Elemente ermöglichen eine Modellierung dieses Effekts:

SOLID5	Coupled- Field Solid Element
PLANE13	2-D Coupled- Field Solid Element
SOLID98	Tetrahedral Coupled- Field Solid Element

Außerdem wurden Variationsgrundregeln verwendet, um die Elementgleichungen zu lösen, die den piezoelektrischen Effekt enthalten [30].

Für Materialien mit linearen Eigenschaften existieren folgende elektromechanische konstitutive Gleichungen [31], [32], [33]:

Mechanische Spannung

$$\{T\} = [c] \cdot \{S\} - [e] \cdot \{E\} \quad (2.4)$$

Elektrische Ladung

$$\{D\} = [e]^T \cdot \{S\} + [\varepsilon] \cdot \{E\} \quad (2.5)$$

mit folgenden Elementen:

$\{T\}$ = mechanischer Spannungsvektor (σ)

$\{D\}$ = Flussdichtevektor

$\{S\}$ = Dehnungsvektor

$\{E\}$ = Elektrizitätsfeldvektor

$[c]$ = Elastizitätsmatrix

$[e]$ = Piezoelektrische Matrix

$[\varepsilon]$ = Dielektrizitätsmatrix

Die Gleichungen (2.4 und 2.5) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & -[e] \\ [e]^T & [\varepsilon] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{S\} \\ \{E\} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

Gleichung 2.4 und Gleichung 2.5 sind die üblichen konstitutiven Gleichungen für das strukturelle bzw. elektrische Feld, nur mit dem Unterschied, dass der Kopplungsfaktor nicht explizit angegeben ist, sondern sich aus der piezoelektrischen Matrix [e] ergibt.

Die Elastizitätsmatrix [c] kann direkt in nicht invertierter Form [c] oder aber auch in invertierter Form [c]⁻¹ als allgemeine anisotrope symmetrische Matrix in ANSYS eingegeben werden:

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ \text{Symmetrie} & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Die piezoelektrische Steifigkeitsmatrix [e] verknüpft den Vektor des elektrischen Feldes {E} für die Raumrichtungen X, Y und Z mit dem Vektor der mechanischen Spannung {T} für die Raumrichtungen X, Y, Z, XY, YZ sowie XZ und wird in folgender Form notiert:

$$[e] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Im Falle der Nutzung des (3,3)- bzw. (3,1)-Effekts ergibt sich folgende Vereinfachung für die [e]-Matrix:

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_2 \\ 0 & 0 & e_2 \\ 0 & 0 & e_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_1 & 0 \\ e_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Die piezoelektrische Matrix kann in ANSYS als piezoelektrische Dehnungsmatrix [d] eingegeben werden. ANSYS wandelt automatisch die Matrix [d] in eine piezoelektrische Steifigkeitsmatrix [e] um, unter Zuhilfenahme folgender Beziehung [33]:

$$[e] = [c] \cdot [D] \quad (2.10)$$

Die allgemeine Dielektrizitätsmatrix $[\epsilon]$ hat die Form:

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

wobei $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ die Dielektrizitätskonstanten in den Raumrichtungen darstellen.

Die theoretischen Grundlagen sind in der Literatur [31] ausführlich beschrieben.

Zur Modellierung mit finiten Elementen in ANSYS wurde das **SOLID5**-Element verwendet (Bild 2.6).

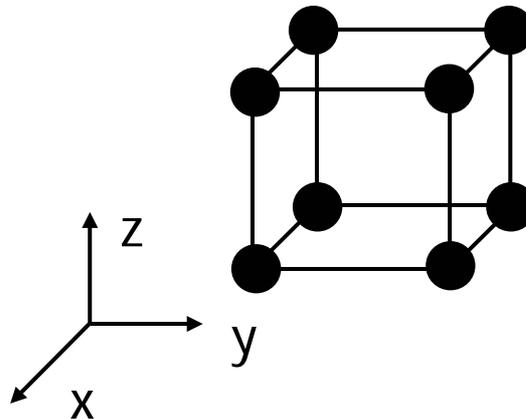


Bild 2.6: 8-Knoten Coupled-Field Element SOLID5

Dieses Element kann dreidimensionale magnetische, thermische, elektrische, piezoelektrische und strukturelle Felder mit begrenzter Koppelung zwischen den Feldern beschreiben. Es ist definiert durch acht Knoten mit bis zu sechs Freiheitsgraden an jedem Knoten.

Für Federstahl wurde das Element SOLID45 zur Modellierung dreidimensionaler Strukturen verwendet. Das Element wird wie SOLID5 durch acht Knoten definiert, aber pro Knoten existieren nur drei Freiheitsgrade (Translation in X-, Y- und Z-Richtung).

3. Realisierung

Ziel der FEM-Berechnungen war es zunächst, die prinzipielle Funktionsweise der ausgewählten Elemente nachzuweisen. Anschließend erfolgte mit parametrisierten Modellen eine Optimierung der Geometrie. Der Schwerpunkt lag dabei in der Maximierung des Stellweges bei gleichzeitig größtmöglicher Steifigkeit des Systems, der Auswahl geeigneter Werkstoffe, sowie Art, Größe, Anzahl und Platzierung der aktiven Teile des Aktors. Ein weiteres Ziel ist es, die Werkstoffbeanspruchung in den Feststoffgelenken zu minimieren, um eine ausreichende Anzahl von Lastspielen zu ermöglichen.

3.1 Wege zur Realisierung ebener Strukturen

Bei den ebenen Systemen werden zwei Wege verfolgt. Einerseits soll das Hebelprinzip genutzt werden und andererseits eine Wegvergrößerung durch Wegaddition erreicht werden.

Wie bereits erwähnt, liegen alle Komponenten des ebenen Wegvergrößerungssystems innerhalb einer physikalischen Wirkebene. Somit ist es möglich, die Strukturierung aus platten- oder scheibenförmigem Ausgangsmaterial herzustellen.

3.2 Zweiseitig eingespanntes Hebelsystem

Die Ausgangsgeometrie wurde, wie in Bild 3.1 dargestellt, auf der Basis eines zweiseitig eingespannten Hebelsystems entworfen. Die Maße wurden mit $L=70$ mm Länge, $b=25$ mm Breite und 1 mm Dicke gewählt, wobei der Rahmen der Piezoplatte von den aktiven Elementen elektrisch getrennt sein muss.

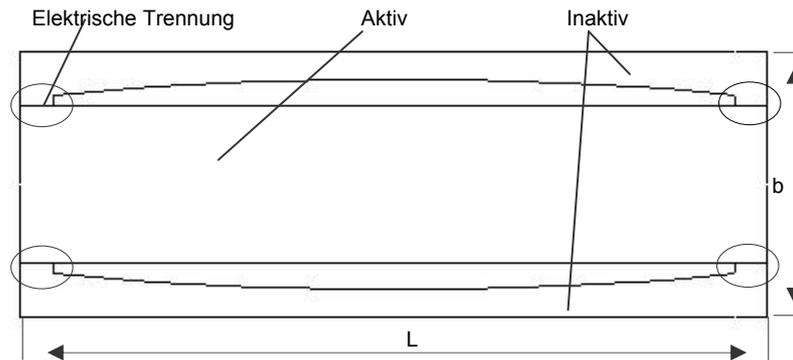


Bild 3.1: Ausgangsgeometrie des zweiseitig eingespannten Hebelsystems

Dieser Übersetzungsmechanismus ist schon bekannt. Eine geringe Längenänderung des aktiven Mittelteils führt zu einem vielfach größeren Ausgangshub am Rahmen.

3.2.1 Berechnung der Ausgangsgeometrie

Ausgehend von einer Vereinfachung des Modells mit Hilfe eines doppelt wirkenden Hebelsystems wie in Kapitel 2.1.3, liefert das Einsetzen der Bemaßungen des Modells in die Systemgleichungen eine Auslenkung $x_B = 240 \mu\text{m}$. Da dies allerdings nur eine sehr grobe Näherung ist, die auf einem idealen System basiert (unendlich steifes Material und unendlich weiche Gelenke), ist eine Simulation deutlich genauer. Diese wird im Folgenden erläutert. Dazu ist zuerst ein Gitternetz des Modells zu entwerfen, welches dann für die Berechnung an die FE- Software übergeben werden kann.

Die Festlegung des für die Berechnung verwendeten Gitternetzes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse, aber auch auf den notwendigen Rechenzeitbedarf. Ist das Netz zu grob, so können physikalische Effekte u. U. nicht abgebildet werden. Daneben ergeben sich auch numerische Probleme im Zusammenhang mit der Konvergenz der zur Lösung verwendeten iterativen Gleichungslösers. Wird das Netz zu dicht gewählt, muss eine große Zahl nicht notwendiger Gleichungen gelöst werden, was die erforderliche Rechenzeit und den Einfluss von Rundungsfehlern negativ beeinflusst.

Die gefundene Vorvernetzung muss dann im Rahmen von Simulationsexperimenten weiter verfeinert werden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen Trial-and-Error Prozess, bei dem das Konvergenzverhalten der Solver und die physikalische Plausibilität der erzielten Ergebnisse einerseits, sowie der erforderliche Rechenaufwand andererseits die erforderliche Rückmeldung liefern [31]. Um allen Anforderungen

gerecht zu werden, wurde keine automatische Vernetzung gewählt, sondern das strukturierte Netz individuell an die Problemstellung angepasst, wie im Bild 3.2 dargestellt.

Für die Simulation ist es wichtig, das Netz und genaue Eigenschaften der Materialien sowie geeignete Randbedingungen festzulegen. Die Materialeigenschaften der Keramik PZT-151

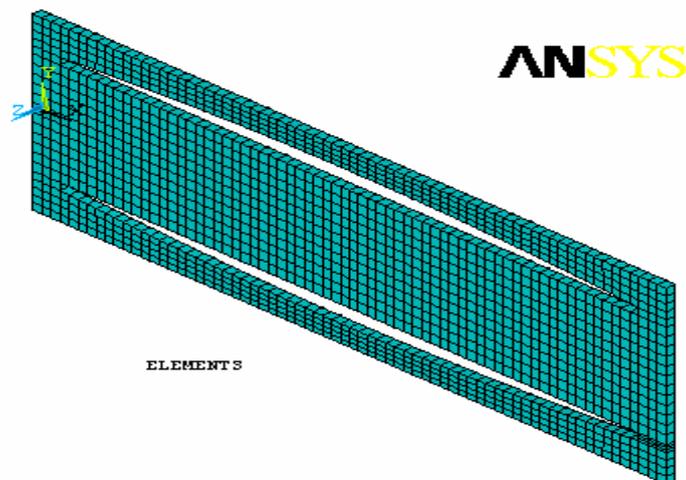


Bild 3.2: Vernetzungsstruktur

wurden aus einem Datenblatt entnommen. Oft ist es schwierig alle Elemente der Marix von den Herstellern der Keramiken zu erhalten. Für alle FEM-Berechnungen wurden für die Keramik 151 folgende Parameter verwendet

$$[c] = \begin{bmatrix} 107.6 & 63.85 & 63.12 & 0 & 0 & 0 \\ & 100.4 & 63.12 & 0 & 0 & 0 \\ & & 107.6 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 19.62 & 0 & 0 \\ & \text{Symmetrie} & & & 19.62 & 0 \\ & & & & & 22.24 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -9.6 \\ 0 & 0 & 15.1 \\ 0 & 0 & -9.6 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15.1 & 0 \\ 15.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ Cb/m}$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 1.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.852 & 0 \\ 0 & 0 & 1.11 \end{bmatrix} 10^{-8} \text{ F/m}$$

In einem Simulationsexperiment wurde der mittlere Teil der Piezoplatte mit 1000 Volt angeregt. Dies führte zu einer Verkürzung der Piezoplatte um ca. 30 µm. Eine Seite wurde eingespannt und alle Freiheitsgrade in z- und x-Richtung auf Null gesetzt. Ziel der FEM-Berechnungen war es zunächst, die prinzipielle Funktionsweise der ausgewählten Elemente nachzuweisen, um eine ausreichende Anzahl von Lastspielen zu ermöglichen. Bild 3.3 zeigt, dass der gewünschte Effekt zu erreichen ist und liefert

einen Stellweg (USUM) von ca. 38 μm . Die mechanischen von-Mises Vergleichsspannungen (SEQV) sind mit ihren Maximalwerten von $\text{SMX}=56,6 \text{ MPa}$ zu groß, sie liegen außerhalb der Beanspruchbarkeit der Keramik von etwa 50 MPa (Bild 3.4).

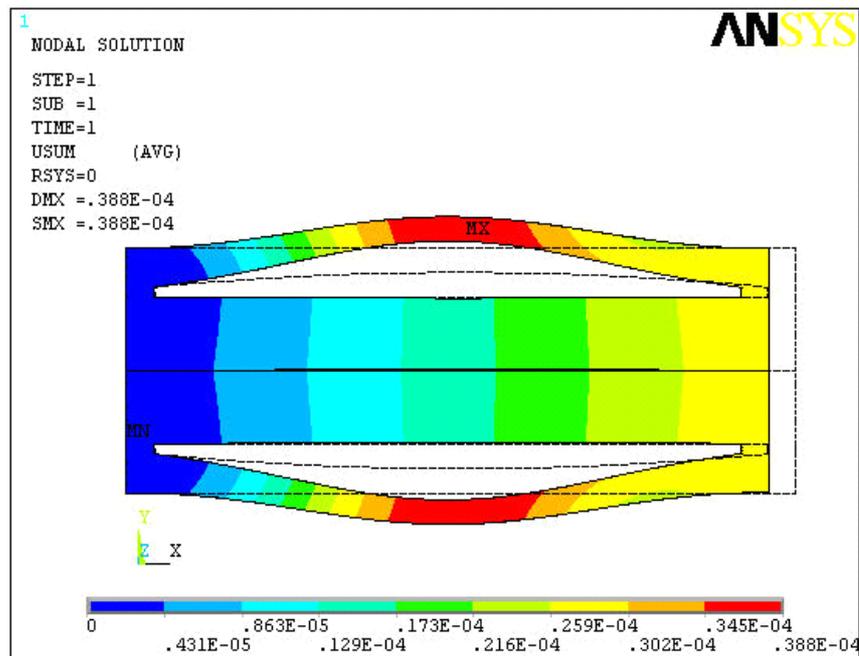


Bild 3.3: Verschiebung USUM

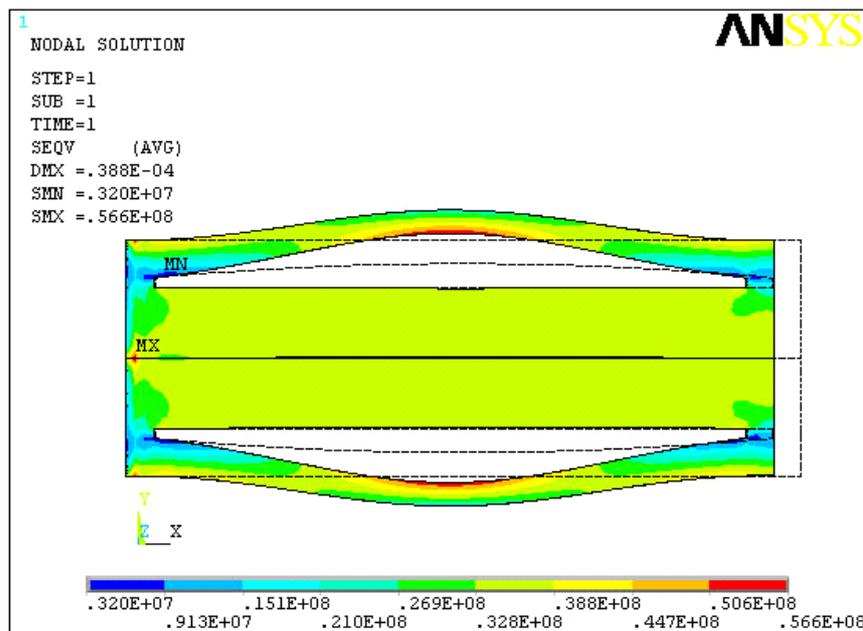


Bild 3.4: Von-Mises Vergleichsspannung (SEQV)

Im Hinblick auf die im Übersetzungsmechanismus wirkenden, hohen Druckbelastungen müssen die biegeelastischen Gelenkstellen eine große Druckfestigkeit und Steifigkeit und einen dementsprechend großen Querschnitt besitzen, woraus sich jedoch der Nachteil ergibt, dass Rückstellkräfte erzeugt werden und damit dem aktiven Teil entgegenwirken.

Der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen lag in der Maximierung des Stellweges und der Minimierung der Werkstoffbeanspruchung.

3.2.2 Optimierung

Nachfolgend seien einige wesentliche Kriterien und Ergebnisse des Entwicklungs- und Optimierungsprozesses der Struktur genannt. Im Verlauf der Optimierung wurden an kritischen Stellen Gelenke eingeführt. Die Berechnungen ergaben anfänglich zu große Spannungen in den Gelenken. Es zeigte sich, daß durch Vergrößern der Radien und der Stegdicken der Gelenke die Spannungen bei gleichzeitiger Beibehaltung der Funktionsparameter wie Steifigkeit und Übersetzungsverhältnis wesentlich reduziert werden konnten, ohne die erreichbaren Wege einzuschränken.

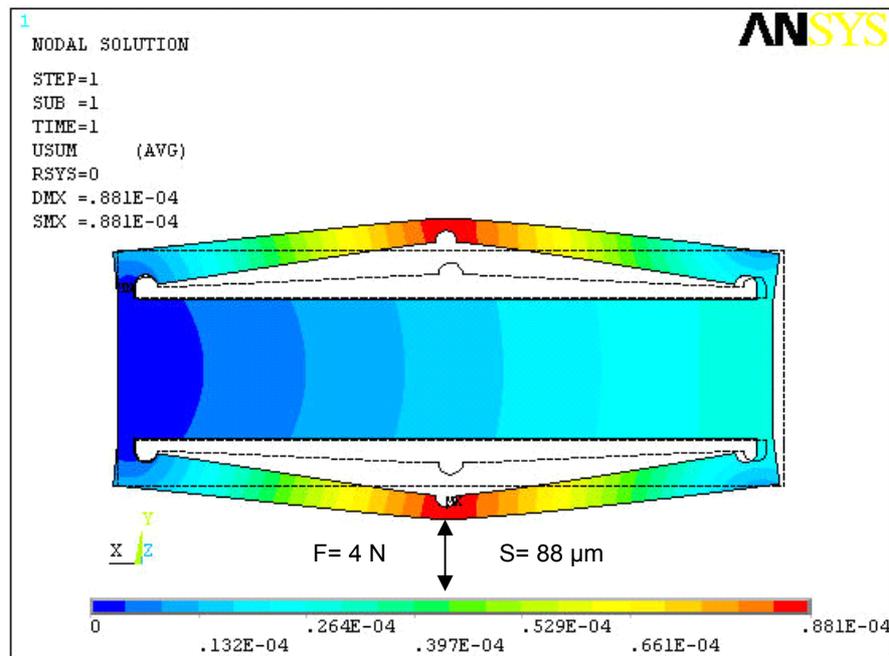


Bild 3.5: Verschiebung (USUM) der optimierten Struktur

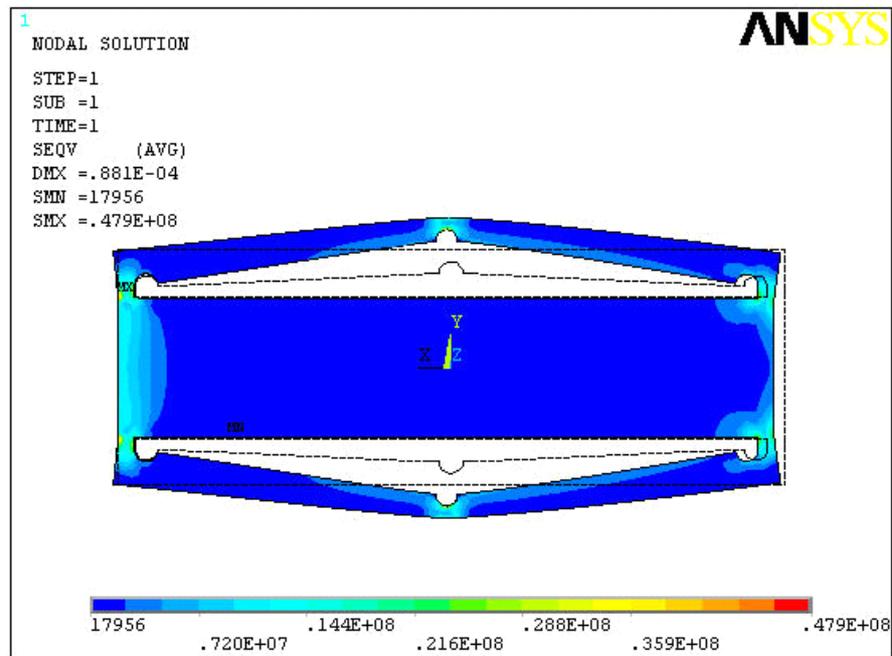


Bild 3.6: von-Mises Vergleichsspannung (SEQV) der optimierten Struktur

Die Bilder 3.5 und 3.6 zeigen das Ergebnis des Optimierungsprozesses, wobei der Hub (USUM) nun 88 μm sowie die maximale Vergleichsspannung $\sigma = 50 \text{ MPa}$ betragen. Es zeigt sich, dass gegenüber der Ausgangsstruktur zum einen die Spannung wesentlich reduziert und außerdem der Weg insgesamt von $2 \times 38 \mu\text{m}$ auf $2 \times 88 \mu\text{m}$ vergrößert wurde.

3.3 Piezoaktor-Strukturierung

Zur Herstellung strukturierter Keramiken werden piezokeramische Vorprodukte in Form von Platten, Scheiben und Blöcken genutzt, die mehrere Hersteller in unterschiedlichen Abmessungen liefern. Das keramische Herstellungsverfahren beeinflusst die elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Anhand der Herstellerdaten lassen sich für die strukturierte Piezokeramik geeignete Produkte auswählen.

Der keramische Prozess bietet die Möglichkeit der Herstellung einer Vielfalt von geometrischen Formen aus piezoelektrischen Keramiken mit unterschiedlichen Spezifikationen für verschiedene Anwendungen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Piezokeramiken mit ihrer speziellen Bearbeitung setzen da an, wo der bis hierhin beschriebene Keramikherstellungsprozess endet (Bild 3.7). Die Bearbeitung erfolgt in mehreren Stufen durch Sägen, um die gewünschten Grundabmessungen zu erhalten

und Polieren, um Oberflächenrauigkeiten zu reduzieren. Die elektrische Kontaktierung wurde mit einer UV-Lötanlage durchgeführt. Die eigentliche Strukturierung wird mit einer Ultraschallanlage vorgenommen, mit der Durchbrüche und Kanäle mit Mindestabmessungen von 300 µm in die Piezokeramik eingebracht werden können. Dabei kommen vorgefertigte Spezialwerkzeugköpfe zum Einsatz, die an der Sonotrode befestigt werden. Diese Werkzeugköpfe haben schon die Form des gewünschten Sägeprofils. Mit deren Hilfe bearbeitet die Ultraschallanlage hochfeste und spröde Materialien wie z.B. Keramik. Vor Beginn der Bearbeitung mit der Anlage wird zuerst das Werkstück mit Wachs auf ein Aufnahmeplättchen geklebt. Nach dem Einspannen dieses Aufnahmeplättchens in die Apparatur lässt man über die Keramik eine Suspension aus Wasser und Borkarbidkörnern fließen. Die Körnergröße beträgt in diesem Fall 80 µm. Durch die hohe Schwingungsamplitude (5–50 µm) werden die zugeführten Borkarbidkörner in das Piezo-Rohmaterial (Werkstück) in Form des entsprechenden Werkzeugkopfes eingehämmert. Dies führt anfangs zu vielen mikroskopisch kleinen Rissen und mit der Zeit auch zu dem gewünschten Materialabtrag.

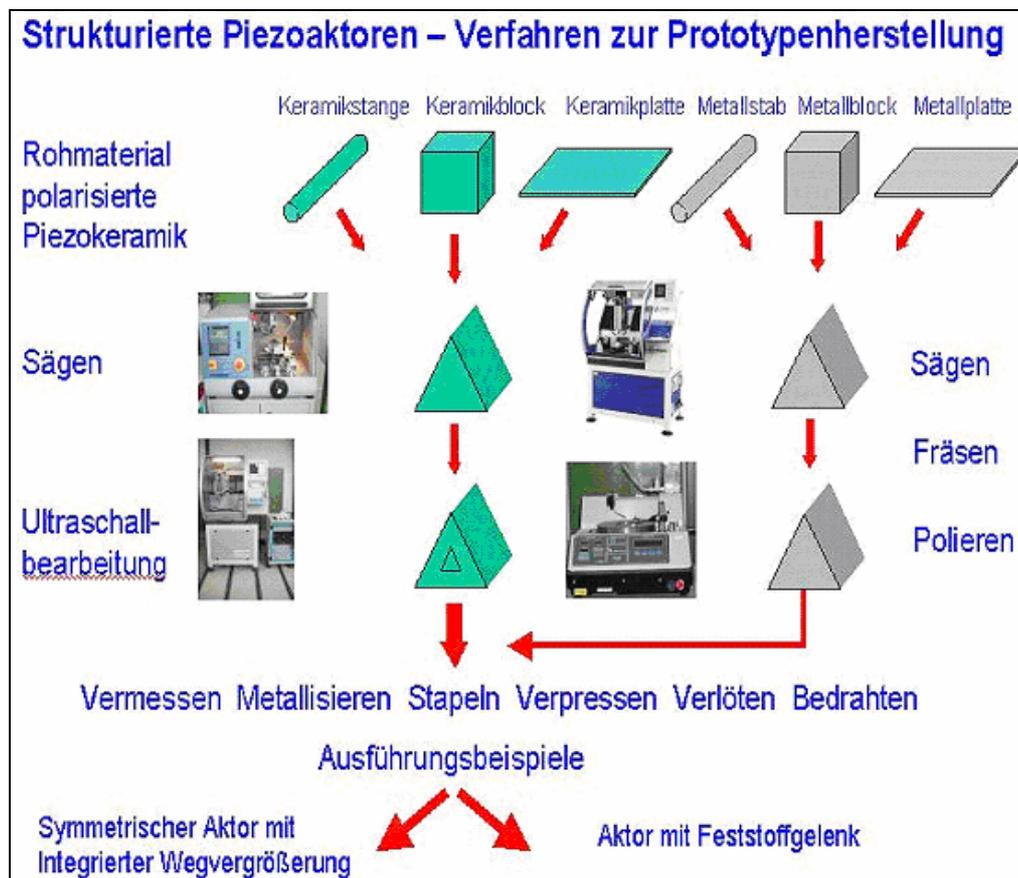


Bild 3.7: Verfahren zur Prototypenherstellung [12]

Die Suspension hat dabei die Aufgabe, den direkten Kontakt zwischen Werkzeugkopf und Werkstück zu verhindern und somit die Materialbeschädigung zu vermeiden. Gleichzeitig sind auch die arbeitswirksamen Kräfte geringer, was zur Schonung des Werkzeugkopfes beiträgt. Bild 3.8 zeigt das beschriebene Prinzip der Ultraschallanlage.

