



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5671

**Herstellung beweglicher  
LIGA-Mikrostrukturen  
durch positionierte  
Abformung**

**A. Both, W. Bacher, M. Heckeke, R. Ruprecht**  
Institut für Mikrostrukturtechnik

November 1995

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

**Wissenschaftliche Berichte**

FZKA 5671

**Herstellung beweglicher LIGA-Mikrostrukturen  
durch positionierte Abformung**

A. Both\*), W. Bacher, M. Heckeke, R. Ruprecht

Institut für Mikrostrukturtechnik

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

**1995**

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

## Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit sowohl beweglichen als auch feststehenden metallischen Elementen auf dem Weg der Kunststoffabformung vorgestellt. Die wesentlichen Prozeßschritte dieses Verfahrens, mit dem als Funktionsmuster Beschleunigungssensoren hergestellt wurden, sind: Positionierte Abformung eines LIGA-Abformwerkzeugs auf einem vorstrukturierten Substrat, Reaktives Ionenätzen und Galvanoformung.

Die Strukturierung der Kunststoffschicht muß mit hoher lateraler Genauigkeit zu Leiterbahnen und Opferschicht auf dem Substrat erfolgen. Hierfür wurde der Prozeß zur positionierten Abformung entwickelt. Zur Justierung des Abformwerkzeugs zum Substrat wurde ein Verfahren erarbeitet und eine Apparatur aufgebaut. Es wurde gezeigt, daß diese Apparatur über viele Abformversuche hinweg mit einer Umformtemperatur von 200 °C und einer Kraft von 20 kN eine Ausrichtung der abgeformten Mikrostrukturen zu den auf dem vorstrukturierten Substrat befindlichen mit einer Genauigkeit von  $\pm 8 \mu\text{m}$  leistet.

Als Funktionsmuster zum Nachweis der Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurden LIGA-Beschleunigungssensoren gefertigt, die bisher nur durch Röntgentiefenlithographie hergestellt werden konnten. Die vermessenen temperaturkompensierten Sensoren haben eine Höhe von  $60 \div 70 \mu\text{m}$  und eine Spaltbreite von  $2.2 \mu\text{m}$ . Die Grundkapazität  $C_0$  des Sensors betrug 2.7 pF bei einer Empfindlichkeit von 1.35%  $C_0/g$ . Die Kapazitätsänderung der Sensoren über den Temperaturbereich von  $-10 \div 100 \text{ °C}$  betrug dabei ca. 10 fF. Mit diesen Leistungsdaten sind die durch Abformung hergestellten Sensoren durchaus mit den durch Röntgentiefenlithographie hergestellten vergleichbar, wenn man die kleinere Strukturhöhe berücksichtigt.

Die Kompatibilität des vorgestellten Prozesses zur CMOS-Technik wurde überprüft. Dazu wurden auf 4"-Wafern, die CMOS-Schaltkreise enthielten, feststehende LIGA-Mikrostrukturen erzeugt. Auf den Wafern wurden die Process Control Monitors vor und nach den LIGA-Prozeßschritten vermessen; dabei konnten keine Abweichungen außerhalb der Toleranzgrenze festgestellt werden. Die Schaltkreise wurden durch die LIGA-Prozeßschritte nicht beeinflusst. Die Kompatibilität dieses Verfahrens zur CMOS-Technik ist dadurch nachgewiesen.

Damit wurden im Rahmen dieser Arbeit die prozeß- und anlagentechnischen Voraussetzungen zur seriennahen Fertigung von typischen beweglichen LIGA-Mikrostrukturen geschaffen. Zusätzlich bietet dieses Verfahren die Möglichkeit zum Aufbau integrierter Mikrosysteme durch die Kombination der LIGA-Technik mit der Mikroelektronik auf einem Substrat.

# Fabrication of movable LIGA-microstructures by aligned molding

## Abstract

An advanced molding technique for the fabrication of microstructures containing fixed and movable elements is presented. The main steps of this process which were demonstrated for the fabrication of acceleration sensors are: aligned molding on a prestructured substrate, Reactive Ion Etching and electroforming.

The structuring of the polymer layer has to be performed with a high lateral accuracy to the sacrificial layer of the substrate. For the alignment of the molding tool to the substrate a process was developed and an apparatus built up. The apparatus was operated at a molding temperature of 200°C and a force of 20 kN. Using these parameters it was shown that for several molding cycles an alignment precision of  $\pm 8 \mu\text{m}$  is achieved.

The performance of the process was proved by the fabrication of acceleration sensors which before could only be produced by x-ray lithography. The hereby produced acceleration sensors have a height of 60 to 70  $\mu\text{m}$  and a capacitor gap of 2.2  $\mu\text{m}$ . The base capacity  $C_0$  of the sensor is 2.7 pF at a sensitivity of 1.35 %  $C_0/g$ . The capacity change of the sensor is 10 fF for temperatures from -10 °C to 100 °C. Considering the smaller structure height of the sensors fabricated by molding they are comparable to those produced by x-ray lithography.

The compatibility of the described process to the CMOS technology was proved by generating LIGA-microstructures on 4"-wafers containing CMOS circuits. On the wafers the process control monitors were checked before and after the additional LIGA process; all deviations were found to be within the tolerance range. There is no influence on the ICs by the LIGA steps. Therewith the compatibility of the two discussed processes is proved.

Within this study the process and apparatus preconditions for small lot series of typical movable LIGA microstructures were set. Additionally this process offers the possibility to build up integrated microsystems by the combination of LIGA micromechanics and microelectronics on one substrate.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
<b>2.</b>	<b>Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen</b> .....	5
<b>2.1.</b>	<b>Herstellung durch Röntgentiefenlithographie</b> .....	5
2.1.1.	Integration der Opferschichttechnik in die LIGA-Technik.....	5
2.1.2.	Justierte Bestrahlung.....	6
<b>2.2.</b>	<b>Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung</b> .....	8
2.2.1.	Grundlagen .....	9
2.2.1.1.	Prozeß zur Abformung von Mikrostrukturen auf einem Substrat .....	9
2.2.1.2.	LIGA-Abformwerkzeuge.....	10
2.2.2.	Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung .....	13
2.2.2.1.	<b>Verfahren 1:</b> Abformung eines einstufigen Werkzeugs auf einer Opferschicht ....	13
2.2.2.2.	<b>Verfahren 2:</b> Abformung eines einstufigen Werkzeugs und partielle Strukturierung durch Trockenätzen .....	15
2.2.2.3.	<b>Verfahren 3:</b> Abformung eines gestuften Werkzeugs .....	17
2.2.2.4.	Diskussion und Auswahl eines Verfahrens .....	19
<b>3.</b>	<b>Qualifizierung eines Prozesses zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen mit dem LIGA-Verfahren</b> .....	23
<b>3.1.</b>	<b>Untersuchungen zur Restschichtdicke</b> .....	23
3.1.1.	Grundlagen .....	23
3.1.1.1.	Geometrische Daten und Konventionen.....	23
3.1.1.2.	Voraussetzungen zur Berechnung des Verdrängungsvorgangs.....	24
3.1.2.	Berechnung der Restschichtdicke .....	24
3.1.3.	Experimentelle Bestimmung der Restschichtdicke .....	26
3.1.4.	Diskussion der Ergebnisse.....	28
<b>3.2.</b>	<b>Maßbeeinflussung durch den Trockenätzprozeß</b> .....	30
3.2.1.	Grundlagen und Anforderungen an den Prozeß .....	30
3.2.2.	Versuchsplanung und Auswertung .....	32
3.2.3.	Diskussion .....	36

<b>3.3.</b>	<b>Laterale Abweichungen beim Abformprozeß</b> .....	37
3.3.1.	Überlegungen zur Entstehung der lateralen Maßabweichungen beim Abformen ...	37
3.3.1.1.	Einfluß des Substratmaterials .....	37
3.3.1.2.	Einfluß der Restschichtdicke .....	38
3.3.2.	Versuchsdurchführung.....	38
3.3.3.	Versuchsauswertung .....	40
<b>3.4.</b>	<b>Kompatibilität zur CMOS-Technologie</b> .....	42
3.4.1.	Prozeß zur Herstellung von Mikrostrukturen auf Integrierten Schaltkreisen .....	42
3.4.1.1.	Galvanikstartschicht .....	43
3.4.1.2.	Opferschicht.....	43
3.4.1.3.	Abformprozeß.....	44
3.4.1.4.	Reaktives Ionenätzen .....	44
3.4.1.5.	Galvanoformung .....	44
3.4.2.	Versuchsergebnisse.....	45
3.4.3.	Diskussion .....	47
<b>4.</b>	<b>Konzeption und Entwicklung einer Maschine zur positionierten Abformung</b> .....	49
<b>4.1.</b>	<b>Anforderungen an die Maschine zur positionierten Abformung und Vorversuche</b> .....	49
4.1.1.	Anforderungen und Prozeßparameter .....	49
4.1.2.	Ausbau der bereits betriebenen Maschinen mit Führungsbolzen und -buchsen.....	50
4.1.3.	Experimentelle Überprüfung der Genauigkeit von Führungsbolzen und -buchse...51	
4.1.4.	Untersuchung einer Führung mit verpreßten PTFE-Lagern .....	52
<b>4.2.</b>	<b>Entwicklung eines Konzepts zur positionierten Abformung</b> .....	54
4.2.1.	<b>Variante 1:</b> Justierkreuzerkennung in der Abformmaschine auf der Substratrückseite.....	55
4.2.2.	<b>Variante 2:</b> Justierkreuzerkennung über eine Optik mit wechselnder Blickrichtung .....	56
4.2.3.	<b>Variante 3:</b> Justierkreuzerkennung durch eine einschwenkbare Optik mit nur einer Blickrichtung .....	57
4.3.4.	<b>Variante 4:</b> Justierkreuzerkennung außerhalb der Abformmaschine .....	59



