

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6511

Entwicklung eines magnetisch-induktiven
Mikroventils nach dem AMANDA-Verfahren

Stefan C. Kaiser

Institut für Mikrostrukturtechnik

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften von der Fakultät für Maschinenbau der Universität
Karlsruhe genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2000

Entwicklung eines magnetisch-induktiven Mikroventils nach dem AMANDA-Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

an der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte
Dissertation

von Dipl.-Phys. Stefan Christian Kaiser
aus Germersheim

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 2000

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile
Korreferent: Prof. Dr. G. Bretthauer

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein Beitrag zur Entwicklung und Herstellung von kostengünstigen Mikroventilen mit magnetisch-induktivem Antrieb geleistet und an Demonstratoren die Funktionsweise des Antriebs nachgewiesen werden. Die Grundlagen für eine Serienfertigung dieser Mikrokomponenten mit dem kostengünstigen AMANDA-Verfahren wurden erarbeitet.

Das Mikroventil verbraucht im geschlossenen Zustand keine Energie und die Ventilmembran des geöffneten Ventils befindet sich in der Nähe eines labilen Gleichgewichtes, so dass nur wenig Energie benötigt wird, um das Ventil geöffnet zu halten. Bei Abschalten der Aktorkraft schließt das Ventil von alleine wieder.

Die Ventilmembran steht unter einer mechanischen Druckspannung, so dass sie sich gegen den Ventilsitz wölbt und ihn verschließt. In der Membran ist eine Leiterbahn aus Gold angebracht und außen an den Ventilen werden zwei Magnete montiert. Ein elektrischer Strom durch die Leiterbahn ruft eine Lorentzkraft hervor, die auf die Membran wirkt und sie vom Ventilsitz abhebt und damit das Ventil öffnet. Mit Hilfe von FEM-Magnetfeldsimulationen wurde die Geometrie für das Mikroventil bestimmt. Die Abmessungen des Ventils betragen $1,8 \times 12 \times 1,5 \text{ mm}^3$, zusammen mit den Permanentmagneten aus Eisen-Neodym-Bor und einem Joch zur Erzeugung eines externen Magnetfelds sind die Gesamtabmessungen $16 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$.

Zur Herstellung des Mikroventils wurde das kostengünstige AMANDA-Verfahren eingesetzt und weiterentwickelt. Dazu wurden Verfahren zur Herstellung von Gehäuseteilen untersucht. Das Heißprägen, das am Institut für Mikrostrukturtechnik am Forschungszentrum Karlsruhe möglich ist und hier erstmals im Zusammenhang mit dem AMANDA-Verfahren eingesetzt wurde, erwies sich dabei als günstigste Abformtechnik. Durch das senkrechte Eintauchen des Formeinsatzes in das Halbzeug sind beim Heißprägen die lateralen Belastungen des Formeinsatzes erheblich geringer als beim Spritzguss, bei dem der Formstoff mit Drücken bis zu 800 bar seitlich eingespritzt wird. Es wurden erstmals beidseitig abgeformte Gehäuseteile mit Heißprägen hergestellt. Die mit dem AMANDA-Verfahren im Nutzen hergestellten Komponenten wurden bisher mit einer Wafersäge vereinzelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mittels beidseitiger Abformung Bruchkanten in den Nutzen vorgesehen und erstmals fertig verklebte Nutzen durch Brechen vereinzelt. Entlang der Bruchkanten wurde eine Klinge angesetzt und mit einem Schlag wurden die Nutzen zerteilt. Durch die Führung der Klinge in den abgeformten Bruchkanten liegt die Genauigkeit der Vereinzlung bei ca. $20 \mu\text{m}$.

Die Ausbeute der Kammerklebetechnik wurde dadurch von ca. 30 % auf ca. 85 % gesteigert, dass die Nutzen vor der Verklebung in einem Sauerstoffplasma aktiviert und die Ventilauslassöffnungen verschlossen werden.

Zur Charakterisierung der Mikroventile wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Bei den Tests mit Stickstoff konnte das Schaltverhalten der Membran im Magnetfeld nachgewiesen werden. Außerdem konnte das erwartete Hysterese-Verhalten der Membran reproduzierbar beobachtet werden. So bewegte sich die Membran bei einem Strom von 150 mA aus der Ruheposition, konnte dann mit einem verringerten Strom von 50 mA gehalten werden und schnappte nach der Absenkung unter 50 mA in die Ruhelage zurück. Bei Tests mit Wasser waren die Ventile dicht bis 35 hPa, bei Druckluft bis 70 hPa. Dauertests zeigten, dass die Ventilmembran zukünftig in einer Goldschicht eingeschlossen werden muss, damit sie beim Kontakt zum Wasser nicht quillt und dadurch die Funktion des Mikroventils beeinträchtigt wird.

Development of a microvalve with magnetic inductive actuation employing the AMANDA process

In the course of the work described in this paper a contribution for the development and production of cost-effective microvalves with a magnetic inductive actuation was provided and the functionality of the actuation was demonstrated. The basis for the series production of the microcomponents with the AMANDA process was established.

The microvalve is normally closed and the valve membrane is near a labile equilibrium in the opened state, so once switched only little power is consumed to keep the valve open. Removing the actor force closes the microvalve automatically.

The valve membrane is subject to mechanical stress giving it a convex shape and thereby sealing a valve seat. Inside the membrane is a gold conductor and two permanent magnets with yoke are placed on the outside of the valve. An electric current running through the conductor produces a Lorentz force, acting on the membrane and lifting it of the valve seat, thereby opening the valve. The geometry of the microvalve was determined with FEM-simulation of the magnetic field. The size of the valve is $1,8 \times 12 \times 1,5 \text{ mm}^3$ and with the iron-neodym-bor permanent magnets and yoke to create an external magnetic field the size of the valve is $16 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$.

For the production of the microvalve the cost-effective AMANDA process was employed and further developed. Techniques for the production of valve housings were examined. The hot embossing, available at the Institute for Mikrostructure Technology at the Karlsruhe Research Center, was used for the first time in combination with the AMANDA process and proved to be the most convenient molding technique. Due to the vertical movement of the molding tool into the molding material lateral stress on the microstructures on the molding tool is considerably smaller than that created by injection molding, where the mold is injected horizontally with pressure up to 800 bar. For the first time double sided hot embossing was performed on the microvalve batches. Since now the components produced with the AMANDA process were separated with a wafer saw. In the course of the work presented here breaking edges were designed into the valve batches and for the first time completely glued microcomponents were separated by means of breaking. A cutter blade was inserted into the breaking edges and the batch diced with one blow. Due to the guidance of the cutter blade in the molded breaking edges the precision of the breaking is ca. $20 \mu\text{m}$.

The yield of the chamber glueing technique was raised from ca. 30 % to ca. 85 % by activating the batches in an oxygen plasma and sealing the valve openings before glueing.

The microvalves were characterized in tests with water and nitrogen. The tests with nitrogen showed the switching behavior of the membrane in the magnetic field. The expected hysteresis effect of the membrane was shown. The membrane moved from its resting position after raising the electrical current over 150 mA and stayed in the deflected state until the electrical current was reduced to 50 mA. After reducing the electrical current further, the membrane returned to its resting position. Tests with water showed no leakage up to 35 hPa, with nitrogen up to 70 hPa. Long-term tests showed, that in the future the valve membrane has to be covered by a gold layer to prevent the swelling of the membrane inhibiting the functioning of the microvalve.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	THEORETISCHE VORÜBERLEGUNGEN	3
2.1	Konzeptionsgrundlagen	5
2.1.1	Vorgabe „normally closed“ Ventil	5
2.1.2	Vorgabe Differenzdruck am Auslass von 100 hPa	7
2.1.3	Vorgabe Volumenströme bis 50 $\mu\text{l}/\text{min}$	7
2.1.4	Vorgabe Aktorprinzip Lorentzkraft	8
2.1.5	Vorgabe maximale Leistungsaufnahme < 5 mW	9
2.2	Magnetfeld	11
2.3	FEM-Simulation der magnetischen Flussdichte	13
2.4	Zusammenfassung der theoretischen Designüberlegungen	17
3	DURCHFÜHRUNG	18
3.1	Das AMANDA-Verfahren	19
3.2	Herstellung von Gehäuseteilen	20
3.2.1	Spritzgießen	20
3.2.2	Heißprägen	22
3.2.3	Lichtinduziertes Reaktionsgießen	24
3.2.4	Rapid Micro Product Development	25
3.2.5	Optische Lithographie mit EPON-SU8	25
3.2.6	Nutzenherstellung mittels LASER	29
3.2.7	Vergleich der Fertigungsverfahren	31
3.2.8	Restschicht und Grate	32
3.3	Membranübertragung und Kontaktierung	32
3.3.1	Kammerklebetechnik	32
3.3.2	Leitkleben	37
3.3.3	UV-Kleben	38
3.4	Formeinsätze	39
3.4.1	Herstellung	39
3.4.2	Design	40

3.5	Membranherstellung	48
3.5.1	Schichtaufbau der Membran	49
4	ERGEBNISSE	53
4.1	Beidseitige Abformung	53
4.1.1	Beidseitiger Spritzguß	57
4.1.2	Beidseitiges Heißprägen	58
4.1.3	Andere Techniken	59
4.1.4	Vereinzelung	59
4.1.5	Stanze	62
4.2	Messungen an den Ventilen	64
4.2.1	Meßaufbau	64
4.2.2	Charakterisierung	65
4.2.3	Thermisches Verhalten	66
4.2.4	Quellen der Membran	67
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	69
	LITERATURVERZEICHNIS	73

1 Einleitung

Für das Jahr 2000 wurde in einer Studie der Systems Planning Corporation über die wirtschaftliche Entwicklung von mikromechanischen Systemen ein Marktvolumen für mikrofluidische Bauteile von 2,6 Mrd US-Dollar vorausgesagt. Überraschend wird dabei fast die Hälfte des Marktvolumens durch mikromechanische Ventile eingenommen [Nex94, Nex99]. Worin besteht aber dieses große Interesse so kleiner Ventile?

Zum einen haben Mikroventile im Vergleich zu ihren makroskopischen Äquivalenten technische Vorteile. Die Miniaturisierung bringt, wie in vielen anderen technischen Bereichen auch, bei Ventilen grundlegende Verbesserungsmöglichkeiten mit sich. Das Totvolumen innerhalb eines Ventils sinkt mit abnehmender Größe, dadurch verringern sich auch die Ansprechzeiten. Stellwege von Schließmechanismen werden verkürzt, der Energieumsatz wird verkleinert und Ermüdungserscheinungen von beweglichen Teilen werden reduziert. Besonders wichtig für ein Massenprodukt ist aber der Zusammenhang zwischen der Größe eines Bauteils und dessen Herstellungspreis, der bei paralleler Fertigung (im „Batch“) oft direkt proportional zu der Fläche der Komponente ist.

Zum anderen wachsen mit der Miniaturisierung die Zahl der Anwendungsmöglichkeiten von Mikroventilen zu, weil z.B. kleine Ventile implantiert, in ein makroskopisches Gerät integriert werden können oder sehr viel kleinere Mengen handhaben helfen. Eine besondere Bedeutung in der Fluidik kommt Mikroaktoren zur Steuerung und Regelung von Volumenströmen von Flüssigkeiten und Gasen zu, den aktiven Mikroventilen. Anwendungsgebiete von Mikroventilen finden sich daher besonders im Bereich von pneumatischen oder hydraulischen Steuersystemen oder chemischen Analysesystemen, etwa bei Gaschromatographen, oder bei medizinischen und pharmazeutischen Dosieraufgaben, wie bei der Entwicklung neuer Medikamente, wo auch aus Kostengründen mit möglichst kleinen Probenmengen gearbeitet wird.

Mikroventile unterscheiden sich in ihrer Konzeption wesentlich von den Bauteilen aus der Mikroelektronik und Mikrosensorik, die weitgehend planar realisiert werden können und zwar durch ihren eindeutig dreidimensionalen Charakter. Für die Entwicklung und Herstellung von Mikroventilen in großen Stückzahlen ist daher eine besondere Technik erforderlich.

Hier bietet sich ein flexibles mikromechanisches Fertigungs- oder Produktionsverfahren an, das AMANDA-Verfahren, das am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Forschungszentrums Karlsruhe seit Anfang der 90er Jahre entwickelt wird [Sch98,Sch99a]. Das AMANDA-Verfahren beruht auf **A**bformung, **O**berflächen**m**ikrome**a**nik und **M**embran**ü**bertragung, und wird besonders zur Herstellung von mikrofluidischen Komponenten eingesetzt, sowohl im Bereich der Sensorik (Druck- und Flußsensoren [Mar98]) als auch Aktorik

(Mikropumpen [Büs94], Ventile [Fah94,Gol96,Gol97] und Entgaser [Rum99]). Der große Vorteil des AMANDA - Verfahrens ist die kostengünstige Fertigung von Mikrokomponenten aus Kunststoff in großer Stückzahl, die durch Abformtechniken und parallele Fertigung erreicht wird. Bisher existiert aber kein Ventil für sehr kleine Volumenströme, das mit einer geringen Leistungsaufnahme arbeitet.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von kostengünstigen Mikroventilen mit dem AMANDA-Verfahren und der Nachweis der Funktion des Antriebs an Demonstratoren. Das Mikroventil soll für kleine Flüsse von weniger als 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ ausgelegt sein, batteriebetrieben sein und daher eine Leistungsaufnahme von nur maximal 5 mW aufweisen. Ein zentraler Punkt der Arbeit ist es, bei der technischen Auslegung der Ventile bereits die Voraussetzungen für eine zukünftige Serienfertigung zu berücksichtigen und Lösungsvorschläge für einen kommerziellen Herstellungsprozess zu erarbeiten.

Grundlage für ein solches Ventil ist ein Antrieb, der bei geringer Leistungsaufnahme die Regelung von fluidischen Strömen erlaubt. Diese Forderungen kann ein elektromagnetischer Aktor mit einer bewegten Leiterbahn auf einer Polyimid-Membran in einem externen Magnetfeld erfüllen. Zur Umsetzung des Antriebs müssen geeignete Gehäuse und Membranen hergestellt werden und die erforderlichen Herstellungsprozesse entwickelt und erprobt werden, insbesondere im Hinblick auf eine sich anschließende kostengünstige Serienfertigung.

In dieser Arbeit werden theoretische Vorüberlegungen, die für die Konstruktion des Mikroventils maßgeblich waren, und analytische und FEM- Berechnungen des Magnetfeldes im Aktorbereich des Ventils in Kapitel 2 dargelegt. In Kapitel 3 wird das AMANDA-Verfahren, das als Grundprinzip der Ventilherstellung gewählt wurde, vorgestellt. Dabei werden verschiedene Verfahren zur Herstellung von Gehäuseteilen angewandt und verglichen, nämlich thermoplastischer Spritzguss, Heißprägen, UV-reaktives Spritzgießen, das RMPD-Verfahren [mic00], fotolithographische Strukturierung mit dem Resist EPON SU-8 und Laserablation. Ebenfalls Gegenstand des 3. Kapitels ist die Entwicklung des Herstellungsprozesses der Membran mittels Oberflächenmikromechanik, die Aufbau und Verbindungstechnik von Membran und Gehäuseteilen und die abschließende Vereinzelung der parallel im Nutzen gefertigten Ventile. Kapitel 4 beschreibt die Charakterisierung der Ventile und stellt neue Fertigungstechniken innerhalb des AMANDA-Verfahrens vor.

2 Theoretische Vorüberlegungen

Der schwierigste Teil beim Entwurf eines Mikroventils ist der Antrieb, denn in einem sehr kleinen Volumen muss ein Aktor untergebracht werden, der in der Lage ist, genügend große Kräfte zur Verfügung zu stellen. Die Energieversorgung des Aktors soll durch eine Batterie bereitgestellt werden, so dass der Antrieb eine Leistung von maximal 5 mW aufnehmen darf, um einen möglichst langfristigen Einsatz des Ventils zu erlauben.

In der Literatur finden sich zahlreiche Konzepte für den Antrieb von Mikroventilen:

Elektrostatische Ventile: Elektrostatische Ventile zeichnen sich durch geringen Energiebedarf aus, der nur für den Schaltvorgang erforderlich ist. Allerdings sinkt die Coulombkraft sehr stark mit dem Abstand der Elektroden, so dass Stellwege über 10 μm schwer realisierbar sind (vergleiche [Bra92, Bos93, Gol97, Huf93, Wag96]).

Piezoelektrische Ventile: Mit Piezokeramiken lassen sich sehr große Kräfte realisieren und es wird auch nur während des Schaltvorganges Energie verbraucht. Nachteilig ist allerdings, dass diese Aktoren nur kleine Stellwege ausführen, so dass es schwierig ist, einen größeren Ventilhub zu erreichen. Als problematisch gelten die hohen Betriebsspannungen von einigen hundert Volt, die in der Regel benötigt werden. Wenn, wie beim AMANDA-Verfahren üblich, das Ventilgehäuse aus einem Kunststoff hergestellt wird, kann als weitere Schwierigkeit hinzukommen, dass die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Keramiken sehr viel kleiner sind als der des Kunststoffes, so dass das Verhalten des Ventils leicht von Temperatureinflüssen beeinträchtigt werden kann. Beispiele für piezobetriebene Ventile finden sich in [Esa89, Rog00, Ros95, Sho91].

Thermisch betriebene Ventile: Bei Ventilen mit einem thermischen Antrieb werden thermopneumatische [Fah94, Gol96, Zde94], Bimetall- und Form-Gedächtnis-Ventile [Dit98, Göb99, Skr97] unterschieden. Ein wesentlicher Nachteil der thermisch angetriebenen Ventile sind vergleichsweise lange Schaltzyklen und geringe Wirkungsgrade, die im Widerspruch zu einem leistungsarmen Antrieb stehen.

Elektromagnetische Ventile: Es wird zwischen Ventilen mit bewegtem Magneten [Wag90, Wag91, Yan95] und Ventilen mit bewegtem Leiter unterschieden [Bos93]. Da ein bewegter Magnet mit einer großen bewegten Masse verbunden ist, ist das Verhalten eines solchen Ventils möglicherweise von der Einbaulage des Systems abhängig, was in vielen Anwendungen nicht erwünscht ist.

Aus diesem Grunde wurde in dieser Arbeit entschieden, ein Mikroventil mit magnetisch-induktivem Aktorprinzip zu konzipieren, (vergleiche Abbildung 1). Eine Membran ist zwischen

zwei Permanentmagneten derart angebracht, dass ein Ventilsitz abgedeckt wird (normally closed).

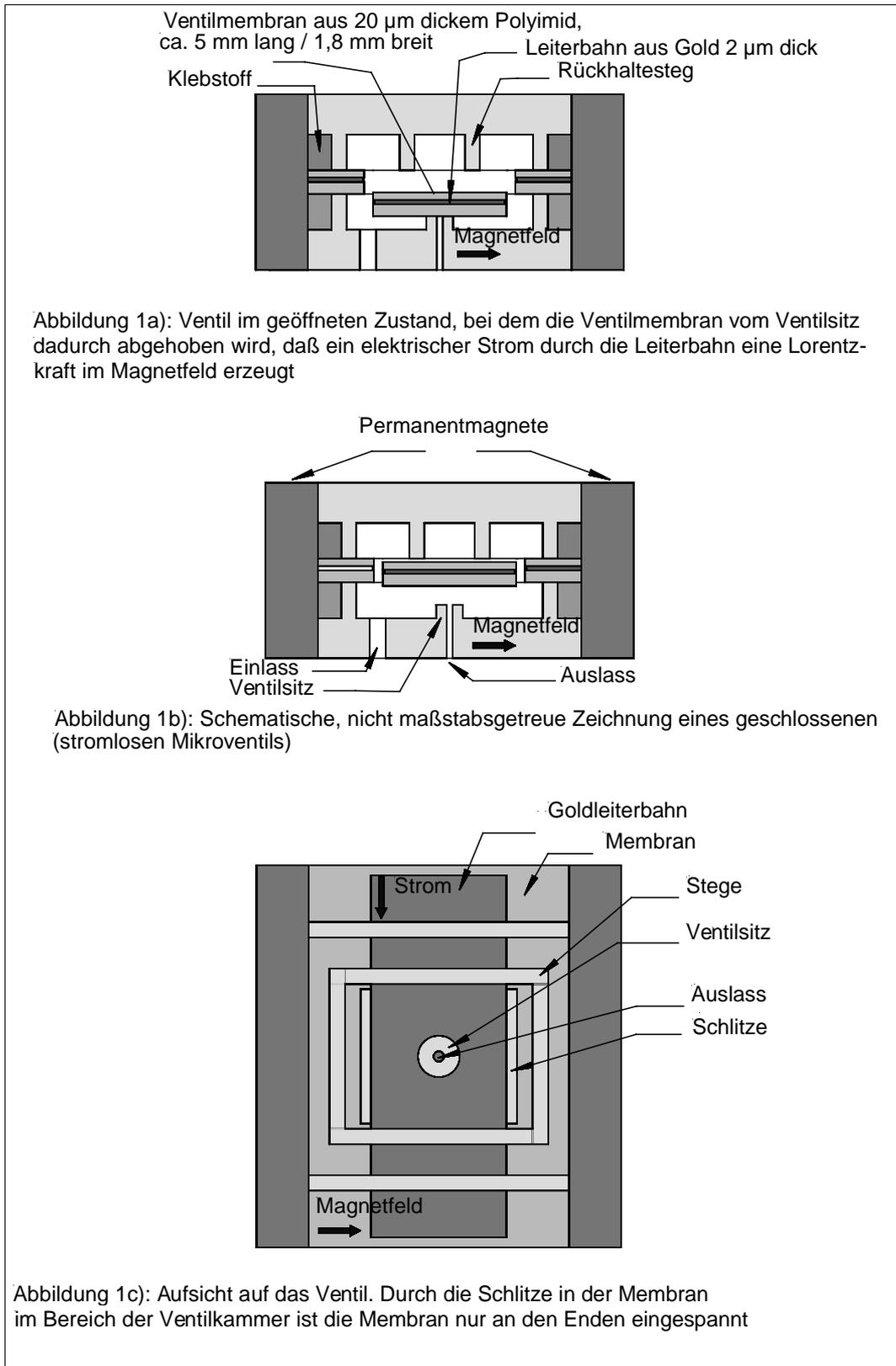


Abbildung 1: magnetisch induktives Aktorprinzip des Mikroventils

Diese Ventilmembran steht unter einer mechanischen Druckspannung, so dass sie sich auswölbt und auf den Ventilsitz gedrückt wird (Abbildung 1a). In der Membran ist eine Leiterbahn aus Gold angebracht. Wenn kein elektrischer Strom fließt, hält die mechanische Vorspannung der Membran das Ventil geschlossen.

Außen am Gehäuse des Ventils sind Permanentmagnete angebracht, so dass die Ventilmembran quer durch ein Magnetfeld verläuft. Durch einen Stromfluss durch die Leiterbahn in der Ventilmembran entsteht eine Lorentzkraft, die die Membran vom Ventilsitz abhebt. Der Strom soll so gesteuert werden, dass zunächst eine große Kraft zur Verfügung steht, um die Membran vom Ventilsitz abzuheben. Danach wird der Strom reduziert, weil sich die Membran in einer Position befindet, in der ein geringerer Strom ausreicht, um das Ventil geöffnet zu halten (Abbildung 1b). Die Membran ist in dieser Stellung in der Nähe eines labilen Gleichgewichtes, so dass die Kräfte, die zur Bewegung der Membran benötigt werden, geringer sind.

Rückhaltestege im Ventilgehäuse verhindern, daß die Membran auf die dem Ventilsitz abgewandte Seite in eine stabile Lage umschnappt und stellen sicher, dass sie beim Abschalten des elektrischen Stromes von selbst in die stabile Lage auf dem Ventilsitz zurückkehrt.

2.1 Konzeptionsgrundlagen

Die Zielsetzung ist ein Mikroventil, das folgende Leistungsdaten besitzt. Es soll

- a) im Ruhezustand geschlossen (normally closed) sein,
- b) gegen einen Differenzdruck am Auslass von mindestens 100 hPa dicht verschließen,
- c) Volumenströme bis 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ im geöffneten Zustand bei flüssigen Medien erlauben.
- d) Das Aktorprinzip ist die Lorentzkraft auf einen beweglichen elektrischen Leiter mit einer
- e) Energieaufnahme $< 5 \text{ mW}$.

Im folgenden werden die theoretischen sowie fertigungstechnischen Überlegungen zur Umsetzung dieser Leistungsdaten in ein Ventildesign dargestellt.

2.1.1 Vorgabe „normally closed“ Ventil

Durch eine Verklebung zwischen zwei Gehäuseschalen kann eine Membran frei gespannt werden. Erfolgt die Verklebung bei einer Temperatur die von der Umgebungsbedingungen abweicht, so kommt es zu inneren Spannungen des Systems Gehäuse/Membran, wenn sich die thermischen Ausdehnungskoeffizienten unterscheiden. Beim Ventil ist der Ausdehnungskoeffizient des Gehäuseteils aus PSU ($\alpha_{t,\text{PSU}} = 54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 9x größer als der thermische

Ausdehnungskoeffizient von Silizium ($\alpha_{t, \text{Si}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), auf dem die Membran bei der Verklebung fixiert ist. Werden die beiden Teile unter Temperaturerhöhung verklebt, so dehnt sich das Gehäuse weiter aus als die Membran. Sobald sich der Verbund vollständig abgekühlt hat, geht das Gehäuse auf seine ursprüngliche Abmessungen L zurück. Die Länge der verklebten Membran L_M ist von der Temperaturdifferenz bei der Verklebung ΔT abhängig. Es gilt

$$L_M = L[1 + \Delta T(\alpha_{t, \text{PSU}} - \alpha_{t, \text{Si}})] \quad (1)$$

Dadurch entsteht eine Druckspannung in der Membran, die die Membran auslenkt, sobald Membran und Gehäuse vom Silizium getrennt werden. Die maximale Auslenkung w_M der Membran in der Mitte der Ventilkammer lässt sich wie folgt berechnen:

$$w_M = \frac{1}{2} \sqrt{L_M^2 - L^2} . \quad (2)$$

Aus der Verbiegung der Membran resultiert eine Biegekraft F_M . Diese kann genutzt werden, um einen Ventilsitz „normally closed“ dicht zu verschließen (vergleiche Abbildung 2).

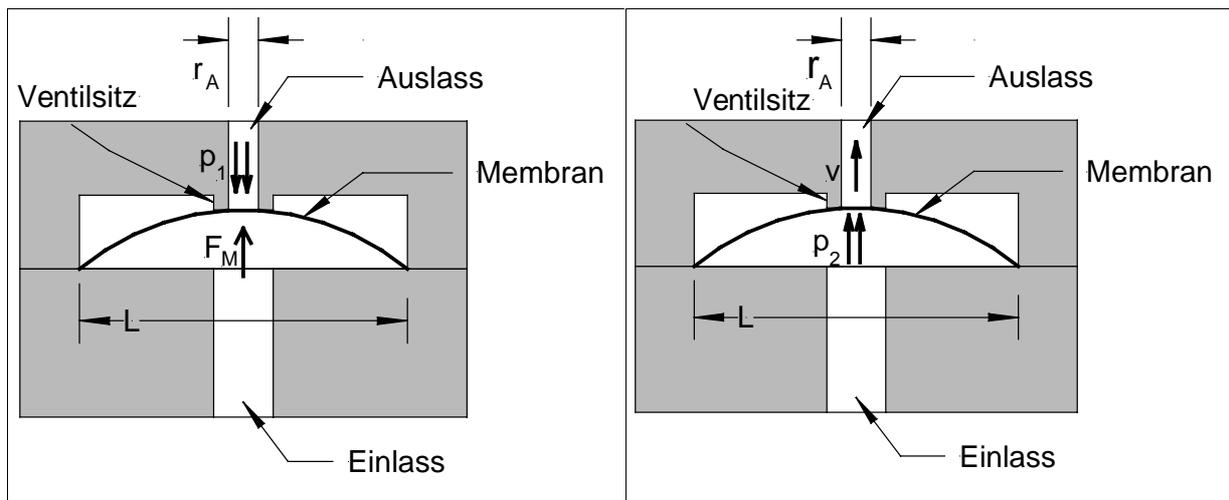


Abbildung 2: Prinzip eines normally closed Ventils, das gegen einen Differenzdruck p_1 verschließt

Abbildung 3: Förderdruck p_2 , der einen Volumenstrom v verursacht, wenn das Ventil geöffnet ist.

F_M setzt sich aus der Biegekraft des Polyimids und der der Goldleiterbahn zusammen und wird für einen beidseitig eingespannten Balken mit gleichmäßiger Flächenlast nach [Mul90] wie folgt berechnet:

$$F_M = 32 \cdot E_M \cdot b \cdot \frac{d_x^3}{L^3} \cdot w_M, \quad (3)$$

dabei ist E_M der Elastizitätsmodul der Schicht, b die Membranbreite, d_x die Schichtdicke, L die Membranlänge und w_M die Auslenkung der Membran im Zentrum der Membran.

Aus fertigungstechnischer Sicht lässt sich die Membranbreite b durch die optische Lithografie einstellen. Eine Änderung dieses Parameters erfordert deswegen die Herstellung eines kompletten Chrommaskensatzes (vergleiche Kapitel 3.4). Die Kammerlänge L kann durch Ventiltypen mit unterschiedlichen Kammerabmessungen auf dem selben Formeinsatz variiert werden, wird mit der Herstellung der Formeinsätze jedoch fixiert. Die Auslenkung w_M ist durch die Abhängigkeit von der Verklebetemperatur gemäß Formel (1) und (2) abhängig und kann bei der Herstellung nachträglich eingestellt werden. Die Schichtdicke der Polyimidmembran d_{PI} kann beim Herstellungsprozeß durch das Spincoaten sehr genau eingestellt werden, ist vollkommen vom Design der Membran und den Formeinsätzen unabhängig und hat den größten Einfluss auf die Kraft F_M , da $F_M \sim d_x^3$ ist.

Vergleicht man die Biegekräfte $F_{M,Au}$ mit $F_{M,PI}$ so erkennt man, dass bei gleicher Schichtdicke d_x die Membrankraft des Goldes $F_{M,Au} \gg F_{M,PI}$, da der Elastizitätsmodul von Gold ca. 40x größer ist als der von Polyimid ($E_{M,Au} = 78 \cdot 10^9$ Pa; $E_{M,PI} = 2 \cdot 10^9$ Pa). Um $F_{M,Au} \approx F_{M,PI}$ zu erhalten muss $d_{PI} \approx 3,4 \cdot d_{Au}$ gelten.

Ein normally closed Ventil kann also über die Biegekraft einer bei einer Temperaturerhöhung in ein Gehäuse eingeklebten Membran erreicht werden. Der maßgebliche Parameter dieser Biegekraft ist die Schichtdicke der Membran.

2.1.2 Vorgabe Differenzdruck am Auslass von 100 hPa

Der Differenzdruck p_1 von 100 hPa fällt über der gesamten Ventilöffnung an. Um die Kraft F_M , die zum Verschließen des Ventils nötig ist, zu minimieren, sollte die Fläche A der Ventilöffnung so klein wie möglich sein, damit

$$p_1 < \frac{F_M}{A} \quad (4)$$

gilt. Aus fertigungstechnischen Gründen haben Stifte, die im Formeinsatz die Ventilöffnungen festlegen, sich über einer Länge von 500 μm als sehr kritisch erwiesen, wenn sie einen Radius von 50 μm unterschreiten. Dadurch hat das Produkt von Differenzdruck und Auslassfläche $p_1 \cdot A$ für $r_A = 50$ μm einen minimalen Wert.

2.1.3 Vorgabe Volumenströme bis 50 $\mu\text{l}/\text{min}$

Um einen Volumenstrom v von 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ (≈ 1 $\mu\text{l}/\text{s}$) zu realisieren, muss ein Förderdruck p_2 von der Innenseite des Ventils beaufschlagt werden, der über dem Ventilausgang anfällt. Im geschlossenen Zustand des Ventils presst der Förderdruck p_2 die Membran auf den Ventilsitz und verschließt dadurch zusätzlich die Auslassöffnung (vergleiche Abbildung 3). Der Förderdruck berechnet sich nach [Töp88] für eine Kapillare der Länge l zu

$$p_2 = \frac{8000 \cdot \eta \cdot l \cdot v}{\pi \cdot r_A^4} \quad (5)$$

Hier gibt η die dynamische Viskosität an (bei Wasser $1,025 \cdot 10^{-2}$ Pa·s) und r_A den Radius der Kapillare, die dem Innenradius des Ventilsitzes entspricht. Die Länge der Kapillare ist durch die Dicke des Ventildeckels von $500 \mu\text{m}$ vorgegeben. Wie in Kapitel 2.1.2 gilt, dass der Radius der Ventilöffnung r_A mindestens $50 \mu\text{m}$ betragen muss. Wegen der Abhängigkeit von p_2 mit der vierten Potenz von r_A ergibt sich bei den Minimalabmessungen bereits $p_1 \approx p_2$.

Da im Ventil kein Antrieb eingebaut ist, der das Medium fördert, soll sicherheitshalber die Membrankraft groß genug sein, um auch ohne den Förderdruck p_2 bei einem Druckabfall auf der Seite der Einlassöffnung, die Auslassöffnung zu verschließen. Für die Biegekraft der Membran F_M muss daher

$$F_M > F_{p1} = p_1 \cdot \pi \cdot r_A^2 \quad (6)$$

gelten, die Kraft F_L , die das Ventil öffnet, muss größer als die Summe der Biegekraft F_M und der Förderkraft F_{p2} sein, es gilt also

$$F_L > F_M + F_{p2} = F_M + (p_1 + p_2) \cdot \pi \cdot r_A^2 \quad (7)$$

gegeben ist. Die Förderkraft muss zusätzlich gegen den Differenzdruck p_1 fördern.

Der zweite wichtige Parameter beim Design des Ventils ist damit der Radius der Auslassöffnung im Ventilsitz r_A . Wird der Radius über das Minimalmaß von $50 \mu\text{m}$ vergrößert, erhöht sich die Stabilität der Struktur und der Förderdruck p_2 sinkt zunächst schneller als p_1 steigt.

2.1.4 Vorgabe Aktorprinzip Lorentzkraft

Das Aktorprinzip beruht auf der Lorentzkraft die im externen Magnetfeld eine stromdurchflossene Leiterbahn auslenkt. Die Lorentzkraft wirkt auf bewegte elektrische Ladungen im Magnetfeld, die sie senkrecht zur magnetischen Flussdichte \mathbf{B} und zur Bewegungsrichtung ablenkt. Die Lorentzkraft ist durch den einfachen Zusammenhang

$$\vec{F}_L = L \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) \quad (8)$$

gegeben. Dabei ist I die elektrische Stromstärke und L die Länge des Weges der Ladungsträger im B-Feld und entspricht der Länge der freigespannten Membran. Die Lorentzkraft steigt mit zunehmender Stromstärke und mit der Membranlänge, ist von der Membranbreite dagegen unabhängig. Deswegen wurde der bewegte Leiter als einfache gerade Leiterbahn mit beidseitigen Kontaktfeldern zur Stromversorgung konzipiert. Um die vollständige Befüllung der Ventilkammer mit Medium und einen Druckausgleich zwischen den durch die Mem-

bran getrennten Teilen der Ventilkammer zu erreichen, wurden Schlitze in der Membran beidseitig der Leiterbahn vorgesehen.

Damit das Ventil schalten kann, muss die Lorentzkraft F_L mindestens größer als die Membrankraft F_M sein. Der dritte Parameter, der die Kräfte im Ventil beeinflusst, ist die Kammerlänge L .

2.1.5 Vorgabe maximale Leistungsaufnahme < 5 mW

Die Vorgabe der maximalen Leistungsaufnahme P des Ventils von 5 mW ist eine Einschränkung für die elektrische Stromstärke I , die linear in die Lorentzkraft F_L eingeht. Um einen möglichst hohen Strom I zu erreichen, muss nach der Formel für die Leistung $P = R \cdot I^2$ bei konstanter Leistung der elektrische Widerstand R der Membran möglichst gering gehalten werden. Der elektrische Widerstand der Leiterbahn auf der Membran kann durch Material mit niedrigem spezifischen elektrischem Widerstand (Gold: spezifischer elektrischer Widerstand $\rho_{Au}: 2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ bei 20 °C) und durch eine hohe Schichtdicke und Schichtbreite erreicht werden.

Eine weiterer Aspekt zur Reduzierung der notwendigen Leistung zur Öffnung des Ventils ist das Membranverhalten. Im ausgelenkten Zustand befindet sich die Membran in einer stabilen Lage, in der Nulllage befindet sich die Membran in einer labilen Lage. Dadurch kann die Lorentzkraft zum Offenhalten des Ventils verringert werden, wenn verhindert wird, dass die Membran in einen zweiten stabilen Zustand auf der vom Ventilsitz abgewandten Position springt. Das Umschnappen verhindern Rückhaltesteg in der gegenüberliegenden Ventilkammerhälfte (vergleiche Abbildung 4). Kann der Strom zum Halten des Ventils auf ein Drittel reduziert werden, so sinkt die Verlustleistung auf 11 %.