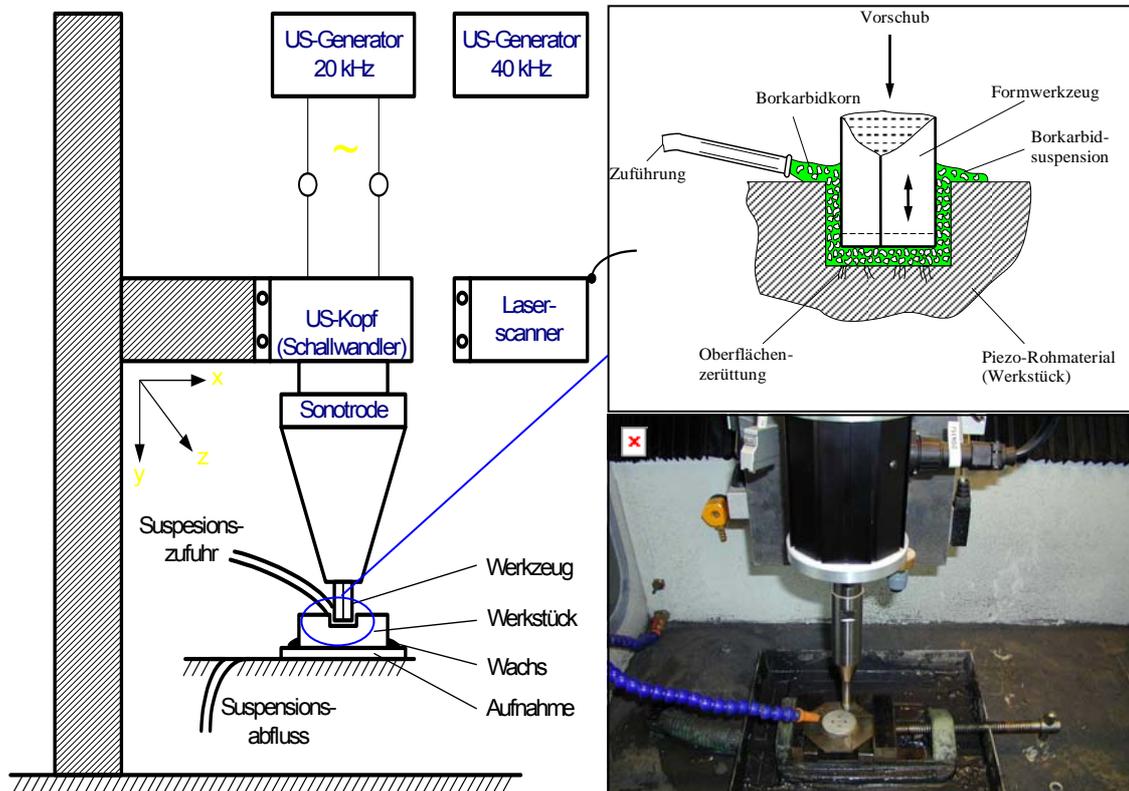


Bild 3.8: Ultraschallanlage Prinzip

Mittels Sägen, Fräsen und Polieren werden Formwerkzeuge für die Bearbeitung an der Ultraschallanlage geschaffen. Die Bearbeitung ist deshalb recht aufwendig.

Um die Genauigkeit bis in den Bereich von $30 \mu\text{m}$ zu steigern, wurden Untersuchungen mit einer Laserbearbeitungsmaschine durchgeführt. Allerdings geht durch die entstehenden hohen Temperaturen beim Laserschneiden der Piezoeffekt verloren. Dies ist in der für Piezo-Keramiken spezifischen Curie-Temperatur begründet. Wird eine Piezo-Keramik über ihre Curie-Temperatur hinaus erwärmt, so verliert sie ihre piezoelektrischen Eigenschaften. Im Falle der PZT-Keramik fällt die Elementarzelle in die kubische Struktur zurück und büßt damit ihre polare Achse ein. Sinkt die Temperatur unter diesen Wert, so ordnen sich die Elementarzellen zwar wieder

tetragonal an, die Dipole sind jedoch wieder zufällig orientiert, und ihre Dipolmomente kompensieren sich [34]. Der Kristall muss erneut polarisiert werden.

Deshalb war die Ultraschallbearbeitung ausschließlich für den Musterbau geeignet. Es zeichnet sich mit der Lasertechnik jedoch ein Verfahren ab, das auch zur Herstellung von kleinen und mittleren Serien geeignet erscheint.

3.4 Fertigung des zweiseitig eingespannten Hebelsystems

Ziel der Realisierung ist, das Ergebnis des Optimierungsprozesses nachzuweisen, und weitere Ideen einfließen zu lassen. Die Platte besteht aus einer piezoelektrischen Keramik auf Basis von Bleizirkonat-Titanat (PZT) und wird komplett mit metallisierter Oberfläche vom Hersteller bezogen (hier als PZT 151). Sie wurde so polarisiert, dass der gewünschte (3,1)-Effekt vorhanden ist. Der Strukturierungsprozess wurde wie in Punkt 4.4 beschrieben durchgeführt. Nach der Strukturierung wird die Platte nochmals erwärmt (unterhalb ihrer Curietemperatur) bis das Klebewachs flüssig ist und sie von der Befestigungsunterlage entfernt werden kann. Danach wurde sie mit Spiritus gereinigt, um sie für den nachfolgenden Klebprozess vorzubereiten. Zunächst wurden die Kontaktierungen der Drähte mit elektrisch leitfähigem Kleber auf das Piezomaterial geklebt (Bild 3.9).

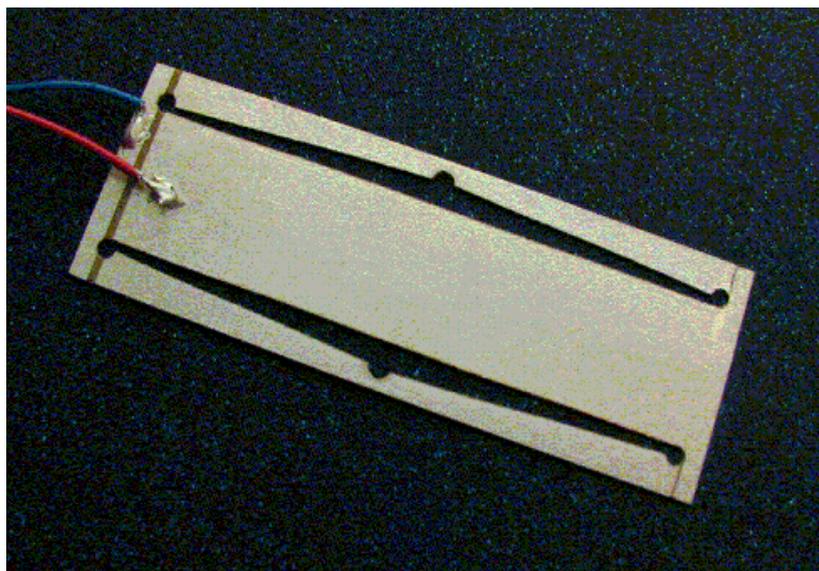


Bild 3.9: Ebener Piezoaktor mit WVS

3.5 Messungen

Der Nachweis der Funktion der gefertigten Versuchsmuster soll anhand von Weg- und Kraftmessungen erbracht werden. Die statische Vermessung erfolgt mittels eines Mikroskops.

3.5.1 Statische Messung

Ein Mikroskop der Fa. Carl Zeiss Jena ist mit einer Kamera ausgerüstet. Ein PC erfasst über einen Framegrabber die Bilddaten, bearbeitet und archiviert diese mittels des Programmsystems dhs der Firma Dietermann & Hansen. Die Vermessung der Keramik erfolgt durch Festlegen eines konkreten Konturpunktes und Ermittlung dessen Verschiebung durch Spannungsänderung am Aktor. Die ermittelten Wege liegen im μm – Bereich zur Vermessung der Spaltbreite einer 3,1- strukturierter Piezoaktor Bild 3.10 zeigt ein typisches Beispiel.

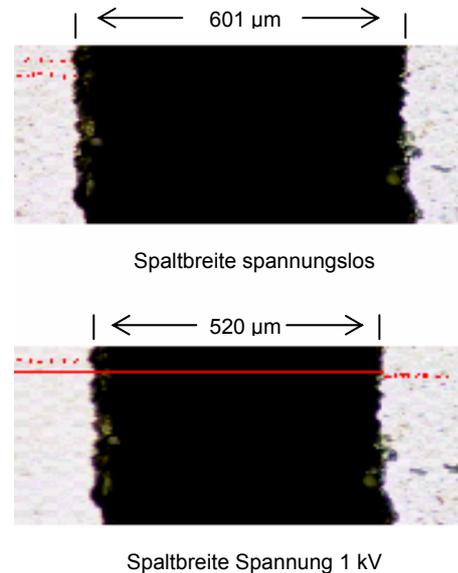


Bild 3.10: Messungen statisch

3.5.2 Quasistatische Messung

Die quasistatischen Messungen ermöglichen die Ermittlung der kompletten Hystereseurve des Aktors. Das Bild 3.11 zeigt den Versuchsaufbau.

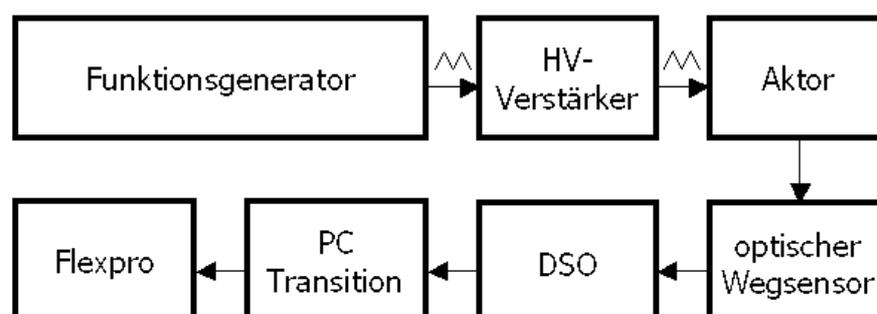


Bild 3.11: Versuchsaufbauschema zur Messung der Kennlinie

Die Wegmessung erfolgte indem ein Funktionsgenerator eine derartige Spannung für den Hochvolt–Verstärker vorgibt, so dass die Spannung am Aktor kontinuierlich von 0 V bis z.B. 2000 V ansteigt und anschließend zu 0 V wieder abfällt. Der optische Wegsensor, in diesem Fall ein Laserscanner der Firma Keyence mit 2 µm Auflösung erfasst den Hub des Aktors. Sowohl Hub als auch Aktorspannung werden vom DSO erfasst und mittels des Programms PC-Transition der Firma Gould zum PC übertragen. Das Auswerteprogramm Flexpro importiert die PC-Transitions- Daten und stellt durch x-y- Darstellung die Hystereseurve des Aktors bereit. Das Bild 3.11 zeigt beispielhaft diese Vorgehensweise, Bild 3.12 den Kurvenverlauf.

Das System erreicht durch die Verkürzung des Grundkörpers einen Stellweg von ca. 81 µm bei einer Stellkraft von ca. 4 N. Insgesamt liefert das System 2×81 µm, da zwei Balken aktiv sind. Ein Vergleich zwischen Simulation 2×88 µm und Messung 2×81 µm zeigt, dass die Übereinstimmung sehr gut ist. Aufgrund des erreichbaren Stellweges und der erreichbaren Kraft ist das System für verschiedene Anwendungen einsetzbar, zum Beispiel in der Dosiertechnik sowie auch im Bereich der Positioniersysteme und so weiter.

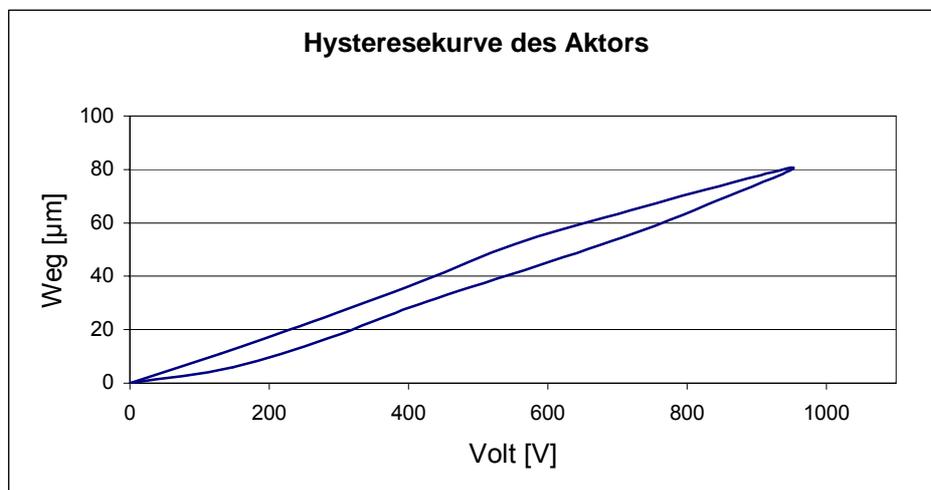


Bild 3.12: Gemessene quasistatische Hystereseurve

Weitere Ausführungen auf der Basis eines zweiseitig eingespannten Hebelsystems sind beispielsweise Ausführungen mit der doppelten Anzahl aktiver und passiver Elemente innerhalb der Piezoplatte (Bild 3.13). Die Maße der Piezoplatte bleiben erhalten, der Wirkweg ist jedoch größer. Dazu kommt, dass die Kraft kleiner wird, was eine Einschränkung der Einsatzmöglichkeiten zur Folge hat. Bild 3.13 zeigt das Ergebnis der

Simulation, wobei der erreichbare Hub (USUM) nun $104 \mu\text{m}$ beträgt. Eine weitere Durchführung von Optimierungen, beispielsweise durch Einfügen von Gelenken ermöglicht eine weitere Maximierung des Stellweges und Minimierung der Werkstoffbeanspruchung.

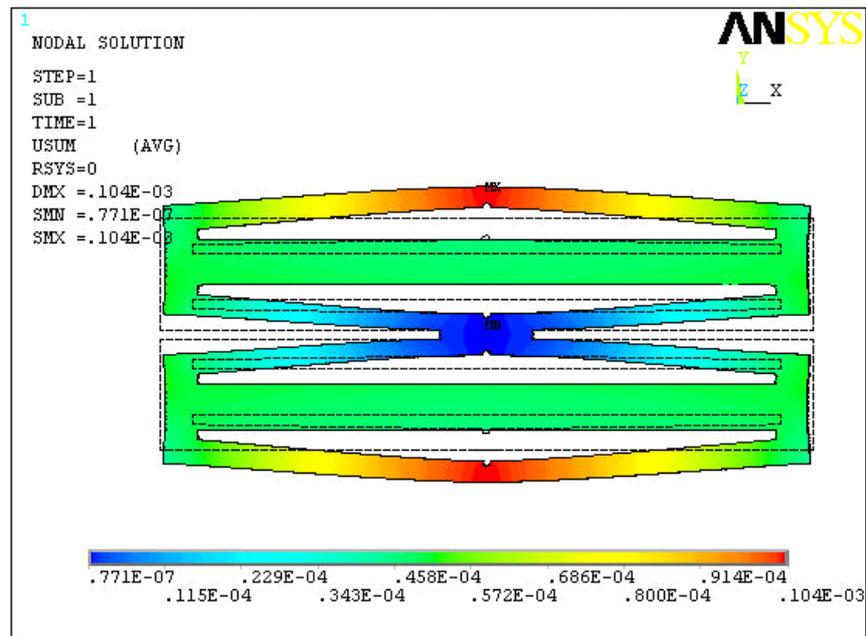


Bild 3.13: Zweiseitig eingespanntes Hebelsystem

3.6 Wegaddition

Der zweite Weg, der verfolgt wurde ist das Wegadditionsprinzip. Grundlage dieser Untersuchung bildete wieder die bereits beschriebene Piezoplatte. Es geht darum, zu zeigen, dass eine Wegaddition mittels einer Strukturierung einer Keramik möglich ist. Dabei wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt, mittels einer symmetrischen und mittels einer unsymmetrischen Strukturierung. Die Geometrie des symmetrischen Aufbaus zeigt Bild 3.14.

3.6.1 Symmetrische Ausführung

Das Gesamtmodul setzt sich aus aktiven und passiven Schenkeln zusammen, die aufgrund der Strukturierung entstehen. Wie in Bild 3.14 zu erkennen ist, wirken die äußere Rahmenstruktur sowie der innere Schenkel als aktive Elemente. Die Schenkel dazwischen, sowie die Lippen, die die gesuchte Spaltgröße bestimmen, bilden die

passiven Elemente. Die einzelnen Schenkel sind jeweils spaltförmig separiert und die passiven von den aktiven elektrisch getrennt.

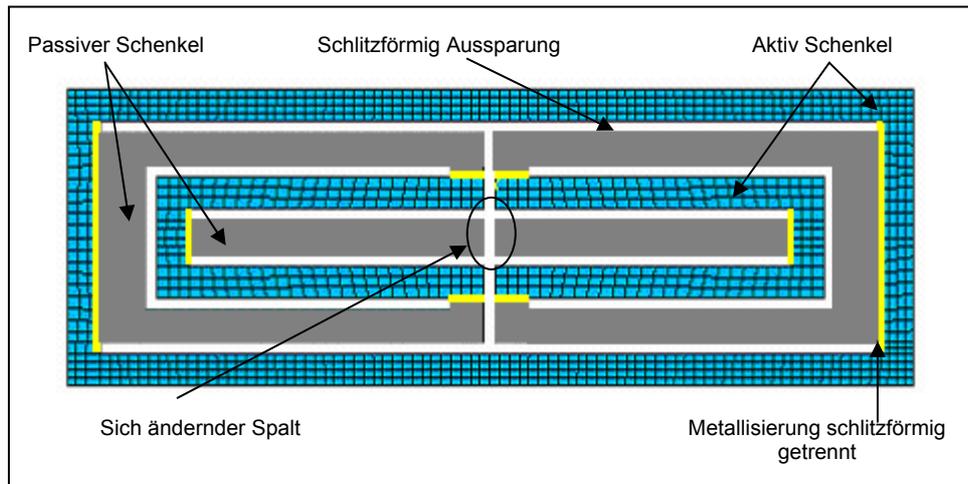


Bild 3.14: Symmetrisch strukturierte Piezoplatte zur Wegaddition

3.6.2 Ergebnisse der Simulation

Als erstes wurde in der Simulation der äußere Rahmen mit einer elektrischen Spannung von 1000 V angeregt. Es ergab sich eine Verschiebung Δs der Enden der inneren Zungen von jeweils $22.8 \mu\text{m}$, wie auch in Bild 3.15 zu sehen ist. Danach wurde zur ersten Spannung eine weitere an die inneren aktiven Schenkel angelegt, was zu einer zusätzlichen Verschiebungserhöhung auf jeweils $34,8+12,6=47,4 \mu\text{m}$ führte, siehe Bild 3.16. Dies ist gleichbedeutend mit einer weiteren Spaltverringering.

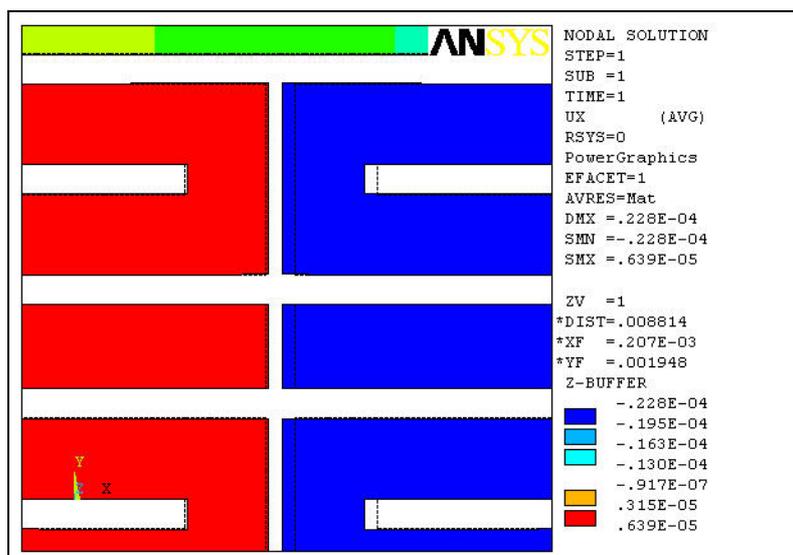


Bild 3.15: Außenschenkel aktiv

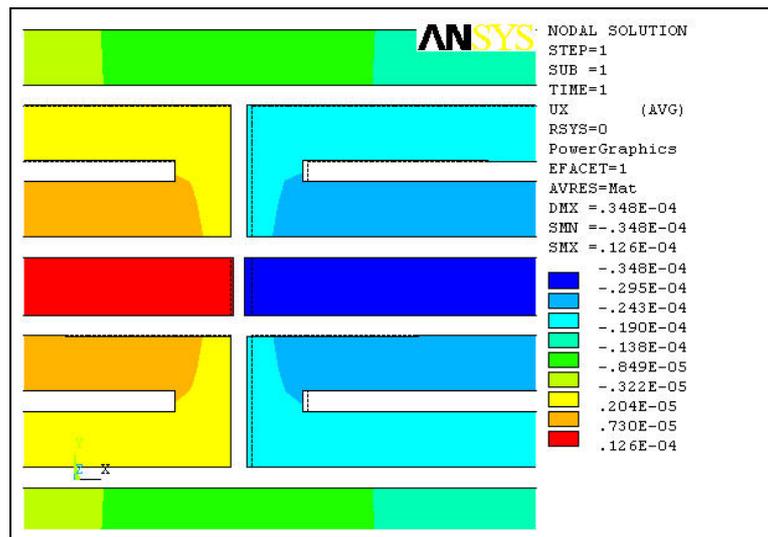


Bild 3.16: Außen- und Innenschenkel aktiv

3.6.3 Realisierung der symmetrischen Ausführung

Anhand der Simulationsergebnisse wurde eine Platte in der gleichen Weise strukturiert (Bild 3.17). Die Kontaktierung wurde aufgelötet.

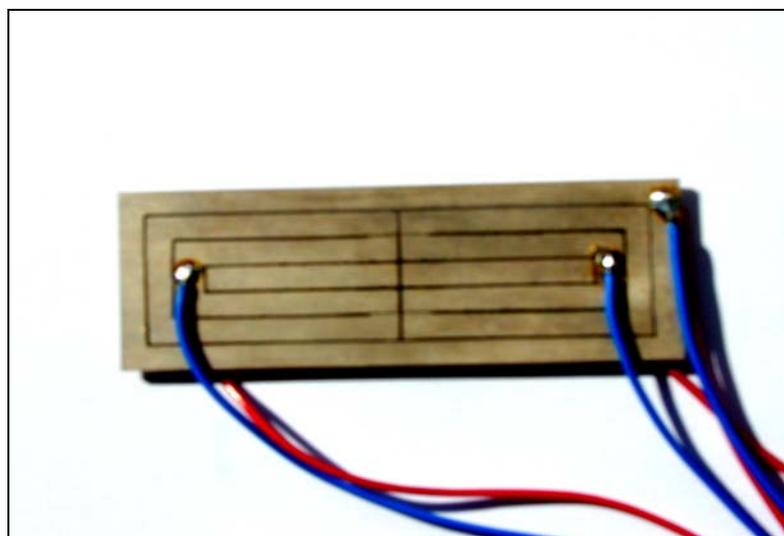
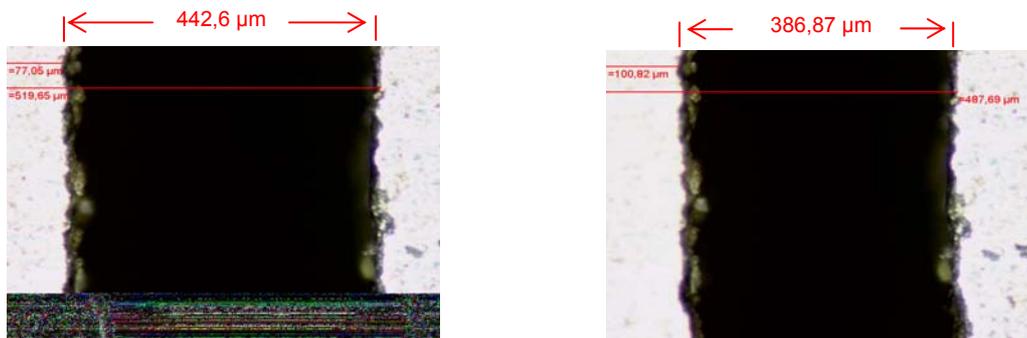


Bild 3.17: Symmetrische Ausführung des Systems mit Wegaddition

3.6.4 Mikroskopische Messung



Spaltbreite spannungslos

Spaltbreite, Spannung 1kV

Bild 3.18: Spaltänderung Δs der symmetrischen Aktorplatte

Mittels des bereits erwähnten Mikroskops wurde die Spaltänderung gemessen (Bild 3.18 links). Bei einer Spannung von 1 kV beträgt Δs ca. 55 μm . Dieses Messergebnis stimmt im Vergleich mit den Werten aus der Simulation 48 μm gut überein. Der geringe Unterschied ergibt sich aus der nicht idealen Realisierung bei der Fertigung.

3.7 Unsymmetrische Ausführung

Bei dieser Ausführung tragen ein umrahmender aktiver Schenkel sowie nach innen je abwechselnd ein passiver und ein aktiver Steg zur Wegaddition bei (Bild 3.19).

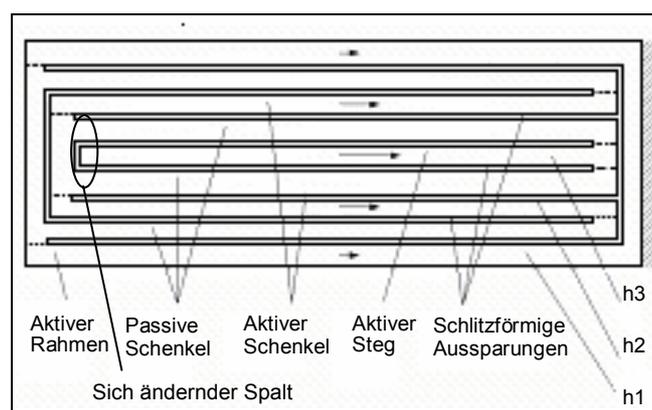


Bild 3.19: Unsymmetrische strukturierte Piezoplatte

Die Funktionsweise ist die gleiche wie bei der symmetrischen Ausführung, nur dass jetzt drei aktive Elemente unter Spannung stehen und somit einen größeren Hub hervorrufen. Die realisierte Form ist in Bild 3.20 dargestellt.

