

**Forschungszentrum Karlsruhe  
Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte**

**FZKA 5902**

**Entwicklung, Herstellung und Test von  
aktiven Mikroventilen für pneumatische  
Anwendungen**

**C. Goll\*, W. Böhmer, W. Menz, W. K. Schomburg  
Institut für Mikrostrukturtechnik**

\*von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe  
genehmigte Dissertation

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
1997**

# Entwicklung, Herstellung und Test von aktiven Mikroventilen für pneumatische Anwendungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe  
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Phys. Claudia Goll geb. Speck  
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Februar 1997

Hauptreferent: Prof. Dr. W. Menz  
Korreferent: Prof. Dr. D. Munz

## Zusammenfassung

Für den Einsatz in chemischen und medizinischen Analysesystemen wurden aktive Mikroventile zum Schalten von Gasen entwickelt, die sich durch eine kleine Baugröße und einen geringen Energiebedarf auszeichnen. Diese Mikroventile verbrauchen weder im geöffneten noch im geschlossenen Zustand Leistung, nur zum Schalten wird Energie zugeführt. Das hat den großen Vorteil, daß weder das zu steuernde Medium noch das Mikroventil unnötig aufgeheizt werden. Dazu wurden geeignete Funktionsprinzipien und Herstellungsprozesse entwickelt. Die Herstellungsprozesse sind kostengünstig und für eine Massenfertigung geeignet. Die Maximal-Abmessungen dieser Ventile betragen  $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$ . Die zwei entwickelten Mikroventiltypen sind:

1. das bistabile (elektro-thermo-)pneumatische Mikroventil,
2. das elektrostatische Mikromembranventil.

Im ersten Fall wurde ein Verfahren zur Herstellung einer bistabil ausgewölbten Polyimid-Folie entwickelt. Die Folie bleibt auch ohne von außen anliegenden Druck in ihrer jeweiligen stabilen Position. Die zwei stabilen Zustände der Folie werden ausgenutzt, um das Mikroventil zu schließen bzw. zu öffnen. Das Umschalten erfolgt elektro-thermo-pneumatisch über einen kurzzeitig in der Aktorkammer anliegenden Über- bzw. Unterdruck. Es wurden Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt, um für die Mikroventile die optimalen Designregeln bestimmen zu können. An den Mikroventilen wurden Messungen zur Bestimmung des Stellweges bzw. des Hubs, der Aktordrücke und des Volumenflusses durchgeführt. Es wurde ein sehr geringer Leckfluß von maximal 1 nl/s ermittelt. Im Dauertest wurde selbst nach 15.6 Mio. Lastzyklen keine Änderung der Funktionseigenschaften der bistabilen Folie festgestellt.

Der zweite Mikroventiltyp, das elektrostatische Mikromembranventil, besteht aus zwei Gehäusehälften, die eine bewegliche Membran umschließen. Alle drei Komponenten fungieren als Elektroden. Je nach angelegter Spannung bewegt sich die doppel-S-förmige Membran in der Ventilkammer und verschließt bzw. öffnet das Mikroventil. Um die Membranbewegungen zu simulieren, ist ein Finite-Elemente-Programm entwickelt worden, da keine geeignete kommerzielle Software zur Verfügung stand. Dieses Programm ermöglicht es, die Kopplung zwischen Membranauslenkung und elektrostatischem Feld zu berücksichtigen. Die Mikroventilgehäuse wurden auf zwei Arten hergestellt, einerseits mittels Abformung, andererseits mittels optischer Lithographie. Die Strukturhöhen betragen  $25 \mu\text{m}$ . Die bewegliche Membran besteht aus einer leitfähigen Schicht, die von zwei Isolationsschichten umschlossen ist. Zur Herstellung dieser 3-Schicht-Membran wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, alle drei Schichten unterschiedlich zu strukturieren und anschließend die Membran auf das Gehäuse zu übertragen. Die Funktion des elektrostatischen Aktors wurde nachgewiesen, die zum Schalten notwendigen Spannungen und die Volumenflüsse durch das geöffnete Mikroventil wurden ermittelt.

Angeordnet zu einem Array, in Kombination mit Mikropumpen, Sensoren und einer entsprechenden Signalverarbeitung können mit diesen Mikroventilen intelligente Mikrofluidsysteme aufgebaut werden, die in chemischen Analysesystemen, in der Umwelt- und Medizintechnik neue Möglichkeiten eröffnen.

## Development, Production, and Test of Active Microvalves for Pneumatic Applications

Active microvalves have been developed for switching gases in chemical and medical analysis systems; they are characterized by their small dimensions and low energy requirement. Neither in the open nor in the closed condition do these microvalves consume power; energy is supplied only for switching. This design offers the major advantage of not heating unnecessarily the medium to be controlled or the microvalve. Suitable working principles and manufacturing processes have been developed. The manufacturing processes are low in cost and lend themselves to mass production. The maximum dimensions of the valves are  $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$ . These two types of microvalves have been developed:

1. the bistable (electro-thermo)-pneumatic microvalve,
2. the electrostatically actuated microvalve.

For the first type of microvalve, a method has been developed to produce a polyimide film with bistable convexity. This film remains in either of its stable positions also in the absence of any external pressure. The two stable states of the film are used to open and close, respectively, the microvalve. Switching is electro-thermo-pneumatic by means of overpressure or negative pressure briefly applied to the actuator chamber. Finite-element simulations were conducted to determine the optimum design rules for the microvalves. The microvalves were subjected to measurements to determine the travel and lift, respectively, the actuator pressures, and the volume flow. A very low leakage flow not exceeding  $1 \text{ nl/s}$  was determined. In a long-term test, no change in the functioning characteristics of the bistable film was found even after 15.6 million load cycles.

The second type of microvalve, the electrostatically actuated microvalve, consists of two housing shells enclosing a movable membrane. The three components act as electrodes. Depending on the voltage supplied, the double-S-shaped membrane moves in the valve chamber, opening and closing the microvalve. A finite-element program has been developed to simulate the membrane movements, as no suitable commercial software was available. This program makes it possible to consider the coupling between the membrane deflection and the electrostatic field. The microvalve housing was produced in two ways: in one case, by means of molding; in the other case, by means of optical lithography. The structures are  $25 \mu\text{m}$  high. The movable membrane consists of a conducting layer enclosed by two insulating layers. A technique of producing this three-layer membrane has been developed which allows the three layers to be patterned differently and the membrane then to be transferred to the housing. The function of the electrostatic actuator has been demonstrated; the voltages necessary for switching, and the volume flows through the open microvalve have been determined.

When arranged in an array, in a combination with micropumps, sensors, and the appropriate signal processing tools, these microvalves can be used to build up intelligent microfluidic systems opening up new possibilities for use in chemical analysis systems for environmental technology and medical technology.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>(Elektro-thermo-)Pneumatisches Mikroventil</b>	<b>9</b>
2.1	Pneumatisches Mikroventil . . . . .	9
2.1.1	Aufbau und Funktionsprinzip . . . . .	9
2.1.2	Mathematisches Modell . . . . .	12
2.1.3	Finite-Elemente-Simulationen . . . . .	15
2.1.4	Prozeßentwicklung, Herstellung . . . . .	21
2.2	Elektro-thermo-pneumatisches Mikroventil . . . . .	29
2.2.1	Schichtaufbau und Funktionsprinzip . . . . .	29
2.2.2	Herstellung . . . . .	35
2.2.3	Elektronische Regelung . . . . .	39
2.3	Charakterisierung . . . . .	45
2.3.1	Oberflächenprofilanalysen . . . . .	45
2.3.2	Indentermessungen . . . . .	48
2.3.3	Strömungsmechanische Grundlagen . . . . .	50
2.3.4	Pneumatische Messungen . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Elektrostatisches Mikromembranventil</b>	<b>57</b>
3.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	58
3.2	Software-Entwicklung und FEM-Simulationen . . . . .	61

3.3	Herstellung . . . . .	67
3.3.1	Herstellung der 3-Schicht-Membran . . . . .	67
3.3.2	Herstellung der Mikroventilgehäuse für das elektrostatische Mikromembranventil . . . . .	71
3.4	Charakterisierung . . . . .	76
3.4.1	Funktionsnachweis des elektrostatischen Aktors . . . . .	76
3.4.2	Volumenflußmessung . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>79</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>83</b>
	<b>Anhang</b>	<b>91</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

In den 80er Jahren wurde der Begriff Mikrosystemtechnik für wissenschaftliche Arbeiten geprägt, die sich mit der Integration verschiedener mikrotechnologischer Gebiete wie Mikroelektronik, Mikromechanik, Mikroaktorik, Mikrosensorik, Mikrooptik oder Aufbau- und Verbindungstechnik befassen. Nach übereinstimmender Einschätzung wird der Mikrosystemtechnik ein sehr großes Entwicklungspotential und ein großer Markt vorausgesagt. Es werden oft Parallelen zur rasanten Entwicklung der Mikroelektronik in den letzten Jahrzehnten gezogen, die wie kaum eine andere Technologie unser heutiges Leben, sei es im Beruf oder in der Freizeit, bestimmt.

Wenn auch einzelne Produkte der Mikrosystemtechnik schon in Mengen gefertigt werden wie z.B. Drucksensoren oder Beschleunigungssensoren für den Automobilbereich (Airbag), steht doch die Mikrosystemtechnik mit ihren Möglichkeiten noch am Anfang einer industriellen Implementierung. Die Produktion von Mikrosystemen in hoher Stückzahl ist in der Regel preiswerter als die Herstellung herkömmlicher makroskopischer Systeme. Die Anwendungsgebiete der Mikrosystemtechnik sind sehr vielfältig und reichen von Verkehrs- und Sicherheitstechnik über Umwelttechnik und Medizintechnik bis zur Kommunikationstechnik. Außerdem eröffnen sich aufgrund der Miniaturisierung völlig neue Möglichkeiten in Anwendungsgebieten wie der minimal-invasiven Therapie und der Implantattechnologie.

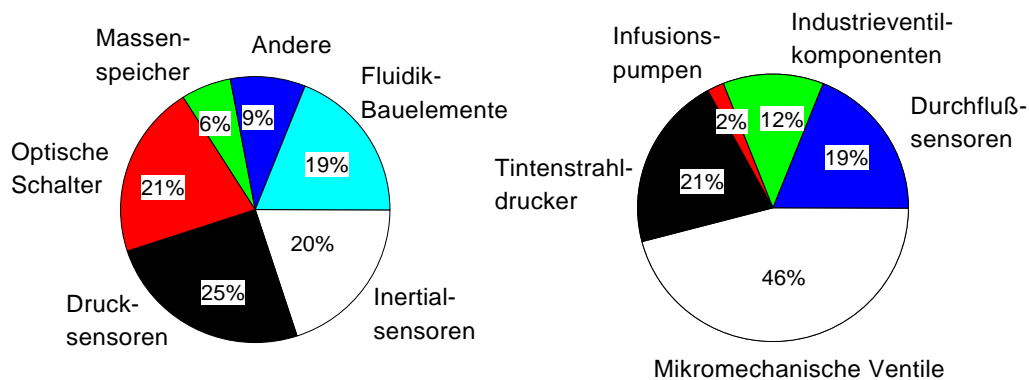
Die Mikrosystemtechnik benötigt Kenntnisse der Mikrotechnologien, wie Schicht- und Strukturierungstechnologien, Mikromechanik und Mikroelektronik sowie der Materialwissenschaften, der Signalverarbeitung und der Aufbau- und Verbindungstechnik [1, 2]. Mit Schicht- und Strukturierungstechnologien lassen sich Membranen, Leiterbahnen, Isolations- und Passivierungsschichten erzeugen. Den Materialwissenschaften fällt eine entscheidende Aufgabe bei der Entwicklung und Charakterisierung neuer Werkstoffe

(z. B. Form-Gedächtnis-Legierungen, elektrisch leitfähige Polymere [3]) zu. In der Mikromechanik werden Strukturen erzeugt, die mit speziellen Ätz- und Passivierungstechniken aus Silizium gefertigt werden. Außerdem werden Materialien wie Glas, Keramik, Metalle und Polymere eingesetzt und u. a. mit Lithographie-, Ätz- und Abformtechniken bearbeitet. Das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte LIGA -Verfahren (Röntgentiefen-**L**ithographie, **G**alvanik und **A**bformung) [4] bietet die Möglichkeit, mikromechanische Strukturen mit hohem Aspektverhältnis und hohem Miniaturisierungsgrad aus Metall oder Polymeren zu erzeugen. Hinzu kommt, daß bestehende Feinwerktechniken in immer kleineren Dimensionen ausgeführt werden können, z. B. Bohren und Fräsen [5, 6]. In der Aufbau- und Verbindungstechnik werden die einzelnen mikromechanischen Komponenten zusammengefügt und die Verbindung zwischen Makro- und Mikrowelt hergestellt. Hier braucht man neue, unkonventionelle Techniken, spezielle Fügetechniken (Kleben, Laserschweißen) und elektrische Kontaktierungstechniken (Bonden, anisotropes Leitkleben), die eine möglichst einfache Montage und Justage ermöglichen. Außerdem wird der Fügeaufwand minimiert, wenn Komponenten integriert hergestellt werden, was z. B. durch Abformung mit mehrstufigen Abformwerkzeugen in verschiedenen Polymeren erreicht werden kann.

Die Bestandteile von Mikrosystemen können in die Bereiche Sensorik, Aktorik, Mikrostrukturen und Signalverarbeitung eingeteilt werden. Der Bereich der Signalverarbeitung beruht auf den Ergebnissen der Mikroelektronik und ist sehr gut entwickelt. Dabei werden miniaturisierte Auswerteschaltkreise eingesetzt, um die analogen oder digitalen Daten zu verarbeiten. Die optische Nachrichtenübertragung mit Fasern gewinnt immer mehr an Bedeutung. Im Bereich der Sensorik werden verschiedene Meßgrößen wie Druck, Kraft, Beschleunigung usw., z. B. durch Dehnungen oder durch die Auslenkung einer seismischen Masse erfaßt. Die Änderung dieser Meßgrößen werden über Widerstands- oder Kapazitätsänderungen ausgelesen. Im Bereich der Aktorik besteht sicherlich der größte Entwicklungsbedarf. Mikroaktoren zur Steuerung und Regelung von Volumenströmen sind hierbei besonders wichtig. Es existieren verschiedene Bauformen zur Veränderung der Durchflußrichtung, des Drucks oder der Größe des Fluidstroms. Sie werden unter dem Oberbegriff Ventile zusammengefaßt. Reichen bei mikromechanischen Aktoren wie z. B. Stellgliedern und Mikromotoren unter Umständen noch quasi zweidimensionale, planare Strukturen aus, so müssen bei Ventilen wirklich dreidimensionale Strukturen geformt werden, was mit einem erheblichen Mehraufwand vor allem in der Aufbau- und Verbindungstechnik verbunden ist.

Diesem Bereich, der Mikrofluidik, wird ein großes Marktpotential vorausgesagt. Eine weltweite Marktstudie der Systems Planning Corporation von 1994 unterstreicht





**Abbildung 1.1:** Für das Jahr 2000 prognostizierte Aufteilung des Weltmarktes mikromechanischer Systeme (links) und die Anteile des Marktsegments Fluidik-Bauelemente im einzelnen (rechts).

eindrucksvoll, daß bei Ventilen der Trend zur Miniaturisierung geht [7]. Für das Jahr 2000 wird prognostiziert, daß Fluidik-Bauelemente 19 % des Weltmarktes mikromechanischer Systeme einnehmen werden (vgl. Abb. 1.1). Das entspricht einem Marktvolumen von 2.6 Mrd. US-Dollar. Unter diesen Fluidik-Bauelementen stellen die mikromechanischen Ventile mit 46 % den weitaus größten Sektor dar. Die beiden vorrangigen Ziele sind, Baugröße und Energiebedarf zu miniaturisieren [8]. Der Entwicklungseinsatz lohnt sich, da Mikroventile gegenüber herkömmlichen, makroskopischen Ventilen einige entscheidende Vorteile besitzen: aufgrund ihrer reduzierten Größe zeichnen sie sich durch ein kleines Totvolumen, kurze Ansprechzeiten, niedrigen Energieverbrauch, verbesserte Ermüdungseigenschaften und einen geringen Preis aus. Das soll im folgenden durch einige Anwendungsbeispiele illustriert werden.

Für medizinische und chemische Analysesysteme, für Dosieraufgaben und für die Umweltüberwachung werden Mikroventile benötigt [9]. Sie steuern und regeln den Fluidstrom in Mikrosystemen. Aber auch in makroskopischen Analysesystemen sind Mikroventile erwünscht. Je kleiner die z.B. in der Gaschromatographie verwendeten Probenmengen sind, desto schärfer ist das Auswertespektrum und desto besser ist die Analyse. Allerdings kommen dann der Probeentnahme eine besondere Bedeutung und Sorgfalt zu. Mikroventile bieten wegen ihres naturgemäß geringen Totvolumens die idealen Voraussetzungen für dieses Einsatzgebiet [10].

In der Medizintechnik besteht der Wunsch, Medikamente exakt zu dosieren, so daß dem Patienten genau die richtige Dosis verabreicht werden kann. Diese optimierte, konti-

nuierliche Medikamentendosierung kann durch ein Mikrosystem erreicht werden, das den momentanen Medikamentenbedarf ermittelt und den Nachschub steuert. Die Miniaturisierung bietet hier große Vorteile. Einerseits werden nur kleinste Analysemengen benötigt, so daß die Messungen auch häufiger durchgeführt werden können, andererseits ist die Mobilität des Patienten durch ein portables, gegebenenfalls implantiertes Gerät gewährleistet. Ein weiterer Vorteil ist, daß Medikamente höher konzentriert werden können und Vorratsbehälter längere Zeiten eingesetzt werden können, wenn man genau genug dosieren kann.

Ebenso sind für chemische Analysesysteme in der Umweltüberwachung bei Analysen direkt vor Ort oder für den Einsatz im Weltraum kleine, leichte portable Analysegeräte nötig. In der Umweltüberwachung können intelligente Systeme miteinander kommunizieren, so daß eine Simultanüberwachung größerer Gebiete möglich wird. In allen diesen Bereichen ist es von Vorteil, Mikrosysteme mit integrierten Mikroventilen zur Fluidsteuerung einzusetzen.

Bisher existierende Mikroventile nutzen folgende Antriebsprinzipien aus: thermisch [11]-[14], magnetisch [15, 16], elektrostatisch [16]-[18], piezoelektrisch [19, 20], mit Form-Gedächtnis-Legierungen [21, 22] oder magnetostriktiven Materialien [23]. Piezoelektrische und magnetostriktive Aktoren erfordern recht hohe Betriebsspannungen bzw. -ströme, um Hübe im Bereich von einigen zehn Mikrometern zu erreichen. Magnetische Aktoren erfordern zur Erzeugung eines hinreichend großen Magnetfeldes ebenfalls hohe Stromstärken, außerdem ergibt sich ein hoher Platzbedarf durch den Antrieb. Thermische Aktoren hingegen erzielen schon bei niedrigen Spannungen große Auslenkungen mit sehr großen Kräften. Beim elektrostatischen Antrieb wirken hohe Kräfte nur bei geringem Elektrodenabstand, trotzdem kann ein hoher Hub durch ein entsprechendes Ventil-Design erreicht werden [24]. Außerdem weisen elektrostatisch angetriebene Mikroventile im Vergleich zu Antrieben mit Form-Gedächtnis-Legierungen kürzere Ansprechzeiten auf.

Die bisher vorgestellten Mikroventile basieren größtenteils auf den Grundlagen der Siliziumtechnik, das gilt auch für erste kommerziell vertriebene Mikroventile [25]. Es handelt sich hierbei um thermisch angetriebene „normally-open“-Ventile, die allerdings den gravierenden Nachteil aufweisen, daß sie im geöffneten Zustand ständig (elektrische) Leistung verbrauchen und somit das zu steuernde Medium und das Mikroventil unnötig aufgeheizt werden, was in den meisten Anwendungen unerwünscht ist [26].

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, Mikroventile zum Schalten von Gasen zu entwickeln, die sich durch eine kleine Baugröße und einen sowohl im geöffneten als auch geschlossenen Zustand geringen Energiebedarf auszeichnen. Dazu mußten geeig-

nete Funktionsprinzipien gefunden und Herstellungsprozesse entwickelt werden. Als Lösungsmöglichkeit für die genannte Aufgabe wird in dieser Arbeit die Verwendung einer bistabilen Folie vorgeschlagen. Hierbei galt es zu klären, ob eine solche Folie, die zwei stabile Zustände einnehmen kann, mit entsprechend kleinen Abmessungen hergestellt werden kann. Die entwickelten Mikroventile wurden so ausgelegt, daß sie im ersten stabilen Zustand geschlossen und im zweiten geöffnet sind. Energie wird nur noch zum Schalten zwischen diesen beiden Zuständen benötigt. Der Effekt der Bistabilität könnte auch für die digitale Speicherung [27, 28] ausgenutzt werden. Eine zweite Möglichkeit zur Reduzierung des Energiebedarfs ist die Verwendung eines elektrostatischen Antriebs. Im statischen Fall arbeiten solche Mikroventile fast verlustleistungsfrei. In diesem Fall sollte untersucht werden, ob Mikroventile mit elektrostatischem Antrieb durch Kunststoffabformung und optische Lithographie hergestellt werden können.

Weitere Anforderungen an die Mikroventile waren: geringer Leckfluß und Volumenflüsse von mehreren hundert  $\mu\text{l/s}$  bei anliegenden Differenzdrücken über 100 hPa und maximal bis 1000 hPa. Außerdem sollten bei der Entwicklung die spätere Systemintegration und die Technologiekompatibilität zur Herstellung anderer Fluidik-Komponenten berücksichtigt werden. Die Herstellungsprozesse sollten kostengünstig und zur Massenfertigung geeignet sein, so daß sie von Firmen übernommen werden können, ohne daß diese ein zu hohes Investitionsrisiko tragen müssen. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war, Finite-Elemente-Programme und Simulationen zu erstellen, um das Ventildesign an geänderte oder spezielle Anforderungsprofile optimal anpassen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Mikroventil-Varianten entworfen und hergestellt:

1. das bistabile (elektro-thermo-)pneumatische Mikroventil,
2. das elektrostatische Mikromembranventil.

Beide Mikroventiltypen brauchen nur zum Schalten Energie.

Zunächst werden der Aufbau und das Funktionsprinzip beider Mikroventiltypen vorgestellt. Der prinzipielle Aufbau ist bei beiden Mikroventiltypen ähnlich. Zwischen zwei Gehäuseteilen befindet sich eine aktive Membran bzw. Folie. Je nach Lage der Membran bzw. der Folie wird der Einlaß der Mikroventile verschlossen oder freigegeben, so daß das Mikroventil entweder geöffnet oder geschlossen ist. Die Materialien und das Design der einzelnen Komponenten sind jedoch recht unterschiedlich.

Um beide Mikroventile optimal auszulegen, wurden in beiden Fällen Finite-Element-Simulationen durchgeführt, die im folgenden vorgestellt werden. Dabei mußte für den

elektrostatischen Antrieb erst ein geeignetes FEM-Programm entwickelt werden, um eine bewegliche Elektrode richtig berechnen zu können. Kommerziell verfügbare Simulationsprogramme besaßen nicht die geforderten Optionen.

Des Weiteren werden die entwickelten Prozesse und deren Variationen zur Herstellung der Gehäuse und der Membran erläutert. Hierbei wird auch auf die Bedeutung elektrisch leitfähiger Polymere näher eingegangen. Außerdem wurden Messungen zur Charakterisierung beider Ventiltypen durchgeführt, deren Ergebnisse vorgestellt werden.

# Kapitel 2

## (Elektro-thermo-)Pneumatisch angesteuertes bistabiles Mikroventil

### Einführung

In diesem Kapitel wird das (elektro-thermo-)pneumatische Antriebsprinzip erklärt. Dabei wird zunächst im ersten Abschnitt das pneumatische Funktionsprinzip beschrieben. Hier werden der Aufbau des Mikroventils, das Funktionsprinzip der Bistabilität und die entwickelten Herstellungsprozesse erläutert. Außerdem werden Finite-Elemente-Simulationen vorgestellt, die es je nach Designwunsch erlauben, das Mikroventil optimal auszulegen. Anschließend wird im zweiten Abschnitt das integrierte Antriebsprinzip, der elektro-thermo-pneumatische Antrieb vorgestellt. Es wird auf den Aufbau, den Herstellungsprozeß und insbesondere auf die elektronische Ansteuerung näher eingegangen. Im dritten Abschnitt werden Messungen gezeigt, die das Mikroventil charakterisieren. Dazu gehören z. B. pneumatische Messungen, Dichtigkeits- und Dauertests.

### 2.1 Pneumatisch angesteuertes bistabiles Mikroventil

#### 2.1.1 Aufbau und Funktionsprinzip

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein bistabiles Mikroventil entwickelt, das nur während des Schaltvorgangs Leistung verbraucht. Im ersten stabilen Zustand ist das Mikroventil geöffnet, im zweiten geschlossen. Dies wird durch eine Ventilmembran erreicht, die auch ohne extern anliegenden Druck zwei stabile, ausgewölbte Zustände einnehmen kann. Die Ventilmembran wird im folgenden als Folie bezeichnet, um zu verdeutlichen, daß

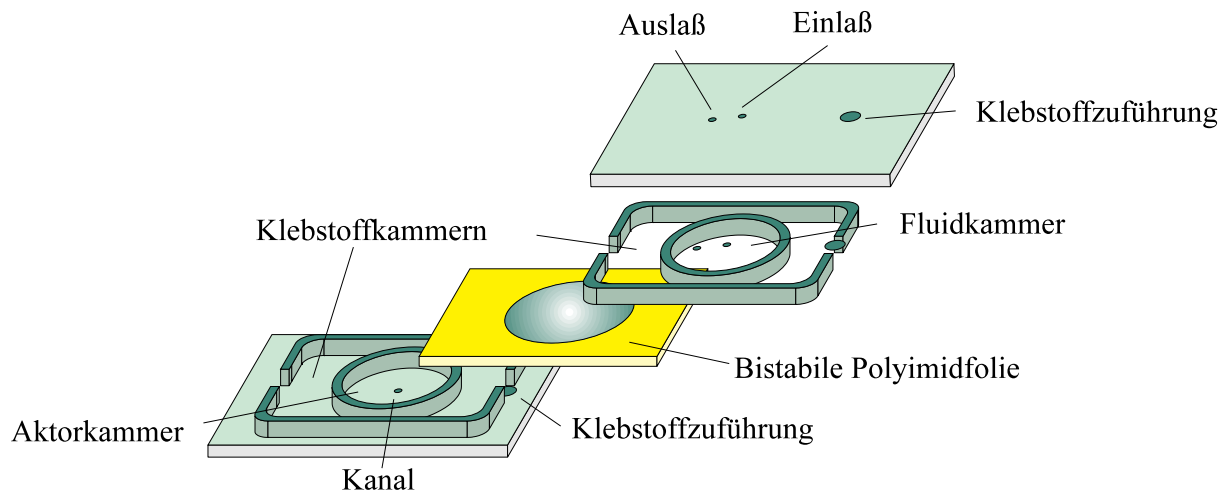


Abbildung 2.1: Schematische Explosionsansicht des bistabilen Mikroventils.

Biegemomente für die stabil ausgewölbten Zustände verantwortlich sind. Das Mikroventil besteht aus zwei Gehäusehälften mit der funktionstragenden Folie dazwischen. Die kreisförmige Folie ist entweder nach oben oder nach unten stabil ausgewölbt und gibt je nach Lage die Verbindung zwischen Ein- und Auslaß frei oder verschließt sie.

In Abbildung 2.1 ist eine schematische Explosionsansicht des bistabilen Mikroventils dargestellt. Links ist das untere Gehäuseteil mit der kreisförmigen Aktorkammer zu sehen. Um die Aktorkammer herum befindet sich eine Klebstoffkammer, deren Funktion in Abschnitt 2.1.4 näher beschrieben wird. In der Aktorkammer ist ein Kanal für den Druckanschluß angebracht. In der Mittelebene ist die Polyimidfolie angeordnet, die in ihrer Mitte genau über der Aktorkammer eine bistabile Auswölbung aufweist. Genau darüber liegt die Fluidkammer des oberen Gehäuseteils, die analog zur Aktorkammer von einer zweiten Klebstoffkammer umgeben ist. Die kreisförmige Polyimidfolie trennt den Aktorbereich vollständig vom Fluidbereich. Der Deckel des oberen Gehäuseteils ist der besseren Anschaulichkeit wegen über der Fluidkammer dargestellt, obwohl das gesamte obere Gehäuseteil samt Fluidkammer und Deckel aus einem Stück gefertigt sind. Dasselbe gilt auch für das untere Gehäuseteil. Im Deckel des oberen Gehäuseteils befinden sich neben einer Öffnung für die Klebstoffzuführung noch zwei weitere Öffnungen, die als Einlaß und Auslaß dienen.

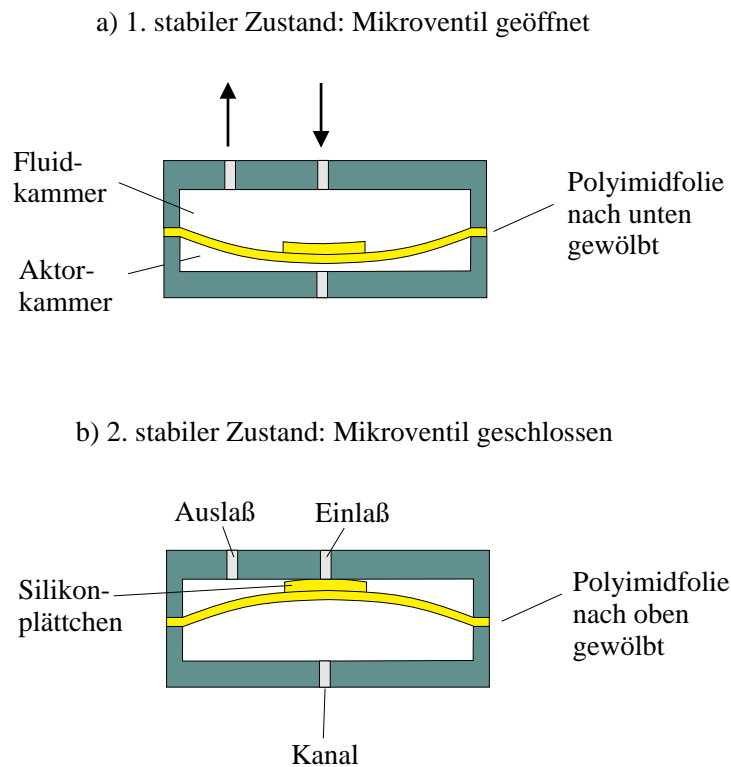


Abbildung 2.2: Querschnittsskizze des Mikroventils zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips.

Typische Abmessungen der in der vorliegenden Arbeit hergestellten Mikroventile sind:

Innendurchmesser von Aktor- und Fluidkammer	3 mm
Höhe der Kammern	120 $\mu\text{m}$
Dicke der Polyimidfolie	25 $\mu\text{m}$
Durchmesser des Einlasses	100 $\mu\text{m}$
Durchmesser des Auslasses	200 $\mu\text{m}$

Abbildung 2.2 verdeutlicht die Funktion der bistabilen Folie. Die Abbildung zeigt den nicht maßstäblich gezeichneten Querschnitt des Mikroventils. Zwischen der Aktor- und der Fluidkammer ist die Polyimidfolie eingeklebt, die Klebstoffkammern sind einfachheitshalber weggelassen. Die Folie weist Biegemomente auf, so daß sie zwei stabile Zustände einnehmen kann. Auf der Folie ist ein kreisförmiges Silikonplättchen als Dichtung angebracht. Diese Ventildichtung kann auch in das obere Gehäuseteil integriert sein. In der oberen Abbildung 2.2 a ist der erste stabile Zustand der Polyimidfolie zu sehen. Die Polyimidfolie ist nach unten gewölbt und gibt die Verbindung zwischen Ein- und Auslaß frei, das Mikroventil ist geöffnet. In der unteren Abbildung 2.2 b ist die Folie nach oben gewölbt, befindet sich also im zweiten stabilen Zustand. Die Verbindung zwischen Ein- und Auslaß ist unterbrochen, das Mikroventil ist geschlossen.

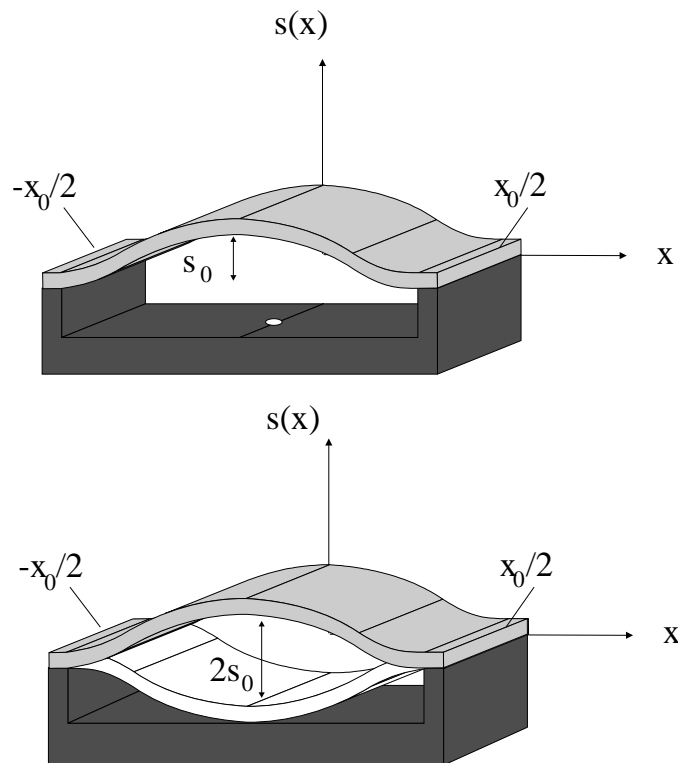


Abbildung 2.3: Schematisches Modell einer an den Seiten eingespannten, rechteckigen Folie.

In den stabilen Zuständen „offen“ oder „zu“ setzt das Mikroventil keine Energie um. Bei entsprechender Konstruktion drückt die bistabile Folie im nach oben gewölbten Zustand gegen den Ventilsitz, so daß das Mikroventil auch gegen einen von außen anliegenden Druck geschlossen bleibt, ohne daß ihm Energie zugeführt werden muß. Das Umschalten des Mikroventils wird durch einen kurzen Druckpuls erreicht. Zum Öffnen wird ein Unterdruckpuls, zum Schließen ein Überdruckpuls benötigt. Der Kanal stellt die Verbindung zum Druckreservoir dar.