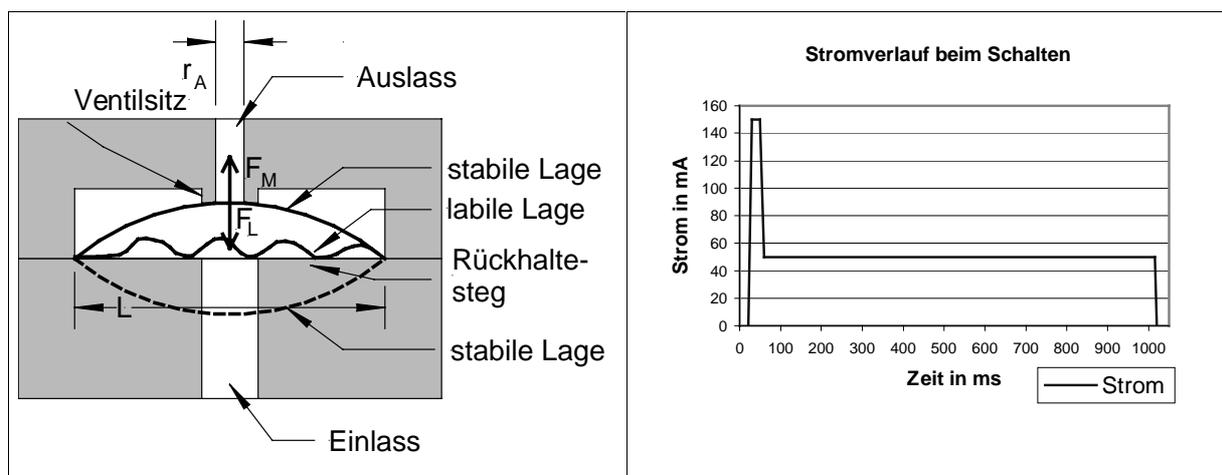


Abbildung 4: Kräfte im Ventil, die bei der Öffnung auftreten. Die Membran nimmt eine labile Lage um die Nullposition ein und wird dort durch Rückhaltesteg gehalten.

Abbildung 5: Schematischer Stromverlauf beim Öffnen des Ventils. Durch die Reduzierung des Schaltstroms in einen geringeren Haltestrom kann die Verlustleistung deutlich verringert werden.

Da das Umschnappen der Membran innerhalb weniger Millisekunden geschieht, die Abgabe von Fluid dagegen im Rahmen von Sekunden stattfinden kann, ist der Schaltstrom bei der energetischen Betrachtung des Ventils vernachlässigbar. Abbildung 5 zeigt den geplanten Stromverlauf für einen Schaltvorgang schematisch. Wird der Strom abgeschaltet, springt die Membran aufgrund der Biegekraft wieder in den Ausgangszustand zurück.

In Abbildung 6 sind die Kräfteverhältnisse im Ventil in Abhängigkeit der Polyimidmembrandicke zwischen 1 und 25 μm dargestellt. Dabei sind $r_A = 60 \mu\text{m}$ (um eine größere Stabilität der Struktur zu erreichen), die Golddicke $d_{Au} = 2 \mu\text{m}$, die Membranbreite $b = 700 \mu\text{m}$, die magnetische Flussdichte $B = 0,95 \text{ T}$ und die Verklebetemperatur $T = 90^\circ\text{C}$ (dadurch ΔT zur Raumtemperatur 65K).

Daraus folgt, dass die Polyimidschicht mindestens eine Dicke von 12 μm aufweisen muss, um dicht zu verschließen und maximal eine Dicke von 23 μm aufweisen darf, damit die Lorentzkraft F_L bei einer Leistungsaufnahme von 5 mW die Membrankraft F_M überwinden kann.

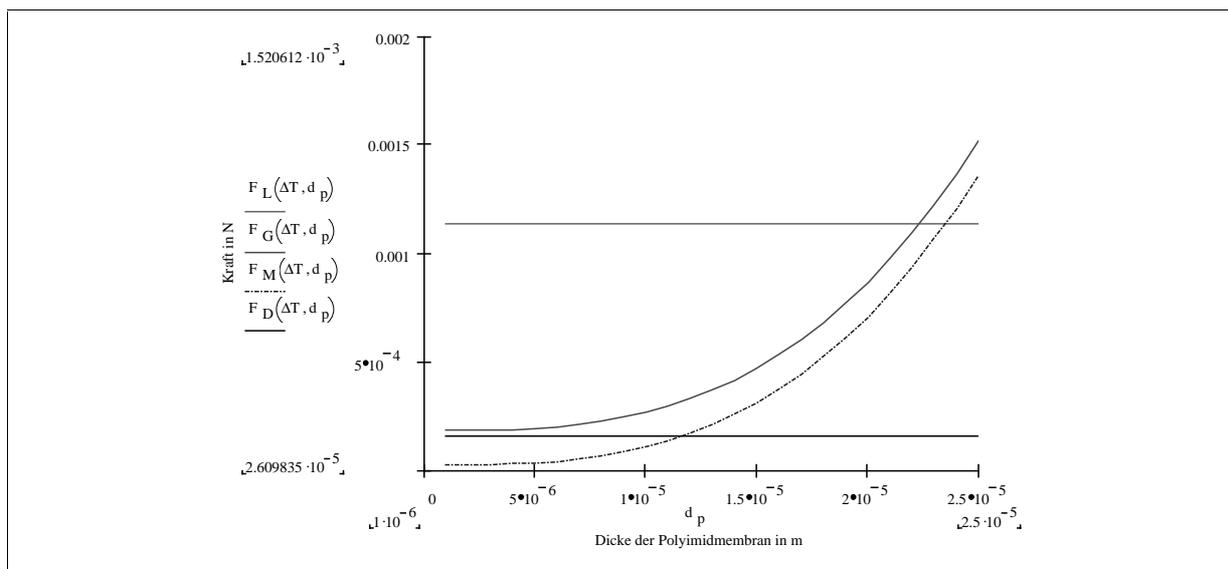


Abbildung 6: Kräfteverhältnisse im Ventil bei unterschiedlicher Polyimidmembrandicke. Damit das Ventil funktioniert, muss $F_L > F_M + F_D = F_G$ und $F_M > 2 F_{p1} = F_D$ gelten.

In Abbildung 7 ist die Abhängigkeit der Verklebetemperatur von der Membrankraft dargestellt. $F_{L5\text{mW}}$ gibt dabei die erreichbare Lorentzkraft bei 5 mW Leistungsaufnahme an, die einem Strom von 250 mA entspricht, F_L gibt die Lorentzkraft bei einem Strom von 150 mA an, bei der eine Öffnung des Ventils, das mit einer Verklebetemperatur von 90 $^\circ\text{C}$ gefügt wurde, beobachtet werden konnte.

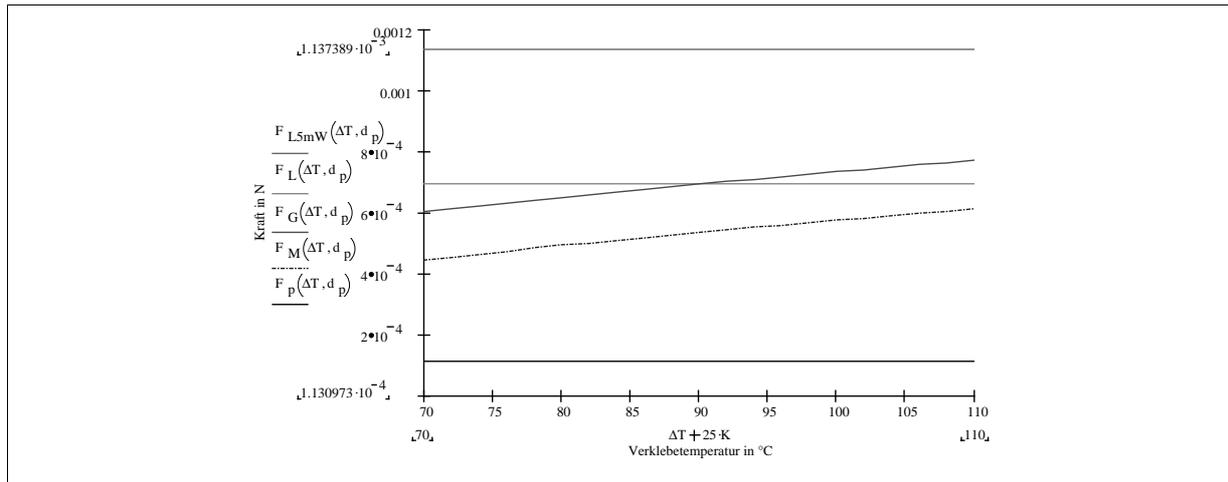


Abbildung 7: Kräfteverhältnisse im Ventil bei unterschiedlicher Verklebetemperatur, $F_M + F_D = F_G$

2.2 Magnetfeld

Die Lorentzkraft, deren Abhängigkeit durch Gleichung (8) gegeben ist, weist zwar keine direkte Abhängigkeit von der Membranbreite b auf, die magnetische Flussdichte zwischen zwei Magneten ist allerdings nicht konstant und hängt vielmehr sowohl von der Magnetisierung der Permanentmagnete als auch von der Anordnung der Magnete und deren Geometrie ab. Insbesondere ist die Spaltbreite zwischen den beiden Magneten von erheblichem Einfluss. Die magnetische Flussdichte eines quaderförmigen Permanentmagneten mit Länge l , Breite $2 \cdot b$ und Dicke $2 \cdot d$ in der Entfernung x vom Zentrum der Stirnfläche (vergleiche Abbildung 8) der Magneten berechnet sich nach [Dex99] zu

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{x+l}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + (x+l)^2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + x^2} \right) \right]. \quad (9)$$

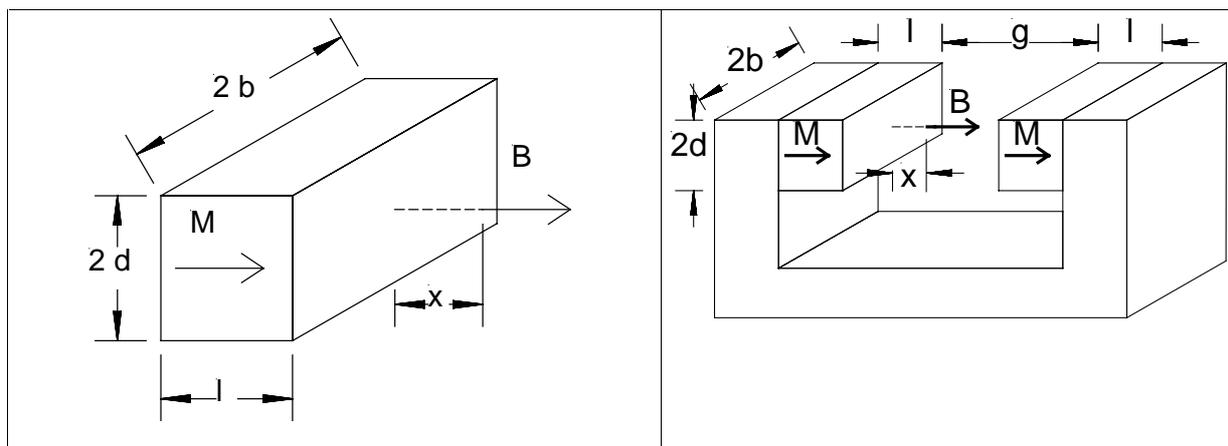


Abbildung 8: Quaderförmiger Permanentmagnet mit einer Magnetisierung M

Abbildung 9: Zwei quaderförmige Permanentmagnete mit Eisenjoch

In Gleichung 9 bezeichnet B_r die Remanenz der Permanentmagnete. Der erste Term gibt dabei den Beitrag von der linken Seite des Magneten, der rechte Term den Beitrag der

rechte Seite der Magnete an. Die Flussdichte in einem Punkt außerhalb der Symmetrieachse ist erheblich komplexer, da die drei Komponenten B_x , B_y und B_z berechnet werden müssen und die Gleichungen an sich aufwendiger werden.

Die magnetische Flussdichte \mathbf{B} von zwei quaderförmigen Permanentmagneten, die durch ein Joch miteinander verbunden und durch einen Luftspalt der Breite g getrennt sind (vergleiche Abbildung 9), kann mit dem Superpositionsprinzip berechnet werden, indem die Beiträge der beiden Magnete addiert werden. \mathbf{B}_1 bezeichnet die Flussdichte des linken quaderförmigen Permanentmagneten mit der Länge $2 \cdot l$ in der Entfernung x , die auf der Verbindungslinie der Zentren der Permanentmagneten liegt, und \mathbf{B}_2 die Flussdichte des rechten Magneten mit dem Abstand $g - x$. Dabei wird näherungsweise angenommen, dass das Eisenjoch nicht gesättigt ist und kein Leckfluss außerhalb des Luftspalts stattfindet.

Die Flussdichte \mathbf{B} ergibt sich dann aus der Summe von \mathbf{B}_1 und \mathbf{B}_2 gemäß:

$$B_1 = \frac{B_r}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{x + 2 \cdot l}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + (x + 2 \cdot l)^2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + x^2} \right) \right], \quad (10)$$

$$B_2 = \frac{B_r}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{g - x + 2 \cdot l}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + (g - x + 2 \cdot l)^2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{g - x}{d \cdot b} \sqrt{d^2 + b^2 + (g - x)^2} \right) \right]. \quad (11)$$

In Abbildung 10 sind die Berechnungen der magnetischen Flussdichte für Spaltbreiten von 1,5 bis 7 mm dargestellt. Für Spaltbreiten über 3 mm fällt das Magnetfeld zur Mitte des Luftspaltes hin stark ab. Erst ab einer Spaltbreite unter 3 mm wird das Magnetfeld auf der Mittellinie zwischen den Permanentmagneten homogen. In Abbildung 11 zeigt sich, dass die mit einer Hallsonde gemessenen Werte der magnetischen Flußdichte im Luftspalt zwischen den Permanentmagneten mit einem Korrekturfaktor von 1,2 mit den analytisch berechneten Werten übereinstimmen. Der Korrekturfaktor wird darauf zurückgeführt, dass im Experiment das magnetische Feld nicht völlig leckfrei durch das Joch geführt wird. Bei den Magneten handelte es sich um Samarium-Cobalt Permanentmagneten mit Außenabmessungen von $5 \times 5 \times 1,5 \text{ mm}^3$ und einer Magnetisierung von 0,8 T senkrecht zu der $5 \times 5 \text{ mm}^2$ Oberfläche. Um für weitere Tests eine ausreichend große magnetische Flussdichte zu erreichen wurden Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete verwendet mit einer Magnetisierung senkrecht zur größten Fläche, Remanenz B_r von 1,280 T und Abmessungen von $15 \times 7 \times 4,5 \text{ mm}^3$ [Mag96].

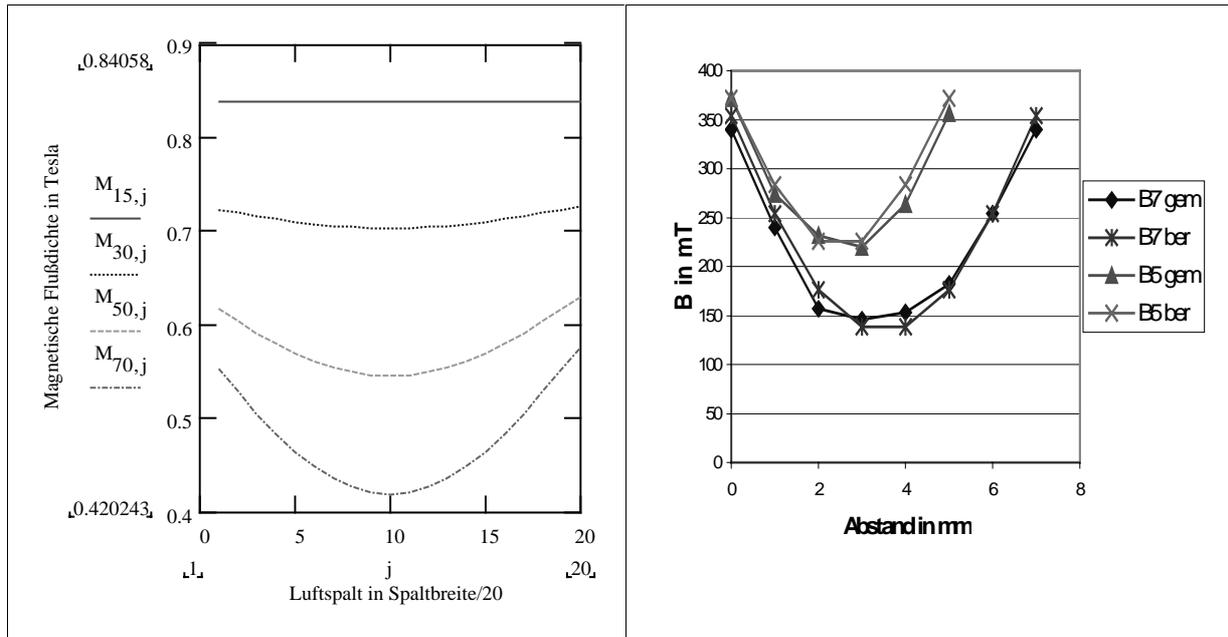


Abbildung 10: Berechnete Magnetische Flussdichte B bei unterschiedlicher Spaltbreite, (1,5 mm; 3 mm; 5 mm; 7 mm)

Abbildung 11: Berechnungen der magnetischen Flussdichte für Spaltbreiten von 7 mm und 5 mm im Vergleich zu den gemessenen Werten.

2.3 FEM-Simulation der magnetischen Flussdichte

Bei der Berechnung der magnetischen Flussdichte B im Luftspalt treten Fehler aufgrund der Annahme der verlustfreien Feldführung auf. Außerdem werden die Terme, die das Feld beschreiben, außerhalb der Mittellinie zwischen den Magneten, wie sie durch Gleichung (11) und (12) beschrieben wird, schnell kompliziert. Deshalb wurde eine Simulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt, die auch Aufschluss über das Magnetfeld abseits der zentralen Verbindungslinie zwischen den Magneten gibt.

Die Simulation wurde mit dem Computerprogramm ANSYS durchgeführt, das den Elementtyp SOLID92 für die Berechnung von Magnetfeldern anbietet. Die Remanenz der Permanentmagnete (1,28 T, Magnetisierung senkrecht zur größten Fläche) wurde über Randbedingungen mit dem FMAG-Befehl eingestellt, die Permeabilitätszahl wurde über die Materialparameter von Luft (Spalt; 1), Eisen (Joch; 10.000) und Neodym-Eisen-Bor (Permanentmagnete; 1,07) festgelegt. Da der Rechenaufwand hierdurch reduziert werden kann, wurde nur ein Viertel des Systems modelliert (vergleiche Abbildung 12, gestricheltes Volumen). Die Gesamtabmessungen der Magnete mit Joch betragen $16 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$. Das Mikroventil wird genau zwischen die beiden Magnete im Zentrum angebracht, so dass der Strom wie in Abbildung 12 eingezeichnet entlang der Leiterbahn fließt.

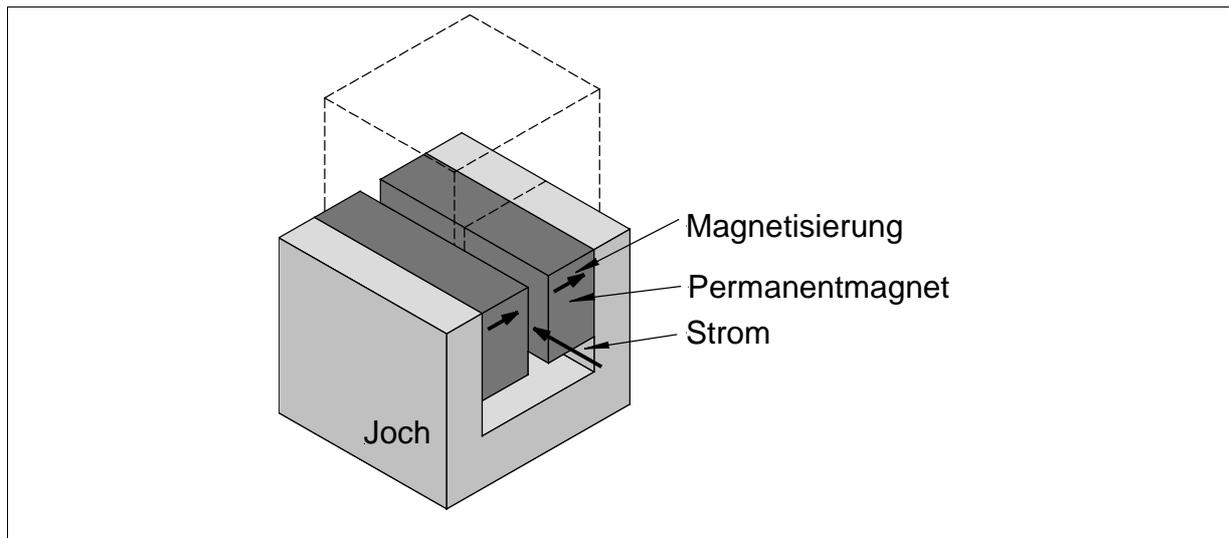


Abbildung 12: ANSYS-Modell des Permanentmagneten mit Joch. Aus Symmetriegründen ist es ausreichend, nur den gestrichelt gekennzeichneten Bereich zu simulieren. Die Gesamtabmessungen der Magnete mit Joch betragen $16 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$.

Die Simulation wurde für verschiedene Breiten des Luftspalts zwischen den Permanentmagneten durchgeführt. Die Abmessungen der Permanentmagnete war durch Muster der Firma Magnetfabrik Schramberg [Mag96] vorgegeben.

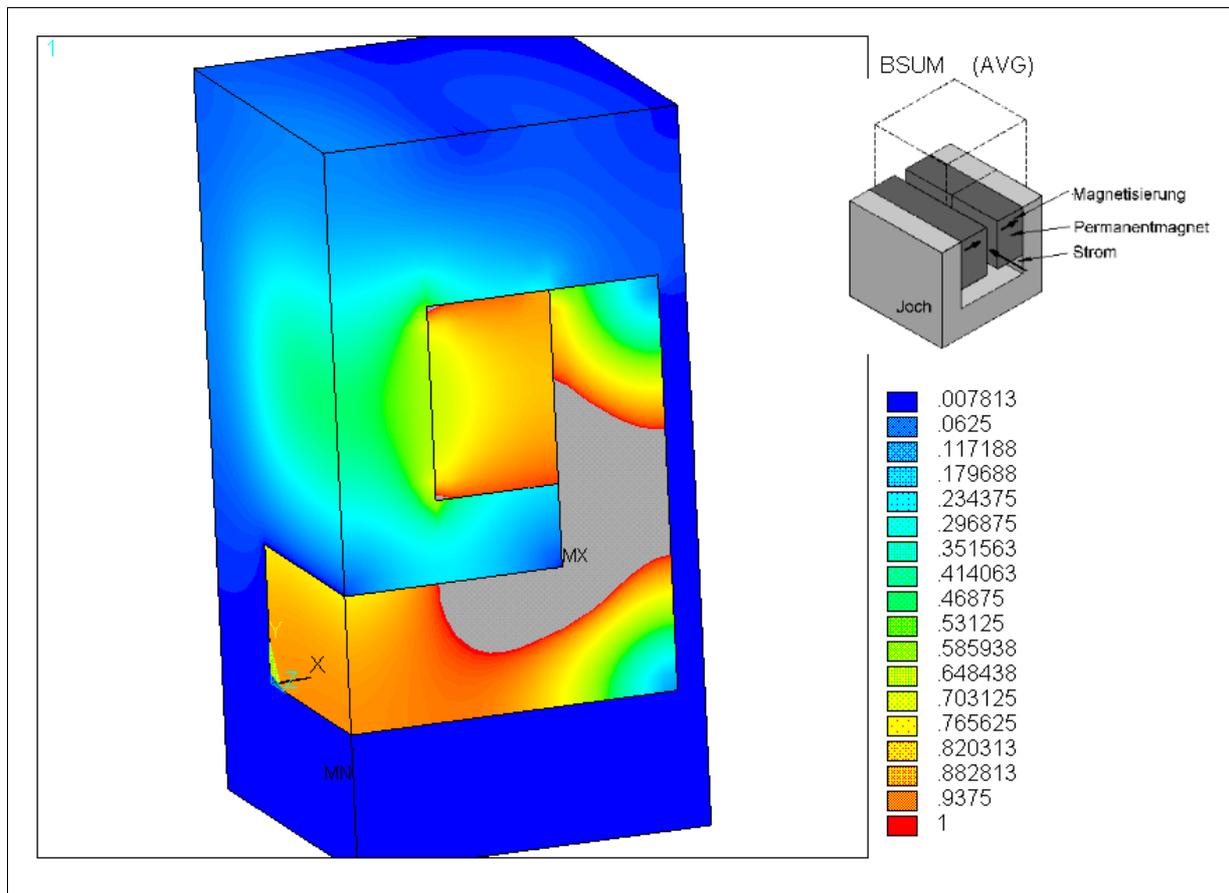


Abbildung 13: Magnetische Flussdichte B bei einer Spaltbreite von 7 mm. Die grauen Bereiche kennzeichnen Flussdichten über 1 T und treten nur innerhalb des Jochs auf. Der Ausschnitt stellt das rechts oben gestrichelt eingezeichnete Segment von Magneten, Joch und Umgebung dar.

Die Simulation und die Messungen zeigen, dass die Spaltbreite höchstens 3 mm betragen sollte, weil sonst das Magnetfeld im Bereich der Ventilmembran nicht homogen und dadurch in der Spaltmitte zu klein ist. In Abbildung 13 ist die magnetische Flussdichte für diesen Fall gezeigt. Die magnetische Flussdichte ist genau zwischen den Magneten im Luftspalt zwar weitgehend homogen aber 7x geringer als der angestrebte Wert von 1 T. Graue Flächen kennzeichnen Flussdichten über 1 T.

Bei einer Reduzierung der Spaltbreite auf 1,5 mm steigt die magnetische Flussdichte auf etwa 0,95 T an, vergleiche Abbildung 14.

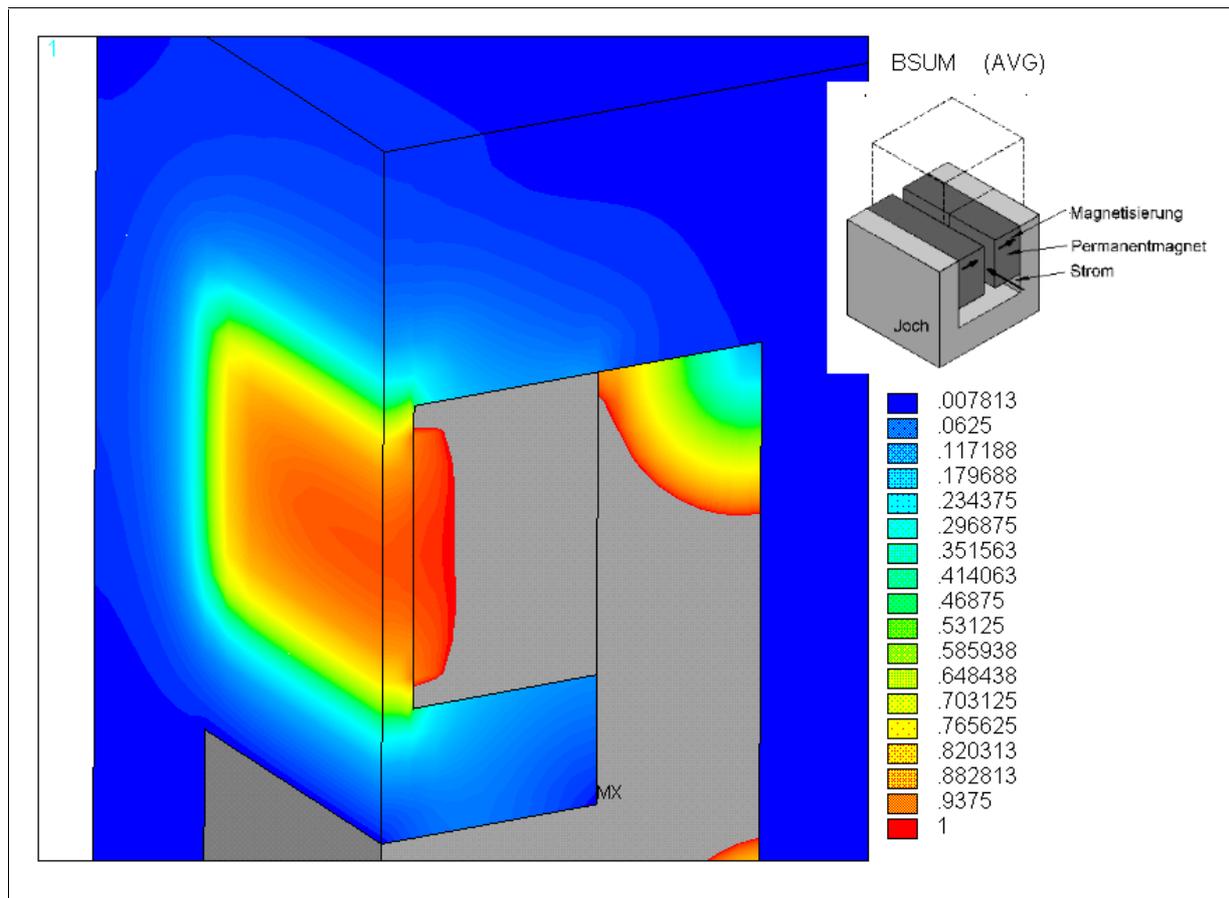


Abbildung 14: Magnetische Flussdichte bei einer Spaltbreite von 1,5 mm. Die grauen Bereiche kennzeichnen Flussdichten über 1 T. Der Ausschnitt stellt das rechts oben gestrichelt eingezeichnete Segment von Magneten, Joch und Umgebung dar.

Entlang der Stromrichtung fällt das Magnetfeld nach außen hin auf 0,75 T ab. Die Flussdichte steigt im ganzen Joch (außer in den äußeren Ecken) auf Werte über 1 T und das Feld konzentriert sich auf den Luftspalt.

Wird der Spalt um nur 0,5 mm auf 2 mm vergrößert, sinkt die Flussdichte auf 0,75 T im Zentrum zwischen den Permanentmagneten ab. Dafür ist das Magnetfeld im gesamten Luftspalt homogener, vergleiche Abbildung 15.

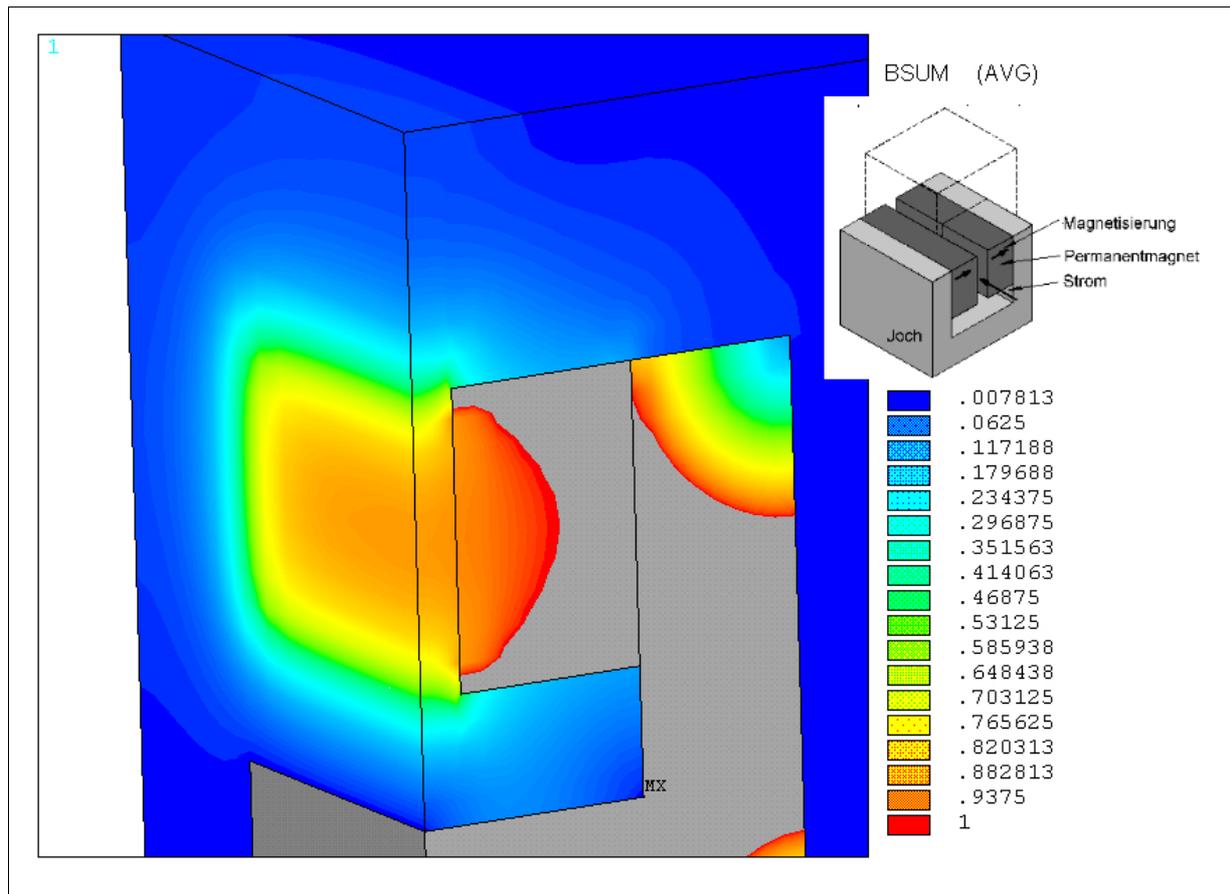


Abbildung 15: Magnetische Flussdichte bei einer Spaltbreite von 2 mm. Die grauen Bereiche kennzeichnen Flussdichten über 1 T. Der Ausschnitt stellt das rechts oben gestrichelt eingezeichnete Segment von Magneten, Joch und Umgebung dar.

2.4 Zusammenfassung der theoretischen Designüberlegungen

In einem normally closed Ventil mit einem magnetisch induktivem Antrieb wirken

- eine Kraft F_{p1} , die durch den Differenzdruck über dem Ventilsitz erzeugt wird
- eine Förderkraft F_{p2} , die den erforderlichen Volumenstrom gegen den Differenzdruck p_1 realisiert. Die Designgröße ist der Radius der Auslassöffnung r_A .
- eine Membrankraft F_M , die das Ventil geschlossen hält, die Designgröße ist die Dicke der Polyimidschicht $d_{x,PI}$ und die Verklebetemperatur ΔT
- eine Aktorkraft, die Lorentzkraft F_L , die das Ventil öffnet. Die Designgröße ist die Luftspaltbreite g und die Membranlänge L

Damit das Ventil funktioniert müssen die Kräfte folgende Ungleichungen erfüllen:

$$F_L(g, L) > F_M(d_{x,PI}, \Delta T) + F_{p2}(r_A) + F_{p1}(r_A) \text{ und } F_M(d_{x,PI}, \Delta T) > 2 F_{p1}(r_A)$$

Dafür wurden die Parameter wie folgt gewählt:

Luftspaltbreite g :	1,5 mm
Membranlänge L :	4 – 5 mm (verschiedene Ventilgrößen im Nutzen)
Radius der Auslassöffnung r_A :	60 μm
Polyimidschichtdicke $d_{x,PI}$:	15 - 25 μm (unabhängig vom Design im Formeinsatz)
Goldschichtdicke $d_{x,Pi}$:	2 μm
Verklebetemperatur ΔT :	70 – 90 °C (nachträglich variabel)
Breite der Membran b	700 μm

3 Durchführung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Mikroventil mit magnetisch-induktivem Antrieb entwickelt, das sich dadurch auszeichnet, dass es kleinste fluidische Ströme im $\mu\text{l}/\text{min}$ Bereich steuern soll (vergleiche Abbildung 16).