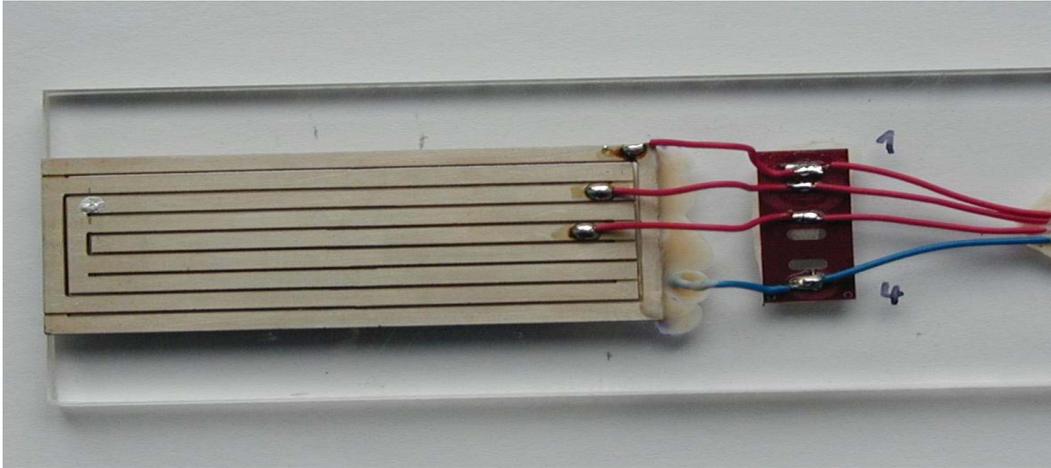


Bild 3.20: Realisierte Form des unsymmetrischen Systems zur Wegaddition

3.7.1 Messergebnisse

An die aktiven Elemente wurde nacheinander Spannung angelegt. Die daraus resultierenden Hubveränderungen in Abhängigkeit von der Anzahl der zugeschalteten Elemente sind in Bild 3.21 aufgetragen.

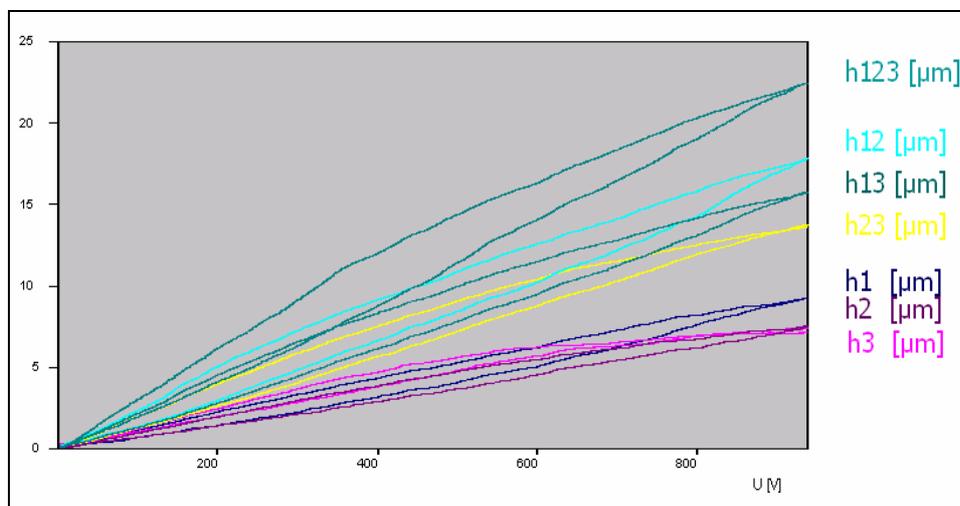


Bild 3.21: Hysterese kennlinien des unsymmetrischen Piezoaktors

Als erstes wurden der äußere Rahmen (h1), die aktiven Schenkel (h2) und der aktive Steg (h3) einzeln mit einer elektrischen Spannung von 0 –1000 V angeregt. Es ergab sich eine Verschiebung Δs der Enden der inneren Zungen $h1=9 \mu\text{m}$, $h2=7.5 \mu\text{m}$ und $h3=7 \mu\text{m}$, wie auch in Bild 3.21 zu sehen ist. Danach wurde paarweise an die aktiven Schenkel h12, h13 und h23 Spannung angelegt, was zu einer weiteren Verschiebungserhöhung führte. Zuletzt wurden all drei aktive Elemente (h123)

angeregt. Aus dem Bild 3.21 ist zu erkennen, dass sich wiederum die Spaltbreite additiv auf $\Delta s = 23 \mu\text{m}$ vergrößert. Dieser Wert gilt für eine Plate mit 1mm dicke und einer angelegten Spannung von 1000 Volt. Bei voller Ausnutzung des möglichen elektrischen Feldes lassen sich höhere Werte erzählen.

Die symmetrische und unsymmetrischen Ausführung zeigen, dass das Prinzip der Wegaddition auch mit Hilfe der Strukturierung der Keramik umsetzbar ist.

4. Räumliche Systeme

Im Gegensatz zu ebenen Systemen befinden sich bei räumlichen Systemen Teile des WVS nicht in der gleichen Wirkebene wie der Aktor. Für die Konstruktion und Herstellung bedeutet dies einen Mehraufwand. Vorteile dieser Vorgehensweise sind die wesentlich reduzierte Querkraftempfindlichkeit sowie einen deutlich robusteren Aufbau.

Mit dieser Art von Systemen wurden wiederum 2 Ansätze zur Wegvergrößerung verfolgt, einmal mittels Piezo-Piezo- und einmal in Hybridbauweise.

4.1 Grundmodell der Piezo-Piezo-Bauweise

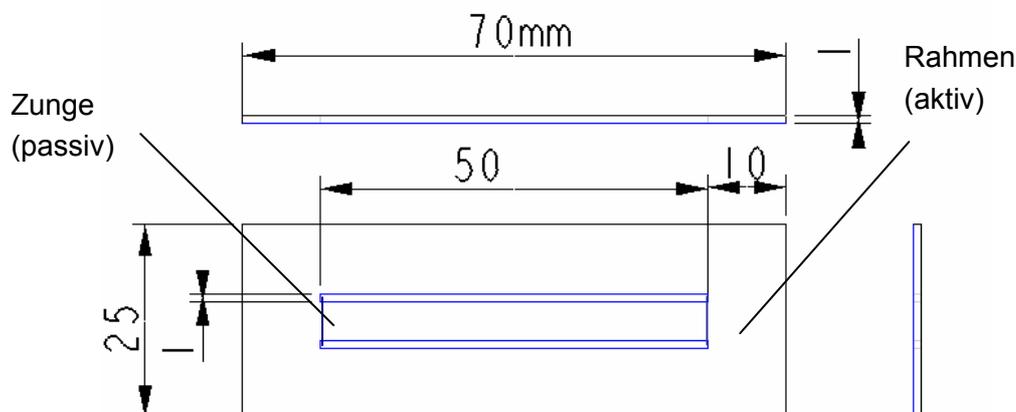


Bild 4.1: Grundmodell der Piezokeramikplatte mit Mittelsteg

Bei dieser Bauform wurde wie bei ebenen Systemen von einer Grundplatte mit den Maßen (70 mm x 25 mm x 1 mm) ausgegangen, wie sie auch in den ebenen Systemen zum Einsatz kam. In dieses Grundmodell wurden zwei längliche spaltförmige Aussparungen eingebracht, die somit eine Art Zunge als dann zu betrachtenden Hebel hervorbringen (Bild 4.1). Daraus folgt, dass das Wirkprinzip eines Hebelsystems verwendet wurde. Während bei den Systemen nach 3.2 – 3.7 die Wirkrichtung

horizontal ist, bewegt sich der Hebel in diesem Fall in vertikaler Richtung (normal zur Platte)

4.1.1 Ergebnisse der Simulation

Bei der Simulation in Ansys wurde wie bei den ebenen Systemen der Elementtyp SOLID5 verwendet. Das dabei entstandene Netz bestand insgesamt aus 3992 Knoten. Bei der FEM-Betrachtung wurde der innere Steg als passives Element gehalten. Der umgebende Keramikrahmen bildet den aktiven Teil und wurde zur Untersuchung einer elektrischen Spannung von 1000 V angesteuert.

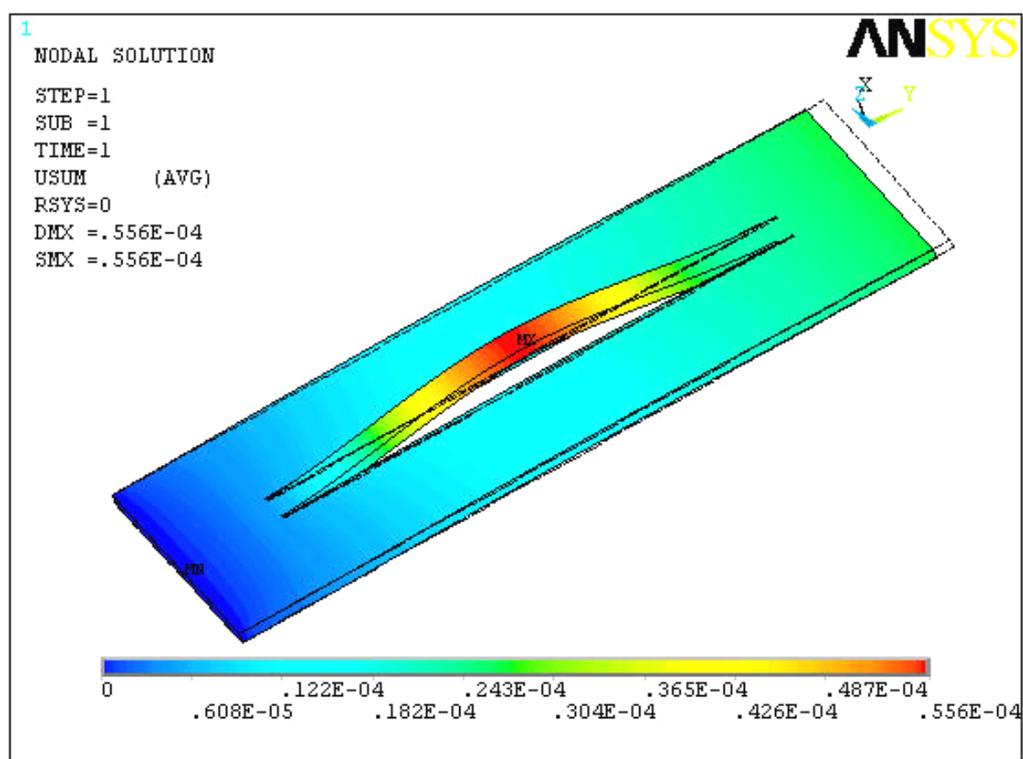


Bild 4.2: Verformung des Mittelstegs

Bild 4.2 zeigt das in ANSYS berechnete verformte Modell. Die durch die angelegte Spannung hervorgerufene Verkürzung des Keramikrahmens beträgt 30 µm. Diese bewirkt ein Durchbiegen des inneren passiven Steges um 55 µm in vertikaler Richtung. Die bei diesem Modell wirkenden Kräfte liegen unter 0,4 N, da die anfänglich sehr hohen Keramikkräfte größtenteils in Verformung umgesetzt werden.

4.1.2 Optimierung

Um einerseits die erreichbaren Wege und andererseits die Wirkkraft zu erhöhen, wurde eine Optimierung des Modells durchgeführt. Dabei wurden als Verbindung zwischen der passiven Zunge und dem aktiven Rahmen Feststoffgelenke hinzugefügt, sowie noch ein weiteres genau in der Mitte der Zunge.

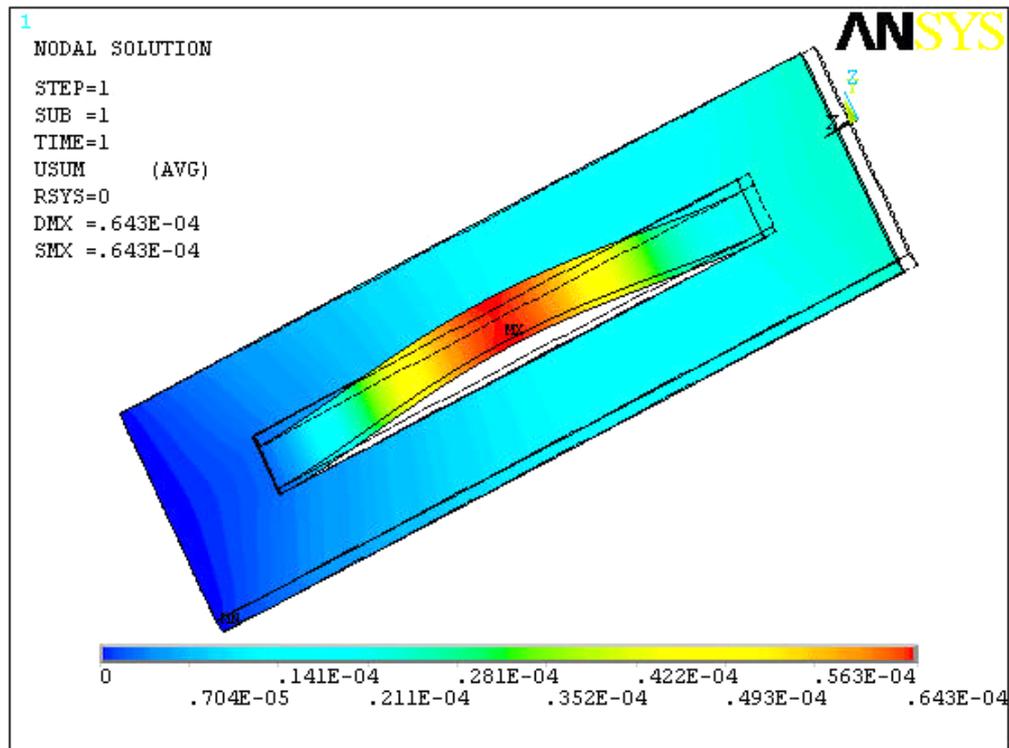


Bild 4.3: Verformung des vorgeformten Aktor

Diese Feststoffgelenke dienen dem Spannungsabbau an den kritischen Stellen. Als weitere Optimierung wurde die Zunge in Form eines Kreissegments mit einem bestimmten Radius vorgeformt (Bild 4.4). Dies führt zu einem größeren Arbeitsweg (Bild 4.3) von ca. 64 μm und einer Kraft von ca. 1 N.

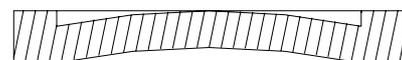


Bild 4.4: Vorgeformter Aktor

4.1.3 Fertigung der Piezokeramikplatte mit Mittelsteg

Für die Umsetzung des Modells in eine entsprechende Keramik wurden zuerst die schlitzförmigen Aussparungen hinzugefügt. Danach musste noch ein Teil der Keramik von beiden Seiten der Zunge in Kreisform abgetragen werden, siehe Bild 4.5. Dieser Vorgang wurde mit Hilfe der Ultraschallanlage durchgeführt, jedoch beanspruchte er

einen sehr großen Zeitraum, da das Werkzeug nur in kleinen Schritten nach und nach die Keramik abtragen kann.

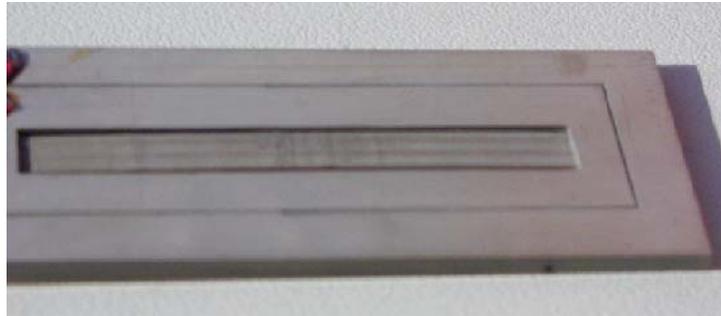


Bild 4.5: Strukturierte Grundkörper

4.1.4 Messung

Die statische Vermessung des Systems erfolgte mit dem Mess-Mikroskop wie unter Pkt. 4.6.1 beschrieben, Eine angelegte Spannung von 1000 V führte dabei zu einer Verkürzung des Grundkörpers um 26 μm . Das vertikal wirkende System erreicht einen Stellweg von 57 μm bei einer Stellkraft von ca. 1N.

Die Messwerte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Allerdings sind sowohl die Kraft als auch der Weg relativ klein, wodurch der Einsatzbereich des Aktors eingeschränkt ist. Dennoch ist das System für Dosier- und Positionierungssysteme, bei denen eine hohe Stellkraft nicht unbedingt erforderlich ist, einsetzbar.

4.2 Grundmodell der Hybridbauweise

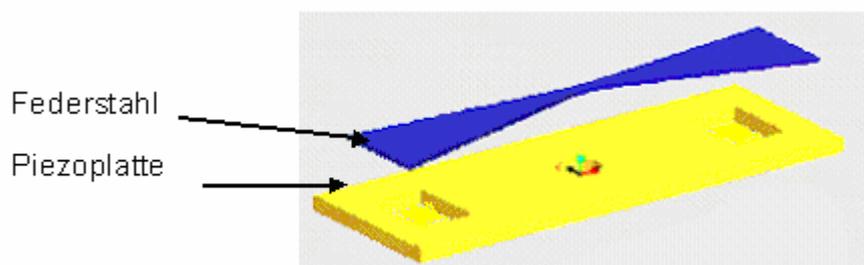


Bild 4.6: Hybride Bauweise

Um Stellwege und Stellkräfte noch zu verbessern, wurde auf eine Hybridbauweise übergegangen. Als besonders kritisch erweisen sich bei der bislang betrachteten reinen Keramiklösung die erforderlichen Feststoffgelenke. Sie sind zum Abbau von Spannungsspitzen und zum Erreichen eines großen Stellwegs unumgänglich, begrenzen jedoch die Lebensdauer des Systems, da dort die höchsten mechanischen Spannungen auftreten. Um Feststoffgelenke in der Keramik zu vermeiden bietet sich eine hybride Bauweise an, bei der stark verformte Teile nicht aus Keramik sondern aus anderen Materialien, z.B. Federstahl gefertigt werden. Bild 4.6 zeigt ein entsprechendes hybrides Hebelsystem. Der Antrieb erfolgt durch eine ebene Keramik.

4.2.1 Simulationsergebnisse

Der Grundkörper entspricht dem rein keramischen System, mit dem Unterschied, dass die verwendete Zunge aus Federstahl besteht und vorgespannt in die dafür vorgesehenen Aussparungen in der Keramik eingefügt wurde. Weiterhin wurde schon im Voraus eine Optimierung durchgeführt, die darin bestand, die Zunge nicht als Streifen mit konstanter Breite auszuführen, sondern in einer Art Butterflyform. Dies bedeutet, dass die Breite der Zunge zur Mitte hin verringert, so dass in der Mitte ein Gelenk entsteht (Bild 4.7).

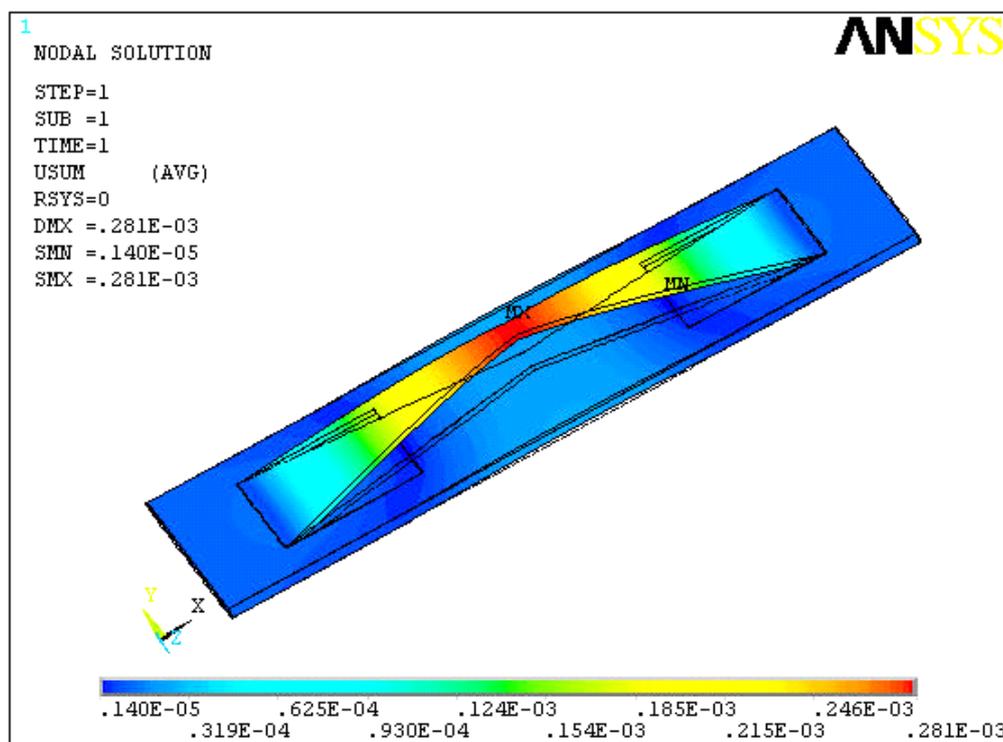


Bild 4.7: Biegung in vertikaler Richtung

Die Dicke der Zunge beträgt 0.5 mm. Zusätzlich wurde, um einen Kompromiss zwischen Weg und Kraft zu finden, der Winkel φ (Bild 2.3) der Zunge zur Piezoplatte optimiert. Um die Feder in das Ansysmodell einfügen zu können, wurde sie durch SOLID45-Elemente simuliert. Ein solches Element ist definiert durch 8 Knoten und besitzt drei Freiheitsgrade.

Als Ergebnisse der Simulation wurden ein im Vergleich zum vorhergehenden Modell wesentlich größerer Weg von 281 μm und zusätzlich höhere Kräfte von 20 N ermittelt. Diese sind in Bild 4.6 dargestellt. Der optimierte Winkel ergab sich zu $\varphi = 1.5^\circ$.

4.2.2 Realisierung der Hybridbauweise

Da die Zunge bei der hybriden Ausführung nicht mehr die Keramik selbst ist, wurden hier keine Spalte mehr in die Grundplatte eingebracht, sondern nur Aussparungen mit Hilfe der Ultraschallanlage herausgearbeitet. Dabei ergab sich ein Problem an den direkten Kontaktstellen zwischen Metall und Keramik, da auf der einen Seite sich der Federstahl in die Keramik hineinschneidet und auf der anderen Seite die hohen Spannungen möglichst großflächig übertragen werden sollen. Um dies zu vermeiden, wurde zwischen Keramik und Zunge ein L-förmiger Stahlwinkel eingebracht, so dass nun die Keramik die Kräfte komplett auf die gesamte Fläche des Stahls und somit auch auf die Zunge übertragen kann. Im Vergleich zu den vorher betrachteten Feststoffgelenken sind diese Winkel außerdem deutlich unkritischer, so dass zusätzlich noch wesentlich höhere Kräfte übertragen werden können.

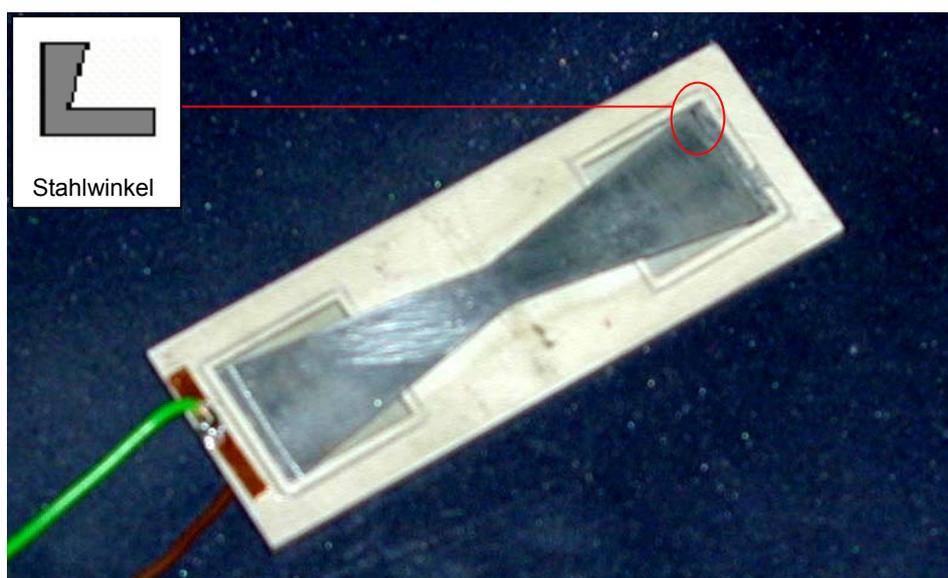


Bild 4.8: Aufbau der Hybridform

Das realisierte System zeigt Bild 4.8. Wenn man sich die Übergangsstelle zwischen Federstahl und Stahlwinkel etwas vergrößert vorstellt, erkennt man, da die Zunge leicht vorgespannt ist, dass sie nur an ihren beiden Endkanten anliegt. Dies hat den Nachteil, dass der Bewegungsfreiheitsgrad für die Drehung eingeschränkt wird und somit viel Kraft allein durch die Verformung der Zunge verloren geht. Dieses Problem wurde gelöst, indem an den Enden des Federstahls die Kanten angefast wurden. Dadurch wird die Kraft über eine größere Auflagefläche übertragen und die Verformungsbewegungsfreiheit wurde erhöht. Beim jetzigen Modell liegt die Federstahlzunge noch auf den Kanten der Aussparungen auf und ist außerdem noch über die Stahlwinkel mit der auf der Keramik aufgetragenen Metallschicht elektrisch verbunden. Um einen Kurzschluss bei angelegter Spannung zu vermeiden, wurde deshalb um die Aussparungen herum rechteckförmig eine elektrische Trennung eingefügt, das bedeutet, dass mit Hilfe der Ultraschallanlage einfach die Metallschicht durchtrennt wurde.