Im nächsten Abschnitt erfolgt die mathematische Beschreibung einer bistabilen Folie. Zunächst wird eine analytische Lösung für eine bistabile, rechteckige Folie vorgestellt, anschließend Finite-Elemente-Simulationen zur Berechnung einer kreisförmigen Folie.

### 2.1.2 Mathematisches Modell

Nützliche Informationen über das Verhalten der kreisförmigen Folie im Mikroventil können durch mathematische Analysen einer einfacheren Struktur gewonnen werden. Als Einstieg in die Problematik von bistabilen Elementen dient folgende analytische Rechnung am Beispiel einer rechteckigen Folie. Das vereinfachte, schematische Modell



sieht man in Abb.2.3. Es soll gezeigt werden, daß die Auswölbung der Folie einsetzt, sobald eine kritische Dehnung  $\varepsilon_{crit} = \sigma/E$  überschritten wird. Außerdem werden die maximalen Auslenkungen bei gegebenen Abmessungen berechnet, welche den Hub des Mikroventils bestimmen. Das Prinzip des „buckling“, d. h. des Ausbeulens, eines beidseitig eingespannten Balkens ist bekannt [27, 29]. Die Folie besteht aus einem homogenen Material mit dem Elastizitätsmodul  $E$ , hat die Länge  $l$  im nicht eingespannten und die Länge  $x_0$  im eingespannten Zustand, die Breite  $b$ , die Dicke  $d$ , ist an beiden Enden bei  $\pm x_0/2$  eingespannt und steht unter der verbliebenen Druckspannung  $\sigma$ . Die Gesamtenergie  $W_{ges}$  setzt sich aus den Anteilen der Energie  $W_{bieg}$  aufgrund der Biegung und der Energie  $W_{sp}$  aufgrund der Druckspannung zusammen. Im eindimensionalen Fall mit der Kurvenform  $s(x)$  für die vertikale Auslenkung ergibt sich [30]:

$$W_{ges} = W_{sp} + W_{bieg} \quad (2.1)$$

$$\text{mit } W_{sp} = \frac{E}{2} l b d \left( \varepsilon - \frac{1}{2l} \int_{-x_0/2}^{+x_0/2} \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right)^2 dx \right)^2$$

$$\text{und } W_{bieg} = \frac{E}{2} b \frac{d^3}{12} \int_{-x_0/2}^{+x_0/2} \left( \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \right)^2 dx$$

$$W_{ges} = W_0 \left[ \left( \varepsilon - \frac{1}{2l} \int_{-x_0/2}^{+x_0/2} \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right)^2 dx \right)^2 + \frac{1}{12} \frac{d^2}{l} \int_{-x_0/2}^{+x_0/2} \left( \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \right)^2 dx \right] \quad (2.2)$$

mit  $\varepsilon = \sigma/E = (l - x_0)/l$  und  $W_0 = E l b d / 2$ .

Man erhält folgende Lösungen:

$$s_{2n}(x) = a_{2n} \frac{l}{2} \left[ \cos \frac{2\pi(n+1)x}{x_0} + (-1)^n \right] \quad (2.3)$$

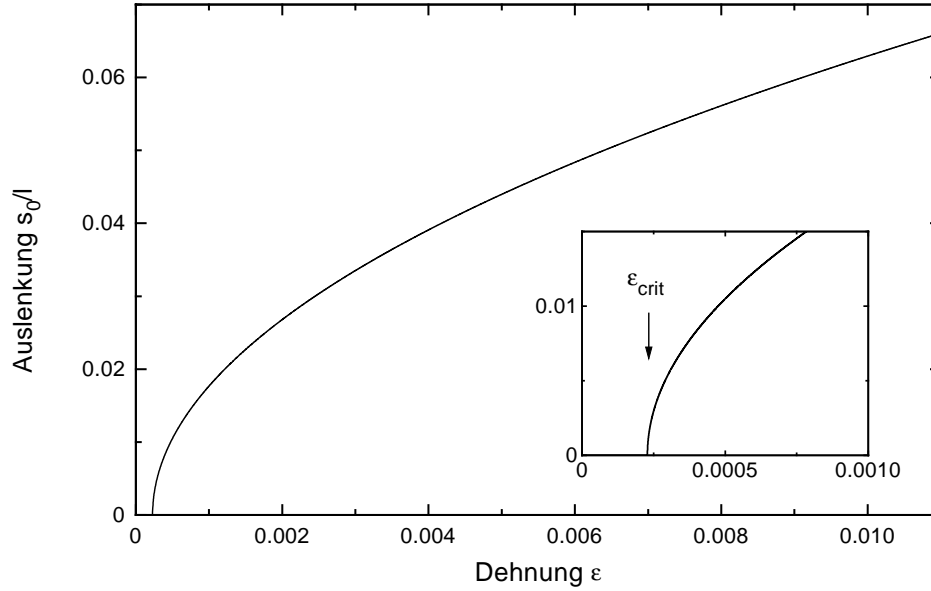
$$s_{2n+1}(x) = a_{2n+1} l \left[ \sin \frac{2\alpha_{2n+1}x}{x_0} - \frac{2x}{x_0} \sin \alpha_{2n+1} \right] \quad (2.4)$$

mit  $n$  als positiver natürlicher Zahl,  $a_i$  als Amplitude und  $\alpha_{2n+1} \approx \tan(\alpha_{2n+1})$ . Ist die Folie nach oben gewölbt, so ergibt sich für die Form der Auslenkung im Grundzustand die Cosinus-Abhängigkeit:

$$s(x) = a_0 \frac{l}{2} (\cos(2\pi x/x_0) + 1) \quad (2.5)$$

Setzt man die Gleichungen 2.3-2.5 in Gleichung 2.2 ein und berechnet des Minimum der Energie, so erhält man folgenden Ausdruck:

$$\pi^2 \left( \varepsilon - \frac{\pi^2 d}{3l} \right) a_0 + \frac{\pi^2}{4} a_0^3 = 0 \quad (2.6)$$



**Abbildung 2.4:** Maximale Auslenkung  $s_0$  normiert auf die Gesamtlänge  $l$  der rechteckigen Folie in Abhängigkeit von der longitudinalen Dehnung  $\epsilon$ .

Die Gesamtenergie ist minimal, wenn  $a_0 = 0$  oder

$$a_0 = \pm \frac{2}{\pi} \sqrt{\epsilon - \frac{\pi^2 d^2}{3l^2}} \quad (2.7)$$

Solange  $\epsilon$  negativ oder kleiner als der Term  $\pi^2 d^2 / 3l^2$  ist, d. h. bei Zugspannung bzw. geringer Druckspannung, ergibt sich für die Energie nur ein Minimum bei  $a_0 = 0$ . Dies ist gleichbedeutend damit, daß die Folie sich nicht auswölbt, sondern in der Ebene liegen bleibt. Wenn jedoch die Dehnung in Längsrichtung aufgrund der Druckspannung größer als der kritische Wert

$$\epsilon_{crit} = \frac{\pi^2 d^2}{3l^2} \quad (2.8)$$

ist, wölbt sich die Folie aus und hat zwei stabile Zustände [30]-[33]. Die maximalen Auslenkungen betragen dann

$$s_0 = \pm a_0 l = \pm l \frac{2}{\pi} \sqrt{\epsilon - \frac{\pi^2 d^2}{3l^2}}. \quad (2.9)$$

Mit  $l = 3 \text{ mm}$ ,  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $E = 2 \text{ GPa}$  und  $\sigma = 7 \text{ MPa}$  ergibt sich die kritische Dehnung  $\epsilon_{crit}$  zu  $\epsilon_{crit} = 2.28 \cdot 10^{-4}$  und die maximale Auslenkung  $s_0$  zu  $s_0 = 109 \mu\text{m}$ .

In Abbildung 2.4 wurde mit den angegebenen Werten die maximale Auslenkung der rechteckigen Folie nach Gleichung 2.9 in Abhängigkeit von der longitudinalen Dehnung  $\varepsilon$  berechnet und auf die Gesamtlänge  $l$  normiert aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist der kritische Wert  $\varepsilon_{crit}$ , bei dem die bistabile Auswölbung einsetzt. Die Ergebnisse zeigen, daß mit Abmessungen von wenigen Millimetern rechteckige Folien einen für den Einsatz in Mikroventilen genügend hohen Hub erzielen können, wenn die kritische Dehnung überschritten wird. Im folgenden sollen mit Finite-Elemente-Simulationen kreisförmige Folien untersucht werden.

### 2.1.3 Finite-Elemente-Simulationen

Die Finite-Elemente (FE)-Methode, d. h. die Methode der endlich großen Elemente, ist ein leistungsfähiges, numerisches Berechnungsverfahren für Problemstellungen der technischen Physik und des Maschinenbaus. Mit diesem Werkzeug kann schon vor der Herstellung nur anhand der Konstruktionszeichnung und der Materialparameter das physikalische Verhalten der Strukturen getestet und v. a. optimiert werden. So können Fertigungskosten eingespart und bei speziellen Designwünschen oder Anforderungen das geeignete Design im Vorfeld bestimmt werden. Parallel zur Prozeßentwicklung eingesetzt, können die numerischen Simulationen im Experiment überprüft werden. Die FE-Methode basiert darauf, daß die zu berechnende Struktur in ein Netz aus geeigneten Elementen aufgeteilt wird, die über Knoten miteinander verknüpft sind. In den einzelnen Elementen werden die zu berechnenden physikalischen Größen durch einfache Funktionen angesetzt. Alle Elementbeiträge und die Randbedingungen werden in einer Systemmatrix zusammengefügt. Die Lösung dieser linearen oder nichtlinearen Gleichungssysteme hoher Ordnung, die mittels leistungsfähiger Rechner bestimmt werden können, stellen die Werte der gesuchten, physikalischen Größen an den Knoten dar. Zunächst soll simuliert werden, ob es theoretisch möglich ist, kreisförmige, bistabile Folien mit Radien von 1 bis 2 mm herzustellen, die einen Ventilhub von rund  $200 \mu\text{m}$  gewährleisten. Dabei soll untersucht werden, ob die Verklebung des Gehäuses mit der Folie benutzt werden kann, um die notwendige Druckspannung in der Folie zu induzieren. Als Gehäusematerial ist Polymethylmethakrylat (PMMA) und als Folienmaterial Polyimid ausgewählt worden. Die Herstellerangaben zum Elastizitätsmodul und für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind in Tabelle 2.1 für beide Materialien aufgelistet.

Die Simulationen sollen die Möglichkeit bieten, Mikroventile optimal auszulegen. Gibt man einen Parameter vor, z. B. Ventildurchmesser, Hub oder Foliendicke, so sollen die

Material	Elastizitätsmodul $E$	Ausdehnungskoeffizient $\alpha$
Polyimid	2-3 GPa	$30 - 60 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
PMMA G77Q11	3.2 GPa	$70 \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Tabelle 2.1: Herstellerangaben zum Elastizitätsmodul und thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

anderen Parameter bestimmt werden, bei denen je nach Anforderung die optimalen Bedingungen herrschen. Außerdem sollen die Simulationen das Öffnungsverhalten der bistabilen Mikroventile näher beschreiben, und z. B. den maximal zulässigen Einlaßdruck, bei dem das Mikroventil noch geschlossen bleibt, berechnen. Die Simulationen sind mit dem FE-Programm ABAQUS, Version 4.9, durchgeführt worden [47]. Um die zu untersuchenden Geometrien zu erstellen bzw. einzulesen, wurde der Pre-Postprozessor FEMGEN bzw. FEMVIEW verwendet. Die Belastungsparameter auf die gewünschten Geometrielemente waren Druck und Temperatur.

Das Gehäuse und die Folie werden bei  $90^\circ\text{C}$  verklebt, da die Glasübergangstemperatur von PMMA  $106^\circ\text{C}$  und die maximale Anwendungstemperatur für Dauerbeanspruchung  $80^\circ\text{C}$  betragen. Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur werden durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten radiale Normalkräfte am Rand der kreisförmigen Folie eingeleitet, da die Komponenten gemäß  $\varepsilon = \alpha\Delta T$  unterschiedlich schrumpfen. Hierdurch entsteht ein Stabilitätsproblem. Die eingeleiteten Normalkräfte bewirken keine Beulung der Folie, solange sie kleiner als die kritische Kraft sind. Bei Überschreitung dieser kritischen Kraft wird die bisher stabile Gleichgewichtslage instabil und die Folie geht in die ausgewölbte stabile Gleichgewichtslage über. Die obere und untere ausgewölbte Gleichgewichtslage sind stabil und energetisch gleichwertig. Aufgrund des bei der Simulation verwendeten absolut symmetrischen Aufbaus wird die Folie in eine instabile Lage versetzt. Keine der beiden ausgewölbten, stabilen Gleichgewichtslagen wird eingenommen, um die Druckspannung durch eine Auslenkung zu minimieren. In der Realität gibt es diesen absolut symmetrischen Aufbau nicht, die instabile Lage wird sich nicht einstellen. Infinitesimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen führen dazu, daß sich bevorzugt eine der stabilen Auswölbungszustände einstellt. In der Simulation werden deswegen zwei Anfangsbedingungen gesetzt, um dieses Problem zu vermeiden. Erstens wird die Polyimidfolie an den Einspannstellen, d. h. an den Stellen, an denen sie mit dem PMMA verklebt wird, in allen drei Freiheitsgraden eingeschränkt. Zweitens wird, um der Polyimidfolie eine gewollte Auslenkungsrichtung zu geben, zu Beginn der Abkühlung ein infinitesimaler Druck in Richtung der gewünschten Auslenkung aufgegeben. Nach der Auswölbung der Folie wird der Druck nach der Abkühlung wieder

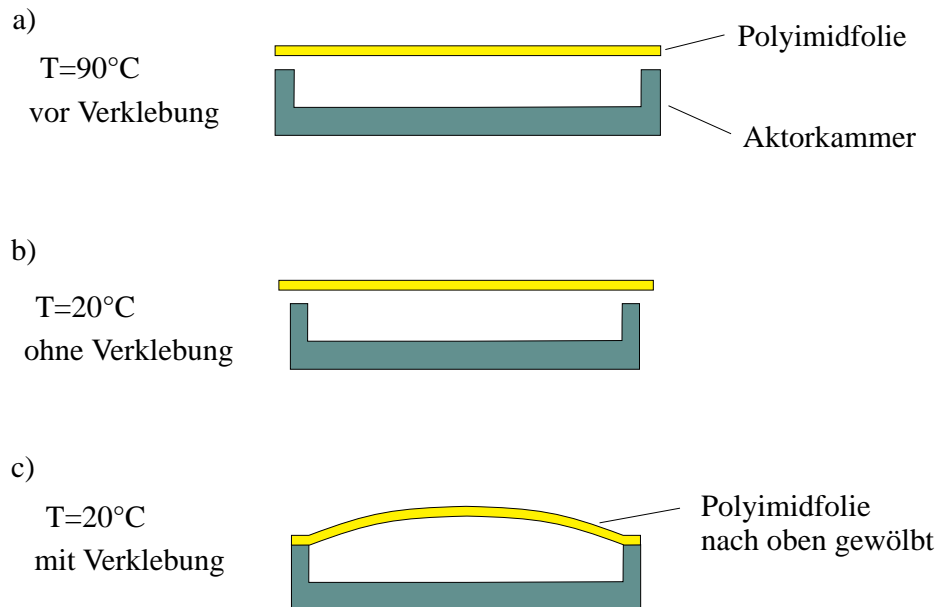
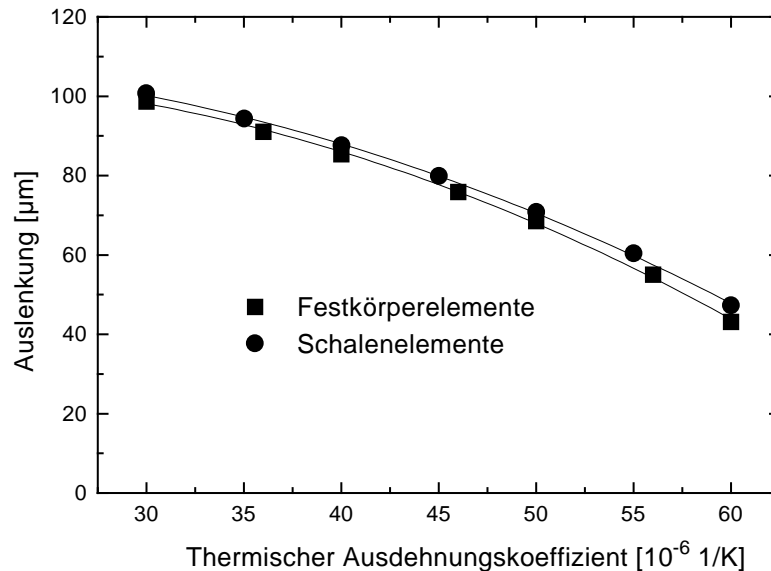


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses.

zurückgenommen. In Abbildung 2.5 ist der Vorgang schematisch skizziert. Bei der Temperatur  $T = 90^{\circ}\text{C}$  besitzen Gehäuse und Folie die gleichen radialen Abmaße (a), nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur ist die Folie länger als die Aktorkammer (b). Werden beide Komponenten miteinander verbunden, so wölbt sich die Polyimidfolie aus (c). Für die Simulationen mußten die geeigneten Elementtypen gefunden werden. Zur Vereinfachung der Rechnung konnte auf axialsymmetrische Elementtypen zurückgegriffen werden. Einerseits wurden Schalenelemente mit 5 Integrationspunkten über der Dicke und 3 Freiheitsgraden ( $u_r, u_z, \varphi$ ) verwendet und andererseits Festkörperelemente mit 9 Integrationspunkten und 2 Freiheitsgraden ( $u_r, u_z$ ). Bei den Schalenelementen wird die Dicke nur einmal am Anfang angegeben und während der gesamten Rechnung beibehalten, bei Festkörperelementen wird die Dicke mit der Definition der Geometrie festgelegt und kann verändert werden. Um die Vorteile der jeweiligen Elementtypen zu bestimmen, mußte für beide eine Vergleichsrechnung durchgeführt werden. Abbildung 2.6 zeigt die ermittelten Auslenkungen nach dem Abkühlvorgang in Abhängigkeit vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Folie für die beiden Elementtypen. Da sich keine großen Unterschiede einstellten, wurde für die Variationen der Foliengeometrie die Schalenelemente wegen der kürzeren Rechenzeit eingesetzt, bei Kontaktproblemen die Festkörperelemente aufgrund der besseren Anschauung. In Abbildung 2.6 ist der Einfluß des thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf die Auslenkung dargestellt, welcher mit der FE-Methode berechnet wurde. In dem vom Hersteller angegebenen Bereich va-



**Abbildung 2.6:** Berechnete Auslenkungen in Abhängigkeit vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Folie [47].

riert die Auslenkung von  $40 \mu m$  bis  $100 \mu m$ . Im folgenden wird mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $30 \cdot 10^{-6} /K$  gerechnet, da dieser Wert den experimentell ermittelten Werten entspricht. Die Variation des Elastizitätsmoduls (2-3 GPa, s. Herstellerangaben) führt zu keinen großen Unterschieden in der Auslenkung.

In Abbildung 2.7 ist die rechnerisch ermittelte, maximale Auswölbung einer kreisförmigen Folie in Abhängigkeit vom Radius für verschiedene, konstante Folienstärken ( $25$ - $40 \mu m$ ) aufgetragen. Die Auslenkungen nehmen mit steigendem Radius zu. Die Rechnung zeigt, daß es möglich ist, bei einem Radius der Folien von  $1.5 mm$  Auslenkungen von  $100 \mu m$  zu erreichen, was einem Hub von  $200 \mu m$  entspricht. Somit werden für Mikroventile beachtliche Hübe erreicht, die vergleichsweise kleine Strömungswiderstände und damit hohe Volumenflüsse ermöglichen. Ebenso kann die Abhängigkeit der Auslenkung im Zentrum der Folie von der Foliendicke für verschiedene Radien ( $0.75$ - $2 mm$ ) berechnet werden (s. Abbildung 2.8). Bei einem Radius von  $1.5 mm$  ergibt sich eine optimale Foliendicke von  $25 \mu m$ , um eine maximale Auslenkung zu erzielen. Analysiert man die anderen Kurven ebenso und trägt die maximalen Auslenkungen bei den jeweiligen optimalen Foliendicken über dem Radius auf, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang (s. Abbildung 2.9):  $w_0 = 0.254 + 65.57 \cdot a$ . Die drei Parameter Foliendicke, -radius und Auslenkung bilden ein dreidimensionales Kennfeld aus, mit dem je nach

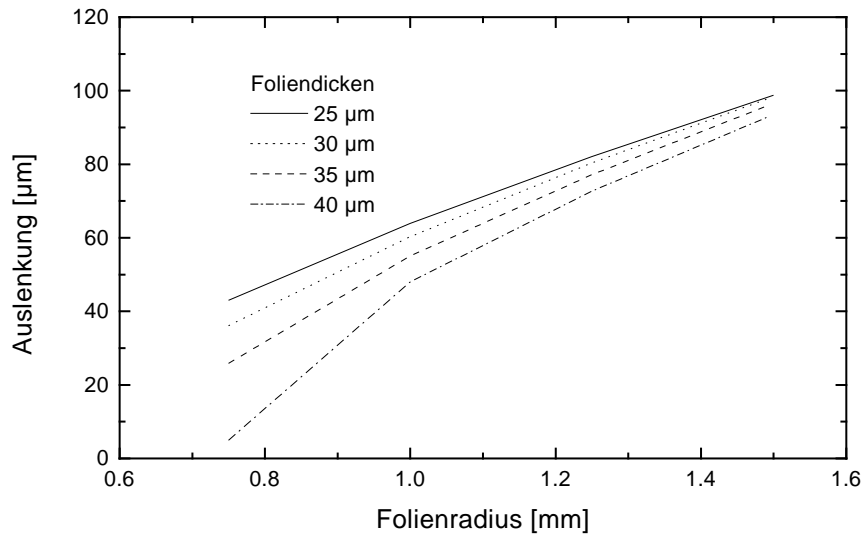


Abbildung 2.7: Maximale Auswölbung einer kreisförmigen Folie in Abhängigkeit vom Radius für verschiedene, konstante Folienstärken (25-40 μm).

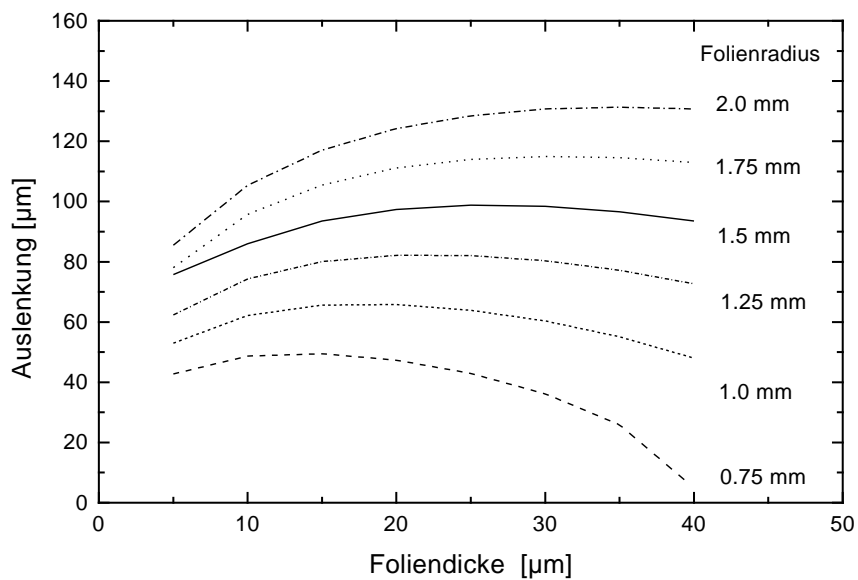


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der Auslenkung im Zentrum der Folie von der Foliendicke für verschiedene Radien (0.75-2 mm).

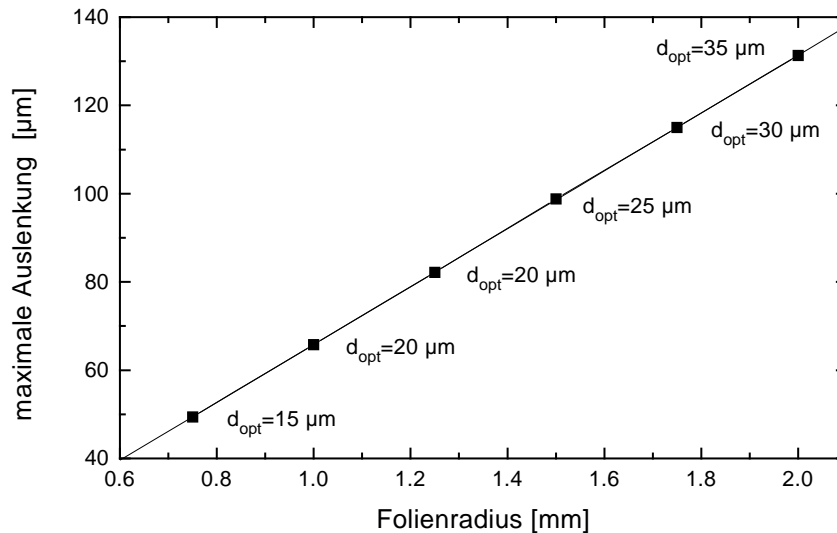


Abbildung 2.9: Die maximalen Auslenkungen bei den jeweiligen optimalen Foliendicken über dem Radius.

den gewünschten Eigenschaften die entsprechenden Parametertripel bestimmt werden können. Somit steht dem Entwickler mit den numerischen Simulationsverfahren ein Werkzeug zur Verfügung, um schnell das optimale Design festzulegen.

Ausgehend von diesen Berechnungen wurde das Öffnungsverhalten einer Folie unter Druckbelastung untersucht, auf die ein Silikonplättchen als Ventilsitz aufgelegt wurde. Dabei wird das Silikonplättchen mit viskoelastischem Materialverhalten in der Abkühlphase beschrieben. Das obere Gehäuseteil, an das die Folie anstößt, wurde als starrer Körper mittels einer Rigid-Surface ausgebildet. Für die Kontaktfläche zwischen oberem Gehäuseteil und Folie mit Silikonplättchen wurden Inter-Elemente verwendet, die auf der Oberfläche des Silikons definiert wurden. Mit einer Dicke des Silikonplättchens von  $60\ \mu\text{m}$ , einem Radius des Einlaßkanals von  $50\ \mu\text{m}$  und einer Kammerhöhe von  $120\ \mu\text{m}$  ergab sich ein Öffnungsdruck von  $0.62\ \text{MPa}$ . Bei diesem Druck verschiebt sich der äußere Kontaktpunkt. Im letzten Schritt wurde noch der Stabilitätsdruck bestimmt. Der Stabilitätsdruck ist der Druck, der bewirkt, daß die Folie umschnappt bzw. das Mikroventil öffnet. In dieser Rechnung wird die ganze Fläche der Folie mit dem Druck beaufschlagt. In Abhängigkeit der Kammerhöhe und der Dicke des Silikonplättchens ergeben sich Stabilitätsdrücke im Bereich 220 bis 270 hPa.



### 2.1.4 Prozeßentwicklung, Herstellung

Um Mikrostrukturen kostengünstig herstellen zu können, bietet sich die Kunststoffabformtechnik an [37]. Mittels dieser Technik ist die für einen industriellen Einsatz unumgängliche Massenproduktion möglich. Die Gehäuse der bistabilen Mikroventile werden in Kunststoff abgeformt. Dazu benötigt man mikromechanisch gefertigte Abformwerkzeuge, sogenannte Formeinsätze. Diese Formeinsätze aus Metall weisen die Negativstruktur der Ventilgehäuse auf. Nach der Abformung werden die Gehäuseteile durch zwei Verklebungen im Nutzen mit der Kunststoffolie verbunden. Anschließend erfolgt die Vereinzelung der bistabilen Mikroventile und ihre fluidische Kontaktierung.

#### Herstellung der Formeinsätze

In die zunächst planparallele, polierte Oberfläche eines Formeinsatzes aus Messing werden an einer CNC-Hochpräzisionsfräsmaschine mit einem  $300\ \mu\text{m}$  dicken Diamant-Fingerfräser Strukturen mit  $120\ \mu\text{m}$  Tiefe gefräst, s. Abb. 2.10 und 2.11. Diese Strukturen bilden später die Berandungen der Aktor- und der Fluidkammer sowie der Klebstoffkammern. Werden die Strukturen im Formeinsatz mit konischen Mikrofräsern (ca.  $5^\circ$ - $10^\circ$  Öffnungswinkel) gefräst, so dienen diese Strukturschrägen als Entformhilfe beim Abformen. Es werden insgesamt zwei Formeinsätze hergestellt, einer für das Gehäuseoberteil, ein zweiter für das Unterteil. Auf jedem Formeinsatz befinden sich die Strukturen für 20 Mikroventilgehäuse, so daß mit einer Abformung ein ganzer Nutzen von 20 Mikroventilen gefertigt wird. Die Öffnungen in den Ventilgehäusen wie Ein- und Auslaß und die Klebstoffzuführungen werden in die Gehäuse integriert. Die Formeinsätze besitzen an diesen Stellen Stifte. Die Stifte für den Einlaß haben einen Durchmesser von  $200\ \mu\text{m}$  und sind  $500\ \mu\text{m}$  hoch. Es gibt zwei Möglichkeiten, diese Stifte herzustellen:

- a) Sie werden separat aus Hartmetall gefertigt und in den Formeinsatz eingesetzt. Dabei werden sie im Formeinsatz verankert, so daß sie beim Abformen weder in den Formeinsatz hineingedrückt, noch beim Entformen herausgezogen werden können. Die Bodenplatte des Formeinsatzes wird deswegen teilbar hergestellt. In Abbildung 2.10 sind eine Detailaufnahme des Formeinsatzes und im Vordergrund die verankerbaren Hartmetallstifte zu sehen. Das hat den Vorteil, daß die Stifte jederzeit ersetzt werden können. Ein Nachteil der Hartmetallstifte ist jedoch, daß sich beim Abformen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Dehnungen zwischen Formeinsatz

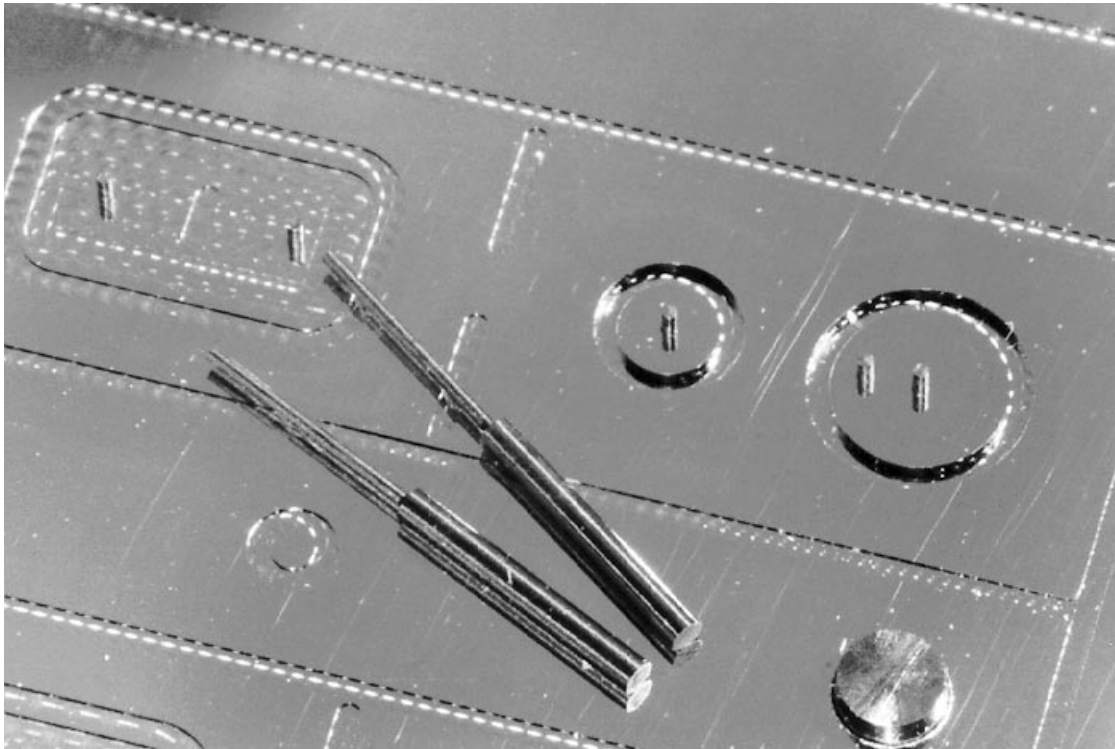


Abbildung 2.10: Detailaufnahme des Formeinsatzes mit den verankerbaren Hartmetallstiften im Vordergrund.

und Stiften ein Grat bilden kann. Die zweite Möglichkeit vermeidet diesen Nachteil.

b) Die Stifte werden in den Formeinsatz aus Messing integriert. Stifte mit diesen kleinen Durchmessern können aus Messing nicht separat hergestellt werden, aber es ist gelungen, sie als zweite Stufe aus dem Formeinsatz zu fräsen. Die Oberfläche der untersten Ebene weist zwar dann Frässpuren auf, doch beträgt die maximale Rauhtiefe weniger als  $2\ \mu\text{m}$ , was für die meisten Anwendungen ausreicht. Die Stifte mit nur  $200\ \mu\text{m}$  Durchmesser und  $500\ \mu\text{m}$  Höhe halten beim Abformen Einspritzdrücken von über 800 bar stand. Abbildung 2.11 zeigt den mikromechanisch gefertigten Formeinsatz mit den integrierten Stiften.