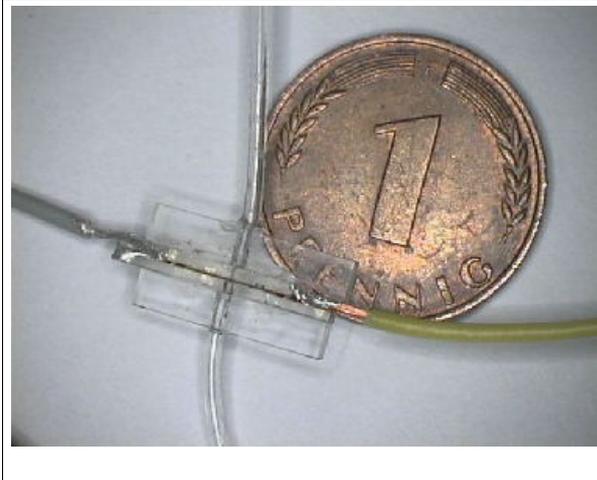


Abbildung 16: Vollständig elektrisch und fluidisch kontaktiertes Mikroventil

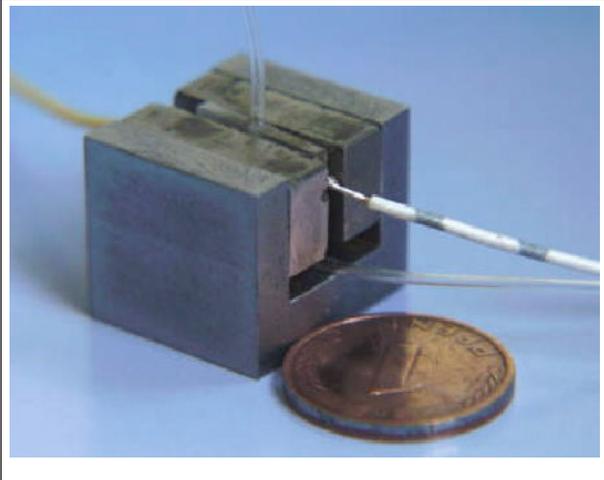


Abbildung 17: Fertiges Mikroventil zwischen Permanentmagneten und Joch

Das Ventil besteht aus:

- einem zweiteiligen Gehäuse,
- einer Membran, die in diesem Gehäuse eingeklebt ist,
- zwei Fluidbausteinen als Anschlüsse für ein Medium
- einem Paar Permanentmagneten, die mit einem Joch das Ventil umgeben und
- elektrischen Kontakten zur Stromversorgung.

Die Ventile wurden mit dem AMANDA-Verfahren hergestellt. Die Gehäuseteile wurden durch Abformung aus Polysulfon (PSU) erzeugt und parallel dazu wurde ein Herstellungsprozess für die bistabilen Membranen mit innen liegender Leiterbahn entwickelt und optimiert. Membranen und Gehäuse werden im Nutzen zu einem funktionalen Ganzen verbunden, vereinzelt und fluidisch und elektrisch kontaktiert. Die Fertigung beruht größtenteils auf etablierten Bearbeitungstechniken aus Abformverfahren, optischer Lithographie, Dünnschicht- und Aufbau- und Verbindungstechnik, die weitgehend im Institut für Mikrostrukturtechnik IMT oder am Forschungszentrum Karlsruhe FZK verfügbar sind und für die Anwendung angepasst wurden. Permanentmagnete, Kunststoffschläuche und Kabel wurden zugekauft.

Die Ventilkammer hat die Abmessungen von $0,5 \times 4 \times 0,1 \text{ mm}^3$, das Ventilgehäuse weist Abmessungen von $1,8 \times 12 \times 1,5 \text{ mm}^3$ auf und die größte Komponente stellen die Perma-

nentmagnete mit dem dazugehörigen Joch mit Außenabmessungen von 16x15x18 mm³ dar (vergleiche Abbildung 17).

3.1 Das AMANDA-Verfahren

Die Ventile werden mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt. AMANDA steht für die Bearbeitungstechniken Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung, die dabei zum Einsatz kommen [Sch99a, Sch00]. In Abbildung 18 wird das AMANDA-Verfahren am Beispiel der Fertigung von mechanisch betätigten elektrischen Schaltern schematisch dargestellt.

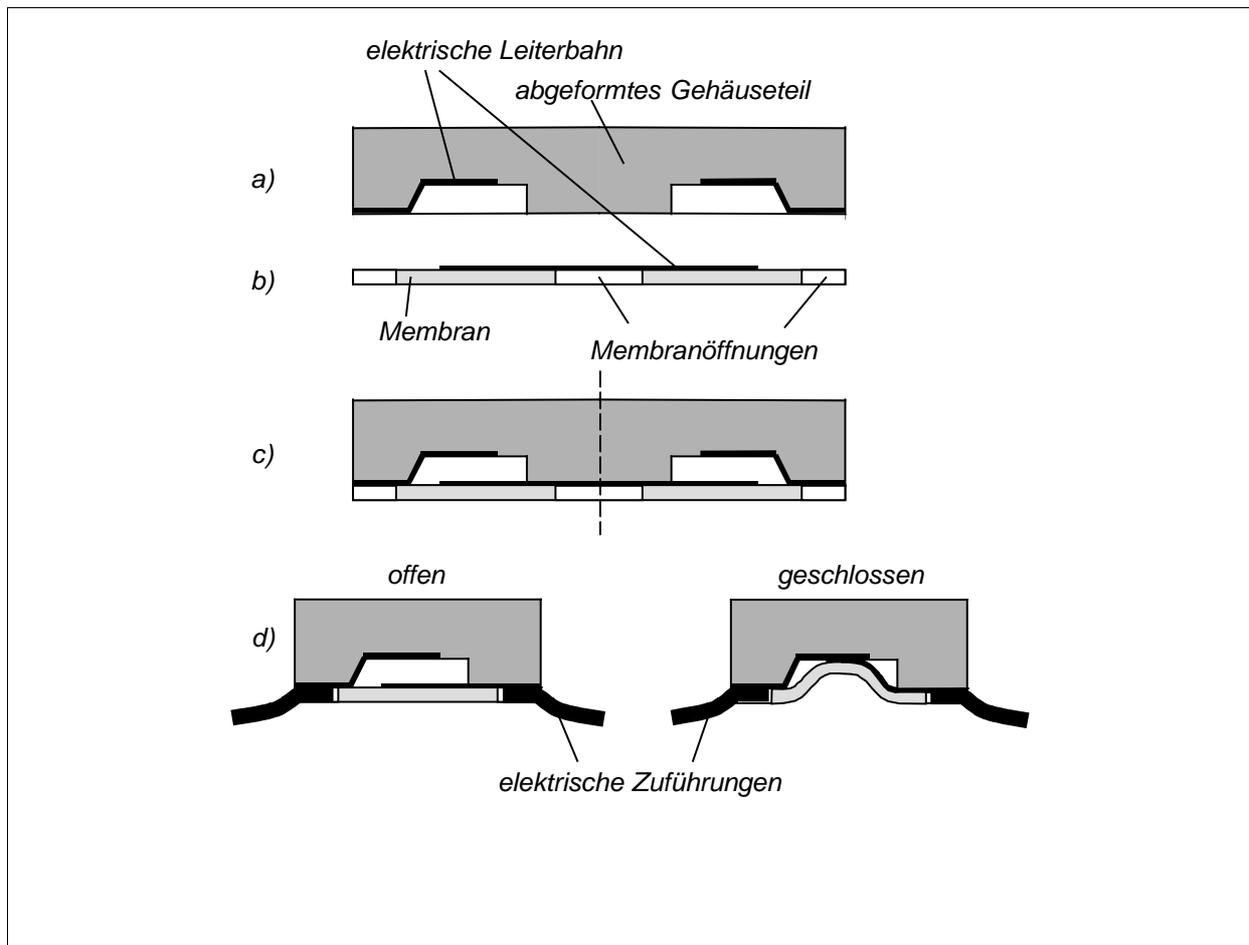


Abbildung 18: Schematische Darstellung des AMANDA-Verfahrens am Beispiel der Herstellung von mechanisch betätigten elektrischen Schaltern.

Die Gehäuse der Schalter werden mit einem geeigneten Formeinsatz durch Heißprägen aus einer Polymerplatte abgeformt. Beim dargestellten Beispiel wurden vor diesem Arbeitsschritt auf der Oberfläche der Platte Leiterbahnen durch Fotolithografie und Nassätzen strukturiert, so dass nach dem Heißprägen Leiterbahnen vorliegen, die in Vertiefungen hineinführen (vergleiche Abbildung 18a). Mit den Methoden der Oberflächenmikromechanik wird eine Membran erzeugt und strukturiert, auf der sich im dargestellten Beispiel auch Leiterbahnen befinden (vergleiche Abbildung 18b). Im dritten Fertigungsschritt wird die Membran auf das

Gehäuse übertragen, wie es in Abbildung 18c zu sehen ist. Mit jedem Fertigungsschritt wird in der Regel nicht nur eine Komponente erzeugt, sondern mehrere Schalter werden in einem sogenannten Nutzen parallel nebeneinander gefertigt. Dadurch sinkt der Fertigungsaufwand wesentlich.

Nach der in Abbildung 18c angedeuteten Vereinzelung der Komponenten werden noch die Anschlüsse angebracht und die Schalter sind fertig.

Ein großer Vorteil des AMANDA - Verfahrens ist die kostengünstige Fertigung von Mikrokomponenten. Diese wird zum einen durch eine stark parallele Fertigung begünstigt, wie sie aus der Siliziumtechnik bekannt ist. Das wurde auch bei den hier untersuchten Mikroventilen deutlich, bei denen z.B. aus einer Membran, die auf einem Siliziumwafer gefertigt wird, 96 Ventilmembranen entstehen und bei der Abformung werden 48 Ventilgehäuse im Nutzen gleichzeitig strukturiert und auch das Verkleben der Membranen mit den Ventilgehäusen wird durch eine Kammerklebetechnik parallel ausgeführt.

3.2 Herstellung von Gehäuseteilen

Beim AMANDA-Verfahren werden die Gehäuse der zu fertigenden Produkte durch Mikroabformung hergestellt, weil dies ein sehr kostengünstiger Weg ist, wenn größere Stückzahlen produziert werden sollen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden deshalb für die Herstellung der Mikroventile das Heißprägen und der Spritzguss untersucht. Für die Mikroabformung wird allerdings ein Formeinsatz benötigt, dessen Herstellung in der Regel viele Wochen in Anspruch nimmt.

Es wäre für die Entwicklung vorteilhaft, wenn Gehäuseteile in geringer Stückzahl auch kurzfristig zur Verfügung stehen könnten. Neben der Abformung wurde deshalb auch untersucht, ob mit alternativen Techniken Gehäuseteile für Vorversuche schneller gefertigt werden können. Im Folgenden wird die Gehäusefertigung durch Heißprägen und Spritzguss mit den Ergebnissen verglichen, die durch lichtinduziertes Reaktionsgießen, durch das schichtweise Belichten eines flüssigen Fotoresistes, durch Fotolithografie besonders dicker, fester Fotoresistschichten und durch die Laserablation von Kunststoffen erzielt wurden.

3.2.1 Spritzgießen

Beim Spritzguss wird über einen Anguss der Hohlraum zwischen dem Formeinsatz und einer Rückseite von der Seite unter Druck (zwischen 10 bis 2000 bar) viskose Schmelzen oder Gießharze laminar eingefüllt (vergleiche Abbildung 19). Das Gehäuse des Mikroventils wird aus Polysulfon (PSU) hergestellt. Dabei werden die Formen vor der Formfüllung evakuiert, um Kompressionsdefekte in den abgeformten Mikrostrukturen zu verhindern [Rup99,Rup00]. Nach dem Einspritzen wird der Formeinsatz aus dem unter die Glasübergangstemperatur

abgekühlten Formstoff gezogen. Aufgrund einer Rippenstruktur auf der Rückseite des abgespritzten Gehäuseteils, auf das der Formstoff durch die Abkühlung aufschumpft, kann der Formeinsatz detailgetreu entformt werden. Anschließend wird das Gehäuse über Auswerferstifte aus der Anlage entfernt.

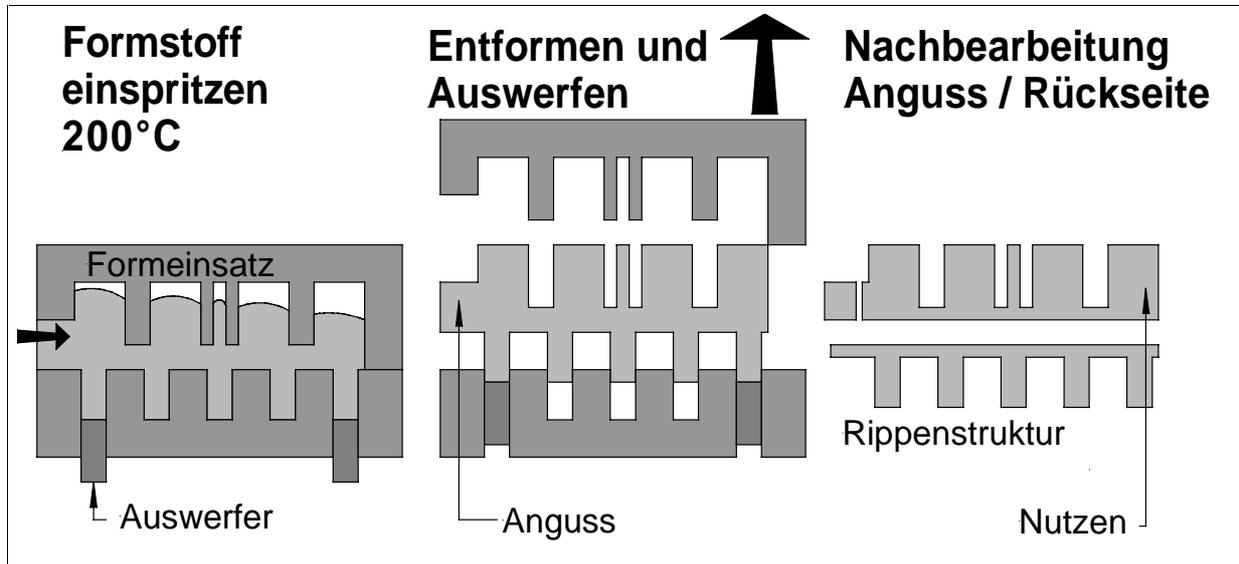


Abbildung 19: Prinzipskizze des thermischen Spritzgusses. Der Formstoff wird überhalb des Schmelzpunkts erwärmt eingespritzt, zur Entformung abgekühlt und über Auswerferstifte aus der Form entfernt. Dabei ist auf der Rückseite des abgeformten Teils eine Rippenstruktur vorgesehen, die eine fehlerlose Entformung der Vorderseite, die die Mikrostruktur trägt, erlaubt. Anguss und Rippenstruktur müssen nachträglich entfernt werden.

Abbildung 20 zeigt Spritzguss gefertigte Nutzen bevor die Rippenstruktur entfernt wurde. Im Hintergrund ist ein Teil des seitlichen Angusses zu sehen. Es ist auffällig, dass die Rippenstruktur im Vergleich zu den Mikrostrukturen deutlich größere Dimensionen hat.

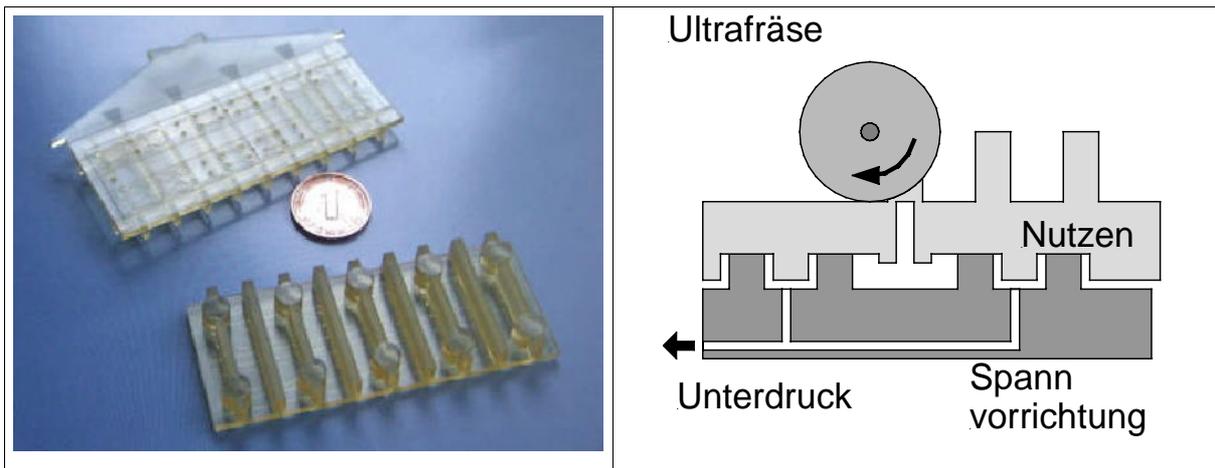


Abbildung 20: Mit Spritzguss hergestellte Ventilgehäuse. Die Rippenstruktur auf der Rückseite wird in zwei darauffolgenden Prozessschritten entfernt

Abbildung 21: Prinzip einer Vakuumspannvorrichtung. Die Oberfläche der Mikrostruktur liegt in Aussparungen der Spannvorrichtung und wird durch Unterdruck festgehalten. Durch das Abräsen der Rückseite werden Durchlöcher im Nutzen bis auf eine dünne Restschicht freigelegt.

Der Vorteil des Spritzgusses liegt in einer kurzen Zykluszeit von nur wenigen Minuten, nachteilig ist, dass eine Nachbearbeitung erforderlich ist. Anguss und Kammstruktur müssen abgesägt werden, anschließend muss die Rückseite der abgeformten Teile auf die erforderliche Dicke der Gehäuseteile abgefräst werden. Damit die Strukturen auf der Vorderseite nicht zum Aufliegen kommen, ist eine spezielle Vakuumspannvorrichtung für jeden Formeinsetz notwendig, wenn die Rückseite bearbeitet wird (vergleiche Abbildung 21).

Weiterhin stellt der seitliche Anguss der Mikrostrukturen ein Problem dar, da die seitliche Belastung durch die Formmasse beim Einspritzen in die Form gerade für filigrane, freistehende Strukturen extrem hoch wird (vergleiche Kapitel 1.3.7).

3.2.2 Heißprägen

In Abbildung 22 ist das Prinzip des Heißprägens [Hec98,Hec99,Hec00] von Mikrostrukturen schematisch dargestellt. Der Formstoff wird als Folie oder als Folienstapel in eine Warmumformmaschine eingelegt, erwärmt und im Vakuum mit einem Formeinsetz geprägt. Ein wesentliches Merkmal des Heißprägens ist, dass sehr geringe Umformgeschwindigkeiten unter 1 mm/s realisiert werden. Von großem Vorteil ist dabei, dass der Formeinsetz vertikal in das Prägematerial eintaucht, das über die Erweichungstemperatur erwärmt wird. Dadurch ist die laterale Belastung von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis niedriger als beim Spritzguss.

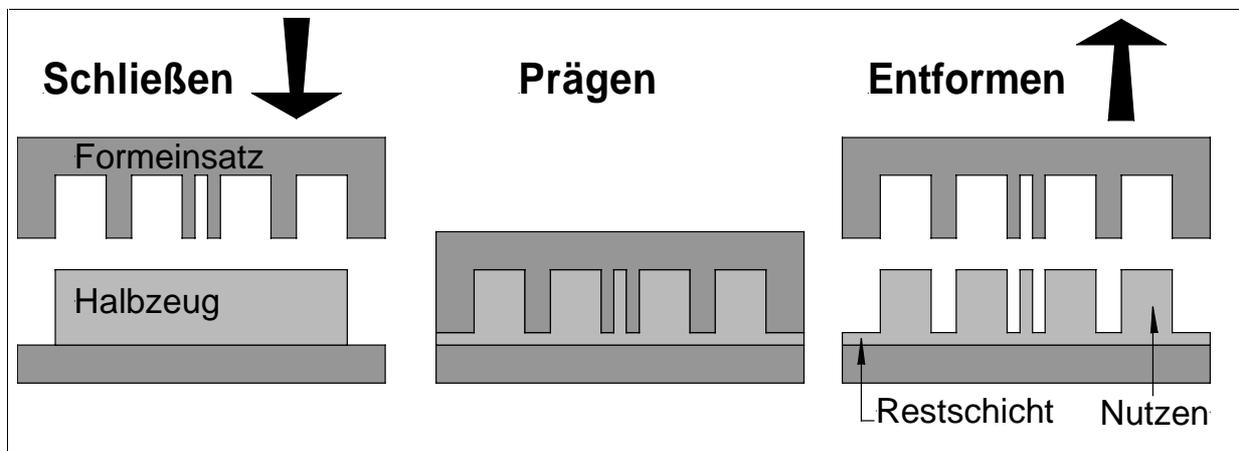


Abbildung 22: Prinzip des Heißprägens. Ein Halbzeug (PSU) wird in die Heißprägemaschine eingelegt und auf die Umformtemperatur erwärmt. Anschließend wird der Formeinsetz langsam senkrecht in das Halbzeug eingetaucht, abgekühlt und entformt. Auf der Rückseite verbleibt eine dünne Restschicht (20 – 100 μm)

Beim Heißprägen wird ein Temperatur- und Kraftverlauf gefahren, wie er in Abbildung 23 gezeigt ist. Bei der Prägung wird zuerst die Vakuumkammer zusammengefahren, evakuiert (1) und Stickstoff eingeblasen um einen besseren Wärmeübertrag zu gewährleisten (2). Sobald die Umformtemperatur (235 °C) erreicht ist wird die Kammer wieder evakuiert (3) und der Formeinsetz in den erweichten Kunststoff eingefahren, bis sich der Prägedruck von 10

kN einstellt (4). Durch den günstigeren thermischen Kontakt des Kunststoffes mit den beheizten Formeinsätzen steigt die Temperatur im Formstoff (5). Der Formeinsatz wird mit einem Nachdruck von 50 kN belastet (6) und die Form auf die Entformtemperatur abgekühlt (7). Die Entformtemperatur liegt unterhalb der Glasübergangstemperatur des PSU bei 180°C. Der Nachdruck wird beaufschlagt, um den Schrumpf des Materials bei der Abkühlung auszugleichen und um die Haftung von abgeformtem Teil zur Unterseite der Prägemaschine zu verbessern. Der Nachdruck wird abgeschaltet und Formeinsatz und Nutzen auseinandergefahren. Während des Trennens der Teile entsteht eine Entformkraft durch die Reibung zwischen Nutzen und Formeinsatz (8). Anschließend wird die Kammer abgekühlt, unterstützt durch die Belüftung der Form (9) und das abgeformte Teil entnommen [Dit00b].

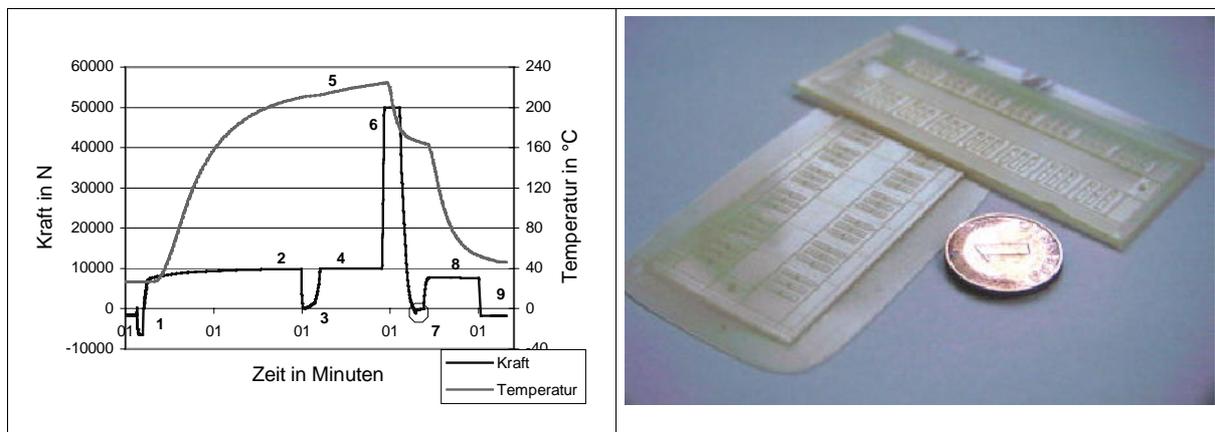


Abbildung 23: Typischer Temperatur- und Kraftverlauf beim Heißprägen.

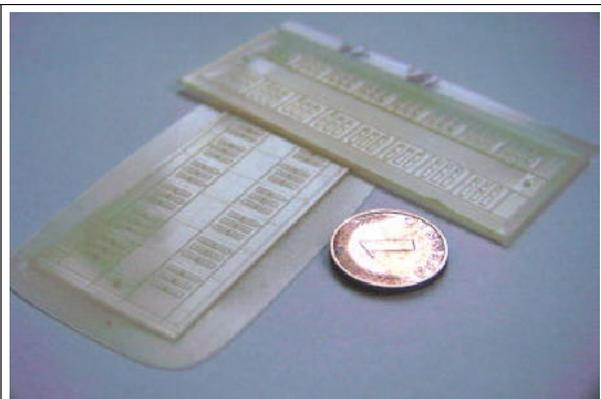


Abbildung 24: Mit Heißprägen abgeformte Ober- und Untergehäuseteile aus PSU.

Beim Heißprägen ist die Zykluszeit beim derzeitigen Entwicklungsstand dieser Technik mit ca. 30 min zwar deutlich größer als beim Spritzguss, dafür ist durch die Verwendung von Folienmaterial als Halbzeug aber ein Materialwechsel bei jedem Prägezyklus möglich [Rup00], was während der Entwicklung neuer Produkte und für kleinere Stückzahlen ein großer Vorteil ist. Außerdem braucht der Formstoff in der Form nicht so weit zu fließen, wodurch weniger mechanische Spannungen in den Mikrostrukturen entstehen, die mechanische Belastung der Mikrostrukturen auf dem Formeinsatz und am abgeformten Teil geringer ausfällt und weniger Verzüge des Formteils auftreten.

Heißprägen ist innerhalb des IMT an einer Heißpräganlage vom Typ HEX 03, die vom IMT in Zusammenarbeit mit der Firma JENOPTIK aus Jena entwickelt wurde, möglich. Die Maschine verfügt über eine elektrische Presse mit einer Wegauflösung $<1\mu\text{m}$ und einer Kraftauflösung im Bereich von einigen Newton. Die verfügbare Maximalkraft beträgt 200 kN. In 5“ durchmessende Druckplatten können die Formeinsätze eingebaut werden. Alternativ können auch Druckplatten eingebaut werden, deren Oberflächen mikrostrukturiert sind, wie es bei der beidseitigen Abformung, im Rahmen der Entwicklung der Ventile gezeigt wurde.

Die Restschicht, die beim Heißprägen um den Nutzen herum verbleibt, kann mit einer Schere abgeschnitten werden (vergleiche Abbildung 24).

3.2.3 Lichtinduziertes Reaktionsgießen

Beim lichtinduzierten Reaktionsgießen (UV-RIM) wird ein Reaktionsharz mit einem Fotoinitiator gemischt und dann mit UV- oder sichtbarem Licht ausgehärtet. Als Reaktionsharz kommen Harze auf MMA/PMMA Basis oder Styrol/ungesättigte Polyester Basis zum Einsatz.

Die UV-RIM Anlage besteht aus zwei Hauptkomponenten, einer Strahlungsquelle (breitbandiges UV/VIS-Spektrum von 300–500 nm) sowie einer transparenten Werkzeughälfte aus Borsilikatglas. Auf der Formeinsatzseite befindet sich eine RIM mit Halteplatte für zwei Formeinsätze, Auswerfer und Vakuumsystem, sowie der Einspritzeinheit mit Materialreservoir [Pfl00].

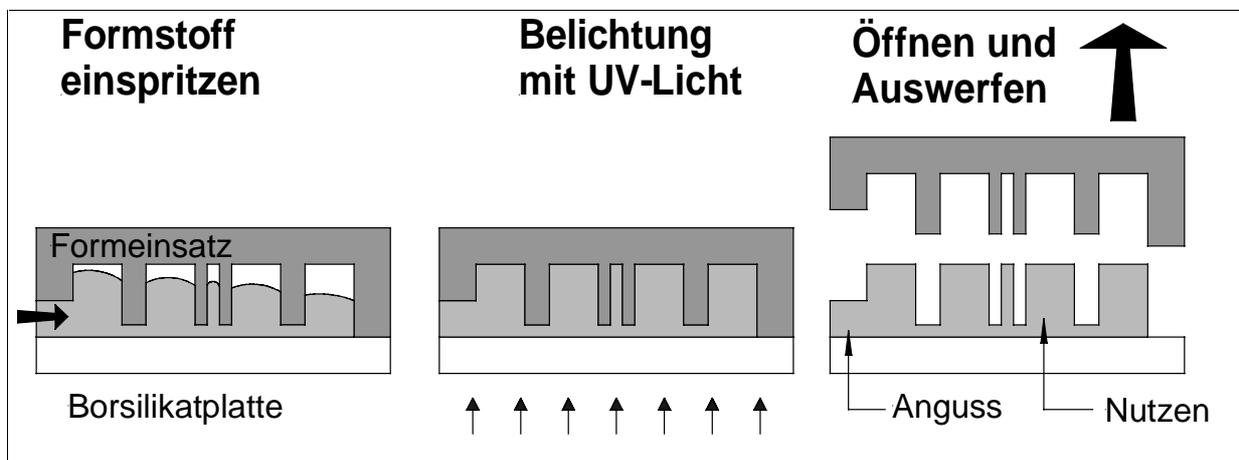


Abbildung 25: Prinzipskizze des UV-RIM. Mit Fotoinitiator gemischter Formstoff wird in die Form eingespritzt und härtet bei UV-Bestrahlung aus. Anschließend wird der Nutzen ausgeworfen.

Der Abformzyklus bei dem UV-RIM unterscheidet sich von dem Spritzguss darin, dass anstelle von heißem Formstoff, der durch seine Abkühlung erstarrt, das Reaktionsharz durch die Einwirkung von intensivem UV/VIS-Licht (Intensität bis 1 W/cm^2) unter Beibehaltung eines Formmassenachdrucks stattfindet [Han99] (vergleiche Abbildung 25).

Wie beim Spritzguss und dem Heißprägen ist die Oberflächenqualität der Nutzstruktur maßgeblich von der Oberflächengüte des Formeinsatzes abhängig. In Abbildung 26 ist ein mit UV-RIM abgeformtes Ventilgehäuse zu sehen. Der Formeinsatz dafür wurde aus Hartmetall mittels Laserablation hergestellt.

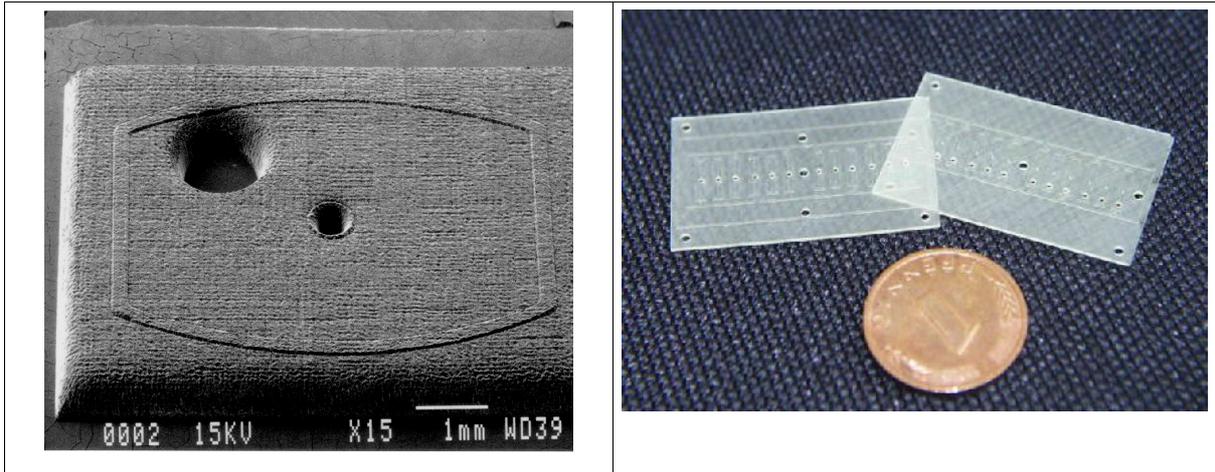


Abbildung 26: Mit UV-RIM hergestelltes Ventilgehäuse. Der Formeinsatz wurde mit Laserablation hergestellt.

Abbildung 27: Mit dem RMPD – Verfahren durch die Fa. microTEC hergestellte Nutzen.

3.2.4 Rapid Micro Product Development

Das „Rapid Micro Product Development“, kurz RMPD wird von der Firma microTEC in Duisburg [mic99] entwickelt und eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren zur werkzeuglosen Produktion dreidimensionaler Mikrostrukturen aus Kunststoff. Das Herstellungsprinzip beruht auf einem flüssigen Monomer, das durch Belichtung mit einem Laser schichtweise strukturierend polymerisiert wird. Dabei fährt ein gesteuerter Laserstrahl die vorgegebenen Flächenstrukturen Punkt für Punkt oder über eine Chrommaske ab und härtet auf diese Weise durch Photoinitiation den flüssigen Photoresist aus. Die Werkstoffe sind Acrylate und Epoxide. Mit dem RMPD-Verfahren ist die Herstellung von Mikrostrukturen in strukturellen Details in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$ in einem Fenster von $5\ \text{x}\ 5\ \text{mm}^3$ strukturierbar [mic00]. In Abbildung 27 sind Ober- und Untergehäuse, die mit dem RMPD-Verfahren hergestellt wurden, dargestellt. Zum Zeitpunkt der Versuche im Rahmen dieser Arbeit konnten mit dem RMPD-Verfahren nur Teile hergestellt werden, die maximal Abmessungen von $26\ \text{x}\ 17\ \text{mm}^2$ aufweisen.

Bei den Verklebungen musste festgestellt werden, dass das von microTEC verwendete Material erheblich spröder als das beim Heißprägen am IMT verwendeten PSU ist. Dadurch zerbrachen die Nutzen beim Verkleben meistens. Dieses Fertigungsverfahren wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

3.2.5 Optische Lithographie mit EPON-SU8

Mikrostrukturen in einer Höhe von einigen hundert Mikrometern lassen sich auch durch optische Lithografie mit einer Qualität herstellen [Fra92, Des97], die für viele Anwendungen in der Mikrofluidik ausreicht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mit dem Photoresist EPON SU-8 Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis erzeugt, die nahezu senkrechte

Profile haben. Dieser negativ arbeitende Resist ist auf der Basis von Epoxydharz aufgebaut und zeichnet sich durch hohe Lichtempfindlichkeit, hohe Transparenz und chemische Beständigkeit aus.

Die Belichtung erfolgt durch Schattenwurf von ebenen Geometrien einer Chrommaske auf die zu strukturierende fotoempfindliche Resistschicht. Dabei werden die Strukturen nahezu 1:1 übertragen [Chu00a].

Da der Ventil Sitz im Vergleich zu den Stegen der Ventilkammern 50 μm tiefer liegt, muss in mehreren Schichten strukturiert werden. Die Vorgehensweise zur Strukturierung von gestuften Nutzteilen ist in Abbildung 28 dargestellt.