<b>4.3.</b>	<b>Realisierung und Überprüfung des ausgewählten Konzepts</b> .....	60
4.3.1.	Anlage zur positionierten Abformung .....	61
4.3.1.1.	Universalprüfmaschine .....	61
4.3.1.2.	Prozeßkammer .....	62
4.3.1.3.	Positioniervorrichtung und ihre Justierung .....	63
4.3.2.	Überprüfung der mechanischen Genauigkeit der Universalprüfmaschine .....	65
4.3.2.1.	Traversenzu- und -schrägstellung .....	65
4.3.2.2.	Seitlicher Versatz der Traversen zueinander .....	67
4.3.3.	Einstellung der Regelparameter .....	69
4.3.4.	Abformung.....	72
4.3.4.1.	Ebenheit der Restschicht .....	72
4.3.4.2.	Wiederholgenauigkeit der Position der Abformung .....	72
4.3.4.3.	Substratdrift .....	73
4.3.4.4.	Positionierte Abformung .....	74
4.3.5.	Diskussion .....	75
<b>5.</b>	<b>Herstellung und Charakterisierung von Funktionsmustern</b> .....	77
<b>5.1.</b>	<b>Funktionsprinzip des Beschleunigungssensors</b> .....	77
<b>5.2.</b>	<b>Anpassung des Beschleunigungssensordesigns an den Prozeß</b> .....	78
5.2.1.	Kompensation des Strukturverlusts beim Trockenätzprozeß .....	79
5.2.2.	Kompensation der durch den Abformprozeß verursachten Lageabweichungen .....	80
<b>5.3.</b>	<b>Herstellung der Komplementärstrukturen des Beschleunigungssensors</b> .....	82
5.3.1.	Abformung schmaler Stege .....	82
5.3.2.	Abformung schmaler Gräben .....	84
5.3.3.	Auswahl der Opferschicht .....	86
<b>5.4.</b>	<b>Herstellung von Beschleunigungssensoren</b> .....	88
<b>5.5.</b>	<b>Messungen an Beschleunigungssensoren</b> .....	92
5.5.1.	Herkömmliches Design .....	92
5.5.2.	Temperaturkompensierter Sensor .....	93
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion</b> .....	97
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	100

## 1. Einleitung

Die rasante Entwicklung in der Mikroelektronik zu immer kleineren und leistungsfähigeren Einheiten zieht für die zunehmend an Bedeutung gewinnende Mikrosystemtechnik eine analoge Entwicklung für mikromechanische Komponenten nach sich. Die konventionellen Fertigungsmethoden kommen für die Herstellung mikromechanischer Teile nicht in Frage. Sie stoßen bei den Genauigkeitsanforderungen an ihre Grenzen oder werden unrentabel. Daher müssen neue Wege zur Herstellung kleinster mechanischer Bauteile beschritten werden. Dabei kommt eine Miniaturisierung der klassischen Verfahren der Feinmechanik nicht in Betracht. Vielmehr orientieren sich diese Wege an den modernen Fertigungsmethoden der Mikroelektronik. Einige Prozesse aus der Mikroelektronik konnten für die Fertigung mikromechanischer Komponenten übernommen werden, so z. B. Maskentechnik, chemische Beschichtung und Ätztechnik. In den letzten Jahren haben sich hieraus prinzipiell drei unterschiedliche Verfahren herausgebildet: Zum einen ist dies die Weiterentwicklung der Siliziumtechnik, die, aufbauend auf der Halbleitertechnik, den Schritt in die für mechanische Komponenten wichtige dritte Dimension macht. Die zweite Methode ist der Einsatz von dicken UV-empfindlichen Photolacken auf Polyimidbasis. Der dritte Ansatz ist das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte LIGA-Verfahren.

In der Siliziumtechnik wurden drei Ätzprozesse weiterentwickelt [Sei89]: Durch das naßchemische isotrope Ätzen von Polysilizium können mikromechanische Bauteile beliebiger Geometrie mit wenigen Mikrometern Höhe hergestellt werden. Durch die Verwendung von trockenen Ionenätzverfahren konnte die Strukturhöhe unter Beibehaltung der freien Geometrie auf mehrere 10 Mikrometer erhöht werden. Die Herstellung von Strukturen mit mehreren 100 Mikrometern Höhe ist mit anisotropem Ätzen von einkristallinem Silizium möglich. Dabei besteht aber nicht mehr die Möglichkeit der freien Formgebung, sondern es muß mit den Vorzugsrichtungen des Einkristalls vorlieb genommen werden.

Die Herstellung von Strukturen mit einer Höhe von mehreren 10 Mikrometern und freier lateraler Form wird möglich durch den Einsatz dicker Photolacke [Alle93]. Diese Strukturen können als Form für galvanische Abscheidung von Metallen verwendet werden. Damit bieten diese Photolacke die Möglichkeit Mikrostrukturen additiv auf ein Substrat aufzubauen, deren Flanken allerdings mit zunehmender Höhe nicht mehr senkrecht stehen.

Strukturen mit einer Höhe von mehrern 100 Mikrometern, freier lateraler Form und senkrechten Wänden können mit dem LIGA-Verfahren [Beck86], das im Forschungszentrum

Karlsruhe am heutigen Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) erfunden wurde, erzeugt werden. Das LIGA-Verfahren verwendet energiereiche Synchrotronstrahlung zur Strukturierung des Resists. Dies ermöglicht die sehr hohen Strukturen mit senkrechten Wänden, wobei diese aus unterschiedlichsten Materialien bestehen können. Dabei übernimmt auch dieses Verfahren in wesentlichen Schritten die Maskentechnik der Siliziumtechnik und die Nutzenfertigung. Das LIGA-Verfahren besteht aus den wesentlichen Prozessschritten Lithographie, Galvanik und Abformung und wird in der Abbildung 1.1 vorgestellt.

Der Resist, der auf ein Substrat aufpolymerisiert wird, wird durch eine Röntgenmaske mit Synchrotronstrahlung bestrahlt (LI). Anschließend wird der bestrahlte Resist in einem geeigneten Entwickler selektiv gegen den unbestrahlten gelöst. Dadurch entsteht auf dem Substrat eine Kunststoffmikrostruktur, deren Zwischenräume durch galvanische Metallabscheidung (G) aufgefüllt werden. Der zwischen den metallischen Mikrostrukturen verbliebene Resist wird entfernt. Das so entstandene Abformwerkzeug wird zur Herstellung vieler Kunststoffmikrostrukturen durch Abformung (A) genutzt, die ein genaues Abbild der Struktur sind, die auf dem Substrat mit Röntgentiefenlithographie erzeugt wurden. Von besonderer Bedeutung ist die Verwendung von Synchrotronstrahlung zur Strukturierung des Resists. Diese harte, hochparallele Röntgenstrahlung ermöglicht die Herstellung sehr hoher Strukturen mit praktisch senkrechten Flanken.

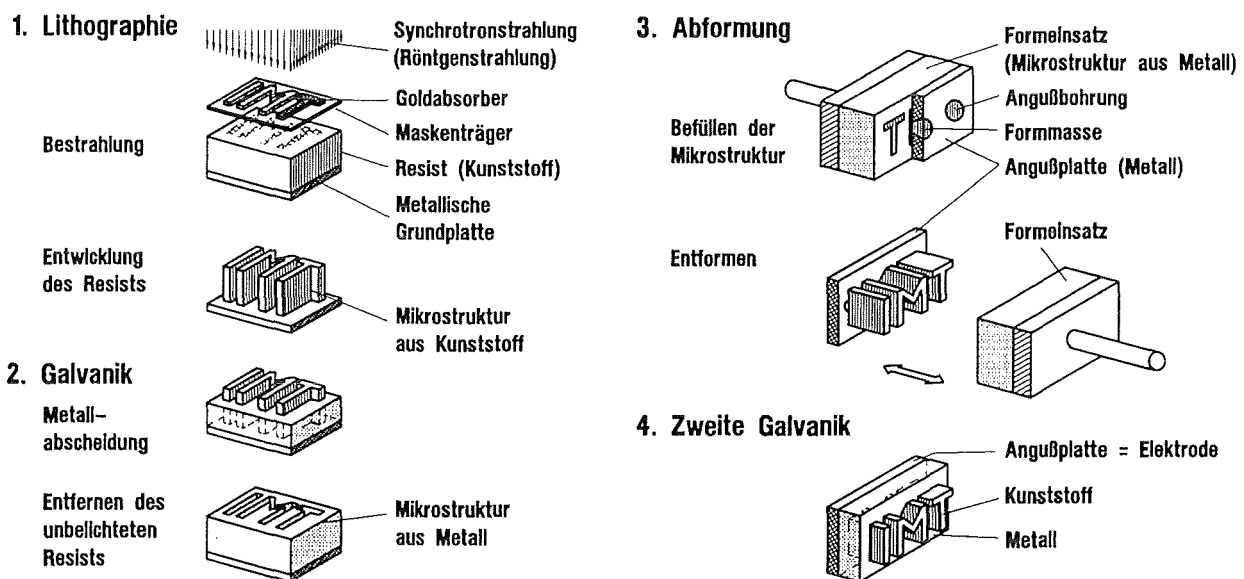


Abb.1.1: Schematische Darstellung der Prozessfolge des LIGA-Verfahrens.

Mikrostrukturen mit glatten, senkrechten Wänden sind für Anwendungen in der technischen Optik und der optischen Nachrichtentechnik besonders wichtig. Für die Fertigung solcher Elemente wird das LIGA-Verfahren von der Fa. microParts/Dortmund und dem IMT bereits kommerziell genutzt. Dabei kommen für die Fertigung aus wirtschaftlichen Gründen in erster Linie Kunststoffabformprozesse zum Einsatz, die integraler Bestandteil des LIGA-Verfahrens sind. Allerdings handelt es sich dabei ausschließlich um feststehende Mikrostrukturen. Für viele Anwendungen in der Sensorik und der Aktorik sind jedoch bewegliche Mikrostrukturen notwendig. Am IMT wurden z. B. Beschleunigungssensoren, Linearantriebe, Mikromotoren, Mikroturbinen und Submikrometeraktoren [Kowa91, Kohl95, Börn95, Wall92] entwickelt, die bis jetzt prozeßbedingt nur durch Röntgentiefenlithographie und Galvanik hergestellt werden konnten. Da bei der Herstellung jeder dieser Strukturen Synchrotronstrahlung eingesetzt werden muß, ist ihre Produktion teuer. Zur Reduzierung der Fertigungskosten muß daher ebenfalls der Kunststoffabformprozeß eingesetzt werden. Dies ist besonders interessant für den Beschleunigungssensor, dessen Struktur alle typischen und problematischen Eigenschaften beweglicher Mikrostrukturen aufweist. Beschleunigungssensoren finden ihren Einsatz beispielsweise in der Aufzeichnung von Beschleunigungsschocks beim Transport bruchgefährdeter Güter, zum Auslösen von Sicherheitsvorgängen im Automobil oder für Navigationszwecke [Stro95]. Für den Fall einer wirtschaftlichen Massenfertigung solcher Sensoren sind mehrere potentielle Abnehmer, die jeweils große Stückzahlen benötigen, vorhanden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem bewegliche LIGA-Mikrostrukturen durch Kunststoffabformung erzeugt werden können. Der wichtigste Prozeßschritt hierbei ist die Positionierung der einzelnen Strukturebenen zueinander. Dafür gibt es in der Abformtechnik bisher noch keine Lösung mit der geforderten Genauigkeit. Bei der Herstellung der Mikrostrukturen durch Röntgentiefenlithographie wird dieses Problem durch justierte Bestrahlung [Wall92] in Analogie zur Halbleiterfertigung gelöst. Für die Abformung ist eine Übertragung dieser Justiermethode aus prozeßtechnischen Gründen nicht möglich. Es stehen weder Verfahren noch Einrichtungen zur Verfügung, die unter typischen Abformbedingungen Mikrostrukturen auf einem vorbestimmten Ort des Substrats erzeugen können.