4.2.3 Messungen

Für die Messwertaufnahme wurde eine quasistatische Messung durchgeführt. Die Werte stimmen gut mit den Simulationsergebnissen überein (Bild 4.9). Der Hystereseverlauf liegt im Bereich der erwarteten Werte nur mit kleinen

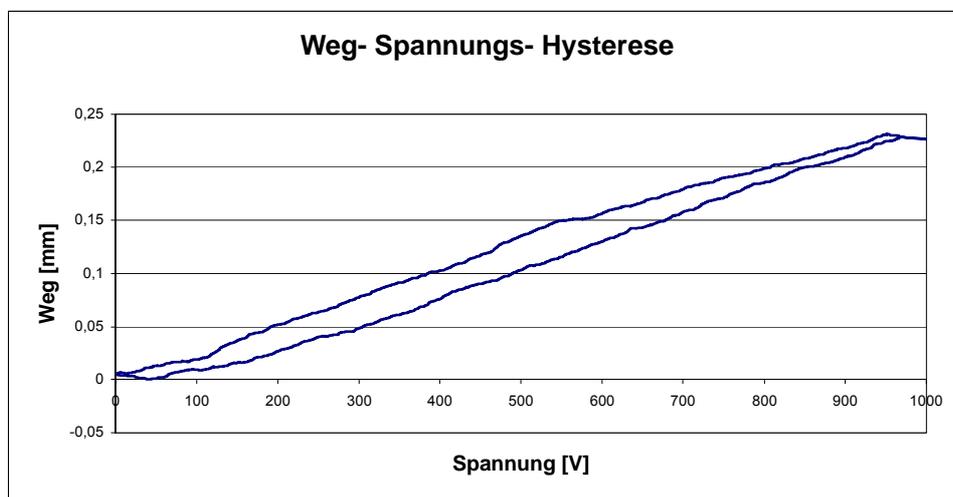


Bild 4.9: Weg-Spannungs-Hysterese der Hybridbauform (Butterfly)

Abweichungen, welche in der Fertigung begründet sind. Eine angelegte eine Spannung von 1000 V ergibt einen Weg von 230 μm .

Als nächstes wurde ein Rechtecksprung der Spannung für die Dauer einer Sekunde angelegt. Die Systemantwort auf diesen Sprung ist im Bild 4.10 dargestellt.

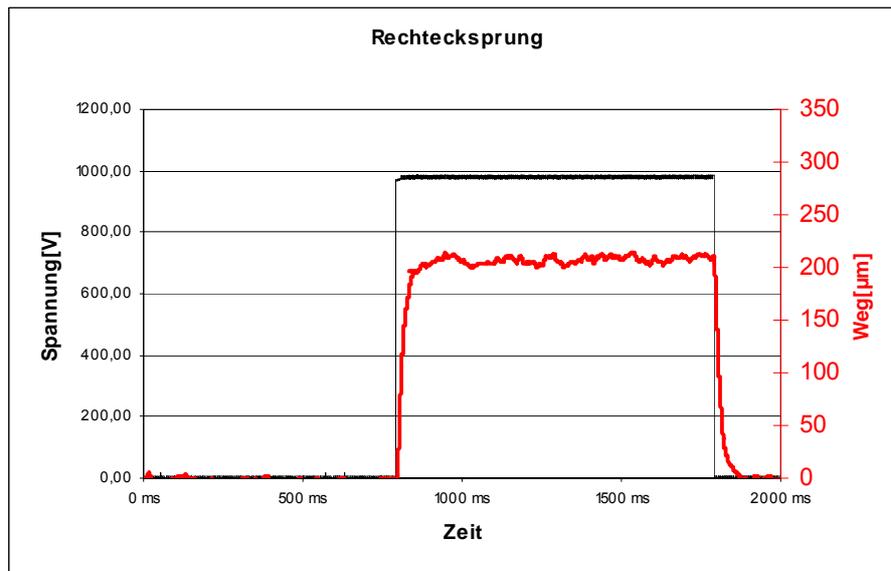


Bild 4.10: Weg-Zeit-Diagramm bei angelegtem Spannungssprung von 1000 V

Die Verzögerungszeiten liegen dabei im Bereich von 35 bis 37 ms. Dies erklärt sich aus den Toleranzen bei der Fertigung. Beispielsweise ist die Zunge nicht mit ideal glatten Kanten eingespannt, daher muss zu Beginn des Spannungssprungs dieses Spiel erst ausgeglichen werden, was einige Millisekunden in Anspruch nimmt. Dazu kommen noch die Reaktionszeiten der eingesetzten Messtechnik.

Die Weg-Zeit-Kurve im Bild 4.10 verläuft auch im eingeschwungenen Zustand recht ungleichmäßig. Vermutlich sind Erschütterungen aus der Umgebung, Spannungsschwankungen und Rauschen der Messwerterfassung die Ursache.

4.3 Grundaufbau der zweiseitigen Butterfly-Hybridform

Um die von der Keramik erzeugten Spannungen noch besser nutzen zu können, wurden die Aussparungen für die Zungenhalterung auf der Keramik weggelassen und stattdessen Öffnungen komplett durch die Grundplatte hindurchgebrochen. Somit ist es nun möglich, mit Hilfe von Σ -förmigen Klammern als Halterung jeweils eine Zunge auf beiden Seiten anzubringen (Bild 4.11). Durch diese Anordnung erhält man annähernd den doppelten Hub bei fast gleicher Kraft. Die Metallschicht (Elektroden) auf beiden Piezoplaten um die Aussparungen wurde entfernt um Kurzschlüsse zu vermeiden. Vorteilhaft an den verwendeten Kontaktierungsstahlwinkeln ist, dass sie eine Längenvergrößerung für das Federstahlelement bewirken und somit bei der kleineren

Abmessung der Piezoplatte eine resultierende größere Auslenkung in vertikaler Richtung hervorrufen, als vorher mit kürzerer Zunge.

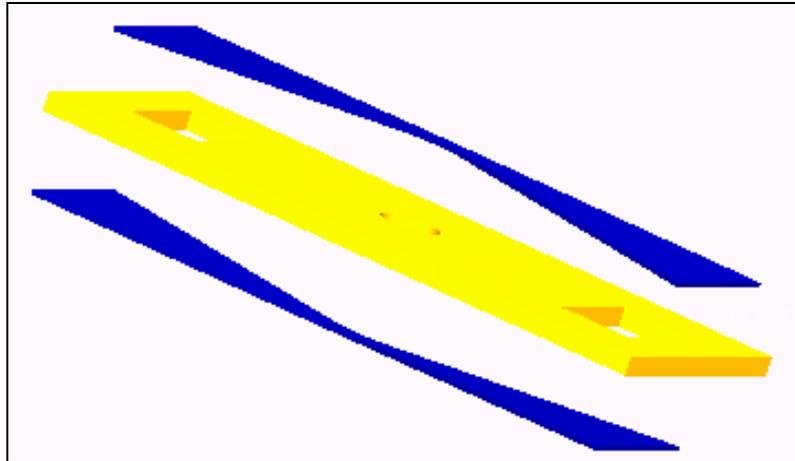


Bild 4.11: Zweiseitig wirkende Butterfly-Hybridform

Als letzter Vorgang bei der Montage musste noch die Kontaktierung vorgenommen werden. Als erstes wurden die Kontaktpunkte mit elektrisch leitfähigem 2-Komponentenkleber auf die Metallschicht aufgeklebt. Dies erwies sich jedoch als ungünstig, da größere Stellen nicht sauber geklebt werden konnten und der Prozess durch das Trocknen sehr zeitaufwendig war. Daher wurde versucht, die Kontakte aufzulöten. Durch die sehr dünne Metallschicht rissen jedoch die Lötunkte schnell ab, weshalb abschließend ein anderes Verfahren versucht wurde. Hierbei wurde auf die Metallschicht zusätzlich ein elektrisch leitfähiges Klebeband aufgebracht und darauf die Kontakte gelötet. Durch das Klebeband wurde nun die gewünschte Haftung auf der Keramikplatte erreicht.

Für die Vermessung wurde auch hier eine quasistatische Messung durchgeführt. Die erreichte Stellwege sind im Vergleich zum einseitigen System ungefähr doppelt so groß. Der Hystereseverlauf liegt im Bereich der erwarteten Werte nur mit kleinen Abweichungen, welche wiederum in der Fertigung begründet sind. Eine angelegte Spannung von 1000V liefert einen Weg von ca. 400 μm (Bild 4.12).

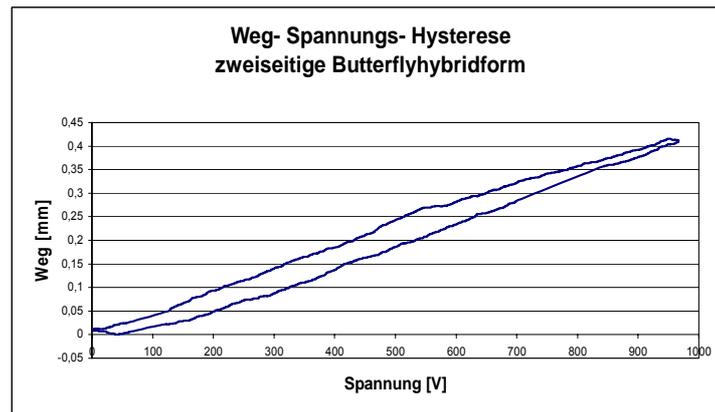


Bild 4.12: Weg-Spannungs-Hysterese

Es ist zu erkennen, dass sich durch den Einsatz der zweiseitigen Butterfly-Hybridform die Stellwege deutlich erhöhen lassen. Dadurch ergibt sich letztlich ein größeres Anwendungsspektrum.

4.4 Weitere hybride Bauformen

Aufbauend auf dem bisher beschriebenen Hebelsystem wird das Modell dahingehend erweitert und optimiert, dass nun als Grundplatte eine kreisförmige Keramikscheibe dient, die ebenfalls den (3,1)-Effekt nutzt. Bild 4.13 veranschaulicht die Kontraktion der Kreisscheibe bei Anlegen einer Spannung. Im spannungslosen Zustand hat die Scheibe einen Radius von 40 mm und eine Dicke von 0,8 mm. Um das Zusammenziehen genauer bestimmen zu können, wurden auf der Scheibe Messpunkte aufgebracht, und deren Ortsveränderung bei Anlegen einer Spannung festgestellt. Diese sind im Bild als Vektoren dargestellt.

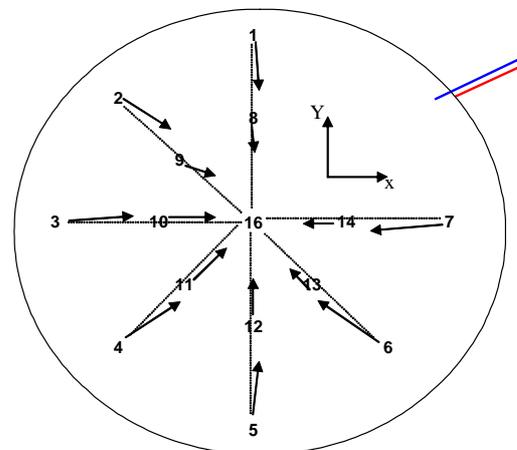


Bild 4.13: Piezo-Kreisscheibe

Auf der Keramikscheibe wird als weitere Veränderung eine segmentierte Ausführung der Federstahlzunge verwendet, was bedeutet, dass sie einen kreisförmigen Mittelpunkt hat, von dem aus nicht wie vorher nur zwei „Strahlen“ abgehen, sondern zehn. Die Enden der Strahlen münden in die vorher in die Keramik eingebrachten Aussparungen. Eine Veranschaulichung der Konstruktion des Tellersystems ist in Bild 4.14 dargestellt.

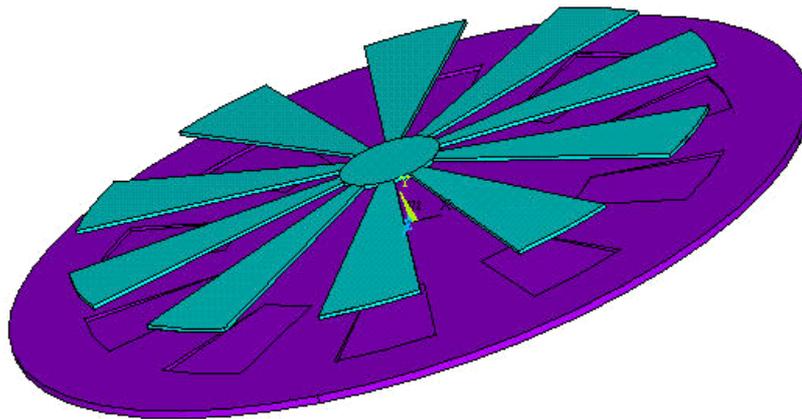


Bild 4.14: Kreisförmige Keramikscheibe mit WVS (Tellersystem) [44]

4.4.1 Simulation

Um die Simulation zu vereinfachen, wurde, da die Anordnung symmetrisch ist, nur ein einzelnes Segment der Zunge zusammen mit dem darunterliegenden Piezosektor betrachtet. Der Simulationsvorgang verlief genau wie oben bei dem butterfly-förmigen hybriden System (Bild 4.15). Man sieht, dass ein deutlich vergrößerter Weg von 0,5 mm in vertikaler Richtung erreicht wurde. Die Stellkräfte steigerten sich durch die erhöhte Anzahl von Zungen auf bis zu 40 N.

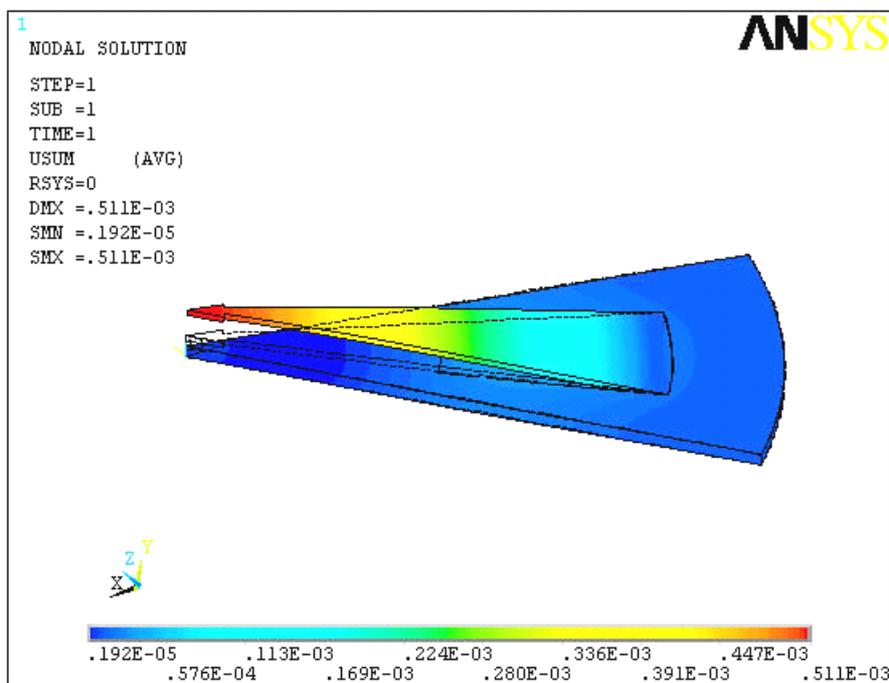


Bild 4.15: Verformung aus der FE-Berechnung

4.4.2 Aufbau des Tellersystems

Wie aus der Grafik der Simulation hervorgeht, wird mit dieser Umsetzung nicht ein einzelner Punkt vertikal bewegt, sondern eine ganze Kreisfläche. Vorteilhaft dabei ist eine bessere Kraftverteilung in Hinblick auf eine kommerzielle Anwendung dieses Prinzips. Die Herstellung der Federstahlstruktur ist bedeutend schwieriger als bei normalem Stahl, daher erfolgt die Herstellung durch Laserstrahlschneiden.

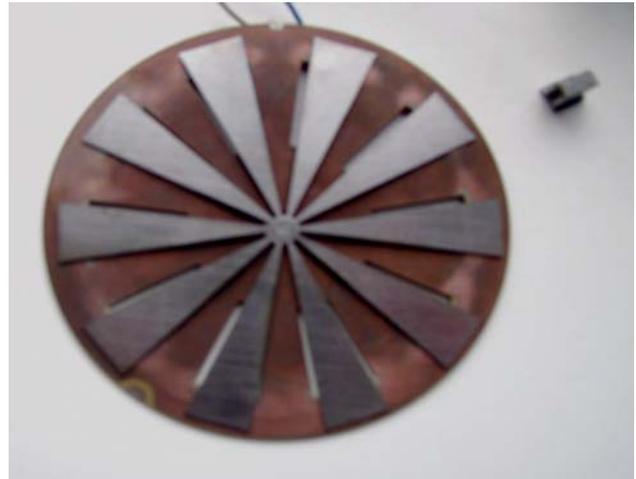


Bild 4.16: Aufbau des Tellersystems

Im Gegensatz zur Simulation wurden bei der Realisierung die Aussparungen in der Keramik gleich durch pyramidenstumpfförmige Durchbrüche ersetzt. Des Weiteren kamen auch wieder zwei aneinander liegende Keramikscheiben zum Einsatz, die wiederum durch Σ -förmige Stahlwinkel zusammengehalten wurden. Diese Stahlwinkel bilden gleichzeitig die Haltevorrichtungen für die 10 Federstahlzungen. Allerdings war die Fixierung hier nicht mehr so einfach, da eine so genaue Fertigung der Einzelteile nicht möglich ist, dass alle Zungen exakt in die Halterungen passen. Daher musste im Nachhinein noch eine feinmechanische Nachbearbeitung bzw. Anpassung der Zungen und Stahlwinkelhalterungen vorgenommen werden. Gleichsam wurden auch hier wieder die Metallelektroden auf den Keramikscheiben im Bereich der Halterungen weggeätzt, um einen Kurzschluss auszuschließen. Der Vorteil des verwendeten Ätzverfahrens ist, dass keine zusätzliche mechanische Spannung bei der Herstellung des Gesamtmoduls auftritt, die zum Bruch der Keramik führen könnte. Die Befestigung der Kontaktdrähte auf der Keramik erfolgte wiederum mittels Auflöten auf ein vorher aufgebrachtes leitfähiges Klebeband. Das Gesamtmodul ist in Bild 4.16 dargestellt.

4.4.3 Messung

Die Vermessung des Übertragungsverhaltens zeigt Bild 4.17. Die kleinen Unterschiede zwischen Messung und Berechnung entstanden durch Ungenauigkeiten in der

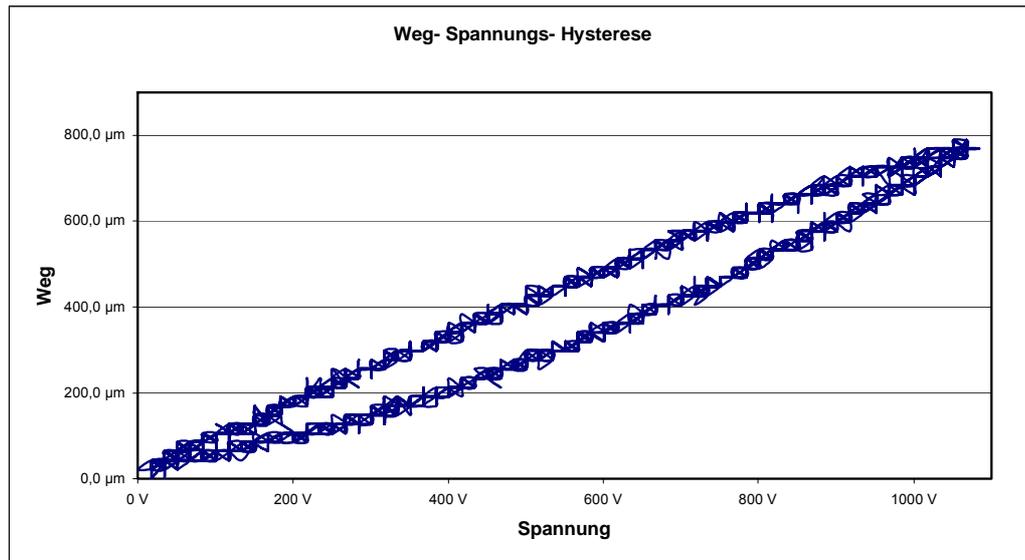


Bild 4.17: Hystereseverlauf des doppelten Tellersystems

Fertigung der Einzelelemente, Messfehler, und die Abweichung der realen Piezoeigenschaften von denen, die im Model angenommen wurden.

4.5 Zusammenstellung

Ausgehend vom Grundgedanken einer stärkeren Integration der einzelnen Funktionsgruppen moderner Aktorsysteme wurde die Integration von Aktor und WVS auf der Basis strukturierter Piezokeramiken vorgestellt. Die als Prototyp hergestellten und getesteten Aktorsysteme stellen den Anfang des Integrationsprozesses dar. Das Ziel, die Aufhebung der Trennung von Aktor und Wegvergrößerungssystem wurde erreicht. Die Schaffung neuartiger Piezoaktoren, die sich im Integrationsgrad, ihrer Funktion und Formgebung wesentlich von den zur Zeit am Markt erhältlichen Aktoren unterscheiden, eröffnet neue Wege in der Anwendung von Piezoaktoren. Auch kann man auf die Vorteile wie einfacher Aufbau, niedriger Preis, geringe Masse, geringer Platzbedarf und sehr hohe Dynamik (Nutzung des Ultraschallbereichs) aufbauen und dadurch neue Eigenschaften des Gesamtsystems erzielen.

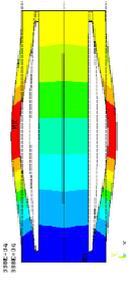
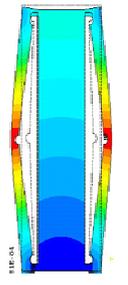
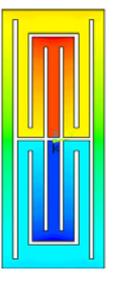
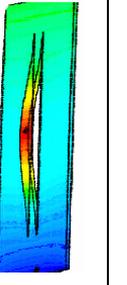
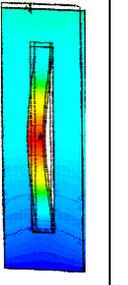
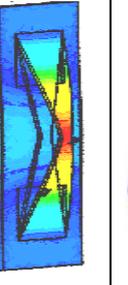
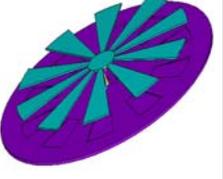
Ebene Systeme		Räumliche Systeme					
							
Ausgang zweiseitige Hebelsystem	optimiert zweiseitige Hebelsystem	Symmetrische Ausführung Strukturierte Piezo	Ausgang Verformung mittel Stegs	optimiert Verformung mittel Stegs	Hybridform Butterfly	Hybridform Tellersystem	
Weg	$\leq 38 \mu\text{m}$	$\leq 88 \mu\text{m}$	$\leq 47.4 \mu\text{m}$	$\leq 55 \mu\text{m}$	$\leq 64 \mu\text{m}$	$\leq 281 \mu\text{m}$	$\leq 511 \mu\text{m}$
Kraft	$\leq 1 \text{ N}$	$\leq 4 \text{ N}$	$\leq 0.8 \text{ N}$	$\leq 0.4 \text{ N}$	$\leq 1 \text{ N}$	$\leq 20 \text{ N}$	$\leq 40 \text{ N}$

Bild 4.18: Zusammenstellung ausgewählter Systeme

Bild 4.18 zeigt eine Auswahl der wesentlichsten strukturierten Aktoren, die untersucht wurden [46].

5. Anwendung strukturierter Piezoaktoren in der Pneumatik

Strukturierte Piezoaktoren bieten eine Vielzahl interessanter Anwendungsmöglichkeiten, da sie durch eine große Zahl freier Entwurfparameter relativ gut an unterschiedliche Aufgaben angepasst werden können. Aufgrund der günstigen technischen Randbedingungen wurde auf der Basis der hybriden Hebelstrukturen ein pneumatisches 2/2-Wege-Ventil für den Einsatz als Standardkomponente in der Pneumatik realisiert.

5.1 Ventile

In diesem Abschnitt wird zunächst kurz auf einige wichtige Begriffe aus der Pneumatik eingegangen. Ventile sind in der Pneumatik Steuerelemente, die den Leistungsfluss schaltend oder stetig beeinflussen [35]. Nach der Funktion lassen sich Ventile folgendermaßen unterscheiden [36]:

- Wegeventile: steuern die Richtung, den Anfang und das Ende des Durchflusses
- Sperrventile: verhindern abhängig von der Strömungsrichtung den Durchfluss
- Druckventile: beeinflussen den Druck des durchströmenden Mediums
- Stromventile: beeinflussen die Durchflussmenge
- Stetigventile: steuern stufenlos den Leistungsfluss

5.2 Wegeventile

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Wegeventile betrachtet. In der internationalen Norm DIN-ISO 1219 sind die Bezeichnung und die symbolische Darstellung der Ventile festgelegt. Die Bezeichnung und Einteilung der Wegeventile erfolgt nach Anzahl der Anschlüsse und nach Anzahl der Schaltstellungen. Ein

einfaches Auf- / Zu-Ventil hat 2 Anschlüsse (Einlass und Auslass) und 2 Schaltstellungen (offen und geschlossen), daher wird es 2/2-Wegeventil genannt. Ein 3/2-Wegeventil hat 3 Anschlüsse und 2 Schaltstellungen. Des Weiteren werden Wegeventile in normal offene und in normal geschlossene Ventile unterteilt.

Normal offene Ventile sind im spannungslosen, unbetätigten Zustand offen und lassen einen Fluidfluss zu. Im Gegensatz dazu sind normal geschlossene Ventile im spannungslosen, unbetätigten Zustand geschlossen. In Bild 5.1 sind normal offene und normal geschlossene 2/2- und 3/2-Wegeventile symbolisch dargestellt.

Die Anzahl der Schaltstellungen wird durch die Anzahl der rechteckigen Felder symbolisiert. Die Nullstellung, die das Ventil ohne Betätigungskraft einnimmt, wird mit einer „0“ im entsprechenden Feld bezeichnet. Die Anschlüsse werden mit 1 (Druckanschluss), 2 (Arbeitsanschluss) und 3 (Entlüftung) benannt. Die Verbindung der Anschlüsse in den unterschiedlichen Schaltstellungen wird durch die Pfeile in den Symbolen gekennzeichnet.

So ist bei einem normal geschlossenen 3/2-Wegeventil der Druckanschluss in der Nullstellung des Ventils geschlossen, der Arbeitsanschluss ist mit der Entlüftung verbunden. Bei betätigtem Ventil ist die Entlüftung verschlossen und der Druckanschluss ist mit dem Arbeitsanschluss verbunden. Die Symbole für die Betätigung des Ventils werden seitlich außerhalb der Felder angebracht. Es handelt sich in Bild 5.1 um elektromagnetisch betätigte Ventile mit Federrückstellung.