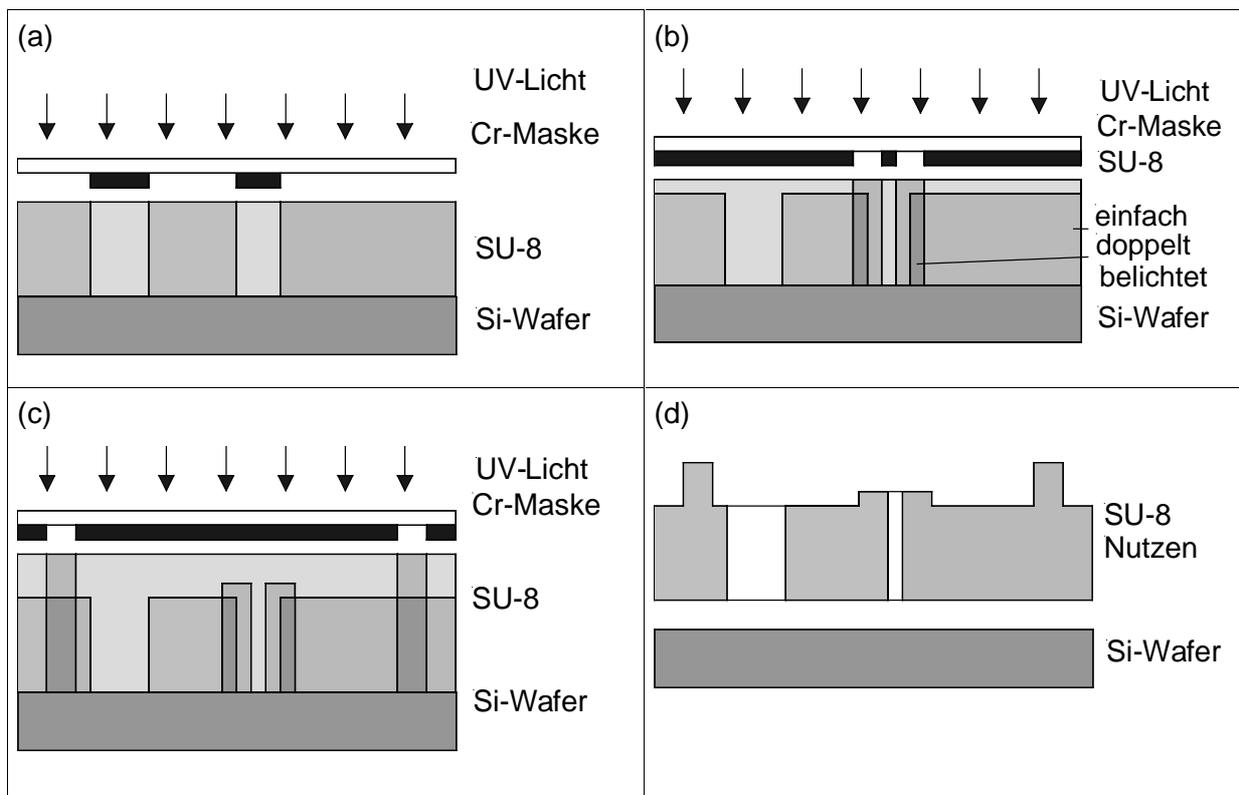


Abbildung 28: Strukturierung von mehrstufigen Nutzteilen aus EPON-SU8. (a) Belichtung der Trägerplatte, (b) Strukturierung der Ventilsitze, die Auslaßöffnung wird auf ein größeres Durchloch in der ersten Ebene belichtet, um die Justierung zu erleichtern. (c) Strukturierung der Stege der Aktor- und Klebstoffkammern. Die Stege setzen sich in ihrer Höhe aus der dort vorher unbelichteten zweiten und der dritten Ebene zusammen. (d) Nach dem Entwickeln wird das Substrat vom Wafer abgelöst

Die erste Ebene dient als Trägerplatte für die Ventilstrukturen, bildet die Kammerdecken und enthält alle Durchlöcher für fluidische Kontakte (siehe Abbildung 28a). Die Schichtdicke beträgt 300 μm . Wegen der großen Zähigkeit des EPON SU8-500 konnten zur Dosierung keine Pipetten oder andere Messmittel zur Feststellung der Lackmenge vor dem Spin-on gemacht werden. Dadurch wird die Dosierung ungenau. Zwar ist die Schichtdicke der Trägerplatte für die Funktionalität nicht maßgeblich, jedoch beeinflusst die Schichtdicke stark die Prozessparameter, vor allem die notwendige Trocknungszeit vor der Belichtung. Eine Schichtdicke von 300 μm stellt dabei einen Kompromiss zwischen den Aspekten des Hand-

lings (möglichst dick), der Trocknungszeit (möglichst dünn) und der Reproduzierbarkeit (möglichst hohe Drehzahlen beim Belacken) dar.

Bei einer Schichtdicke von 300 μm liegen die Trocknungszeiten, bis sich der Lösungsmittelgehalt im EPON SU-8-500 auf 5% abgesenkt hat, bei 3-4 Stunden bei einer Umgebungstemperatur von 95°C. Während der Trocknungszeit muss der Wafer absolut waagrecht liegen, da die EPON SU-8 Schicht noch lange zähflüssig bleibt. Das bedeutet, dass sich Luftblasen, die beim Schleudern entstehen können und die für zähe Lacke oder niedrige Drehzahlen typische Randüberhöhung sich von alleine auflösen. Ist allerdings der Untergrund nicht eben kommt es zu Inhomogenitäten, die die Inhomogenität des Schleuderprozesses weit überwiegen (bis zu 200 μm bei einer mittleren Schichtdicke von 600 μm).

Nach dem Tempern des Resistes im Ofen bzw. auf einer Hotplate muss das Substrat vollständig abkühlen, da sonst die Oberfläche klebrig bleibt und beim Belichten an der Chrommaske haftet. Um ein Ankleben zu vermeiden, kann die Maske mit Hexamethyldisilazan (HMDS) beschichtet werden. HMDS wird üblicherweise als Haftvermittler benutzt. Es konnte im Rahmen der Arbeit gezeigt werden, dass sich, ähnlich wie bei Polyimid, bei dem EPON SU-8 System eine HMDS – Beschichtung eine entgegengesetzte Wirkung hat und ein Anhaften zwischen Resist und Chrommaske unterdrückt wird. Die Beschichtung hat nur dann zu besseren Ergebnissen geführt, wenn die Maske vor jeder Belichtung neu mit HMDS passiviert wurde.

Nach einem weiteren Spin-on von EPON-SU8 wird der relativ zur Membranebene tiefer liegende Ventilsitz strukturiert (vergleiche Abbildung 28b). Die zweite Ebene definiert die Höhe der Ventilsitze und hat eine Dicke von 20 μm . Das Durchloch des Ventilsitzes verdeckt beim Belichten ein größeres Durchloch, das bereits in der 1. Ebene strukturiert wurde, aber vollständig vom Ventilsitz abgedeckt wird. Dadurch kommt es in manchen Regionen am Rand des Durchlochs in der ersten Ebene zu Doppelbelichtungen, die aber nicht stören, weil sie keinen Einfluss auf die spätere Form der Mikrostruktur haben. Die Größe und die exakte Lage der Einlassöffnung im Ventilgehäuse wird erst bei der 2. Belichtung definiert. Dadurch werden Dejustierungen zwischen dem Ventilsitz und der Öffnung vermieden.

In Abbildung 28c ist die Strukturierung der dritten Ebene dargestellt. Die dritte Ebene strukturiert alle Kammerstege und hat eine Dicke von 30 μm . Bei der Belichtung werden im Bereich der Kammerstege die 2. und die 3. Ebene gleichzeitig belichtet. Dadurch addiert sich die Steghöhe zu 50 μm . Im Anschluss werden alle drei Schichten entwickelt und der fertige Nutzen von dem Substrat abgelöst (vergleiche Abbildung 28d). Bei der Trennung des Nutzens vom Substrat wurden verschiedene Strategien verfolgt, die im folgenden beschrieben sind:

Siliziumwafer

Silizium hat eine gute Haftung zum SU-8, was zu einer günstigen Handhabung während des Prozesses führt. Dadurch ist aber ein Abheben am Ende des Prozesses nicht möglich. Statt dessen kann der Wafer mit 30 % KOH aufgelöst werden. Diese Methode hat sich besonders bei kleinen Strukturen mit Abmessungen von wenigen mm² bewährt, die sich schnell von Silizium lösen, noch bevor der gesamte Wafer aufgelöst ist. Bei großen zusammenhängenden Strukturen, wie es die Ventalnuten mit einer Fläche von ca. 2000 mm² sind, dauert das Auflösen des Siliziums bei 65-75 °C ca. 4 Stunden. Es kommt während dieses Verfahrens an der Waferoberfläche und insbesondere am Rand auch unter der Nutzstruktur zu einer starken Blasenbildung, die zu permanenten Schäden des Nutzens führt. Die Kontaktfläche mit dem Silizium wird trüb und der gesamte Nutzen wird wellig. Eine Verklebung mit einer Membran wird dadurch unmöglich, da der Nutzenspröde ist und beim Andrücken auf die Membran in der Verklebeeinrichtung zerbricht.

Waferfolie

Bei der Entwicklung von Infrarotfiltern für astronomische Beobachtungen im Weltraum war schon früher einmal das Problem aufgetreten, dass Mikrostrukturen durch eine Blasenbildung bei der chemischen Auflösung des Substrates beschädigt werden. Als Lösung für dieses Problem wurde die Mikrostruktur auf einer sogenannten Waferfolie aufgebaut. Auf einen Siliziumwafer wird eine Kohlenstoffschicht und eine Titanschicht aufgesputtert. Die Kohlenstoffschicht weist nur eine geringe Haftung zum Silizium auf, deshalb kann sie zusammen mit der Titanschicht mechanisch vom Wafer abgezogen werden. Am Rand des Wafers wird kein Kohlenstoff aufgebracht, damit das Titan dort eine feste Verbindung mit dem Silizium eingehen kann. Dieser Verbund einer Trennschicht und einer Membran mit einem Substrat wird Waferfolie genannt.

Wenn nun eine filigrane Mikrostruktur auf einer Waferfolie aufgebaut wird, kann sie zusammen mit einer Titanmembran ohne chemische Einwirkung von einem Siliziumwafer abgezogen werden. Anschließend braucht nur eine sehr dünne Titanschicht chemisch aufgelöst zu werden, was in der Regel keine Schäden an der Mikrostruktur verursacht.

Auf einer Waferfolie durch Fotolithografie hergestellte Nutzen konnten problemlos vom Wafer abgezogen werden. Auf diese Weise konnten die besten Ergebnisse erzielt werden, allerdings sind Waferfolien relativ teuer in der Herstellung.

Siliziumwafer mit Titan besputtert

Von Siliziumwafern, die mit 5 µm Titan besputtert wurden, ließ sich die Nutzstruktur direkt nach dem Entwickeln abheben, solange das SU-8 noch vom Entwickler feucht war. Ein

solcher Wafer kann solange wiederverwendet werden, wie die Oberfläche noch makellos ist. Ist das SU-8 getrocknet, lässt es sich auch nicht von einer gesputterten Titanschicht lösen. Anzumerken ist, dass sich die Struktur nach einem Jahr wieder durch Lockerung aufgrund von thermischer Wechsellast problemlos abheben lässt.

Damit hat sich für die Trennung des fertigen Nutzens aus EPON SU-8 vom Substrat die Beschichtung eines Siliziumwafers mit Titan als beste Lösung erwiesen. Für Strukturen mit kleineren zusammenhängenden Abmessungen ist ein gewöhnlicher Siliziumwafer ausreichend.

Verklebeversuche

Transparente und ebene SU-8 Nutzen lassen sich in der Verklebeapparatur des IMT mit dem Kammerklebverfahren positioniert verkleben. Der Schrumpf von SU-8 weicht von demjenigen der PSU-Teile ab, so dass die Nutzen relativ zur Membran zu groß ausfallen und damit in den Randbereichen des Nutzens die Membranen nicht mehr unterhalb der Ventilsitze verlaufen. Die unterschiedliche thermische Ausdehnung von PSU und SU-8 hat außerdem zu einer Abweichung in der Vorspannung der Membran geführt. Nutzen aus SU-8 brechen, wenn sie in der Verklebeapparatur eingespannt werden. Weil SU-8 im Vergleich zum PSU zu spröde ist, war eine Vereinzelnung im Anschluss nicht mehr sinnvoll.

Die Herstellung von Prototypen mit EPON SU-8 ist nicht sinnvoll, weil Nutzen aus diesem Material zu spröde sind, um mit der Kammerklebetechnik verklebt zu werden. Darüber hinaus müsste ein anderer Schrumpf berücksichtigt werden, was aber möglich wäre, wenn sich SU-8 im Prinzip eignen würde.

Zusammenfassend muss über die Nutzenherstellung mit EPON SU-8 gefolgert werden, dass sie kein serientaugliches Verfahren, da die Zykluszeit durch die erheblichen Trocknungszeiten sehr hoch und der Resist relativ teuer ist.

3.2.6 Nutzenherstellung mittels LASER

Mittels Excimer-Laserstrahlung als einer Methode des „kalten“ Materialabtrags können einerseits Formeinsätze gefertigt werden oder aber direkt Nutzstrukturen aus dem Vollen gefertigt werden [Pfl00,Läß95]. Beispiele für Strukturen, die mit dem Laser hergestellt wurden, sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt.

Bei der Strukturierung von Kunststoff wird der Laserstrahl über ein Blenden- und Shutter-system auf einen rechteckigen Fleck mit homogener Energiedichte reduziert und löst an dieser Stelle den Kunststoff auf bis die gewünschte Tiefe der Strukturen erreicht wird. Die Steuerung des Strahls erfolgt dabei entweder über ein CAD/CAM Programm oder über eine Maskierung des Substrats.

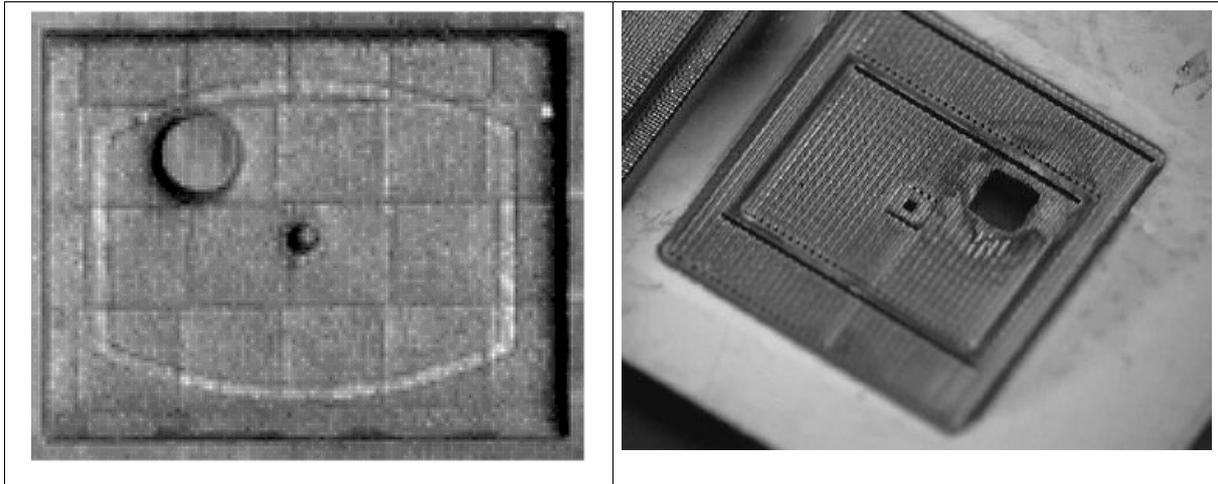


Abbildung 29 Mittels Laserablation hergestellter Formeinsatz.

Abbildung 30: Strukturierung von Kunststoff (PSU) mit Excimer-Laserstrahlung.

Ein großer Vorteil dieser Technik insbesondere gegenüber dem RMPD Verfahren ist, dass eine große Anzahl unterschiedlicher Materialien strukturiert werden kann, insbesondere auch PSU, das für die Herstellung der Mikroventile verwendet wird. Dadurch können Prototypen schnell und günstig hergestellt werden, die die gleichen Materialeigenschaften haben, wie die in einer späteren Serienfertigung hergestellten Gehäuse.

Tabelle 1: Übersicht über Herstellungsverfahren für Gehäuseteile

Abformung	Spritzgießen (TIM)	Heißprägen	UV-RIM	RMPD	EPON-SU8	Laser
Erfahrungen mit Material	PMMA, PC, PSU PE, POM, PA, PEEK, LCP PA12-C, POM-C	PMMA, PC POM, PVDF, PSU	PMMA, UP PMMA, Farbstoff gefüllt PMMA-Fe, SiO ₂ , Al ₂ O ₃	RMPD-Lack	EPON SU-8	PSU, PC, PI, PMMA, PBT, PA, PEEK, ABS Stahl, Al
Maschinen- technik	Serientauglich	Kleinserien- tauglich unter ISO 9001	Für Labormuster	Für Labormuster	Kleinserien- tauglich unter ISO 9001	für Labormuster
Zykluszeit	70 sec – 8 min	10 min – 25 min	60 sec – 30 min	70 sec – 8 min	10 min – 25 min	60 sec – 30 min
Gesamtdauer typisch	Formeinsatz + 1 Woche	Formeinsatz + 2 Tage	Formeinsatz + 2 Tage	Chrommasken + 1 Woche	Chrommasken + 2 Tage	1 Tag
max. Aspektver- hältnis	20	50	10	20	10	3-5, 10 in Stahl
min. Strukturbreite / - detail [µm]	20 / 0,2	4 / 0,2	4 / 0,2	10	5 / 2	1 Eximer 10 YAG-Laser
max. Strukturhöhe [µm]	1000	1000	400	5000	500	1000
Strukturierbare Fläche	2 mal 20 x 60 mm ² oder Teile	20 x 60 mm ² bis Ø 100 mm ²	2 mal 20 x 60 mm ²	50 mm x 50 mm	6" Wafer	150 x 150 mm ²
R _a (zum Teil formabhängig)	50 nm	50 nm	50 nm	50 nm	50 nm	50 nm
Beidseitige Strukturierung	Eingeschränkt möglich	Hervorragend geeignet	Ungeeignet	Möglich	Eingeschränkt möglich	Eingeschränkt möglich
Besonderheiten	Simulation zur Formfüllung und Werkzeug- temperierung	Positionierte Abformung auf Substrat mit +/- 10 µm lateral	Eigene Com- poundierung mit verschiedenen Füllstoffen	Material für Nutzen ungeeignet	Material für Nutzen ungeeignet	Schnelle Prototypen aus richtigem Material

3.2.7 Vergleich der Fertigungsverfahren

3.2.8 Restschicht und Grate

Beim einseitigen Abformen durch Spritzguss oder Heißprägen bleibt typischerweise auf der Rückseite eine Restschicht zurück. Beim Spritzguss wird zusätzlich eine Kammstruktur, auf der Rückseite der Nutzstruktur vorgesehen, die das Spritzgussteil beim Öffnen der Form festhält, so dass die Strukturseite entformt werden kann. Anschließend wird das fertige Teil über bewegliche Auswerferstifte auf der Rückseite der Spritzgussform entfernt. Diese Kammstruktur wird vor dem Fräsen mit einer Säge abgetrennt, was einen zusätzlichen Arbeitsschritt bedeutet.

Die Rückseite kann nachträglich abgefräst werden. Dazu werden die Nutzen in eine Vakuumspannvorrichtung eingelegt und mit einer Ultrafräse auf Maß reduziert (vergleiche Abbildung 21). Bei dieser Technik entstehen an den Durchlöchern im Nutzen selten Grate, lediglich ein ca. 20 µm dünnes Schwimmhäutchen bleibt über den Öffnungen zurück, das aufgrund seiner Flexibilität von der Fräse in das Loch eingedrückt wird. Dieses Häutchen lässt sich in der Regel einfach durch Druckluft entfernen. Für sehr kleine Öffnungen (unter 200 µm) reicht der Druck dabei häufig nicht aus. In diesem Fall müssen die Durchlöcher ein weiteres mal nachgearbeitet werden.

Grate entstehen bei der Entformung durch Fließen des Kunststoffes an der Form. Zur Vermeidung werden Entformschrägen eingesetzt, so dass das entformte Teil und der Formeinatz möglichst schnell den Kontakt zueinander verlieren. Zum anderen kommt es zur Gratabbildung, wenn das Abformwerkzeug bei der Entformung nicht vollkommen vertikal bewegt wird. Besonders kritisch sind die Grate im Bereich des Ventilsitze, da sie verhindern, dass sich die Membran dicht auf den Ventilsitz anlegt und damit das Ventil verschließt. Durch die geringe Höhe der Ventilkammer ist es außerdem möglich, dass die Membran durch einen Grat vollkommen festgeklemmt wird und sich dann gar nicht mehr bewegen lässt.

3.3 Membranübertragung und Kontaktierung

Die Gehäuseteile und die Membranen werden mit Aufbau und Verbindungstechnik (AVT) zusammengesetzt, fluidisch und elektrisch kontaktiert und anschließend vereinzelt. Als Verbindungstechniken werden das Kammer-, Kapillar-, UV- und Leitkleben eingesetzt.

3.3.1 Kammerklebetechnik

Die Verklebungen zwischen den Gehäusehälften und der Membran geschieht im Nutzen auf einer Verklebeapparatur, die am IMT entwickelt wurde und auch für die Kleinserienfertigung der Mikropumpe eingesetzt wird [Büs96,Kel92,Maa96]. Die Membranübertragung wird in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wird ein Gehäuseteil mit der Membran, die auf einem Siliziumwafer haftet (vergleiche Kapitel 3.5) verklebt und von dem Wafer abgehoben. Auf die

nach außen weisende Oberfläche des Verbundes Nutzen/Membran wird ein zweites Gehäuseseiteil angebracht, indem wie bei der ersten Verklebung Klebstoff in ein Kammersystem eingespritzt wird.

Die Verklebeapparatur des IMT besteht aus zwei beheizbaren Messingplatten, die lateral zueinander verschoben werden können und im verschraubten Zustand in der z-Richtung zusammen gepresst werden (vergleiche Abbildung 31). An die obere Heizplatte schließt sich eine Quarzglasscheibe mit Bohrungen für die Klebstoffbefüllung und Kerben für eine Fixierung durch Unterdruck, der von einer Vakuumpumpe geliefert wird, an. Die Platte sorgt für eine gleichmäßige Druckverteilung über dem gesamten Nutzen (vergleiche Abbildung 32).

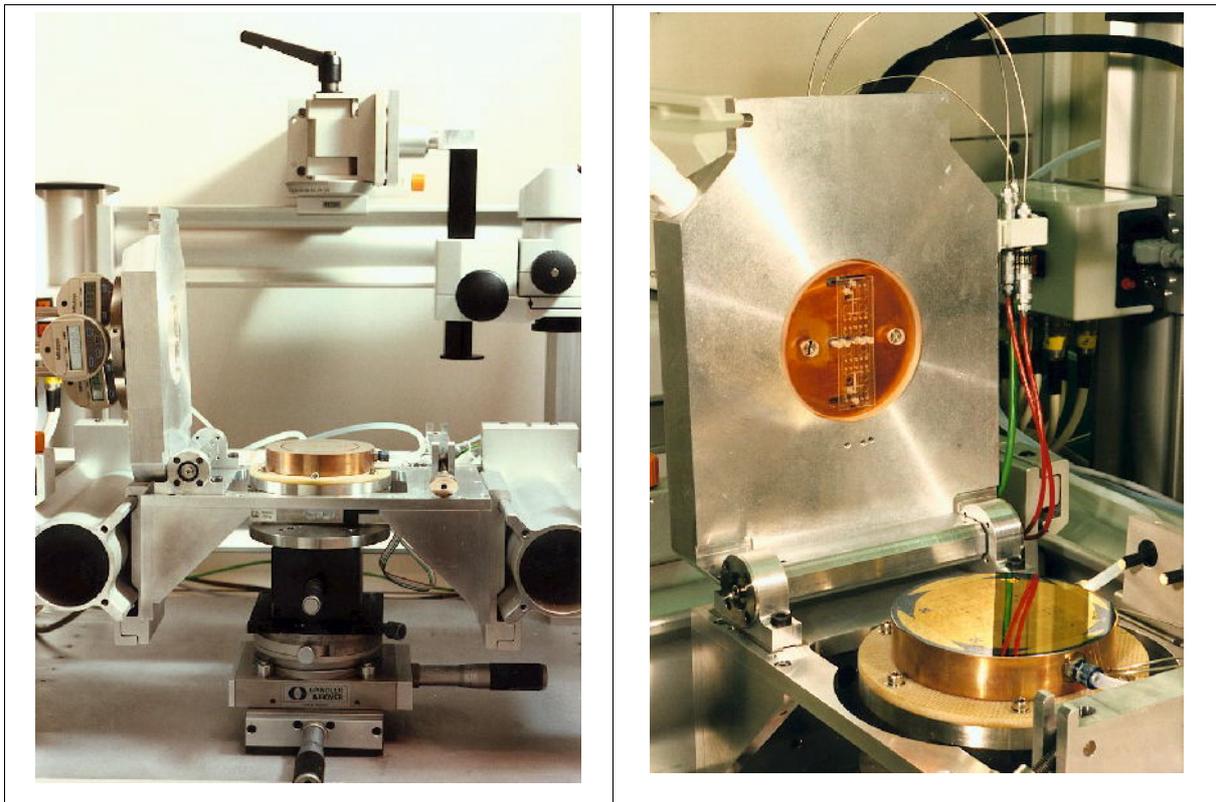


Abbildung 31: Verklebeapparatur des IMT: Unten x-y-z- Verschiebetisch, rechts oben: Oben ist ein Nutzen auf der hochgeklappten einschwenkbare Optik zur positionierten Heizplatte zu sehen, auf der unteren Heizplatte Verklebung, Links oben hochgeklappte Heizplatte ist ein Wafer mit Membran eingespannt mit Vakuums�annvorrichtung.

Der Klebstoff wird unter Druck in die Klebstoffkammer eingespritzt und verteilt sich dann innerhalb der Kammer zum einen durch den Druck, zum anderen durch Kapillarkräfte, die in der 50 - 100 μm hohen Kammer den Klebstoff vorwärts ziehen. Dabei bewegt sich der Klebstoff besonders schnell an Kanten und schmalen Bereichen voran, bleibt aber an den Stegen, die die Ventilkammer begrenzen, stehen, bis die gesamte Klebstoffkammer vollständig gefüllt ist und nur die Ventilkammern klebstofffrei sind (vergleiche Abbildung 33).

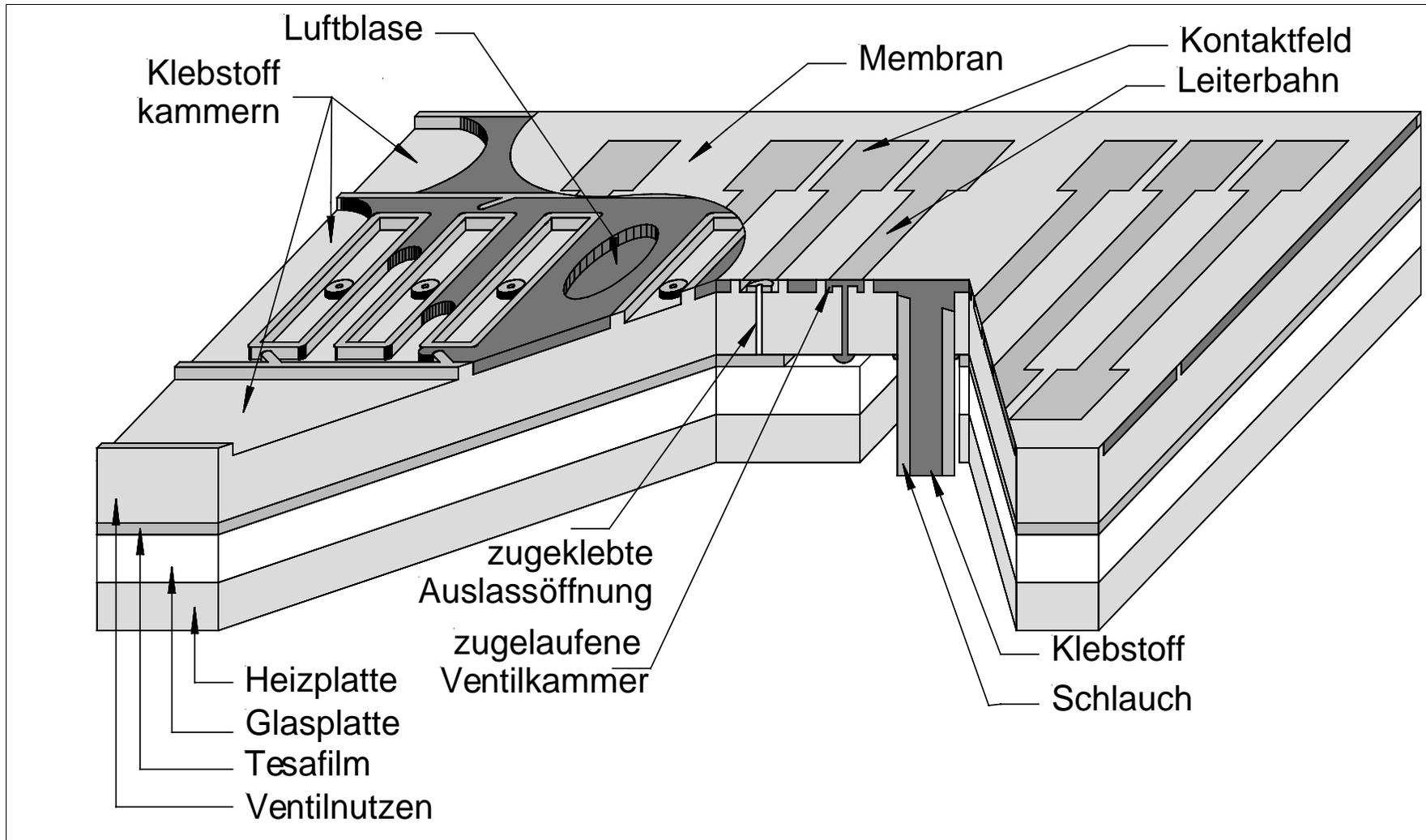


Abbildung 33: Prinzip der Kammerklebetechnik: Klebstoff wird durch einen Schlauch, der in die Rückseite des Nutzens eingeklebt ist, in ein Kammersystem unter Nachdruck gepresst, das zwischen der Strukturseite des Nutzens und der Membran entsteht. Die Membran haftet auf einem Si-Wafer (nicht dargestellt). Der Klebstoff bewegt sich zudem durch Kapillarkräfte vorwärts. Werden die Auslassöffnungen der Ventilkammern mit Klebeband verschlossen, bildet sich innerhalb der Ventilkammer durch die Temperaturerhöhung bei der Verklebung ein Überdruck, der verhindert, dass sich die Ventilkammer mit Klebstoff füllt (Nutzen maßstabsgerecht).

Allerdings lief zu Beginn der Klebstoff pro Verklebung in 40 - 50% der Ventilkammern. Da ein Ventil aus zwei Ventilkammerhälften besteht, zwischen denen die Membran eingespannt ist, sinkt die Gesamtausbeute an nicht zugelaufenen Ventilen auf 20 - 40 % je Nutzen, da beide Seiten der Ventilkammer klebstofffrei sein müssen. Um die Ausbeute zu vergrößern, wurden die Nutzen vor der Verklebung präpariert. Die Nutzen werden normalerweise vor der Verklebung im Ultraschallbad mit Spülmittel von Fetten gereinigt. Kurz vor der Verklebung wird die Oberfläche der Strukturseite der Nutzen nun zusätzlich im Planarätzer bearbeitet.

Im Planarätzer wird die Gehäuseoberfläche einem Sauerstoff-Plasma ausgesetzt. Der Aufprall der Sauerstoffatome und -moleküle auf Moleküle an der Oberfläche des Nutzens führt zu einer Aktivierung der Oberfläche im Sinne einer höheren Reaktivität. In der Sauerstoffatmosphäre kommt es zu chemischen Veränderungen der Oberfläche durch den Einbau von Dipolen, die für die Benetzungseigenschaften wichtig sind. Dadurch gewinnt das unpolare PSU an seiner Oberfläche einen polaren Charakter, was zu einer Erhöhung der Klebefestigkeit mit dem Klebstoff führt. Als weitere Mechanismen der Verbesserung der Klebefestigkeit können die Degradation von Polymerketten, die Bildung von Radikalen und eine Entfernung oder Reduzierung der „weak boundary layer“ gelten [Hab97]. Die Einwirktiefe liegt bei ca. 2-3 nm [Ger87]. Der positive Effekt der Aktivierung auf das Klebeverhalten ist von der Liegezeit und dem Material abhängig und verschwindet beim PSU nach einigen Stunden.

Als weitere Verbesserung wird die Rückseite des aktivierten Gehäuseteils im Bereich der Ventilöffnungen mit hitzebeständigem Klebeband abgeklebt (vergleiche Abbildung 33 Mitte). Dadurch wird die Luft, die sich in den Ventilkammern befindet eingeschlossen, wenn das Ventilgehäuse auf die Membran gepreßt wird. Sobald die auf Verklebetemperatur beheizten Komponenten zusammengedrückt werden, erwärmt sich die Luft in den Ventilkammern. Da die Luft durch das Klebeband nicht entweichen kann, entsteht ein Überdruck in den Ventilkammern, der verhindert, dass Klebstoff in die Ventilkammer fließt. Da die Klebstoffkammern nach außen offen sind, bleibt der Normaldruck im Bereich der Klebstoffkammer erhalten.

Nach der Aktivierung der Nutzenoberfläche und der Verschließung der Ventilkammeröffnungen lag die Ausbeute bei 85 - 95 %.

Wie in Kapitel 2.1.1 dargelegt, wird die Vorspannung der Membran durch die Verklebetemperatur bestimmt. Das Design der Formeinsätze wurde für eine Verklebung bei 90°C ausgelegt. Bei dieser Temperatur passen Membran und Gehäuseteile direkt aufeinander. Die Toleranz, die für Maßhaltigkeit der Verklebung der Gehäuseteile zu der Membran nötig ist, ist durch die Breite der Schlitze in der Membran von 50 µm vorgegeben. Wird diese Toleranz überschritten, wird die Membran auch längsseitig von der Kammerwand eingespannt. Bei einer präzisen Verklebung ($\pm 10 \mu\text{m}$) ergibt sich dadurch ein Spielraum in der Verklebetem-

peratur von $90^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$. Die Verklebetemperatur ist andererseits durch den Klebstoff ebenfalls eingeschränkt. Der Klebstoff kann nach 30 min, während der sich die beiden Komponenten des Epoxidharzklebers verbinden, verarbeitet werden. Innerhalb dieser Zeitspanne nimmt die Viskosität stark ab und bleibt nach Ablauf der 30 Minuten relativ konstant und der Kleber härtet bei Raumtemperatur nach 72 Stunden vollständig aus. Bei Temperaturen von 110°C härtet der Klebstoff innerhalb von wenigen Minuten aus, so dass dies die maximale Temperatur für eine Verklebung ergibt, da sonst der Klebstoff innerhalb der Kammern so hart wird, dass kein neues Material nachgedrückt werden kann. Bei einer Temperatur von 60°C dauert die Trocknung ca. 30 min. Innerhalb dieser Zeitspanne kann der Klebstoff durch die Kapillarkraft auch zwischen Membran und Kammerstege gelangen und die Kammern befüllen.

Die bestehende Kammerklebeapparatur wurde für Membranen auf 4"-Siliziumwafern und Gehäuseteile mit den Abmessungen von $28 \times 66 \text{ mm}^2$ ausgelegt. Um kleinere Gehäuse mit der Kammerklebetechnik verkleben zu können, musste deswegen ein Adapter für die Apparatur entwickelt werden, der eine justierte Verklebung von Membran zu Gehäuse erlaubt. Dies war im Rahmen dieser Arbeit notwendig, da die Ventilgehäuse, die von microTEC mit dem RMPD-Verfahren hergestellt wurden, nur Abmessungen von maximal $26 \times 17 \text{ mm}^2$ besitzen. Der Adapter wurde aus Messing gefertigt, um eine gute thermische Übertragung der Heizplatte auf die Nutzstruktur zu gewährleisten.

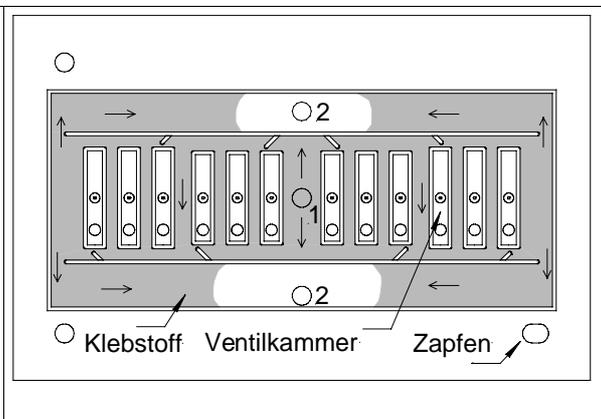
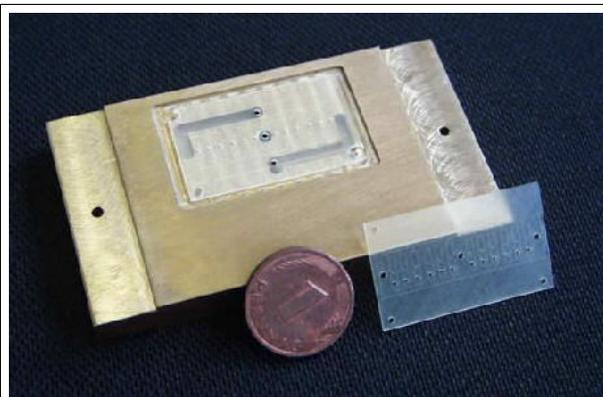


Abbildung 34: Aufnahmeadapter für die Verklebeapparatur für Nutzen von microTEC. Hier werden alle Kammern mit einem einzigen Klebeschritt befüllt.

Abbildung 35: Klebekammern bei microTEC-Gehäusen. Klebstoff wird bei (1) eingespritzt, verteilt sich entlang der Pfeile und verlässt die Kammer bei (2) durch Schläuche in der Kammerdecke

Bei der gewöhnlichen Verklebung mit der Kammerklebetechnik werden Membran und Gehäuse optisch über Justiermarken zueinander positioniert. Ebenfalls wird der Füllzustand der Klebekammern optisch überprüft und die Befüllung gestoppt, wenn der Klebstoff am Rand aus den Klebstoffkammern austritt. Diese optischen Kontrollen sind nicht möglich, wenn der Werkstoff, aus dem die Nutzen gefertigt sind, undurchsichtig ist. Auf Grund der

momentanen Konstruktion der Kammerklebeapparatur werden im geschlossenen Zustand Gehäuseteile mit den Abmessungen von 26 x 17 mm² vollständig von der Heizplatte verdeckt, so dass auch hier eine optische Positionierung und Klebstoffkontrolle unmöglich ist.