Es muß daher eine Methode gefunden werden, die eine Abformung der Kunststoffstrukturen an einer bestimmten Position auf dem Substrat ermöglicht. Dieses Verfahren wird in der vorliegenden Arbeit von Grund auf entwickelt. Eine Apparatur muß aufgebaut werden, mit

der Kunststoffstrukturen mit einer lateralen Genauigkeit von  $\leq \pm 10 \mu\text{m}$  zu einer bereits vorhandenen Struktur auf dem Substrat abgeformt werden können.

Die Maßänderungen, die durch Änderungen in der Prozeßführung bei der Herstellung beweglicher Mikrostrukturen auftreten, müssen beim Design der Mikrostrukturen bereits kompensiert werden. Daher werden die bei der Abformung auftretenden Maßabweichungen der Strukturebenen zueinander und die Strukturverluste an den Flanken eingehend untersucht und entsprechende Prozeßvorhalte ermittelt.

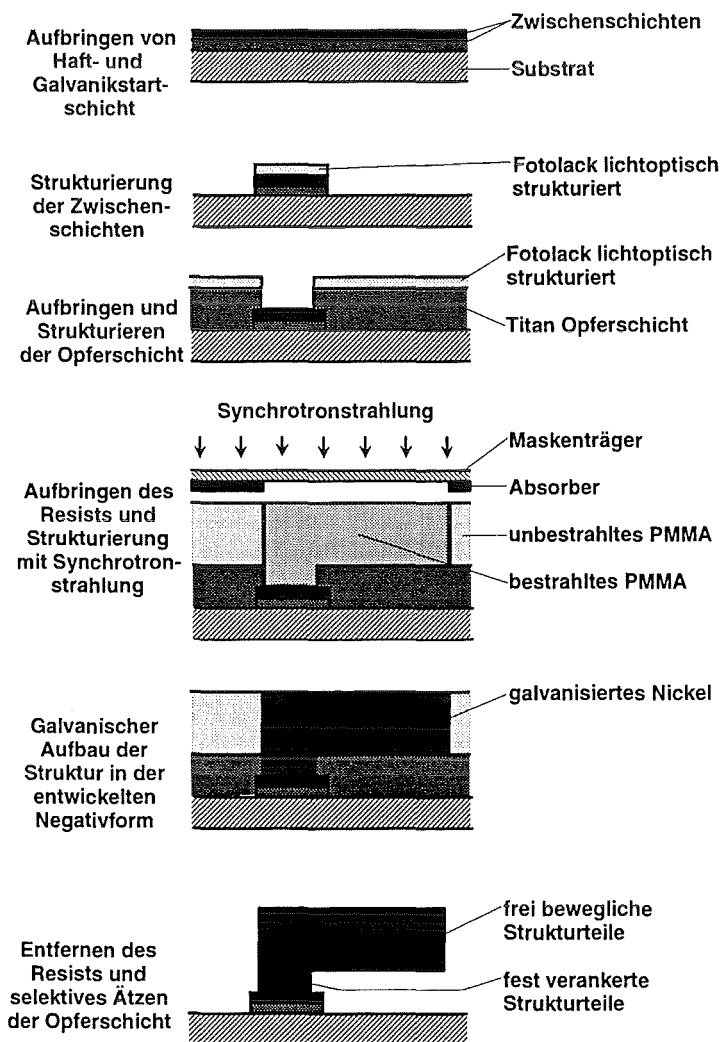
Zum Test der entwickelten Verfahren werden beispielhaft Beschleunigungssensoren hergestellt und qualifiziert.

## 2. Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen

### 2.1. Herstellung durch Röntgentiefenlithographie

#### 2.1.1. Integration der Opferschichttechnik in die LIGA-Technik

Mit dem LIGA-Verfahren und einer speziell entwickelten Opferschichttechnik wurden Prototypen beweglicher Mikrostrukturen [Burb91] durch die Prozeßschritte Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Ätzen der Opferschicht hergestellt. Besondere Beachtung verdient bei diesem Verfahren der Bestrahlungsvorgang, der justiert zu der bereits auf dem Substrat befindlichen Opferschicht durchgeführt werden muß. In Abbildung 2.1 ist der gesamte Prozeß schematisch dargestellt.



**Abb.2.1:** Prozeßfolge zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Kombination des LIGA-Verfahrens mit einer Opferschicht aus Titan [Burb91].

Auf ein isolierendes Substrat werden zwei dünne Metallschichten aufgesputtert, die einerseits eine haftfeste Verbindung zwischen den galvanisch aufgebauten Mikrostrukturen und dem Substrat gewähren sollen, auf denen andererseits auch die Galvanik des LIGA-Prozesses gut starten muß. Auf diese Metallschichten wird ein Fotolack aufgetragen, der lichtoptisch strukturiert wird und danach als Ätzmaske für die Strukturierung der Metallschichten dient. Diese dünnen strukturierten Metallebenen dienen zur späteren elektrischen Kontaktierung der Mikrostrukturen und werden im folgenden als Leiterbahnebene bezeichnet. Anschließend wird der Fotolack entfernt und eine wenige Mikrometer dicke Titanschicht aufgebracht. Diese Titanschicht, die als Opferschicht dient, wird analog zur Leiterbahnebene strukturiert, wobei die photolithographische Strukturierung justiert zur Leiterbahnebene durchgeführt werden muß. Anschließend wird das Substrat mit röntgenempfindlichem Resist beschichtet und durch eine justierte Maske mit Synchrotronstrahlung bestrahlt. Die bestrahlten Bereiche des Resists werden herausgelöst und die Zwischenräume galvanisch mit Metall gefüllt. Nun wird der verbliebene Resist entfernt und die Opferschicht selektiv gegenüber dem Substrat und den metallischen Mikrostrukturen geätzt. Dadurch werden die Mikrostrukturen, die auf der Opferschicht aufgebaut worden waren, beweglich.

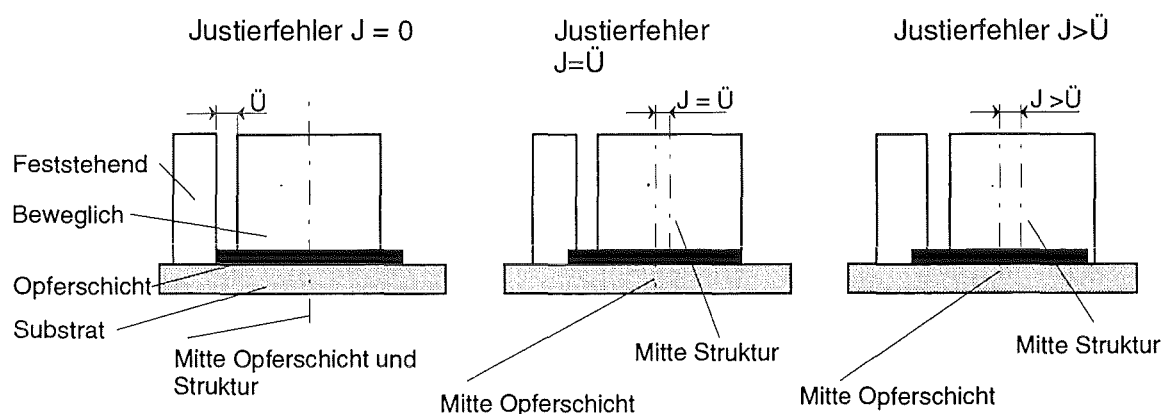
### **2.1.2. Justierte Bestrahlung**

In Abschnitt 2.1.1. wurde die justierte Bestrahlung, die im Zusammenhang mit der Herstellung rotierender Mikrostrukturen untersucht [Wall92] wurde, bereits erwähnt. Da diese Technik sich von der justierten optischen Lithographie, die aus der Halbleitertechnik hinreichend bekannt ist [MeBl92], unterscheidet, und im weiteren Verlauf dieser Arbeit zum Vergleich herangezogen wird, wird sie hier kurz beschrieben.

Es wird ein Substrat verwendet, dessen metallisierte Oberfläche durch lichtoptische Lithographie und naßchemisches Ätzen vorstrukturiert wurde. Die zur optischen Strukturierung verwendete Maske enthält an bestimmten Positionen Justierkreuze, die in die metallisierte Oberfläche des Substrats übertragen werden. Nun wird eine Röntgenmaske, die mit entsprechenden Justieröffnungen versehen wurde, über dieses Substrat gelegt. Das Substrat wird zusammen mit der Maske in ein Mikroskop mit Justiervorrichtung eingelegt. Die Mikroskopoptik wird zunächst auf das Justierkreuz der Maske fokussiert und seine Position über eine Videokamera und eine Bildverarbeitungskarte gespeichert. Jetzt wird der Mikroskopoptisch in der Höhe so verfahren, daß die Substratoberfläche in die Fokusebene kommt. Mit dem Mikroskop werden durch die Justieröffnungen der Maske die Justierkreuze auf dem Substrat erkannt. Somit können die Justierkreuze von Maske und Substrat zur

Deckung gebracht werden. Anschließend werden Maske und Substrat zueinander arretiert und in die Bestrahlungsapparatur eingebaut, in der die Probe bestrahlt wird.

Die Justiergenauigkeit ist dabei von entscheidender Bedeutung für die spätere Funktion der Mikrostrukturen. Die Abbildung 2.2 zeigt die Zusammenhänge zwischen dem Justierfehler  $J$ , dem Überlapp der Opferschicht  $\ddot{U}$  und der Funktion der beweglichen Mikrostrukturen. Links ist der Idealfall ohne Justierfehler skizziert. Der bewegliche Teil der Mikrostruktur steht mittig auf der Opferschicht und die feststehende Struktur neben der Opferschicht. Die mittlere Skizze zeigt den Grenzfall. Die bewegliche Mikrostruktur steht gerade noch auf der Opferschicht, aber die feststehende Mikrostruktur nur zu einem kleinen Teil. Ganz rechts ist der Justierfehler so groß, daß Teile der beweglichen Mikrostruktur auf dem Substrat stehen, deswegen kann später die Struktur nicht mehr beweglich werden. Außerdem steht die feststehende Mikrostruktur so weit auf der Opferschicht, daß nach deren Entfernung die Haftung der Struktur zum Substrat unter Umständen nicht mehr ausreicht.