### Abformung

Es sind zwei Abform-Verfahren verwendet worden, die vergleichbare Resultate lieferten. Erstens die Warmumformung-Prägetechnik in PMMA und zweitens die Spritzgußtech-

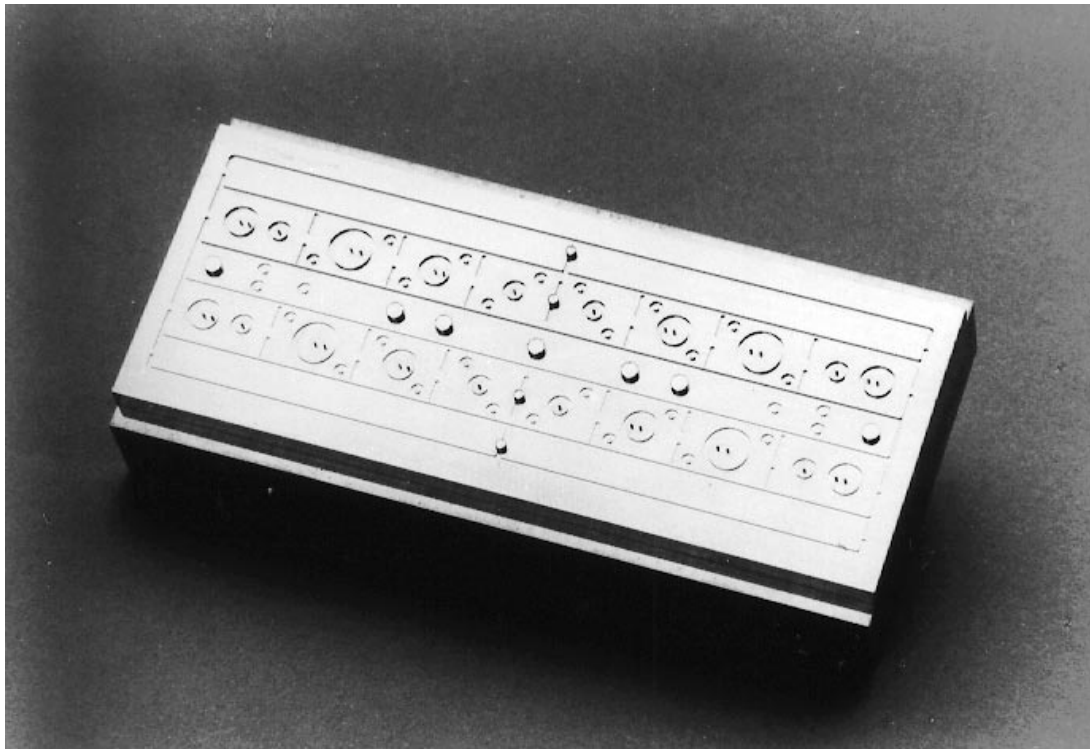


Abbildung 2.11: Mikromechanisch gefertigter Formeinsatz.

nik in PMMA und Polysulfon (PSU). Einen guten Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Kunststoffverarbeitung und die Eigenschaften der verwendeten Kunststoffe findet sich in [37]. Beim Prägeverfahren wird das Halbzeug aus dem thermoplastischen Kunststoff bis in den weichelastischen Zustand erwärmt, unter geringer Kraft verformt, so daß die Strukturen im Formeinsatz mit dem Kunststoff gefüllt werden. Anschließend wird bei anhaltender Verformkraft unter den Glaserweichungspunkt abgekühlt. Beim Spritzguß wird die bis zum plastischen Zustand erhitzte Formmasse aus der Förderschnecke rasch in den geschlossenen gekühlten Formeinsatz gespritzt. Das Formteil, in diesem Fall das Mikroventilgehäuse, erstarrt unter gesteuertem Nachdruck. Dadurch wird die Schrumpfung des erkaltenden Formteiles kompensiert, da plastische Masse nachgeliefert wird. Nach der Abkühlung und Erstarrung wird das Formteil aus dem Formeinsatz ausgeworfen. Die ganze Fertigung erfolgt automatisch und die Zykluszeit beträgt rund 8 Minuten.

Die mit Spritzguß abgeformten Mikroventilgehäuse weisen auf ihrer Rückseite eine Auswerferstruktur, die sog. Sohle oder Kammstruktur auf, die in einem sich anschließenden Frässhritt (Grob- und Ultrafeinfräsen) entfernt wird. Dabei werden auch die Öffnungen in den Mikroventilgehäusen für den Ein- und Auslaß usw. freigelegt.

### Fügeprozeß (Kammerklebetechnik)

Eine Aufgabe dieser Arbeit war es, experimentell zu zeigen, daß Folien mit entsprechend kleinen Abmessungen hergestellt werden können, die zwei stabile Zustände einnehmen. Dazu mußten geeignete Herstellungsprozesse entwickelt werden, die die abgeformten Mikroventilgehäuse mit der Folie verbinden und gleichzeitig die Bistabilität der Folie erzeugen.

Die Bistabilität wird dadurch erreicht, daß man die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Folie bzw. der Gehäuseteile ausnutzt und geeignete Geometrien wählt. Wie schon aus den Simulationen (s. Abschnitt 2.1.3) bekannt ist, können sie zur Erzeugung einer Auswölbung einer Folie benutzt werden. Die verwendete Folie besteht aus gewalztem Polyimid und ist kommerziell erhältlich. Für eine Folie aus Polyimid beträgt der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha = 30 \cdot 10^{-6} / \text{K}$  und für die Mikroventilgehäuse aus PMMA  $70 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ . Bei einer Erwärmung von Folie und Gehäuse um  $70^\circ\text{C}$ , Verklebung im warmen Zustand und anschließender Abkühlung wird eine Druckspannung induziert. Diese Druckspannung bewirkt bei einer  $25 \mu\text{m}$  dicken Polyimidfolie eine maximale Auswölbung der Folie um  $100 \mu\text{m}$ , so daß der Hub des bistabilen Mikroventils  $200 \mu\text{m}$  beträgt (s. Abschnitt 2.1.3 und 2.3.1).

Die geeignete Klebetechnik, um die Gehäuseteile mit der Polyimidfolie zu verbinden, muß daher folgende Anforderungen erfüllen:

1. Der Klebeprozess muß dem oben genannten Temperaturgang folgen, um die Bistabilität der Folie zu erreichen.
2. Der Justieraufwand beim Klebstoffauftrag soll für eine einfache Fertigung möglichst klein sein.
3. Die Verklebung soll für eine Fertigung in großen Stückzahlen geeignet sein.
4. Der Ort des Klebstoffes soll wohldefiniert sein, damit die Folie im aktiven Bereich frei beweglich bleibt und ihre Auswölbung nicht durch Klebenuten am Rand behindert wird.
5. Die Schichtdicke des Klebstoffes soll genau eingestellt sein, was gleichzeitig bedeutet, daß die Schrumpfung des Klebstoffes beim Aushärten klein sein soll, um immer die gleiche Spannung in der Folie zu induzieren.

Bei den herkömmlichen Techniken wird zunächst der Klebstoff durch Dispensen, Siebdruck oder Stempeln auf die zu klebenden Teile aufgetragen und dann werden diese

Teile zueinander justiert. Dabei ist der Justieraufwand beim Klebstoffauftrag hoch und die Gefahr groß, daß Klebstoff in Bereiche gelangt, die klebstofffrei bleiben sollen. Verschiedene Klebetechniken, die speziell entwickelt wurden, um Mikrokomponenten zu verkleben, sind in [39, 40] beschrieben. Allen gemeinsam ist das Prinzip, daß die Komponenten erst zueinander justiert und dann verklebt werden. Die Fertigung wird dadurch einfacher und sicherer.

Zur Herstellung bistabiler Mikroventile ist die Kammerklebetechnik ausgewählt worden (s. Abschnitt 2.1.1), sie erfüllt die oben genannten Anforderungen. Diese Kammerklebetechnik wurde auch schon zur Herstellung der Mikropumpen erfolgreich eingesetzt [38] und für die Verklebung von Mikroventilen entsprechend erweitert. Es besteht kein Justieraufwand beim Klebstoffauftrag mehr. Die Aktor- und Fluidkammer werden von einem Rand oder Steg umgeben, an den sich ein Hohlraum anschließt, der mit Klebstoff befüllt wird. In diesen Klebstoffkammern sind spezielle Strukturen zur blasenfreien Befüllung und ein Auslaß für den überschüssigen Klebstoff vorgesehen. Durch die Klebstoffkammer wird der Ort und die Dicke des Klebstoffes genau vorgegeben. Die Schrumpfung des Klebstoffes wird dadurch ausgeglichen, daß beim Aushärten ständig Klebstoff nachgeliefert wird. Werden die einzelnen Klebstoffkammern der Mikroventile miteinander zu einem Nutzen verbunden, so wird durch einmalige Klebstoffzufuhr gleich der gesamte Nutzen mit der Folie verklebt. Dadurch wird die Produktion großer Stückzahlen gewährleistet. Um den geforderten Temperaturgang zu erfüllen, wird ein warmaushärtender Klebstoff ausgewählt, der bei 90°C aushärtet. Es ist ein zweikomponentiger Epoxidharz-Klebstoff, der niederviskos ist und über eine gute Benetzung von Polymeroberflächen verfügt. Damit wird ein rascher Klebstofffluß durch alle Klebstoffkammern gesichert. Um zu verhindern, daß der Klebstoff unter die Kammerränder kriecht, ist es notwendig, die zu verbindenden Teile bei der Verklebung miteinander zu verpressen. Je kleiner der Spalt zwischen den Fügepartnern ist, um so langsamer kriecht der Klebstoff.

Abbildung 2.12 zeigt die verwendete Verklebeapparatur. Auf die kreisförmige Heizplatte in der Mitte wird die Folie aufgelegt und auf 90°C erwärmt. An dem im Bild senkrecht nach oben geklappten Deckel der Verklebeapparatur wird das Mikroventilgehäuse befestigt. Wird der Deckel geschlossen, so wird ein Anpreßdruck von 200 N eingestellt und die Mikroventilgehäuse werden auch auf 90°C erwärmt. Hat sich das thermische Gleichgewicht eingestellt, dann wird über die Klebstoffzuführungen Klebstoff in die Klebstoffkammern injiziert. Die Aushärtung erfolgt bei 90°C und dauert 15 Minuten. Die Klebstoffkammern der einzelnen Mikroventilgehäuse eines Nutzens sind miteinander verbunden, so daß pro Verklebung 20 Mikroventilgehäuse gleichzeitig mit



Abbildung 2.12: Verklebeapparatur.

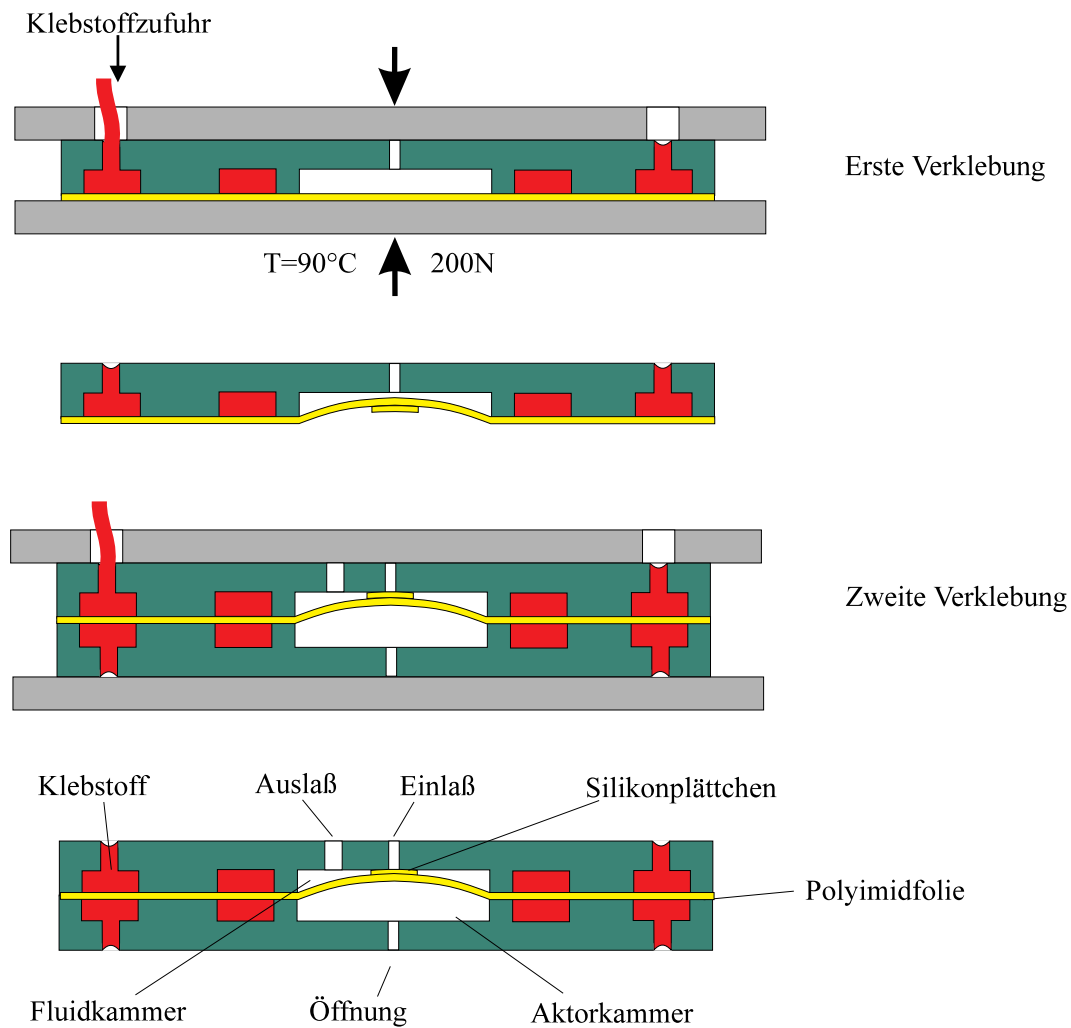


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Herstellung eines bistabilen Mikroventils.

der Folie verklebt werden. In Abbildung 2.13 ist die Herstellung exemplarisch für ein bistabiles Mikroventil dargestellt. In einer ersten Verklebung werden die Aktorkammern mit der Folie verbunden. Nach dem Aushärten des Klebstoffes und der Abkühlung des ganzen Verbundes wölbt sich die Folie.

Auf die ausgewölbte Folie wird ein dünnes ( $20\text{-}60\ \mu\text{m}$ ) Silikonplättchen als Dichtung angebracht. Das Silikon wird aus zwei Komponenten - Binder und Härter - angerührt, dann wird das Gemisch im Vakuumofen von möglichen Lufteinschlüssen befreit, anschließend wird es verpreßt, so daß durch einen voreingestellten Abstand Schichten unterschiedlich einstellbarer Dicke hergestellt werden können. Aus diesen dünnen Schichten lassen sich die Silikonplättchen leicht ausstanzen. Das Silikon hat sich als Material bewährt, da es elastisch ist, Unebenheiten ausgleichen und sich so optimal beiden Be-

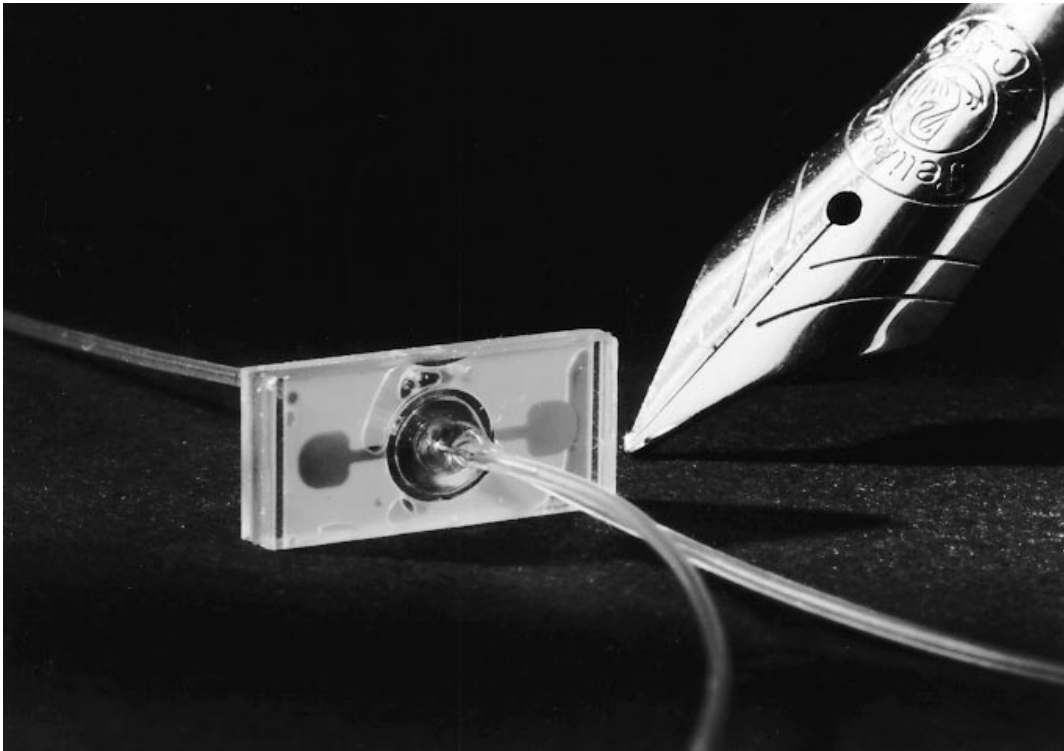


Abbildung 2.14: Komplettes Mikroventil im Größenvergleich mit einer Füllfeder.

grenzungsflächen anpassen kann. Außerdem verfügt es über den großen Vorteil, daß es sehr stark an der Polyimidoberfläche haftet. Diese starke Adhäsion erlaubt es, auf eine Verklebung zwischen Polyimid und Silikon zu verzichten. Weiterhin ist Silikon aufspinnbar, so daß es auch direkt auf die Polyimidoberfläche aufgetragen werden kann.

Für den zweiten Verklebevorgang wird der Verbund umgedreht und dann in einer zur ersten justierten Verklebung mit den Fluidkammern zusammengefügt. Die Justierung erfolgt mittels in den Gehäuseteilen und der Folie angebrachter Justiermarken. Die Parameter der zweiten Verklebung sind analog zu denen der ersten Verklebung gewählt. Nach dem Aushärten und der Abkühlung steht ein ganzer Nutzen von 20 bistabilen Mikroventilen zur Verfügung. Dieser Nutzen kann anschließend durch mehrere Trennschnitte durch die Klebstoffkammern vereinzelt werden. Die fluidische Kontaktierung kann wahlweise im Nutzen oder an den vereinzelt Mikroventilen vorgenommen werden. Dabei werden z. T. Schläuche mit einem Innendurchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  und einem Außendurchmesser von  $200\ \mu\text{m}$  verwendet. Um die Schläuche in die Öffnungen der Gehäuseteile zu kleben, ist ein lichthärtender Klebstoff verwendet worden. Er ist klar durchsichtig, niederviskos und wird sonst v. a. in der Zahnmedizin, der allgemeinen Medizintechnik und der Optronik eingesetzt. Dieser Klebstoff härtet bei Blaulicht



(450-550 nm) in wenigen Sekunden (Kriechstopp nach 2 s) aus. Dadurch kann die Klebstofffront beim Erreichen der Strukturränder des Gehäuses durch die Lichtbestrahlung gestoppt und somit gezielt positioniert werden. Das komplette bistabile Mikroventil ist in Abbildung 2.14 wiedergegeben. Im Vordergrund sind der Ein- und Auslaß zu sehen, im Hintergrund der Anschluß für die Aktorkammerseite. Als Größenvergleich wurde eine Füllfeder gewählt.

## 2.2 Elektro-thermo-pneumatisch angesteuertes bistabiles Mikroventil

### 2.2.1 Schichtaufbau und Funktionsprinzip

Der elektro-thermo-pneumatische Antrieb wurde ausgewählt, um das Mikroventil integriert anzusteuern. Er wird dadurch charakterisiert, daß eine elektrische Ansteuerung über eine Wärmekopplung die Pneumatik regelt, die das Mikroventil schaltet. Das Wirkungsprinzip ist im folgenden kurz erklärt: ein stromdurchflossener Leiter erwärmt das ihn umgebende Medium, was in einer abgeschlossenen Kammer zu einem Druckanstieg führt, der als Schaltdruck verwendet werden kann. So wird effektiv Wärme und Druck bzw. Kraft gekoppelt. Dieses Aktorprinzip wird auch bei Mikropumpen [38] und 'normally-open' Mikroventilen [12, 41, 42] erfolgreich eingesetzt. Doch ist es bei dieser Art von Mikroventilen nachteilig, daß ständig Energie zugeführt werden muß, um das Mikroventil in seiner Position zu halten. Dadurch wird erstens das ganze Mikroventil unnötig aufgeheizt und zweitens kommt es zu einer Erwärmung des zu steuernden Mediums, was in den meisten Fällen unerwünscht ist. Wird jedoch das elektro-thermo-pneumatische Antriebsprinzip mit dem bistabilen Aktorprinzip gekoppelt, so erhält man ein quasi leistungsloses Mikroventil und vermeidet unnötiges Erwärmen.

Um dieses Aktorprinzip einzusetzen, muß der Aufbau des pneumatischen Mikroventils erweitert werden. Im Vergleich zum Aufbau des pneumatischen Mikroventils weist das elektro-thermo-pneumatische Mikroventil eine weitere Funktionsebene auf. Eine Explosionsansicht ist in Abbildung 2.15 zu sehen. Gemeinsam ist beiden Mikroventiltypen das obere und untere Gehäuse mit der bistabilen Folie dazwischen. Die oberen und unteren Gehäuseteile bestehen aus Klebstoffkammern um die Fluid- bzw. Aktorkammern. Die Fluidkammern sind mit Öffnungen für Ein-, Auslaß und die Klebstoffzuführung versehen. In der Aktorkammer befindet sich ein Kanal, dessen Funktion bei der Beschreibung des Schaltmechanismus genau erläutert wird. Die neue Funktionsebene besteht aus einer Zwischenebene mit einer kreisförmigen Aussparung über der Fluid- bzw. Ak-

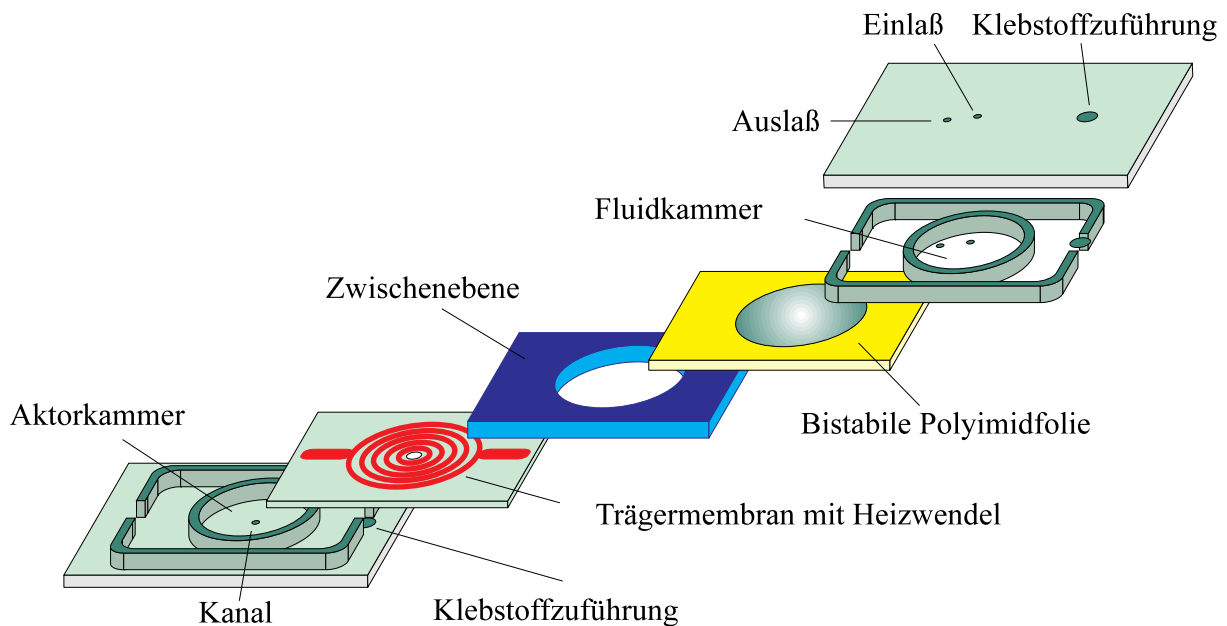
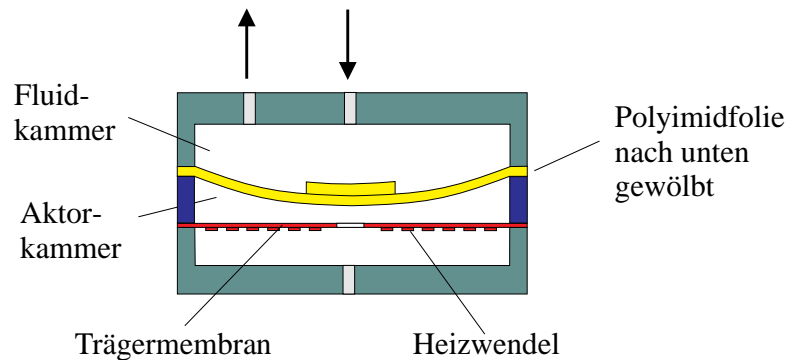


Abbildung 2.15: Explosionsansicht des elektro-thermo-pneumatischen Mikroventils.

torkammer und einer dünnen Trägermembran für eine Heizwendel. Die Heizwendel als stromdurchflossener Leiter kann so das Medium in der Aktorkammer erwärmen. Eine schematische, nicht maßstabsgetreue Querschnittszeichnung für die beiden Zustände des Mikroventils „offen“ und „zu“ ist in Abbildung 2.16 dargestellt.

Zur Erklärung des Funktionsprinzips soll im folgenden davon ausgegangen werden, daß das bistabile Mikroventil geöffnet ist, d. h. die bistabile Polyimidfolie in Abbildung 2.16 a ist nach unten gewölbt. Das Medium in der Aktorkammer ist Luft, der Kanal in der Aktorkammer stellt die Verbindung zur Umgebung her. Die stromdurchflossene Heizwendel ermöglicht es, die Luft in der Aktorkammer gesteuert zu erwärmen. Die Erwärmung erfolgt über eine regelbare Elektronik, deren Funktion in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wird. Die Heizwendel befindet sich auf einer Trägermembran mit einer Öffnung in der Mitte, die für den Druckausgleich innerhalb der Aktorkammer sorgt. Um das Mikroventil zu schließen, d. h. die Polyimidfolie in den zweiten stabilen Zustand zu überführen, ist ein Überdruck in der Aktorkammer erforderlich. Wird nun die Luft in der Aktorkammer schnell erhitzt, so steigt der Druck schnell an. Da aber der Strömungswiderstand des Kanals so dimensioniert ist, daß die Luft nur langsam im Vergleich zum Schaltvorgang entweichen kann, baut sich ein Überdruck in der Aktorkammer auf. Die bistabile Folie schnappt nach oben, das Mikroventil ist geschlossen (s. Abb. 2.16 b). Zum Öffnen des Mikroventils ist ein Unterdruck nötig. Dieser Unterdruck wird ebenfalls durch Erwärmung der Luft in der Aktorkammer erreicht. Die Luft in

a) 1. stabiler Zustand: Mikroventil geöffnet



b) 2. stabiler Zustand: Mikroventil geschlossen

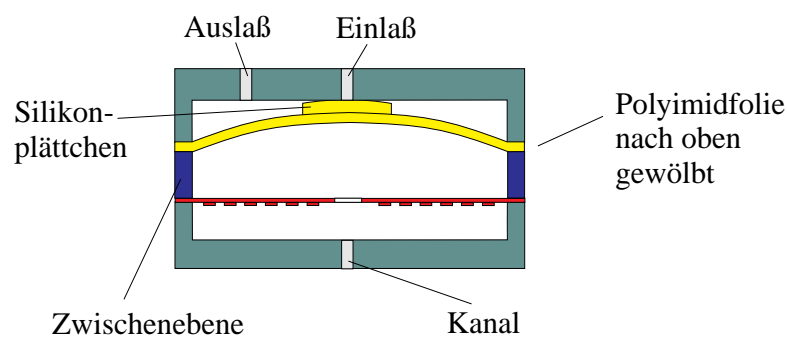


Abbildung 2.16: Querschnittsskizze des elektro-thermo-pneumatischen Mikroventils in den beiden stabilen Zuständen.

der Aktorkammer wird so langsam erwärmt, daß ein Druckausgleich durch den Kanal stattfinden kann. Wird nun die Heizung abgeschaltet, sinkt der Druck in der Aktorkammer und die Folie schaltet in die andere Gleichgewichtslage, bevor sich der Druck wieder ausgleichen kann. Das Mikroventil ist offen (s. Abb. 2.16 a). Voraussetzung für das Schalten ist, daß die Luft wegen des hohen Strömungswiderstandes des Kanals nicht schnell genug nachströmen kann.

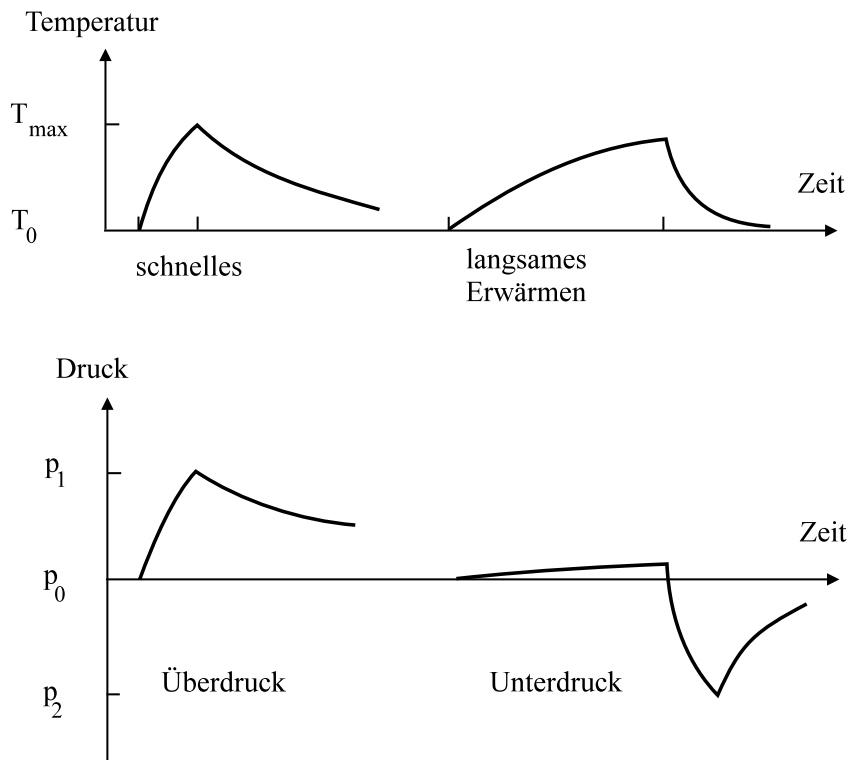


Abbildung 2.17: Temperatur- und Druckverhältnisse in der Aktorkammer als Funktion der Zeit.

### Schaltmechanismus

In Abbildung 2.17 sind die Temperatur- und Druckverhältnisse in der Aktorkammer als Funktion der Zeit aufgetragen. Links sind die Verhältnisse beim Schließen, rechts beim Öffnen des Mikroventils dargestellt. Schnelles Erwärmen führt zu einem Überdruck, langsames Erwärmen und anschließendes Abkühlen führt zu einem Unterdruck. Das Mikroventil sei geöffnet, die bistabile Polyimidfolie nimmt den ersten stabilen Zustand ein. Unter der Annahme, daß die Polyimidfolie so lange in ihrem stabilen Zustand bleibt, d. h. das Aktorkammervolumen konstant bleibt, bis der erforderliche Schaltdruck aufgebaut ist, berechnet sich die zum Schließen des Mikroventils nötige Temperaturerhöhung in der Aktorkammer mit der idealen Gasgleichung [44]. Das Verhältnis der Drücke in den beiden Zuständen ist gleich dem Verhältnis der Temperaturen.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Bei einer zum Schalten des Mikroventils benötigten Druckdifferenz von 250 hPa (s. Abschnitt 2.3.4) ergibt sich ausgehend von Raumtemperatur eine notwendige Temperaturerhöhung um rund 70 K.

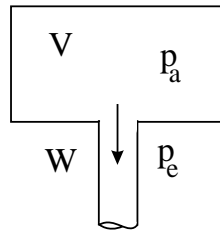


Abbildung 2.18: Definition der Bezeichnungen in der Aktorkammer.