Deswegen ist auf dem Verklebeadapter eine passive Justierung mit drei Zapfen vorgesehen, die an drei Ecken in dazu passende Löcher im Nutzen passen. Wegen der thermischen Ausdehnung der Teile bei der Verklebung ist eines der Löcher in Längsrichtung als Langloch ausgeführt. Die aktive Positionierung von Membran und Adapter wird wieder über die üblichen Justiermarken zwischen Membran und Adapter erzielt. Dadurch konnten die kleineren Gehäuse auch mit den Membranen verklebt werden, die für die großen Nutzen hergestellt wurden.

Bei der gewöhnlichen Verklebung mit der Verklebeapparatur wird die Verklebung gestoppt, wenn der Klebstoff aus den Klebstoffkammern austritt, um zu verhindern, dass der Klebstoff nicht über den Nutzen hinaus in die Verklebeapparatur läuft. Deswegen wurden in dieser Anordnung alle Klebstoffkammern zusammengefaßt (vergleiche Abbildung 35). Der Klebstoff dringt durch die mittlere Klebekammer in beide Richtungen um die Ventile ein, befüllt anschließend die Klebekammer für die elektrischen Kontaktfelder und fließt dann durch eingeklebte Schläuche durch die üblichen Befülllöcher in der Verklebeapparatur zurück. Beim Oberteil, bei dem keine Klebekammern unter den Kontaktfeldern vorgesehen sind, tritt der Klebstoff unmittelbar am Ende der zentralen Kammer in einen Schlauch ein, der innerhalb des Adapters zu den vorgegebenen Befülllöchern gelenkt wird. Das hat den Vorteil, dass der Klebstoff nicht aus der geschlossenen Klebekammer auslaufen kann und der Einschluß von Luftblasen vermindert wird. Diese Luftblasen entstehen meist, wenn der Ausgang für die Luft durch Klebstoff verschlossen wird. Klebstoff kann sich aufgrund von Kapillarkräften schneller als die gesamte Klebstofffront in den Klebekammern ausbreiten und der Luft dadurch den Weg abschneiden. Da sich die Kapillarkräfte aber insbesondere an Kanten auswirken und sich an größeren Flächen erheblich reduzieren, kann die Luft durch ein Loch in der Kammerdecke, in das der Schlauch eingeklebt ist, entweichen. Mit dem Füllstand der Klebstoffrückleitung wird das Ende der Verklebung festgestellt.

3.3.2 Leitkleben

Zur elektrischen Kontaktierung der Ventile mit der Steuerelektronik hat sich das Leitkleben als erfolgreiche Methode durchgesetzt. Alternative Methoden sind die reversible Kontaktierung über Leitungsband oder Leitmatten oder das Drahtbonden. Beim Leitkleben wird ein auf Epoxy-Basis beruhender Klebstoff eingesetzt. Eine Komponente des Klebstoffs ist mit Silberpartikeln versetzt, so dass sie elektrisch leitfähig ist. Der Klebstoff wird im vermischten Zustand ganzflächig auf die Kontaktfelder und Drahtenden aufgebracht und fixiert bei 80°C

getrocknet. Der Kontaktwiderstand der Verklebung liegt bei ca. $0,1\Omega$. Durch das ganzflächige Aufbringen des Klebstoffs werden Defekte an den Kontaktfeldern meist ausgeglichen.

3.3.3 UV-Kleben

Zu der fluidischen Kontaktierung der Nutzen werden auf das Ober- und das Unterteil Fluidbausteine aufgeklebt. Die Fluidbausteine sind PMMA Quader mit einer Bohrung in der Mitte, in die mittels UV-Kleben ein Schlauch eingeklebt wird, der das Gas oder die Flüssigkeit zum und vom Ventil leitet und damit auch den Übergang zwischen der makroskopischen und mikroskopischen Welt darstellt (vergleiche Abbildung 36).

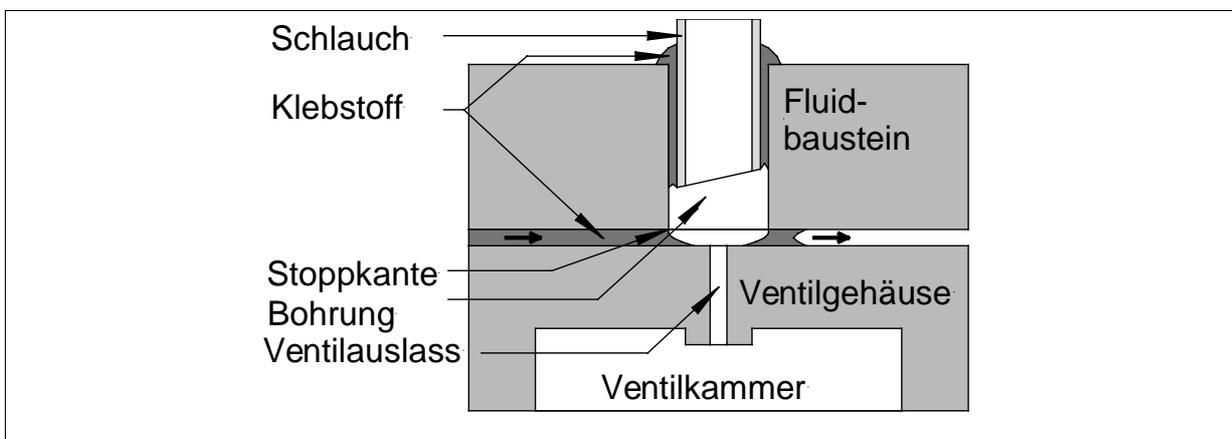


Abbildung 36: Prinzip des Kapillarklebens beim Verkleben von Fluidbaustein und Gehäuse. Der Fluidbaustein dient als Adapter zu größeren Schlauchdurchmessern.

Die Bohrung im Fluidbaustein weist einen größeren Durchmesser als die jeweiligen Öffnungen in den Rückseiten von Ventil Ober- und Unterteil auf. Das erfüllt zum einen den Zweck, dass ein Kunststoffschlauch mit einem größeren Innendurchmesser als die Kapillare im Ventil selbst eingesetzt werden kann. Dadurch bleibt diese Kapillare und die Öffnung zwischen dem Ventilsitz und der Membran das den fluidischen Widerstand des Gesamtsystems betreffend bestimmende Element. Zum anderen verhindert der größere Durchmesser der Bohrung im Fluidbaustein, dass beim Zusammenkleben von Ventil und Fluidbaustein die Öffnungen durch Klebstoff verschlossen werden. Beim Aufkleben der Fluidbausteine wird die Kapillarklebeteknik eingesetzt. Dabei werden die starken Kapillarkräfte ausgenutzt, die eine Flüssigkeit in einen dünnen Spalt hineinziehen. Ventil und Fluidbaustein werden aufeinandergesetzt, zusammengepreßt und mit einer Nadel wird ein kleiner Klebstofftropfen seitlich an die Verbindungsstelle aufgesetzt. Die Kapillarkraft im Luftspalt zwischen den beiden Bauteilen zieht dann den Klebstoff in den Spalt, bis die gesamte Auflagefläche gleichmäßig benetzt ist. Der Klebstofffluß kann in diesem Fall leicht kontrolliert werden, da der Luftspalt durch Totalreflexion spiegelnd erscheint. In dem Bereich,

in den bereits Klebstoff eingedrungen ist, wird die Kontaktzone transparent, da der Brechungsindex von Klebstoff, Ventilgehäuse und Fluidbaustein ähnlich ist.

Die Klebstofffront bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die mit geringerer Spalthöhe zunimmt. Erreicht daher der Klebstoff eine Kante, die zu einer Vergrößerung des Spaltquerschnitts führt, verlangsamt sich der Klebstofffluss in diesem Bereich. Die Bohrung im Fluidbaustein, die die kleinere Öffnung im Ventil umgibt, stellt so eine Kante dar. In Abbildung 37 ist ein fluidisch und elektrisch vollständig kontaktiertes Ventil zu sehen.

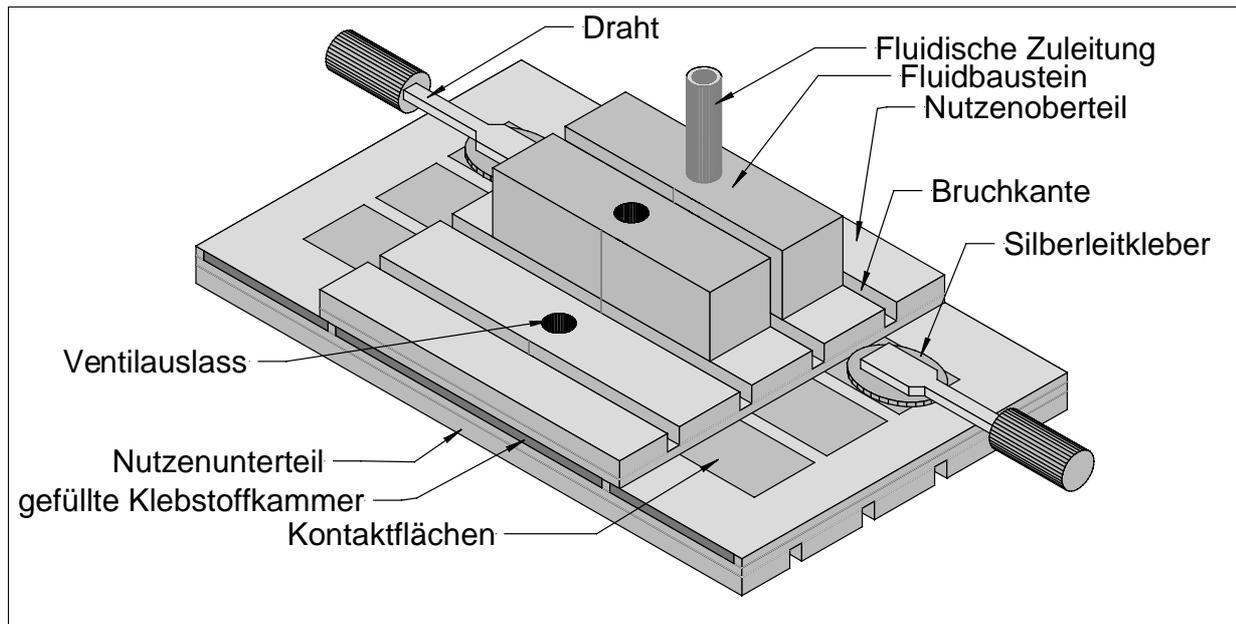


Abbildung 37: Ventilnutzen nach der Verklebung und der elektrischen und fluidischen Kontaktierung. Anschließend werden die Ventile längs der Bruchkanten vereinzelt, (Zeichnung maßstäblich).

3.4 Formeinsätze

Für die Abformung der Gehäuseteile werden zwei Formeinsätze benötigt, mit denen die obere bzw. untere Gehäuseschale hergestellt werden. Es wurden im Verlauf der Arbeit zwei Formeinsatzpaare hergestellt, ein Paar für den Spritzguss, anschließend ein Paar mit einem verbesserten Design für das Heißprägen, das anschließend für die beidseitige Abformung umgearbeitet wurde.

3.4.1 Herstellung

Die beiden Formeinsätze für Spritzguss und Heißprägen wurden durch mikromechanische Bearbeitung aus einem Rohling aus Messing mit einer CNC-Maschine gefräst, das erste Paar von der Firma Kern in Murnau, das zweite von der Hauptabteilung Versuchs- und Prozesstechnik HVT am FZK. Eine Alternative zu der mikromechanischen Herstellung der Formeinsätze, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, war die Formeinsatzherstellung mit Laser.

Wolframcarbidhaltige Hartmetalllegierungen lassen sich mittels Laserablation strukturieren [Pfi98]. Ähnlich wie bei der direkten Bearbeitung der Kunststoffteile wird hier ein Q-switch Nd:YAG-Laserstrahl auf die Hartmetalloberfläche fokussiert und mittels eines Spiegelsystems über die Oberfläche gescannt. Säulenstrukturen für die Durchlöcher im Ventil lassen sich dabei mit einer Höhe von 500 µm mit bei Pulsfrequenzen von 4–8 kHz erzeugen, in dem pro Puls bis zu 2000 µm³ Material abgetragen wird. Gesamthöhen von mehreren Millimetern sind möglich. Nach Aussagen des IMF kann ein gebrauchsfähiger mikrostrukturierter Formeinsatz inklusive der Oberflächenglättung, beginnend bei der Eingabe der CAD/CAM-Daten bis zum fertigen Hartmetall- oder Stahlformeinsatz, innerhalb von zwei bis vier Tagen realisiert werden [Pfi00].

Sowohl bei den mit den abgeformten Teilen des laserstrukturieren Hartmetall Formeinsatzes, als auch den vom Excimer-Laser direkt gefertigten Nutzen musste festgestellt werden, dass sowohl Oberflächenbeschaffenheit als auch Rauigkeit und Kantensteilheit mit $R_{\bar{a}} = 1$ bis 5 µm noch sehr hoch sind. Die Laserbearbeitung ist damit den anderen Strukturierungsverfahren zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Untersuchung erheblich unterlegen. Da eine qualitativ hochwertige Oberflächenbeschaffenheit im Bereich des Ventilsitzes für die Funktion des Ventils von besonderer Wichtigkeit ist, wurden die Versuche, Nutzen mit dem Laser zu strukturieren, nicht weiter verfolgt. Außerdem konnten aus apparativen Gründen nur Flächen mit Außenabmessungen von maximal 15 x 10 mm² strukturiert werden, während für die Nutzen der Mikroventile Abmessungen von 66 x 28 mm² vorgesehen waren. Das kostengünstige Verbindungsverfahren mit der Kammerklebetechnik kann bislang mit diesem Verfahren nicht realisiert werden, weil die Bearbeitungsfläche zu klein für ein Kammersystem ist.

Seit den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit wurden Verbesserungen an der Bearbeitungstechnik mittels Laser am Institut für Materialforschung vorgenommen, beispielsweise eine verbesserte Abtragsstrategie, der sogenannten Ortho-Scan Technik, die zu einer Verringerung der Oberflächenrauheit führt [Lae95, Mei95].

3.4.2 Design

Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die beiden Designs für die Strukturflächen der Formeinsätze der Ventilsitzseite der Gehäuse. Im folgenden werden die Details beschrieben.

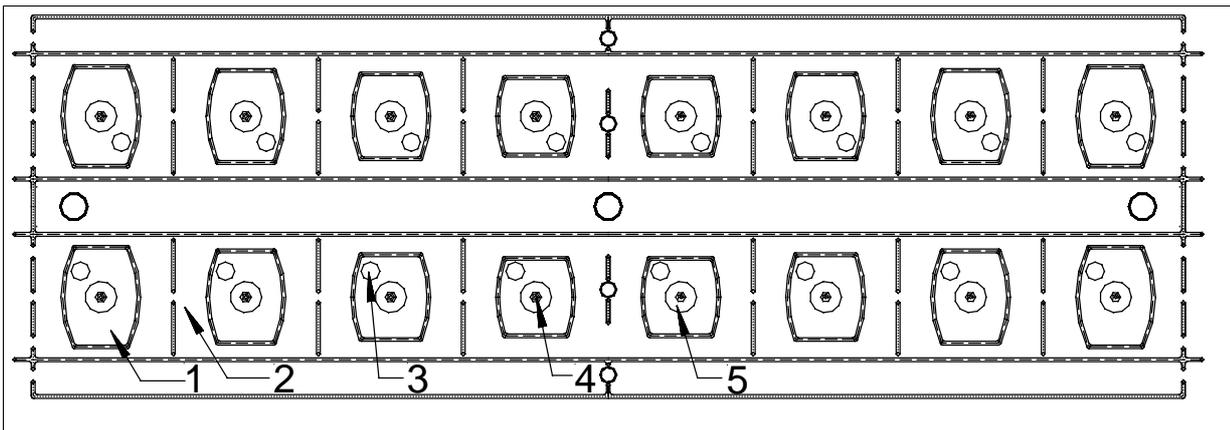


Abbildung 38: Design des ventilseitigen Formeinsatzes für den Spritzguss. Auf einem Nutzen werden die Gehäuseschalen für 16 Ventile strukturiert. Umgeben sind die Ventilkammern (1) durch eine zusammenhängende Klebekammer (2). 1. Ventilkammer, 2. Klebekammer, 3. Stift, der die Auslassöffnungen der Ventile erzeugt, 4. Ventilsitz, 5. Schutzwall, der eine Beschädigung des Formeinsatzes beim Spritzguss verhindern soll.

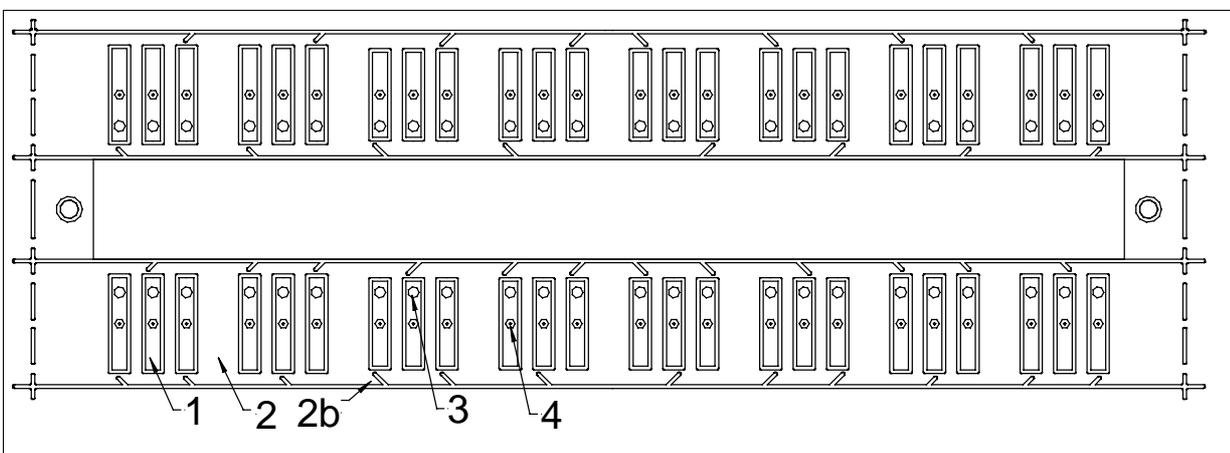


Abbildung 39: Design für den ventilseitigen Formeinsatz für das Heißprägen, hier werden die Gehäuseschalen für 48 Ventile auf einem Nutzen hergestellt. Die Durchlöcher werden durch Stifte erzeugt, die auf der Formeinsatzseite 180 µm hoch sind und von der Rückseite auf 350 µm hohe Stifte treffen. 1. Ventilkammer, 2. Klebekammer, 3. Stift, 4. Ventilsitz.

3.4.2.1 Ventilkammer

Die Ventilkammer besteht aus einem einzelnen geschlossenen umlaufenden Steg. Die Hauptaufgabe der Ventilkammer liegt darin, einen Hohlraum gegenüber dem Klebstoff freizulassen, der in die umliegende Klebstoffkammer eingespritzt wird. Innerhalb der Ventilkammer wird die Membran an den beiden kurzen Stirnseiten von dem umlaufenden Steg eingespannt. In der übrigen Ventilkammer bleibt die Membran durch Schlitze entlang der Goldleiterbahn frei. Unterhalb der Membran ist eine Ventilsitz strukturiert, durch dessen Mitte das Fluid ausströmt, wenn die Membran vom Ventilsitz durch die Lorentzkraft bewegt wird. Daneben ist ein Stift für die Zuleitung des Fluids angelegt. Im ersten Design war vorgesehen, dass das Fluid auf der gleichen Seite in das Ventil ein- und austritt. Im zweiten Design wurde die Einlassöffnung auf die gegenüberliegenden Seite verlegt, um den Schließdruck auf die

Membran zu vergrößern. Im zweiten Design ist auch auf der Ventilsitzseite ein halber Stift für den Einlass vorstrukturiert, der bei Bedarf von der Rückseite geöffnet werden kann.

Die Ventilkammer ist im ersten Formeinsatz seitlich abgerundet, damit sie besser vom Klebstoff umflossen werden kann und in ihrer Länge variiert um unterschiedliche Auslenkung der Membran nach einer Verklebung zu erreichen. Bei dem zweiten Design wurde die Ventilkammer deutlich verschmälert damit das externe Magnetfeld groß bleibt (Vergleiche Kapitel 2.2). Die Ventilkammern sind möglichst lang, da die Länge der Membran in die Größe der Lorentzkraft eingeht. Die Ventilkammer hat eine Höhe von 100 μm .

3.4.2.2 Klebstoffkammern

Bei der Kammerklebetechnik muss sich der Klebstoff gleichmäßig und ohne Luftblasen in der gesamten Kammer verteilen. Aus diesem Grund ist im ersten Formeinsatz die Ventilkammern verrundet und in ihrer Größe aufsteigend nach außen hin sortiert angeordnet. Im zweiten Design wurden Stege vorgesehen, die den Klebstofffluss lenken sollen (siehe Detail 2b in Abbildung 39). Diese kurzen Zapfen sollen dazu führen, dass der Klebstoff meanderförmig um die Ventile fließt, anstatt sich geradewegs am Rand entlang zu bewegen und dabei Luftpinschlüsse zwischen den Ventilkammern zu hinterlassen. Da der Klebstofffluss aufgrund der undurchsichtigen Heizplatten nicht visuell zugänglich ist, kann keine Aussage darüber gemacht werden, inwieweit dieses Konzept wirkungsvoll ist.

An die zentralen Klebekammern schließen sich nach außen je eine schmale Klebekammern an, die gesondert befüllt werden und bei der ersten Verklebung zur Fixierung der elektrischen Kontaktfelder dienen. Diese äußeren Klebekammern sind im oberen Ventilnutzen nicht vorgesehen, da die Kontaktfelder für die elektrischen Zuleitungen von der Oberseite frei sein müssen. Die mittlere Kammer wird beim Oberteil nicht befüllt, da hier die Paare zu den äußeren Kontaktfelder liegen. Im Oberteil ist die Kammerhöhe im Mittelbereich abweichend von den 100 μm im restlichen Nutzen auf 300 μm angehoben. Einerseits ist die größere Kammerhöhe ein Schutz gegen das versehentliche Einfließen von Klebstoff, zum anderen muss die Kammerdecke nachträglich mit einer Kreissäge entfernt werden, um die Kontaktfelder zugänglich zu machen, was durch die größere Kammerhöhe erleichtert wird.

3.4.2.3 Stifte

Die Stifte stellen die kritischsten Strukturen im Formeinsatz dar, da sie mindestens die Höhe der Gehäuseschale in ihrer endgültigen Form durchstrukturieren müssen. Diese können auf verschiedene Weise im Formeinsatz realisiert werden, nämlich als Hartmetallstifte, die in den Messingformeinsatz eingesetzt werden oder als Messingstifte, die aus dem Vollen gefräst sind.

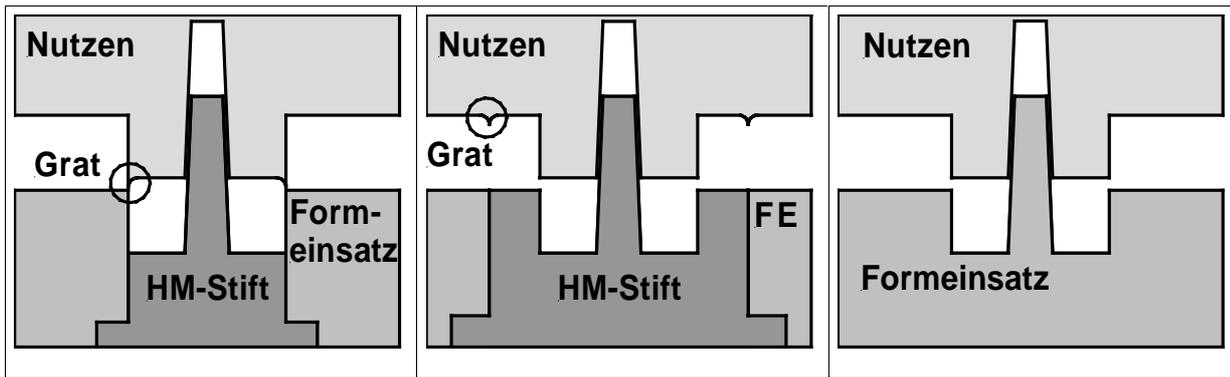


Abbildung 40: Strukturierungsmöglichkeiten für Durchlöcher im Formeinsatz. a) eingesetzte Hartmetallstifte, b) breitere Hartmetallstifte mit strukturierter Stirnfläche, c) aus dem vollen gefräste Stifte

Die Hartmetallstifte haben den Vorteil, dass sie durch ihre größere Biegesteifigkeit der hohen mechanischen Beanspruchung beim Abformen besser standhalten [Rei97]. Diese entsteht bei der Abkühlung durch das Aufschrumpfen des Abformwerkstoffes auf den Formeinsatz. Allerdings ist bei Versuchen mit anderen Formeinsätzen gezeigt worden, dass sich ein Spalt zwischen Stift und Formeinsatz bildet, in den bei der Abformung Kunststoff eindringt (siehe Abbildung 40a).

Der Spalt ist durch Fertigungstoleranzen bedingt und wird durch die größere thermische Ausdehnung von Messing gegenüber Hartmetall bei der Abformung vergrößert. Dadurch entstehen an diesen Stellen beim Abformen Grate, die gerade im Bereich des Ventilsitzes stören. Die Möglichkeit, den Stift breiter anzulegen (siehe Abbildung 40b) entfällt, da hierfür der Ventilsitz ebenfalls auf dem Stift realisiert werden müsste. Die Stifte aus dem Vollen im Formeinsatz zu fräsen hat den Vorteil, dass keine Grate entstehen (Abbildung 40c).

Dafür muss die niedrigere Biegesteifigkeit der Messing-Stifte in Kauf genommen werden. Wenn der Formeinsatz vollständig aus Hartmetall oder Stahl gefertigt wird, fallen diese Überlegungen weg. Allerdings konnte im Rahmen dieser Arbeit von dieser Technik kein Gebrauch gemacht werden, da das Verfahren zu dem Zeitpunkt noch nicht ausgereift war.

Für die Funktion des Ventils ist die Auslassöffnung im Bereich des Ventilsitzes von zentraler Bedeutung. Die Fläche der Auslassöffnung bestimmt, wieviel Kraft notwendig ist, um das Ventil gegen einen Außendruck zu verschließen. Auf der anderen Seite muss die Öffnung groß genug sein um im Formeinsatz durch einen Stift realisiert zu sein (vergleiche Kapitel 2.1).

Ein hohes Aspektverhältnis der Stifte muss vermieden werden, um zu verhindern, dass die Stifte beim Herstellungsprozess im Spritzguss durch den hohen Einspritzdruck des Kunststoffes verbogen werden. Auch beim Heißprägen treten starke Kräfte auf, die die Stifte verbiegen können, da das abgeformte Teil beim Abkühlen auf den Formeinsatz aufschumpft und dadurch sich zum Zentrum des Formeinsatzes hin verkleinert. Die

fertigungstechnischen Auflagen überwiegen dabei die Vorgaben für einen ausreichenden Durchfluss an Fluid.

3.4.2.4 Ventilsitz

Der Ventilsitz wird durch eine einzige Fahrspur des Diamantwerkzeugs hergestellt und ist um $50\ \mu\text{m}$ zu den Stegstrukturen zurückgesetzt. Die Membran hat dadurch die Möglichkeit, der Druckspannung, die bei der Verklebung entsteht, auszuweichen. Idealerweise sollte sich die Membran an den Ventilsitz anlegen und diesen dicht verschließen. Deswegen ist es an dieser Stelle besonders wichtig, dass die Oberfläche des Ventilsitzes glatt ist.

Bei der Entformung durch Heißprägen drücken sich die Stifte im Randbereich des Formeinsatzes seitlich in das noch weiche PSU und werfen es dünenartig auf (vergleiche Abbildung 41). Dies behindert eine Abdichtung der Ventilöffnung. Der Fehler kann leicht manuell behoben werden, indem eine Räumnadel mit $500\ \mu\text{m}$ Durchmesser unter dem Mikroskop vorsichtig auf den Ventilsitz gepreßt und damit die Erhebung eingeebnet wird (vergleiche Abbildung 42).

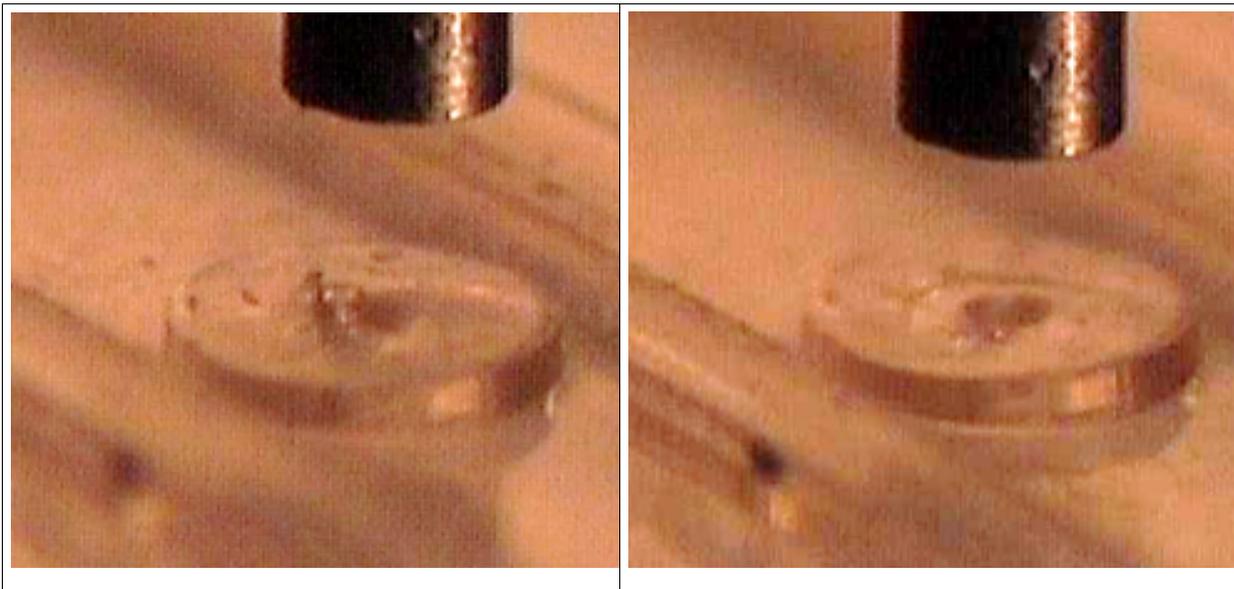


Abbildung 41: Detailansicht des Ventilsitzes. **Abbildung 42:** Wie Abbildung 41, Aufwertung mit Aufwertung im Ventillbereich durch Schrumpfung. **Abbildung 42:** Wie Abbildung 41, Aufwertung mit einer Räumnadel eingeebnet.

3.4.2.5 Entformschrägen

Beim Entwurf der Formeinsätze wurden Entformschrägen vorgesehen, damit die mikrostrukturierten Teile bei der Abformung besser aus dem Formeinsatz entnommen werden können. Durch die Schräge löst sich die Form vom abgeformten Teil bei einer vertikalen Bewegung schneller [Rei98]. Das heißt, dass alle Strukturwände im Formeinsatz einen Winkel von $> 2^\circ$ zur Senkrechten aufweisen müssen. Zusätzlich war im ersten Design am Boden der Strukturen eine Schräge von 15° vorgesehen, damit schmale und hohe Stifte im Form-

einsatz nicht beschädigt werden (vergleiche Abbildung 43). Verwinkelte Entformschrägen dieser Dimensionen lassen sich mit herkömmlichen Hartmetallfräsern nicht realisieren. Deswegen kamen bei der Herstellung der Formeinsätze Diamantwerkzeuge zum Einsatz, die von der Firma Medidia in Zusammenarbeit mit HVT entwickelt wurden [Med00].

Die Stufe in der Entformschräge entsteht durch die Schneidgeometrie des 200 µm Fingerfräasers, der zur Herstellung der Ventilformeinsätze aus Naturdiamant geschliffen wurde (vergleiche Abbildung 44). Fräser lassen sich leichter aus Diamant als aus Hartmetall wegen der extremer Härte des Diamants zu komplizierten Schneidgeometrien verarbeiten. Dafür lassen sich Fingerfräser aus Hartmetall in zylindrischer Ausfertigung bis zu 80 µm kleinen Durchmessern herstellen [Sch99b]. Im zweiten Formeinsatzpaar wurden die Stegstrukturen und die Stifte mit Entformschrägen mit einem Winkel von 2° mit einem entsprechenden Diamantwerkzeug gefräst. Da die Stifte im zweiten Formeinsatzpaar niedriger und damit stabiler sind, wurde auf den Absatz verzichtet.

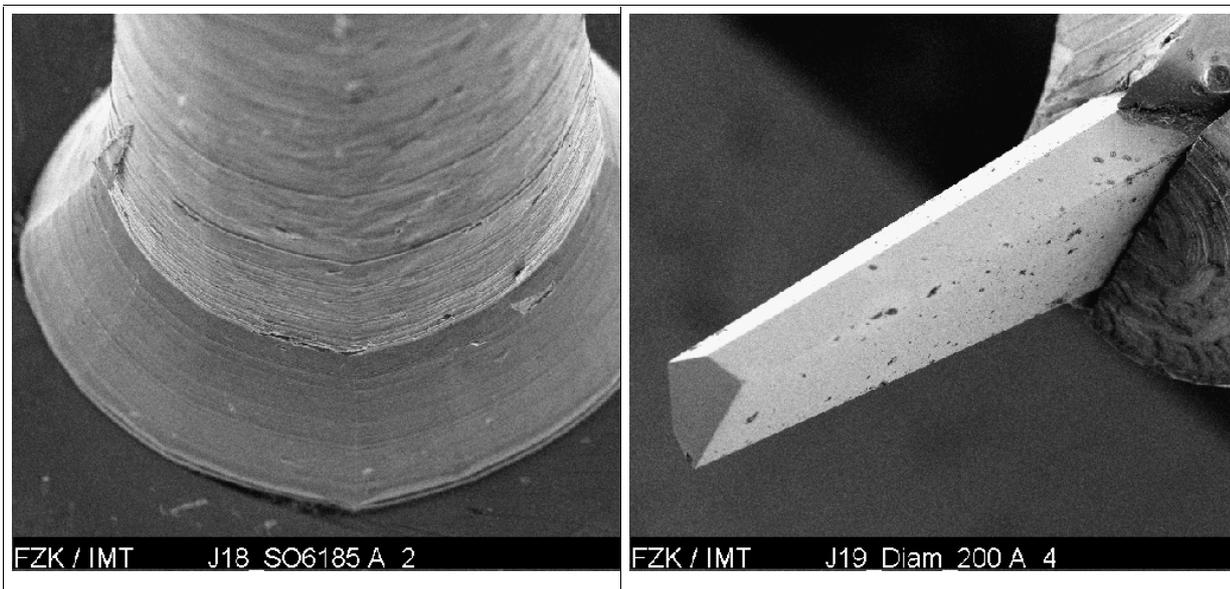


Abbildung 43: Entformschrägen im Formeinsatz, REM-Aufnahme vom Ventilsitz, Breite des Absatzes 50 µm. **Abbildung 44:** Diamantfräser zur Strukturierung der Entformschrägen, Durchmesser 200 µm.

3.4.2.6 Rückhaltestege

Im Bereich der Ventilkammer befinden sich auf der Rückseite Rückhaltestege. Die Membran befindet sich in der ersten Beulform, hat also genau einen Bauch in der Mitte und je einen Knoten an den Einspannstellen im Gehäuse. Die Membran hat zwei stabile Zustände, bei denen der Bauch jeweils in eine Kammerhälfte ausgewölbt ist. In einem dieser Zustände deckt die Membran den Ventilsitz ab und das Ventil ist „normally closed“. Um zu verhindern, dass der zweite stabile Zustand von der Membran durch den Schaltvorgang eingenommen werden kann, sind auf der anderen Seite in der Ventilkammer Rückhaltestege vorgesehen.

Statt dessen liegt die Membran in einem labilen Zustand auf den Rückhaltstegen auf. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Membran auf Grund der Rückhaltstegen und der beschränkten Kammerhöhe vorzugsweise eine höhere Beulform einnimmt, wenn die Druckspannung in der Membran durch die Verklebung zu hoch ist. In dieser höheren Beulform verschließt die Membran den Ventilsitz gerade nicht. Dies kann vermieden werden, wenn die Vorspannung der Membran sorgfältig eingestellt wird. Die Vorspannung wird durch die Verklebetemperatur beeinflusst (vergleiche Kapitel 2.1).