**Abb.2.2:** Auswirkung des Justierfehlers bei der Herstellung beweglicher Mikrostrukturen.

Um die Justiergenauigkeit, die durch die justierte Bestrahlung erreicht werden kann, zu bestimmen, wurden die einzelnen Fehler der verwendeten Geräte sowie der Masken und Substrate analysiert. Die wesentlichen Fehlerquellen sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Fehlerquelle	Justierfehler [ $\mu\text{m}$ ]
Maskenverzüge	$\pm 1$
Justierkreuze ungleichmäßig geätzt	$\pm 2$
Bestrahlungsapparatur steht nicht senkrecht zum Strahl	$\pm 1$
Mikroskopisch verschiebt sich horizontal beim Einstellen der Fokusebene	$\pm 1$

**Tab.2.1:** Zusammenstellung der wichtigsten Fehlerquellen bei der justierten Bestrahlung.



Die Fehler sind zufallsverteilt. Damit ergibt sich die theoretische Justiergenauigkeit  $J_0$  aus:

$$J_0 = \pm \sqrt{\sum F_i^2} \quad (2.1)$$

wobei  $F_i$  die einzelnen Justierfehler aus Tabelle 2.1 sind.

Die theoretische Justiergenauigkeit beträgt mit den am IMT und am Bonner Synchrotron vorhandenen Einrichtungen  $J_0 \approx \pm 2.5 \mu\text{m}$ . Bei der Überprüfung einzelner Proben [Wall92] wurde die tatsächliche Justiergenauigkeit bestimmt, indem die Lageabweichungen zwischen den vorgeätzten und den durch Bestrahlung erzeugten Justiermarken vermessen wurden. Dabei zeigte sich, daß die optimale Justiergenauigkeit  $J_{\text{opt}}$  bei  $\pm 5 \mu\text{m}$  liegt. Im Rahmen einer weiterführenden Arbeit [Stro95] wurde die justierte Bestrahlung zur Herstellung kleiner Stückzahlen von Prototypen und Mustern genutzt. Hier wurde eine mittlere Justiergenauigkeit  $J_m \approx \pm 7 \mu\text{m}$  ermittelt. Die kleine Abweichung zwischen der optimalen Justiergenauigkeit  $J_{\text{opt}}$  und der im Mittel erreichten Genauigkeit  $J_m$  zeigt, daß mit dieser Methode auch unter fertigungsnahen Bedingungen fast die optimale Justiergenauigkeit  $J_{\text{opt}}$  erzielt wird. Die mit dieser Methode erreichbare mittlere Justiergenauigkeit reicht für die Funktion der bisher am IMT entwickelten Mikrostrukturen aus (vgl. Kapitel 1.).

## **2.2. Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung**

Das in Abschnitt 2.1. vorgestellte Verfahren eignet sich zur Herstellung von Prototypen und auch Kleinserien. Die Anzahl der hergestellten Strukturen hängt dabei maßgeblich von ihrer Gesamtgröße ab. Im Falle des Beschleunigungssensors werden auf einem Substrat auf der Grundfläche von  $20 * 60 \text{ mm}^2$  ca. 70 Strukturen angeordnet, d.h. durch Prozessierung eines Substrats werden im Optimalfall 70 Sensoren hergestellt. Hier ist die Fertigung einer Kleinserie von mehreren hundert oder tausend Stück durch direkte Röntgentiefenlithographie möglich. Wenn dagegen Millionen dieser Sensoren pro Jahr benötigt werden, wie etwa in der Automobilindustrie, ist es unmöglich, sie durch Röntgentiefenlithographie herzustellen. Dies ist wirtschaftlich nur mit der Abformtechnik möglich. Dabei wird die Röntgentiefenlithographie nur einmal zur Herstellung eines Abformwerkzeugs benötigt. Mit diesem Werkzeug werden dann die Strukturen mit den in der Kunststofftechnik üblichen Methoden hergestellt.

### 2.2.1. Grundlagen

Im Rahmen der Entwicklung des LIGA-Verfahrens wurden mehrere Prozesse zur Abformung von Mikrostrukturen auf einem Substrat durch Reaktionsguß vorgestellt [Harm90]. Dabei wird das Werkzeug auf das Substrat gepreßt, so daß die Formnester des Werkzeugs gegen die Umgebung abgedichtet sind. Durch Angußkanäle wird das Formstoffpolymerisat in die Formnester eingespritzt, wo es unter hohem Druck aushärtet. Dabei konnte gezeigt werden, daß Abformwerkzeuge, die durch Röntgentiefenlithographie und Galvanik hergestellt wurden, sich zur Abformung von Mikrostrukturen im Reaktionsguß eignen. Die Wandrauigkeit des Werkzeugs ist so klein, daß die Mikrostrukturen aus dem Abformwerkzeug entformt werden können, obwohl sie senkrecht stehende Wände haben.

#### 2.2.1.1. Prozeß zur Abformung von Mikrostrukturen auf einem Substrat

Die Reaktionsgußprozesse sind weniger gut geeignet zur Herstellung von Mikrostrukturen auf dünnen, spröden Substraten, wie Siliziumwafern, da die hohen Schließkräfte zum Abdichten zwischen Form und Substrat diese beschädigen können. Daher wurden durch die Entwicklung des Prägeprozesses [Mich93] die Funktionen 'Formnester befüllen' und 'Formstoff polymerisieren' voneinander getrennt.

Der gesamte Prozeß zum Prägen von Mikrostrukturen auf einem Substrat ist hier kurz beschrieben: Auf das Substrat werden eine nur wenige Mikrometer dicke Haftschrift und darauf der thermoplastische Formstoff aufpolymerisiert. Dabei gewährleistet die Haftschrift die Übertragung der Entformkräfte vom Substrat in den Formstoff, während sich der Formstoff durch eine möglichst kleine Haftung zum Abformwerkzeug auszeichnet. Der Formstoff wird im Vakuum oberhalb der Glasübergangstemperatur durch Einpressen eines Abformwerkzeugs strukturiert. Anschließend werden Substrat und Werkzeug unter die Glasübergangstemperatur des Formstoffs abgekühlt und die Mikrostrukturen aus dem Werkzeug entformt. Mit diesem Prozeß wurden typische LIGA-Mikrostrukturen hergestellt.

Für diesen Prozeß muß als Formstoff ein Thermoplast verwendet werden. Thermoplastische Kunststoffe zeichnen sich dadurch aus, daß sie beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur in den viskoelastischen Zustand übergehen. Nur in diesem Zustand kann der Werkstoff zerstörungsfrei umgeformt werden. Der Umformvorgang muß also oberhalb der Glasübergangstemperatur stattfinden. Unterhalb dieser Temperatur befindet sich der Kunststoff im elastischen Zustand und es können Zugkräfte im Formstoff übertragen

werden. Da zum Entformen der Mikrostrukturen aus dem Abformwerkzeug Zugkräfte nötig sind, muß der Entformvorgang unterhalb dieser Temperatur durchgeführt werden. Ein wesentlicher Schritt bei der Entwicklung des Prägeprozesses war daher die Charakterisierung eines geeigneten Formstoffs. Dabei wurde auf das von Anfang an beim LIGA-Verfahren verwendete Polymethylmethacrylat (PMMA) zurückgegriffen [Mich93], das am IMT im Rahmen der Untersuchungen von Kunststoffen zur Abformung PMMA am weitesten entwickelt war. Für den vorgestellten Prägeprozeß wurde auf PMMA-Basis ein spezieller thermoplastischer Formstoff mit folgender Grundzusammensetzung verwendet:

100 Gew. Teile Plexit 60 <sup>1</sup>	(Polymer/Monomergemisch, Grundmaterial)
3 Gew. Teile BPO	(Benzoylperoxid, Initiator)
1,5 Gew. Teile DMA	(Dimethylanilin, Aktivator)

Die Glasübergangstemperatur für diesen Formstoff liegt bei 110 °C.

Zur Abformung von Mikrostrukturen mit einem hohen Aspektverhältnis wird an den Formstoff eine weitere Bedingung gestellt: LIGA-Mikrostrukturen haben im Vergleich zur Grundfläche eine große Seitenwandfläche. Daher treten zwischen Abformwerkzeug und Mikrostruktur beim Entformen hohe Haftkräfte auf. Um plastische Verformungen oder Abrisse beim Entformen der Mikrostrukturen zu vermeiden, müssen diese Haftkräfte, im folgenden Entformkräfte genannt, minimiert werden. Eine in der Kunststofftechnik übliche Methode zur Lösung dieses Problems ist die Zugabe von Trennmitteln zum Formstoff. Diese Methode erwies sich auch für die Abformung von Mikrostrukturen als erfolgreich. Ein kommerzielles Trennmittel PAT665<sup>2</sup> zeigt einen entscheidenden Einfluß auf die Entformkraft. Die Entformkraft wird durch Beimischen von 3 Gew. Teilen Trennmittel auf etwa 35% des Wertes ohne Trennmittel reduziert.

#### 2.2.1.2. LIGA-Abformwerkzeuge

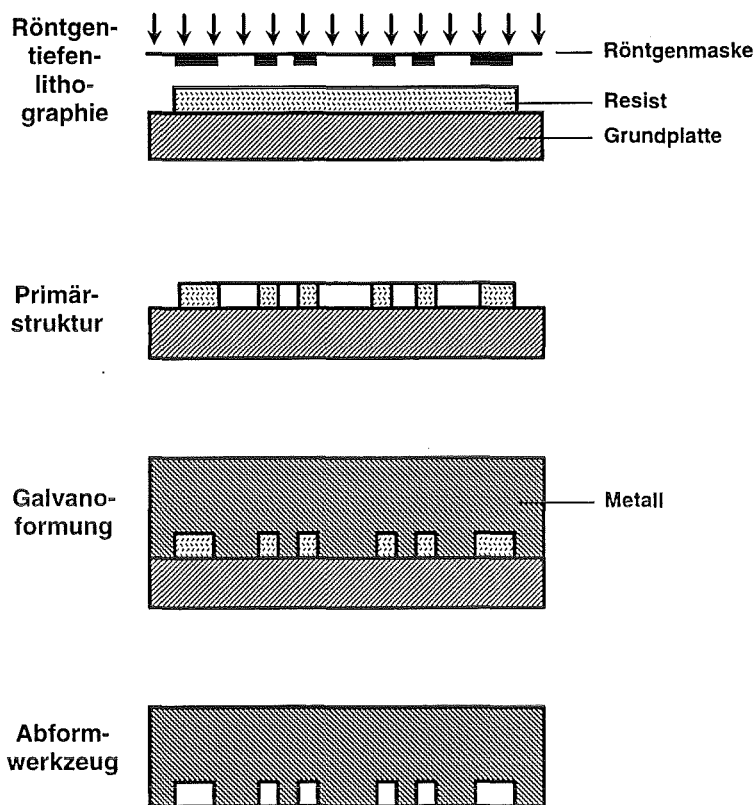
Zur Herstellung größerer Stückzahlen von LIGA-Mikrostrukturen werden verschiedene Kunststoffabformverfahren eingesetzt. Immer wird jedoch ein mikrostrukturiertes

---

<sup>1</sup> Handelsname der Fa. Röhm, Darmstadt

<sup>2</sup> Handelsname der Fa. Würtz, Bingen Sponheim

Abformwerkzeug benötigt. Die Abbildung 2.3 erläutert das Verfahren zur Herstellung dieser Abformwerkzeuge.