Damit läßt sich die Energie, die zugeführt werden muß, berechnen zu [45]:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = 64 \mu\text{J}$$

$Q$	Wärmemenge
$c$	spez. Wärmekapazität des zu erwärmenden Stoffes, $c_v^{\text{Luft}} = 0,717 \text{ kJ}/(\text{kgK})$
$m$	Masse des Körpers, $m = \rho \cdot V = 1.276 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$
$\rho$	Dichte, $\rho = 1.204 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Luft, 1013 hPa, 20°C)
$V$	Aktorkammervolumen, $V = 1.06 \text{ mm}^3$
$\Delta T$	Temperaturdifferenz, die mit der Wärmemenge $Q$ erzeugt wird

Die thermische Relaxationszeit für den Aufbau des Überdruckes beträgt rund 2 ms [46]. Der zum Öffnen des Mikroventils notwendige Unterdruck stellt sich dann ein, wenn das System nach dem Abschalten der Heizung schneller abkühlt, als sich der Druckausgleich einstellen kann, d. h. die thermische Relaxationszeit des Systems muß kleiner als die pneumatische sein. Die thermische Relaxationszeit ergab sich aus Simulationen des Wärmestromes zu 10-30 ms [46]. Ein dünneres Gehäuse verbessert die Wärmeabfuhr, was zu einer besseren Kühlung führt. Ausgehend von einer Temperatur in der Aktorkammer von  $T = 363 \text{ K}$  und Normaldruck, ergibt sich bei einer Abkühlung um 70 K ein Unterdruck von 195 hPa in der Aktorkammer, wenn das Volumen konstant bleibt. Die pneumatische Relaxationszeit läßt sich analytisch berechnen. Unter der Annahme, daß die Temperatur des Systems konstant bleibt, ist der Massenstrom der Anordnung (zur Definition der verwendeten Bezeichnungen, s. Abb. 2.18) gegeben durch die Druckdifferenz und den Strömungswiderstand des Kanals

$$\frac{dm}{dt} = \frac{p_e(t) - p_a(t)}{W}$$

und es gilt das Gasgesetz

$$p_a V = m R_L T.$$

$V$	Aktorkammervolumen $V = V_2$ ( $V_2$ s.u.)
$W$	Strömungswiderstand
$p$	Druck
$T$	Temperatur
$R_L$	Gaskonstante, $R_L = 286 \text{ J}/(\text{kgK})$ für Luft

Es ergibt sich folgende Differentialgleichung

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{V}{R_L \cdot T} \frac{dp_a(t)}{dt} = \frac{p_\varepsilon(t) - p_a(t)}{W}$$

Die pneumatische Relaxationszeitkonstante der Anordnung ist somit:

$$\tau_1 = \frac{VW}{R_L T}$$

Eine größere Aktorkammer bewirkt eine längere Zeitkonstante. Gibt man die Zeitkonstante vor, so läßt sich der nötige Strömungswiderstand des Kanals berechnen. Mit  $\tau_1 = 30 \text{ ms}$ ,  $T = 293 \text{ K}$ ,  $V = V_2 = 1.764 \text{ mm}^3$  erhält man  $W = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ Pa s/kg}$ . In die Aktorkammern der Mikroventile werden Glaskapillaren als Strömungswiderstände eingeklebt. Es gelang Glaskapillaren herzustellen, die über eine Länge von mehreren cm einen Innendurchmesser von nur  $8 \mu\text{m}$  haben. Bei 1 cm Länge besitzen diese Kapillaren einen Strömungswiderstand von [48]

$$W = \frac{\Delta p}{\dot{V}_N \cdot \rho} = \frac{128\eta l}{\pi d_i^4 \rho} = 1.66 \cdot 10^{15} \frac{\text{Pa s}}{\text{kg}} \quad (l \gg d_i)$$

$$l = 1 \text{ cm}$$

$$d_i = 8 \mu\text{m}$$

$$\eta = 16.5 \mu\text{Pa}$$

$$\rho = 0.99 \text{ kg/m}^3$$

Der Strömungswiderstand der Kapillaren ist also gemäß dieser Abschätzung um drei Größenordnungen höher. Um die Volumenänderung der Aktorkammer beim Schalten zu bestimmen, wird folgende Abschätzung gemacht. Das Aktorvolumen setzt sich aus einer zylindrischen Kammer und einem Kugelabschnitt zusammen. Der Kugelabschnitt ist näherungsweise das Volumen, das durch die kreisförmige Folie begrenzt wird.  $V_1$  sei das Volumen im offenen Zustand (s. Abb. 2.16 a) und  $V_2$  das Volumen im geschlossenen Zustand (s. Abb. 2.16 b). Es gilt [43]:

$$V_1 = \pi\phi^2/4h - \pi s_0(\phi^2/8 + s_0^2/6)$$

$$V_2 = \pi\phi^2/4h + \pi s_0(\phi^2/8 + s_0^2/6)$$

Die Volumenänderung entspricht dem doppelten Kugelabschnittsvolumen. Mit den angegebenen Werten: Aktor- und Fluidkammerinnendurchmesser  $\phi = 3 \text{ mm}$ , Aktorkammerhöhe  $h = 200 \mu\text{m}$ , maximale Auslenkung der Folie  $s_0 = 100 \mu\text{m}$ , ergibt sich für  $V_1 = 1.06 \text{ mm}^3$  und für  $V_2 = 1.76 \text{ mm}^3$ , also eine Volumenänderung von rund  $0.7 \text{ mm}^3$ , die beim Schalten des Mikroventils auftritt.

## 2.2.2 Herstellung

Nachdem im vorigen Abschnitt die Funktion und der prinzipielle Aufbau der elektrothermo-pneumatischen Mikroventile erläutert worden sind, geht es in diesem Abschnitt um deren Herstellung. Als erstes wird die Herstellung der quasi-freitragenden Heizwendel dargestellt, anschließend folgt die Beschreibung des Fügeprozesses für das gesamte Mikroventil.

### Quasi-freitragende Heizwendel

Die Wärmeleistung der Heizwendel soll gleichmäßig in der gesamten Aktorkammer wirken. Für diese Anforderung wäre eine frei in der Aktorkammer aufgehängte Heizwendel ideal. Heizwendeln, die sich selbst tragen und formstabil sind, sind selbst in Mäanderform und aus Nickel mehrere  $\mu\text{m}$  dick [46]. Das hat den Nachteil, daß der Heizwendelwiderstand zu klein ist, um die geforderte Wärmeleistung zu erzielen. Hierzu braucht man höhere Widerstände ( $> 40 \Omega$ ). Heizwendeln aus Gold, die diese Widerstände erreichen, sind für die geforderten Abmessungen wenige nm dick. Bei einem Durchmesser der Aktorkammer von 3 mm, ergibt sich für die Leiterbahndicke 130 nm. Deshalb wird hier vorgeschlagen, die dünne Gold-Heizwendel auf einer Trägermembran anzubringen und durch geeignete Öffnungen in der Trägermembran einen Druckausgleich in der Aktorkammer zu gewährleisten. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an die Trägermembran:

- Sie muß möglichst dünn sein, um eine kleine Wärmekapazität zu besitzen,
- sie muß strukturierbar sein, um die Öffnungen herzustellen,
- und sie muß in geeigneter Weise mit dem Gehäuse verbunden werden können.

Alle diese Anforderungen erfüllt ein Negativ-Photolack, Probimide XU408. Dieser Polyimidlack kann im Dickenbereich  $0.5\text{-}5 \mu\text{m}$  aufgetragen werden und ist photostrukturierbar. Außerdem existiert eine spezielle Abhebetechnik, die es ermöglicht, die Membran mit dem Gehäuse in Kammerklebtechnik zu verbinden. Der Herstellungsprozeß läuft folgendermaßen ab. Zuerst wird auf einen Silizium-Wafer eine dünne Goldschicht (60 nm) aufgedampft. Ein schmaler Streifen ( $\simeq 5 \text{ mm}$ ) am Rand des Wafers wird dabei abgedeckt. Dadurch erhält man Gebiete unterschiedlich starker Haftung. Ohne Goldschicht haftet die folgende Polyimidschicht gut auf der Unterlage, mit Gold dagegen nur gering. Diese geringe Haftung zum Substrat wird ausgenutzt, um die Membran vom

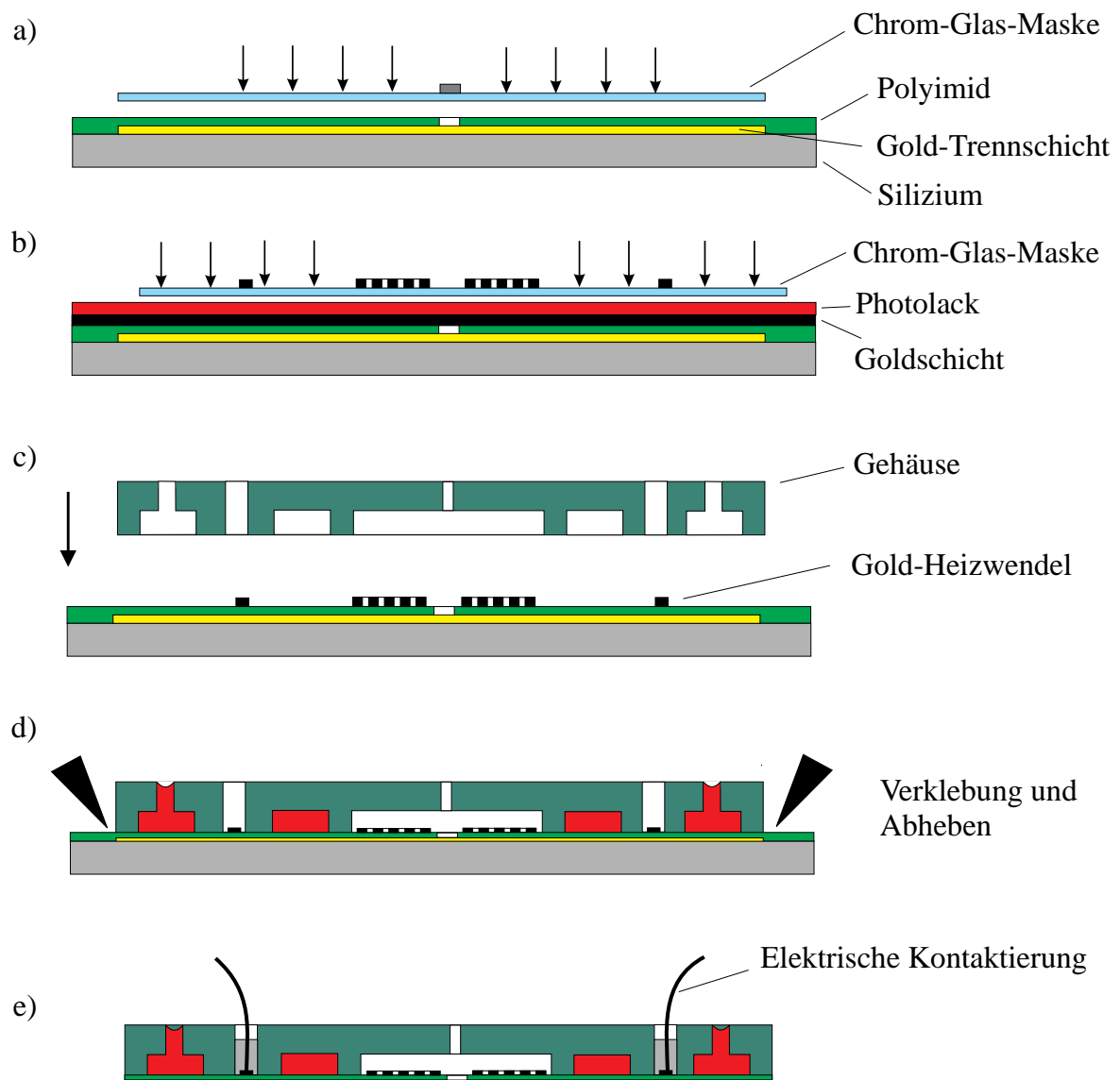


Abbildung 2.19: Herstellungsprozeß der quasi-freitragenden Heizwendel.



Silizium-Wafer zu trennen. Die Goldschicht wird deshalb auch als Trennschicht bezeichnet. Durch diese Übertragungstechnik werden erfolgreich Sticking-Effekte, wie sie vor allem bei Naß-Ätz-Techniken auftreten, vermieden. Auf diese dünne Goldschicht wird der Polyimidlack aufgeschleudert und bei 110°C getrocknet (Prebake). Danach folgt die photolithographische Strukturierung mittels einer Chrom-Glas-Maske (s. Abb.2.19 a). Die mit UV-Strahlung belichteten Molekülketten des Negativlacks (XU408) vernetzen sich, die unbelichteten Stellen können mit einem speziellen Entwickler herausgelöst werden. Nach dem folgenden Hardbake des Polyimids bei 400°C beträgt die Polyimid-schichtdicke 1  $\mu\text{m}$ . Auf die strukturierte Polyimidschicht wird die zweite Goldschicht (< 200 nm, je nach Design) aufgedampft und als Heizwendel strukturiert [70]-[73]. Dazu wird die ganze Fläche zunächst mit einem Positiv-Photolack (AZ4210) bedeckt (s. Abb. 2.19 b). In diesen Lack werden die Heizwendelstrukturen durch optische Lithographie (s. o.) übertragen, so daß bei der nachfolgenden Ätzung der Goldschicht mit einer Kaliumjodid/Jod-Lösung (200 g/l KaJ + 100 g/l Jod, Neutralisation mit Natriumthio-sulfat) nur die durch den Photolack geschützten Heizwendelstrukturen übrigbleiben (s. Abb.2.19 c). Die Reste des Photolacks werden anschließend mit Kaliumhydroxid entfernt, d. h. gestrippt. Haftungsprobleme von aufgedampftem Gold auf Polyimid können mit einer zusätzlichen Zwischenschicht Chrom beseitigt werden. Diese Zwischenschicht muß nur wenige nm dick sein (10 nm) und läßt sich bei der naßchemischen Strukturierung des Goldes ebenfalls ätzen. Desweiteren weisen auch gesputterte Goldschichten eine gute Haftung zum Polyimid auf. Die strukturierte Goldschicht wird bei 400°C eine Stunde lang getempert, um den Widerstandswert der Heizwendel zu stabilisieren. Es hatte sich gezeigt, daß ungetemperte Schichten während des späteren Betriebs thermisch altern und ihr Widerstand abnimmt (s. Abschnitt 2.2.3). Mit Formeinsätzen, die analog zu denen für die pneumatischen Mikroventile hergestellt worden sind, werden die Gehäuseteile in PMMA oder PSU abgeformt (s. Abschnitt 2.1.4). Die unteren Gehäuseteile werden in Kammerklebetechnik auf den strukturierten Schichtaufbau aufgeklebt, und der gesamte Verbund wird vom Silizium-Wafer abgehoben (s. Abb. 2.19 d). Anschließend wird die Trennschicht durch einen RIE (Reaktives Ionenätzen)-Prozeß entfernt, und man erhält eine quasi-freitragende Heizwendel über der Aktorkammer (s. Abb.2.19 e).

### Fügeprozeß

Die oberen Gehäuseteile aus PMMA werden mit der Polyimidfolie, auf der Silikonplättchen angebracht sind, ebenfalls in Kammerklebetechnik verklebt. Analog zu dem in Abschnitt 2.1.4 geschilderten Verfahren erhält man eine über der Fluidkammer aus-

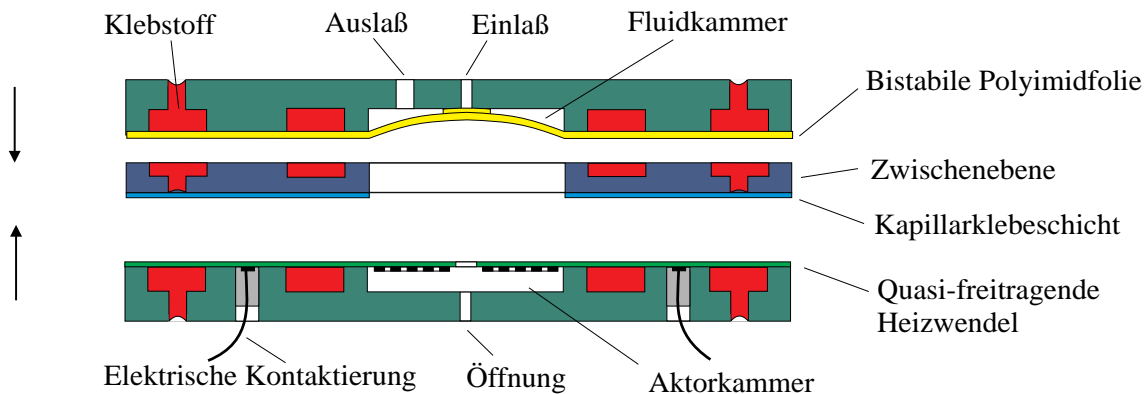


Abbildung 2.20: Fügeprozeß.

gewölbte, bistabile Folie. Insgesamt sind damit zwei Verbundsysteme vorhanden: Jeweils ein Gehäuseteil mit einer Membran bzw. Folie. Diese beiden Hälften werden über eine Zwischenebene aus PSU miteinander verbunden (s. Abb. 2.20). Diese  $100\ \mu\text{m}$  dicke Zwischenebene weist über der Aktor- und Fluidkammer eine  $3\ \text{mm}$  große Öffnung auf. Sie wird mit einer Hälfte in Kammerklebetechnik und mit der zweiten Hälfte in Kapillarklebetechnik verklebt. Die Kapillarklebetechnik nützt, wie der Name schon sagt, die Kapillarkräfte in engen Spalten aus. Die Zwischenebene wird auf das Gehäuse gepreßt. Am Randbereich wird mit einer Nadel ein Klebstofftropfen gesetzt. Der Klebstoff wird in die engen Spalte zwischen Gehäuse und Zwischenebene gezogen. Es ergeben sich Klebstoffdicken um  $10\ \mu\text{m}$ . Für die Kammerklebetechnik wird wie in Abschnitt 2.1.4 ein zweikomponentiger Epoxidharz-Klebstoff verwendet. Zum Kapillarkleben ist ein lichthärtender Klebstoff eingesetzt worden. Die Fluidanschlüsse werden in die dafür vorgesehenen Öffnungen im Gehäuse ebenfalls in Kapillarklebetechnik mit lichthärtendem Klebstoff eingeklebt (s. Abschnitt 2.1.4).

Die Heizwendel weist zwei Kontaktpads auf. Über diesen Kontaktpads befinden sich Hohlräume, die mit elektrisch leitendem Klebstoff aufgefüllt werden. Es handelt sich dabei um einen thixotropen zweikomponentigen Epoxidharz-Klebstoff, in dessen Matrix  $10\text{-}15\ \mu\text{m}$  große Silber-Kügelchen eingelagert sind. In die Hohlräume führen die Anschlüsse zur elektrischen Kontaktierung des Mikroventils.

In diesem Abschnitt ist der Herstellungsprozeß für die einzelnen Komponenten bistabiler elektro-thermo-pneumatischer Mikroventile beschrieben worden. Im nächsten Unterkapitel wird es darum gehen, die Funktionsweise der hierfür entwickelten elektronischen Ansteuerung vorzustellen.

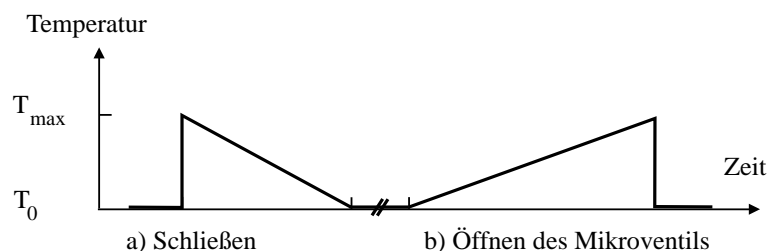


Abbildung 2.21: Ideale Temperaturverläufe zum Öffnen und Schließen des Mikroventils.

### 2.2.3 Elektronische Regelung

Wie schon in Abschnitt 2.2.1 geschildert, sind geregelte Temperaturerhöhungen in der Aktorkammer nötig, um das Mikroventil zu schalten. Die idealen Temperaturverläufe zum Öffnen bzw. Schließen des Mikroventils sind in Abb. 2.21 zu sehen. In Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung für Prozeßtechnik und Elektronik ist eine Ansteuerung entworfen worden, um diese Temperaturprofile durch elektrisches Erwärmen zu realisieren. Bei der Regelung wird davon ausgegangen, daß die Temperatur des Gases in der Aktorkammer durch die Temperatur der Heizwendel auf der Trägermembran bestimmt wird. Durch Änderungen der Heizwendeltemperatur nimmt man Einfluß auf die Temperatur des Gases und damit auf den zum Schalten des Mikroventils nötigen Druck in der Aktorkammer. Die momentanen Heizwendeltemperaturen werden durch Widerstandsmessungen an der Heizwendel während der Heizphasen bestimmt. Es gilt folgende Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_R(T - T_0))$$

$R_0$	Heizwendelwiderstand bei der Temperatur $T_0$
$R(T)$	Heizwendelwiderstand bei der Temperatur $T$
$\alpha_R$	Temperaturkoeffizient der Heizwendel

Dieser Zusammenhang wird ausgenutzt, um die Heizwendeltemperatur zu regeln. Es wird folgende Methode angewandt: um einen Überdruck in der Aktorkammer zu erhalten, ist ein schneller Temperaturanstieg und ein nicht zu schnelles Abkühlen notwendig. An der Schaltung wird der gemessene Kaltwiderstand und der maximal zugelassene Warmwiderstand eingestellt. Zunächst wird demnach die Heizwendel schnell auf diese Maximaltemperatur aufgeheizt. Um zu vermeiden, daß die Temperatur in der Aktorkammer sofort wieder exponentiell abnimmt, gibt die elektronische Schaltung eine quasi lineare Abnahme vor, indem sie in gewissen Zeitabständen Soll- und Ist-Wert der Heizwendeltemperatur über eine Widerstandsmessung vergleicht. Ergibt sich eine Abweichung wird pulsweise Energie zugeführt. Die Spannungspulse, die den Strom-

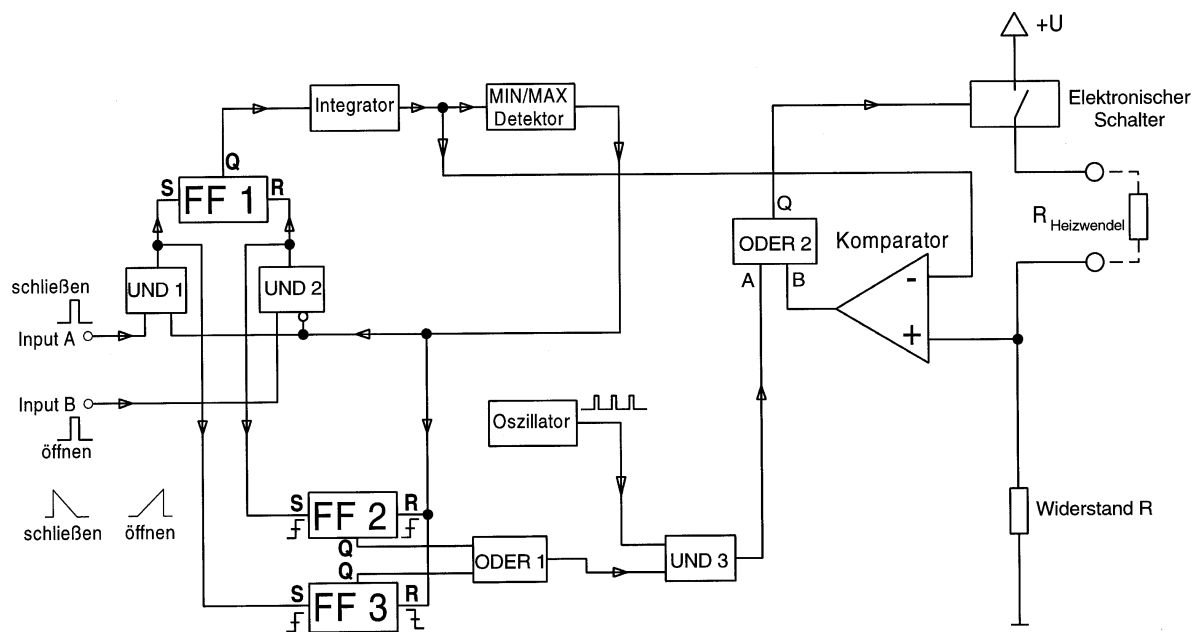


Abbildung 2.22: Blockschaltbild der elektronischen Steuerung.

fluß durch die Heizwendel und damit die Energiezufuhr bewirken, bleiben in der Höhe konstant, werden aber mit der Zeit immer kürzer.

Um einen Unterdruck in der Aktorkammer aufzubauen, ist ein langsamer Temperaturanstieg erforderlich. Die Schaltung gibt wieder eine nahezu lineare Rampe vor, bis der anfangs eingestellte maximale Warmwiderstand erreicht ist. Dabei wird oben erwähntes Prinzip des Nachheizens angewandt. Die Schaltung vergleicht wieder Ist- mit Soll-Wert der Heizwendeltemperatur. Zur Regelung werden Spannungspulse von konstanter Höhe in ihrem Taktverhältnis verändert. Die Pulslängen werden mit der Zeit immer länger, da die Temperatur insgesamt ansteigt, also insgesamt immer mehr Energie zugeführt werden muß. Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur kühlt das Ventilsystem ab. Es ergibt sich in beiden Fällen ein sägezahnartiges Temperaturprofil, dessen thermische Zeitkonstanten frei wählbar eingestellt werden können.

Die Funktion der entwickelten elektronischen Schaltung soll anhand des Blockschaltbildes (s. Abbildung 2.22) erklärt werden. Ein am Input A anliegendes Triggersignal bewirkt das Schließen des Mikroventils, liegt das Triggersignal am Input B an, wird es geöffnet. Durch die Triggersignale werden zwei Abläufe in Gang gesetzt. Im ersten Fall werden über das UND-Glied 1 die beiden Flip-Flops FF1 und FF3 gesetzt, im zweiten Fall wird über das UND-Glied 2 FF1 zurückgesetzt und FF2 gesetzt. In Abhängigkeit

der momentanen Lage von FF1 befindet sich der am Ausgang angeschlossene Integrator im positiven oder negativen Sättigungszustand, d. h. jeweils in Ruhestellung. Wird FF1 gesetzt, so läuft der Ausgang des Integrators mit einer vorwählbaren Geschwindigkeit vom positiven in den negativen Sättigungszustand und beim Rücksetzen genau umgekehrt. Diese Integratorausgangsspannung wird also einerseits zur Vorgabe des Widerstands im Abschaltpunkt einer Heizphase dem invertierenden Eingang eines Komparators zugeführt, andererseits dient das Signal der Ansteuerung des MIN/MAX-Detektors. Der Ausgang des MIN/MAX-Detektors befindet sich in Abhängigkeit des letzten Sättigungszustandes des Integrators im Zustand 1 bzw. 0. Dieses Signal sperrt jeweils eines der beiden UND-Glieder und verhindert somit das Abbrechen eines bereits laufenden Schaltvorgangs. Mit der Schaltflanke des Ausgangssignals vom MIN/MAX-Detektor wird FF2 bzw. FF3 zurückgesetzt. Bei Beendigung des Schließvorganges erscheint am MIN/MAX-Detektor der Sprung 1 nach 0. Diese negative Flanke setzt FF3 zurück. Beim Öffnen des Mikroventils wird vom MIN/MAX-Detektor eine positive Schaltflanke generiert, diese setzt FF2 zurück.

Ist eines der beiden Flip-Flops FF2 oder FF3 gesetzt, so gelangt über das ODER-Glied 1 eine 1 an UND-Glied 3. In dieser Zeit werden die Nadelimpulse des Oszillators, die am Eingang vom UND-Glied 3 anliegen, durchgeschaltet. Der elektronische Schalter, der die Spannung  $+U$  am Mikroventil und am Widerstand  $R$  anlegt, ist ohne Ansteuerung offen. Der Ausgang des Komparators ist '0'. Bei freigeschaltetem Oszillator gelangen die positiven Nadelimpulse über das ODER-Glied 2 zum Eingang des elektronischen Schalters. Der elektronische Leiter wird leitend, d. h. die Spannung  $+U$  liegt am Spannungsteiler  $R_{Heizwendel}$  und  $R$  an.

Um den momentanen Soll- und Ist-Wert der Heizwendeltemperatur zu vergleichen, vergleicht der Komparator die Integratorausgangsspannung mit dem Spannungsabfall am Heizwendelwiderstand. Beim Einschalten des elektronischen Schalters ist der Heizwendelwiderstand klein, da die Temperatur niedrig ist. Deshalb ist die Spannung am nicht-invertierenden Eingang des Komparators positiver als die am invertierenden Eingang anliegende, vom Integrator kommende Spannung. Am Ausgang des Komparators erscheint 1, dadurch wird der elektronische Schalter über das UND-Glied 2 nach Ende des Nadelimpulses weiterhin leitend gehalten. Durch Zunahme der Heizwendeltemperatur steigt  $R_{Heizwendel}$  an. Die Spannung am nicht-invertierenden Eingang des Komparators sinkt, bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Komparator umschaltet. In diesem Moment wird der Ausgangspegel des Komparators 0, der elektronische Schalter wird nichtleitend. Eine Aufheizphase der Aktorkammertemperatur ist beendet. Ein nachfolgender Nadelimpuls vom Oszillator startet einen neuen Aufheizvorgang. Es ergeben sich wie

oben schon erwähnt unterschiedlich lange Spannungspulslängen in den Aufheizphasen. Auf diese Weise können die gewünschten Temperaturprofile erzeugt werden.

Für diese Art der Ansteuerung ist es wichtig, den Kaltwiderstand und den Temperaturkoeffizienten des Heizwendelmaterials genau zu kennen (s. obige Formel), um die Parameter (Kalt- und Warmwiderstand bzw. positiver und negativer Sättigungszustand des Integrators) richtig zu setzen. Als Heizwendelmaterial ist für das Mikroventil Gold ausgewählt worden, weil es gut in dünnen Schichten aufgedampft oder aufgesputtert werden kann und im Gegensatz zu Titan oder Kupfer nicht oxidiert. Durch diese Oxidschichten wird zum einen die Kontaktierung erschwert, zum anderen ist kein sicherer Betrieb gewährleistet. Die Literaturwerte für den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_R$  und der spezifische Widerstand  $\rho_{el}$  von Gold sind  $\alpha_R(\text{Au}, 0-100^\circ\text{C}) = 0.0039/\text{K}$ ,  $\rho_{el}(\text{Au}, 20^\circ\text{C}) = 0.022 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  [45]. Doch gelten diese Werte für Bulk-Material und nicht für dünne Schichten, wie sich im folgenden zeigen wird. Die Heizwendel ist als Spirale mit seitlich herausgeführten Kontaktpads ausgelegt. Das Design der Heizwendel für die Dicke, Breite und Länge der jeweiligen Leiterbahn richtet sich nach dem für eine entsprechende Heizleistung benötigten Heizwendelwiderstand und berechnet sich nach folgender Formel für den Widerstand:

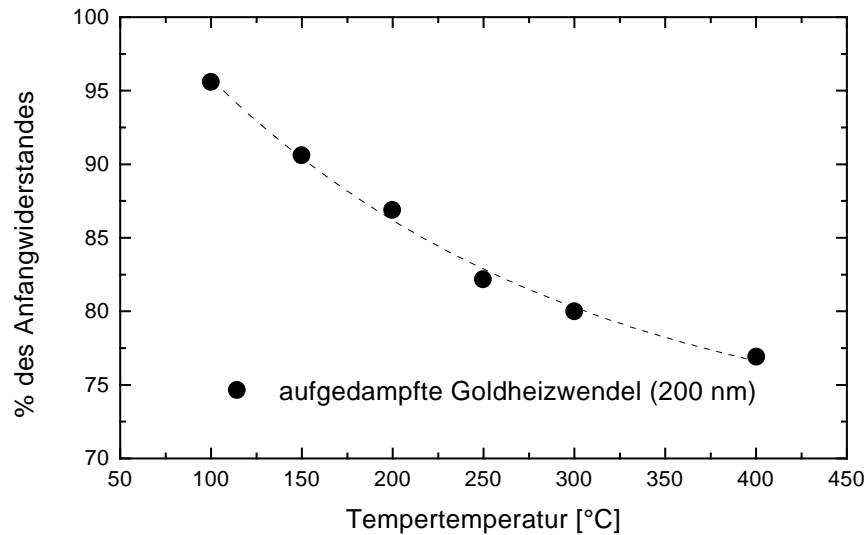
$$R = \frac{\rho_{el} l}{A}$$

$$A = bt$$

$R$  Heizwendelwiderstand  
 $\rho_{el}$  spezifischer Widerstand  
 $l, b, t, A$  Länge, Breite, Dicke, Querschnitt der Heizwendel

Um einen geforderten Kaltwiderstand von rund  $100 \Omega$  zu erreichen, müssen die Heizwendeln je nach Design Dicken im Bereich von 100-300 nm aufweisen.

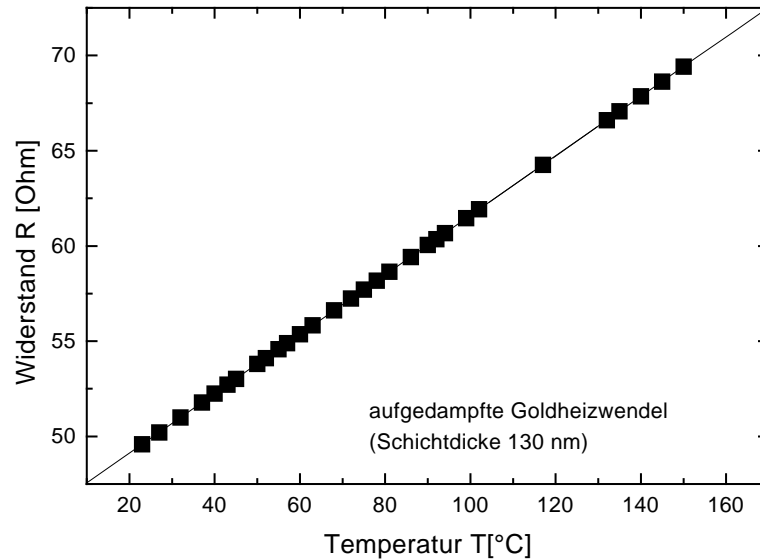
Im Experiment hat sich aber gezeigt, daß der Kaltwiderstand immer mehr abnimmt, je länger die Heizwendel in Betrieb war. Das spricht dafür, daß sich das Metallgefüge durch die Erwärmung während des Betriebes ändert. Diese dünnen Schichten weisen noch keinen homogenen Aufbau auf, sondern es existieren viele Korngrenzen. Deswegen sind Versuche unternommen worden, die Schichten zu tempern, um Defekte im kristallinen Gefüge auszuheilen. In Abbildung 2.23 ist der Kaltwiderstand einer 200 nm dicken Goldheizwendel als Prozentsatz des Anfangswiderstandes über verschiedenen Tempertemperaturen aufgetragen [49]. Man findet eine exponentielle Abnahme des Widerstandes als Funktion der Tempertemperatur  $T_T$ , die sich mit der Gleichung  $R/R_0 \cdot 100\% = 70.8 + 21.4 \cdot \exp(-(T_T - 132.5)/206.0)$  beschreiben läßt. Es zeigte sich, daß bei einem einstündigen Tempern bei  $400^\circ\text{C}$  nach der Inbetriebnahme keine nennenswerten Veränderungen des Kaltwiderstandes mehr auftraten. Dieser Wert veränderte



**Abbildung 2.23:** Kaltwiderstand in Prozent des Anfangswiderstandes in Abhängigkeit von der Tempertemperatur, Fitparameter siehe Text.

sich auch nach erneuten, wiederholten Temperschritten nicht mehr. Deshalb werden die Goldschichten gleich nach der Herstellung, also schon vor der Inbetriebnahme des Mikroventils getempert (vgl. Abschnitt 2.2.2). Der Kaltwiderstand einer aus Gold aufgedampften Schicht ( $t = 130$  nm) beträgt nach dem Tempern noch 80% des Ausgangswertes. Ohne Berücksichtigung der Tempereffekte hätte der Fehler bei der Auslegung der elektronischen Schaltung rund 20% betragen, und das Mikroventil wäre nur ungenügend aufgeheizt worden. Bei bekannter Heizwendelgeometrie kann aus den Messungen des Widerstandes die spezifische Leitfähigkeit  $\sigma_{el}$  der aufgedampften Goldschicht bestimmt werden. Für die ungetemperte Schicht ergab sich  $\sigma_{el,1} = 20.75 \pm 0.11$  m/ $\Omega$ mm<sup>2</sup> und für die getemperte Schicht  $\sigma_{el,2} = 25.53 \pm 0.09$  m/ $\Omega$ mm<sup>2</sup>. Die experimentell gewonnenen Werte liegen bei 46% bzw. 56% des Literaturwertes. Im Vergleich dazu erreichen 300 nm dicke, gesputterte Schichten nach dem Tempern bis zu 70% des Literaturwertes für Bulk-Material.