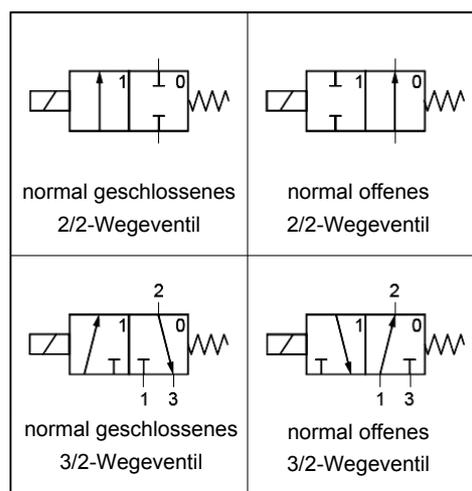


Bild 5.1: Symbolische Darstellung von 2/2- und 3/2-Wegeventilen [37]

In der Pneumatik werden Wegeventile hauptsächlich dazu verwendet, Linearantriebe wie z. B. Pneumatikzylinder durch Druckbeaufschlagung zu bewegen.

Ein 3/2-Wegeventil wird normalerweise dazu verwendet, den Druck in einem an dessen Arbeitsanschluss angeschlossenen Pneumatikzylinder so zu verändern, dass in der einen Schaltstellung Druck aufgebaut und in der anderen wieder abgebaut wird. Mit zwei komplementär geschalteten 3/2-Wegeventilen kann so eine Vorwärts- und Rückwärtsbewegung eines Linearantriebs erzeugt werden.

Die Nennweite (NW) eines Ventils entspricht dem Durchmesser eines Kreises, der die gleiche Fläche wie der engste Strömungsquerschnitt A_s des Ventils hat [38].

So ist also:

$$NW = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (5.1)$$

Die Nennweite gibt jedoch keinen genauen Aufschluss über den Durchfluss eines Ventils, da weder Strömungswiderstände noch die Geometrie des engsten Strömungsquerschnitts berücksichtigt sind. Sie hat sich allerdings in der Praxis zur Einordnung von Ventilen und Auslegung von pneumatischen Systemen durchgesetzt.

Einen genaueren Aufschluss über die Durchflussmenge gibt der KV-Wert. Eine Kenngröße, die in der Hydraulik entstanden ist und in die Pneumatik übernommen wurde. Er gibt an, wie viel Wasser (in m³/h) durch ein Ventil bei 1 bar Druckdifferenz fließt. Die Messung des KV-Wertes erfolgt nach den Normen VDI/VDE 2173 und wird auch für Pneumatikventile mit Wasser durchgeführt. Aus dem KV-Wert lässt sich nach der Normdurchsatz Q_N für Luft in NI/min durch ein Pneumatikventil im unterkritischen

Druckbereich ($\Delta p < \frac{p_1}{2}$) näherungsweise zu

$$Q_N = \frac{5.14 e^5}{60} \cdot k_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot p_2}{\rho_N \cdot T_1}} \quad (5.2)$$

berechnen. Dabei werden die Drücke Δp und p_2 in bar, die Dichte ρ_N in kg/m³ und die Temperatur T_1 in K angegeben [39].

5.3 Konstruktive Auslegung

In der Ventiltechnik werden Ventile mehrheitlich durch eine bewegliche Ventilplatte realisiert, die einen Ventilsitz öffnet und verschließt. Beim Schließen wird die Ventilplatte dabei als Dichtelement auf den Ventilsitz gedrückt. Solche Ventile werden als Flachsitzventile bezeichnet. Bild 5.2 zeigt den Bereich der Ventilöffnung eines angetriebenen Sitzventils [37], [40].

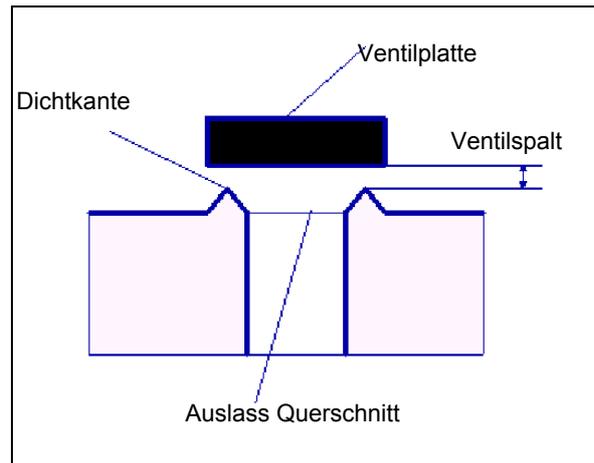


Bild 5.2: Darstellung des Bereichs der Ventilöffnung eines Sitzventils

In den folgenden Abschnitten soll eine Konstruktionsvariante technischer Flachsitzventile vorgestellt werden. Dabei werden normal offene 2/2- Wegeventile mit und ohne druckausgeglichenen Ventilplatte vorgestellt. Darauf aufbauend werden dann die Berechnung und die Realisierung umgesetzt.

5.3.1 Ausführungsform normal offenes 2/2-Wegeventil

Die Ventilplatte technischer Flachsitzventile kann druckausgeglichen oder nicht druckausgeglichen ausgeführt werden (Bild 5.3). Der Vorteil von Ventilen mit druckausgeglichenen Ventilplatte ist, dass mit geringen Kräften hohe Drücke geschaltet werden können. Die Ventilplatte ist dann druckausgeglichen, wenn die zu schaltende Druckdifferenz $p_1 - p_2$ nur auf eine vergleichsweise kleine Fläche wirkt. Die pneumatische Kraft wirkt auf die Piezoplatte, so dass bei steigendem Druck sowohl der Abstand zwischen Ventilplatte und Ventilsitz als auch die erforderliche Kraft zum Schließen des Ventils kleiner werden. Um den Druckausgleich zu ermöglichen, müssen entweder Öffnungen in der Piezoplatte sein oder der Eingangsdruck muss über einen zweiten Druckanschluss auf die Rückseite der Piezoplatte geleitet werden. In jedem Fall

muss auf der Rückseite der Piezoplatte ein abgeschlossenes Volumen ausgebildet sein, in dem der Eingangsdruck wirken kann.

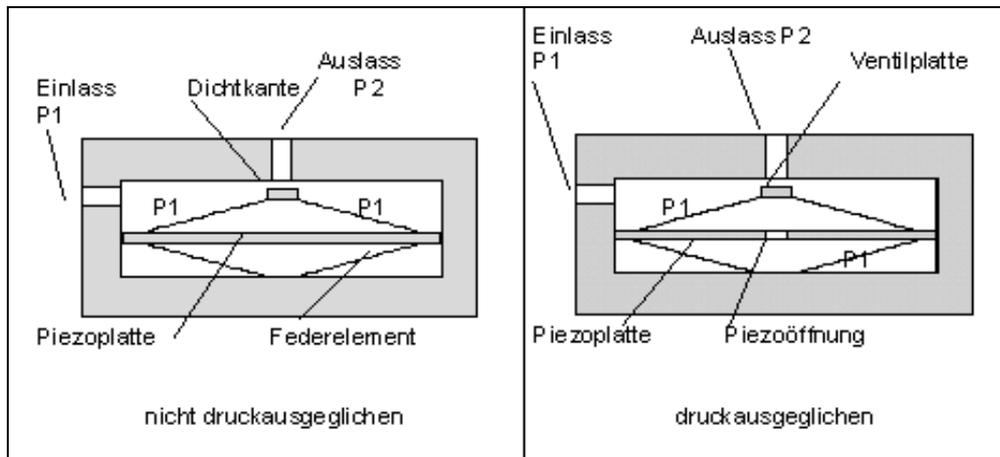


Bild 5.3: Schematische Darstellung verschiedener Ausführungsformen von 2/2-Wegeventilen mit Flachsitz

Ventile mit nicht druckausgeglichener Ventilplatte können mit einer geschlossenen Piezoplatte ausgeführt werden, d.h. die keine Öffnungen aufweist. Das abgeschlossene Volumen auf der Rückseite der Piezoplatte ist nicht erforderlich. Sofern der Eingangsdruck p_1 vollständig am Ventilsitz abfällt und der Ausgangsdruck p_2 gleich dem Umgebungsdruck p_0 ist, wirkt die Druckdifferenz $p_1 - p_2$ ebenfalls nur auf die Fläche der Einlassöffnung. Ist der Ausgangsdruck größer als der Umgebungsdruck oder fällt der Eingangsdruck nicht vollständig an der Einlassöffnung ab, so wirkt auf die Piezoplatte die pneumatische Kraft F_{pn} .

$$F_{pn} = p_{piezo} \cdot A_{piezo} \quad ; \quad p_1 - p_2 \leq p_{piezo} \quad (5.3)$$

Hierbei ist p_{piezo} der auf die Piezoplatte- und Piezofläche A_{piezo} wirkende Druck. Die pneumatische Kraft wirkt öffnend auf das Ventil, so dass bei steigendem Eingangsdruck der Abstand zwischen Ventilplatte und Ventilsitz größer wird und somit auch die erforderliche Kraft zum Schließen des Ventils ansteigt.

5.3.2 Aktorkraft zur Betätigung von 2/2-Wegeventilen

Die zum Betätigen von Ventilen erforderliche Aktorkraft hängt vom Ventilhub s , der Steifigkeit der Federelementaufhängung der Ventilplatte sowie von deren Vorauslenkung ab, siehe Bild 5.4.

Die Vorauslenkung der Ventilplatte hat je nach Ausführungsform unterschiedliche Ursachen und Beträge. Bei normal offenen Ventilen findet eine Vorauslenkung z_{pn} der Ventilplatte durch die vom Eingangsdruck abhängige pneumatische Kraft F_{pn} statt. Die zum Betätigen der Ventilplatte erforderliche Aktorkraft ergibt sich für normal offene Ventile aus der Betrachtung des Kräftegleichgewichts:

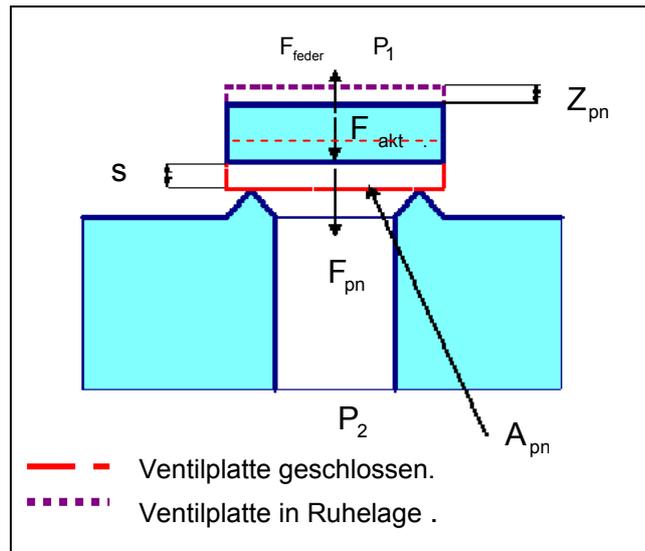


Bild 5.4: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte sowie die Auslenkung

$$F_{akt} + F_{pn} - F_{feder} = 0 \quad (5.4)$$

Die pneumatische Kraft F_{pn} errechnet sich dabei aus der Druckdifferenz $p_1 - p_2$ zwischen Eingangs- und Ausgangsdruck und der pneumatischen Fläche A_{pn} zu

$$F_{pn} = A_{pn} \cdot (p_1 - p_2) \quad (5.5)$$

bei einem normal offenen Ventil mit $Z_{vp} = s + Z_{pn}$ muss die gesamte Auslenkung der Ventilplatte berücksichtigt werden.

5.4 Antrieb eines Ventils mit Hybridsystem

Aufbauend auf der bis hier beschriebenen Ausführungsform von Sitzventilen ist zu erkennen, dass zur Realisierung von Sitzventilen grundsätzlich alle genannten strukturierten Bauformen von Piezoaktoren einsetzbar sind. Hybridbauformen bieten

dabei mehr Hub und Kraft. In dem gewählten Antriebsprinzip, bei dem ein 2/2-Wege-Ventil mit Hilfe der zweiseitigen Butterfly-Hybridform ausgeführt wurde, müssen wesentliche Parameter, wie beispielsweise der maximale Druckbereich, Durchfluss, Stellweg und die zur Verfügung stehende Aktorkraft berücksichtigt werden. Als Größenordnung dieser Kraft wurden in Abschnitt 5.3 ca. 20 N und für den Stellweg ca. 0.4 mm gemessen.

In Kapitel 5 wird näher auf den Piezoantrieb eingegangen. Neben diesen Parametern gibt es eine Reihe von sich gegenseitig beeinflussenden Designgrößen, die bei der Auslegung des 2/2-Wegeventils festgelegt werden müssen.

Für eine detaillierte Untersuchung der Strömungsvorgänge, Strömungskräfte, und zur Ermittlung wesentlicher Geometrieparameter wurde eine FE-Strömungssimulation durchgeführt. Dadurch bekommt man Erkenntnisse über Vorgänge, die experimentell nicht oder nur schwer zu handhaben sind. Die Ergebnisse sind relativ schnell zu erhalten und beschleunigen dadurch die Produktentwicklung.

5.5 FE-Strömungssimulation

Alle Aufgaben der Fluidsimulation wurden mit Hilfe des Programmpakets FLUENT durchgeführt. Hierbei stellt FLUENT die Tools zur Berechnung von Strömungsproblemen auf FE-Basis zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit genügte die Modellierung der Strömungsverhältnisse, da die mechanischen Berandungen als konstant angesehen werden können.

Das folgende Bild 5.5 zeigt die konstruktive Variante eines 2/2-Wege-Ventils mit zweiseitiger Butterfly-Hybridform, welches im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde.

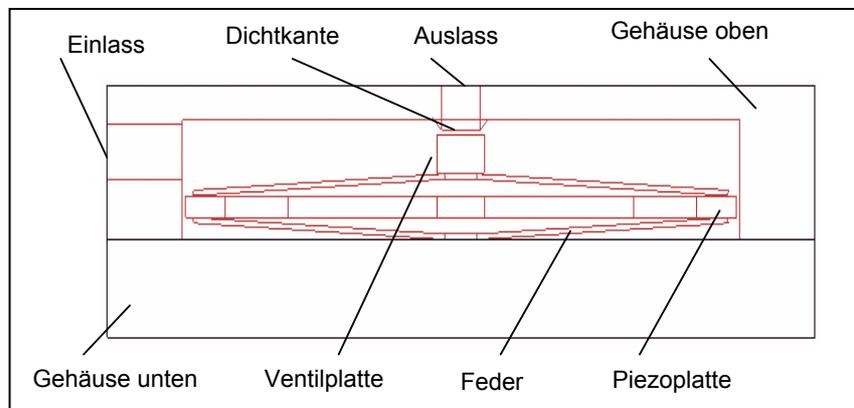


Bild 5.5: Geometrie des Ventils

Der Ventiltteil besteht aus einer Piezoplatte der Größe $70 \times 25 \times 1$ mm, zwei Federelementen in Butterflyform und einer Ventilplatte, die in einem Gehäuse sitzen. Das Gehäuse hat zwei Bohrungen, eine für den Ein- und eine für den Auslass. Zuerst wurde das Ventil mit bestimmten Maßen festgelegt, um erforderliche Informationen und Geometriedaten für die FLUENT Berechnung bereitstellen zu können. Anhand der Abbildung 5.5 werden die nächsten Schritte der Berechnungen erläutert.

5.5.1 Festlegen des Geometriemodells

Die Geometrie des Wegeventils wurde auf der Basis der in Bild 5.5 dargestellten Maßskizze erstellt. Es ist im Interesse des Aufwandes für die Erstellung eines FE-Modells und der Berechnungszeit für die einzelnen FE-Ergebnisse (Druck-, Dichte-, Temperaturverteilung, Geschwindigkeitsprofil, Volumenstrom etc.) erforderlich, Vereinfachungen und Restriktionen bei der Modellierung vorzunehmen.

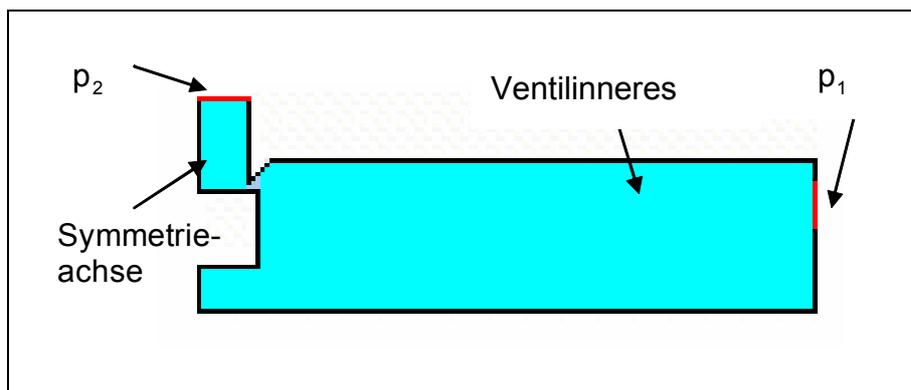


Bild 5.6: Geometriemodell

Diese Vereinfachungen dürfen einerseits jedoch nicht dazu führen, dass die Unterschiede zum realen System einen zu großen prozentualen Anteil erreichen, aber andererseits das Modell auch nicht zu stark verkomplizieren. Diese gegensätzlichen Forderungen erfordern Kenntnis und Erfahrung bei der Gestaltung des Modells, um Modellierungsaufwand und Berechnungszeiten in ein ausgewogenes Verhältnis zu bringen. Die Datenreduktion wurde in einem ersten Schritt mit der Festlegung der Grenzen des Modells in Bild 5.6 vorgenommen. Die eine Schnittstelle wurde rotationssymmetrisch zum eigentlichen Ventil gewählt und die zweite am Rand des Ventils mit symmetrischem Abströmkanal festgelegt.

Eine weitere Einschränkung des Modells gegenüber dem realen Ventil liegt in der Vernachlässigung des Federelements, welches an der unteren und oberen Seite des Ventils liegt. Die Piezoplatte wurde außerdem vernachlässigt.

Die asymmetrische Anordnung des Ventils erfordert ein echtes dreidimensionales Modell mit entsprechendem Aufwand.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Einteilung der einzelnen Regionen bei der Vernetzung. Auch hier ist Erfahrung gefragt, um die zu erwartenden Problemzonen richtig zu ermitteln und entsprechend feiner oder in anderer Art zu vernetzen. Die kritischen Zonen wurden so vereinfacht, dass keine Probleme bei der Vernetzung auftreten können. Diese Änderungen haben nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

5.5.2 Annahmen zur Berechnung der Fluideigenschaften

Alle hier vorgestellten FLUENT Berechnungen werden für Luft durchgeführt. Dabei wird Luft näherungsweise als ideales Gas mit

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (5.6)$$

betrachtet. Die ideale Gaskonstante ist mit $R=287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ gegeben. Somit ergibt sich für die Umgebungsbedingungen von $T=300 \text{ K}$ und $p=0,098 \text{ MPa}$ eine Dichte von $\rho=1,17 \text{ kg}/\text{m}^3$. Für Untersuchungen mit anderen Medien z.B. Erdgas stehen weitere Fluidmodelle zur Verfügung, die bei Bedarf herangezogen werden könnten.

Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich entsprechend als Funktion des Fluidzustands und der absoluten Fluidtemperatur zu

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (5.7)$$

Die Konstante γ ergibt sich als Verhältnis der spezifischen Wärmen C_p und C_v des Fluids

$$\gamma = C_p / C_v \quad (5.8)$$

Für alle Berechnungen wurde der kompressible Fall angesetzt. Der Wärmeübergang zwischen Luft, Gehäuse und Umgebung wurde vernachlässigt, so dass alle Berechnungen adiabat durchgeführt werden konnten. Speziell für adiabate Berechnungen ist die totale Temperatur

$$T_{\text{total}} = T_{\text{static}} + \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot C_p} \quad (5.9)$$

von Bedeutung, da sie als Maß für die Gesamtenergie jedes Punktes des Systems zu Kontrollzwecken herangezogen werden kann. Hierbei ist v die lokale Geschwindigkeit, C_p die spezifische Wärme und g die Gravitationskonstante.

Verluste werden im Fall laminarer Strömung durch die Viskosität μ berücksichtigt. Für den Fall turbulenter Strömung stehen mehrere Turbulenzmodelle zur Verfügung. Für die hier durchgeführten Rechnungen wurde das in FLUENT bevorzugte k-epsilon Modell verwendet. Es eignet sich besonders zur Modellierung von Turbulenzen in Rohren, Ventilen und Kanälen.

5.5.3 Vernetzung

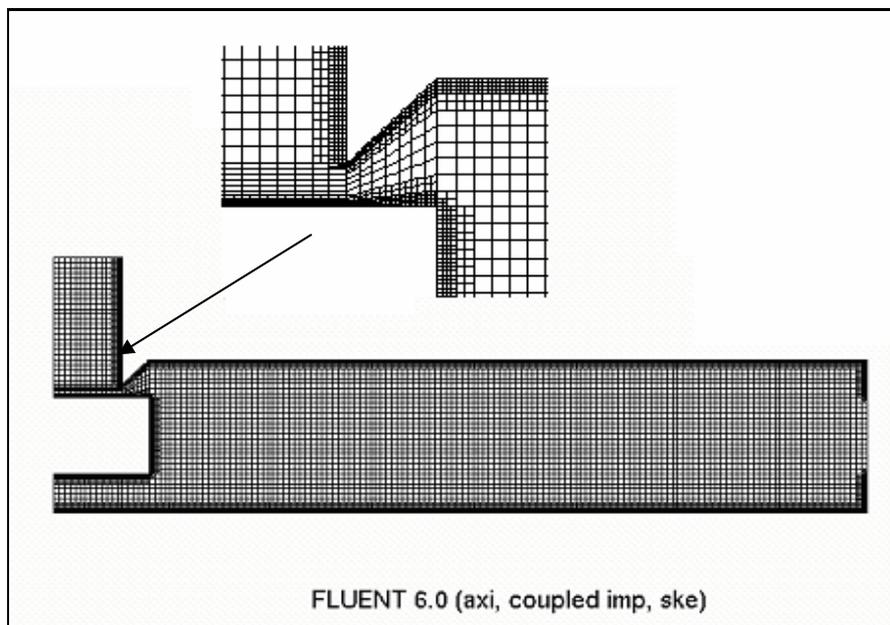


Bild 5.7: Finite-Elemente-Netz

Die Festlegung des für die Berechnung verwendeten Netzes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse, aber auch auf den notwendigen Rechenzeitbedarf. Ist das Netz zu grob, so können physikalische Effekte unter

Umständen nicht abgebildet werden. Daneben ergeben sich auch numerische Probleme im Zusammenhang mit der Konvergenz der zur Lösung verwendeten iterativen Gleichungslöser. Wird das Netz zu dicht gewählt, muss eine große Zahl nicht notwendiger Gleichungen gelöst werden, was die erforderliche Rechenzeit und möglicherweise auch den Einfluss von Rundungsfehlern negativ beeinflusst. Erste Anhaltspunkte für die Wahl des Netzes liefern die Geometrie des Strömungskanals sowie die erwarteten Gradienten der Geschwindigkeiten, des Drucks und der Temperatur. Kritische Stellen treten an scharfen Kanten oder engen Spalten auf, da dort die Vernetzung sehr dicht gewählt werden muss. Aus diesem Grund wurden verschiedene Vereinfachungen und Glättungen beim Übergang von der technischen Zeichnung zum Geometriemodell bereits vorgenommen. Ein aus strömungstechnischer Sicht kritischen Bereich stellt der Ventilspalt dar, da dort über eine relativ kurze Strecke sehr große Druck- und Temperaturänderungen zu erwarten sind. Entsprechend wurde dort von vornherein eine sehr dichte Vernetzung gewählt, wie der in Bild 5.7 dargestellten Vergrößerung zu entnehmen ist. Für turbulente Strömungsverhältnisse, wie sie im Ventil zu erwarten sind, spielt die Abbildung der Grenzschicht in Wandnähe eine entscheidende Rolle, so dass dort mit einem sehr viel dichteren Netz gerechnet werden muss.

Die so gefundene Vorvernetzung muss dann im Rahmen von Simulationsexperimenten weiter verfeinert werden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen trial-and-error Prozess, bei dem Konvergenzverhalten der Solver und die physikalische Plausibilität der erzielten Ergebnisse einerseits, sowie der erforderliche Rechenaufwand andererseits, die erforderliche Rückmeldung liefern. Um allen Anforderungen gerecht zu werden, wurde keine automatische Vernetzung gewählt, sondern das strukturierte Netz individuell an die Problemstellung angepasst.

5.5.4 Festlegen der Randbedingungen

Zur Lösung des Strömungsproblems müssen an allen Berandungen des Strömungskanals geeignete Randbedingungen vorgegeben werden. Hierbei kann zwischen der Kanalwand und dem Zu- bzw. Abfluss unterschieden werden. Die Ventilplatte wird in dieser Betrachtung als Wand behandelt.

An der Kanalwand werden alle Geschwindigkeitskomponenten (Wandhaftbedingungen) auf Null gesetzt, da dort der Kontakt mit einem Festkörper vorliegt. Die Temperatur an

der Wand wird auf Umgebungstemperatur $T=300$ K gesetzt. Es findet kein Wärmeübergang zwischen Fluid und Wand statt.

Am Zu- und Abfluss wird der Druck über dem Strömungskanal vorgegeben. Der absolute Druck p_{abs} setzt sich hierbei aus einem Bezugsdruck p_0 und dem von FLUENT berechneten Druck p zusammen. Als Bezugsdruck wurde $p_0=0,101350$ MPa verwendet. Am Zufluss muss außerdem die Fluidtemperatur T über den gesamten Querschnitt spezifiziert werden.

Die Randbedingungen müssen entweder vor oder nach der Vernetzung des Gebiets vorgegeben werden.

5.5.5 Berechnung des Strömungsproblems

Die theoretischen Grundlagen zur numerischen Lösung des diskretisierten Strömungsproblems sind in der Literatur ausführlich beschrieben. An dieser Stelle soll lediglich ein kleiner Abriss der wesentlichen Ansätze und der Vorgehensweise bei der Berechnung gegeben werden.