**Abb.2.3:** Verfahren zur Herstellung von LIGA-Abformwerkzeugen.

Ein Resist, der in einer Dicke von mehreren 100 Mikrometern auf eine Grundplatte aufpolymerisiert wurde, wird durch eine Röntgenmaske mit Synchrotronstrahlung bestrahlt. Die bestrahlten Bereiche des Resists werden in einem Entwickler herausgelöst. Auf der Grundplatte entstehen Polymermikrostrukturen, die durch galvanische Metallabscheidung invertiert werden. Dabei wächst das abgeschiedene Metall von der Grundplatte aus startend auf und überwächst die Polymerstrukturen schließlich. Die Metallabscheidung wird beendet, wenn über den Mikrostrukturen ein Metallblock von ca. 7 mm Dicke entstanden ist. Dieser wird durch mechanische Bearbeitung auf die Außenmaße des Abformwerkzeugs gebracht. Schließlich wird das Abformwerkzeug von der Grundplatte getrennt und der Resist aus den Mikrostrukturen entfernt [Tro93].

Prinzipiell ist es auch möglich, mit gestuften Abformwerkzeugen bewegliche Mikrostrukturen herzustellen. Diese Technik wird in Abschnitt 2.2.2.3. näher erläutert. Die Herstellung

gestufter Abformwerkzeuge geschieht durch eine Kombination von Röntgentiefenlithographie und Abformung [Kalb94] und ist in Abbildung 2.4 dargestellt:

Auf eine Grundplatte wird ein abformbarer Resist, d.h. ein Kunststoff, der sowohl durch Abformung wie auch durch Röntgentiefenlithographie strukturiert wird, aufgebracht. Dieser Resist wird mit einem einstufigen Abformwerkzeug strukturiert. Es entsteht eine durchgehende Resistschicht definierter Dicke mit strukturierter Oberfläche. Diese stellt die Mikrostrukturen der oberen Stufe dar.

Die durchgehende Resistschicht wird jetzt durch Röntgentiefenlithographie, die justiert zur oberen Mikrostrukturebene durchgeführt wird, strukturiert. In der anschließenden Galvanoformung zum Abformwerkzeug wird die Resiststruktur zuerst vollständig mit Metall aufgefüllt und dann überwachsen. Zur Fertigstellung des gestuften Werkzeugs wird analog zum einstufigen Werkzeug verfahren.

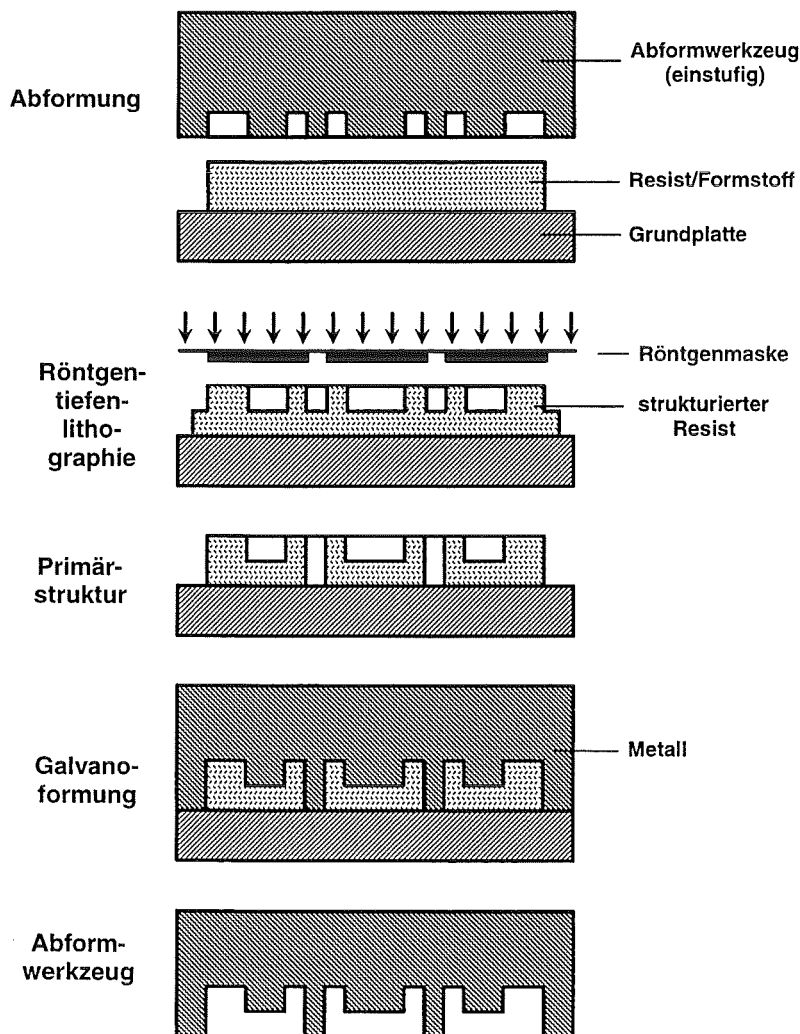


Abb.2.4: Verfahren zur Herstellung eines zweistufigen Abformwerkzeugs.

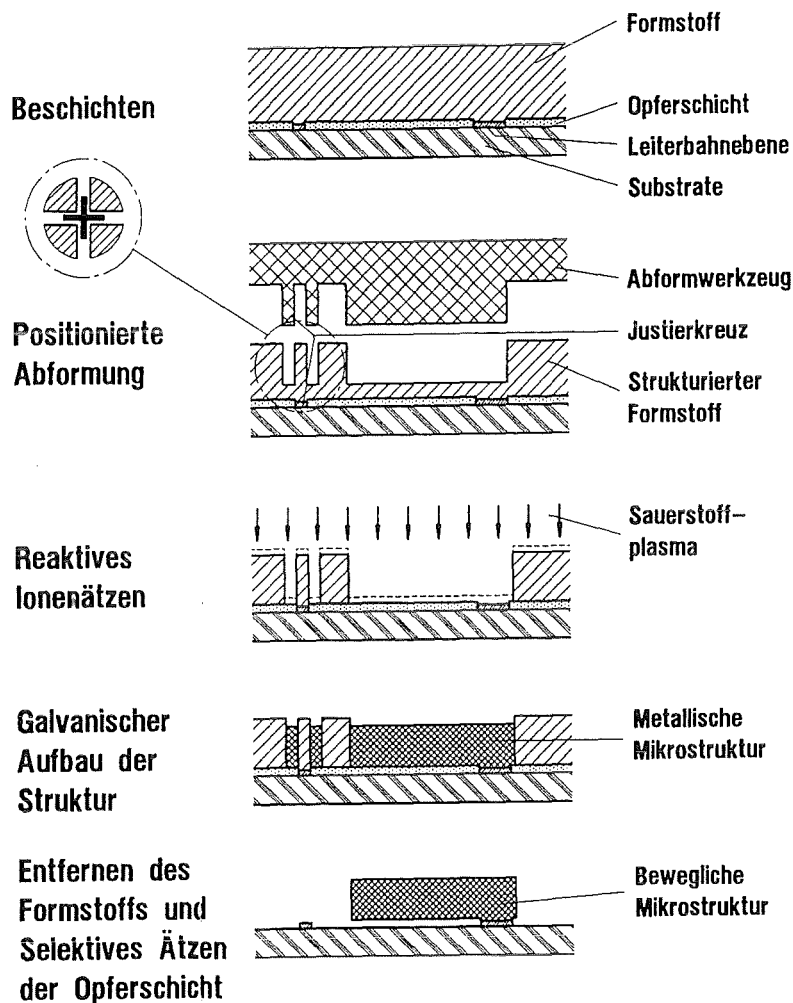
### **2.2.2. Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung**

Zur Herstellung von beweglichen metallischen Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren dürfen die beweglichen Teile nicht direkt auf dem Substrat stehen, sondern müssen auf einer Zwischenschicht erzeugt werden, die zum Schluß selektiv gegenüber Mikrostrukturen und Substrat entfernt wird. Erst durch diesen Schritt verlieren die Strukturen ihre feste Verbindung zum Substrat und werden beweglich. Daraus folgt, daß zwei strukturierte Ebenen benötigt werden, die außerdem zueinander justiert sein müssen. In der oberen Ebene liegt der bewegliche Teil der Struktur, während die untere Ebene immer die mechanische Verbindung zwischen Substrat und oberer Ebene liefert. Für den Fall einer elektrischen Kontaktierung dieser Strukturen wird eine weitere Ebene, die Leiterbahnebene, benötigt, die direkt auf dem Substrat liegt. Die Strukturen der beiden schon erwähnten Ebenen müssen für die elektrische Kontaktierung ebenfalls justiert zur Leiterbahnebene hergestellt werden.

In Abschnitt 2.1. wurde bereits ein Verfahren vorgestellt, mit dem bewegliche Mikrostrukturen hergestellt werden. Dabei wird die untere Strukturebene durch eine metallische Opferschicht gebildet, die durch lichtoptische Lithographie strukturiert wird. Die obere Ebene wird durch justierte Röntgentiefenlithographie erzeugt. Bei Verwendung der Abformtechniken hingegen gibt es mehrere Möglichkeiten der Erzeugung von Strukturen, die später beweglich sein sollen, auf Zwischen- oder Opferschichten. Diese werden im folgenden dargestellt und bewertet.

#### **2.2.2.1 Verfahren 1: Abformung eines einstufigen Werkzeugs auf einer Opferschicht**

Dieses Verfahren stellt die konsequente Übertragung des in Abschnitt 2.1. vorgestellten Verfahrens dar. Es wird ein mit metallischer Opferschicht als untere Ebene vorstrukturiertes Substrat verwendet und die obere Ebene durch Abformung anstatt mit Röntgentiefenlithographie strukturiert. Die Abbildung 2.5 zeigt dieses Verfahren in einzelnen Schritten.