An den getemperten Proben ist anschließend der Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen worden, um den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_R$  zu bestimmen. Der experimentell ermittelte Wert beträgt für eine 130 nm dicke, aufgedampfte Goldschicht  $\alpha_R = 3.15 \pm 0.0031 \cdot 10^{-3}$ /K und ergibt sich aus der Geradensteigung in Abbildung 2.24 [49]. Es ergibt sich eine Abweichung vom oben angegebenen Literaturwert von



**Abbildung 2.24:** Temperaturabhängigkeit des Widerstandes. Die durchgezogene Linie entspricht einem Fit nach  $R(T) = R_0(1 + \alpha_R(T - T_0))$ .

rund 80%. Mit zunehmender Schichtdicke und Homogenität nähern sich die Werte dem Literaturwert für einkristallines Gold.

Messungen an dünnen, aufgedampften Goldschichten zeigen die Abweichungen der Leitfähigkeit und des Temperaturkoeffizienten von den Literaturwerten für Bulk-Material. Diese müssen bei der Designerstellung der Heizwendeln und bei der Inbetriebnahme des Mikroventils mit der elektronischen Ansteuerung berücksichtigt werden, damit die Ansteuerungsparameter Kalt- und Warmwiderstand der Heizwendel bzw. positiver und negativer Sättigungszustand des Integrators richtig gesetzt werden können.



## 2.3 Charakterisierung von (elektro-thermo-)pneumatisch angesteuerten bistabilen Mikroventilen

### 2.3.1 Oberflächenprofilanalysen

Die ersten Messungen, die an (elektro-thermo-)pneumatisch angesteuerten bistabilen Mikroventilen durchgeführt worden sind, galten der Untersuchung der bistabilen Folie. Einerseits sollte das Oberflächenprofil in den beiden stabilen Zuständen bestimmt werden und andererseits der maximale Hub des Mikroventils ausgemessen werden. Nachdem die  $25\ \mu\text{m}$  dicke Polyimidfolie mit einem Gehäuseteil verklebt worden war und sich die Bistabilität eingestellt hatte, wurde eine Oberflächenprofilanalyse mit einem Tastschnittgerät durchgeführt. Dabei fährt eine Nadel in regelmäßigen Abständen über die Probe und nimmt bei jeder Spur das jeweilige Höhenprofil auf. Die Höhenmessung erfolgt induktiv. Der Durchmesser der Nadelspitze beträgt  $0.5\ \mu\text{m}$ , und die Spitze ist mit einem Winkel von  $72^\circ$  angeschrägt. In Abbildung 2.25 sind die Oberflächenscans einer nach oben und einer nach unten ausgewölbten Folie zu sehen. Die Oberflächen sind gleichmäßig und symmetrisch gewölbt, es existieren keine Falten etc., die die Ventulfunktion stören könnten. Jede Spur kann quantitativ ausgewertet werden.

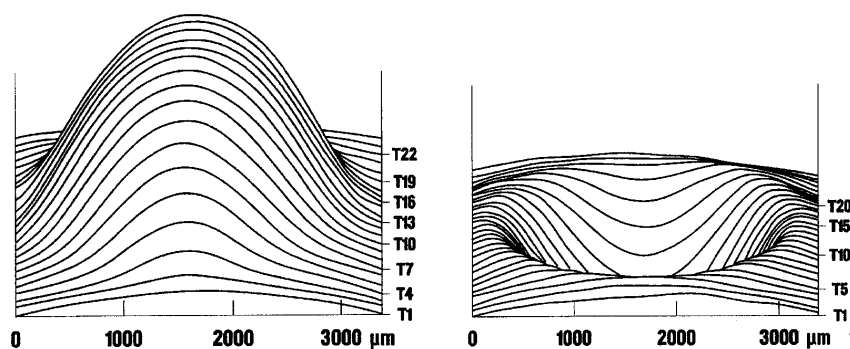


Abbildung 2.25: Oberflächenscan einer nach oben und nach unten gewölbten Folie.

Über einer Aktorkammer mit 3 mm Durchmesser, die von einem  $300\ \mu\text{m}$  breiten Steg berandet wird, ergab sich im Zentrum der bistabilen Folie eine maximale Auslenkung von  $120\ \mu\text{m}$  in beiden Richtungen. Damit erhält man einen Hub des Mikroventils von  $240\ \mu\text{m}$ . Dieser große Hub ist nötig für hohe Volumenflüsse. Das Oberflächenprofil der bistabilen Folie durch ihren Mittelpunkt ist in Abbildung 2.26 aufgetragen. Bei einem Kammerradius von 1 mm erhält man eine maximale Auswölbung von  $65\ \mu\text{m}$ , d. h. einen Hub von  $130\ \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse stimmen gut mit den theoretischen Werten überein (s. Abb. 2.7).

Wird eine kreisförmige, am Rand fest eingespannte Platte mit einer gleichmäßigen lateralen Last  $q$  belastet, so wölbt sie sich aus. Um die maximalen Auslenkungen der Platten zu vergleichen, dient folgende Rechnung. Eine Näherungslösung, um die im Verhältnis zur Dicke großen Auslenkungen einer kreisförmigen Platte unter gleichmäßiger lateraler Last  $q$  zu berechnen, kann mit dem Minimalisierungsprinzip der Energie gefunden werden [29]. Es wird angenommen, daß das Oberflächenprofil mit der gleichen Formel dargestellt werden kann wie im Fall kleiner Auslenkungen.

$$w(r) = w_0 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (2.10)$$

- $a$  Radius der am Rand fest eingespannten, kreisförmigen Platte
- $w(r)$  Auslenkung
- $w_0$  Maximalauslenkung
- $r$  radiale Entfernung

Durch die gemessenen Punkte in Abbildung 2.26 ist diese Fitfunktion gelegt worden. Für die maximale Auslenkung ergab sich  $w_0 \approx 125 \mu\text{m}$ , für den Radius  $a = 1820 \mu\text{m}$ . Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen im Experiment. Die etwas höheren Daten aus dem Experiment lassen sich damit erklären, daß die Folien nach der ersten Verklebung nicht am inneren Kammerrand, sondern weiter außen fest eingespannt sind, also tatsächlich einen größeren Durchmesser haben. Durch die spätere zweite Verklebung des Verbundes mit dem zweiten Gehäuseteil wird die Folie am inneren Aktorkammerrand eingespannt. Die Abweichungen liegen im Rahmen der Meßungenauigkeiten. Die Energie aufgrund der Biegung läßt sich wie folgt ausdrücken [29]:

$$W_0 = \frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^a \left[ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}\right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)^2 + \frac{2\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] r dr d\theta = 32 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \frac{w_0^2}{a^2} \cdot D$$

mit der Plattendicke  $d$  und der Plattensteifigkeit

$$D = \frac{E \cdot d^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

Die radiale Verschiebung  $u$  ist gegeben durch

$$u = r(a - r)(C_1 + C_2 r + C_3 r^2 + \dots). \quad (2.11)$$

Mit den Gleichungen 2.10 und 2.11 lassen sich die Dehnungen der Mittelebene in tangentialer und radialer Richtung ( $\varepsilon_t$  und  $\varepsilon_r$ ) berechnen.

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} + \frac{1}{2} \cdot \left[ \left(\frac{du}{dr}\right)^2 + \left(\frac{dw}{dr}\right)^2 \right]$$

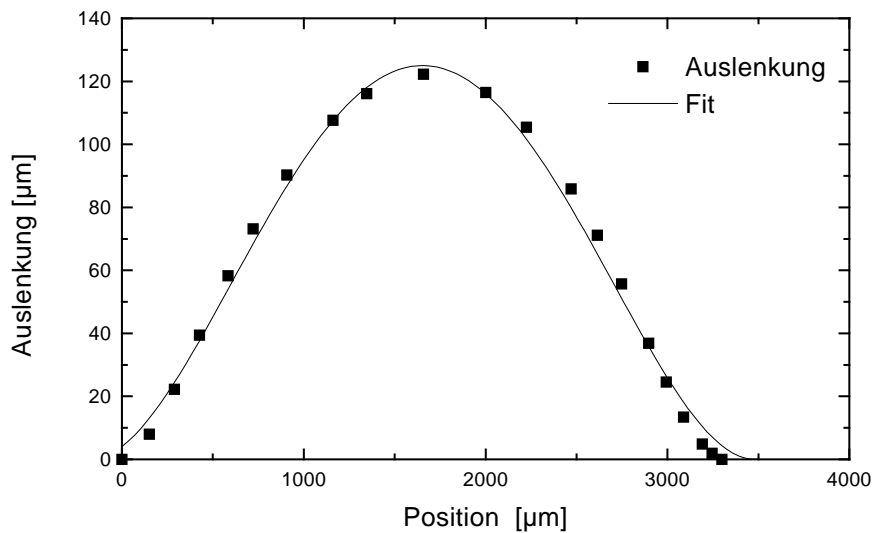


Abbildung 2.26: Oberflächenprofil für einen Scan durch den Mittelpunkt der bistabilen Folie. Die durchgezogene Linie wurde nach [29] berechnet.

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r}$$

Damit läßt sich die Energie aufgrund der Streckung der Mittelebene folgendermaßen ausdrücken:

$$W_1 = \pi \cdot \frac{Ed}{1 - \nu^2} \int_0^a (\varepsilon_r^2 + \varepsilon_t^2 + 2\nu\varepsilon_r\varepsilon_t) r dr$$

Werden nur die ersten beiden Terme von 2.11 benutzt, so ergibt sich

$$W_1 = W_1(C_1, C_2)$$

Nutzt man die Tatsache aus, daß die Energie in der Gleichgewichtslage minimal wird, so lassen sich die Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  bestimmen.

Mit  $\delta W_1/C_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  und  $\nu = 0.3$  ergibt sich

$$W_1 = 2.59\pi D \frac{w_0^4}{a^2 \cdot d^2}$$

Die Gesamtenergie ergibt sich als Summe der beiden Energiekomponenten aufgrund der Biegung und aufgrund der Streckung der Mittelebene zu

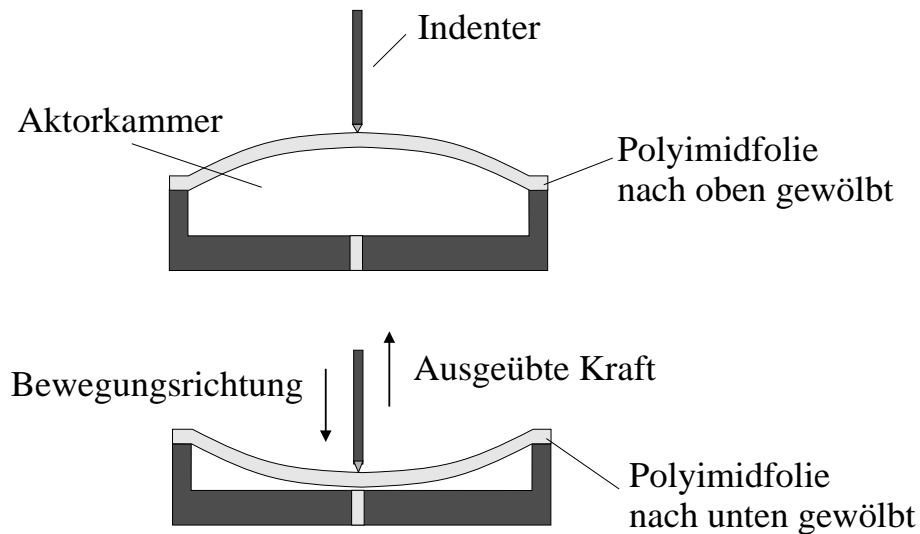


Abbildung 2.27: Meßaufbau für die Indentermessungen.

$$W_0 + W_1 = \frac{32}{3} \pi D \frac{w_0^2}{a^2} \left( 1 + 0.244 \frac{w_0^2}{d^2} \right)$$

Benützt man das Prinzip der virtuellen Verschiebungen, so kann man einen Ausdruck für  $w_0$  erhalten

$$w_0 = \frac{qa^4}{64D} \cdot \frac{1}{1 + 0.488 \frac{w_0^2}{d^2}}$$

Aus dieser Beziehung läßt sich die  $q$  bestimmen. Mit den Werten aus Tabelle 2.2 ergibt sich  $q=28787$  Pa. Die Auswölbung der bistabilen Folie verhält sich also entsprechend der einer kreisförmigen Platte, die mit einer gleichmäßigen Last von 28 kPa belastet wird.

$E$	$w_0$	$d$	$a$	$\nu$
2 GPa	125 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	1.8 mm	0.3

Tabelle 2.2: Wertetabelle.

### 2.3.2 Indentermessungen

Nach den Oberflächenprofilanalysen sind Kraft-Weg-Diagramme eines Indenters aufgenommen worden, der auf die nach oben gewölbte Polyimidfolie ( $\phi = 3$  mm) drückt.

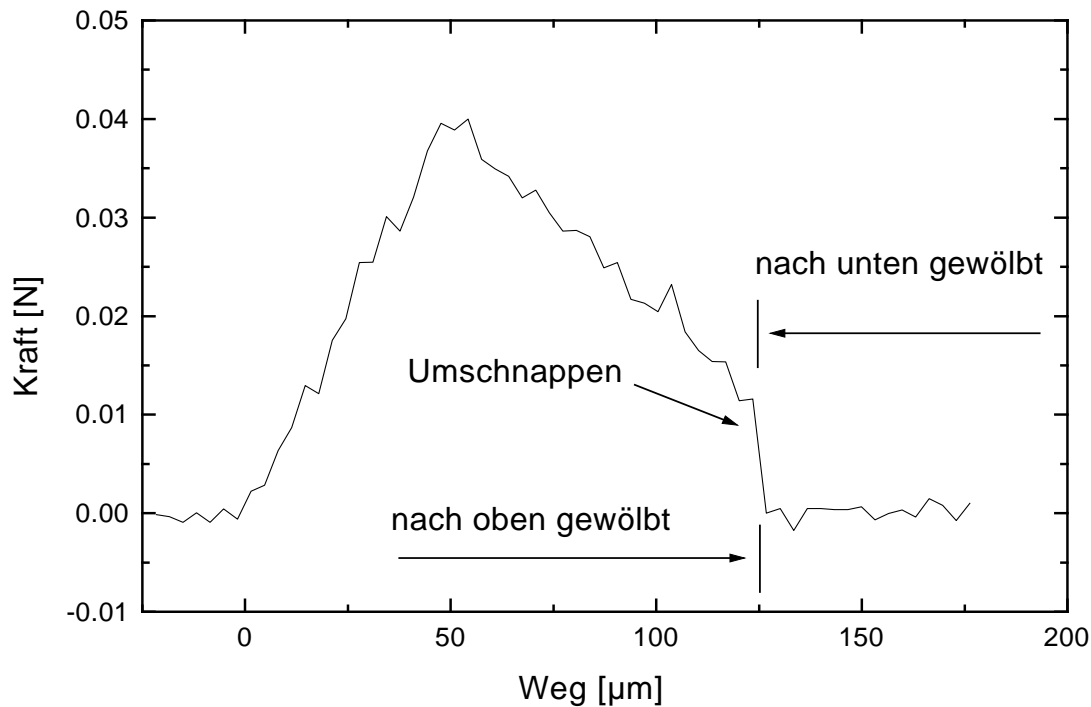


Abbildung 2.28: Kraft-Weg-Diagramm, Indenterdurchmesser 1.5 mm.

Diese Messungen sollen dazu dienen, das Schaltverhalten des Mikroventils näher zu charakterisieren.

Der prinzipielle Meßaufbau ist in Abbildung 2.27 abgebildet. Der Indenter wird über der Polyimidfolie zentriert und so weit nach unten verfahren, bis er die Oberfläche der Folie gerade berührt. Dies ist die Nullage. Mit einer voreingestellten Geschwindigkeit wird der Indenter nach unten verfahren und die auf ihn wirkenden Kräfte gemessen. Die Geschwindigkeiten betragen bei diesen Messungen 0.02 bis 0.1 mm/min, und die Meßpunkte wurden im Sekundentakt aufgenommen. Es wurden Indenter mit Durchmessern von 0.26 bis 2 mm verwendet. Abbildung 2.28 zeigt eine Messung mit einem Indenterdurchmesser von 1.5 mm, bei dem ein Großteil der Folienoberfläche belastet ist.

Die Kraft nimmt mit steigender Verfahrestrecke zu und erreicht nach einer Strecke von rund  $50 \mu\text{m}$  ein Kraftmaximum. Ist die Folie nach einem Verfahrweg von rund  $125 \mu\text{m}$  über ihre Mittellage ausgelenkt, erfolgt das Umschnappen. Ab diesem Punkt ist die Folie nach unten gewölbt. Die Umschnappkraft beträgt 13 mN und die maximale Kraft

40 mN. Mit abnehmenden Indenterdurchmessern nehmen auch die maximalen Kräfte ab. Bei Durchmessern von 2 mm ergibt sich eine Maximalkraft von 65 mN und bei 0.26 mm von 22 mN.

Mit diesen Messungen konnte festgestellt werden, welche Kraft die bistabile Folie auf den Ventilsitz ausübt. Daraus lassen sich die Öffnungsdrücke des Mikroventils bestimmen. Des weiteren läßt sich aus dem zur Maximalkraft gehörenden Verfahrensweg die optimale Dicke der Dichtung ermitteln.

### 2.3.3 Strömungsmechanische Grundlagen

Um die Strömungsverhältnisse in einem Mikroventil erklären zu können, dienen folgende Überlegungen. Es existieren charakteristische Kenngrößen, die Strömungen in Kanälen beschreiben, z. B. die Reynoldszahl [77]:

$$Re_L = vL/\nu$$

- $\nu$  kinematische Viskosität,  $\nu = \eta/\rho$
- $\eta$  dynamische Viskosität
- $L$  Länge des Kanals
- $v$  Geschwindigkeit
- $\rho$  Dichte des Fluids

Die Reynoldszahl ist dimensionslos und stellt das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften dar. Ihre ausführliche Herleitung findet sich z. B. in [34]. Ihr Zahlenwert gibt an, ob es sich um eine laminare oder eine turbulente Strömung handelt [74]. Makroskopische Rohrströmungen mit  $Re_L < 2300$  sind stets laminar, bei größeren Werten der Reynolds-Zahl handelt es sich um turbulente, d. h. wirbelbehaftete Strömungen. Mit der Reynolds-Zahl läßt sich die Einlaufstrecke  $X_e$  der laminaren Kanalströmung abschätzen zu [35]:

$$X_e = 0.03 \cdot Re_t \cdot D_h.$$

In Mikrostrukturen kann es leicht vorkommen, daß der Kanal kürzer als die Einlaufflänge ist. So berechnet sich z. B.  $X_e$  bei einem Querschnitt von  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$  und einer Reynoldszahl von 1500 zu 1.8 mm. Gravesen et al. [35] schlagen deswegen folgende Einteilung der kritischen Übergangswerte der Reynolds-Zahl  $Re_t$  für Mikrostrukturen vor (s. Tabelle 2.3). Tabelle 2.3 listet die Volumenflüsse auf.

Bei Blendenöffnungen mit  $L/D_h < 0.5$  wird  $Re_t = 15$  verwendet [36]. Hier dominiert der Druckabfall aufgrund der Beschleunigung des Fluids beim Durchtritt durch die Blende. Für kurze Kanäle setzt man die Einlaufflänge gleich der Kanallänge, was

Geometrie	Definition	$Re \ll Re_t$	$Re_t$	$Re \gg Re_t$
Öffnung	$L/D_h < 0.5$	$Q_v \simeq A \frac{2}{C} \frac{D_h}{\eta} \frac{p_e^2 - p_a^2}{2p_a}$	15	$Q_v = \frac{A}{2\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{p_e^2}{p_a}}; \frac{p_e}{p_a} > 2$
kurzer Kanal	$2 < L/D_h < 50$	$Q_v = A \frac{2}{C} \frac{D_h^2}{L\eta} \frac{p_e^2 - p_a^2}{2p_a}$	$30L/D_h$	$Q_v = \frac{A}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}; \frac{p_e}{p_a} < 2$
langer Kanal	$L/D_h > 100$	$v_m < 0.3c_s$	2300	$Q_v = A \sqrt{\frac{(2/\rho)(p_e^2 - p_a^2)/2p_a}{fL/D_h + 2 \ln(p_e/p_a)}}$

$D_h$	hydraulischer Durchmesser, $D_h = 4A/U$	$p_e$	Einlaßdruck
$A$	Querschnittsfläche des Kanals	$p_a$	Auslaßdruck
$U$	benetzter Umfang	$Q_v$	Volumenfluß am Auslaß
$C$	Reibungskoeffizient	$\rho$	Dichte
$\xi$	für Schlitzblenden ist $\xi = 41$	$c_s$	Schallgeschwindigkeit
$f$	Druckverlustkoeffizient	$v_m$	mittlere Fluidgeschwindigkeit, $v_m = Q/A$

Tabelle 2.3: Strömungsmodelle für zweiatomige Gase unter isothermischen Bedingungen.

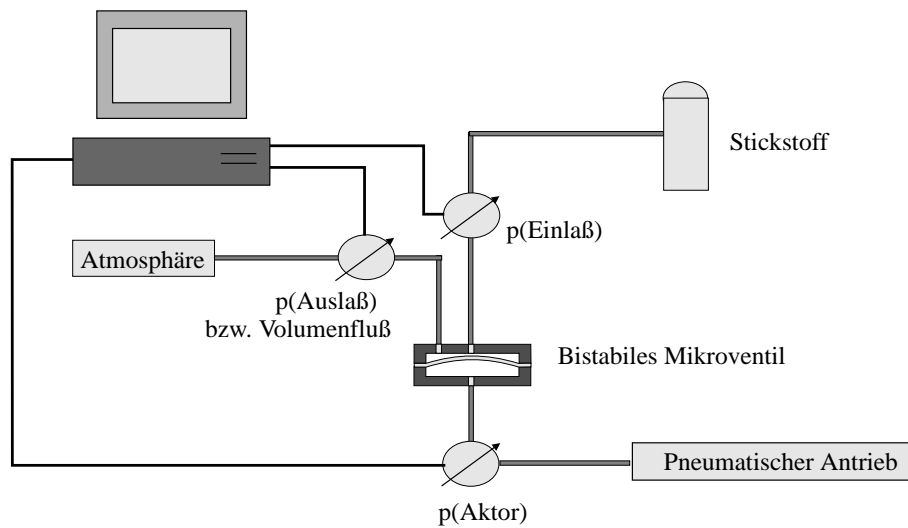


Abbildung 2.29: Meßaufbau für die pneumatischen Messungen.

bedeutet, daß der Druckabfall aufgrund der Beschleunigung gleich dem Druckabfall aufgrund der Reibung des Fluids ist. Man erhält  $Re_t = 30L/D_h$ . Bei langen Kanälen, d. h. bei dominierenden Reibungsverlusten, ergibt sich 2300. Die somit eingeführte neue charakteristische Kenngröße ist das Verhältnis zwischen der Länge des Kanals  $L$  und dem hydraulischen Durchmesser  $D_h$ . Mit den angegebenen Formeln lassen sich die Volumenflüsse durch Kanäle berechnen, die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt mit dem Experiment verglichen.

### 2.3.4 Pneumatische Messungen

An den vollständig gehäusten, mit Fluidanschlüssen versehenen Mikroventilen wurden pneumatische Messungen durchgeführt. Bei dem zu schaltenden Medium handelte es sich um Stickstoff. Es wurden die benötigten Schaltdrücke in der Aktorkammer, der Volumenfluß durch die geöffneten und der Leckfluß der geschlossenen Mikroventile bestimmt.

#### Aktordruckbestimmung

Der Meßaufbau für die pneumatischen Messungen ist in Abbildung 2.29 skizziert. An allen Fluidanschlüssen eines bistabilen Mikroventils befinden sich Drucksensoren, die mit einer Ausleseeinheit verbunden sind. Für die Messung der Drücke sind mikromechanisch hergestellte Differenzdrucksensoren verwendet worden [51]. Diese Sensoren,



die für die Verwendung gasförmiger Medien geeignet sind, bestehen aus einer Siliziummembran, auf der eine piezoresistive Vollbrücke angebracht ist. Beidseitig dieser Membran besitzen die Sensoren ein Totvolumen von  $1.9 \pm 0.3 \text{ mm}^3$ . Die im folgenden angegebenen Drücke sind als Differenzdrücke zum Atmosphärendruck definiert. Die Drucksensoren sind in einem Meßbereich bis maximal 1200 hPa verwendet worden.

Am Einlaß wird Stickstoff aus einer Gasflasche zugeführt, der Auslaß ist zur Atmosphäre hin offen. Der Aktordruck wird extern mit einem Spritzenkolben erzeugt, so daß Über- oder Unterdruck angelegt werden kann. Es genügt, nur Druckpulse einzuleiten, da sich das Mikroventil nach dem Schaltvorgang in einem stabilen Zustand befindet. Die Meßergebnisse der Aktordrücke zum Öffnen und Schließen eines bistabilen Mikroventils sind in Abbildung 2.30 in Abhängigkeit vom anliegenden Einlaßdruck aufgetragen. Der Durchmesser der verwendeten Polyimidfolie beträgt 3 mm, ihre Dicke  $25 \mu\text{m}$  und die Fluidkammerhöhe  $120 \mu\text{m}$ . Die Schließdrücke steigen mit wachsenden Einlaßdrücken linear von 150 hPa bis 350 hPa an. Auch die Öffnungsdrücke steigen leicht an und liegen im Bereich um 30 hPa. Die Kurven verhalten sich nicht symmetrisch, da die beiden stabilen Zustände der Folie durch den angebrachten Ventilsitz nicht mehr symmetrisch sind und außerdem in beiden Fällen jeweils unterschiedliche Strömungs- und Druckverhältnisse vorliegen. Der kritische Einlaßdruck, ab dem die Mikroventile öffnen, weil die nach oben gewölbte Folie dem anliegenden Druck nicht mehr standhalten kann, beträgt bei dieser Geometrie 700 hPa.

### Volumenflußbestimmung

In Abbildung 2.31 sind die Volumenflüsse durch ein geöffnetes Mikroventil in Abhängigkeit vom anliegenden Einlaßdruck aufgetragen. Der Meßaufbau ist analog zu Abb. 2.29, zusätzlich werden noch Volumenflußsensoren verwendet [52]. Die Volumenflüsse nehmen mit steigendem Einlaßdruck zu und erreichen Werte bis 0.4 ml/s bei einem Differenzdruck von 700 hPa. Mit den in Abschnitt 2.3.3 angegebenen Formeln lassen sich die Volumenflüsse durch Kanäle berechnen. In Tabelle 2.4 sind die verwendeten Daten angegeben.

Die mit der Formel

$$Re_L = vL/\nu = vL\rho/\eta$$

berechnete Reynolds-Zahl liegt im Bereich zwischen 28 und 115. Im Bereich kleiner Differenzdrücke ist die Reynolds-Zahl sehr viel kleiner als  $Re_t$  (vgl. Tab. 2.4). Der Vo-

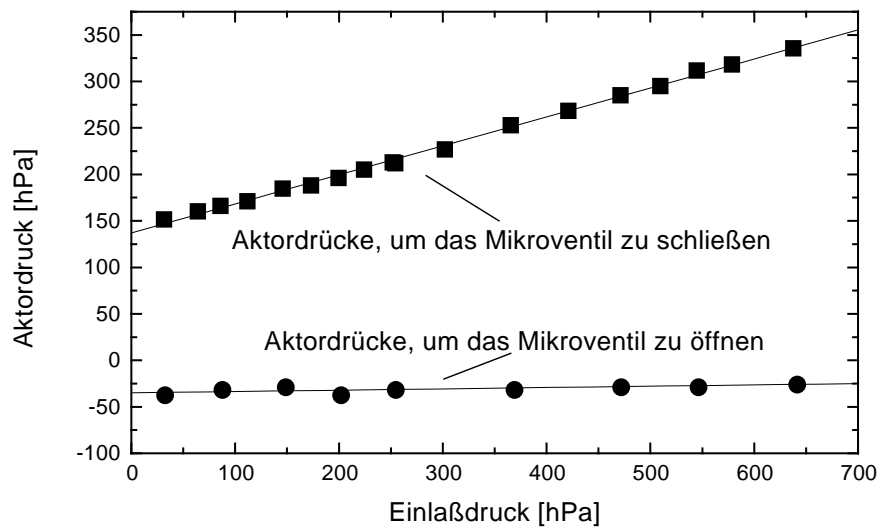


Abbildung 2.30: Aktordruck in Abhängigkeit vom Einlaßdruck.

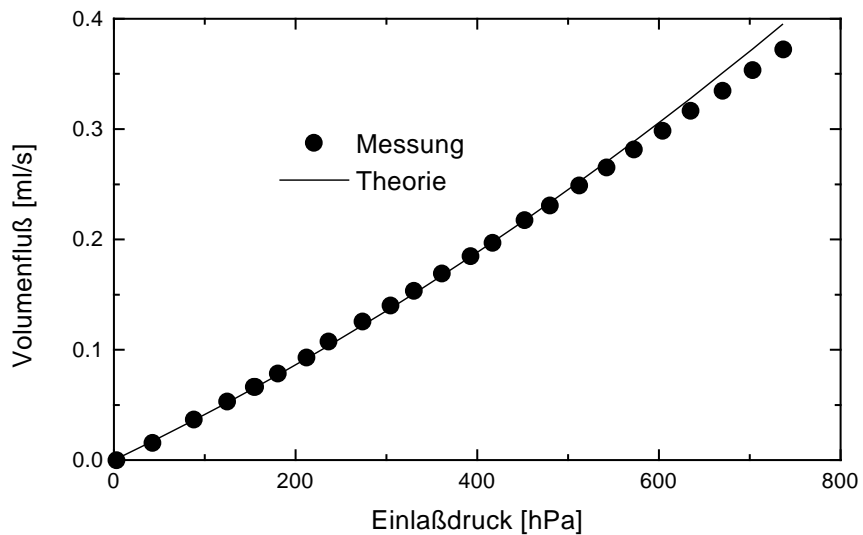


Abbildung 2.31: Volumensfluß in Abhängigkeit vom Einlaßdruck.

$L$	$B$	$H$	$A$	$U$	$D_h$	$L/D_h$
1.5 mm	2.5 mm	150 $\mu\text{m}$	$3.75 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$	5.3 mm	280 $\mu\text{m}$	5.3
$Re_t$	$\Delta p$	$\xi$	$C$	$\eta_{N_2}$	$v$	$\rho_{N_2}$
159	200 hPa	41	0.6	$16.5 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$	0.2-1 m/s	1.2 kg/m <sup>3</sup>

Tabelle 2.4: Wertetabelle.

lumenfluß  $Q_v$  wird mit folgender Formel (s. Tab. 2.3) ausgerechnet.

$$Q_v = A \frac{2}{C} \frac{D_h^2}{L\eta} \frac{p_e^2 - p_a^2}{2p_a}$$

Man erhält mit den in der Tabelle 2.4 angegebenen Werten den in Abb. 2.31 aufgetragenen Volumenfluß. Messung und Theorie stimmen recht gut überein, nur bei Einlaßdrücken über 600 hPa liegen die theoretischen Werte etwas höher. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die Reynolds-Zahl in diesem Bereich fast genauso groß wie  $Re_t$  wird.

### Dichtigkeittest

Die Forderung nach einer geringen Leckrate ist vor allem in der Medizintechnik von besonderer Bedeutung. Um die Dichtheit bistabiler Mikroventile zu testen, wurden zuerst Messungen mit einem Volumenflußsensor durchgeführt. Es konnte kein Leckfluß festgestellt werden, der Leckstrom lag unter der Auflösungsgrenze. Um trotzdem eine quantitative Aussage treffen zu können, wurde der Auslaß in einen mit Wasser gefüllten Behälter gelegt. Ein Stickstoffbläschen am Ende des Auslaßschlauches diente als Anzeige des Leckflusses. Nach mehreren Stunden konnte aus der leichten Vergrößerung des Bläschens ein Leckfluß von maximal nur 0.001  $\mu\text{l/s}$  festgestellt werden.

### Dauertest

Für die Zuverlässigkeit der Mikroventile ist neben der Dichtheit auch die Frage der Dauerbelastbarkeit der Folie wichtig. Abbildung 2.32 zeigt den Meßaufbau für den Dauertest. An der Aktorkammerseite lag stationär ein Druck von 200 hPa an. In der Fluidkammer wurde mit einer Frequenz von 20 Hz über ein Ventil zwischen den Drücken 0 und 400 hPa geschaltet, wodurch sich die Folie zwischen ihren beiden stabilen Lagen bewegt. Mit diesem Aufbau war eine maximale Frequenz von 25 Hz möglich. Durch diese wechselnde Beanspruchung kann die Dauerwechselfestigkeit der bistabilen Polyimidfolie getestet werden. Nach einem Dauerbetrieb von 288 h, d. h. 15.6 Mio. Lastzyklen,

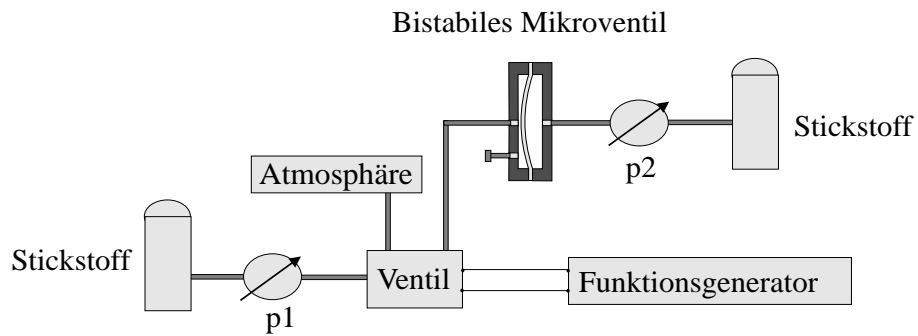


Abbildung 2.32: Meßaufbau für den Dauertest.

konnte keine Änderung der Funktionseigenschaften der Polyimidfolie festgestellt werden. In der Literatur wird die Biegewechselfestigkeit ( $10^7$  Lastwechsel) von Polyimid mit  $35 \text{ N/mm}^2$  angegeben [53].