Mathematisch können diskretisierte Strömungsprobleme als nichtlineare Gleichungssysteme betrachtet werden. Allerdings sind die auftretenden Ordnungen sehr hoch, so dass nur speziell angepasste Lösungsverfahren für eine effiziente Anwendung in Betracht kommen. Die Diskretisierung des hier untersuchten Ventils liefert ein Netz, mit 13067 Knoten. Für jeden dieser Knoten müssen die gekoppelten Gleichungen des Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturfeldes gelöst werden. Generell zerlegt FLUENT das Gesamtproblem in getrennte Aufgaben, für deren iterative Lösung jeweils angepasste Solver verwendet werden können. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass Spezifika der Problemformulierung bei der Wahl des Solvers besser berücksichtigt werden können. Für das hier bearbeitete Problem wurde der Solver Coupled ausgewählt. Dieser bietet eine höhere Genauigkeit. Alle Solver bieten die Möglichkeit einer Fehlerüberwachung.

Zur Berücksichtigung turbulenter Strömungsverhältnisse, werden von FLUENT Turbulenzmodelle angeboten, welche Verluste, sowie die damit verbundene Energiewandlung und Viskositätseinflüsse nachbilden. Die Zerlegung des Gesamtproblems bringt allerdings auch gewisse Konvergenzprobleme mit sich, so dass die Berechnung insgesamt in mehrere Abschnitte zerfällt:

Laminare Berechnung

Start mit einer hohen „künstlichen“ kinematischen Viskosität. Die Anzahl der Iterationen beträgt 100.

Turbulente Berechnung

- Umschalten auf das Turbulenzmodell k-epsilon. Laminare Strömungsanteile werden viskositätsfrei mit $\mu = 0 \text{ m}^2/\text{s}$ berechnet.

Während der gesamten Berechnung wird ein Plausibilitätstest durchgeführt. So können aus numerischen Gründen negative Drücke oder Temperaturen auftreten. An diesen Stellen ist durch Veränderung der Parametrisierung, wie Viskositätsabbau, Vergrößerung des Relaxationskoeffizienten oder durch eine Verfeinerung des zugrunde liegenden Gitternetzes Abhilfe zu schaffen. Darüber hinaus bieten die Solver eine Überwachung des Fehlers, so dass innerhalb einer Iteration stabile numerische Verhältnisse garantiert werden.

Die Erfahrungen, die in umfangreichen Berechnungen mit dem Ventil gewonnen wurden, zeigen, dass mit einigem Aufwand numerisch sehr stabile Ergebnisse gewonnen werden können.

5.6 Ergebnisse der Fluidsimulation

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse vermitteln einen ersten Einblick in die Strömungsverhältnisse innerhalb des Ventils. Alle Berechnungen wurden mit folgenden Parametern durchgeführt.

Einlassdruck	0.5 MPa	(+0,1 MPa Referenzdruck)
Auslassdruck	0,0 MPa	(+0,1 MPa Referenzdruck)
Zulauftemperatur	300 K	
Umgebungstemperatur	300 K	
Ventilspalt	0.1 mm	

5.6.1 Druckverteilung

Charakteristisch für die Ventilströmung ist die zum Teil beträchtliche Energieumsetzung auf kurzer Strecke, sprich im Spaltbereich, verbunden mit hoher Geschwindigkeit. Diese Tatsache lässt erwarten, dass im Sitzbereich große Druckgradienten vorzufinden sind. Untermuert wird dies mithilfe der berechneten Druckverteilung in Bild 5.8. Die

Entspannung vollzieht sich im Sitzbereich von 4,4 bar auf Umgebungsdruck. Aufgrund der sehr gleichmäßigen Druckverteilung scheinen die Ein- und Auslaufbereiche genügend groß dimensioniert zu sein. Eine genauere Analyse der Druckverläufe erfolgt im Zusammenhang mit der Berechnung der auf die Ventilplatte wirkenden Druckkräfte.

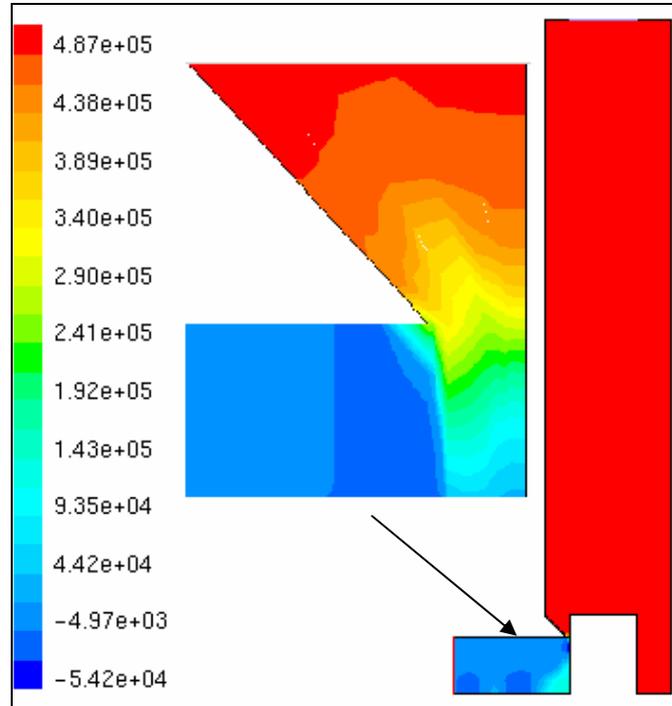


Bild 5.8: Druckverteilung

5.6.2 Geschwindigkeitsverteilung

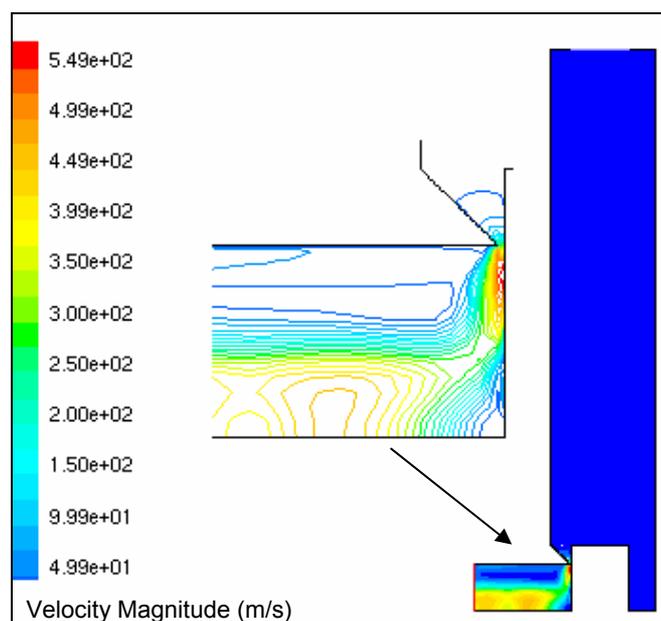


Bild 5.9: Geschwindigkeitsverteilung

Der Entspannungsverlauf im Ventil (Bild 5.9) kann näherungsweise als Düse angenommen werden. Der erste Abschnitt ist stets durch eine starke Beschleunigung der Strömung gekennzeichnet. Die Drosselung geschieht vor allem im zweiten Durchströmabschnitt. Im engsten Querschnitt folgt analog zur Laval-Düse eine Machzahl $M=1$. Die nachfolgende Flächenerweiterung kann quasi als Überschalldüse verstanden werden, dargestellt durch Linien gleicher Machzahl in Bild 5.10a. Ab dem Auftreten der ersten Machschen Linie beginnt die Umlenkung sowie die Ablösung der Strömung von der Ventilplatte. Aus der Kontinuitäts- bzw. Druckbedingung folgt zwangsläufig ab diesem Punkt eine sich stetig ausweitende Rückumlenkung der Strömung. Diese Verwirbelung ruft einen nachfolgenden Druckanstieg hervor, der als auftretende Verdichtungslinien denkbar wäre.

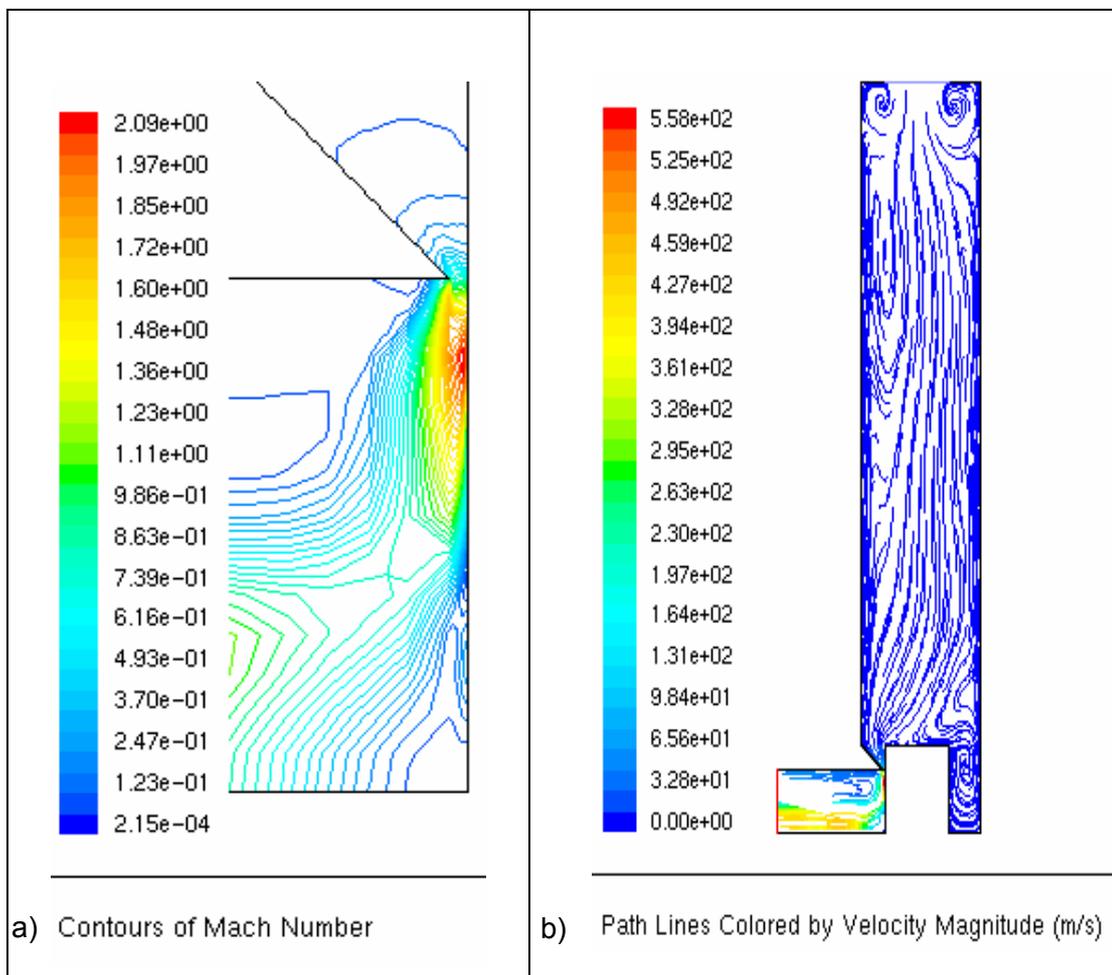


Bild 5.10: Geschwindigkeit in Machzahlen und Geschwindigkeitslinien

Die Darstellung von Stromlinien erlaubt es, den Weg einzelner Strömungsteilchen zu verfolgen und verdeutlicht noch einmal die lokalen Strömungsrichtungen im Strömungsfeld, siehe Bild 5.10b.

Man erkennt, dass im Bereich des Einlasses, wie auch im unteren Bereich der Ventilplatte deutliche Verwirbelungen auftreten.

5.6.3 Temperatur- und Dichteverteilung

Die Analyse der Temperaturverteilung ist schon allein deshalb von besonderem Interesse, da durch die starke Expansion der Luft im und nach dem Ventilsplatt eine starke Abkühlung zu erwarten ist (Bild 5.11a). Die durchgeführten adiabaten Rechnungen zeigen eine maximale Abkühlung von 300 K auf 177 K direkt im Ventilsplatt, an den sich ein größerer Bereich mit Temperaturen um 250 K anschließt.

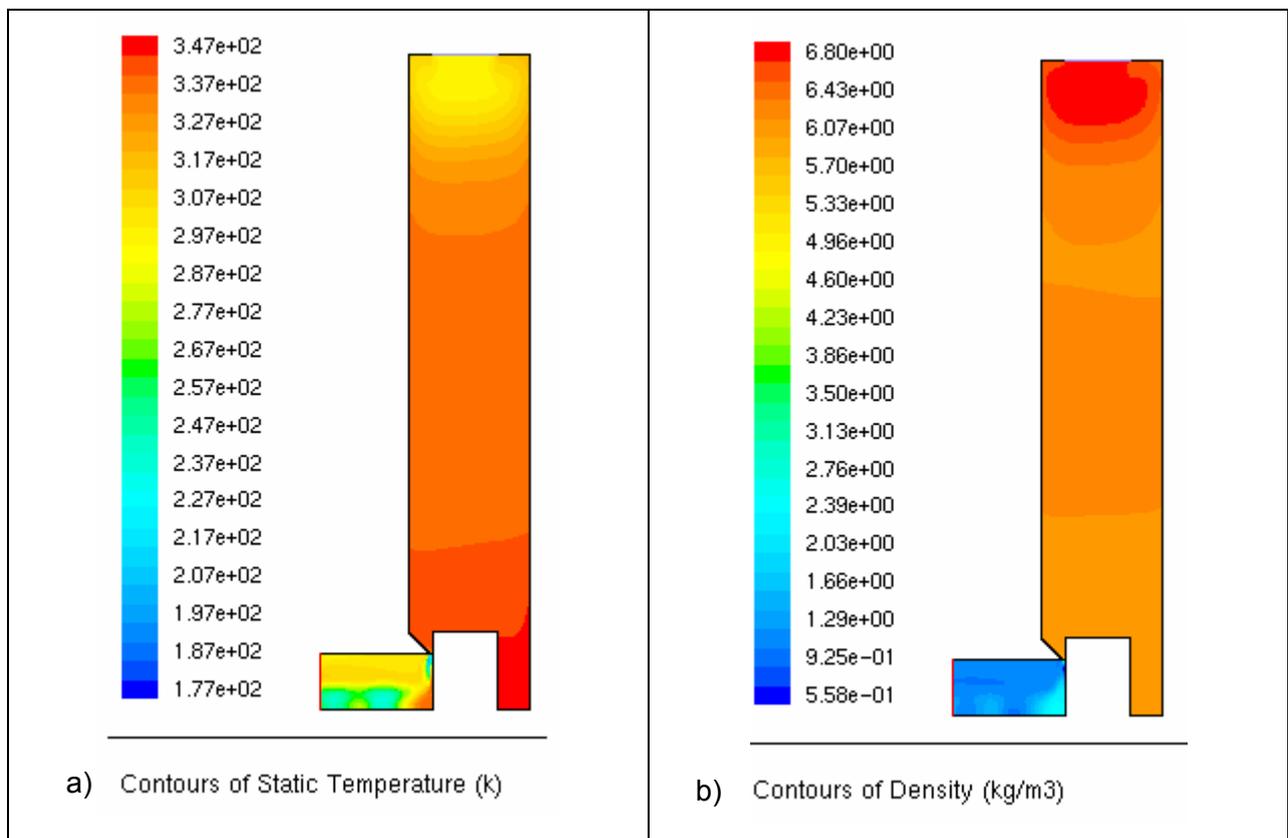


Bild 5.11: Temperatur und Dichteverteilung

Zwar würden diese Werte unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen Luft und Wandung sicher etwas höher liegen; insgesamt zeigt die Rechnung jedoch eine starke thermische Belastung der gesamten Einheit insbesondere im Ventilsplatt.

Auch die Dichteverteilung zeigt eine gleichmäßige Entspannung der Luft im Zu- und Abfluss. Bei der Analyse des gesamten Einlassbereichs ist zu berücksichtigen, dass das hier zugrunde gelegte rotationssymmetrische Modell des Ventils die realen Strömungsverhältnisse nur eingeschränkt widerspiegelt (Bild 5.11b).

5.6.4 Berechnung des Volumenstroms

Zur Berechnung des Volumenstromkennfeldes wurden Simulationen für verschiedene Spaltbreiten von 0.1 bis 0.5 mm bei Drücken von 0.5 bis 10 bar am Einlass und 0 bar am Auslass durchgeführt. Die ausgewählten Werte für die FE-Berechnung sind in Bild 5.12 zu sehen. Beispielsweise ergibt sich bei einer Druckdifferenz von 10 bar und einem Spalt von 0.5 mm ein Volumenstrom von 273 NI/min.

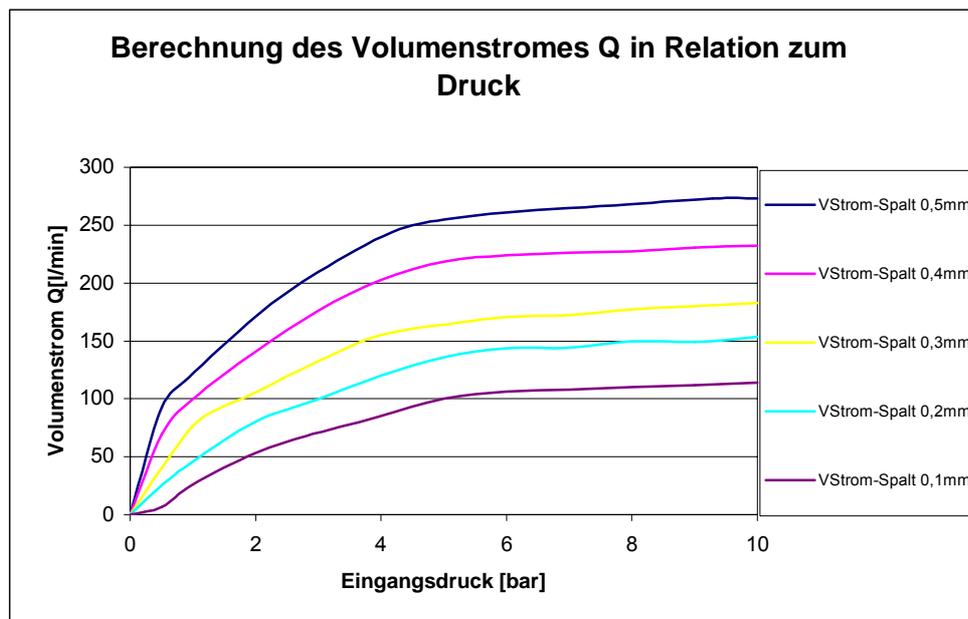


Bild 5.12: Berechneter Volumenstrom am Auslassquerschnitt

5.6.5 Berechnung der Druckkräfte

Die Berechnung der Druckkräfte auf die Ventilplatte ist für die Auslegung des Antriebssystems von entscheidender Bedeutung. Die vom Antrieb aufzubringende Kraft setzt sich aus den Anteilen für die Trägheit und des Drucks zusammen. Die hier vorgenommene Druckkraftberechnung erfolgt als Integration des Drucks über die gesamte vom Fluid beaufschlagte Oberfläche der Ventilplatte:

$$F = \int p(r, \varphi) \cdot dA = \int_0^{2\pi} \int_0^R p(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = 2\pi \cdot \int_0^R p(r) \cdot r \cdot dr \quad (5.10)$$

Dabei wird lediglich die in Stellrichtung der Ventilplatte wirkende Komponente der Druckkraft betrachtet. Weiterhin wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, dass für die vorliegende rotationssymmetrische Anordnung der Druck unabhängig vom Drehwinkel φ ist. Die Umsetzung der Integration erfolgt innerhalb von FLUENT, wobei eine numerische Integration über einen vorgegebenen Gitterpfad durchgeführt wird.

Bild 5.13 zeigt die Berechnungsergebnisse für die resultierende pneumatische Kraft an der Ventilplatte in Schließrichtung, für Spaltbreiten von 0.1–0.5 mm bei Drücken von 0.5–10 bar am Einlass und 0 bar am Auslass.

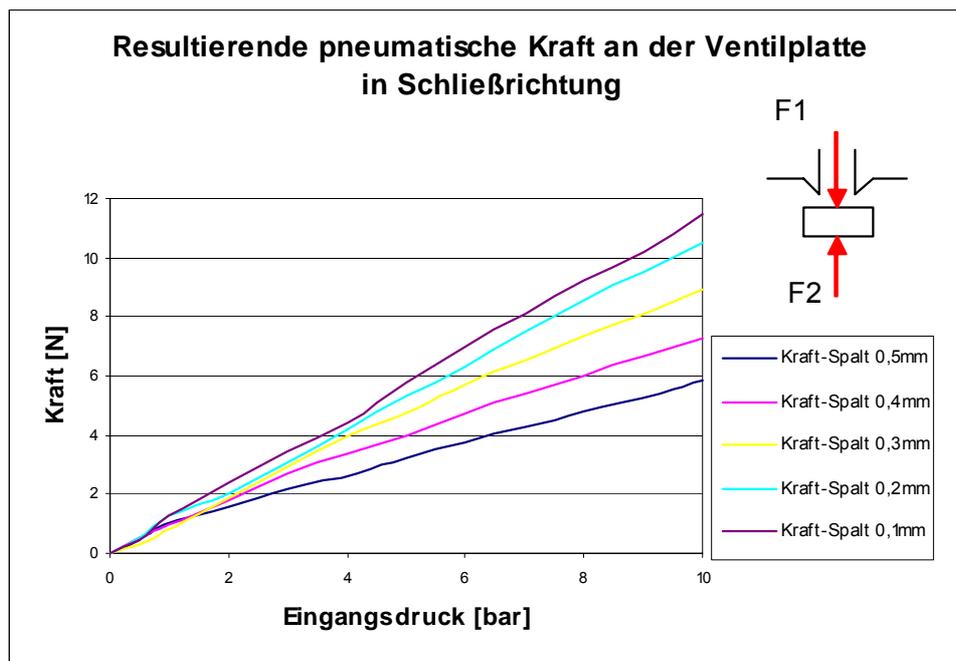


Bild 5.13 Resultierende pneumatische Kraft an der Ventilplatte

Die pneumatische Kraft F_1 wirkt auf die Ventilplatte als öffnende Kraft, F_2 jedoch als schließende Kraft. Die daraus resultierende Gesamtkraft ergibt sich somit als die Summe beider:

$$F = F_1 + F_2 \quad (5.11)$$

Somit ist bei einer Druckdifferenz von 10 bar und einem Spalt von 0.5 mm die resultierende schließend wirkende pneumatische Druckkraft $F=11,5$ N. Sie setzt sich allerdings noch aus der vom Antrieb aufzubringenden Kraft zusammen.

Mit den vorliegenden Simulationsergebnissen lässt sich eine erste Analyse der Strömungsvorgänge im Ventil vornehmen. Um die numerischen Ergebnisse experimentell zu bestätigen und um die Kenntnisse über ventilinterne Strömungsvorgänge sowie über Wegvergrößerungssysteme zu verbessern, wurde ein Prototyp realisiert.

5.7 Herstellung der Funktionsmuster des 2/2-Wegeventils

Das in dieser Arbeit vorgestellte 2/2-Wegeventil wurde im Institut für Mechatronik und Antriebstechnik (IMAT) hergestellt. In den folgenden Abschnitten wird die Fertigung der Einzelkomponenten beschrieben und auf die Verbindung der Einzelkomponenten eingegangen.

5.7.1 Fertigung der Einzelkomponenten

Wie schon erwähnt, wurde aufgrund der günstigen technischen Randbedingungen der Antrieb für ein pneumatisches Schaltventil in hybrider Hebelform realisiert. Das System wurde doppelt wirkend ausgeführt, so dass ober- und unterhalb der Keramikgrundplatte jeweils ein Hebelement angeordnet ist. Wenn der untere Hebel dazu genutzt wird, die Gesamtanordnung vertikal zu verschieben und der obere Hebel direkt das Schließelement trägt, lässt sich so der Stellweg verdoppeln. In Bild 5.14 ist eine dreidimensionale Darstellung des Gehäusekonzepts dargestellt.

Das zweiteilig ausgeführte Gehäuse wurde zu Kontrollzwecken aus Plexiglas gefertigt. Die Luftzufuhr erfolgt am rechten Anschluss, der Luftauslass liegt im Gehäusedeckel oberhalb des Schließelements. Im unteren Teil des Gehäuses befindet sich eine Bohrung, die der Herausführung der Kabel aus dem Ventilgehäuse dient. Die zweiseitige Butterfly-Hybridform wird im unteren Gehäuseteil mit einer Schraube (M2) befestigt. Die Ventilplatte sitzt auf dem oberen Teil der zweiseitigen Butterfly-Hybridform. Die Kontaktkabel sind so gestaltet, dass sie nur sehr geringe Kräfte auf den Piezoantrieb übertragen, da dies andernfalls zu einer Fehlfunktion des Ventils führen würde.