**Abb.2.5:** Prozeß zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung eines einstufigen Werkzeugs auf einer Opferschicht.

Es wird ein Substrat verwendet, das mit einer Leiterbahn- und Opferschichtebene (vgl. Abschnitt 2.1.) versehen wird. Auf diese Schichten wird der Formstoff aufpolymerisiert. Anschließend muß die Abformung der Mikrostrukturen positioniert zum Substrat durchgeführt werden. Eine Aufsicht auf eines der dazu benötigten Justierkreuze ist in Abbildung 2.5 vergrößert dargestellt. Die Komplementärstrukturen des Formeinsatzes entstehen im Formstoff. Zwischen der Stirnfläche des Abformwerkzeugs und dem Substrat verbleibt eine Polymerrestschicht, deren minimale Dicke dadurch festgelegt ist, daß die Mikrostrukturen fehlerfrei entformt werden können [Fing94]. Durch Reaktives Ionenätzen (Reactive Ion Etching, RIE) im  $O_2$ -Plasma wird diese Polymerrestschicht entfernt. Die so freigelegten elektrisch leitfähigen Schichten werden in einem Galvanikbad als Kathode kontaktiert. Das abgeschiedene Metall, vorzugsweise Nickel, wächst zwischen den verbliebenen Kunststoffmikrostrukturen auf. Diese werden anschließend in Ethylacetat

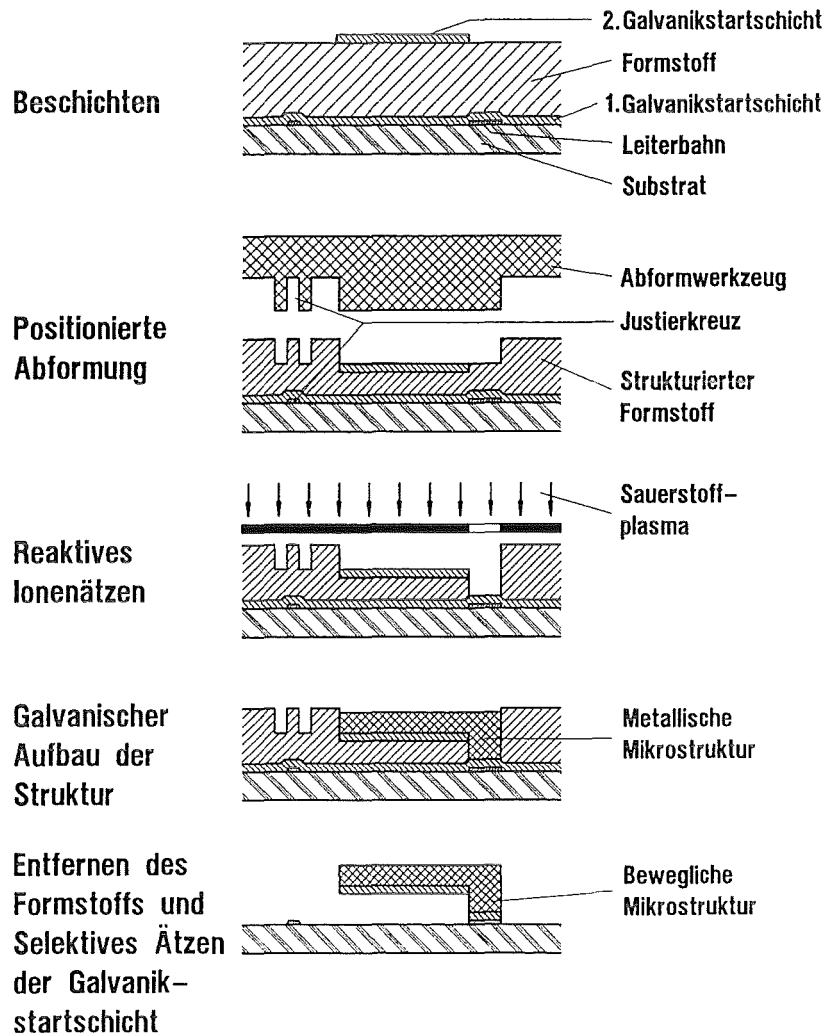
entfernt. Nun wird die Opferschicht selektiv zum Substrat und zum Nickel entfernt. Teile der Nickelstrukturen verlieren dadurch die feste Verbindung zum Substrat und werden beweglich. Somit ist es möglich, feststehende und bewegliche Mikrostrukturen auf einem Substrat in einer Prozeßsequenz herzustellen.

Zur Durchführung dieses Prozesses müssen die Mikrostrukturen mit hoher lateraler Genauigkeit zu den auf dem Substrat vorhandenen Strukturen der Opferschicht abgeformt werden. Hierfür wird der in Abschnitt 5.2. beschriebene positionierte Abformprozeß entwickelt. Ferner muß der Abformprozeß so geführt werden, daß dünne und gleichmäßige Restschichtdicken entstehen, um die Prozeßdauer für das Reaktive Ionenätzen zu minimieren und die Überätzung der freigelegten Galvanikstartschicht zu vermeiden.

#### 2.2.2.2. Verfahren 2: Abformung eines einstufigen Werkzeugs und partielle Strukturierung durch Trockenätzen

Hier wird die obere Strukturebene des Sensors durch Abformung eines einstufigen Abformwerkzeugs erzeugt. Die darunterliegende Opferschicht wird durch die beim Abformen verbleibende Kunststoffrestschicht gebildet und durch Reaktives Ionenätzen geeignet strukturiert. Der gesamte Prozeß ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Für dieses Verfahren wird ein Substrat verwendet, auf das die Leiterbahnstruktur sowie eine ganzflächige Galvanikstartschicht aufgebracht wurde. Zur Strukturierung der oberen Ebene wird die positionierte Abformung genutzt. Damit werden die Strukturen justiert zu den Leiterbahnen erzeugt. Die untere Ebene wird von der beim Abformen zwischen Werkzeug und Substrat verbliebenen Polymerschicht gebildet. Diese Schicht wird nach dem Abformen durch RIE partiell strukturiert. Dazu wird eine Maske auf den abgeformten Strukturen justiert, die für reaktive Ionen nur dort durchlässig ist, wo die Strukturen fest auf dem Substrat stehen sollen.





**Abb.2.6:** Prozeß zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung eines einstufigen Werkzeugs und partielle Strukturierung durch anisotropes Ätzen.

Während des Reaktiven Ionenätzens wird die Substratoberfläche also nur dort freigelegt und so die untere Ebene strukturiert. In der anschließenden Galvanik wachsen die Metallstrukturen vom Substratgrund aus startend auf. Beim Erreichen der oberen Ebene kontaktiert das abgeschiedene Metall die zweite Galvanikstartschicht, die nötig ist, da der Formstoff selbst nicht leitfähig ist. Diese zweite Galvanikstartschicht wird vor dem Abformen auf die Formstoffoberfläche aufgebracht. Dazu wird eine dünne Goldschicht auf den Formstoff aufgedampft, die mit lichtoptischer Lithographie und naßchemischem Ätzen strukturiert wird. Dabei werden Goldstrukturen justiert zu den Leiterbahnen dort erzeugt, wo sich der Startgrund für die zweite Ebene befindet. Diese zweite Galvanikstartschicht befindet sich nach dem Abformen im Grund der Mikrostrukturen aus Formstoff [Kalb94]. Nachdem diese Goldschicht durch das abgeschiedene Metall elektrisch kontaktiert worden ist, werden die

Mikrostrukturen der oberen Ebene gleichmäßig mit Metall aufgefüllt. Zur Fertigstellung der Struktur wird der Formstoff entfernt. Damit verlieren die Strukturen, die auf dem Formstoff abgeschieden wurden, ihre feste Verbindung zum Substrat und werden beweglich.

Aus dem letzten Absatz geht bereits hervor, daß das Substrat mit einer Leiterbahnebene, einer ganzflächigen Galvanikstartschicht und auf dem Formstoff mit einer zweiten Galvanikstartschicht versehen werden muß. Damit ist die Substratvorbereitung für diesen Prozeß aufwendig.

An den Abformprozeß wird auch bei diesem Verfahren die Forderung einer hohen lateralen Genauigkeit gestellt. Die feststehenden Teile der Mikrostruktur müssen auf den freiliegenden Leiterbahnen entstehen. Die Dicke der verbleibenden Polymerschicht zwischen der Stirnseite des Werkzeugs und dem Substrat darf in diesem Fall eine Welligkeit von einigen Mikrometern aufweisen, da die verbliebene Schicht über der Galvanikstartschicht durch partielles RIE entfernt wird. Die Flanken der Mikrostrukturen werden dabei nicht angegriffen, weil diese durch eine Maske abgedeckt werden. Dieser Prozeßschritt kann von seiner Dauer und damit Ätztiefe beliebig eingestellt werden. Hieraus wird deutlich, daß die freie Höhe der beweglichen Teile der Mikrostrukturen über die verbliebene Restschichtdicke einstellbar ist. Das Einprägen der zweiten Galvanikstartschicht von der Formstoffoberfläche auf den Boden der abgeformten Struktur wurde bereits gezeigt [Kalb94].