# Kapitel 3

## Elektrostatisch angesteuertes Mikromembranventil

### Einführung

Eine weiteres Antriebsprinzip für ein Mikroventil mit möglichst geringer Leistungsaufnahme ist ein elektrostatischer Aktor [62], [66]-[69]. Auch bei diesem Antriebsprinzip wird nur während des Schaltens Leistung verbraucht. Im offenen oder geschlossenen Zustand ist das Mikroventil quasi leistungslos, da nur eine Spannung zwischen den Elektroden anliegt und kein Strom fließt. Shikida *et al.* [58]-[60] haben einen S-förmigen elektrostatischen Membranaktor vorgestellt, welcher mit silizium-mikromechanischen Techniken hergestellt wurde. Nickel ist als Membranmaterial ausgewählt worden, da es mit dem Herstellungsprozeß kompatibel ist. Allerdings weist der Nickelfilm eine hohe innere Spannung auf, so daß er nur 5-10 Zyklen eingesetzt werden kann [61]. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob ein elektrostatisches Mikroventil und insbesondere die Membran aus Polymerwerkstoffen hergestellt werden können.

In diesem Kapitel wird der Aufbau und das elektrostatische Funktionsprinzip eines Polymer-Mikromembranventils erklärt. Neben dem Einsatz neuer Materialien und sich damit ergebender neuer Herstellungsprozesse ist im Vergleich zu den Arbeiten von Shikida *et al.* das Funktionskonzept der S-förmigen Membran zu einer doppel-S-förmigen erweitert und das Mikroventil weiter miniaturisiert worden [76]. Es besteht aus zwei Gehäuseteilen mit einer beweglichen Membran dazwischen. Alle drei Komponenten stellen Elektroden dar. Desweiteren wird ein neu entwickeltes Software-Programm vorgestellt, das es ermöglicht, die Bewegung der Mikromembran zu simulieren. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulationen, die auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basieren, gezeigt. Anknüpfend an diese theoretischen Vorüberlegungen werden

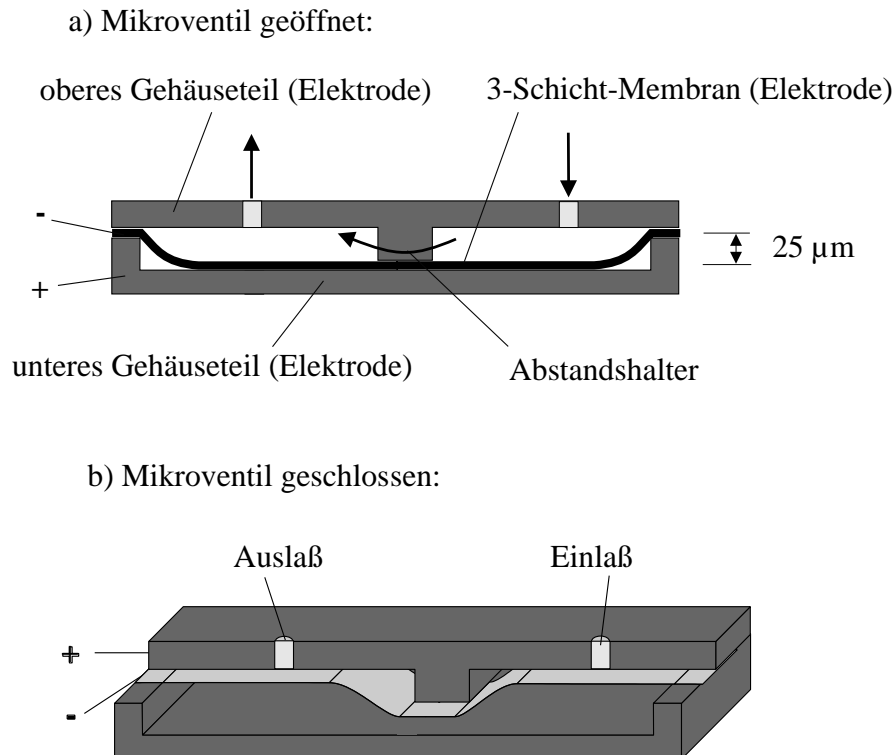


Abbildung 3.1: Querschnittsskizze im offenen und geschlossenen Zustand.

die Herstellungsprozesse für Membran und Gehäuse erläutert. Die bewegliche Membran besteht aus zwei Isolationsschichten mit einer leitenden Schicht dazwischen. Der Strukturierungsprozeß dieser 3-Schicht-Membran wird vorgestellt. Danach werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Gehäuseherstellung demonstriert: erstens die Abformung in elektrisch leitfähigem Kunststoff, zweitens mittels optischer Lithographie. Zum Schluß wird das elektrostatische Mikromembranventil durch Messungen charakterisiert.

### 3.1 Aufbau und Funktionsweise

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische, nicht maßstabsgetreue Querschnittsskizze des elektrostatischen Mikromembranventils im geöffneten (a) und geschlossenen Zustand (b). Die beiden Gehäusehälften und die bewegliche Membran bilden jeweils eine Elektrode. Ein Kurzschluß kann dadurch vermieden werden, daß entweder die Gehäusehälften oder die Membran mit einer Isolationsschicht überzogen werden. Da es herstellungsbedingt schwieriger war, die Gehäuse zu isolieren, wurde der zweite Weg gewählt. Die Membran besteht aus drei Schichten. Die leitende Metallschicht ist von zwei Isolationsschichten umgeben, wobei auch hier erst ein geeigneter Herstellungsprozeß entwickelt

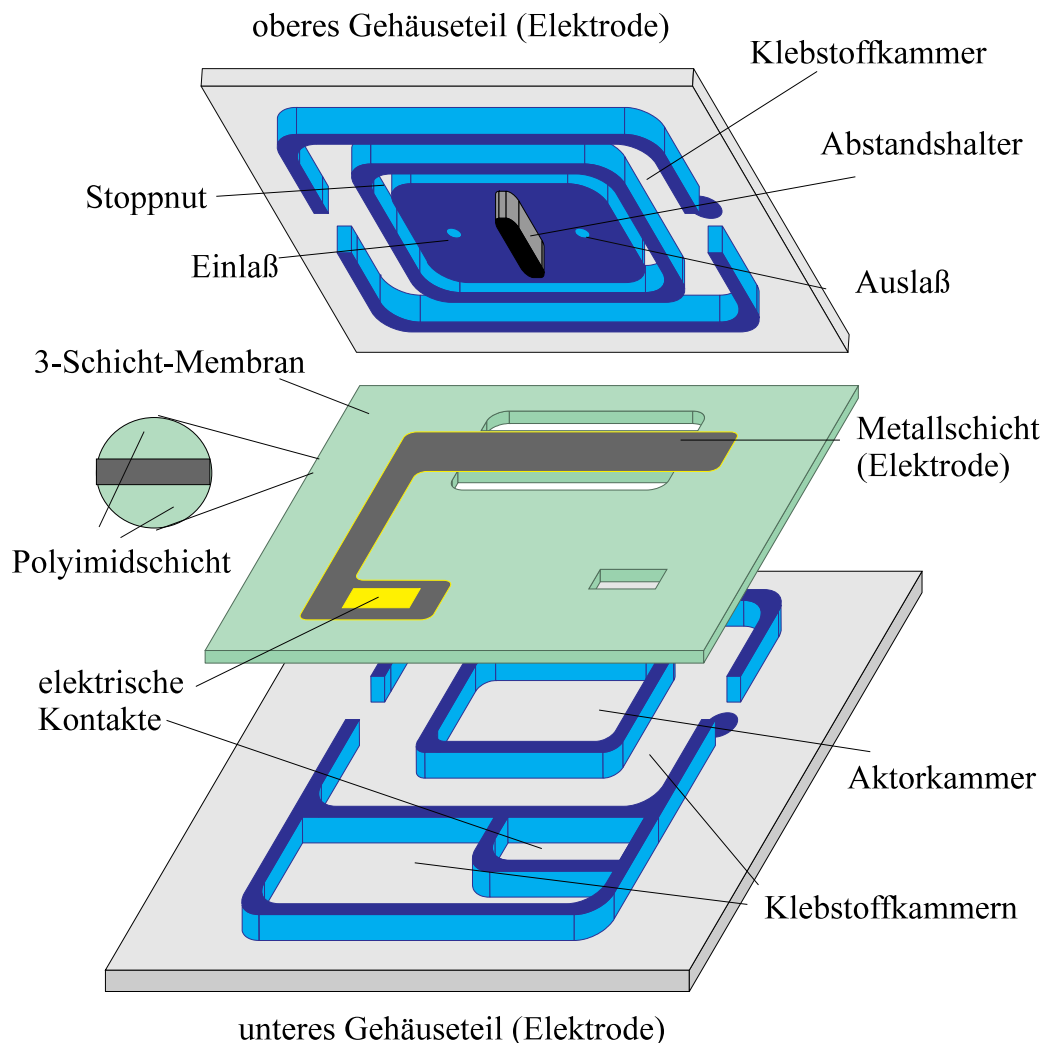


Abbildung 3.2: Explosionsansicht des elektrostatischen Mikroventils.

werden mußte. Über einen in das obere Gehäuseteil integrierten Abstandshalter wird die Membran in eine Doppel-S-Form gebracht.

In Abbildung 3.2 ist das elektrostatische Mikromembranventil in einer Explosionsansicht abgebildet. Das obere Gehäuseteil ist nach oben aufgeklappt und die 3-Schicht-Membran etwas erhöht über dem unteren Gehäuse dargestellt. In dieser Ansicht sind auch die für den Fügeprozeß notwendigen Klebstoffkammern zu sehen. Die Stoppnut fängt überschüssigen Klebstoff auf. Im Vordergrund sind Kontaktierungsflächen für die Elektroden vorhanden. Die Aktorkammern, in denen das Fluid strömt, sind in der Aufsicht im Grundriß rechteckig. In ihrer Längsmittellinie liegen die streifenförmigen Membranelektroden genau über den Fluidanschlüssen. Die Kammern sind 2 bis 4 mm

lang, der Abstandshalter ist nur  $25\ \mu\text{m}$  hoch. Er ist zentral in der Kammer angeordnet und reicht nicht bis zum Kammerrand, so daß ein Fluidstrom in der Ebene des Mikroventils möglich wird. Im oberen Gehäuseteil befinden sich Öffnungen für Ein- und Auslaß.

Der Vorteil elektrostatischer Antriebe ist, daß sie nahezu verlustleistungsfrei arbeiten. Der Nachteil der elektrostatischen Kräfte ist normalerweise, daß sie mit  $1/s^2$  ( $s$  Elektrodenabstand) abfallen, d. h. nur bei kleinen Abständen der Elektroden sind die Kräfte groß genug, um eine Bewegung zu bewirken. Bei Ventilen ist man aber darauf angewiesen, daß die Fluidkanäle nicht zu klein werden, um noch einen großen Volumenfluß zu erzielen. Die Doppel-S-Form löst dieses Problem. Einerseits ist ein kleiner Abstand der Elektroden gewährleistet, andererseits ist der Fluidkanalquerschnitt genügend groß. Der Membranstreifen wird an beiden Rändern an die obere und in der Mitte durch den Abstandshalter an die untere Elektrode gedrückt. Dadurch ist er an drei Stellen nur durch die Isolationsschicht von der jeweiligen Gegenelektrode getrennt. Die erreichbaren elektrostatischen Kräfte sind sehr groß, da diese Isolationsschichten sehr dünn gehalten werden können ( $1\ \mu\text{m}$ ). Je nach angelegter Spannung öffnet oder schließt das Mikroventil. Liegt die Spannung zwischen dem unteren Gehäuseteil und der Membran an, so beginnt sich die 3-Schicht-Membran, von der Mitte aus nach beiden Seiten hin immer weiter an den Boden anzulegen, weil dort die größten Kräfte wirken. Das Mikroventil wird geöffnet, das Fluid strömt am Abstandshalter vorbei. Analog dazu schließt das Mikroventil, wenn die Spannung zwischen oberem Gehäuseteil und der Membran anliegt. Die Bewegung des Membranstreifens beginnt nun jeweils an den seitlichen Rändern und die 3-Schicht-Membran schmiegt sich an die obere Elektrode an. Ist die Membran im geöffneten und geschlossenen Zustand maximal ausgelenkt, so wirkt die größte Kraft, ohne daß dabei ein elektrischer Strom fließt, der das Mikroventil oder das Fluid aufwärmen könnte. Diese Kraft  $F$  läßt sich mit

$$F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A U^2}{2s^2}$$

elektrische Feldkonstante  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}\ \text{C/Vm}$

Dielektrizitätszahl  $\varepsilon_r \simeq 3$

Fläche der Kondensatorplatte  $A = lb$ ,  $l = 2.5\ \text{mm}$ ,  $b = 0.5\ \text{mm}$

Spannung  $U = 50\ \text{V}$

Elektrodenabstand  $s = 1\ \mu\text{m}$

zu  $41\ \text{mN}$  abschätzen.



## 3.2 Software-Entwicklung und FEM-Simulationen

Um das Design der elektrostatischen Mikromembranventile optimal auslegen und schon vor der Herstellung die Membranbewegungen durch Simulationen testen zu können, wurden genauso wie bei den (elektro-thermo-)pneumatischen Mikroventilen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) (s. Abschnitt 2.1.3) numerische Berechnungen anhand der Konstruktionszeichnung und der Materialparameter durchgeführt. Dadurch können Fertigungskosten eingespart und für spezielle Anforderungen das geeignete Design im Vorfeld bestimmt werden. Kommerzielle Software stand für diese Aufgabenstellung nicht zur Verfügung, so daß erst ein geeignetes Programm für das hier vorliegende gekoppelte Problem entwickelt werden mußte. Die Kopplung besteht hier zwischen der Membranauslenkung und dem elektrostatischen Feld. Typische Kopplungen, die bereits mit kommerziellen FEM-Programmen mehr oder weniger aufwendig ausgeführt werden können, sind:

1. Kopplungen von Materialparameter mit Ergebnissen voriger FEM-Simulationen, z. B. bei der Berechnung von thermischen Spannungen mit temperaturabhängiger Elastizität. Zuerst wird die Temperatur- und anschließend die davon abhängige Spannungsverteilung ermittelt.
2. Nur an bestimmten Stellen räumlich gekoppelte Maschennetze, z. B. erstreckt sich das elektrische Feld auch im leeren Raum, während der Wärmefluß an Material gebunden ist (Ausnahme: Wärmestrahlung). Bei der Berechnung des elektrischen Feldes eines temperaturabhängigen, dielektrischen Materials, kann man so zwei voneinander unabhängige Maschennetze betrachten, die nur einige gemeinsame Knoten aufweisen.

Im Fall des elektrostatischen Mikromembranventils tritt folgende Kopplung auf. Betrachtet man die zwei Elektroden - eine Gehäuseelektrode und die Membran (s. Skizze Abb. 3.3) -, so herrscht zwischen den beiden Elektroden bei angelegter Spannung ein elektrostatisches Feld. In diesem elektrostatischen Feld lenkt sich die bewegliche Membranelektrode aus, bis sie im Kräftegleichgewicht ist. Da sie selbst aber eine Elektrode darstellt, verändert sich durch ihre Auslenkung das elektrostatische Feld. Diese neue Feldverteilung muß erst berechnet werden, bevor wieder die neue Membranauslenkung aufgrund des geänderten elektrostatischen Felds berechnet werden kann. Dieser iterative Prozeß wird so lange durchgeführt, bis sich ein Kräftegleichgewicht eingestellt hat und eine genügende Konvergenz erreicht worden ist. Das schematische Flußdiagramm des dazu nötigen Programms ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Das Simulationsprogramm

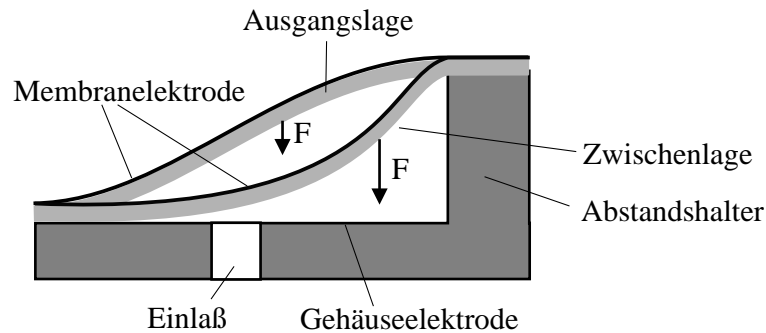


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung von Membran- und Gehäuseelektrode.

muß zur Berechnung der endgültigen Auslenkung mehrmals hintereinander Programme zur Lösung des Feldproblems und zur Berechnung der Membranauslenkung starten. Außerdem müssen jedesmal neue Maschennetze erstellt werden, wobei berücksichtigt werden muß, daß die untere Gehäuseelektrode die Membranauslenkung begrenzt. Bei der Vergrößerung der Auflagefläche der Membran auf dem Gehäuse werden immer weniger Elemente benötigt, so daß das Maschennetz nicht mehr durch einfache Geometrieänderungen der Knotenkoordinaten (topologieerhaltend) erzeugt werden kann. Ein hierfür entwickeltes Lösungskonzept für ein Simulationsprogramm [56] bietet folgende Möglichkeiten: Veränderungen der Maschennetze können miteinbezogen werden, und der Anwender kann festlegen, in welcher Reihenfolge FEM-Programme aufgerufen werden, welche Rechenoperationen von ihnen in den einzelnen Abläufen, die im folgenden als 'Steps' bezeichnet werden, durchgeführt werden. In jedem Step kann dem Programm mitgeteilt werden, welche Aufgaben es in Abhängigkeit von den Ergebnissen anderer Programme lösen soll. Die einzelnen FEM-Programme werden mit den Maschennetzgeneratoren und weiteren Programmen mit der Bezeichnung *Scriptsolver* zu Modulen zusammengefaßt. Diesen verschiedenen Modulen ist ein Regie-Programm übergeordnet, welches die zeitliche Abarbeitung innerhalb eines Moduls und zwischen den Modulen regelt. Das Regie-Programm wird durch ein Regie-File gesteuert, in dem die Namen der aufzurufenden Programme und die zeitliche Reihenfolge aufgelistet sind. Den Programmen können für jeden Step verschiedene Befehlsfolgen (*Scripts*) zugeordnet werden. Außerdem können auch zeitabhängige Probleme berechnet werden. Der Anwender muß neben den erforderlichen Eingabedateien mit den Ausgangsdaten für die FEM-Programme oder Maschennetzgeneratoren das Regie-File erstellen und das Regie-Programm starten, alles andere läuft automatisch ab. Das Regie-Programm überprüft bei jedem Aufruf eines Programmes, ob hierfür zu diesem Step ein Script vorliegt. Wenn ja, wird es dem Programm mitgeteilt. Diese Aufgabe übernimmt der *Scriptsolver* eines jeden Moduls. Er wertet die Eingabe- und Ergebnisdateien anderer FEM-Programme

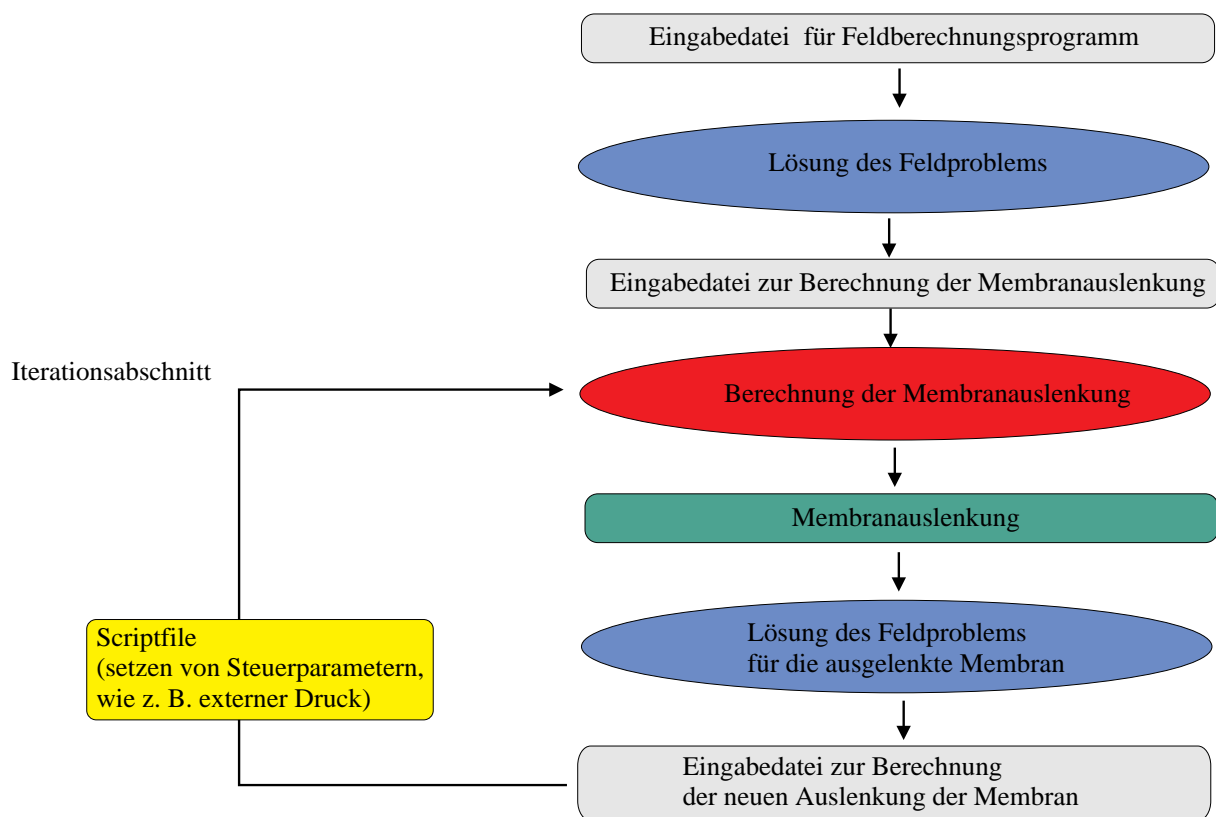
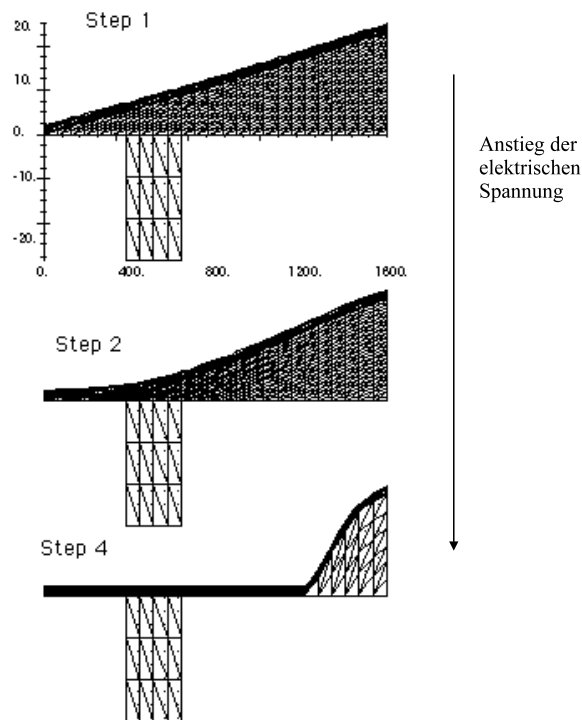


Abbildung 3.4: Flußdiagramm des entwickelten FEM-Programms.

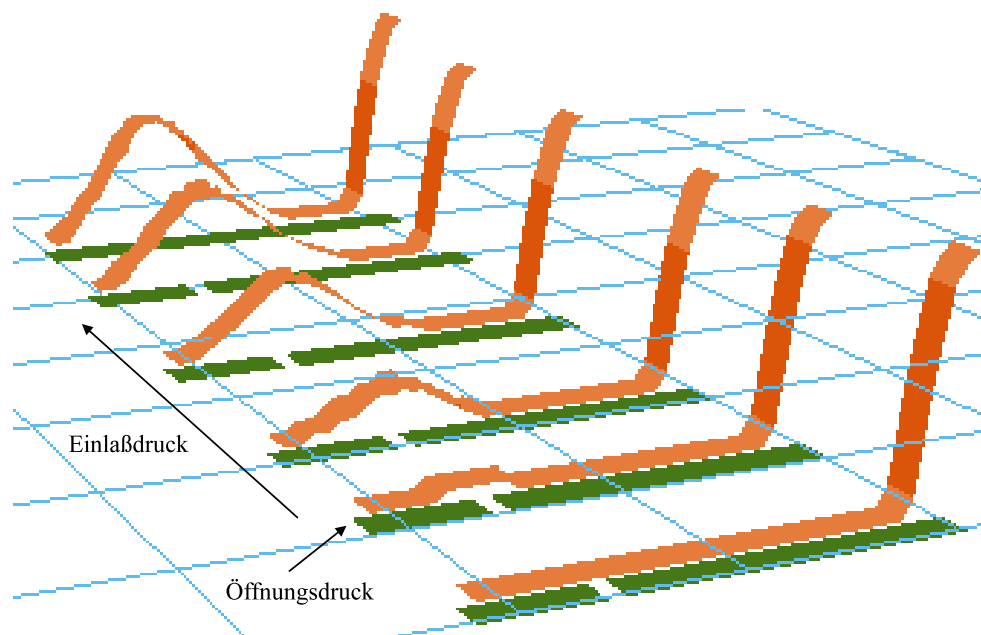


**Abbildung 3.5:** Maschennetze der ausgelenkten Membranelektrode im elektrostatischen Feld für verschiedene Steps bei ansteigenden Spannungen.

aus, erstellt davon abhängig ein Parameterfile, welches den Ablauf des zugeordneten FEM-Programmes regelt, und erzeugt ein neues Maschennetz.

Der regiegeführte Rechenablauf führt beim Mikromembranventil zuerst zu einer selbst-konsistenten Berechnung der Auslenkung der Membran als Folge der elektrostatischen Kräfte, anschließend wird ein Einlaßdruck angelegt und die hieraus resultierende Membranauslenkung berechnet. Dazu sind zwei Module nötig, die nacheinander aufgerufen werden. Modul 1 besteht aus einem FEM-Programm zur elektrostatischen Feldberechnung, einem modellspezifischen Maschennetzgenerator und einem Scriptsolver. Modul 2 beinhaltet ein Programm, das die Membranauslenkung berechnet, einen Membranerzeuger und wiederum einen Scriptsolver. So werden iterativ und voneinander abhängig Membranauslenkung und elektrostatisches Feld berechnet und deren Netze erstellt, bis sich die Membran im Step  $n$  nicht weiter auslenkt. Im Step  $n+1$  werden dann Scriptanweisungen aktiviert, die die Auslenkung der Membran unter Gegendruck berechnen.

Bisher wurden zur Berechnung der Membranauslenkung ab dem zweiten Step nur die Kräftedifferenzen benötigt. Ihre Berechnung wird durch die Scriptanweisung außer



**Abbildung 3.6:** Auslenkungen der Membran bei einem Bruchteil der Gesamtkraft für verschiedene Verhältnisse von Druckkraft zu elektrostatischer Kraft.

Kraft gesetzt, so daß das Feldberechnungsprogramm wieder die elektrische Gesamtkraft auf die ausgelenkte Membran ermittelt. Diese Kraft kann dann mit der verglichen werden, die durch einen Druck hervorgerufen wird, der ebenfalls durch die Scriptanweisung an speziellen Knoten, nämlich am Einlaß, gesetzt wird. Der Ort und die Größe dieses Druckes ist frei wählbar. Eine weitere Scriptanweisung bewirkt, daß bei der Berechnung der Auslenkung aufgrund des externen Druckes die Kräfte in mehreren Steps angelegt werden. Dies ist notwendig, da erstens die Kräfte neu berechnet werden müssen, damit sie immer senkrecht auf der Membranoberfläche stehen. Zweitens muß bei jedem Step geprüft werden, ob die Membran auf der Gegenelektrode aufliegt. Ist dies der Fall, werden automatisch die notwendigen Randbedingungen für das Membranprogramm gesetzt.

In Abbildung 3.5 ist das Maschennetz für die Feldberechnung für einige Steps dargestellt. Da die Membran sich symmetrisch verhält, wird zur Rechenzeiteinsparung immer nur eine Hälfte simuliert. Die obere Elektrode stellt zugleich die Membranauslenkung des vorangegangenen Steps dar. Die Ausgangsposition ist ganz oben in Step1 dargestellt. Anschließend wird die Spannung erhöht, die Membran legt sich an die Gehäuseelektrode an. In Step2 reicht die Spannung noch nicht aus, die Gehäuseöffnung zu verschließen. Nach weiterer Spannungserhöhung ist sie in Step4 verschlossen.

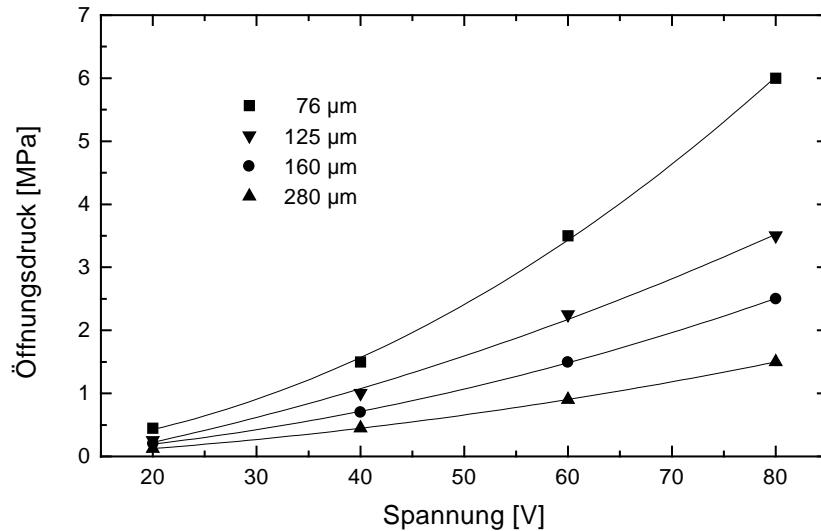


Abbildung 3.7: Öffnungsdrücke in Abhängigkeit von der angelegten Spannung und von der Größe der Einlaßöffnung.

Abbildung 3.6 zeigt die durch den am Einlaß angelegten Druck ausgelenkte Membran bei einem Bruchteil der Gesamtkraft für verschiedene Verhältnisse von Druckkraft zu elektrostatischer Kraft. Sobald die Membranelektrode nicht mehr am Gehäuse anliegt (zweite Kurve von vorne), wird der Zustand instabil, die elektrostatischen Kräfte werden kleiner und die Kräfte aufgrund des Druckes nehmen zu, d. h. das Mikroventil öffnet bei diesem Druck. Mit dem entwickelten Programm konnte so rechnerisch ermittelt werden, bei welchem kritischen Einlaßdruck die elektrostatische Kraft nicht mehr ausreicht, um das Mikroventil geschlossen zu halten. In Abbildung 3.7 sind diese Öffnungsdrücke als Funktion der an die Elektroden angelegten Spannung aufgetragen. Jede Kurve wurde für eine bestimmte Breite der Einlaßöffnung berechnet. Für eine  $160 \mu\text{m}$  breite Einlaßöffnung ergibt sich bei einer Spannung von  $60 \text{ V}$  ein kritischer Öffnungsdruck von  $1.5 \text{ MPa}$ . Je kleiner die Einlaßöffnung, desto größer wird der kritische Öffnungsdruck, d. h. das Mikroventil bleibt länger geschlossen.

Es wurde eine Methode vorgestellt, die die Kopplung zwischen Membranauslenkung und elektrostatischer Feldberechnung bewerkstelligt und die Simulation mittels FEM-Programme ermöglicht. Somit steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem Membranauslenkungen in Abhängigkeit von der angelegten Spannung berechnet werden können. Außerdem läßt sich die Wirkung eines am Einlaß angelegten Druckes auf die

Membranauslenkung ermitteln und der sich daraus ergebende Öffnungsdruck des Ventils bestimmen. So können im Vorfeld der Entwicklung Parameterstudien betrieben werden, um das Mikromembranventil je nach Anforderung optimal auszulegen. Dieses Programm kann außerdem entsprechend erweitert werden und so für viele weitere Anwendungsfälle eingesetzt werden. Im nächsten Abschnitt werden die Herstellungsprozesse für die Mikroventilkomponenten, d. h. der 3-Schicht-Membran und der Mikroventilgehäuse, näher erläutert.

## 3.3 Herstellung

### 3.3.1 Herstellung der 3-Schicht-Membran

Die Membranelektrode muß, um die Isolation zu den Gehäuseelektroden zu gewährleisten, beidseitig mit je einer Isolationsschicht bedeckt sein. Somit ergibt sich ein dreischichtiger Aufbau der Membran. Der Herstellungsprozeß muß folgende Anforderungen erfüllen:

1. Alle drei Schichten müssen unterschiedlich strukturiert werden können. Denn es werden sowohl Öffnungen durch die ganze 3-Schicht-Membran hindurch, als auch nur in einer Schicht benötigt, außerdem muß die Metallelektrode strukturiert werden.
2. Die 3-Schicht-Membran muß im Gehäuse frei beweglich sein.

Der hierfür entwickelte Herstellungsprozeß ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Im ersten Schritt wird auf den Silizium-Wafer eine dünne Goldschicht (60 nm) als Trennschicht aufgedampft. Danach erfolgt der Aufbau der dreischichtigen Membran mittels optischer Lithographie. Die erste Isolationsschicht ist eine 1  $\mu$ m dicke Polyimidschicht, die auf den Wafer aufgesponnen wird und anschließend getrocknet wird (s. Abb. 3.8 a). Bei dem hierbei verwendeten Polyimid handelt es sich um einen photostrukturierbaren Negativresist (Probimide XU408). Durch die Belichtung mit UV-Licht über eine Chrom-Glas-Maske und anschließender Entwicklung werden die Strukturen für die Öffnungen der Isolationsschicht über den Kontaktpads und der Membranstreifen selbst freigelegt. Auf das Polyimid wird eine 300 nm dicke Goldschicht aufgesputtert. Die Goldschicht wird durch optische Lithographie kombiniert mit Naß-Ätz-Techniken strukturiert. So erhält man einen rechteckigen Streifen mit Kontaktpad als Membranelektrode (s.