3.4.2.7 Schutzwall

Im ersten Formeinsetzdesign ist um den Ventilsitz ein ringförmiger Schutzwall angebracht, der den Druck des einströmenden Kunststoffes auf den 500 µm hohen und an der Spitze nur 80 µm durchmessenden Stift verringern soll. Der Ringwall ist 100 µm niedriger als der Stift, so dass der flüssige Mold über diesen Ringspalt den Ventilsitz befüllt, (vergleiche Abbildung 45). Außerdem dient der Ringwall als Verankerung der abgeformten Teile, die durch die Längenkontraktion beim Abkühlen auf den Wall und nicht auf die fragilen Stifte aufschumpft. Die dünne Restschicht von nur 100 µm hat sich als problematisch erwiesen, da beim Entformen die dünne Restschicht eine Sollbruchstelle darstellt. Um zu verhindern, dass der Nutzen dort einreißt wurden die Nutzen mit einer stärkeren Restschicht geprägt und anschließend auf das Sollmaß abgefräst, wodurch die Durchlöcher freigelegt werden. Beim Abfräsen werden die abgeformten Nutzen in eine Vakuumspannvorrichtung eingelegt, so dass die Strukturen (Kammerstege und Ventilsitz) nicht aufliegen. Dabei musste festgestellt werden, dass an der flexiblen Restschicht, die durch den Ringwall entsteht, beim Fräsen der Ventilsitz so weit nach unten gedrückt wird, dass nicht ausreichend Abtrag in dem Bereich der Ventilöffnung erzielt werden kann. Dadurch werden die Durchlöcher nicht freigelegt. Deswegen war auch mit diesem Strukturierungsverfahren ein manuelles Nachbessern der Durchlöcher erforderlich. In Abbildung 45 ist eine REM Aufnahme der Struktur im Formeinsetz des ersten Designs mit Stiften für Einlaß und Auslaß und einem Schutzwall für den Ventilsitz zu sehen.

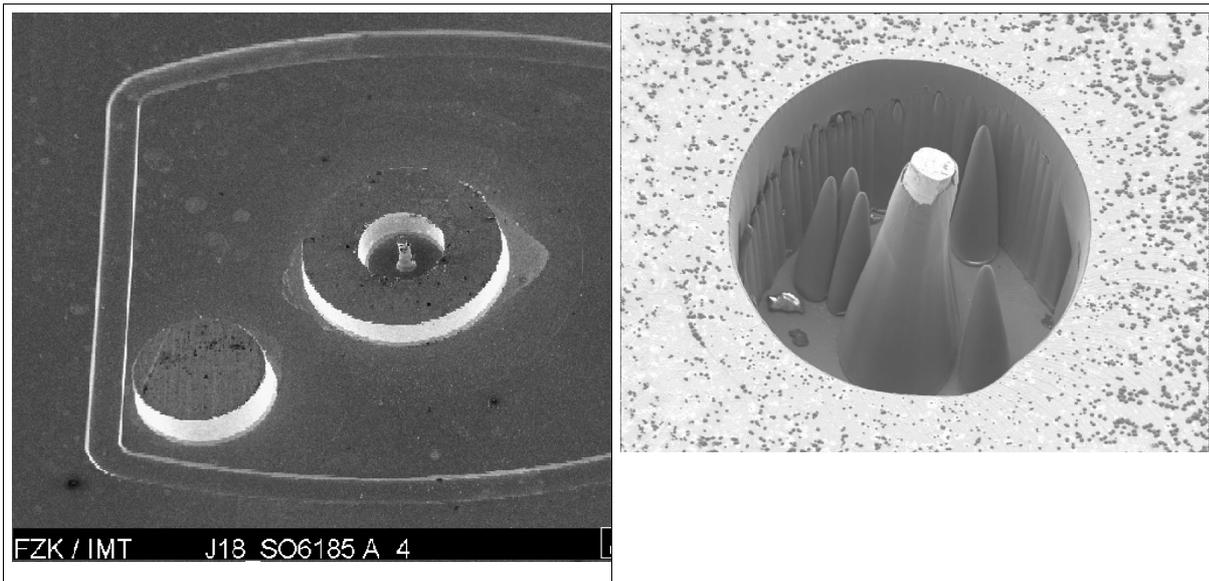


Abbildung 45: Gesamtansicht eines Ventiloberteils im Formeinsatz mit Stiften für Einlaß und Auslaß und einem Schutzwall für den Ventilsitz.

Abbildung 46: Rückstände bei der Reinigung eines Messingformeinsatzes von PSU-Rückständen mit Eximer-Laser. Die Kegel haben eine einheitlich Höhe von ca. 320 - 340 μm .

3.4.2.8 Reinigung

Durch wiederholte Abformungen steigen die Abformkräfte, zum Beispiel durch die Oxidation der Formeinsätze, die dadurch rauher werden. Dies hat nach vielen Abformungen dazu geführt, dass die Entformkräfte im Bereich des Schutzwalls so groß waren, dass regelmäßig die Ventilsitze aus dem abgeformten PSU-Teil herausbrachen und in der Form verblieben.

Um den Formeinsatz wieder gebrauchsfähig zu machen, wurde der Formeinsatz mittels Laser gereinigt. Dazu werden mit einem Excimer Laser kurze Energiepulse auf die um den Ventilauslass festsitzenden PSU Rückstände gefeuert.

Bei zu langer Bestrahlungsdauer und zu hoher Energiedichte kommt es an der Messingoberfläche zu einer erheblichen Aufrauung, im Bereich von R_a 5 - 8 μm (vergleiche Abbildung 47).

Außerdem konnten kegelförmige Strukturen beobachtet werden (vergleiche Abbildung 46). Die zurückgebliebenen Kegel haben zum großen Teil die gleiche Höhe von etwa 320 bis 340 μm . Diese entspricht der Dicke der PSU-Folien, die für die Abformung übereinandergelegt werden, weil Material in der richtigen Dicke nicht verfügbar ist. Deswegen wird vermutet, dass Staubpartikel zwischen den Folien durch Schattenbildung die Ursache für die Kegelstrukturen sind. Die Kegel verschwinden nach dem ersten Abformen, da sie keine Verbindung mit dem Untergrund haben.

Bei der gepulsten Bestrahlung mit dem Laser verdampft das PSU schlagartig, was durch einen kurzen Knall wahrnehmbar ist. Die Behandlungsdauer mit Laserpulsen kann durch

diesen akustischen Effekt kontrolliert werden. Sobald das Knallen aufhört, ist der Kunststoff entfernt. Wurde der Laser dann abgeschaltet, konnten die besten Ergebnisse bezüglich Oberflächenqualität auf dem Messing erzielt werden (vergleiche Abbildung 48).

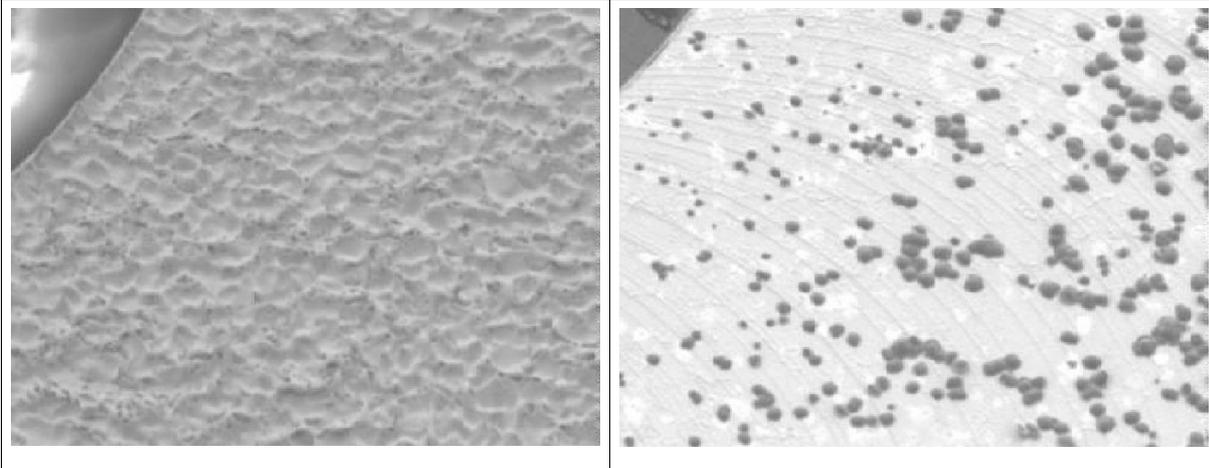


Abbildung 47: Messingoberfläche bei zu hohem Energieeintrag durch den Eximer-Laser. Seitenlänge 250 μm .

Abbildung 48: Oberfläche des Formeinsatzes bei „akustischer“ Regelung der Laserstrahlung. Seitenlänge 250 μm .

Bei der Reinigung des Formeinsatzes wurde nur sehr kurzfristig eine Verbesserung der Entformung erzielt. Nach wenigen Entformungen waren die Schutzwälle wieder mit Kunststoff gefüllt oder die Stifte, die die Durchlöcher strukturieren vom Formeinsatz abgerissen. Ob die Reinigung eines Formeinsatzes mit dem Laser eine sinnvolle Technik darstellt, konnte mit dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Formeinsatz nicht weiter bestimmt werden. Bei dem zweiten Design kam es nicht zu diesen Verschmutzungen des Formeinsatzes

3.5 Membranherstellung

Die Membranen, die im Ventil das aktive Bauteil darstellen, werden mit dem AMANDA-Verfahren mittels optischer Lithographie und Dünnschichttechnik aus Polyimid hergestellt [Cib00]. Die Membranen sind dabei während der Bearbeitung am Rand fest mit einem Silizium-Abhebewafer verbunden. Als Abhebeschicht sind 60 nm Gold aufgebracht. Die Einzelmembranen, parallel auf dem Wafer strukturiert, werden mit dem Gehäuse des Ventils übertragen (verklebt) und anschließend vom Siliziumwafer abgehoben.

Zusätzlich zu der Polyimidschicht werden, von der Anwendung abhängig, verschiedene Schichten von Metallisierungen mit Chrom, Titan und Gold aufgebracht. Über das Polyimid hinaus können auch andere Kunststoffe als Membranmaterialien oder –komponenten eingesetzt werden, z.B. PFA oder Polyisopren. Allerdings gestaltet sich die Verarbeitung dieser Kunststoffe häufig als ausgesprochen aufwendig und müsste zuvor intensiv untersucht werden [Rum98, Sti99, Tru00].

3.5.1 Schichtaufbau der Membran

Die Strukturierung der Ventilmembranen aus Polyimid erfolgt mittels Fotolithografie. Dabei geschieht die Fertigung auf einem Siliziumwafer parallel, so dass Membranen für 32 Mikroventile gleichzeitig gefertigt werden. Die 10 µm dicke Membran besteht aus einem Verbund aus drei Schichten: eine Goldleiterbahn von 2 µm Dicke ist in Polyimid eingeschlossen. Das Polyimid ist derart strukturiert, dass eine rechteckige, freitragende Membran mit $0,8 \times 5 \text{ mm}^2$ an den Schmalseiten innerhalb der Ventilkammer eingespannt ist und sich zum Ventilsitz hin auswölbt.

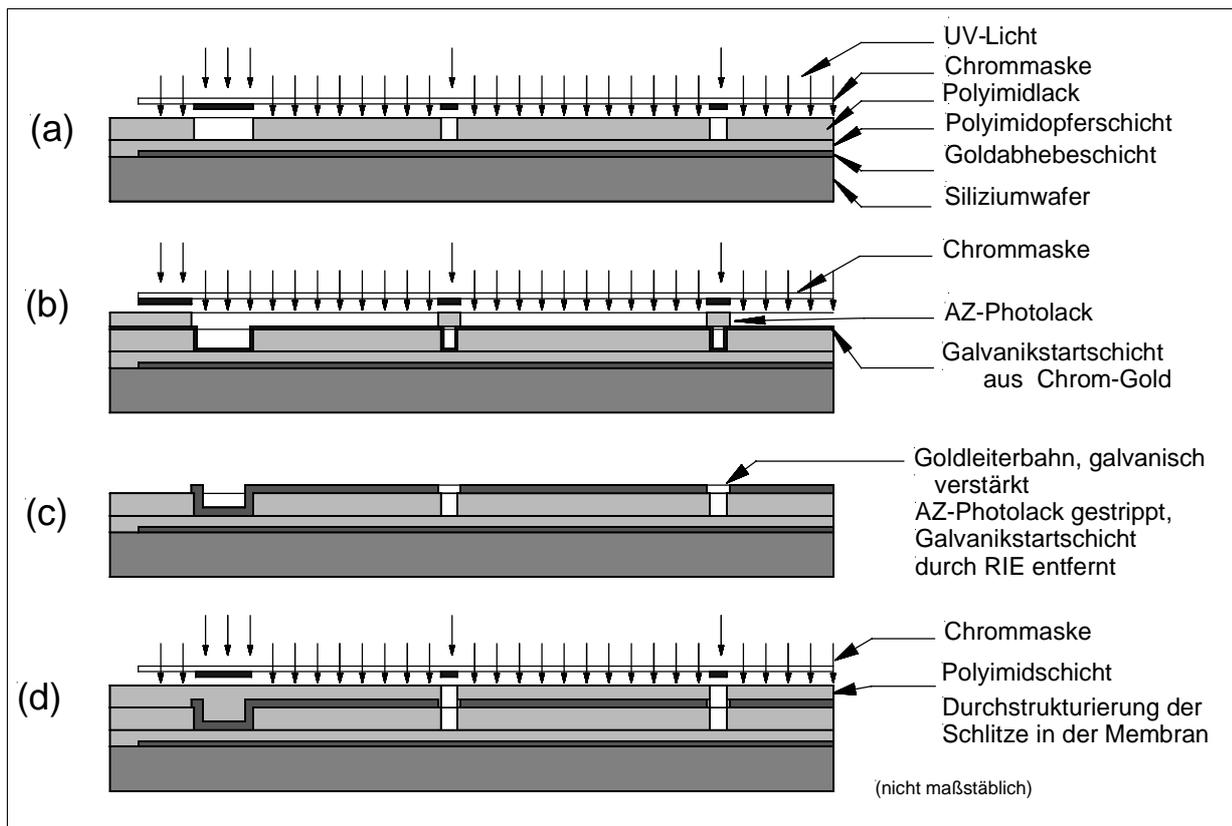


Abbildung 49: Herstellungsverfahren der Polyimid/Goldmembran

Abbildung 49 zeigt schematisch die Fertigung der Membran. Zuerst wird ein Siliziumwafer mit einer 60 nm Goldschicht bedampft, die später als Abhebeschicht dient (a). Dabei wird der Wafer beim Bedampfen mit einer Ringmaske belegt, die verhindert, dass der Randbereich mit Gold bedeckt wird. Wird anschließend der Wafer mit Polyimid beschichtet, so haftet das Polyimid am Randbereich des Wafers und verhindert, dass sich durch die großen inneren Spannungen, die bei der Trocknung von dicken Lackschichten durch den Volumenverlust entstehen, die Polyimidschicht vorzeitig vom Wafer abheben.

Darauf wird eine Hilfsschicht aus 1,2 µm dünnem Polyimid aufgeschleudert und bei 400 °C ausgebacken. Diese Hilfsschicht verhindert ein Durchreißen der Membran durch innere Spannungen. Versuche hatten gezeigt, dass ab einer Schichtdicke von ca. 20 µm die

Polyimidschichten zusammen mit der Goldabhebeschicht an scharfen Kanten regelmäßig einreißt und sich zusammenrollt. Die kleinsten Strukturen beim Mikroventil im Bereich der Schlitze messen zwar $50\ \mu\text{m}$ und sind mit geeigneten Radien verrundet, die Justierkreuze weisen dagegen mit $5\ \mu\text{m}$ viel kleinere und scharfkantigere Strukturen auf (vergleiche Abbildung 50). In Abbildung 51 ist ein Design für ein Justierkreuz dargestellt, das diese Gefahr des Einreißen reduzieren soll.

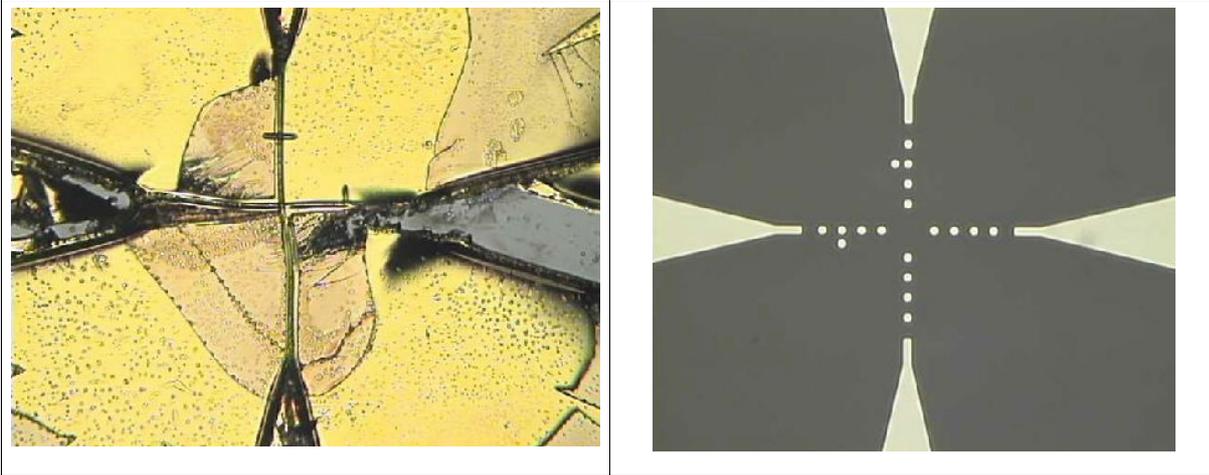


Abbildung 50: Zentrum eines Justierkreuzes zur optischen Lithographie. Minimale Stegbreite im Zentrum $5\ \mu\text{m}$, zerrissen durch hohe Zugspannungen bei dicken Polyimidmembranen.

Abbildung 51: Auf Stabilität gegen Einreißen verbessertes Justierkreuz, hier auf der Chrommaske.

Danach wird eine zweite $5\ \mu\text{m}$ dicke Schicht Fotoresist aus Polyimid aufgeschleudert. Dabei wurde der Resist in zwei aufeinanderfolgenden Belackungen mit kurzen Prebakes auf der Hotplate dazwischen durchgeführt. Die Doppelbelackungen haben den Vorteil, dass pro Schicht die Drehzahl beim Aufspinnen größer ist und dadurch die Schicht insgesamt homogener wird. Auch gleichen sich Defekte in den einzelnen Schichten aus und das Lösungsmittel wird leichter ausgetrieben, da der Weg bis zur Oberfläche pro Schicht kürzer ist. Diese Technik hat sich insbesondere für Schichten zwischen $7\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ bewährt. Dagegen hat es sich nicht als sinnvoll erwiesen, die darunterliegende durchgehende Hilfsschicht und die strukturierte erste Membranebene gleichzeitig zu strukturieren. Versuche, die Hilfsschicht nach einer Flutbelichtung und nach einem kurzen Postexposurebake neu zu belackern, haben nach dem gemeinsamen Hardbake zu einem deutlichen Verzug in den lateralen Abmessungen der Membran geführt, so dass die Maßhaltigkeit zwischen den Justierkreuzen auf den Chrommasken höherer Ebenen und den Justierkreuzen auf dem Wafer nicht mehr gegeben war. Die Abweichungen waren in der Größenordnung von $300\ \mu\text{m}$ über die gesamte Waferbreite. Als Grund für den Verzug wird die Volumenausdehnung des Polyimids bei Flutbelichtung der Hilfsschicht angenommen.

Mit einer Chrommaske werden fotolithografisch Öffnungen für elektrische Kontakte und Schlitze strukturiert, die die Form der Ventilmembran definieren (Abbildung 49a) Es handelt

sich dabei um eine unjustierte Belichtung des gesamten Wafers. Es entsteht eine bis an den Rand der Wafer durchgehende Membran. Dies ist an dem Belichter für justierte Lithographie nicht möglich, da die Maskenaufhängung nur ein $80 \times 80 \text{ mm}^2$ großes Fenster im Zentrum der 4" Wafer ausleuchten kann. Da es sich bei dem Polyimid um einen negativ arbeitenden Resist handelt, werden bei der anschließenden Entwicklung die unbelichteten Randbereiche aufgelöst. Bei der ersten Belichtung werden die Justierkreuze strukturiert, die den folgenden Belichtungen als Markierung dienen.

Da die Leiterbahn einen möglichst geringen elektrischen Widerstand haben soll, muss eine relativ dicke Goldschicht strukturiert werden. Dies ist erforderlich, damit die Leistungsaufnahme des Systems gering gehalten werden kann und dabei ein möglichst hoher Strom realisiert wird, da dieser in die Aktorkraft eingeht.

Das Aufdampfen von Gold ist für Schichtdicken über 200 nm mit den Möglichkeiten, wie sie am IMT verfügbar sind, ist kostspielig. Beim Sputtern entstehen Temperaturen, die für AZ-Resist, der hier als Maskierung benutzt wird, nicht verträglich sind. Es kann eine durchgehende Goldschicht ohne Maskierung gesputtert oder gedampft, anschließend justiert mit AZ-Resist [Pol00] maskiert und dann nasschemisch geätzt werden. Dennoch werden für Goldschichten über 500 nm gesputterte oder gedampfte Schichten unwirtschaftlich teuer.

Eine Möglichkeit, Goldschichten im Bereich von 1 bis $5 \mu\text{m}$ herzustellen, ist das galvanische Aufwachsen einer dünnen leitenden Schicht. Dafür wird eine wenige Nanometer dünne Chromschicht und eine ca. 60 nm dicke Goldschicht als Galvanikstartschicht aufgedampft. Ein positiv arbeitender Fotoresist wird aufgeschleudert und so strukturiert, dass die Goldschicht im Bereich der späteren Leiterbahn und der Anschlüsse offenliegt (siehe Abbildung 49b).

In die Öffnungen im Fotoresist hinein werden $2 \mu\text{m}$ Gold galvanisch abgeschieden. Ein unerwünschter Nebeneffekt der galvanischen Verstärkung ist eine ungleichmäßige Goldabscheidung die zu dickeren Schichten im Randbereich des Wafers führt. Dieser „Badewanneneffekt“ kann dadurch reduziert werden, dass möglichst zusammenhängende Flächen mit einer gleichmäßigen Bedeckung des Wafers strukturiert werden [Bad97]. Außerdem entsteht eine Stufe in der Goldschicht im Bereich der Kontaktfelder, die häufig zum Versagen der Ventile führt, da an der Kante die Goldschicht dünner bleiben kann. Das führt zu erhöhten Widerständen und dadurch bei Stromfluss zu verstärkter Wärmeentwicklung. Das Polyimid bleibt bis zu Temperaturen von 300°C stabil. Solche Temperaturen lassen sich mit den erforderlichen hohen Strömen relativ leicht erreichen, wenn der Widerstand der Leiterbahn zu hoch ist. Um die Problematik mit der Stufe an den Kontaktfeldern zu entschärfen, ist die Abdeckschicht aus Fotoresist in jeder Richtung um

200 µm größer als das Kontaktfeld. Die Stufenregion wird dadurch in einem größeren Bereich ebenfalls auf 2 µm verstärkt.

Im Anschluß an die Galvanik wird der maskierende Fotoresist entfernt und die Galvanikstartschicht mit einem Argonplasma abgetragen, so dass die einzelnen elektrischen Komponenten gegeneinander isoliert sind (Abbildung 49c). Die Leiterbahn wird durch eine weitere Polyimidschicht abgedeckt, in die wieder Schlitze lithographisch strukturiert werden (Abbildung 49d). Die Polyimidschichten werden für eine Stunde bei 350 - 400°C imidisiert.

Um die Dichtigkeit des Ventils zu erhöhen wird eine Haube auf die Leiterbahn strukturiert. Die Haube versteift im Bereich des Ventilsitzes die Membran und soll dadurch für ein besseres Anliegen der Membran auf dem Ventilsitz sorgen. Dabei wurde als Haubenmaterial sowohl Polyimid als auch Polyisopren verwendet. Polyimid eignet sich deswegen, weil es dem übrigen Membranmaterial entspricht und sehr robust ist. Polyisopren ist weicher und klebriger und hat dadurch die besseren abdichtenden Eigenschaften. Allerdings ist es nicht UV-stabil und zerfällt nach wenigen Wochen an Weißlicht. Ein Ventil mit Polyisopren Haube kann deswegen nur im lichtdicht abgeschlossenen Zustand auf Dauer betrieben werden.

Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien wird die Membran vorgespannt, wenn die Teile auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Der Verbund von Gehäuseteil und Membran wird vom Siliziumwafer abgehoben, nachdem die Membran um das aufgeklebte Teil herum eingeritzt worden ist.

Das Abheben wird durch die Trennschicht aus Gold ermöglicht, die nur eine geringe Haftung zum Silizium hat. Das auf der Membran verbliebene Gold wird in einem Argonplasma abgetragen. Danach wird die Hilfsschicht, die bisher die Membran straff gespannt hat, in einem Sauerstoffplasma entfernt. Die Schlitze werden dadurch in der Membran vollständig geöffnet und die Ventilmembranen wölben sich nach außen, weil sie unter Druckspannung stehen.

4 Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Konzeptes für ein Mikroventil auf der Grundlage des AMANDA-Verfahrens. Dafür sollten die erforderlichen Herstellungsprozesse für das Mikroventil entwickelt und erprobt werden. Bei allen Entwicklungen sollte eine preiswerte Fertigung, wie sie durch das AMANDA-Verfahren möglich wird, im Vordergrund stehen. Nach dem in den vorangegangenen Kapiteln das Konzept und Design des Mikroventils mit magnetisch-induktivem Antrieb dargestellt wurden, beschreibt dieses Kapitel Verbesserungen und Erweiterung der bestehenden Verfahren innerhalb des AMANDA-Verfahrens und Tests an ersten Fertigungsmustern.

Erstmals wurde im Rahmen dieser Arbeit beidseitige Abformung mit Heißprägen und Spritzguss realisiert. Im Zusammenhang mit der beidseitigen Abformung war es möglich, ein neuartiges Vereinzelungsverfahren für verklebte Mikrostrukturen zu entwickeln.

4.1 Beidseitige Abformung

Die beidseitige Abformung erweitert wesentlich die Gestaltungsmöglichkeiten für mikrostrukturierte Teile, die mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt werden. So sind z.B. durch die Gehäuseteile ganz hindurchgehende schmale Öffnungen mit hohem Aspektverhältnis schwierig zu realisieren, da sie sich nur schwer abformen lassen und der Formeinsatz an dieser Stelle leicht beschädigt wird (vergleiche Abbildung 52 oben). Durch das beidseitige Abformen ist es möglich, durchgehende Öffnungen durch zwei kürzere Stifte zu realisieren, die im oberen bzw. unteren Formwerkzeug angebracht und aufeinander zu gerichtet sind. Dabei kann der rückseitige Stift größere Radien als der vorderseitige Stift aufweisen, was zu einer größeren Stabilität führt (vergleiche Abbildung 52 Mitte). Gleichzeitig können von der Rückseite Bruchkanten durch Stege realisiert werden. Nach der Verklebung der Gehäuse mit der Membran können die Ventile entlang dieser Bruchkanten einfach vereinzelt werden (vergleiche Abbildung 52 unten).

Durch die beidseitige Abformung war es im zweiten Design der Formeinsätze möglich, die Stifte innerhalb der Ventile nur noch $130\ \mu\text{m}$ über der Ventilkammer Ebene anzulegen, anstelle von $500\ \mu\text{m}$ im ersten Design (vergleiche Abbildung 53). Im ersten Design war eine Entformschräge von 15° vorgesehen, im zweiten Design kann die Entformschräge durch das günstigere Aspektverhältnis auf 2° reduziert werden. Dadurch kann der minimale Radius r_{\min} von $82\ \mu\text{m}$ auf $107\ \mu\text{m}$ vergrößert werden und gleichzeitig der maximale Radius der Auslassöffnung r_A von $140\ \mu\text{m}$ auf $130\ \mu\text{m}$ verkleinert werden.

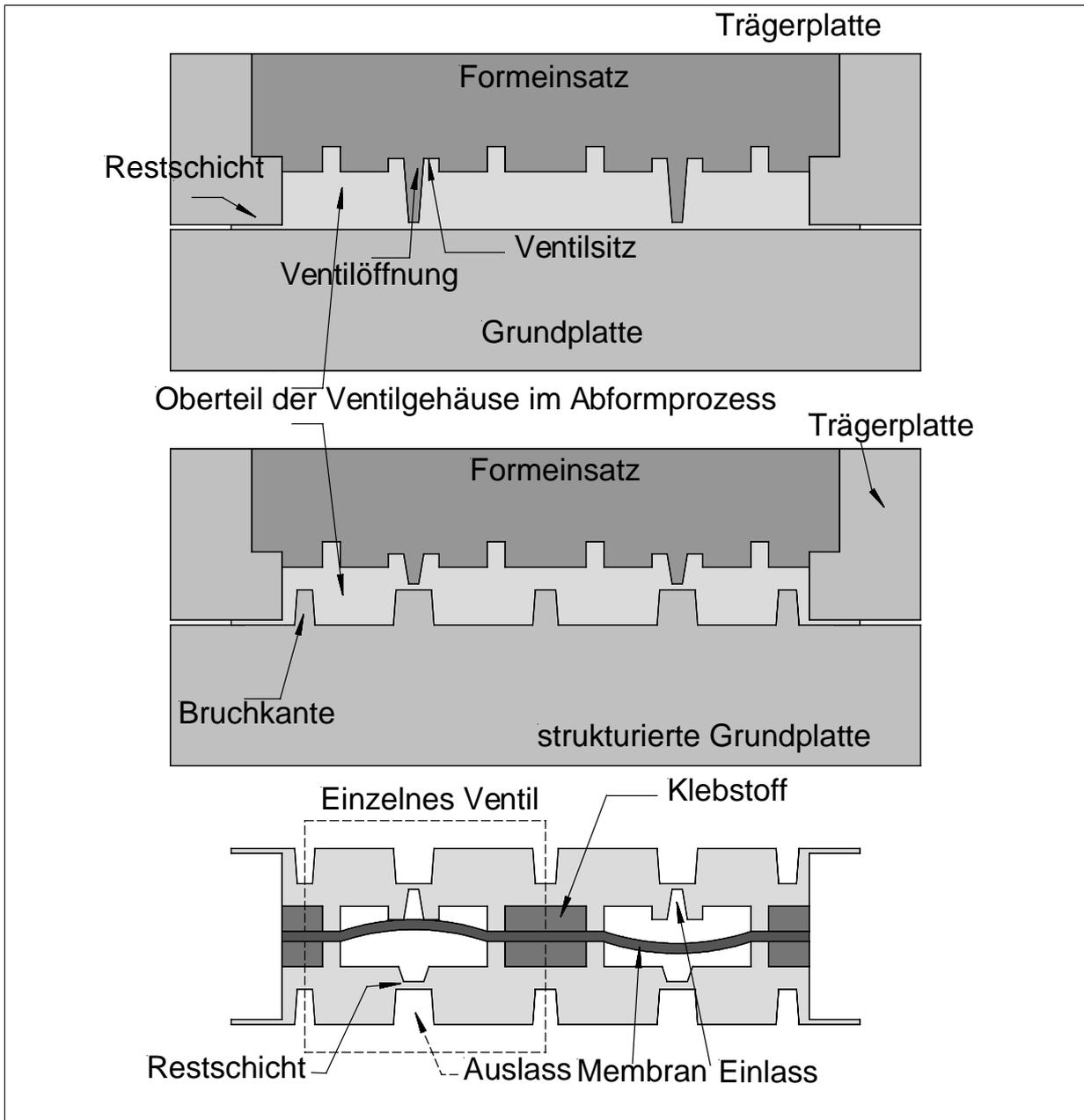


Abbildung 52: Gegenüberstellung von einseitiger und beidseitiger Abformung. Oben: Einseitige Abformung der Oberseite der Ventilgehäuse. Für die Ventilöffnungen werden sehr lange, dünne Stifte auf dem Formeinsatz benötigt (vgl. Abbildung 54). Mitte: Beidseitige Abformung des gleichen Teils. Im Formeinsatz und in der strukturierten Grundplatte sind nur noch stabile Mikrostrukturen erforderlich (vgl. Abbildung 55). Unten: Zwei mit einer Membran verklebte Nutze. Entlang der Bruchkanten kann das Ventil einfach vereinzelt werden.

Das führt zu einer Verbesserung des Aspektverhältnisses von 6,1 im ersten Design auf 1,7 im beidseitig strukturierten Design. Darüber hinaus verringert sich durch die Verkleinerung des Radius r_A im Bereich des Ventilsitzes die Druckfläche, die durch die Membran abgedeckt werden muss und dadurch der Druck auf die Membran um 14%.

Ebenfalls wird der fluidische Widerstand der Kapillare zum einen durch die Verkürzung der dünnen Kapillare und zum anderen durch den größeren Radius r_{\min} an der dünnsten Stelle verringert, was den notwendigen Druck, der den Durchfluss von 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ verursacht, weiter

verkleinert. Die beidseitige Abformung erlaubt also eine deutliche Verbesserung der fluidischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Verbesserung der Stabilität der Formeinsätze. Die Veränderungen der Stiftgeometrie ist in Abbildung 53 dargestellt.

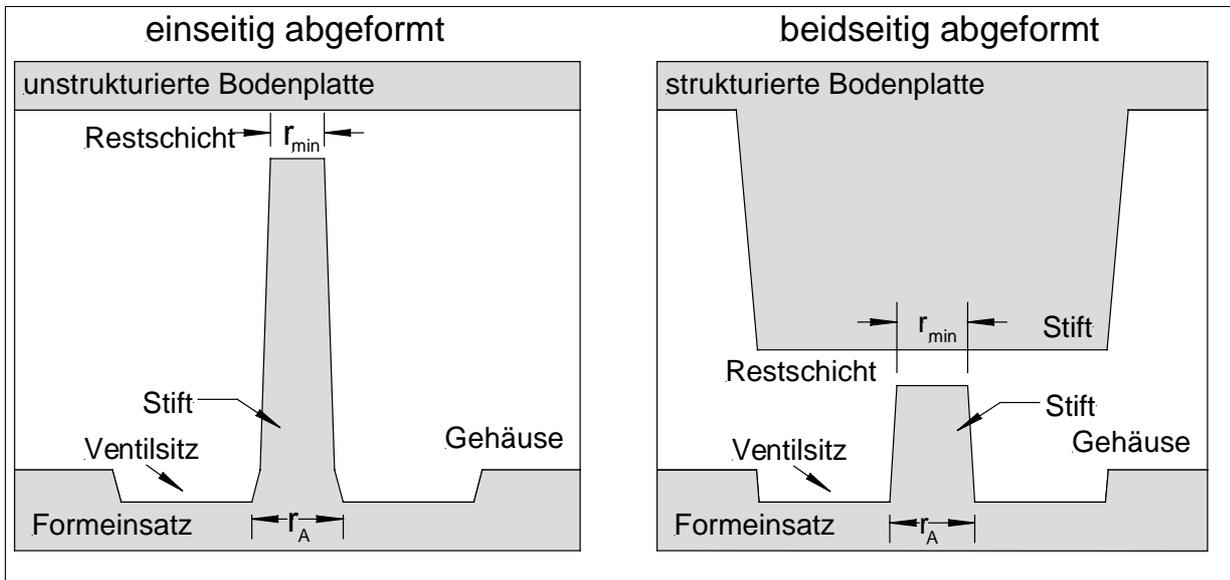


Abbildung 53: Stiftgeometrien im Formeinsatz zur Strukturierung der Durchlöcher im Bereich des Ventil Sitzes. Links im ersten Design einseitige Abformung, rechts im Formeinsatz für eine beidseitige Abformung.

In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind die Messingstifte in REM-Aufnahmen dargestellt. Der dünnere Stift ist von einem Schutzwall umgeben, der den Stift vor seitlich einfließendem Formstoff beim Spritzguss schützen soll (vergleiche Kapitel 3.7.2.7).