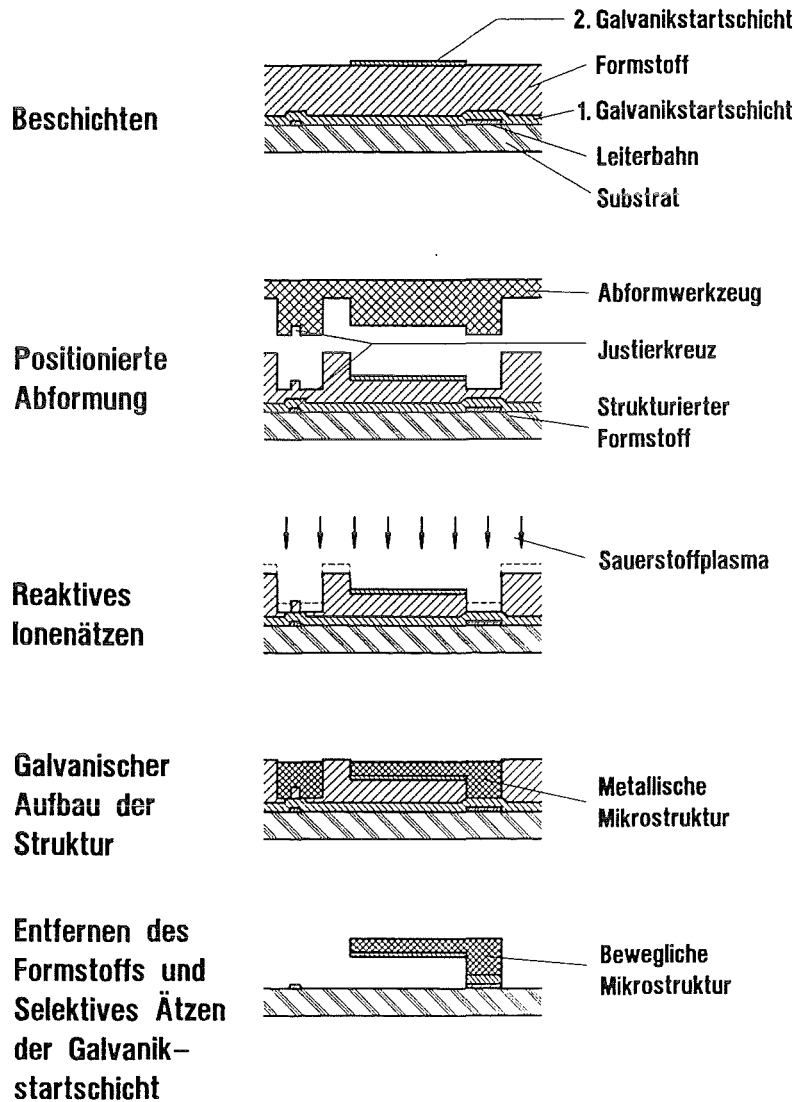
Die Maske für das Reaktive Ionenätzen besteht bisher aus einer Polyimid/Titanmembran, die auf einen Aluminiumrahmen aufgeklebt wird. Die Herstellung dieser Membran ist aufwendig [Both94] und bei bestimmten Geometrien der Öffnungen in der Maske treten so große Spannungsüberhöhungen auf, daß die Membranen durch Eigenspannungen zerstört werden.

Das galvanische Auffüllen der so erzeugten Mikrostrukturen wurde untersucht und es konnte gezeigt werden, daß auch über lange Strecken auf der Polymerschicht durch eine zweite Galvanikstartschicht ein Galvanikstart realisiert werden kann [Kalb94].

#### 2.2.2.3. Verfahren 3: Abformung eines gestuften Werkzeugs

Mit diesem Verfahren, das in Abbildung 2.7 dargestellt ist, werden wieder zwei Kunststoffebenen strukturiert. Deshalb wird ein Substrat wie in Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben verwendet. Beide Ebenen werden durch Abformung in einem Arbeitsschritt strukturiert. Dazu wird ein gestuftes Abformwerkzeug benötigt, dessen Herstellung in Abschnitt 2.2.1.3. erläutert wurde. Die obere Ebene des Werkzeugs erzeugt dabei auch die obere Ebene der Mikrostrukturen, die untere Ebene analog dazu die untere Mikrostrukturebene. Nach der

Abformung wird bei diesem Verfahren ganzflächig durch Reaktives Ionenätzen das Polymer abgetragen, bis im Grund der unteren Ebene das Substrat freigelegt ist. Damit stehen Polymerstrukturen zur Verfügung, die durch Galvanoformung und Entfernen des Formstoffs wie in Abschnitt 2.2.2.2. zu beweglichen Metallstrukturen weiter prozessiert werden.



**Abb.2.7:** Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch Abformung eines gestuften Werkzeugs.

Zur Durchführung dieses Verfahrens muß das Substrat genau so beschichtet werden, wie das Substrat in Abschnitt 2.2.2.2. Die zweite Galvanikstartschicht muß einer weiteren Anforderung genügen: Sie darf während des RIE nicht abgetragen werden, um im Strukturgrund der oberen Stufe auf der Polymeroberfläche einen homogenen Galvanikstart zu ermöglichen.

Auch bei diesem Verfahren müssen die Mikrostrukturen mit hoher lateraler Genauigkeit zu den bereits auf dem Substrat befindlichen Strukturen erzeugt werden. Ferner können die

gestuften Mikrostrukturen durch Abformen nur mit einem gestuften Abformwerkzeug hergestellt werden. Zur Herstellung solcher gestufter Werkzeuge wird für jede Stufe eine Röntgenmaske benötigt [Kalb94]. Die freie Höhe der beweglichen Mikrostruktur wird nur durch die prozeßtechnischen Möglichkeiten bei der Strukturierung des Formstoffs/Resists für das gestufte Werkzeug begrenzt. Die beim Abformen verbleibende Polymerrestschicht am Fuße der Mikrostrukturen muß möglichst dünn sein. Bei diesem Verfahren wird die Strukturhöhe in gleichem Maße wie die Restschicht durch RIE abgetragen, da der Strukturgrund der oberen Stufe nicht abgetragen wird.

An das reaktive Ionenätzen werden dieselben Anforderungen gestellt wie in Abschnitt 2.2.2.1.

#### 2.2.2.4. Diskussion und Auswahl eines Verfahrens

##### Substratvorbereitung

Ein wesentlicher Gesichtspunkt für die Auswahl eines Verfahrens ist der prozeßtechnische Aufwand für die gesamte Herstellung einer beweglichen Struktur. Für jedes Verfahren wird auf dem Substrat eine Leiterbahnebene benötigt, die durch Sputtern, lichtoptische Kopie und naßchemisches Ätzen hergestellt wird. Bei Verfahren 1 wird direkt auf dieser Schicht durch Sputtern, justierte optische Lithographie und naßchemisches Ätzen eine Opferschicht erzeugt. Der Formstoff wird auf diese Schicht aufpolymerisiert und der Abformprozeß kann ohne weitere Vorbehandlung begonnen werden. Bei Verfahren 2 und 3 muß auf die Leiterbahnebene zunächst ganzflächig eine erste Galvanikstartschicht aufgebracht werden. Erst hierauf kann der Formstoff aufpolymerisiert werden. Auf diese Formstoffschicht wird die zweite Galvanikstartschicht aufgesputtert, die anschließend mit optischer Lithographie und naßchemischem Ätzen strukturiert wird. Hierfür muß die Formstoffschicht eine Ebenheit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  aufweisen, die nur durch eine zusätzliche Oberflächenbearbeitung zu erreichen ist, weil sonst eine gute Justierung der zweiten Galvanikstartschicht bezüglich der Strukturen direkt auf dem Substrat nicht möglich ist [Schu94].

##### Geometrische Anforderungen

Ein anderer Aspekt für die Auswahl eines Verfahrens sind die geometrischen Anforderungen, die an die Mikrostrukturen gestellt werden. Entscheidend ist die freie Höhe, welche die bewegliche Mikrostruktur über der Substratoberfläche haben muß. Das erste Verfahren liefert hier nur die Variation zwischen 2 und 5  $\mu\text{m}$ . Die freie Höhe wird von der Dicke der gesputterten Opferschicht bestimmt. Höhen unter 2  $\mu\text{m}$  liefern keine einwandfreie Beweglichkeit der Strukturen und Höhen über 5  $\mu\text{m}$  sind aus Zeit- und Prozeßgründen nicht

sinnvoll. Mit den beiden anderen Verfahren sind freie Höhen zwischen 30 und 100  $\mu\text{m}$  gut realisierbar. Solche Höhen sind dann erforderlich, wenn die beweglichen Teile die darunterliegenden Integrierten Schaltkreisen nachteilig beeinflussen können [Bant93].

### Positionierte Abformung

Für jedes der drei vorgestellten Verfahren muß ein spezieller Verfahrensschritt entwickelt werden: Die positionierte Abformung. Dabei stellt Verfahren 1 besonders hohe Anforderungen an die zu erreichende Genauigkeit, weil die abgeformten Strukturen mit einer Positionsgenauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  zur Struktur der Opferschicht und Leiterbahn passen müssen, da aus Stabilitätsgründen die feststehenden Teile bestimmter am IMT entwickelten Mikrostrukturen, z. B. Beschleunigungssensoren, nicht mehr als 10  $\mu\text{m}$  auf der Opferschicht stehen dürfen (vgl. Abbildung 2.2). Die Verfahren 2 und 3 stellen geringere Anforderungen, denn hier müssen die abgeformten Strukturen nur mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 20 \mu\text{m}$  zu den Leiterbahnen justiert sein, damit die Strukturen elektrisch kontaktiert werden. Es besteht dagegen keine Gefahr, daß die Strukturen wegen mangelnder Haftung vom Substrat gelöst werden. Die Justierung der beiden strukturierten Ebenen zueinander findet bei Verfahren 2 durch die Justierung der RIE-Maske statt, die unkritisch ist, da bei diesem Verfahren unwesentliche Kräfte und Temperaturschwankungen auftreten. Bei Verfahren 3 wird die Justierung der beiden Ebenen bereits bei der Abformwerkzeugherstellung durchgeführt.

### Restschichtdicke

Für alle drei Verfahren ist die Analyse des Abformvorgangs bezüglich der Einstellung einer definierten Restschichtdicke notwendig. Speziell für Verfahren 1 und 3 müssen die Abformparameter zur Einstellung definierter Restschichten bekannt sein. Zusätzlich muß eine sehr gute Ebenheit dieser Schicht erreicht werden. Die Einstellung einer kleinen Restschichtdicke von  $30 \div 40 \mu\text{m}$  auf  $\pm 5 \mu\text{m}$  ist notwendig. Die wesentlichen Parameter, die diese Größe beeinflussen, sind bekannt [Rupr93, Fing94]. Die genaue Analyse der einzelnen Prozeßparameter auf die Restschichtdicke wird in Abschnitt 3.1. gezeigt.

### Reaktives Ionenätzen

Die vorgestellten Verfahren verwenden alle das Reaktive Ionenätzen zum Entfernen der Kunststoffrestschicht am Fuß der abgeformten Mikrostrukturen. Die prinzipielle Eignung dieses Prozesses wurde bereits gezeigt [Rupr93], aber die dabei erzielten Ätzgeschwindigkeiten waren sehr gering und die Anisotropie nicht reproduzierbar. Außerdem wurden die Ätzverhältnisse an Teststrukturen ermittelt, deren laterale Abmaße nicht denen

von typischen beweglichen Mikrostrukturen, z. B. Beschleunigungssensoren [Stro95], entsprechen. Daher muß auch dieser Verfahrensschritt bezüglich höherer Ätzgeschwindigkeit und zuverlässiger Anisotropie an geeigneten Mikrostrukturen, wie schmalen ( $3 \div 7 \mu\text{m}$ ) und gleichzeitig hohen ( $100 \mu\text{m}$ ) Mikrostrukturen, untersucht und weiterentwickelt werden. Speziell bei Verfahren 2 wird eine RIE-Maske benötigt. Die Bereitstellung einer solchen Maske ist zwar möglich, doch konnte bisher die notwendige Langzeitstabilität während des Ätzens nicht gezeigt werden. Aus diesem Grund scheidet Verfahren 2 aus der Diskussion aus.