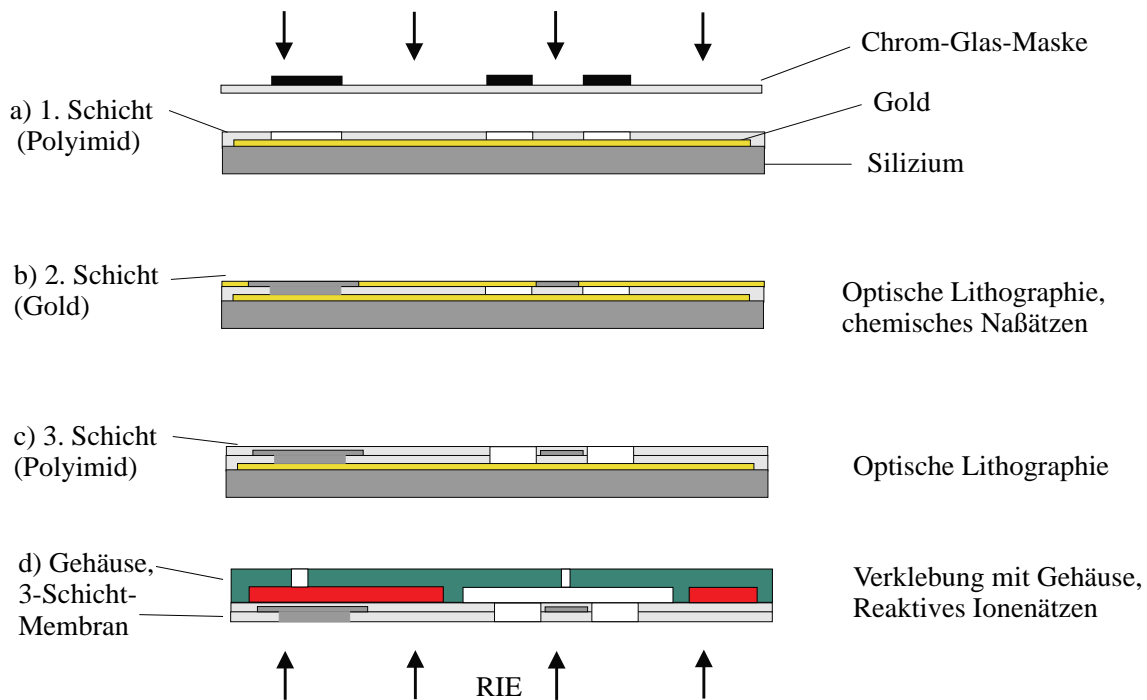


Abbildung 3.8: Herstellungsprozeß für die 3-Schicht-Membran.

Abb. 3.8 b). Bis hierher verläuft der Prozeß analog zu dem in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Verfahren zur Herstellung der quasi-freitragenden Heizwendel. Durch das Aufspinnen und anschließende Strukturieren einer dritten Schicht wird dieses Verfahren erweitert. Diese Polyimidschicht stellt die zweite Isolationsschicht dar und verhindert einen Kurzschluß zwischen Membranelektrode und Gehäuse. Die einzelnen Prozessierungsschritte sind wieder Aufschleudern, Prebake, Belichtung, Entwicklung und Hardbake (s. Abb. 3.8 c).

Die vollständig aufgebaute 3-Schicht-Membran ist in Abb. 3.10 zu sehen. Der dreischichtige Membranverbund wird durch die Abhebe- und Kammerklebetechnik vom Silizium-Wafer getrennt. Zuerst wird das untere Gehäuseteil in Kammerklebetechnik in einer justierten Verklebung mit der 3-Schicht-Membran verbunden. Dann wird der Verbund aufgrund der geringen Haftung der Trennschicht vom Wafer abgehoben. Die Trennschicht bleibt hierbei am Polyimid haften und wird durch einen sich anschließenden RIE (Reaktives Ionenätzen)-Prozeß abgetragen (s. Abb. 3.8 d). Danach erfolgt die zweite justierte Verklebung (s. Abb. 3.9). Der Verbund wird mit dem oberen Gehäuseteil, das den integrierten Abstandshalter aufweist, verklebt. Hierbei wird der Membranstreifen durch den Abstandshalter gegen das untere Gehäuseteil gedrückt. Bei den Verklebungen ist darauf zu achten, daß sie bei einer genügend hohen Temperatur



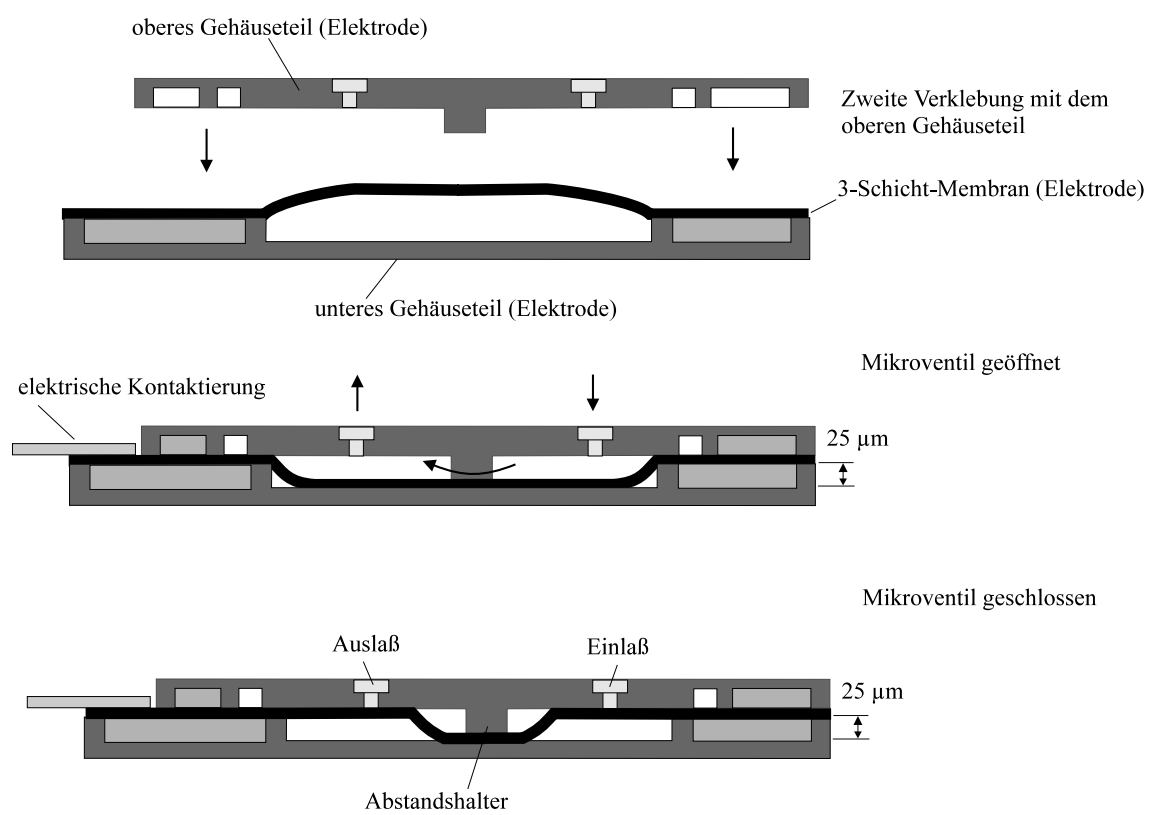


Abbildung 3.9: Fügeprozeß von 3-Schicht-Membran und Gehäuse.

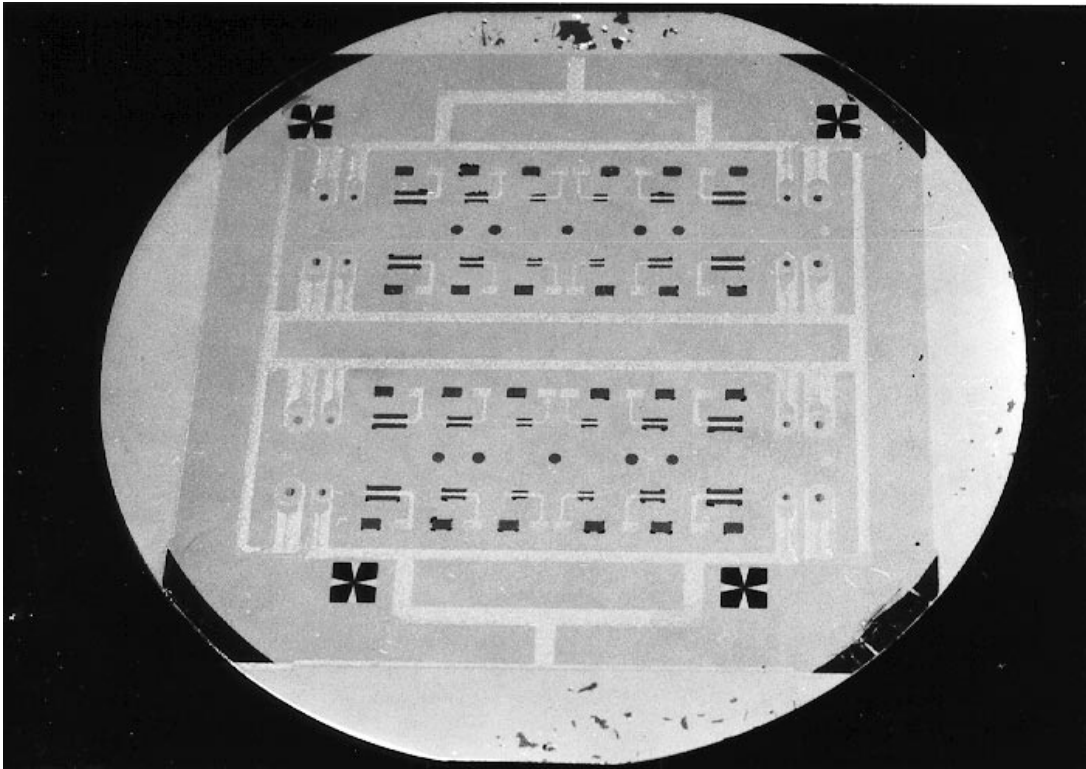


Abbildung 3.10: Foto einer 3-Schicht-Membran für 24 Mikroventile auf einem Silizium-Wafer.

erfolgen. Dadurch wird erreicht, daß die Membran aufgrund der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Gehäuse und Membran über eine ausreichend große Vorwölbung verfügt. Daher ist sie auch nach der Verklebung mit dem zweiten Gehäuseteil über den Abstandshalter nicht zu stark eingespannt, sondern kann sich frei im Ventilgehäuse bewegen und an die Gehäusewände anlegen.

Abbildung 3.9 zeigt die Querschnittsskizze des Mikroventils im geöffneten und geschlossenen Zustand. Die im Verbund hergestellten Mikroventile können nach den Verklebungen vereinzelt werden. Die Trennung erfolgt durch Sägeschnitte durch die Klebstoffkammern zwischen den einzelnen Mikroventilkammern. Die fluidische Anschlußtechnik erfolgt analog zu der in Abschnitt 2.1.4 dargestellten Methode. Die elektrische Kontaktierung der Elektroden erfolgt durch anisotropes Leitleben. Auf die Kontaktpads der Elektroden wird eine thermoplastische Folie gelegt, die duroplastische Mikrokugeln (Durchmesser  $12\ \mu\text{m}$ ) mit elektrisch leitendem Nickelüberzug enthält. Darüber wird ein Flachbandkabel justiert angeordnet. Mit einer Heißsiegleinrichtung wird die thermoplastische Folie geschmolzen und der elektrische Kontakt zwischen den Kontaktpads und dem Flachbandkabel über die Mikrokugeln hergestellt. Die Bezeichnung des ani-

sotropen Leitklebens kommt daher, daß der Kontakt nur längs einer Raumrichtung stattfindet. Beim Abkühlen schrumpft die thermoplastische Folie stärker als die duroplastischen Mikrokugeln, und es ergibt sich ein Übergangswiderstand von wenigen  $m\Omega$  [57].

### 3.3.2 Herstellung der Mikroventilgehäuse für das elektrostatische Mikromembranventil

Bei der Herstellung der Mikroventilgehäuse für die elektrostatischen Mikromembranventile mußten Wege gefunden werden, um elektrisch leitfähige Gehäuseelektroden zu erhalten. Im folgenden werden zwei hierfür erarbeitete Lösungsmöglichkeiten vorgestellt, erstens die Herstellung mittels Abformung und zweitens die Herstellung mittels optischer Lithographie.

#### Abformung

Die Abformung erlaubt, wie schon erwähnt, die kostengünstige Massenproduktion. Die hierfür benötigten Formeinsätze für Gehäuseober- und unterteil wurden analog zu dem in Abschnitt 2.1.4 geschilderten Verfahren mit mikromechanischen Methoden aus Messing gefertigt, wobei die Präzisionsansprüche an die CNC-Hochleistungsfräsmaschine diesmal noch höher waren: Die gefrästen Strukturen sind nur  $25\ \mu\text{m}$  tief und es mußten gestufte Strukturen mit sehr guter Oberflächenqualität aller Ebenen hergestellt werden. Außerdem mußten aufgrund der Integration des Abstandshalters in das obere Gehäuseteil die gefrästen Strukturen in den beiden Formeinsätzen eine hohe Paßgenauigkeit  $\pm 2\ \mu\text{m}$  zueinander aufweisen. Diese Forderungen konnten erfüllt werden, so daß die Klebe- und Verbindungstechnik des Mikroventils ermöglicht wurde. Die mikromechanisch gefertigten Formeinsätze für je 12 Gehäuseober- und -unterteile mit verschiedenen Abmessungen sind in Abbildung 3.11 mit einem Maßstab abgebildet. Mit diesen Formeinsätzen wurden erstmals Mikroventilgehäuse im Spritzgußverfahren mit elektrisch leitfähigen Polymeren abgeformt [76]. Als Gehäusematerial ist leitrußgefülltes Polyamid (PA12) verwendet worden. Die Gehäuse sind aufgrund des Gehalts an Leitruß völlig undurchsichtig und schwarz, so daß neue Justiertechniken für die justierte Verklebung der Gehäuse mit der Membran benötigt wurden. Deshalb sind in den abgeformten Gehäuseteilen an beiden Rändern kreisförmige Öffnungen vorgesehen. Die Gehäuseteile werden in der Verklebeapparatur fest eingespannt. Der Wafer mit der 3-Schicht-Membran kann auf einem Positioniertisch verfahren werden, so daß mit einem Mikroskop die Justiermarken auf der Membran mit den Öffnungen im Gehäuse zur

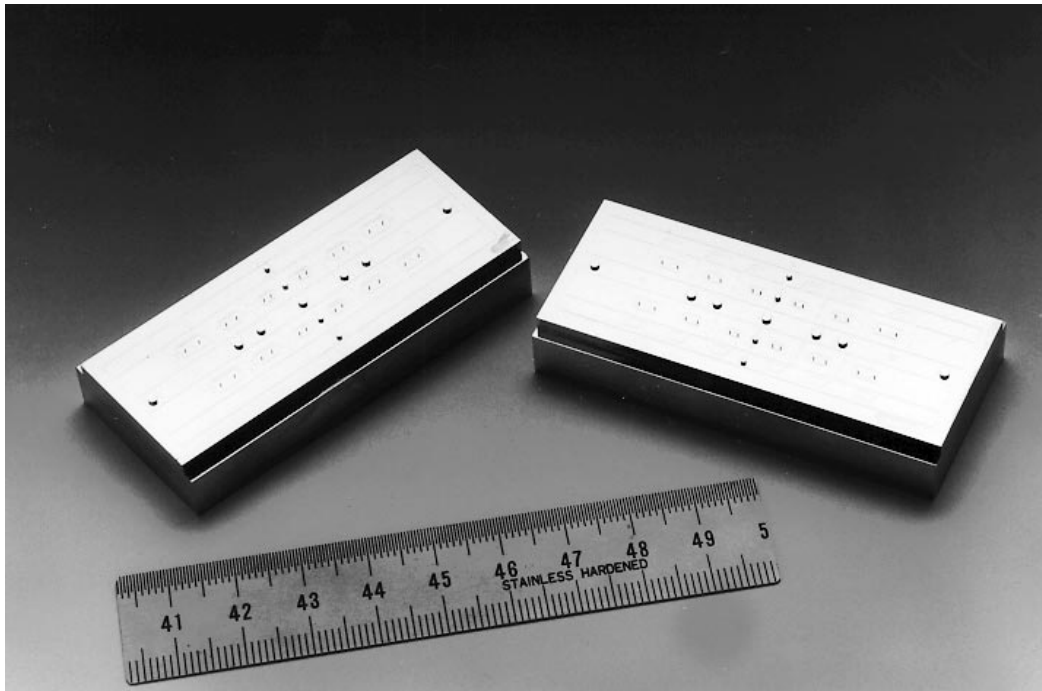


Abbildung 3.11: Mikromechanisch gefertigte Formeinsätze für Mikroventilgehäuse.

Deckung gebracht werden können. Die Justiermarken werden in einem Arbeitsschritt mit der Metallelektrode in der Zwischenschicht der 3-Schicht-Membran strukturiert.

Abbildung 3.12 zeigt die mittels Spritzguß in leitfähigem Polyamid abgeformten Gehäuseober- und unterteile für je 12 Mikroventile. Der spezifische Durchgangswiderstand von elektrisch leitfähigem Polyamid beträgt  $10^3 \Omega\text{cm}$ , im Vergleich zu  $10^{15} \Omega\text{cm}$  bei ungefülltem Polyamid. Die elektrische Leitfähigkeit reicht zur Kontaktierung der Gehäuseelektroden aus. Nachteilig bei der Verwendung von Polyamid ist die starke Volumenkontraktion (Schrumpfung) von 4-7 % beim Erstarren, die durch die Kristallisation hervorgerufen wird. Dies kann bei der Spritzgußverarbeitung fehlerhafte Strukturen bewirken. Eine Abwandlung der Molekülbausteine kann hier Abhilfe schaffen, z.B. beträgt die Schrumpfung bei Polyamid mit aromatischen Bausteinen nur 0.5 % [37]. Da diese Änderungsmöglichkeit momentan nicht gegeben war, aber trotzdem eine Alternative bei der Gehäuseherstellung vorhanden sein sollte, sind weitere Versuche mit optischer Lithographie durchgeführt worden, deren Ergebnisse im folgenden dargestellt sind.

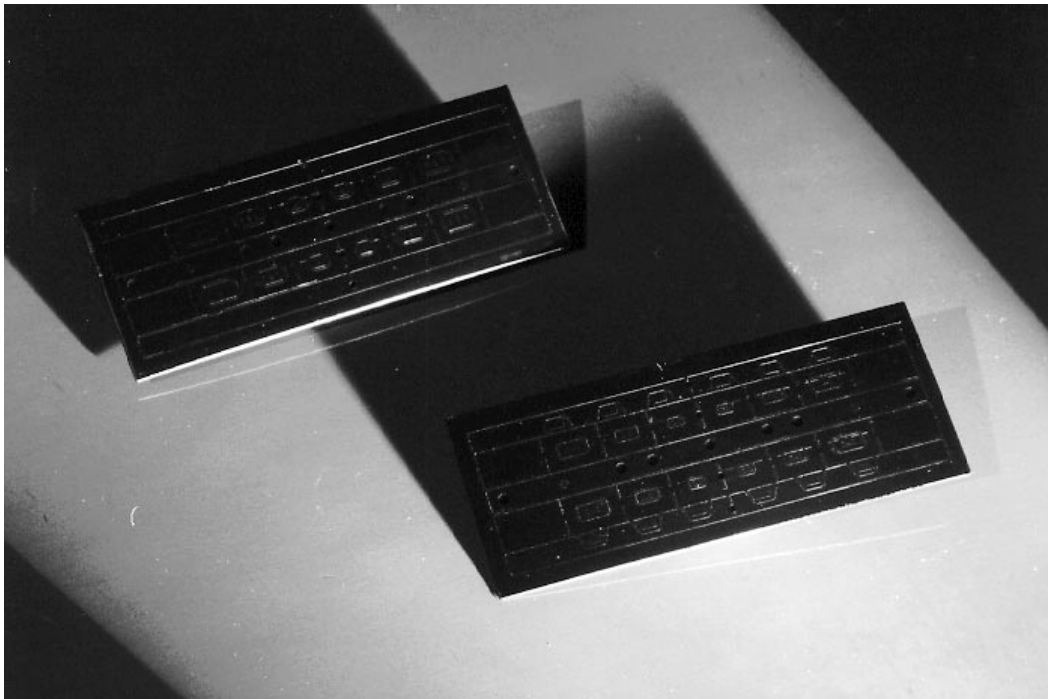


Abbildung 3.12: In leitfähigem Polyamid abgeformte Gehäuseober- und -unterteile für je 12 Mikroventile.

### Optische Lithographie

Mittels optischer Lithographie werden die Gehäuseteile direkt hergestellt. Es ist darauf geachtet worden, daß auch bei diesem Prozeß mehrere Gehäuse parallel gefertigt werden, so daß eine Produktion in großen Stückzahlen möglich ist. Hierbei war es notwendig ein geeignetes Gehäusematerial zu finden und einen zweistufigen Dickschichtprozeß zu entwickeln. In diesem Prozeß wurde der Aufbau von zwei unterschiedlich strukturierten  $25\ \mu\text{m}$  dicken Polyimidschichten übereinander auf seine Machbarkeit und Maßgenauigkeit hin untersucht.

In Abb. 3.13 und 3.14 ist die Herstellung der Mikroventilgehäuse schematisch skizziert. Für die Gehäuseunterteile ergibt sich folgende Prozeßfolge (s. Abb. 3.13): Als Substrat wird eine  $125\ \mu\text{m}$  dicke Kaptonfolie verwendet, die schon Öffnungen für die Fluidanschlüsse aufweist. Im ersten Schritt wird auf diese Kaptonfolie eine Metallschicht (Chrom-Gold) als Elektrode aufgedampft. Die Chromschicht ist nur wenige nm dick und dient nur als Haftvermittler, die Goldschicht ist  $300\ \text{nm}$  dick. Anschließend wird eine photostrukturierbare Polyimidschicht (XU348) aufgeschleudert, so daß nach dem Prebake, der Belichtung, der Entwicklung und dem Hardbake eine strukturierte,  $25\ \mu\text{m}$  dicke Schicht vorhanden ist. Diese Strukturen bilden die Stege um die

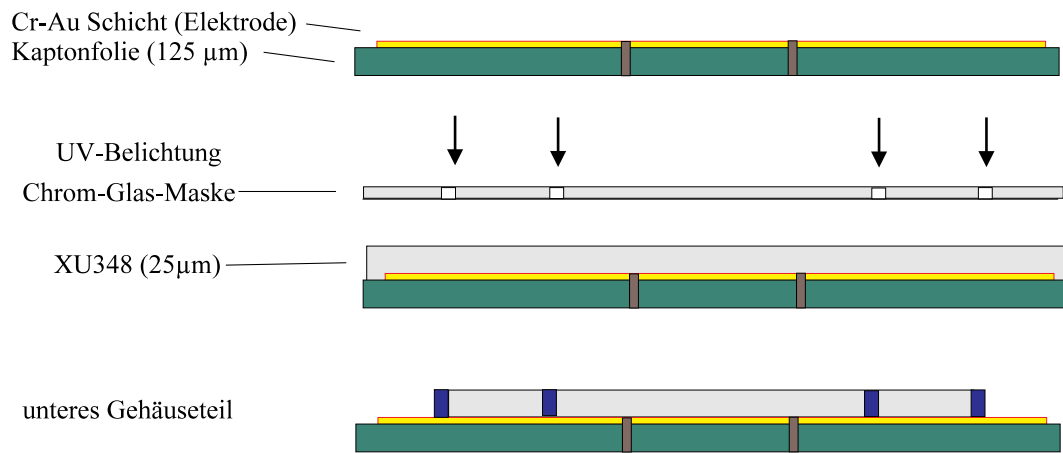


Abbildung 3.13: Herstellungsprozesse für die unteren Mikroventilgehäuse.

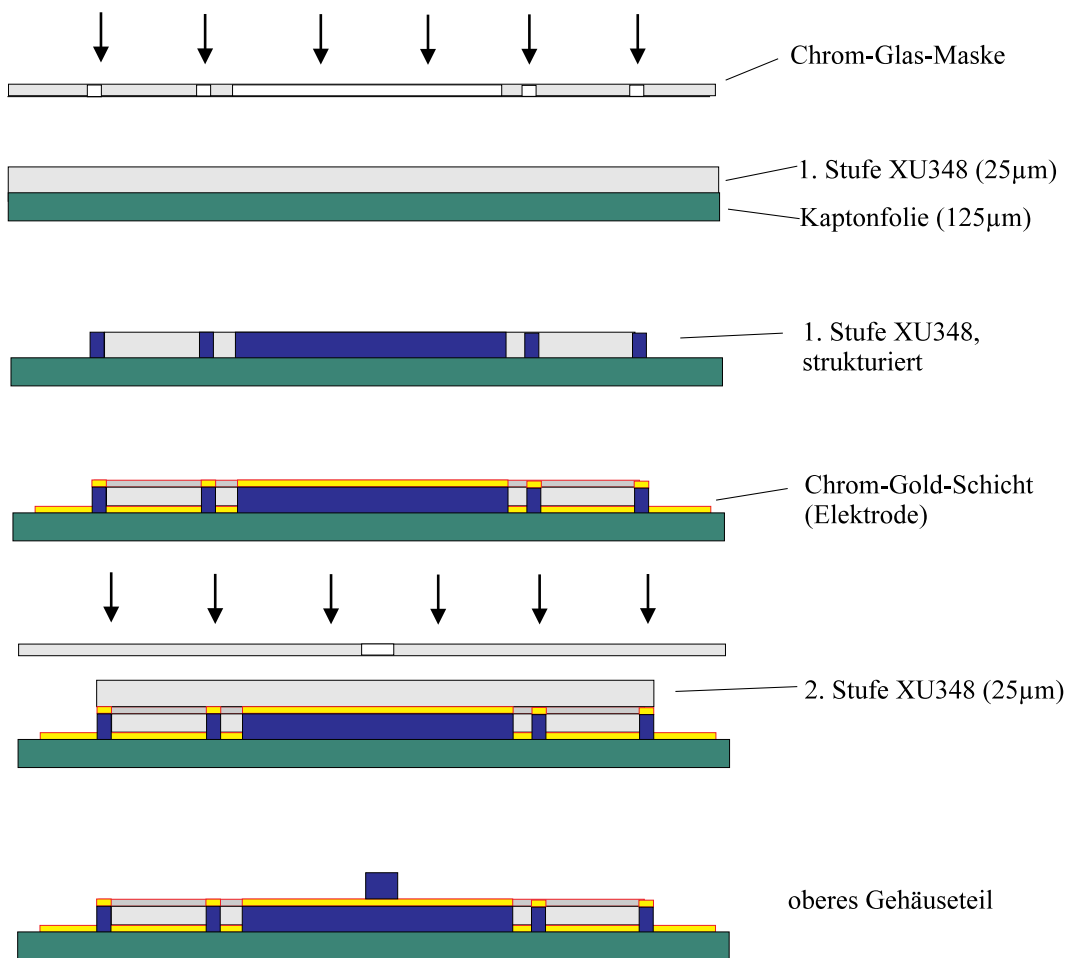
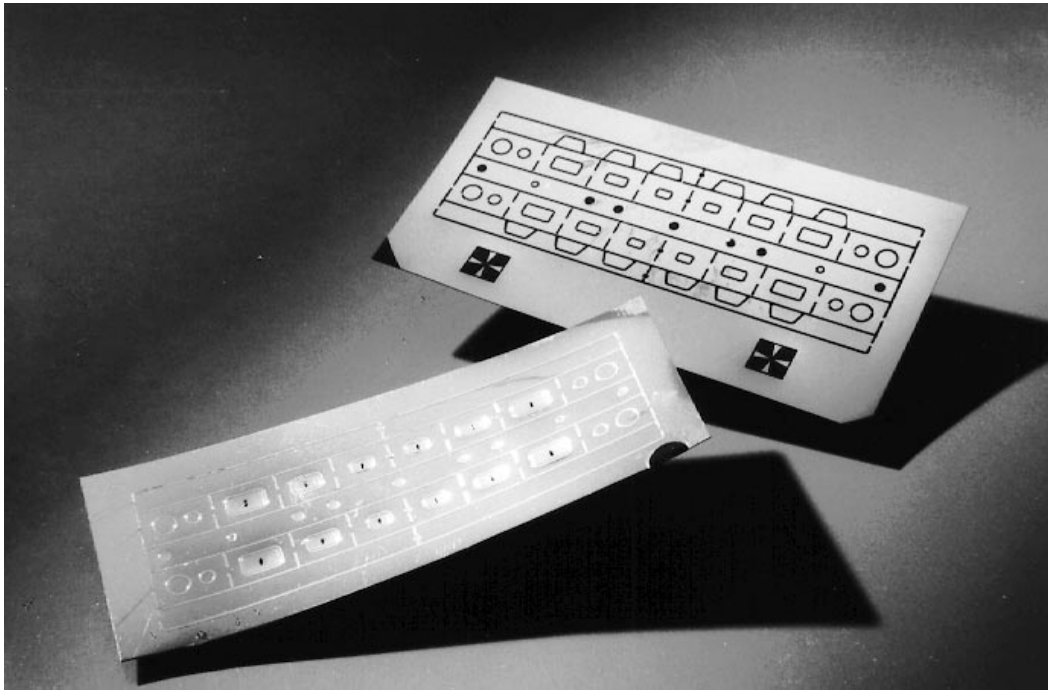


Abbildung 3.14: Herstellungsprozesse für die oberen Mikroventilgehäuse.



**Abbildung 3.15:** Mittels optischer Lithographie hergestellte Mikroventilgehäuse für 12 Mikroventile.

Ventilkammer. Für die Gehäuseoberteile wird diese Prozeßfolge leicht modifiziert und erweitert (s. Abb. 3.14): Zunächst wird direkt auf die Kaptonfolie die Polyimidschicht aufgeschleudert und mit einer anderen Maske belichtet und strukturiert. Dann wird die Chrom-Gold-Elektrode aufgedampft. Und anschließend wird die zweite ebenfalls  $25\ \mu\text{m}$  dicke Polyimidstufe darauf aufgebaut. Diese zweite Stufe bildet den Abstandshalter und muß maßgenau zur Steghöhe der unteren Ventilkammer passen. Dies konnte durch die entsprechenden Prozeßdaten beim Aufschleudern und Ausbacken erreicht werden. Der Fügeprozeß mit der 3-Schicht-Membran und die Kontaktierung laufen genauso ab, wie mit abgeformten Gehäuseteilen. Die mit optischer Lithographie hergestellten oberen und unteren Gehäuseteile für je 12 Mikroventile sind in Abbildung 3.15 dargestellt.

In Abbildung 3.16 ist das komplette elektrostatische Mikromembranventil mit elektrischen und fluidischen Anschlüssen zu sehen. Die Gehäuse wurden mit der Abformmethode hergestellt. Als Größenvergleich dient ein Streichholz.

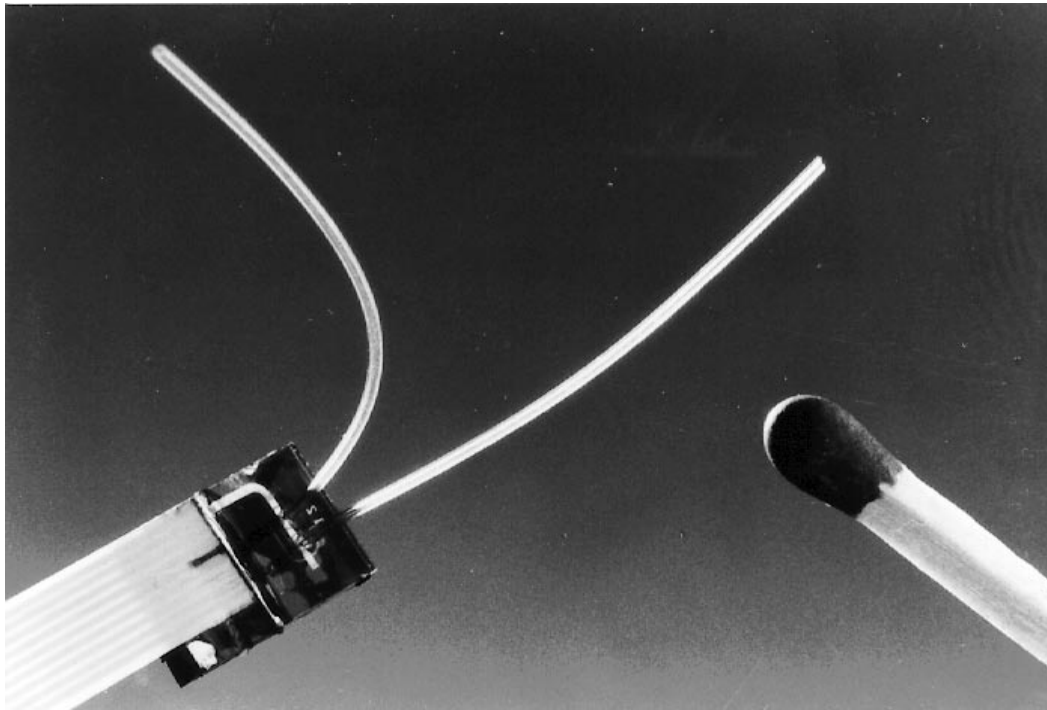


Abbildung 3.16: Komplettes elektrostatisches Mikromembranventil im Größenvergleich zu einem Streichholz.

## 3.4 Charakterisierung

### 3.4.1 Funktionsnachweis des elektrostatischen Aktors

Zuerst wurde die Funktion des elektrostatischen Aktors nachgewiesen. Die Spannung liegt zwischen einer Gehäuseelektrode und der Membran an. Mit wachsender Spannung, d. h. mit steigenden elektrostatischen Kräften zwischen den Elektroden, legte sich die Membran immer mehr an das Gehäuse an. Bei einer Spannung von 60 V ist es gelungen, die Membran mit ihrer Maximalfläche an die Gehäuseelektrode anzulegen. In diesem Zustand waren die Gehäuseöffnungen, der Ein- und Auslaß, vollständig verschlossen. Es hat sich gezeigt, daß eine  $1\ \mu\text{m}$  dicke Schicht zur Isolation ausreicht. Durch diese Isolationsschicht ist auch gleichzeitig der minimale Elektrodenabstand gegeben, der die Größe der elektrostatischen Kräfte bestimmt. Es gab aber auch Mikroventile, bei denen Spannungen von 90 V bis maximal 150 V nötig waren, um diesen Zustand zu erreichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte dieser Sachverhalt nicht allein nur durch veränderte Ventilgeometrien begründet werden. Um einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Maximalspannung und Ventilgeometrie angeben zu können, müssen noch weitere Versuche durchgeführt werden. Eine mögliche Ursache für das



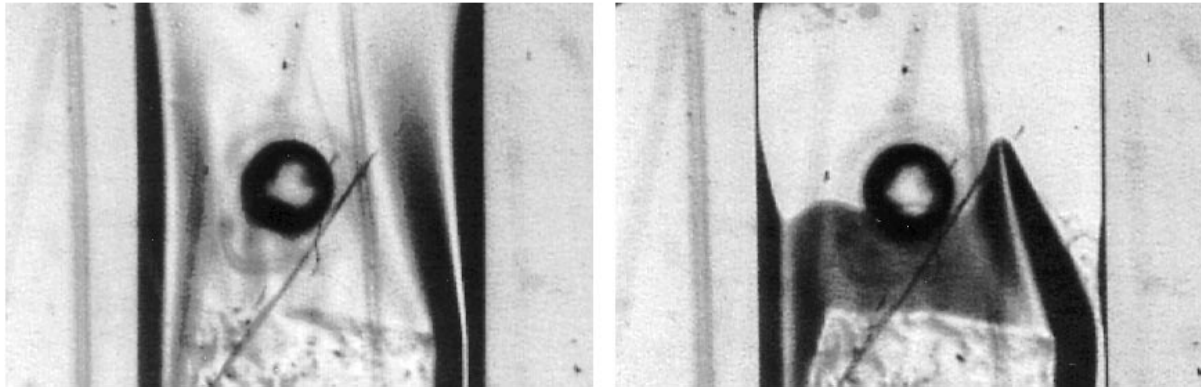


Abbildung 3.17: Mikroskopaufnahmen der Membranauslenkungen. Links: im Ausgangszustand bei 0 V, rechts: bei 60 V. Die Membranbreite beträgt  $500\ \mu\text{m}$ .

unterschiedliche Verhalten können unterschiedliche Membraneigenschaften sein. Durch die Herstellung können Membraneigenschaften leicht modifiziert werden, was direkten Einfluß auf die innere Spannung der Membran und damit auf ihre Anfangsauslenkung hat.