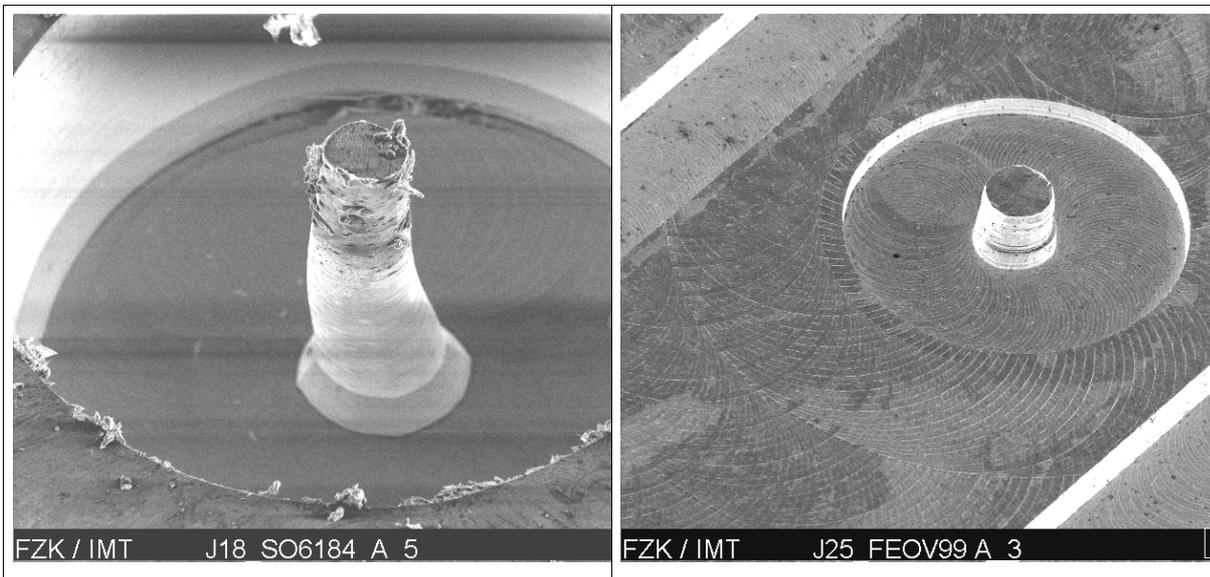


Abbildung 54: Stift zur Strukturierung der Ventilöffnung im ersten Design, verbogen. Höhe 500 μm , Durchmesser oben 82 μm

Abbildung 55: Stift zur Strukturierung der Ventilöffnung im zweiten Design, Höhe 130 μm , Durchmesser oben 107 μm . Der Schutzwall ist im zweiten Design überflüssig.

Die rückseitige Bodenplatte trägt nur relativ grobe Strukturen mit kleinsten Abmessungen von 600 μm , so dass sie mit herkömmlichen CNC-Maschinen leicht gefertigt werden kann.

Die Stege auf der Bodenplatte sind parallel zu den Ventilen ausgerichtet. Deshalb sind momentan immer noch drei Sägeschritte erforderlich, die quer zu den Bruchkanten verlaufen. Dadurch werden die Kontaktfelder in der mittlere Kammer freigelegt und im Anschluß der Nutzen der Länge nach getrennt. Im bestehenden Design wurde auf diese quer verlaufenden Bruchkanten verzichtet, um eine leichtere Entformung von der Bodenplatte zu erlauben. Zum anderen konnte so mit einer einzigen Bodenplatte die Rückseite der Gehäuseoberteile und der Gehäuseunterteile strukturiert werden. Bei diesen Versuchen wurde erstmals mit einer Form heißgeprägt, die die am IMT standardmäßig verwendeten Maße von 66 x 28 mm² überschreitet. Wie in Abbildung 56 zu sehen ist, ist noch der Großteil der Fläche auf der Bodenplatte unstrukturiert. Die bisherige Nutzengröße von 66 x 28 mm² findet auf einer 4" Platte zweimal nebeneinander Platz. Der Erfolg, mit der die Bodenplatte als Form eingesetzt wurde, hat gezeigt, dass zukünftig anstelle der Formeinsätze direkt Platten mit 10 mm Durchmesser für das Heißprägen eingesetzt werden können, mit denen sich beispielsweise parallel ein Gehäuseober- und unterteil abformen läßt. Das ist insbesondere wegen der bislang für PSU mit 30 min noch relativ langen Zykluszeit für die Abformung interessant.

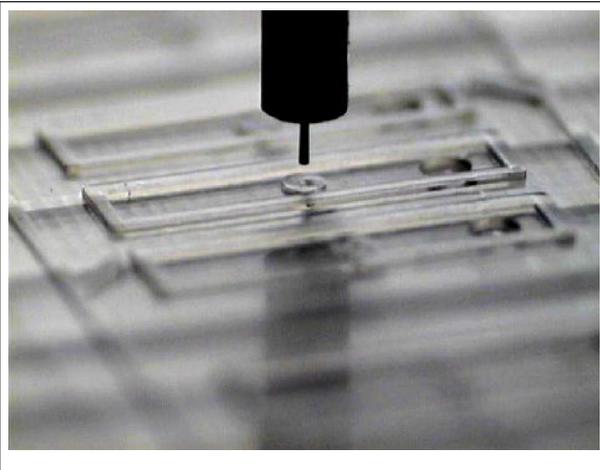
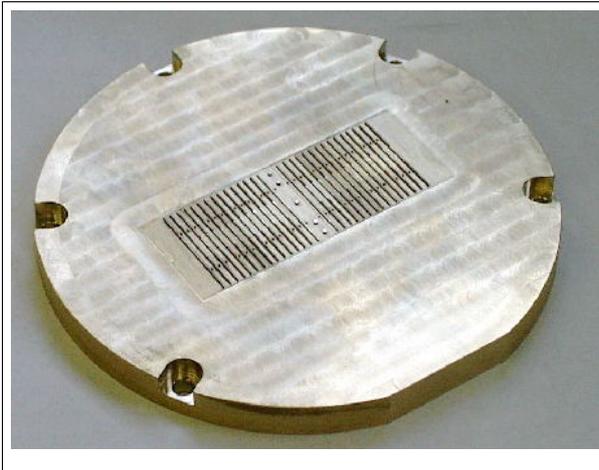


Abbildung 56: Bodenplatte zur beidseitigen Abformung mit Heißprägen. Parallel zu jedem Ventil verlaufen Bruchkanten. In der Mitte werden die Durchlöcher zur Klebstoffbefüllung strukturiert.

Abbildung 57: Räumnadel zur Entfernung der Restschicht im beidseitig abgeformten Nutzen.

Bei der beidseitigen Abformung entsteht die Restschicht zwischen Formeinsatz und einer rückseitigen Formplatte im Inneren des Gehäuseteils und kann deswegen nicht abgefräst werden. Dafür sind die beim Abformen entstehenden Grate ebenfalls im Inneren des Nutzens und stören so die Funktionalität der Ventile nicht. Bei Durchlöchern mit Radien > 300 µm kann diese Restschicht in der Regel durch Druckluft entfernt werden, für Radien < 300 µm eignen sich Räumnadeln um die Restschicht herauszudrücken (vergleiche Abbildung 57). Für eine Serienfertigung kann man sich eine Anordnung aus Hartmetallstiften

vorstellen, mit der mit einem Arbeitsschritt alle Durchlöcher im Nutzen von der Restschicht befreit werden.

4.1.1 Beidseitiger Spritzguß

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Materialforschung (IMF III/FZK) Versuche unternommen, die Gehäuseteile zweiseitig abzuspritzen. Dabei sollte zuerst die Kammstruktur die auf der Rückseite der entformten Teile entsteht, durch Bruchkanten ersetzt werden, die im Inneren der Nutzen verlaufen und nach der Verklebung mit der Membran zu einer vereinfachten Vereinzelnung durch Brechen beitragen sollen. In Abbildung 58 ist ein solches Spritzgussteil mit Anguss zu sehen, allerdings noch ohne die Ventilstrukturen auf der Vorderseite. Die Realisierung der beidseitigen Abformung durch Spritzguss gestaltete sich schwieriger als erwartet, da die Auswerferstifte zwischen den Strukturen auf der Rückseite Platz haben mussten. Die Auswerfer wurden so konstruiert, dass ihr Zentrum gerade unter den Ventilsitzen zu liegen kam. Während der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Ventile zu groß waren und dadurch die magnetische Flußdichte im Bereich des Ventilsitzes zu weit abgesenkt wurde. Im neuen Design wurde deswegen die Ventilbreite von 7 mm auf 1,8 mm reduziert. Für die Spritzgussanlage bedeutet das, dass für die Auswerferstifte nicht mehr ausreichend Platz auf der Rückseite des Nutzens ist, ohne den Bruchkanten im Weg zu sein. Die Auswerferstifte können aber nicht beliebig gesetzt werden, vielmehr muss für jede Auswerfergeometrie eine Vorrichtung konstruiert werden, die den Anforderungen der Spritzgussmaschine wie Heizung, Evakuierungseinrichtung usw. entspricht.

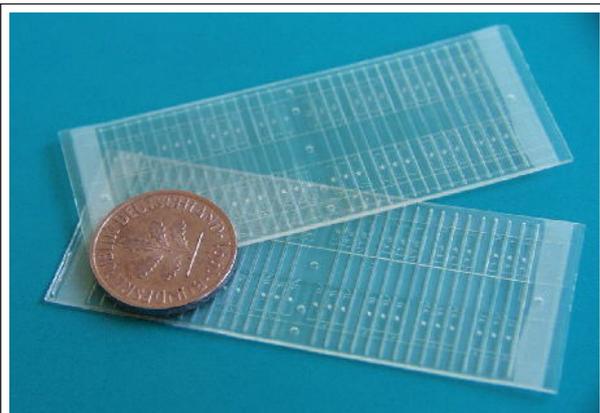


Abbildung 58: Beidseitig strukturiertes Ventilgehäuse mit Anguss. Die Rippenstruktur wird durch auf der Rückseite verlaufende Bruchkanten im Gehäuse ersetzt.

Abbildung 59: beidseitig heißgeprägte Ventilnutzen. Zwischen den Ventilkammern sind auf der Rückseite Bruchkanten strukturiert.

Dadurch ist die Möglichkeit zur beidseitigen Abformung beim Spritzguss wenig flexibel und mit einem hohen zeitlichen und materiellen Aufwand verbunden. Über die erforderliche Justage von Ober- zu Unterteil wurde im Rahmen der Arbeit keine weiteren Untersuchungen

durchgeführt, da die beidseitige Abformung zu diesem Zeitpunkt wirtschaftlicher durch Heißprägen realisiert werden konnte.

Die Idee, leicht vereinzelbare Mikrostrukturen mit Spritzguss herzustellen, konnte später an einer anderen Mikrostruktur demonstriert werden [Dit00a].

4.1.2 Beidseitiges Heißprägen

Die HEX 03 Warmumformanlage des IMT/FZK verfügt über ein Vakuumsystem und über ein Überdeckungssystem, mit dem auf 10 µm genau justierte Prägungen möglich sind. Dies ist besonders für die beidseitige Abformung interessant, da damit einfach die Justierung der rückseitigen Stifte relativ zu den Strukturen auf der Vorderseite möglich ist [Dit00b]. In Abbildung 59 sind Ober- und Untergehäuseschalen die mittels beidseitigem Heißprägen hergestellt wurden dargestellt.

Die größere Stabilität der Stifte bei der beidseitigen Abformung führt zu besseren Abformereigenschaften, insbesondere wird die Entformkraft bei der Abformung durch das geringere Aspektverhältnis gesenkt.

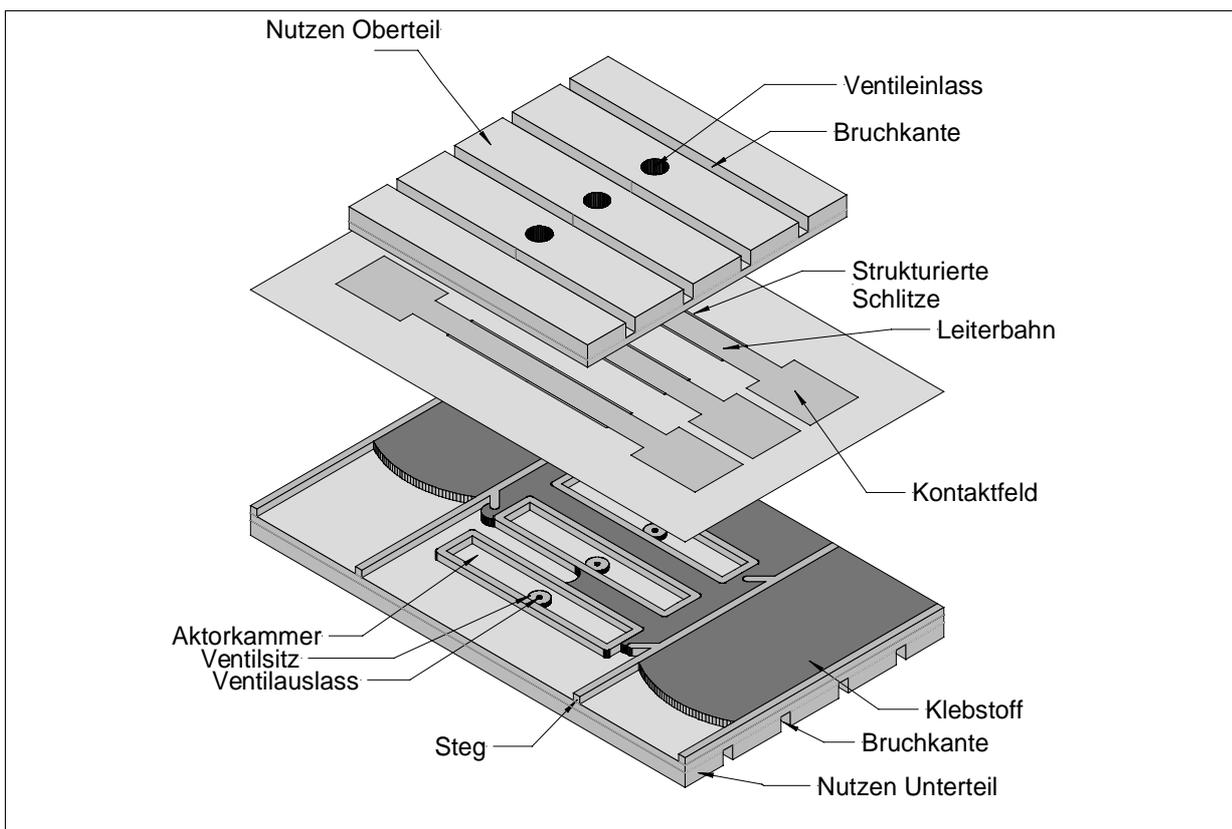


Abbildung 60: Verklebung von beidseitig abgeformten Gehäusehälften. Die Bruchkanten dienen dabei als Justiermarken, die mittig zwischen den Kontaktfeldern zu liegen kommen.

Die Verklebung der beidseitig abgeformten Ventilenutzen funktioniert gleich wie die Verklebung einseitig geprägter Teile (vergleiche Abbildung 60). Günstigerweise lassen sich die Gehäuseteile relativ zur Membran sehr genau anhand der Bruchkanten positionieren, da

diese exakt zwischen zwei Kontaktfeldern verlaufen. Das Problem, dass die Vakuumsaugung der Kammerklebeapparatur auf die Bruchkanten trifft, wird durch das Klebeband verhindert, das zur Versiegelung der Ventilkammern während der Verklebung eingesetzt wird. Durch das Klebeband werden die Bruchkanten gegenüber dem Vakuumsystem abgedeckt.

4.1.3 Andere Techniken

EPON SU-8

Eine beidseitige Strukturierung von Nutzen ist mit EPON - SU8 ebenfalls möglich. Dazu wird das Trägersubstrat, also der Siliziumwafer, vorher durch nasschemisches Ätzen strukturiert. Wird der Wafer am Ende vom Resist entfernt, bleiben die Gräben im Wafer als erhabene Strukturen auf der Rückseite der Nutzen stehen. Das Ätzen von Silizium ist Stand der Technik, so dass sich der zusätzliche Aufwand zur beidseitigen Strukturierung mittels EPON - SU8 in Grenzen hält [Chu00a].

UV-RIM

Für eine beidseitige Abformung ist das UV-RIM ungeeignet, da üblicherweise die Formeinsätze, die für die Strukturierung der Rückseite verwendet werden, nicht transparent sind und bei einer seitlichen Einstrahlung von UV-Licht vermutlich Schattenwürfe zu Defekten führen würden, insbesondere bei Grabenstrukturen mit hohem Aspektverhältnis. Auch lassen sich in Borsilikatglas nur schwer genaue Strukturen herstellen [Wul00].

RMPD

Eine beidseitige Bearbeitung ist hier besonders einfach möglich [mic00]. Da der Resist, der dabei zum Einsatz kommt, in seiner Materialeigenschaften vom PSU abweicht (Sprödigkeit) und deswegen auch für Prototypen im Rahmen dieser Arbeit nicht eingesetzt werden konnte, wurden in dieser Richtung keine weitergehenden Untersuchungen unternommen.

LASER

Eine beidseitige Bearbeitung ist zwar möglich, muss aber nachträglich positioniert durchgeführt werden. Um abgeformte Kunststoffteile nachzubearbeiten, eignet sich der Laser dagegen hervorragend, z.B. um Restschichten zu entfernen.

4.1.4 Vereinzelung

Die mit dem AMANDA-Verfahren im Nutzen hergestellten Komponenten wurden bisher mit einer Wafersäge mit 300 µm breiten Sägeblättern vereinzelt. In Abbildung 61 ist die Schnittfolge bei der Vereinzelung mit der Wafersäge dargestellt. Zuerst wird die mittlere Kammer im Oberteil, die die elektrischen Kontaktfelder abdeckt ausgesägt. Anschließend

werden die beiden Klebstoffkammern mit den Ventilkammern getrennt. Diese Schnitte sind mit lateralen Abweichungen von $\pm 250 \mu\text{m}$ toleriert, da die Gesamtlänge der Ventile nicht für die Funktionalität der Ventile maßgeblich ist. Bei den Schnitten (1) und (2) beträgt die Toleranz der Schnitttiefe $\pm 150 \mu\text{m}$, die durch einen $300 \mu\text{m}$ hohen Hohlraum vorgegeben ist, in den eingesägt wird. Bei Nichteinhaltung der Toleranz wird das elektrische Kontaktfeld durchgesägt. Dieser Schaden wird jedoch in jedem Fall bei der elektrischen Kontaktierung durch das Auftragen von Silberleitkleber ausgeglichen. Die Schnitte (1) bis (3) können an einer Kreissäge mit Mikroskop von Hand durchgeführt werden.

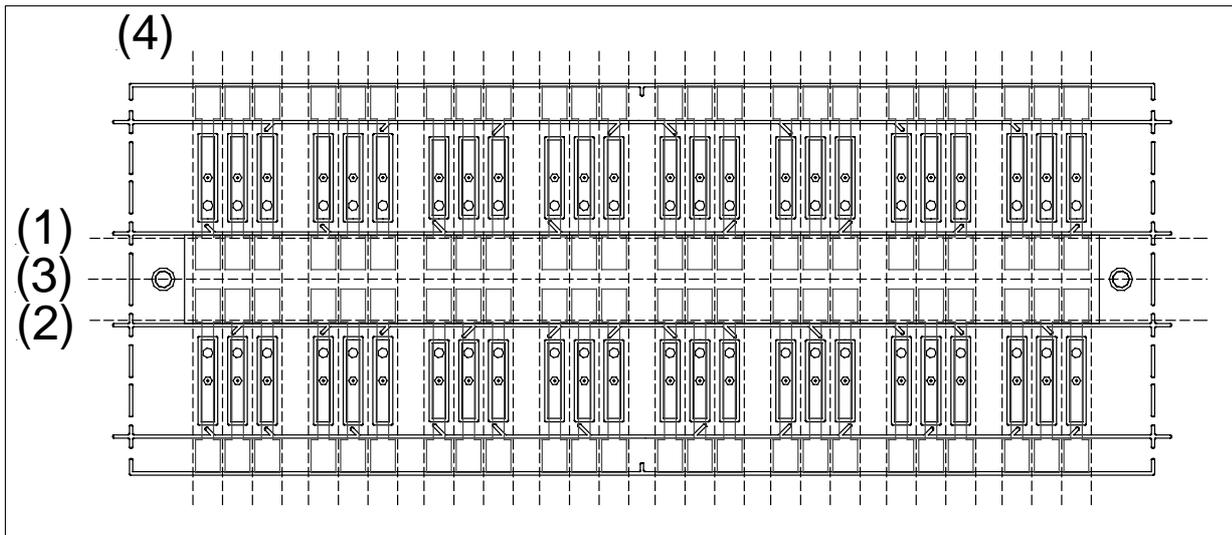


Abbildung 61: Schnittfolge bei der Vereinzelung. Schnitte (1) + (2) haben nur eine Schnitttiefe von $300 \mu\text{m}$ und legen die inneren Kontaktfelder frei, (3) zerlegt die Ventile an ihren Stirnseiten, alle weiteren Schnitte trennen die Ventile parallel zur elektrischen Leiterbahn ab.

Alle weiteren Sägeschnitte dienen zur seitlichen Abtrennung der Ventilgehäuse. Diese Schnitte sind mit $\pm 50 \mu\text{m}$ toleriert. Dadurch bleibt auf beiden Seiten des Schnittes eine Verklebung mit mindestens $250 \mu\text{m}$ Breite zurück, die für eine dichte und feste Verklebung ausreichend ist. Für diese Sägeschnitte ist der Einsatz einer Wafersäge oder einer CNC-Präzisionsfräse erforderlich. Die Wafersäge hat gegenüber der Fräsmaschine am IMT den Vorteil einer Kühlung und einer Kammeraüberwachung für mikrometeregenaues Positionieren. Dennoch können Vereinzelungen mit der CNC-Fräsmaschine durchgeführt werden, nachdem die Position der Schnitte an einem Meßmikroskop relativ zu einem Anschlag bestimmt wurde.

Die Zustelltiefe pro Sägeschnitt liegt bei der Wafersäge bei $250 \mu\text{m}$, so dass jeder Schnitt 4x bis zur Durchtrennung gesägt wird. Dadurch dauert die Vereinzelung eines Ventils mit Präzisionsfräse oder Wafersäge ca. eine halbe Stunde und erfordert hohe Investitionskosten.

Vor der Einführung der Bruchkanten durch die beidseitige Abformung wurden Bruchtests an bestehenden Gehäuseteilen durchgeführt, die mit der Wafersäge verschieden tief eingesägt

wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass bereits durch einen Einschnitt von 50 µm Tiefe beim Brechen mittels Biegebeanspruchung die Bruchstelle durch den Einschnitt bestimmt. Der Bruch startet stets an einer der inneren Ecken des Einschnitts. Allerdings ist PSU relativ zäh, so dass ein Durchbrechen der Teile erst durch mehrmalige wechsellastige Biegebeanspruchung erreicht werden konnte. Dies führt zu einer ausgefranzten Bruchkante (vergleiche Abbildung 62). Verklebte Gehäuseteile brechen leichter, weil der Klebstoff, vergleichsweise spröde ist und an der Bruchstelle glatt abbricht. Eine eingeklebte Membran bricht ebenfalls glatt in der Fortsetzung der Bruchkante. Allerdings treten bei Biegebeanspruchung starke Scherkräfte zwischen Membran, Klebstoff und Gehäuse auf, die zur Zerstörung der verklebten Ventile führen. Versuche haben gezeigt, dass mit sinkender PSU Restdicke im Bereich der Bruchstelle im Gehäuse die Qualität des Bruchs steigt. Bei den schmalen Ventilgehäusen im zweiten Design ist ein Brechen durch Biegebeanspruchung erschwert, da der Hebelarm zu kurz ist. Insgesamt eignet sich dieses Trennverfahren nicht, da der Ausschuss zu hoch ist.

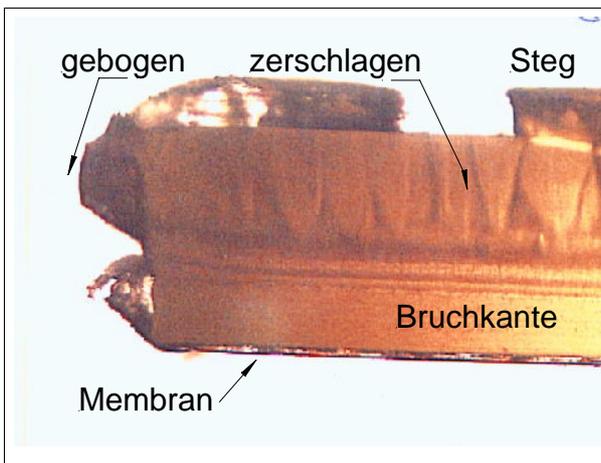


Abbildung 62: Bruchverlauf bei der Vereinzelung durch wechselnde Biegebeanspruchung (links) und zerschlagen (vorne).

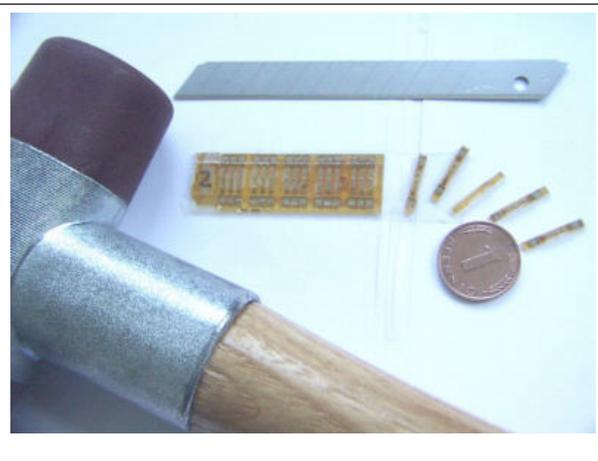


Abbildung 63: Vereinzelung von Ventilen durch Brechen mit einer Klinge, die schlagartig mit einem Hammer durch die Bruchkanten getrieben wird

Dagegen kann eine Vereinzelung der verklebten Mikrostrukturen mit hoher Qualität durch eine Klinge erreicht werden, die senkrecht durch die Bruchkante mit großer Geschwindigkeit getrieben wird, etwa durch einen Hammerschlag (vergleiche Abbildung 62 vorne).

Die Schnitte (1) bis (3) aus Abbildung 61 müssen im bestehenden Design immer noch mit einer Kreissäge ausgeführt werden. Im Anschluß können mit der eben beschriebenen Technik 24 Mikroventile innerhalb von 60 Sekunden vereinzel werden, ohne dass sich die Verklebung zwischen Gehäuse und Membran löst. Eine weitere Verkürzung der benötigten Arbeitszeit wäre durch die Verwendung einer Stanze möglich.

Der große Vorteil dieser Vereinzelungstechnik besteht in seiner Einfachheit und Geschwindigkeit. Nachteilig ist die unpräzise Ortsauflösung, die durch die Breite der Klinge

und der Bruchkanten gegeben ist. Ist dagegen die Schneidgeometrie der verwendeten Klinge bekannt und die Bruchkante darauf abgestimmt, ist eine reproduzierbare Genauigkeit durch die Führung der Klinge in den abgeformten Bruchkanten mit einer Schwankung der Ventilbreite im Bereich von $\pm 20 \mu\text{m}$ gegeben. Es ist zu beachten, dass in dem Bereich, in dem gebrochen wird, kein Materialverlust entsteht, anders als beim Vereinzeln mit der Wafersäge. Dadurch kann die Verklebung schmaler angelegt und insgesamt die Fläche auf dem Nutzen besser ausgenutzt werden.

Für alle Anwendungen, bei denen es nicht exakt auf die Außenabmessungen der Mikrokomponente ankommt, ist diese Vereinzlungstechnik besonders gut geeignet. Gerade im Hinblick auf eine Kleinserienfertigung ist diese Technik interessant, da die Zerteilung eines kompletten Nutzens mit einer geeigneten Schneid- oder Stanzvorrichtung schnell und kostengünstig ausgeführt werden kann. Zudem handelt es sich um eine reinraumtaugliche Technik, da weder Späne noch Wasserpartikel freigesetzt werden, wie das beim Sägen der Fall ist.

4.1.5 Stanze

Die im Inneren von der Membran getrennten Teile der Ventilkammern sind fluidisch durch Schlitzte in der Membran verbunden, die durch optische Lithographie strukturiert werden. Im ersten Design wurde untersucht, ob die Schlitzte auch mechanisch in die Membran eingestanzt werden könnten.

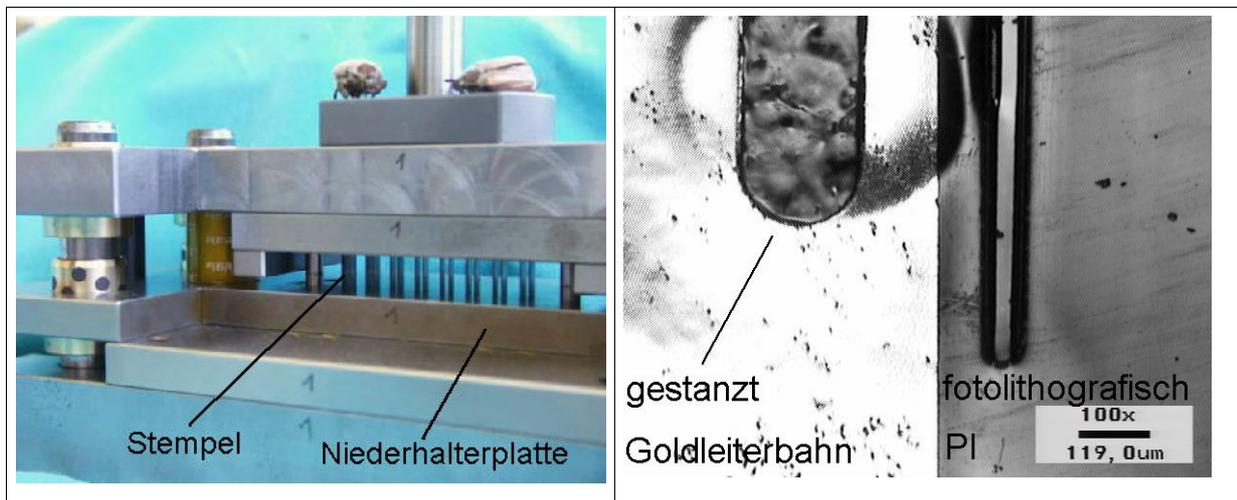


Abbildung 64: Stanze zur Strukturierung von Schlitzte in die Membran. In der Mitte sind die vertikalen Stempel zur Strukturierung der Schlitzte zu sehen.

Abbildung 65: Mechanisch (rechts, $400 \mu\text{m}$) und Fotolithographisch (links $50 \mu\text{m}$) erzeugte Schlitzte im Vergleich.

Der Einsatz einer Stanze ermöglicht prinzipiell eine erhebliche Verkürzung des Fertigungsverfahrens, da durch eine einzige Stanzung mehrere justierte Belichtungen zur Strukturierung von Schlitzte sowie die dazu gehörigen Entwicklungsschritte und Chrommasken

wegfallen. Allerdings kann auch mit einer Stanze auf die optische Lithographie im ersten Design nicht verzichtet werden, da die Goldleiterbahn im Bereich der Kontaktfelder zur elektrischen Kontaktierung einseitig freiliegen müssen, was mit einer Stanze nicht erreicht werden kann.

Bei dicken Polyimidschichten (ab ca. 20 μm) werden die inneren Spannungen beim Trocknen der Membran so groß, daß sie bereits auf dem Wafer einreißt (vergleiche 3.8.2). Das tritt vornehmlich an den durchgehenden Schlitzen ein, wenn auf die 2 μm dicke Hilfsschicht aus Polyimid verzichtet wird. Der Aufwand für die Fertigung wäre aber geringer, wenn die Schlitze in nur einem Schritt gestanzt werden könnten. Deshalb wurde eine Stanze in Auftrag gegeben (siehe Abbildung 64), die seitlich neben der Goldleiterbahn Schlitze in der Membran anbringt. Beim Betätigen der Stanze wird die Membran zunächst durch einen Niederhalter fixiert und anschließend die Schlitze mit 16 Stempeln (für 8 Leiterbahnen) ausgestanzt. Die Stempel haben eine Breite von 400 μm und Längen zwischen 4 und 5 mm. Außerhalb der Nutzfläche der Membran werden zwei Löcher gestanzt, die bei der zweiten Stanzung mit Hilfe von zwei Dornen die Membran relativ zu den ersten Schlitzen positionieren.

In Abbildung 65 sind die mit der Stanze und lithographisch hergestellten Schlitze zu sehen. Wegen fertigungstechnischer Beschränkungen sind mit der Stanze keine Schlitze herstellbar, die schmalere sind als 400 μm . Fotolithografisch lassen sich dagegen deutlich schmalere Schlitze herstellen (hier 50 μm). Da die Breite der Schlitze aber auch in die Gesamtbreite des Ventils eingeht und damit die magnetische Flußdichte reduziert, muss in dem neuen, schmaleren Design der Ventile auf den Einsatz einer Stanze verzichtet werden.

Der Stanzprozeß ist für eine Massenfertigung wegen des Preisvorteils trotzdem interessant. Die Justierung und Stanzung geht schnell (unter 5 min für einen Nutzen) und würde die Herstellung von zwei Chrommasken und damit die justierten Belichtungen überflüssig machen. Außerdem gibt es bei der fotolithografischen Strukturierung das Problem, dass die Schlitze beim Aufschleudern des Polyimidresits Hindernisse darstellen, die eine ungleichmäßige Schichtdicke verursachen können. Nachteilig an der Stanzmethode ist die Tatsache, daß nicht durch einen Siliziumwafer gestanzt werden kann und deshalb die Membran zuerst abgehoben werden muss, bevor sie durch die erste Verklebung mit dem Gehäuse fixiert wird. Das Verkleben einer freien Membran ist erheblich schwieriger und das Risiko, die gewünschte Vorspannung in der Membran nicht richtig einstellen zu können, ist größer. Dieses Problem könnte umgangen werden, indem die Membran auf eine steifere Kaptonfolie aufgeklebt und anschließend abgehoben, im Verbund gestanzt und dann verklebt wird, da erfahrungsgemäß Polyimid/Kapton bis zu einer Dicke von 100 μm gestanzt werden kann.

Die Stanze wurde von der Firma SISTA in Eggenstein angefertigt [Sis98].

4.2 Messungen an den Ventilen

Zur Charakterisierung der Mikroventile wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Bei den Tests mit Stickstoff konnte das Schaltverhalten der Membran im Magnetfeld nachgewiesen werden. Außerdem konnte das erwartete Hysterese-Verhalten der Membran reproduzierbar beobachtet werden. So bewegte sich die Membran bei einem Strom von 150 mA aus der Ruheposition, konnte dann mit einem verringerten Strom von 50 mA gehalten werden und schnappte nach der Absenkung unter 50 mA in die Ruhelage zurück. Bei Tests mit Wasser waren die Ventile bis 35 hPa dicht, bei Druckluft bis 70 hPa. Dauertests zeigten, dass die Ventilmembran zukünftig in einer Goldschicht eingeschlossen werden muss, damit sie beim Kontakt zum Wasser nicht quillt und dadurch die Funktion des Mikroventils beeinträchtigt wird.

Thermische Untersuchungen ergaben, dass sich die Membran bei einem Strom von 150 mA um nur 3°C erwärmt. Andererseits hält die Membran einer thermischen Belastung von 340°C stand, die bei elektrischen Strömen über 2 A auftreten.

4.2.1 Meßaufbau

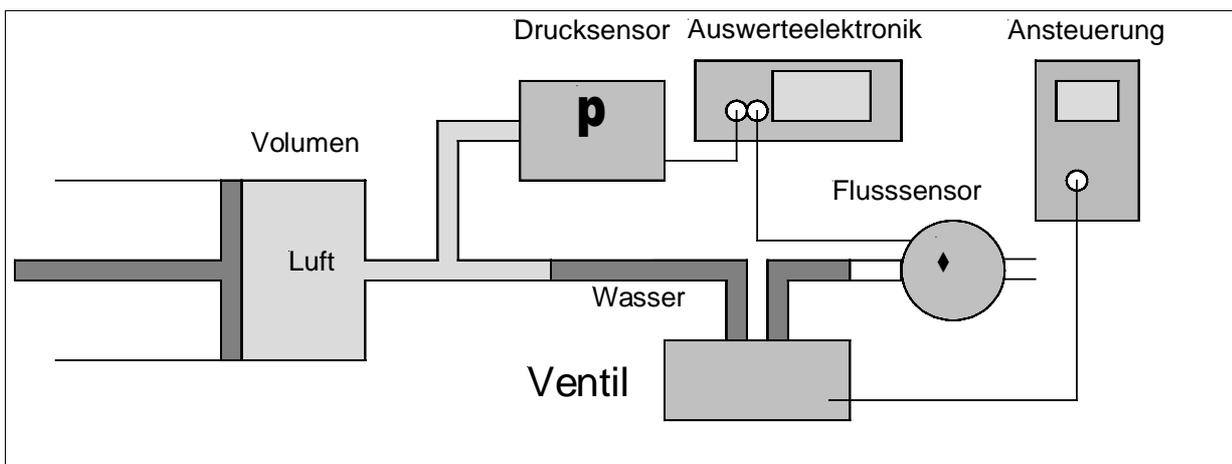


Abbildung 66: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Mikroventile.