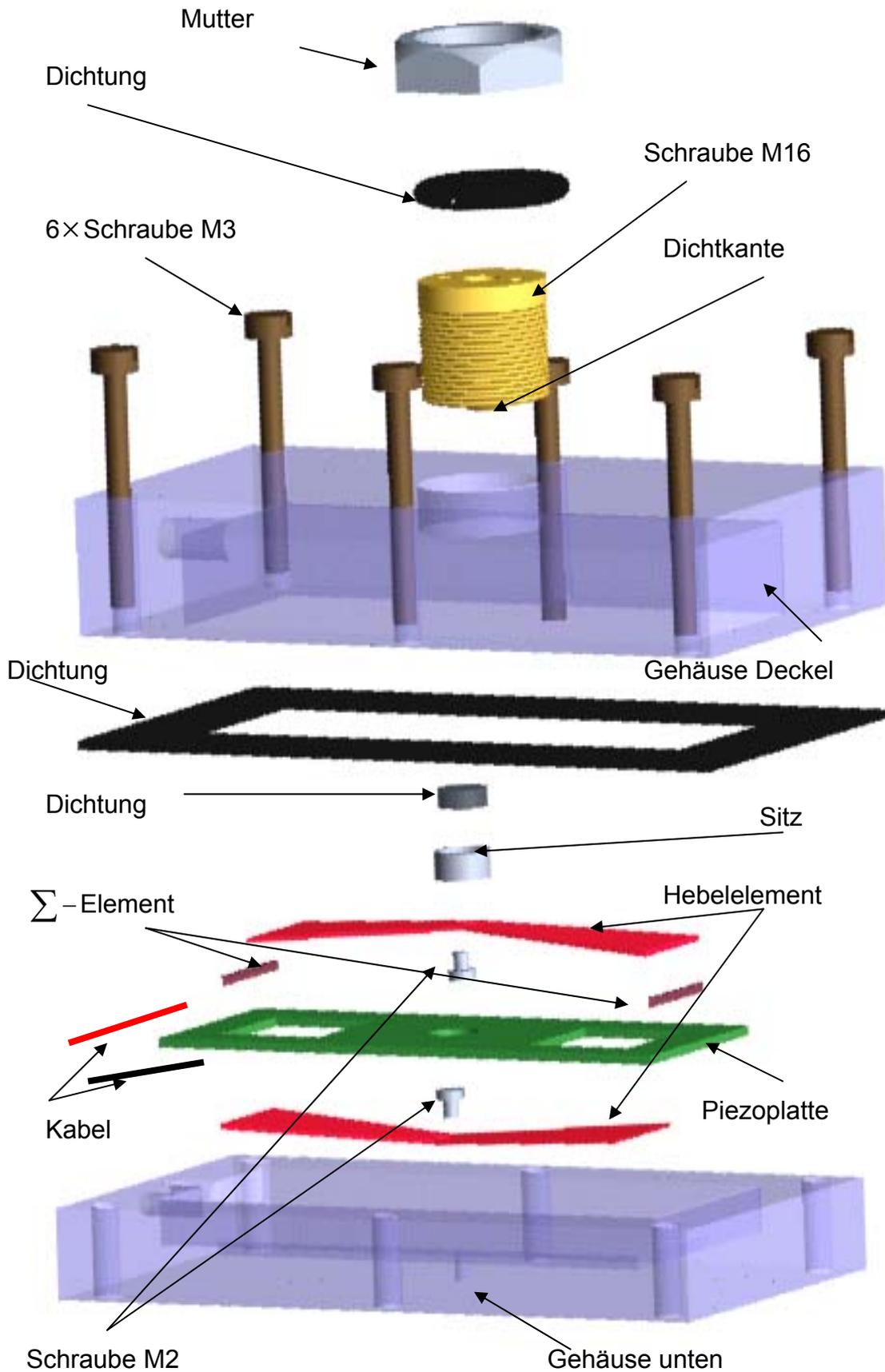


Bild 5.14: Dreidimensionale Explosionsdarstellung des Gehäuses für das piezotriebene 2/2-Wege-Ventil

Zur Abdichtung des Gehäusedeckels gegen den unteren Teil ist eine Flachdichtung vorgesehen. Ein wichtiger Teil des Ventils ist die Dichtkante. Sie wurde realisiert in Form einer Nut auf der Unterseite des Zylinders mit Außengewinde. Durch das Innengewinde im oberen Teil des Gehäuses sowie dem Außengewinde des Zylinders ist diese Dichtkante justierbar. Die mechanische Befestigung der beiden Gehäuseteile, zwischen denen die Flachdichtung liegt, erfolgt mittels 6×M3 Schrauben. Bild 5.15 zeigt das teilweise montierte Ventil.

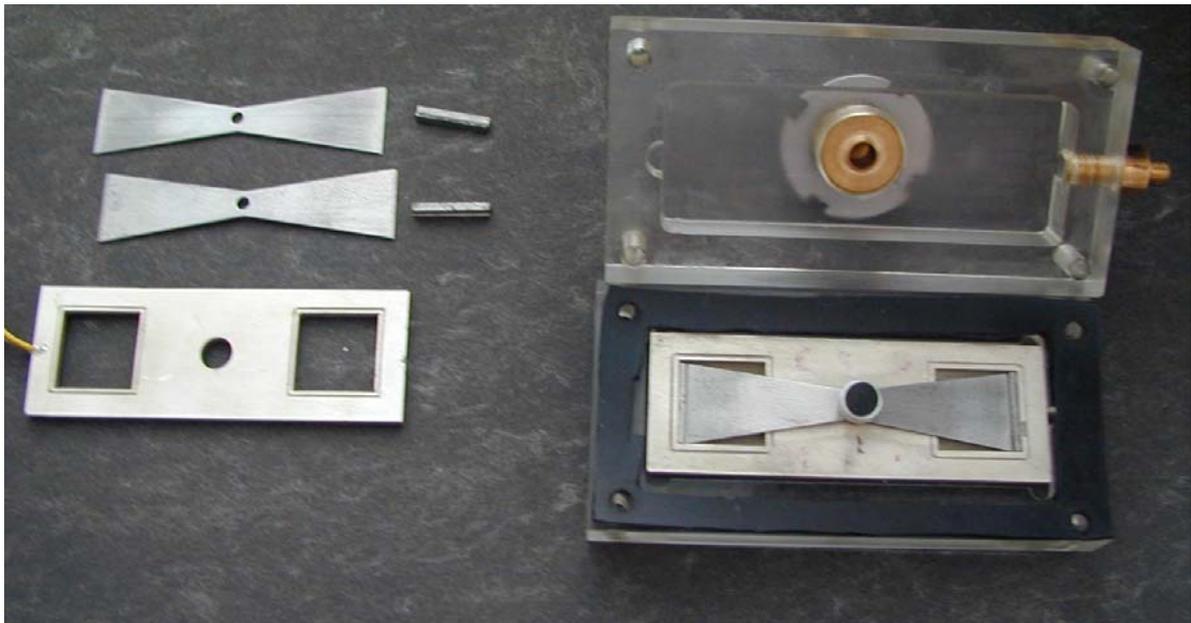


Bild 5.15: Teilweise montierte 2/2-Wege-Sitzventil mit Piezoantrieb

5.8 Messungen

Die Eigenschaften eines piezoangetriebenen 2/2-Wege-Ventils werden durch dessen pneumatisches, mechanisches und elektrisches Verhalten gekennzeichnet. Nachfolgend werden der Versuchsaufbau, die eingesetzte Messtechnik und die durchgeführten Untersuchungen beschrieben.

5.8.1 Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik

Der Prüfaufbau (Bild 5.16), wurde durch entsprechend groß ausgelegte Automatikkupplungen flexibel aufgebaut. Der Bereich des vorhandenen Volumenstromsensors reichte von 25 bis max. 300 NI/min. Zur Kalibrierung dieser Systeme wurde ein Schwebkörpervolumenstrommessgerät benutzt.

Die Druckmessung erfolgte mit zwei piezoresistiven Drucksensoren und einem parallel angeordnet Manometer.

Die Druckluftbereitstellung erfolgte über ein entsprechend großes Druckminderventil mit Aufbereitungseinheit und Manometer. Dabei wurden die Versuche mit Drücken bis zu 6 bar durchgeführt. Zur Messwerterfassung wurde ein PC mit entsprechender Messkarte und einem Erfassungsbereich von ± 10 V verwendet.

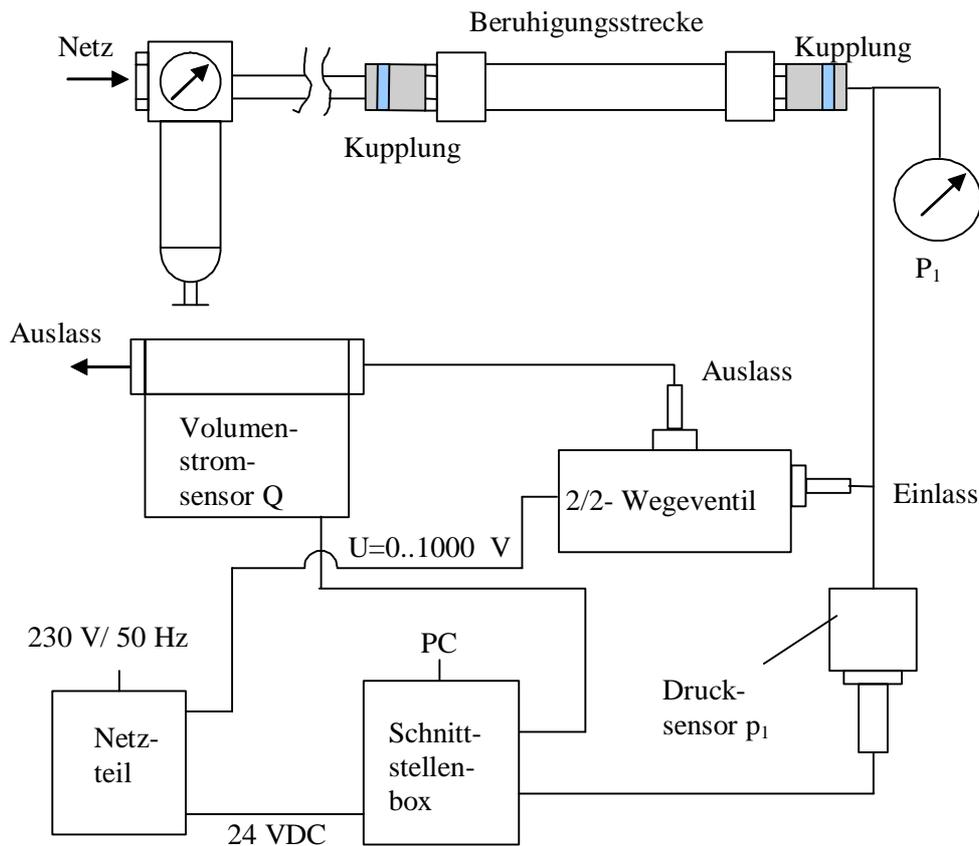


Bild 5.16: Messanordnung zur Bestimmung des Volumenstroms Q

5.8.2 Volumenstrom vom Druck- zum Auslassanschluss

Im unbetätigten Zustand des Normalöffner-2/2-Wegeventils ist der Druckanschluss mit dem Auslassanschluss verbunden. In diesem Zustand findet eine Durchströmung des Arbeitsvolumens statt, d.h. der Druck im Arbeitsvolumen steigt auf einen Druck nahe dem des Druckanschlusses an. Zur Messung des druckabhängigen Volumenstroms wird ein variabler Eingangsdruck an den Druckanschluss des Ventils angelegt. Die Messung des Volumenstroms erfolgt am Ausgangsanschluss, an dem ebenfalls Umgebungsdruck herrscht. Der Eingangsdruck p_1 wird von 0 bar bis zum Maximaldruck

von 6 bar in Schritten von 0,5 bar erhöht. Bei jedem Druckwert wird nach Erreichen des stationären Zustands der sich einstellende Volumenstrom ermittelt.

5.8.3 Vergleich Messung und Berechnung des Volumenstromes

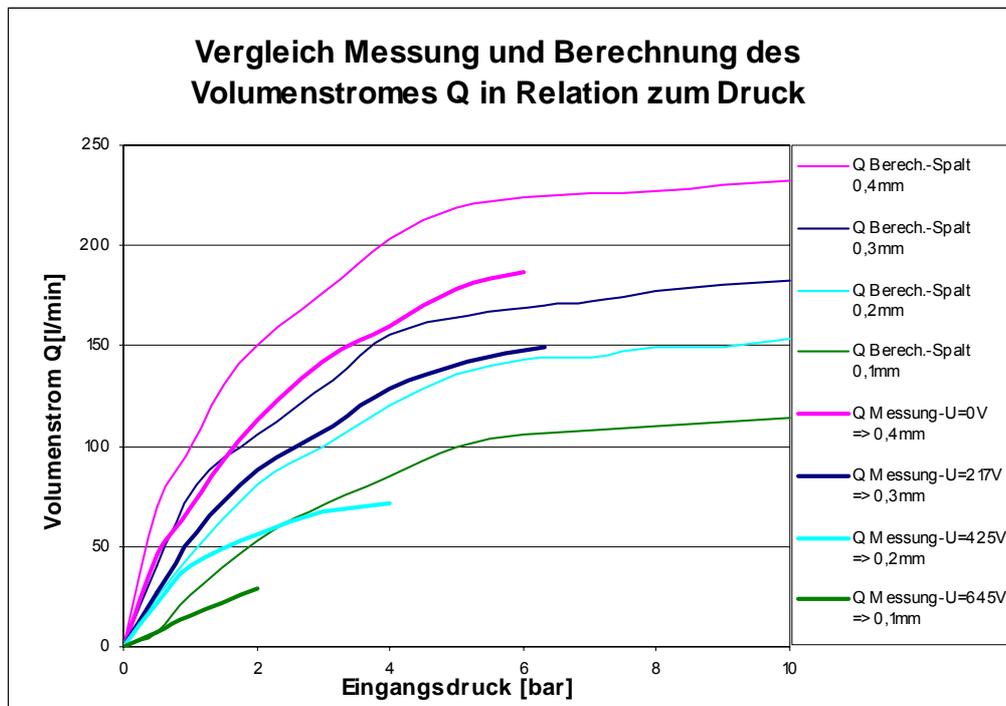


Bild 5.17: Vergleich von Messung und Berechnung des Volumenstromes

In Bild 5.17 sind die bei dieser Messung ermittelten Ergebnisse des Ventils im Vergleich mit den berechneten Werten aufgetragen. Für die Messungen wurde zum Betätigen an die elektrostatische Antriebseinheit des Ventils eine elektrische Spannung zwischen $U=0-1000$ V angelegt. Der konkrete Spannungswert wurde aus dem Hysteresediagramm in Abschnitt 5 zur anfänglichen Festlegung der Spaltbreite entnommen.

Man erkennt, dass die Messungen sich nicht groß von den berechneten Werten unterscheiden. Weiterhin ist zu erkennen, dass der größtmögliche Volumenstrom bei einem Druck von 6 bar und einer Spaltbreite von 0.4 mm auftritt. Er beträgt in diesem Fall um 191 NI/min. Im Vergleich dazu lag der errechnete Wert um 219 NI/min bei einer Spaltbreite von 0.2 mm. Der Kurvenverlauf geht noch bis 4 bar, knickt aber zunächst ab und endet abrupt, da dann das Ventil komplett schließt. Dies lässt sich damit erklären, dass der Druck auf die Unterseite des Schließplättchens höher ist, als die Druckdifferenz oberhalb des Plättchens, woraus eine Kraft in schließender Richtung

resultiert. Diese Kraft verengt den Strömungsspalt und führt bei ausreichend großem Einlassdruck zu einem abrupten Schließen des Ventils. Dies spiegelt sich auch in den Kurvenverläufen der Messungen mit kleineren Spaltbreiten wieder, nur passiert der Schließvorgang schon bei deutlich geringeren Drücken. Beträgt die Spaltbreite beispielsweise von Anfang an nur 0.1 mm, so schließt das Ventil schon bei einem Einlassdruck von 2 bar. Aus dem Diagramm lässt sich weiterhin erkennen, dass bei jedem Kurvenpaar eine Abweichung zwischen den gemessenen und den simulierten Werten besteht. Diese lässt sich dadurch erklären, dass bei der Simulation der gesamte Versuchsaufbau nicht mit berücksichtigt wurde, wohingegen bei der Messung der Volumenstrom nicht direkt am Aus- und Einlass des Ventils, sondern erst in nachgeschalteten Kanälen gemessen wurde. Deutlich höhere Abweichungen erkennt man bei der Spaltbreite von 0.2 mm, da dort die pneumatische Kraft wesentlich höher ist und in Schließrichtung arbeitet. Es ist also davon auszugehen, dass bei der entsprechenden angelegten Spannung von $U=425\text{ V}$ die Spaltbreite kleiner als die gewünschten 0.2 mm ist. Insgesamt kann man aber sagen, dass die Ergebnisse den Erwartungen entsprechen.

5.8.4 Auswertung

Die Messungen dienen dazu, das Ventil in seinen Funktionen und Leistungen kennen zu lernen. Weiterhin zeigen Messung und Analyse, dass das vorhandene Ventil auf Basis eines strukturierten Piezomoduls in pneumatischen Komponenten durchaus einsetzbar ist. Dies sind natürlich nur erste Versuche der Umsetzung. Es gibt selbstverständlich noch genügend Raum für eine Optimierung, was aber nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Ein möglicher Ansatz der hier noch verfolgt wurde ist dabei die Verwendung der weiter vorn schon beschriebenen Tellersystems. Es bietet einerseits eine höhere Stellkraft des Ventils sowie auch einen größeren Durchflussspalt.

5.9 Weitere Ausführungsform

5.9.1 2/2-Wege-Ventil mit doppelseitigem Tellersystem

Wie man in Bild 5.18 erkennen kann, wurde hier wiederum das Gehäuse aus Plexiglas gefertigt, nun jedoch in runder Bauform. Der sonstige Zusammenbau ist der gleiche wie beim vorgehenden Modell. Unterschiedlich ist nun nur die größere Spaltbreite von 5 mm

bzw. der doppelte Stellweg zum Vorhergehenden. Für die genauere Untersuchung wurde hier ein 3D FE-Modell bei der Simulation verwendet.



Bild 5.18 Darstellung des piezoangetriebenen 2/2-Wege Sitzventils

5.9.2 Das scheibenförmige Grundmodell der Simulation

Wie bei dem anderen Modell beschrieben wurden auch hier wieder Vereinfachungen vorgenommen. In diesem Fall wurde die untere Hälfte der Antriebseinheit vernachlässigt, da sie für die Strömungsvorgänge keine große Rolle spielt.

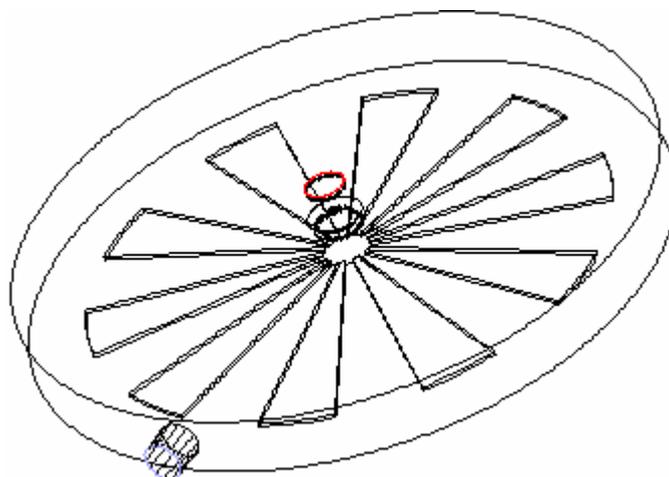


Bild 5.19: Simulationsgrundmodell des 2/2-Wegeventils mit Tellersystem

Anderenfalls würde das FE-Modell deutlich verkompliziert und der Rechenaufwand unnötig erhöht. Bild 5.19 verdeutlicht das Modell.

5.9.3 Netz des FE-Modells

Aufgrund der komplizierten Geometrie war es sehr schwierig, ein strukturiertes Netz zu erstellen. Daher wurde ein hybrides Netz gewählt, das heißt ein Teil blieb strukturiert, und der Rest wurde mit Hilfe eines freien Netzes beschrieben. Die Verbindung zwischen strukturiertem und freiem Netz geschieht mit pyramidenförmigen Elementen. Das resultierende Netz ist in Bild 5.20 dargestellt. Es besteht aus ca. 1,5 Mio. Knoten. Als Randbedingungen wurden die gleichen gewählt, wie sie auch im vorgehenden Modell verwendet wurden.

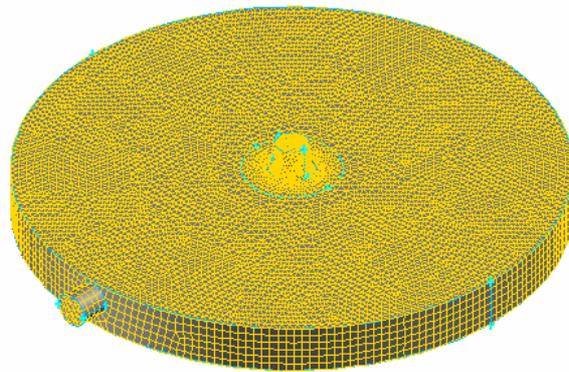


Bild 5.20: FE-Netz des Grundmodells

5.9.4 Simulationsergebnisse

Der erste Simulationsdurchlauf wurde mit den gleichen Ausgangsdaten wie im obigen Modell durchgeführt, abgesehen von einer abweichenden Spaltbreite von 0.5 mm. Die Druckverteilung ist in Bild 5.21 dargestellt.

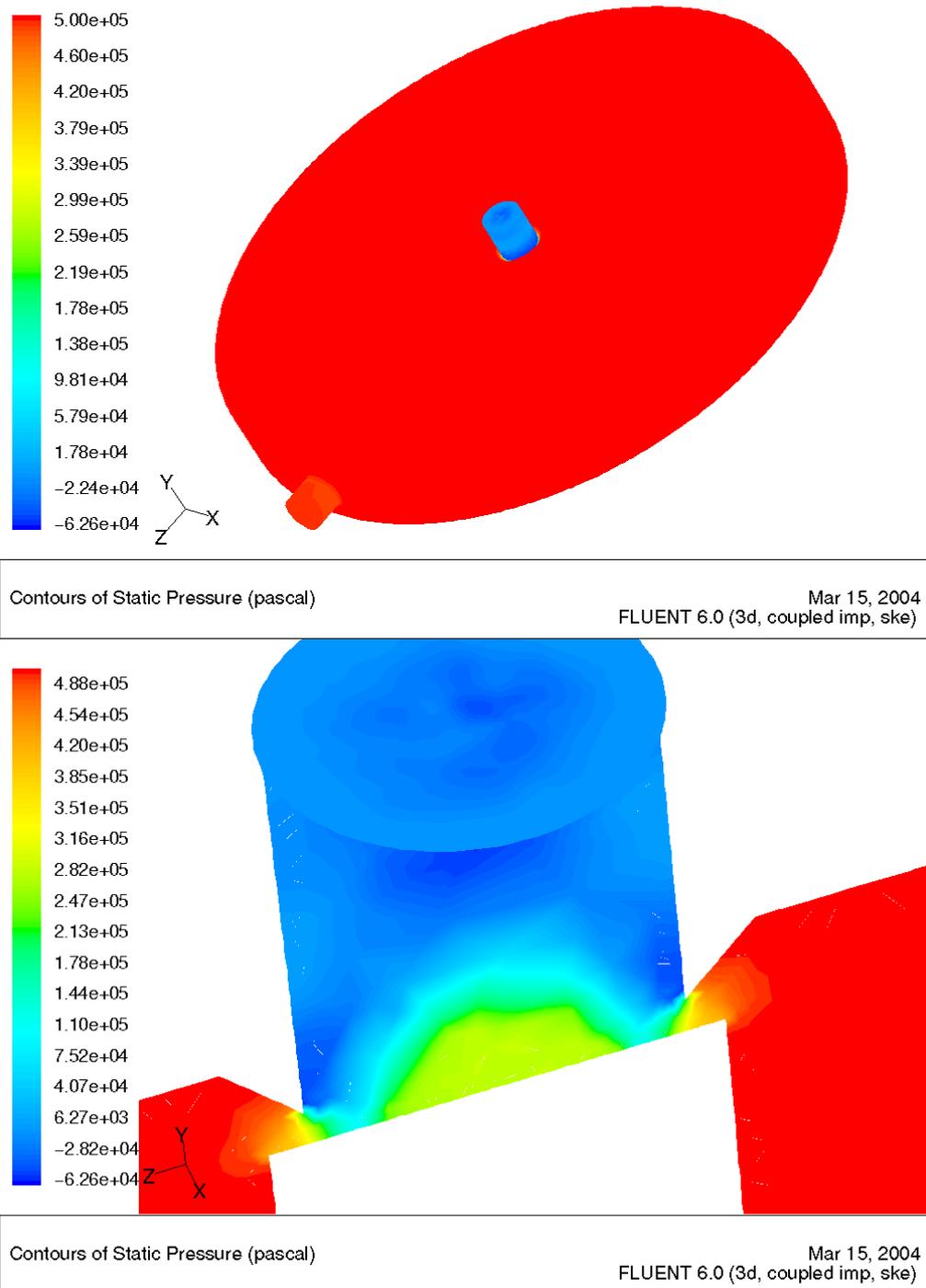


Bild 5.21: Druckverteilung

Im oberen Teil von Bild 5.21 ist der statische Druck des Ventils dargestellt. Um eine deutlichere Ansicht zu erhalten wurde daraufhin eine Schnittebene im kritischen Bereich des Ventilspaltes aus der vorgehenden Darstellung entnommen und vergrößert eingefügt.

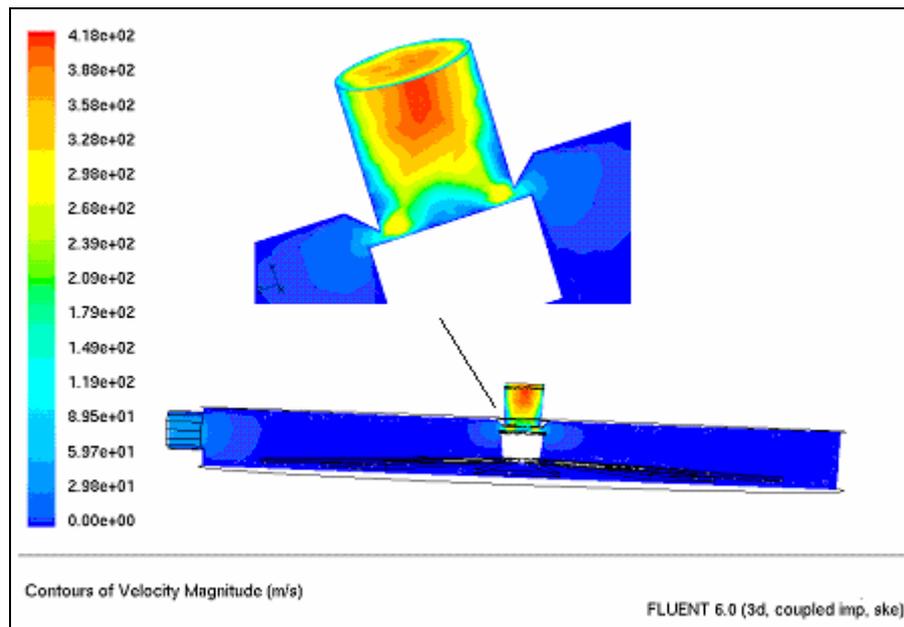


Bild 5.22: Geschwindigkeitsprofil

Es ist zu erkennen, dass die Druckverteilung (Bild 5.21) wie auch das Geschwindigkeitsprofil (Bild 5.22) erwartungsgemäß den Verteilungen des obigen Modells stark ähnelt, da ja die Grundmodelle aneinander angelehnt sind. Wieder baut sich der Druck am Ventilspalt ab, in dieser Ausführung fällt er von ca. 5 bar auf 3 bar ab und sinkt dann allmählich zum Auslass hin auf den Außendruck ab. Bei der Geschwindigkeitsverteilung erkennt man, dass im Inneren des Ventils die Strömung fast konstant verläuft und erst am Spalt einmal eine deutliche Geschwindigkeitszunahme auftritt, die ihr Maximum im Zentrum des Auslasses findet. Außerdem ist der Verlauf sehr gleichmäßig. Dies ist auch deutlich beim Vergleich mit dem Strömungslinienverlauf in Bild 5.23 zu erkennen.

Hier ist die Wirbelbildung innerhalb des 3D-Modells besser zu sehen als im vorgehenden Modell. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der Geometriegestaltung kommt es innerhalb des gesamten Modells zur Wirbelbildung.