Um die Membranbewegung fotografieren zu können, ist ein Zwei-Elektroden-Aufbau verwendet worden. Anstelle der normalerweise verwendeten dritten Elektrode (unteres Gehäuseteil) wird ein transparentes, nicht leitfähiges PMMA-Gehäuseteil verwendet. Die Spannung liegt zwischen Membran und dem oberen Gehäuseteil an. Die Bewegung der Membran kann durch das untere Gehäuseteil hindurch beobachtet werden. Die Anzahl der Schaltzyklen lag bei über 50. Abbildung 3.17 zeigt zwei Aufnahmen, die hierbei unter dem Mikroskop mit einer Videokamera gemacht wurden. Das Mikroventil ist von der Unterseite her aufgenommen. Es ist jeweils nur eine Hälfte des Mikroventils dargestellt. Auf den Fotos ist die Membranelektrode in der Ventilkammer, der Abstandshalter im Vordergrund und eine kreisförmige Öffnung im Gehäuse zu erkennen. Links im Bild ist die Anordnung im Ausgangszustand zu sehen, wenn keine Spannung anliegt. Rechts im Bild ist die gleiche Anordnung bei einer zwischen den Elektroden angelegten Spannung von 60 V zu sehen. Man erkennt am unterschiedlichen Schattenwurf, wie sich die Membran aufgrund der elektrostatischen Kräfte an die Gehäuseelektrode anlegt. An den hellen Stellen liegt die Membran am Gehäuse an, an den dunklen Stellen ist sie über den Abstandshalter gespannt. Die ungleichmäßige Faltenbildung ist in den nachfolgenden Designs durch einen breiteren Abstandshalter vermieden worden.

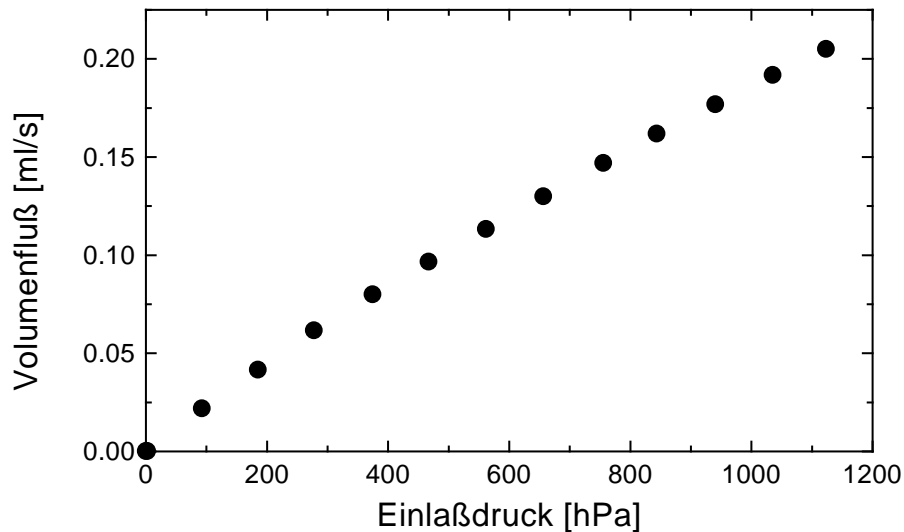


Abbildung 3.18: Volumenflußmessung in Abhängigkeit von den Einlaßdrücken

### 3.4.2 Volumenflußmessung

Anschließend wurden die fluidischen Kenndaten an den vollständig kontaktierten Mikroventilen bestimmt, indem der Volumenfluß durch die geöffneten Mikroventile gemessen wurde. Das zu steuernde Medium war wiederum Stickstoff, das dem Einlaß aus einer Gasflasche zugeführt wurde. Der Meßaufbau war im wesentlichen wie in Abschnitt 2.3.4 (Abb. 2.29) beschrieben, kleine Änderungen ergaben sich wegen des neuen Aktorprinzips. Die Drücke wurden mit Silizium-Drucksensoren bestimmt und als Differenzdrücke zum Atmosphärendruck angegeben. Der Volumenfluß wurde mit einem Massendurchflußsensor mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 2\%$  bestimmt. Die gemessene Kennlinie des Volumenflusses durch das geöffnete Mikroventil in Abhängigkeit vom anliegenden Einlaßdruck ist in Abbildung 3.18 aufgetragen. Die Ventilkammerhöhe betrug  $25\ \mu\text{m}$ . Mit steigenden Einlaßdrücken werden Volumenflüsse von maximal  $0.2\ \text{ml/s}$  bei einem Differenzdruck von  $1100\ \text{hPa}$  erreicht .

# Kapitel 4

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Mikroventile für den Einsatz in chemischen und medizinischen Analysesystemen zum Schalten von Gasen entwickelt, die sich durch eine kleine Baugröße und einen geringen Energiebedarf auszeichnen. Die Mikroventile verbrauchen weder im geöffneten noch im geschlossenen Zustand Leistung, sondern es wird nur zum Schalten Energie zugeführt. Das hat den großen Vorteil, daß weder das steuernde Fluid noch das Mikroventil unnötig aufgeheizt werden. Die dazu notwendigen Herstellungsprozesse sind kostengünstig und für eine Massenfertigung geeignet. Die zwei entwickelten Mikroventiltypen sind:

1. das bistabile (elektro-thermo-)pneumatische Mikroventil,
2. das elektrostatische Mikromembranventil.

Die Maximal-Abmessungen dieser Ventile betragen  $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$ . Im ersten Fall wurde ein Verfahren zur Herstellung einer bistabil ausgewölbten Polyimid-Folie entwickelt. Die Folie bleibt auch ohne von außen anliegenden Druck in ihrer jeweiligen stabilen Position. Die zwei stabilen Zustände der Folie werden ausgenutzt, um das Mikroventil zu schließen bzw. zu öffnen. Dadurch wird nur zum Schalten zwischen diesen beiden Zuständen Energie benötigt. Das kann pneumatisch über einen kurzzeitig in der Aktorkammer anliegenden Über- bzw. Unterdruck erfolgen oder elektro-thermo-pneumatisch, indem mit Hilfe einer stromdurchflossenen Heizwendel die nötigen Drücke in der Aktorkammer erzeugt werden. Der Stellweg bzw. der Hub des Mikroventils ist aufgrund des Aktorprinzips sehr groß, was einen hohen Volumenfluß sichert. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber den meisten anderen Aktorprinzipien. Es wurden Finite-Elemente-Simulationen mit ABAQUS durchgeführt, die bestätigen, daß sich bei den ermittelten

Prozeßparametern bistabil ausgewölbte Folien einstellen. Die Rechnungen können dazu benutzt werden, für zukünftige Mikroventile Designregeln aufzustellen.

Die Gehäuse der bistabilen Mikroventile wurden in Kunststoffabformtechnik aus PM-MA und PSU hergestellt. Dies ist ein kostengünstiger, vollautomatischer Prozeß, der auf eine Massenproduktion ausgelegt ist. Die Zykluszeit für einen im Spritzguß gefertigten Nutzen von 20 Mikroventilen betrug 8 min. Die hierfür benötigten Formeinsätze wurden mit feinmechanischen Methoden hergestellt. Es wurden erstmals in die Formeinsätze integrierte Stifte verwendet, die einen Durchmesser von nur  $200\ \mu\text{m}$  bei einer Höhe von  $500\ \mu\text{m}$  besitzen und Einspritzdrücken von bis zu 800 bar standhalten. Dadurch konnten die Einlaßöffnungen im Gehäuse abgeformt werden. Die Gehäuse und die Folie wurden in einer speziell entwickelten Kammerklebetechnik zusammengefügt. Auch diese Technik eignet sich für die Produktion großer Stückzahlen, da die Mikroventile im Nutzen verklebt werden können. Durch diesen Fügeprozeß wird gleichzeitig die Auswölbung der Folie erreicht.

Durch eine weitere Funktionsebene mit einer quasi-freitragenden Heizwendel erhält das Mikroventil einen elektro-thermo-pneumatischen Antrieb. Die Herstellung wurde erfolgreich demonstriert. Hierzu war es nötig, den Prozeß mit Methoden der optischen Lithographie und einer speziellen Übertragungstechnik für Polyimidmembranen zu ergänzen. Für die speziellen Anforderungen der unterschiedlichen Heizphasen wurde eine elektronische Regelung entworfen und in ersten Versuchen am Mikroventil getestet.

Um die bistabile Folie zu charakterisieren, wurden Oberflächenprofilanalysen durchgeführt und mit analytisch berechneten Profilen verglichen. Bei einem Radius der Aktorkammer von 1.5 mm beträgt die maximale Auswölbung einer  $25\ \mu\text{m}$  dicken Folie  $122\ \mu\text{m}$ , bei 1 mm Radius  $65\ \mu\text{m}$ . Außerdem wurden Kraft-Weg-Diagramme für die bistabile Folie aufgenommen, um das Schaltverhalten des Mikroventils genauer zu bestimmen. Die Folien wechseln in den zweiten stabilen Zustand, wenn sie über ihre Mittellage ausgelenkt werden. Die Kraft, die die Folie auf den Ventilsitz ausübte, wurde gemessen und betrug maximal 65 mN. Es wurden Meßanordnungen aufgebaut, um an den vollständig gehäusten und mit Fluidanschlüssen versehenen Mikroventilen pneumatische Messungen durchführen zu können. Das Mikroventil wurde mit Stickstoff betrieben. Die Ergebnisse zeigen, daß die bisher gefertigten Mikroventile Einlaßdrücken bis zu 700 hPa standhalten. Die Aktordrücke, die notwendig sind, um das Mikroventil zu öffnen bzw. zu schließen, wurden ebenfalls bestimmt. Die erforderlichen Schließdrücke lagen im Bereich von 150 hPa bis 350 hPa Überdruck, die Öffnungsdrücke im Bereich um 30 hPa Unterdruck. Die gemessenen Volumenflüsse durch das geöffnete Mikroventil

erreichten Werte bis zu 0.4 ml/s bei einem über dem Ventil abfallenden Differenzdruck von 700 hPa. Außerdem wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretisch berechneten Volumenflüssen und den experimentellen Ergebnissen gefunden. Die Dichtigkeit des Mikroventils wurde experimentell überprüft, es ergab sich ein sehr geringer Leckfluß von maximal 1 nl/s. In einem Dauertest konnte selbst nach 15.6 Mio. Lastzyklen keine Änderung der Funktionseigenschaften der bistabilen Folie festgestellt werden.

Der zweite Mikroventiltyp, das elektrostatische Mikromembranventil, besteht aus zwei Gehäusehälften mit einer beweglichen Membran dazwischen. Alle drei Komponenten stellen Elektroden dar. Je nach angelegter Spannung bewegt sich die doppel-S-förmige Membran in der Ventilkammer und verschließt bzw. öffnet das Mikroventil. Um die Membranbewegungen zu simulieren, ist ein Finite-Elemente-Programm entwickelt worden, da keine geeignete kommerzielle Software zur Verfügung stand. Dieses Programm ermöglicht es, die Kopplung zwischen Membranauslenkung und elektrostatischem Feld zu berücksichtigen. Damit wurden die kritischen Öffnungsdrücke des Mikroventils in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung numerisch berechnet. Für zukünftige Designs besteht anhand der Konstruktionszeichnung und der Materialparameter die Möglichkeit, sie vor der Fertigung zu testen und zu optimieren, so daß Herstellungskosten eingespart werden können.

Die bewegliche Membran besteht aus zwei Isolationsschichten, die eine leitfähige Schicht umschließen. Zur Herstellung dieser 3-Schicht-Membran wurde ein Verfahren entwickelt. Jede der drei Schichten wurde unterschiedlich strukturiert und die Membran anschließend auf die Gehäuseteile übertragen. Die Mikroventilgehäuse wurden auf zwei Arten hergestellt, einerseits mittels Abformung, andererseits mittels optischer Lithographie. Die Strukturhöhe der zur Abformung benötigten gestuften Formeinsätze betrug nur 25  $\mu\text{m}$ . Sie konnten mit der erforderlichen Präzision mit feinmechanischen Methoden gefertigt werden. Mit diesen Formeinsätzen wurden erstmals Abformungen im Spritzgußverfahren mit elektrisch leitfähigen Polymeren für den Einsatz in Mikroventilen durchgeführt. Das verwendete leitfähige Polyamid besitzt einen spezifischen Durchgangswiderstand von  $10^3 \Omega\text{cm}$ , im Vergleich zu  $10^{15} \Omega\text{cm}$  für ungefülltes Polyamid.

Für die Herstellung der Mikroventilgehäuse mittels optischer Lithographie sind auf 125  $\mu\text{m}$  dicken Kaptonfolien die 25  $\mu\text{m}$  hohen Gehäusestrukturen aufgetragen und strukturiert worden. Für die Gehäuseoberteile wurde ein maßgenauer und positionierter zweistufiger Dickschichtprozeß angewandt. Mit speziellen Justiertechniken bei der Verklebung wurden die Gehäuseteile und die 3-Schicht-Membran paßgenau zusammen-

gefügt. Durch optimierte Parameter beim Fügeprozeß wird die Beweglichkeit der Membran gewährleistet.

Die Funktion des elektrostatischen Aktors wurde nachgewiesen. Bei einer Spannung von 60 V legte sich die 3-Schicht-Membran mit ihrer Maximalfläche an die Gehäuseelektrode an. Es wurde festgestellt, daß eine 1  $\mu\text{m}$  dicke Polyimidschicht zur Isolation der Membranelektrode ausreicht. Die gemessenen Volumenflüsse erreichen bei den elektrostatischen Mikroventilen maximal 0.2 ml/s bei einem Differenzdruck von 1100 hPa.

In der vorliegenden Arbeit wurden Mikroventile zum Schalten von Gasen entwickelt, die sich durch eine kleine Baugröße und einen geringen Energiebedarf auszeichnen. Die vorgestellten Herstellungsverfahren erlauben eine Fertigung in hohen Stückzahlen. Angeordnet zu einem Array, in Kombination mit Mikropumpen, Sensoren und einer entsprechenden Signalverarbeitung können intelligente Mikrofluidsysteme aufgebaut werden, die in chemischen Analysesystemen, in der Umwelt- und Medizintechnik neue Möglichkeiten eröffnen.

# Literaturverzeichnis

- [1] W. Menz, P. Bley, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, VCH Verlag, Weinheim, (1993).
- [2] S. Büttgenbach, *Mikromechanik*, Stuttgart, Teubner, (1991).
- [3] J. W. Gardner, P. N. Bartlett, *Application of Conducting Polymer Technology in Microsystems*, Sensors and Actuators A 51, (1995), pp. 57-66.
- [4] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, *Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming and Plastic Molding (LIGA-Process)*, Microelectronic Engineering 4, (1986), pp. 35-36.
- [5] E. Westkämper, H.-W. Hoffmeister, J. Gäbler, *Spanende Mikrofertigung*, F&M 104, (1996), No. 7-8, pp. 525-248.
- [6] T. Schaller, W. Bier, G. Linder, K. Schubert, *Mechanische Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen*, F&M 102, (1994), No. 5-6, pp. 274-278.
- [7] Micro Electro Mechanical Systems (MEMS); Marktstudie der System Planning Corporation; 1429 North Quincy Street, Arlington, Virginia 22207; July 1., (1994).
- [8] R. Zengerle, *Stand der Technik bei mikrofluidischen Aktoren*, F&M 104 (1996) 4, pp. 241-248.
- [9] R. Roßberg, B. Schmidt, S. Büttgenbach, *Micro Liquid Dosing System*, Microsystem Technologies 2, (1995), pp. 11-16.
- [10] M. Esashi, *Integrated Micro Flow Control Systems*, Sensors and Actuators A 21-23, (1990), pp. 161-167.

- [11] H.-P. Trah, H. Baumann, C. Döring, H. Goebel, T. Grauer, M. Mettner, *Micro-machined Valve with Hydraulically Actuated Membrane Subsequent to a Thermoelectrically Controlled Bimorph Cantilever*, Sensors and Actuators A 39, (1993), pp. 169-176.
- [12] J. Fahrenberg, W. Bier, D. Maas, W. Menz, R. Ruprecht, W. K. Schomburg, *Microvalve System Fabricated by Thermoplastic Molding*, Proc. MME'94, Pisa, (1994), pp. 178-181.
- [13] W. Riethmüller, W. Benecke, *Thermally Excited Silicon Microactuators*, IEEE Transactions on Electron Devices, 35, (1988), No. 6, pp. 758-763.
- [14] H. Jerman, *Electrically-Activated, Normally-Closed Diaphragm Valves*, Proc. Transducers'91, (1991), pp. 1045-1048.
- [15] K. Yanagisawa, H. Kuwano, A. Tago, *An Electromagnetically Driven Microvalve*, Proc. Transducers'93, Yokohama, Japan, June 7-10, (1993), pp. 102-105.
- [16] D. Bosch, B. Heimhofer, G. Mück, H. Seidel, U. Thumser, W. Welsler, *A Silicon Microvalve with Combined Electromagnetic/Electrostatic Actuation*, Sensors and Actuators A 37-38, (1993), pp. 684-692.
- [17] M. A. Huff, J. R. Gilbert, M. A. Schmidt, *Flow Characteristics of a Pressure-Balanced Microvalve*, Proc. Transducers'93, Yokohama, Japan, June 7-10, (1993), pp. 98-101.
- [18] M. A. Huff, J. R. Gilbert, M. A. Schmidt, *Flow Characteristics of a Pressure-Balanced Microvalve*, Proc. Transducers '93, Yokohama, Japan, (1993), pp. 98-101.
- [19] S. Shoji, B. van der Schoot, N. de Rooij, M. Esashi, *Smallest Dead Volume Microvalve for Integrated Chemical Analyzing Systems*, Proc. Transducers'91, San Francisco, (1991), pp. 1052-1055.
- [20] M. Esashi, S. Shoji, A. Nakano, *Normally closed Microvalve and Micropump Fabricated on a Silicon Wafer*, Sensors and Actuators 20, (1989), pp. 163-169.
- [21] K. D. Skrobanek, M. Kohl, S. Miyazaki, *Stress-Optimised Memory Microactuator*, Proc. 3rd ICIM/ECSSM'96, Lyon, (1996), pp. 499-504.



- [22] A. D. Johnson, *J. Micromech. Microeng.*, 1, (1991), pp. 34-41; A. D. Johnson, E. J. Shahoian, *Recent Progress in Thin Film Shape Memory Microactuators*, IEEE (1995), pp. 216-220.
- [23] E. Quandt, K. Seemann, *Magnetostrictive Thin Film Transducers for Applications in Microsystem Technology*, Proc. Actuator'96, Bremen, June 26-28, (1996), pp. 279-282.
- [24] M. Shikida, K. Sato, S. Tanaka, Y. Kawamura, Y. Fujisaki, *Electrostatically Actuated gas Valve with Large Conductance*, Proc. Transducers'93, Yokohama, Japan, June 7-10, (1993), pp. 94-97.
- [25] Redwood Microsystems, Datenblatt *The Fluistor Microvalve*, Menlo Park (CA), USA, (1993). Euro Sensors, Datenblatt, *Gas Valve Normally Closed*, Modell 4425, London, UK, (1993).
- [26] M. J. Zdeblick, R. Anderson, J. Jankowski, B. Kline-Schoder, L. Christel, R. Miles, W. Weber, *Thermopneumatically Actuated Microvalves and Integrated Electro-Fluidic Circuits*, Proc. Actuator'94, Bremen, June 15-17, (1994), pp. 56-60.
- [27] B. Hälg, *On a Micro-Electro-Mechanical Nonvolatile Memory Cell*, Transaction on Electron Device, 37, (1990), No. 10, pp. 2230-2236.
- [28] T. Lisec, M. Kreutzer, B. Wagner, *A Bistable Pneumatic Microswitch for Driving Fluidic Components*, Proc. Transducers'95 - Euroensors IX, Stockholm, June 25-29, (1995), pp. 309-312.
- [29] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Verlag, 2nd ed., (1959).
- [30] J. H. Babaei, R.-S. Huang, Ch. Y. Kwok, *A New Bistable Microvalve Using an SiO<sub>2</sub> Beam as the Movable Part*, Proc. Actuator'94, Bremen, (1994), pp. 34-37.
- [31] D. S. Popescu, D. C. Dascalu, M. Elwenspoek, T. Lammerink, *Silicon Active Microvalves Using Buckled Membranes for Actuation*, Proc. Transducers'95 - Euroensors IX, Stockholm, June 25-29, (1995), pp. 305-308.
- [32] D. S. Popescu, M. Elwenspoek, T. S. J. Lammerink, *Buckled Membranes for Microstructures*, Proc. MEMS'94, Oiso, Japan, (1994), pp. 188-192.

- [33] T. Lisec, S. Hoerschelmann, H. J. Quenzer, B. Wagner, W. Benecke, *Thermally Driven Microvalve with Buckling Behaviour for Pneumatic Applications*, Proc. MEMS'94, Oiso, Japan, (1994), pp. 13-17.
- [34] W. Wagner, *Strömungstechnik und Druckverlustberechnung*, Vogel Verlag, 2. Aufl., (1990).
- [35] P. Gravesen, J. Branebjerg, O. S. Jensen, *Microfluidics - a Review*, J. Micro-mech. Microeng. 3, (1993), pp. 168-182.
- [36] M. A. Huff, M. S. Mettner, T. A. Lober, M. A. Schmidt, *A Pressure-Balanced Electrostatically-Actuated Microvalve*, Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, (1990), pp. 123-127.
- [37] K. Biederbick, *Kunststoffe*, Vogel Verlag, 4. Aufl., (1977).
- [38] B. Büstgens, W. Bacher, W. Menz, W. K. Schomburg, *Micropump Manufactured by Thermoplastic Molding*, Proc. MEMS'94, Oiso, Japan, (1994), pp. 18-21.
- [39] D. Maas, B. Büstgens, J. Fahrenberg, W. Keller, D. Seidel, *Application of Adhesive Bonding for Integration of Microfluidic Components*, Proc. Actuator'94, Bremen, (1994), pp. 75-78.
- [40] D. Maas, B. Büstgens, J. Fahrenberg, W. Keller, P. Ruther, W. K. Schomburg, D. Seidel, *Fabrication of Microcomponents Using Adhesive Bonding Techniques*, Proc. MEMS'96, San Diego, February 11-15, (1996), pp. 331-336.
- [41] J. Fahrenberg, D. Maas, W. Menz, W. K. Schomburg, *Active Microvalve System Manufactured by the LIGA-Process*, Proc. Actuator'94, Bremen, (1994), pp. 71-74.
- [42] LEE Hydraulische Miniaturkomponenten GmbH, Component Catalog, Postfach 560324, 60407 Frankfurt.
- [43] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, *Taschenbuch der Mathematik*, 23. Aufl., Harri Deutsch Verlag, Thun und Frankfurt/Main, (1981).
- [44] E. Riedel, *Allgemeine und Anorganische Chemie*, de Gruyter Verlag, 4. Aufl., (1988).
- [45] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 5.-8. Aufl., Harri Deutsch Verlag, Thun und Frankfurt/Main, (1986).

- [46] Dissertation Burkhard Büstgens, Universität Karlsruhe, (1995), FZKA 5856, Forschungszentrum Karlsruhe.
- [47] Studienarbeit J. Bohnenberger, Forschungszentrum Karlsruhe, (1996).
- [48] Wissenspeicher Fluidtechnik, ISBN 3-343-00246-1.
- [49] Jürgen Daniel, persönliche Mitteilung.
- [50] C. Gerthsen, H. O. Kneser, H. Vogel, *Physik*, 15. Aufl., Springer Verlag, (1986).
- [51] Sensor Technics GmbH, *Pressure Sensor Handbook 1994/1995*, Puchheim, (1994).
- [52] Digital GC Flowmeter, CS-Chromatographie Service GmbH.
- [53] H. Domininghaus, *Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, ISBN 3-18-400846-0, VDI Verlag, Düsseldorf, (1988).
- [54] I. Szabo, *Höhere Technische Mechanik*, 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin, (1977).
- [55] Dubbel, *Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Verlag, Berlin, (1990).
- [56] B. Krevet, W. Kaboth, *Kopplung von Finite-Elemente-Programmen zur Simulation komplexer Systeme*, FZKA-Nachrichten, Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 28, 2-3, (1996), pp. 224-232.
- [57] D. Seidel, B. Büstgens, W. Keller, D. Maas, *Aufbau- und Verbindungstechniken für die Kleinserienfertigung von Mikropumpen*, 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik am Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5670, (1995).
- [58] M. Shikida, K. Sato, T. Harada, *Micromachined S-Shaped Actuator*, Proc. 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, (1995), pp. 167-172.
- [59] M. Shikida, K. Sato, *Characteristics of an Electrostatically-driven Gas Valve under High-pressure Conditions*, Proc. MEMS'94, Oiso, Japan, (1994), pp. 235-240.
- [60] M. Shikida, K. Sato, S. Tanaka, K. Takeshita, S. Suzuki, *Response Time Measurement of Electrostatic S-Shaped Film Actuator Related to Environmental Gas Pressure Conditions*, Proc. MEMS'96, San Diego, February 11-15, (1996), pp. 210-214.
- [61] M. Shikida, persönliche Mitteilung.

- [62] M. A. Huff, M. S. Mettner, T. A. Lober, M. A. Schmidt, *A Pressure-Balanced Electrostatically-Actuated Microvalve*, Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, SC, (1990), pp. 123-127.
- [63] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, W. Menz, W. K. Schomburg, *Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms*, J. Micromech. Microeng. 6, (1996), pp. 77-79.
- [64] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, W. Menz, W. K. Schomburg, *Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms*, Proc. Transducers'95 - Euro-sensors IX, Stockholm, June 25-29, (1995), pp. 59-60. Proc. MME'95, Kopenhagen, (1995), pp. 108-111.
- [65] B. Wagner, H. J. Quenzer, S. Hoerschelmann, T. Lisec, M. Juerss, *Bistable Microvalve with Pneumatically Coupled Membranes*, Proc. MEMS'96, San Diego, February 11-15, (1996), pp. 384-388.
- [66] J. Branbjerg, P. Gravesen *A New Electrostatic Actuator Providing improved Stroke length and Force*, Proc. MEMS'92, Travemünde, February 4-7, (1992), pp. 6-11.
- [67] T. Giesler, J.-U. Meyer, *Electrostatic Excitation and Capacitive Detection of Flexural Plate-waves*, Sensors and Actuators A 36, (1993), pp. 113-119.
- [68] T. Giesler, J.-U. Meyer, *Electrostatically Excited and Capacitively Detected Flexural Plate Waves on Thin Silicon Nitride Membranes with Chemical Sensor Applications*, Sensors and Actuators B 18-19, (1994), pp. 103-106.
- [69] B. Schmidt, S. Howitz, *Design and Fabrication of an Electrically Actuated Micromachined Flow Valve*, Proc. MME'90, Berlin, (1990).
- [70] V. Fronz, *Kupfer direkt auf Polyimid*, Metalloberfläche 44, (1990), No. 5, pp. 237-240.
- [71] J. Y. Pan, P. Lin, F. Masech, S. D. Senturia, *Verification of FEM Analysis of Load Deflection Methods for Measuring Mechanical Properties of Thin Films*, Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, SC, (1990), pp. 70-73.
- [72] J. W. Beams, *Mechanical Properties of Thin Films of Gold and Silver*, Structure and Properties of Thin Films, C. A. Neugebauer, Ed. New York, Wiley, (1959), pp. 183-192.

- [73] J. A. Thornton, D. W. Hoffman, *Stress-Related Effects in Thin Films*, Thin Solid Films, 171, (1989), pp. 5-31.
- [74] O. S. Jensen, P. Gravesen, *Flow Characteristics of a Micromachined Diaphragm Valve Designed for Liquid Flows above 1ml/min*, J. Micromech. Microeng. 3, (1993), pp. 236-238.
- [75] T. Ohnstein, T. Fukiura, J. Ridley, U. Bonne, *Micromachined Silicon Microvalve*, Proc. MEMS'90, Napa Valley, (1990), pp. 95-98.
- [76] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, R. Ruprecht, W. K. Schomburg, *Electrostatically Actuated Polymer Microvalve Equipped with a Movable Membrane Electrode*, Proc. MME'96, Barcelona, October 21-22, (1996), pp. 231-234.
- [77] J. Zierep, *Grundzüge der Strömungslehre*, Verlag G. Braun, Karlsruhe, (1982).

## Anhang

Liste häufig verwendeter Symbole (nach Themengebieten geordnet)

$E$	Elastizitätsmodul
$\sigma$	Spannung
$W_{ind}$	Energie
$l, b, d$	Länge, Breite, Dicke der Platte
$s(x)$	Kurvenform vertikaler Auslenkung für eine rechteckige Platte
$s_0$	maximale Auslenkung
$a_i$	Amplitude
$\varepsilon$	Dehnung
$\alpha$	Ausdehnungskoeffizient
$T$	Temperatur
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$Q$	Wärmemenge
$c$	spezifische Wärmekapazität
$m$	Masse des Körpers
$V$	Aktorkammervolumen
$W$	Strömungswiderstand
$p$	Druck
$R_L$	Gaskonstante
$\tau$	Relaxationszeit
$d_i$	Innendurchmesser
$\eta$	Viskosität
$\rho$	Dichte
$\phi$	Durchmesser der Aktorkammer
$h$	Aktorkammerhöhe
$R$	elektrischer Widerstand
$\sigma_{el}$	elektrische Leitfähigkeit
$\rho_{el}$	spezifischer Widerstand
$\alpha_R$	Temperaturkoeffizient
$l, b, t, A$	Länge, Breite, Dicke, Querschnitt der Heizwendel

$w(r)$	Auslenkung für eine kreisförmige Platte
$w_0$	maximale Auslenkung
$u$	radiale Verschiebung
$W_i$	Energie
$d$	Plattendicke
$a$	Radius
$D$	Plattensteifigkeit
$\nu$	Querkontraktionszahl
$q$	Last
$A$	Querschnittsfläche des Kanals
$L$	Länge des Kanals
$B$	Breite des Kanals
$H$	Höhe des Kanals
$U$	benetzter Umfang
$\nu = \eta/\rho$	kinematische Viskosität
$\eta$	dynamische Viskosität
$v$	Geschwindigkeit
$\rho$	Dichte des Fluids
$Re_L = vL/\nu$	Reynoldszahl
$X_e$	Einlaufstrecke
$D_h = 4A/U$	hydraulischer Durchmesser
$p_e$	Einlaßdruck
$p_a$	Auslaßdruck
$Q_v$	Volumenfluß am Auslaß
$C$	Reibungskoeffizient
$\xi$	für Schlitzblende: 41
$f$	Druckverlustkoeffizient
$c_s$	Schallgeschwindigkeit
$v_m = Q/A$	mittlere Fluidgeschwindigkeit
$F$	elektrostatische Kraft
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_r$	Dielektrizitätszahl
$A = lb$	Fläche der Kondensatorplatte
$U$	Spannung
$s$	Elektrodenabstand

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Menz für die sehr gute wissenschaftliche Betreuung und hilfreiche Unterstützung dieser Arbeit sowie Herrn Prof. Munz, der freundlicherweise das Korreferat übernommen hat.

Des weiteren danke ich den Herren Dr. Bacher und Dr. Schomburg für die sehr gute Betreuung, Diskussion und Zusammenarbeit sowie Herrn Dr. Krevet für seine Hilfe bei der Entwicklung des FEM-Programms.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des Institutes für ihre Hilfsbereitschaft und gute Zusammenarbeit, insbesondere meinen Zimmerkollegen Herrn Dr. Büstgens und Herrn Dipl.-Ing. Martin für hilfreiche Diskussionen und wertvolle Anregungen.

Außerdem danke ich den Mitarbeitern weiterer Institute des Forschungszentrums für die sehr gute, institutsübergreifende Zusammenarbeit, die auf vielfältige Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Doktorandenstipendiums des Forschungszentrums Karlsruhe.



## Lebenslauf

Name: Claudia Goll geb. Speck

Geburtsdatum: 15.4.69

Geburtsort: Karlsruhe

Familienstand: verheiratet

Konfession: römisch-katholisch

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung: 1975 - 1979 Grundschule in Elchesheim  
1979 - 1988 Gymnasium in Durmersheim  
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

Studium: Beginn zum Wintersemester 1988/89  
Diplom-Studiengang Physik an der Universität Karlsruhe

1990 Diplom-Vorprüfung

1992/93 wissenschaftliche Hilfskraft an der Fakultät für  
Physik der Universität Karlsruhe

1992 Beginn der Diplomarbeit am Physikalischen Institut  
der Universität Karlsruhe bei Prof. v. Löhneysen  
Thema:  
„Magnetische Eigenschaften der Schwer-Fermion-Systeme  
 $\text{CeCu}_{6-x}\text{Pd}_x$  und  $\text{CeCu}_5\text{Au}$ “

1993 Diplom-Hauptprüfung

Promotion: seit 1.3.1994 Promotion am Institut für Mikrostrukturtechnik  
des Forschungszentrums Karlsruhe bei Prof. Menz