Die elektrisch und fluidisch kontaktierten Ventile wurden in fluidischen Tests mit Wasser und Stickstoff charakterisiert. Ein Kolben komprimiert ein Luftvolumen. Der steigende Druck, der das Wasser (oder nur Druckluft) durch das Ventil presst wird vor dem Ventil gemessen. Hinter dem Ventil verdrängt das Wasser wiederum Luft in einem Volumen, so dass mittels eines Flusssensors der Fluiddurchsatz durch das Ventil bestimmt werden kann. Abhängig von der Stromrichtung, der durch die Leiterbahn auf der Membran geleitet wird, wirkt die Lorentzkraft auf die Membran, entweder verschließend oder öffnend.

4.2.2 Charakterisierung

Bei Versuchen mit Druckluft bei einem Differenzdruck von 100 hPa konnte eine Bewegung der Membran auf Grund der Lorentzkraft bei Stromstärken von 150 mA beobachtet werden (vergleiche Abbildung 67 und Abbildung 68). Sobald der Strom durch die Membran geleitet wird, wird die Membran auf den Ventilsitz zu bewegt wird, so dass der Durchfluss um 50 % sinkt. Diese Bewegung erfolgt sehr schnell. Genau konnte die Schaltzeit wegen der langsamen Ansprechzeit der Volumenstrommessung in der Größenordnung von Sekunden, nicht bestimmt werden. Wird die Stromrichtung durch die Leiterbahn in der Membran umgekehrt, so lässt sich beim Ventil eine Steigerung des Durchflusses um 40 % messen. Luft hat bei Standardbedingungen eine Viskosität, die ca. 60x kleiner ist, als die von Wasser. Da das Ventil für Flüssigkeiten und nicht für Gase ausgelegt ist, kommt daher für Luft ein Durchfluss von 50 sccm zustande.

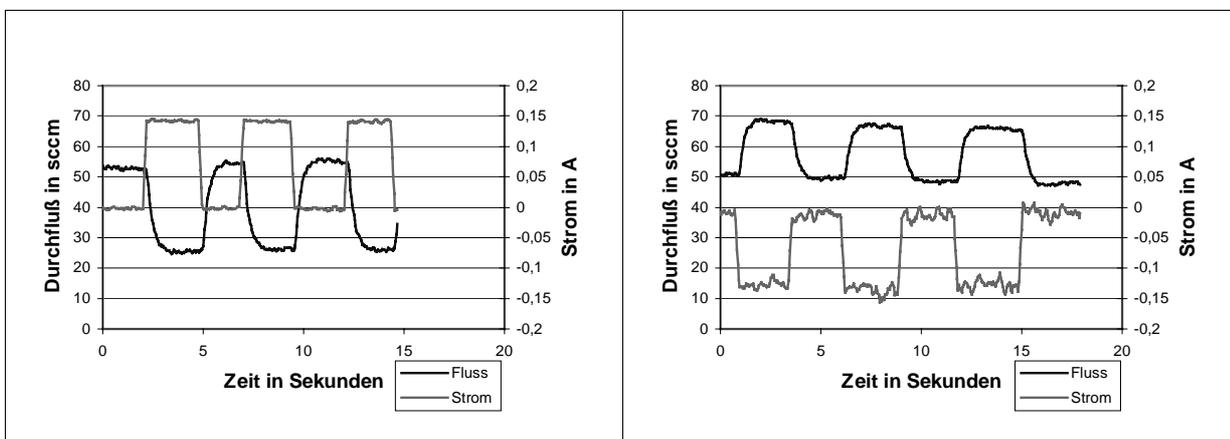


Abbildung 67: Durchfluss durch ein Mikroventil mit Druckluft. Der Durchfluss sinkt um 50 % bei eingeschalteter Aktorkraft
Abbildung 68: Durchfluss durch ein Mikroventil mit Druckluft. Der Durchfluss steigt um 40 % bei entgegengesetzt angreifender Aktorkraft

Die Bewegung der Ventilmembran braucht nur durch einen kurzen Stromstoß von 150 mA ausgelöst zu werden. Die Membran bleibt dann in ihrer Position, bis der Strom auf weniger als 50 mA reduziert wird. Dieser Hysterese-Effekt konnte sowohl mit einem Flusssensor als auch optisch reproduzierbar nachgewiesen werden. Das Schaltprinzip ist in Abbildung 69 dargestellt. Wird der Strom langsam bis 150 mA gesteigert, steigt der Durchfluss sprunghaft an und bleibt auch nach dem Absenken des Stromes bis 50 mA konstant. Unter 50 mA springt die Membran in ihre Ruhelage zurück.

Dies ermöglicht es, den Stromverbrauch des Ventils während der Öffnungszeit gering zu halten.

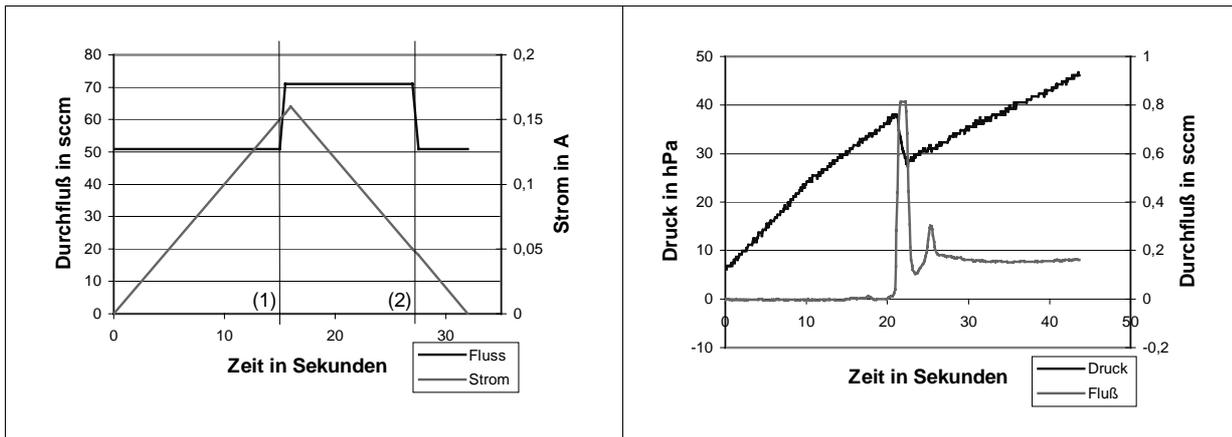


Abbildung 69: Hysterese-Effekt durch den Übergang der Membran aus der Ruhelage in eine labile Lage in der Ventilmittle. Wird der Strom gesenkt, springt die Membran in ihre Ruhelage zurück

Abbildung 70: Dichtigkeitsmessung mit Wasser. Bei einem Druck auf die Membran auf den Ventilsitz bis ca. 35 hPa bleibt das Ventil dicht im Bereich der Nachweisgrenzen.

Es konnte bei Versuchen mit Druckluft eine Dichtigkeit der Ventile bis zu 70 hPa beobachtet werden. Bei Wasser blieb das Ventil bis zu einem Druck von ca. 35 hPa im Bereich der Nachweisgrenzen dicht (vergleiche Abbildung 70). Danach hebt sich die Membran ab, was sich mit einem kurzen Puls im Signal des Flusssensors zeigt. Der Druck fällt ab und ein konstanter Durchfluss bis zu 170 $\mu\text{l}/\text{min}$ stellt sich ein. Der erforderliche Durchfluss von 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ kann also leicht realisiert werden. Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, ist es zum einen für das Kräfteverhältnis im Ventil günstiger, wenn ein größerer Fluss durch das Ventil möglich ist als erforderlich, zum anderen hatten fertigungstechnischen Gründe einen minimalen Durchmesser für die Dimensionierung der Durchlöcher auferlegt.

4.2.3 Thermisches Verhalten

Der Einfluß der Wärmeentwicklung durch die Aufnahme der elektrischen Leistung auf das Biegeverhalten der Membran wurde mittels einer Thermokamera am Institut für Materialforschung (IMF/FZK) untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass es für die angestrebten Verlustleistungen im Ventil von 5 mW bei 200 mA nur zu einer Temperaturerhöhung der Membran um 2 bis 3°C kommt. Bei einer elektrischen Stromstärke von 600 mA liegt die Temperatur der Membran noch bei 35°C. Erst bei elektrischen Stromstärken über 1 A steigt die Temperatur schnell an, zum einen wegen der quadratischen Proportionalität zwischen Verlustleistung und Stromstärke und andererseits durch die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes selbst.

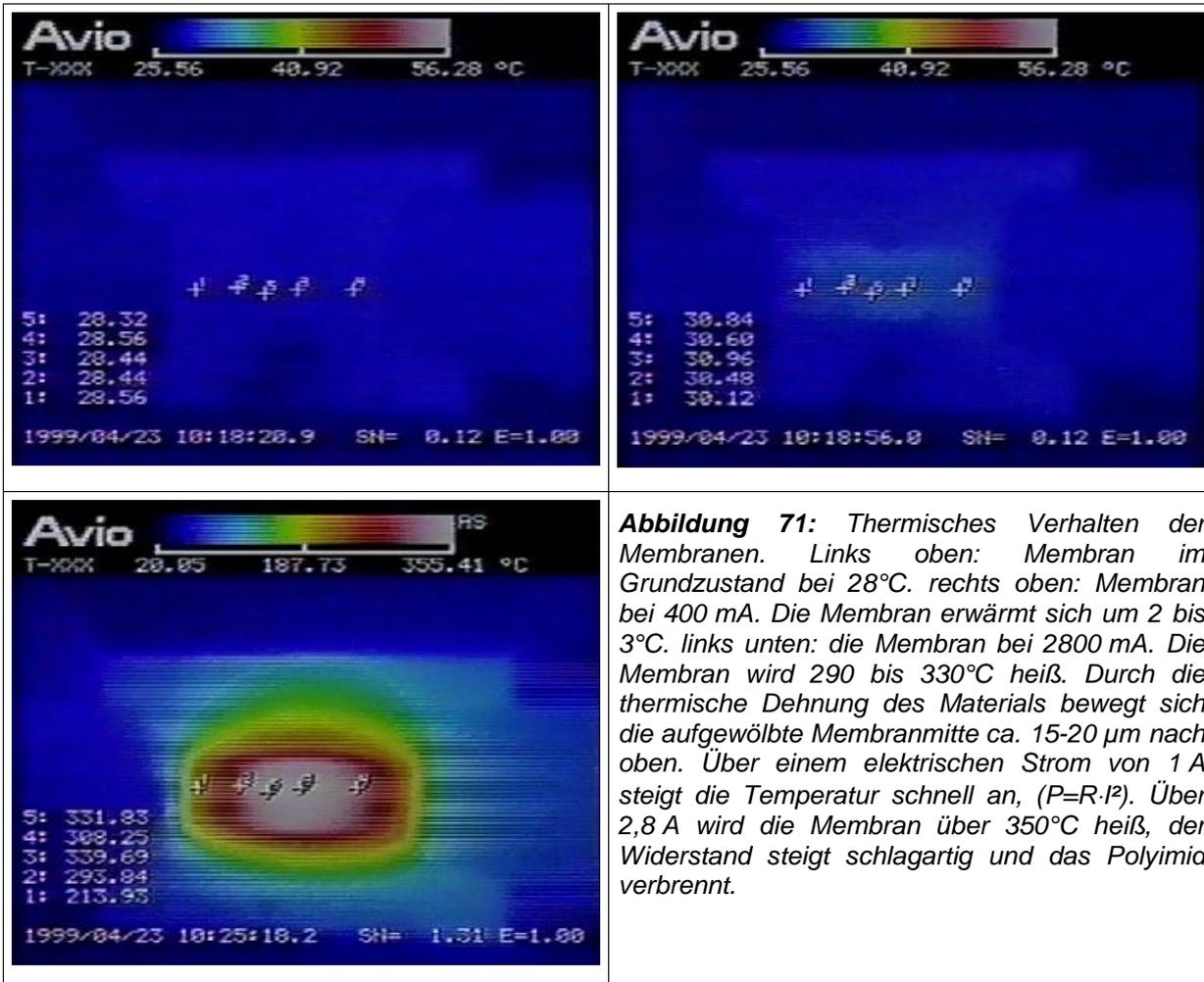


Abbildung 71: Thermisches Verhalten der Membranen. Links oben: Membran im Grundzustand bei 28°C. rechts oben: Membran bei 400 mA. Die Membran erwärmt sich um 2 bis 3°C. links unten: die Membran bei 2800 mA. Die Membran wird 290 bis 330°C heiß. Durch die thermische Dehnung des Materials bewegt sich die aufgewölbte Membranmitte ca. 15-20 µm nach oben. Über einem elektrischen Strom von 1 A steigt die Temperatur schnell an, ($P=R \cdot I^2$). Über 2,8 A wird die Membran über 350°C heiß, der Widerstand steigt schlagartig und das Polyimid verbrennt.

Bei 2,8 A werden Temperaturen von 290 bis 330°C erreicht, die Membran kühlt aber bei Stromwegnahme ab und geht zerstörungsfrei in den Originalzustand zurück. Wird die Stromstärke über 2,8 A gesteigert steigt der Widerstand plötzlich rapide und die Membran verbrennt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Membran stets an der gleichen Stelle verbrennt, nämlich in dem Bereich, in dem sie vom Kontaktfeld zur Ventilkammer hin die Klebstoffkammer überbrückt. Einerseits ist an dieser Stelle die Wärmeabfuhr am schlechtesten, andererseits muss die Goldleiterbahn an dieser Stelle eine 5 bis 10 µm hohe Stufe überwinden, die fertigungstechnisch bedingt ist (vergleiche Kapitel 3.8). Für den normalen Gebrauch bei Strömen zwischen 150 mA bis 200 mA nimmt die Membran hingegen weder Schaden noch wird sie stark erwärmt. Mit Flüssigkeit konnten die Versuch nicht gefahren werden, da für die Beobachtung mit der Thermokamera die obere Ventilhälfte abgenommen werden musste.

4.2.4 Quellen der Membran

Der Einfluß von Wasser auf die Ventilmembran wurde untersucht, weil bekannt ist, dass Polyimide dazu neigen, Wasser aufzunehmen und zu quellen. Dadurch könnte sich die Vorspannung der Ventilmembran verändern. Deshalb wurde ein Mikroventil, an dem die

obere Gehäuseschale nicht angebracht worden war, in Wasser eingelegt und die Auswölbung der Membran über 3 Monate verfolgt. Die Auslenkung nahm bei ungeschützten Membranen um 25 bis 50% zu. Dies bedeutet für das Mikroventil, dass es nicht mehr mit der vorgesehenen elektrischen Leistung geöffnet werden kann, weil die Vorspannung, mit der die Membran auf den Ventilsitz gepresst wird, durch das Quellen der Membran stark zunimmt.

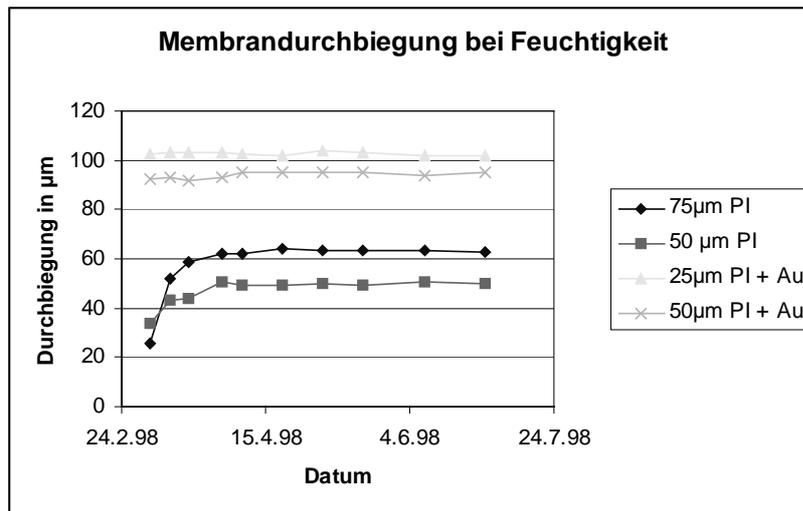


Abbildung 72: Vergleich zwischen unbehandelten und mit einer Goldschicht bedeckten Ventilmembran

Parallel wurde der Versuch mit einem Ventil durchgeführt, bei dem die Membran beidseitig mit einer 60 nm dünnen Goldschicht abgedeckt war. Dieses Ventil wurde 12 Wochen in Wasser eingelegt, ohne daß sich innerhalb der Nachweisgrenzen Veränderungen bemerkbar gemacht hätten (vergleiche Abbildung 72).

Es ist also notwendig, die Ventilmembran in dünne Goldschichten einzuschließen, um eine langfristige Funktion des Mikroventils sicherzustellen. Eine Alternative wäre, das Design des Mikroventils auf die Eigenschaften einer gequollenen Membran auszulegen. Allerdings wird in den meisten Anwendungsfällen die elektrisch isolierende Wirkung, die das trockene Polyimid zwischen elektrischer Leiterbahn und dem Fluid darstellt, erwünscht sein, die mit einer gequollenen, wasserhaltigen Polyimidmembran verloren geht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für ein neuartiges mikromechanisches Ventil zur Steuerung von Volumenströmen von weniger als 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ bei einer Leistungsaufnahme von weniger als 5 mW erarbeitet. Das Mikroventil verbraucht im geschlossenen Zustand keine Energie und die Ventilmembran des geöffneten Ventils befindet sich in der Nähe eines labilen Gleichgewichtes, so dass nur wenig Energie benötigt wird, um das Ventil geöffnet zu halten. Bei Wegnahme der Aktorkraft schließt das Ventil von alleine wieder.

Im theoretischen Teil der Arbeit konnte ein magnetisch-induktiver Antrieb mit einer stromdurchflossenen elektrischen Leiterbahn als aussichtsreich ermittelt werden. Mit Hilfe von FEM-Magnetfeldsimulationen wurde die Geometrie für das Mikroventil bestimmt.

Die Ventilmembran steht unter einer mechanischen Druckspannung, so dass sie sich gegen den Ventilsitz wölbt und ihn verschließt. In der Membran ist eine Leiterbahn aus Gold angebracht und außen werden an den Ventilen zwei Magnete montiert. Ein elektrischer Strom durch die Leiterbahn ruft eine Lorentzkraft hervor, die auf die Membran wirkt und sie vom Ventilsitz abhebt und damit das Ventil öffnet. Die Abmessungen des Ventils betragen $1,8 \times 12 \times 1,5 \text{ mm}^3$, zusammen mit den Permanentmagneten aus Eisen-Neodym-Bor und einem Joch zur Erzeugung eines externen Magnetfelds sind die Gesamtabmessungen $16 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$.

Zur Herstellung des Mikroventils wurde das kostengünstige AMANDA-Verfahren eingesetzt und weiterentwickelt. Spritzguss, Heißprägen und UV-Reaktionsspritzguss wurden für die Abformung von Gehäuseteilen untersucht und ihre Eignung für das AMANDA-Verfahren verglichen. Das Heißprägen, das am IMT maßgeblich entwickelt wurde und hier erstmals im Zusammenhang mit dem AMANDA-Verfahren eingesetzt wurde, erwies sich dabei als dem Spritzguss überlegen. Zwar sind die Zykluszeiten beim Heißprägen von Ventilgehäusen aus Polysulfon (PSU) noch lang im Vergleich zum Spritzguss, durch das senkrechte Eintauchen des Formeinsatzes in das Halbzeug sind beim Heißprägen jedoch die lateralen Belastungen des Formeinsatzes erheblich geringer als beim Spritzguss, bei dem der Formstoff mit Drücken bis zu 800 bar seitlich eingespritzt wird. Die bis zu 80 μm schmalen und 500 μm hohen Stifte auf den Formeinsätzen, die für die Herstellung der Ventilöffnungen benötigt wurden, wären beim Spritzguss beschädigt worden und konnten deshalb nur durch Heißprägen abgeformt werden. Beim UV-Reaktionsspritzguss zeigte sich, dass eine abschließende Bewertung noch nicht möglich ist, weil die Entwicklung dieses Prozesses noch nicht weit genug fortgeschritten ist.

Die Möglichkeit, Prototypen rasch herstellen zu können, ist von großem Interesse für die Weiterentwicklung des AMANDA-Verfahrens, da die Formeinsätze, die für die Abformung

benötigt werden, eine zeitintensive Herstellung erfordern. Deshalb wurde auch untersucht, ob mit Gehäuseteilen Erkenntnisse für geplante AMANDA-Komponenten gezogen werden können, die mit anderen Verfahren schneller hergestellt werden als über die Fertigung von Formeinsätzen und anschließende Abformung.

Mit dem Resist EPON-SU8 konnten gestufte Gehäuseteile hergestellt werden, die jedoch wegen der gegenüber PSU unterschiedlichen thermischen und mechanischen Eigenschaften nicht weiterverarbeitet werden konnten. Das gleiche Problem zeigte sich bei den Gehäuseteilen, die mit dem RMPD-Verfahren gefertigt wurden. Die Herstellung von Gehäuseteilen mittels Laserablation bietet den Vorzug, das auch PSU damit strukturiert werden kann. Dadurch können Prototypen schnell und günstig hergestellt werden, die die gleichen Materialeigenschaften haben, wie in einer späteren Serienfertigung hergestellte Gehäuse. Allerdings wurde mit den durchgeführten Versuchen nicht die Oberflächenqualität erreicht, die für eine Verklebung der Gehäuse benötigt wird.

Erstmals wurden beidseitig abgeformte Gehäuseteile durch Heißprägen hergestellt. Die beidseitige Abformung erweitert wesentlich die Gestaltungsmöglichkeiten für mikrostrukturierte Teile, die mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt werden. So sind z.B. durch die Gehäuseteile ganz hindurchgehende schmale Öffnungen mit hohem Aspektverhältnis schwierig zu realisieren, da sie sich nur schwer abformen lassen und der Formeinsatz an dieser Stelle leicht beschädigt wird. Durch das beidseitige Abformen ist es möglich, durchgehende Öffnungen mit Hilfe von zwei kürzeren Stifte zu realisieren, die im oberen bzw. untern Formwerkzeug angebracht und aufeinander zu gerichtet sind. Dabei kann der rückseitige Stift in der Regel größere Radien als der vorderseitige Stift aufweisen, was zu einer größeren Stabilität führt. Beim beidseitigen Abformen entsteht eine Restschicht in der Gehäusemitte, die durch Druckluft oder durch Räumnadeln einfach entfernt werden kann.

Die mit dem AMANDA-Verfahren im Nutzen hergestellten Komponenten wurden bisher mit einer Wafersäge vereinzelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vermittels beidseitiger Abformung Bruchkanten in den Nutzen vorgesehen und erstmals fertig verklebte Nutzen durch Brechen vereinzelt. Entlang der Bruchkanten wurde eine Klinge angesetzt und mit einem Schlag wurden die Nutzen zerteilt. 24 Mikroventile wurden innerhalb von 60 Sekunden vereinzelt, ohne dass sich die Verklebung zwischen Gehäuse und Membran löste. Für die Vereinzelung mit der Wafersäge würde dagegen eine halbe Stunde benötigt und die Investitionskosten liegen wesentlich höher. Eine weitere Verkürzung der benötigten Arbeitszeit wäre durch die Verwendung einer Stanze möglich. Durch die Führung der Klinge in den abgeformten Bruchkanten liegt die Genauigkeit der Vereinzelung bei ca. 20 µm.

Einen wesentlichen Kostenfaktor bei der Herstellung der Mikroventile und anderer AMANDA-Komponenten stellt die Strukturierung der Membran durch Fotolithografie dar. Deshalb

wurde untersucht, inwieweit die Membranen mit einer Stanze strukturiert werden können. In den Mikroventilen wurden beidseitig neben der Leiterbahn Schlitz angebracht, die aus der Gesamtmembran bewegliche Brücken heraustrennten. Die so hergestellten 400 µm breiten Schlitz waren von hoher Qualität. Für die Massenfertigung ist daher der Einsatz einer Stanze empfehlenswert, soweit es die fertigungstechnischen Beschränkungen erlauben. Für die Entwicklung von Prototypen ist eine Stanze nicht flexibel genug.

Die Ausbeute der Kammerklebetechnik wurde von ca. 30 % auf ca. 85 % gesteigert, weil die Nutzen vor der Verklebung in einem Sauerstoffplasma aktiviert und die Ventilausschlüsse verschlossen wurden. Durch die Behandlung im Sauerstoffplasma wurde die Benetzung der Polymeroberflächen durch den Klebstoff verbessert, wodurch sich deutlich weniger Lufteinschlüsse in den mit Klebstoff zu befüllenden Bereichen ausbildeten. Das Verschließen der Ventilöffnungen verhinderte, dass an diesen Stellen während der Befüllung mit Klebstoff Luft entweicht und so wurde unterbunden, dass Funktionsbereiche der Mikroventile ungewollt mit Klebstoff aufgefüllt wurden.

Zur Charakterisierung der Mikroventile wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Bei den Tests mit Stickstoff konnte das Schaltverhalten der Membran im Magnetfeld nachgewiesen werden. Außerdem konnte das erwartete Hysterese-Verhalten der Membran reproduzierbar beobachtet werden. So bewegte sich die Membran bei einem Strom von 150 mA aus der Ruheposition, konnte dann mit einem verringerten Strom von 50 mA gehalten werden und schnappte nach der Absenkung unter 50 mA in die Ruhelage zurück. Bei Tests mit Wasser waren die Ventile dicht bis 35 hPa, bei Druckluft bis 70 hPa. Dauertests zeigten, dass die Ventilmembran zukünftig in einer Goldschicht eingeschlossen werden muss, damit sie beim Kontakt zum Wasser nicht quillt und dadurch die Funktion des Mikroventils beeinträchtigt wird.

Thermische Untersuchungen ergaben, dass sich die Membran bei einem Strom von 150 mA um nur um 3°C erwärmt. Andererseits hält die Membran einer thermischen Belastung von 340°C stand, die bei elektrischen Strömen über 2 A auftreten.

Durch eine weitere Optimierung von Membrandicke und Verklebetemperatur können diese Werte weiter verbessert werden. Durch eine weitere Optimierung der Membrankräfte, lässt sich das Magnetfeld verringern, was zu einer Reduzierung der Gesamtabmessung von Ventil und Joch führt.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu batteriebetriebenen, kostengünstigen Mikroventilen mit magnetisch-induktivem Antrieb geleistet werden. Das Funktionsprinzip für den Antrieb erfüllt die technischen Anforderungen, wie an Demonstratoren nachgewiesen werden konnte. Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung des Ventils war die Berücksichtigung von Anforderungen für eine spätere Serienfertigung.

Dazu wurde eine Reihe technischer Lösungen erarbeitet, die geeignet sind, Fertigungskosten zu senken und Ausbeuten zu erhöhen. Somit sind jetzt die Voraussetzungen geschaffen, AMANDA Ventile mit magnetisch-induktivem Antrieb zu industriellen Prototypen weiterzuentwickeln und letztlich in 3-5 Jahren in ein Serienprodukt zu überführen.

Literaturverzeichnis

- [Bos93] D. Bosch, B. Heimhöfer, G. Mück, H. Seidel, U. Thumser, W. Welsler; „*A silicon microvalve with combined electromagnetic/electrostatic actuation*“, Sensors and Actuators A, 37-38 (1993) 684-692
- [Bra92] J. Branjeberg, P. Gravesen, „*A new Electrostatic Actuator providing improved Stroke length and Forth*“ Proc. Micro Electro Mechanical Systems'92 Travemünde, 1992, pp 6-11
- [Büs94] B. Büstgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg, L. Keydel "Micromembrane Pump Manufactured by Molding"; Proceedings der 4th International Conference on New Actuators, Actuator'94, Bremen, Juni 15 - 17, (1994) 86 - 90
- [Cib00] Polyimid ist eingetragenes Warenzeichen der Firma Ciba-Geigy
- [Des97] M. Despont, H. Lorenz, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud, P. Vettiger "High-Aspect-Ratio, Ultrathick, Negative-Tone Near-UV Photoresist for MEMS Applications"; Proceedings of the 10th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'97, 26. - 30.1.97, Nagoya, Japan (1997) 519 – 522
- [Dex99] Magnetic Design; <http://www.dexteromag.com/magnetic.html>
- [Dit00a] H. Dittrich, U. Wallrabe, J.Mohr *et al.*: „RibCon – Steckerverbinder für 16 Multimode-Fasern“, 4. Statuskolloquium PMT; FZKA 6423; Forschungszentrum Karlsruhe (2000); S.179
- [Dit00b] H. Dittrich; persönliche Mitteilung 26.4.2000
- [Dit98] D. Dittmann, „Mikroventile mit Formgedächtnis-Dünnschichten“, Diplomarbeit, Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe (TH), 1998
- [Esa89] M. Esashi, S. Shoji, A. Nakano; „Normally closed Microvalve and Micropump Fabricated on a silicon Wafer“, Sensors and Actuators 20, (1989), pp. 163-169
- [Fah94] J. Fahrenberg, W. Bier, D. Maas, W. Menz, R. Rupprecht, W.K. Schomburg; „Microvalve System Fabricated by Thermoplastic Molding“, Proc. MME'94, Pisa, (1994), pp.178-181
- [Fra92] A.B.Frazier, M.G.Allen, "High Aspect Ratio Electroplated Microstructures Using A Photosensitive Polyimide Process"; Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems '92 (1992) 87 – 92
- [Ger87] Gerenser, L.J. : "X-Ray Photoemission Study of Plasma Modified Polyethylene Surfaces", J.Adhesion Sci.Technol. 1 (1987), 231-246
- [Göb99] J. Göbes, M. Kohl, V. Saile; „Entwicklung von Normally Closed Mikroventilen mit Formgedächtnis-Dickfilmen“, Diplomarbeit, Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe (TH), 1999
- [Gol96] Goll, C.; Bacher, W.; Büstgens, B.; Maas, D.; Menz, W.; Schomburg, W.K., "Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms", J. Micromech. Microeng. 6, 1996, 77 – 79
- [Gol97] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg, "Electrostatically Actuated Polymer Microvalve Equipped with a Movable Membrane Electrode", J. Micromech. Microeng. 7 (1997) 224 – 226
- [Hab97] Habenicht, G: Kleben : „Grundlagen, Technologie“, 3., völlig Neubearb. u. erw. Aufl. - Berlin [u.a.] : Springer, 1997. - XXIV, 893 S. : Ill., ISBN 3-540-62445-7
- [Hec00] Hecke, M., Dittrich, H., „Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht“, 4. Statuskolloquium PMT; FZKA 6423; Forschungszentrum Karlsruhe (2000); S.195
- [Hec98] M. Hecke, W. Bacher, K.D. Müller, „Hot embossing - The molding technique for plastic microstructures“ Microsystem Technologies 4 (1998) 122 – 124
- [Hec99] Hecke M., Müller K.D., Bacher W., „Microstructured Plastic Foils Produced by Hot Embossing“, HARMST, Kisarazu, 1999, 84-85.
- [Huf93] 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
- [Kel92] W. Keller; unveröffentlicher Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1992)
- [Läß95] Läßiger, B: „Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung“, Aachen, Verlag Shaker, ISBN 3-8265-0453-4, 1995

- [Maa96] Maas, D.; Büstgens, B.; Fahrenberg, J.; Keller, W.; Ruther, P.; Schomburg, W.K.; Seidel, D.; "Fabrication of Microcomponents using Adhesive Bonding Techniques", Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '96, 11. - 15.2.96 San Diego, USA (1996) 331 - 336
- [Mag96] Produktinformationen Magnetfabrik Schramberg (1996)
- [Mar98] Martin, J.; Bacher, W.; Hagena, O.F.; Schomburg, W.K., "Strain Gauge Pressure and Volume-Flow Transducers Made by Thermoplastic Molding and Membrane Transfer", Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, Heidelberg, 1998, 361 – 366
- [Med00] Produktinformation Firma Medida Diamantwerkzeuge GmbH, Idar-Oberstein, 2000
- [Mei95] Meiners, E.: „Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozess“, B.G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-06222-4, Stuttgart, 1995
- [Men97] W. Menz, J.Mohr; „Mikrosystemtechnik für Ingenieure“; 2. Auflage, VCH Weinheim, 1997
- [mic00] <http://www.microtec-d.com>
- [mic99] Firma microTEC; Produktinformation, Duisburg 1999
- [Nex94] Nexus Marktstudie der System Planning Corporation; 1429 North Quincy Street, Arlington, Virginia 22207; July 1., 1994
- [Nex99] <http://www.nexus-emsto.com/market-analysis/1-2.html>
- [Pfl00] W. Pflöging, T. Hanemann, W. Hoffmann; „Lasergestützte Entwicklung von mikrostrukturierten Komponenten und Abformwerkzeugen“; 4. Statuskolloquium PMT; FZKA 6423; Forschungszentrum Karlsruhe (2000); S.131
- [Pfl98] Pflöging, W.; Piötter, V.; Hanemann, T.: European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT'98), Mordike, B.L. (Ed.), (1998) 443
- [Rog00] T. Rogge, persönliche Mitteilung 23.4.2000
- [Ros95] R. Roßberg, B. Schmidt, S. Büttgenbach; „Micro liquid dosing system“; Microsystem Technologies 2, Springer Verlag, 1995, pp 11-16
- [Rum99] Z. Rummler, W. Bacher, V. Saile, W.K. Schomburg "Mass Separation using thin PTFE Membranes"; Proceedings of Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMs/MOEMs, DTM'99, 30 Mar – 1 Apr 1999 in Paris, France
- [Rup00] Ruprecht, R.; Gietzelt, T.; Guttman, M.; Hanemann, T.; Hecke, M.; Müller, K.; Piötter, V.: „Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall“; 4. Statuskolloquium PMT; FZKA 6423; Forschungszentrum Karlsruhe (2000); S.31
- [Rup99] Ruprecht, R. et al.: „Miniaturisierung in der Medizintechnik“, Tagungsband 23. Jahrestagung Spritzgießtechnik des VDI-K, Baden-Baden, (1999) 109
- [Sch00] W.K. Schomburg, S. Kaiser; "Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren"; Vortrag beim 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe und Wissenschaftliche Berichte FZKA 6423 (2000) 159 – 164
- [Sch92] J.Schulz, M. Strohmann, U.Wallrabe; "Regeln für Form und Anordnung von Justierkreuzen im LIGA-Prozeß"; IMT-Bericht Nr 102/23; Kernforschungszentrum Karlsruhe 1992
- [Sch98] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Goll, C.; Martin, J.; Rummler, Z., "AMANDA - Produktion mikrofluidischer Komponenten durch Abformung und Membranübertragung", Vortrag auf dem 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, 2. - 3. April 1998 und FZKA-Bericht 6080, 1998, 173 – 178
- [Sch99a] Schomburg, W.K.; Ahrens, R., Bacher, W.; Martin, J.; Saile V.; "AMANDA – Surface Micromachining, Molding, and Diaphragm Transfer", Sensors and Actuators A 76 (1999) 343 – 348
- [Sch99b] Schaller, T.; Bohn, L.Mayer, J.; Schubert, K.; „Microstructure grooves with a width of less than 50 µm cut with ground hard metal micro end mills“, Prec. Eng., 24 (1999), 229-235.
- [Sch99c] Schaller, T.; Hecke, M.; Ruprecht, R.; „Mechanical Micromachining for Mold Insert Fabrication and Replication“, ASPE 1999 Spring Topical Meeting, Proceedings Vol 19 (1999), 3-8.
- [Sho91] 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
- [Sis98] Firma Sista Werkzeugbau GmbH, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Industriestraße 18
- [Skr97] K.D. Skrobanek, M. Kohl, S. Miyazaki; „*Stress-optimized shape memory microvalves*“, Proc.MEMS '97, Nagoya, Japan 1997, IEEE Cat.No. 97CH36021, pp.256-261
- [Töp88] H. Töpfer, A. Schwarz; „*Wissensspeicher Fluidtechnik*“ VEB Fachbuchverlag Leipzig, ISBN 3-343-00246-1, 1988
- [Tru00] R. Truckenmüller, persönliche Mitteilungen, April 2000
- [Wag90] B. Wagner, W. Benecke; „*Magnetically Driven Microactuator: Design Considerations*“, Microsystem Technologies 90, H. Reichel (ed.), Springer-Verlag (1990), pp. 838-843
- [Wag91] B. Wagner, W. Benecke; „*Microfabricated actuator with moving permanent magnet*“, Proc. MEMS Workshop, Nara, Japan (1991), pp. 27-32
- [Wag96] B. Wagner, H.J. Quenzer, S. Hoerschelmann, T. Lisec, M. Jueress; „*Bistable microvalve with pneumatically coupled membranes*“, Proc. MEMS 96, San Diego, pp. 384-388
- [Wul00] Kolja Wulff; persönliche Mitteilung, April 2000
- [Yan95] K. Yanagisawa, H.Kuwano, A. Tago; „*Electromagnetically driven microvalve*“, Microsystem Technologies 2, Springer-Verlag (1995), pp. 22-25
- [Zde94] 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, 4th Int. Conf. on New Actuators (Bremen 15. /17. 06. 94), 1994, pp.56-60