Da die Modellformen viele Gemeinsamkeiten aufweisen, wurde hier nur eine Simulation mit einer bestimmten Spaltbreite von 0.5 mm durchgeführt. Die restlichen Simulationen lassen sich wegen der Ähnlichkeiten vom obigen Modell ableiten. Dies betrifft ebenso die Kräfte, die an der Ventilplatte wirken.

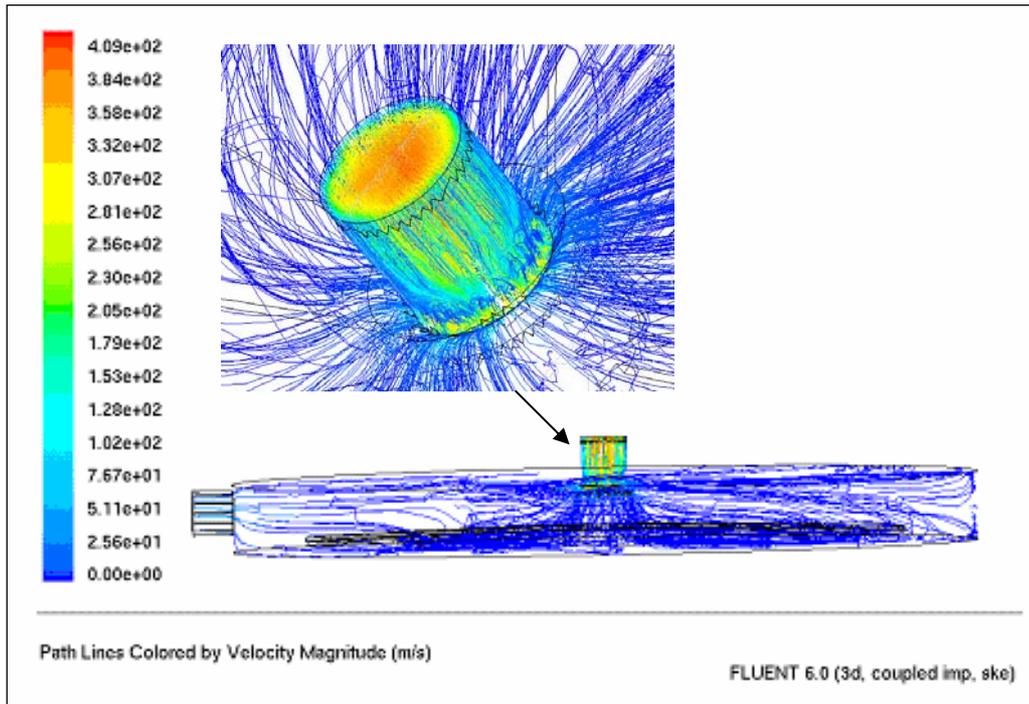


Bild 5.23: Strömungslinien

5.9.5 Vergleich der Messdaten mit den simulierten Werten

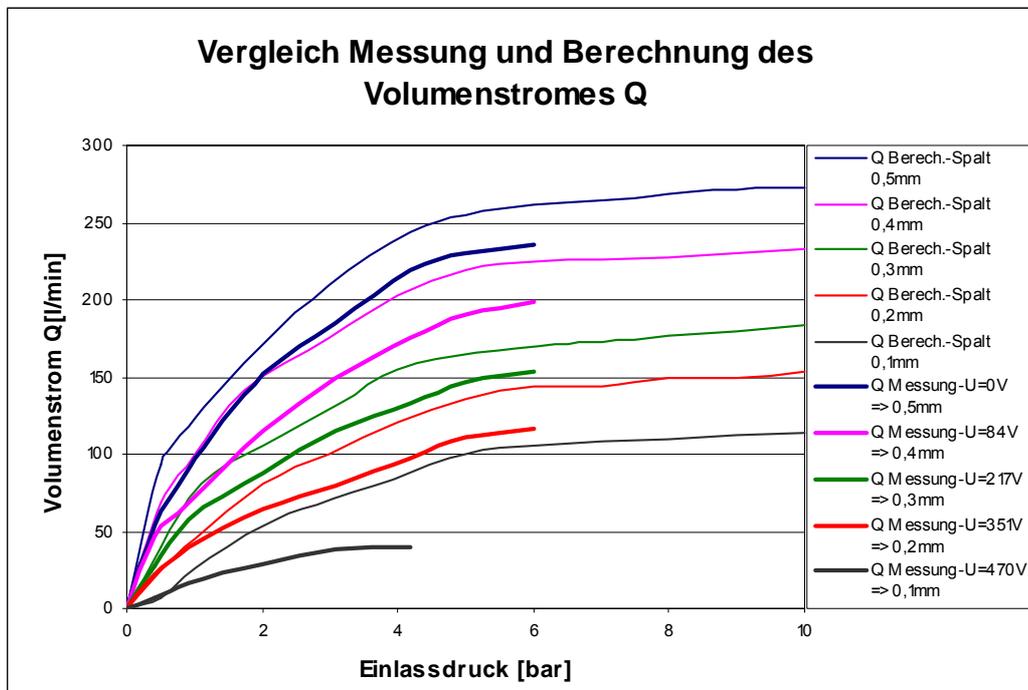


Bild 5.24: Vergleichsdiagramm

Aufgrund des größeren Spaltes ergibt sich ein höherer Volumenstrom im Vergleich zum vorigen Modell (Bild 5.24). Außerdem arbeitet das Ventil stabiler bei höheren Drücken. Beispielsweise bleibt es bei einer Spaltbreite von 0.2 mm selbst noch bei 6 bar geöffnet. Der kritische Punkt liegt bei ca. 4 bar und einer Spaltbreite von 0.1 mm, hier schließt sich das Ventil abrupt.

Weitere Überlegungen in Richtung einer Optimierung an dieser Stelle könnten dahingehen, dass man beispielsweise die Form der Schließplatte variiert. Möglich wäre eine Kegel- oder auch eine Halbkugelform. Dadurch würden sich die pneumatischen Kräfte, die auf diese Platte wirken, verringern und somit ein abruptes Verschließen des Ventils bei sich erhöhendem Druck und konstanter anliegender Spannung hinauszögern. Eine weitere Möglichkeit bestünde auch darin, dass man die Antriebseinheit in einer stabileren Ausführung konstruiert, etwa durch ein steiferes Federelement. Dies ist möglich, da im jetzigen Fall der Arbeitsbereich bzw. das Potential des Piezoantriebs in diesem Bereich noch lange nicht ausgereizt ist. Man vergleiche alleine die Hubwege – theoretisch sind mögliche 0.8 mm Hub ja messtechnisch schon nachgewiesen, bisher genutzt wurden jedoch nur 0.5 mm.

Wie man erkennt, ist an dieser Stelle noch eine Menge an Optimierung möglich, dies kann jedoch hier nicht alles bis ins Detail ausgeführt werden, da es den Umfang dieser Arbeit sprengen würde.

6. Zusammenfassung

Piezoaktoren finden heute zunehmend breitere Anwendung in vielen Industriezweigen. Während sensorische Anwendungen wie Kraft-, Druck oder Beschleunigungssensoren schon seit Jahrzehnten erfolgreich am Markt etabliert sind, haben Anwendungen, bei denen Piezoaktoren als Antrieb verwendet werden bislang vor allem Nischenbereiche besetzt. Erst in jüngster Vergangenheit wurden durch verbesserte und vor allem preiswertere Herstellungstechnologien die Möglichkeiten für einen breiteren Einsatz geschaffen. Bestes Beispiel sind piezogesteuerte Einspritzventile, die heute in einer Reihe von Fahrzeugen in Serie millionenfach eingesetzt werden.

Dennoch kann nicht verkannt werden, dass zur weiteren Verbreitung des Einsatzes von Piezoantrieben immer noch viele Hürden überwunden werden müssen. Wichtigstes Hindernis ist dabei der immer noch relativ hohe Preis und die geringe Integration des gesamten Antriebes. Oft müssen dem Aktor Wegvergrößerungssysteme nachgeschaltet werden, um die erforderlichen Stellwege zu erzeugen, womit sich Bauvolumen und Kosten des Gesamtsystems weiter erhöhen.

Einen neuen Ansatz für wirtschaftliche und funktionale Piezoantriebe bietet die Integration von Aktor und Wegvergrößerungssystem (WVS) auf der Basis strukturierter Piezokeramiken.

Ziel der Arbeit war es deshalb, Strukturen zu entwickeln und zu testen, bei denen die Trennung von Aktor und Wegvergrößerungssystem aufgehoben wird. Durch Integration der genannten Funktionen in die Piezokeramik sollen neuartige Antriebssysteme geschaffen werden, die sich im Integrationsgrad, ihrer Funktion und Formgebung wesentlich von den zur Zeit am Markt erhältlichen Systemen unterscheiden.

Dazu wurde zunächst eine Analyse der klassifizierten verfügbaren Systeme durchgeführt. Ausgehend vom kinematischen Grundprinzip eines doppelt wirkenden Hebelsystems wurden Grundprinzipien für strukturierte Keramiken zunächst als ebenes System und anschließend als dreidimensionales System erarbeitet.

Die entwickelten Systeme wurden zunächst in Finite-Elemente Analysen auf ihre grundsätzliche Eignung untersucht und hinsichtlich ihres Hubes sowie der möglichen Stellkraft optimiert.

Auf einer Ultraschall-Bearbeitungsanlage wurden aus Rohkeramiken eine Reihe von Prototypen hergestellt und getestet. Die gewonnenen Messergebnisse stimmen mit den Rechenwerten gut überein.

Als Beispiel für den praktischen Einsatz der neu entwickelten Piezo-Antriebssysteme wurden zwei direkt gesteuerte pneumatische 2/2-Wege Ventile mit unterschiedlichen Antriebssystemen gebaut. Um Antrieb und Ventil möglichst gut aufeinander abzustimmen, wurden zunächst mittels Strömungssimulation in FLUENT die erforderlichen Stellkräfte und die erreichbaren Volumenströme berechnet.

Die Messergebnisse an den realisierten Ventilen bestätigen die Berechnungsergebnisse sowohl hinsichtlich des Antriebes als auch des Strömungsverhaltens.

Die als Prototyp getesteten Antriebssysteme stellen den Anfang des Integrationsprozesses dar. Das Ziel, die Aufhebung der Trennung von Aktor und Wegvergrößerungssystem konnte jedoch anhand der gebauten Ausführungsvarianten nachgewiesen werden. Die neuartigen Systeme, die sich im Integrationsgrad, ihrer Funktion und Formgebung wesentlich von den zur Zeit am Markt erhältlichen Aktoren unterscheiden, eröffnen bei konsequenter Weiterentwicklung neue Wege in der Anwendung von Piezoaktoren. Aufbauend auf den Vorteilen wie einfacher Aufbau, geringe Masse, geringer Preis und Platzbedarf sowie eine hohe Dynamik lassen sich neue Eigenschaften des Gesamtsystems erzielen und damit neue Anwendungsgebiete erschließen.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Koch.:
PIEZOXIDE (PXE), Eigenschaften und Anwendungen (1988).
- [2] G. Helke:
"Physikalische Eigenschaften, Zusammensetzung, Herstellungsprozess, Kenngrößen und praktische Anwendungen" Keramische Zeitschrift 51 (1999) und 52 (2000).
- [3] www.keramverband.de/keramik/deutsch/presstexte/press01-00-T3.html
- [4] Firmenschrift Physik Instrumente (PI) GmbH & Co,
Nanopositionierung, (1998).
- [5] Lubitz, K. Schuh, C., Steinkopff, T., Wolff, A.:
Properties and Reliability of large PZT multilayer actuators, ACTUATOR 2000, 7th International Conference on New Actuators, June 2000, Bremen, Germany, S.58-61.
- [6] C. Jehle:
www.epcos.com/excelon/servlet/excelon/applications/xml/applications_e.xml?xlsheet=applications:/xsl/article_detail.xsl§ionId=automotive&articleId=8
- [7] G. Gautschi:
"Piezoelectric Sensorics, Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers", (2002).
- [8] Firmenschrift Physik Instrumente (PI) GmbH & Co:
Nanopositionierung, (2001).
- [9] W. Jaffe, W. Cook, H. Jaffe:
"Piezoelectric Ceramics" Academic Press London, (1971).
- [10] Kasper, R.; Heinemann, W.; Wagner, A.:
"Modelling and Control for Piezoelectric Actuators for High Speed Applications".
25.8.-28.8.1998, The Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, MOVIC, Volume 1, S. 231 – 236 (1998).
- [11] W. Heinemann :

- "Der Piezoaktor mit neuer Ansteuerung - ein dynamischer Antrieb der Mechatronik
Dritter Brandenburger Workshop Mechatronik ,(1998).
- [12] Kasper,R., W. Heinemann, M.A. al Wahab:
"Berechnung und Entwurf strukturierter Piezoaktoren", 6. Magdeburger
Maschinenbautage S. 25ff (2003).
- [13] Patentschrift CEDRAT TECHNOLOGIES, DE 196 43 180 A1,(1995).
- [14] Firmenschrift CEDRAT Electrical Engineering,Piezp Products V2.1,(2002).
- [15] Kasper,,R., J. Weiser, M.A. al Wahab:
Abschlusskolloquium des Innovationskollegs Adaptive mechanische Systeme, "Aktive
Verbindungselemente zur Befestigung, Schall- und Schwingungsdämpfung adaptiver
mechanischer Systeme", (Mai (2001).
- [16] Kasper, R.; Schröder, J.; Wagner, A.:
Schnellschaltendes Hydraulikventil mit piezoelektrischem Stellantrieb. O + P
"Ölhydraulik und Pneumatik" 41 (1997) ,Nr. 9, S. 694 – 698, (1997).
- [17] Kasper, R.; Schröder, J.; Wagner, A. :
"Nonlinear model based Control of a Piezoelectric actuated hydraulic valve".
4.7. - 9.7.1999, IFAC, Peking.
- [18] Firmenschrift ASCO Joucomatic GmbH & Co., Piezo Valve Line, V7359.
- [19] Patentschrift Hoerbiger Fluidtechnik GmbH, AT 396392 B, 25.8.1993, Piezo- Ventil.
- [20] Patentschrift der Festo AG & Co., EP 1104863 A2, 06.06.2001.
- [21] Linden, D.:
Hydraulisches Piezoservoventil NG10, O+P Ölhydraulik und Pneumatik 43, Nr. 7 S. 538-
543, (1999).
- [22] Herakovic, N.:
"Die Untersuchung der Nutzung des Piezoeffektes zur Ansteuerung fluidtechnischer
Ventile". Dissertation RWTH Aachen, (1996).
- [23] marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, <http://www.marco.de /D/asy/tdv/ 001 /001.html>.
- [24] Weinmann, M., Post, P., Vollmer, H., Wanner, R., Kluge, S., Woias, P.:
"Pneumatic silicon microvalves with piezoelectric actuation", ACTUATOR 2000, 7th
International Conference on New Actuators, June 2000, Bremen, Germany, S.224-227.
- [25] Kasper, R.; Goetze, R.; Weist, N.:
"Optimierung mechanischer Wegübersetzungseinheiten für Aktoren in Konsum- und
Produktionsgütern" ,WTU, UFZ -Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
(Az.1955A/0025).

- [26] Roth, K:
"Konstruieren mit Konstruktionskatalogen", (1982).
- [27] Willibald, L:
"Konstruktionslehre der Getriebe", (1961).
- [28] Volmer, J:
"Getriebetechnik" Koppelgetriebe", (1979).
- [29] Kasper, R.:
"Konstruktive Aspekte mechanischer Hebelsysteme" Vorlesung Skript, Mechatronik3, (IMAT).
- [30] Müller, G., Katheder, W.:
"FEM für Praktiker" Band 441, (1994).
- [31] ANSYS Documentation , ANSYS, Inc. Theory Reference, Chapter 11.1 Coupling-Piezoelectric Analysis.
- [32] Piefort, V. and Preumont, A., "Finite Element Modeling of Piezoelectric Structures", Samtech User's Conference, Paris, France, January (2001).
- [33] Allik, H., Hughes, J. R.: "Finite Element for Piezoelectric Vibration", International Journal Numerical Methods of Engineering, No. 2, pp. 151-157, (1970).
- [34] Schultes, G.:
"Piezo-Aktoren "Physikalische Grundlagen, Arbeitsprinzipien und Anwendungsbereiche, Andras Bies, Sensor und Fienewerktechnik, (2000).
- [35] Will, S.:
Einführung in die Hydraulik und Pneumatik, VEB Verlag Technik Berlin, (1988).
- [36] W. Beitz, K.-H. Küttner; Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau; 16. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, (1987).
- [37] Messner, S:
"Elektrostatisch angetriebenes 3/2-Wege-Mikroventil für pneumatische Anwendungen" Dissertation , Institut für Mikrosystemtechnik IMFW, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg August (2000).
- [38] Backe, Grundlagen der Pneumatik, Vorlesungsumdruck, IFAS RWTH Aachen, Aachen, (1994).
- [39] Will, D:
"Einführung in die Hydraulik und Pneumatik" Berlin: Verl. Technik, (1988).
- [40] Dietze, M.:

- "Messung und Berechnung der Innenströmung in hydraulischen Sitzventilen", (1996).
- [41] "Keramische Werkstoffe" TGL, 7838/01, Dezember 1989.
- [42] Ionescu, F., Kostadinov, K.:
"TELEOPERATED CONTROL FOR ROBOT WITH 6 DOF FOR MICRO AND NANO MANIPULATIONS", 6. Magdeburger Maschinenbautage S. 127 ff, (2003).
- [43] Ionescu Fl., K. Kostadinov, Hradynarski R. and I. Vuchkov, Teleoperated Control For Robot With 6 DOF For Micro And Nano Manipulations, in "*Intelligente technische Systeme und Prozesse*", [Hrsg.: R. Kasper...] - Logos Verlag - Berlin, 2003, ISBN 3-8325-0338-2, pp.127-132
- [44] Hristov K., Fl. Ionescu, K. Kostadinov, Modelling Procedure and Development of Piezo Actuated Mechatronic Systems, Journal "*Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*", vol.53, Sofia, 2002, pp.76-79.
- [43] Kasper, R., W. Heinemann, M.A. al Wahab:
"Strukturierte Piezokeramiken für die Aktoren", 4th Polish-German Mechatronic Workshop 2003, Development Potentials of Mechatronics Proceedings, Wissenschaftsverlag Ilmenau S. 130 ff.
- [46] Kasper, R., M. Al Wahab:
"Mechanically Structured Piezoelectric Actuators", 9th international conference on new actuators and 3rd international exhibition on smart and drive systems, ACTUATOR 2004.

Bildverzeichnis

Bild 1.1: Piezoelektrischer Effekt.....	1
Bild 1.2: Herstellungsprozess von piezoelektrischen Keramiken [2].....	3
Bild 1.3: Typische Prozessfolge zur Herstellung von Bleizirkonat-Titanat($\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$) [3].....	4
Bild 1.4: Stapelaktor aus n Volumenelementen	7
Bild 1.7: Wege und Kräfte von Piezoaktoren.....	9
Bild 1.8: Prinzipielle ebene und räumliche Hebelsysteme [12].....	10
Bild 1.11: 3D-Modell-Hydrostatischer Wegübersetzer [16]	12
Bild 1.12: Piezoaktorisch betriebenes Kraftfahrzeug-Einspritzsystem	13
Bild 1.13: Positioniersysteme: Hexapod und Flexure NanoPositioner [8]	14
Bild 1.14: Piezoaktorgetriebenes direktgesteuertes Hydraulikventil [16], [17].....	15
Bild 2.1: Kinematische Ketten - Grundmodule von ebenen Systemen.....	18
Bild 2.2: kinematische Ketten - räumliche Systeme	19
Bild 2.3: Doppelt wirkendes Hebelsystem	19
Bild 2.4: Übersetzungsverhältnis [29].....	20
Bild 2.6: 8-Knoten Coupled-Field Element SOLID5	24
Bild 3.1: Ausgangsgeometrie des zweiseitig eingespannten Hebelsystems.....	26
Bild 3.3: Verschiebung USUM.....	28
Bild 3.4: Von-Mises Vergleichsspannung (SEQV).....	28
Bild 3.5: Verschiebung (USUM) der optimierten Struktur.....	29
Bild 3.6: von-Mises Vergleichsspannung (SEQV) der optimierten Struktur.....	30
Bild 3.7: Verfahren zur Prototypenherstellung [12].....	31
Bild 3.8: Ultraschallanlage Prinzip.....	32
Bild 3.9: Ebener Piezoaktor mit WVS.....	33
Bild 3.11: Versuchsaufbauschema zur Messung der Kennlinie	34
Bild 3.12: Gemessene quasistatische Hysteresekurve	35
Bild 3.13: Zweiseitig eingespanntes Hebelsystem	36
Bild 3.14: Symmetrisch strukturierte Piezoplatte zur Wegaddition	37
Bild 3.15: Außenschenkel aktiv	37
Bild 3.16: Außen- und Innenschenkel aktiv	38
Bild 3.17: Symmetrische Ausführung des Systems mit Wegaddition.....	38

Bild 3.18: Spaltänderung Δs der symmetrischen Aktorplatte	39
Bild 3.19: Unsymmetrische strukturierte Piezoplatte	39
Bild 3.20: Realisierte Form des unsymmetrischen Systems zur Wegaddition	40
Bild 3.21: Hysteresekennlinien des unsymmetrischen Piezoaktors	40
Bild 4.1: Grundmodell der Piezokeramikplatte mit Mittelsteg	42
Bild 4.2: Verformung des Mittelstegs.....	43
Bild 4.3: Verformung des vorgeformten Aktor	44
Bild 4.5: Strukturierte Grundkörper.....	45
Bild 4.6: Hybride Bauweise	45
Bild 4.7: Biegung in vertikaler Richtung.....	46
Bild 4.8: Aufbau der Hybridform	47
Bild 4.9: Weg-Spannungs-Hysterese der Hybridbauform (Butterfly).....	48
Bild 4.10: Weg-Zeit-Diagramm bei angelegtem Spannungssprung von 1000 V	49
Bild 4.11: Zweiseitig wirkende Butterfly-Hybridform	50
Bild 4.12: Weg-Spannungs-Hysterese	51
Bild 4.14: Kreisförmige Keramikscheibe mit WVS (Tellersystem) [43].....	52
Bild 4.15: Verformung aus der FE-Berechnung	52
Bild 4.17: Hystereseverlauf des doppelten Tellersystems.....	54
Bild 4.18: Zusammenstellung ausgewählter Systeme.....	55
Bild 5.1: Symbolische Darstellung von 2/2- und 3/2-Wegeventilen [37].....	57
Bild 5.2: Darstellung des Bereichs der Ventilöffnung eines Sitzventils	59
Bild 5.3: Schematische Darstellung verschiedener Ausführungsformen von 2/2-Wegeventilen mit Flachsitz.....	60
Bild 5.4: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte sowie die Auslenkung	61
Bild 5.5: Geometrie des Ventils	62
Bild 5.6: Geometriemodell	63
Bild 5.7: Finite-Elemente-Netz.....	65
Bild 5.8: Druckverteilung	69
Bild 5.9: Geschwindigkeitsverteilung.....	69
Bild 5.10: Geschwindigkeit in Machzahlen und Geschwindigkeitslinien.....	70
Bild 5.11: Temperatur und Dichteverteilung	71
Bild 5.12: Berechneter Volumenstrom am Auslassquerschnitt	72
Bild 5.13 Resultierende pneumatische Kraft an der Ventilplatte	73
Bild 5.14: Dreidimensionale Explosionsdarstellung des Gehäuses für das piezogetriebene 2/2- Wege-Ventil	75
Bild 5.15: Teilweise montierte 2/2-Wege-Sitzventil mit Piezoantrieb	76
Bild 5.16: Messanordnung zur Bestimmung des Volumenstroms Q	77

Bild 5.17: Vergleich von Messung und Berechnung des Volumenstromes	78
Bild 5.18 Darstellung des piezoangetriebenen 2/2-Wege Sitzventils	80
Bild 5.19: Simulationsgrundmodell des 2/2-Wegeventils mit Tellersystem	80
Bild 5.20: FE-Netz des Grundmodells	81
Bild 5.21: Druckverteilung	82
Bild 5.22: Geschwindigkeitsprofil.....	83
Bild 5.23: Strömungslinien.....	84
Bild 5.24: Vergleichsdiagramm	84

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
C	F	Kapazität
[c]	–	Elastizitätsmatrix
{D}	–	Flussdichtevektor
E	V/m	Elektrische Feldstärke
{E}	–	Elektrizitätsfeldvektor
[e]	–	Piezoelektrische Matrix
F	N	Kraft
g	m ³ /(kg.s ²)	Gravitationskonstante
L	m	Länge
M	–	Machzahl
n	–	Volumenelemente- Zahl
p	bar	Druck
Q _A	c	elektrische Ladung
Q	l/min	Volumenstrom
R	-	Gaskonstante
r	m	Radius
s	m	Spalt
{S}	–	Dehnungsvektor
T	K	Temperatur(kelvin)
{T}	–	mechanischer Spannungsvektor (σ)
U	V	Elektrische Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
Z	m	Auslenkung
C	kJ/(kg·K)	spezifischen Wärme
σ	N / mm ²	mechanische Spannung
Δ	–	Differenz
ρ	kg/m ³	Dichte
φ	◦	Drehwinkel
γ	–	Konstante
[ε]	–	Dielektrizitätsmatrix

Indizes

Abs	Absolut
akt.	Aktor
Feder	Federelement
Piezo	Piezoaktor
pn	Pneumatik
N	Norm
S	Strömung

Veröffentlichungen:

- 1- Kasper,,R., J. Weiser, M.A. al Wahab:
Abschlusskolloquium des Innovationskollegs Adaptive mechanische Systeme, "Aktive Verbindungselemente zur Befestigung, Schall- und Schwingungs-dämpfung adaptiver mechanischer Systeme", (Mai (2001).
- 2- Kasper,R., W. Heinemann, M.A. al Wahab:
"Berechnung und Entwurf strukturierter Piezoaktoren", 6. Magdeburger Maschinenbautage S. 25ff (2003).
- 3- Kasper,R., W. Heinemann, M.A. al Wahab:
"Realisierung und Test strukturierter Piezoaktoren", 6. Magdeburger Maschinenbautage S. 317ff (2003).
- 4- Kasper, R., W. Heinemann, M.A. al Wahab:
"Strukturierte Piezokeramiken für die Aktoren", 4th Polish-German Mechatronic Workshop, Development Potentials of Mechatronics Proceedings, Wissenschaftsverlag Ilmenau S. 130 ff (2003).
- 5- Kasper, R., M. Al Wahab:
"Mechanically Structured Piezoelectric Actuators", 9th international conference on new actuators and 3rd international exhibition on smart and drive systems, ACTUATOR 2004.