#### Abformung mit hohem Aspektverhältnis

Eine weitere Anforderung an den Abformvorgang liegt in der Abformung typischer Mikrostrukturen, die nach weiteren Prozeßschritten vom Substrat gelöst werden. Kritisch ist hier das Aspektverhältnis, d.h. das Verhältnis von Höhe zu Breite der Kunststoffstrukturen. Für den Beschleunigungssensor muß dies ein Verhältnis von mindestens 30 : 1 sein. Bei den beiden ersten Verfahren wird zur Strukturierung des Kunststoffs ein einstufiges Werkzeug genutzt. Die Herstellung dieser Werkzeuge wird am IMT als Standardprozeß durchgeführt. Die Möglichkeit der Herstellung zweistufiger Werkzeuge wurde in [Kalb94] nachgewiesen. Ein Schwerpunkt der Entwicklung war dabei ein abformbarer Resist. Das in [Kalb94] vorgestellte Resistsystem gewährleistet aber nicht die Entformbarkeit von typischen Mikrostrukturen, die zur Herstellung beweglicher Komponenten notwendig sind. Untersuchungen zeigten [Mich93], daß die Entformkräfte und damit die fehlerfreie Entformbarkeit der Mikrostrukturen maßgeblich vom Trennmittelgehalt<sup>1</sup> abhängen. Zur fehlerfreien Entformung von Mikrostrukturen mit sehr hohem Aspektverhältnis ist ein Anteil von 3 Gew.% dieses Trennmittels erforderlich. Das vorgestellte Resistsystem arbeitet aber wegen der sonst mangelhaften Beständigkeit im Röntgentiefenlithographieentwickler [Kalb94] mit einem maximalen Trennmittelgehalt von 2 Gew.%, der die Entformbarkeit der hier benötigten Strukturen nicht gewährleistet. Die Entwicklung eines abformbaren Resistsystems ist damit an prozeßtechnischen Grenzen angelangt [Kalb94]. Somit dürfte die Herstellung eines gestuften Abformwerkzeugs, das die Abformung der typischen Strukturen ermöglicht, mit großem Aufwand verbunden sein. Daher wurde Verfahren 3 in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

---

<sup>1</sup> PAT 665, Fa. Würtz, Bingen Sponsheim

## Zusammenfassung

Die diskutierten Vor- und Nachteile der Verfahren werden in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

Prozeßschritt	Verfahren 1	Verfahren 2	Verfahren 3
Anzahl der Metallisierungsschichten	2	3	3
Abformwerkzeug	1-stufig	1-stufig	<b>2-stufig</b>
Positioniergenauigkeit	10 µm	20 µm	20 µm
Restschichtdicke	35±5 µm	unkritisch	35±5 µm
Reaktives Ionenätzen	Anisotropie >12	Anisotropie unkritisch, <b>Maske notwendig</b>	Anisotropie >12
Bewertung	+	-	-

**Tab.2.2:** Entscheidung für die Prozeßauswahl. Die wichtigsten Kriterien sind **fett** gedruckt.

Nach der Analyse der prozeßtechnischen Möglichkeiten und der aussichtsreichen Entwicklungsoptionen fällt die Wahl auf das Verfahren 1. Die beweglichen Mikrostrukturen werden also in der vorliegenden Arbeit durch positionierte Abformung mit einem einstufigen Werkzeug auf einer Opferschicht, RIE und Galvanoformung hergestellt. Dazu müssen folgende Entwicklungsarbeiten geleistet werden:

- Positionierte Abformung, mit der eine Genauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  erreicht wird.
- Abformparameter, mit denen eine auf  $\pm 5 \mu\text{m}$  gleichmäßige Schichtdicke von  $30 \div 40 \mu\text{m}$  eingestellt werden kann.
- RIE-Prozeß, mit dem ein Anisotropieverhältnis von  $\geq 12:1$  und eine Abtragsrate von  $400 \text{ nm/min}$  erreicht wird.

### 3. Qualifizierung eines Prozesses zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen

#### 3.1. Untersuchungen zur Restschichtdicke

Beim Warmumformen von LIGA-Mikrostrukturen auf einem Substrat dringt das Abformwerkzeug in den Formstoff ein, der in den viskoelastischen Bereich überführt wurde. Dabei werden zunächst die Mikrostrukturen des Abformwerkzeugs befüllt, anschließend verdrängt das Abformwerkzeug den zwischen Werkzeug und Substrat verbleibenden Formstoff. Dieser Verdrängungsvorgang kommt in Abhängigkeit von der Viskosität des Formstoffs und der Kraft, mit der das Werkzeug in den Formstoff gepreßt wird, zum Stillstand und es verbleibt, wie bereits in Abschnitt 2.2.2.1. erwähnt, eine Polymerschicht zwischen den beiden Partnern, die im folgenden Restschicht genannt wird. Prinzipiell ist bei dem in Abschnitt 2.2. entwickelten Prozeß eine minimale Restschichtdicke anzustreben, denn das Reaktive Ionenätzen wird dadurch verkürzt, wodurch die Kosten zur Herstellung sinken. Andererseits wurde in [Fing94] festgestellt, daß bei Restschichtdicken unter 30 µm Haftungsprobleme zwischen Polymer und Substrat auftreten und damit die fehlerfreie Herstellung der Mikrostrukturen nicht mehr möglich ist. Daher wird die einzustellende Restschichtdicke auf minimal 30 µm festgelegt. Da es prozeßtechnisch nicht möglich ist, Werkzeuge und Substrate mit einer besseren Ebenheit als  $\pm 5 \mu\text{m}$  bereitzustellen, kann die Restschicht auch nicht ebener hergestellt werden. Da die minimale Dicke von 30 µm keinesfalls unterschritten werden sollte, wird die anzustrebende Schichtdicke auf  $35 \pm 5 \mu\text{m}$  festgelegt.

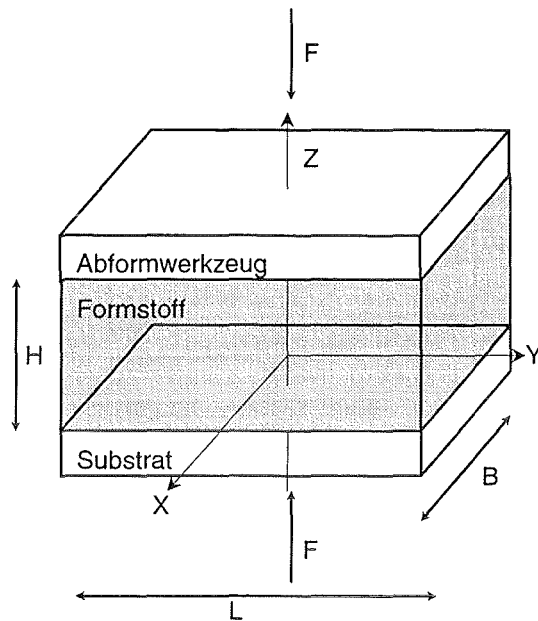
#### **3.1.1. Grundlagen**

##### 3.1.1.1. Geometrische Daten und Konventionen

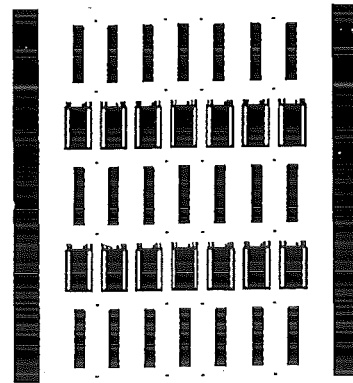
Der Abformvorgang wird in Abschnitt 3.1.2 als Verdrängen eines Fluids zwischen zwei Platten behandelt. Die dabei verwendeten Maße und Koordinaten sind in Abbildung 3.1 erklärt. Die Maße der Stirnfläche des Abformwerkzeugs betragen  $26 * 66 \text{ mm}^2$ , wobei das Strukturfenster von  $20 * 60 \text{ mm}^2$  von einem 3 mm breiten Rahmen umgeben wird. In diesem Strukturfenster sind die einzelnen Mikrostrukturen angeordnet, deren Höhe im Rahmen dieser Untersuchungen von 100 bis 200 µm variiert wurde. Dabei wurden alle Abformwerkzeuge mit einem einheitlichen Design hergestellt, d.h. die Art der Strukturen und ihre Anordnung wurde



nicht geändert. Ein Ausschnitt des Designs ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Zusätzlich wurden vergleichende Versuche mit einem unstrukturierten Abformwerkzeug, entsprechend  $0 \mu\text{m}$  Strukturhöhe, durchgeführt.



**Abb.3.1:** Geometrie konvention für den Abformvorgang.



**Abb.3.2:** Stirnfläche des Abformwerkzeugs. Die schwarzen Flächen sind erhaben.

### 3.1.1.2. Voraussetzungen zur Berechnung des Verdrängungsvorgangs

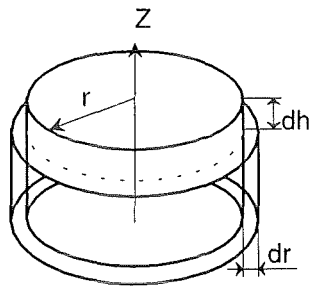
Die notwendigen Voraussetzungen für eine theoretische Berechnung sind in [Kast95] ausführlich dargestellt und werden hier in kurzer Form wiederholt.

- Die Polymerschmelze wird als inkompressibles Medium angenommen.
- Es liegt im gesamten Bereich eine laminare Strömung vor.
- Die Viskosität der Polymerschmelze und damit die Restschichtdicke ist wesentlich von der Temperatur abhängig. Im folgenden wird deshalb nur noch der Einfluß der Temperatur bei konstantem Druck auf die Restschichtdicke erwähnt.
- Der Umgebungsdruck  $p_{\infty}$  ist verglichen mit dem Druck im Formstoff  $p_F > 10 \text{ bar}$  so klein, daß  $p_{\infty}$  in erster Näherung zu 0 gesetzt werden kann..

### **3.1.2. Berechnung der Restschichtdicke**

Das Problem des Fluidausflusses zwischen zwei Platten, die sich aufeinander zubewegen, wurde für den rotationssymmetrischen Fall in [Müll62] ausführlich behandelt. Zusätzlich wird eine Lösung für elliptische Platten vorgestellt. Die Lösung für die elliptischen Platten kommt

der Realität mit rechteckigen Platten bereits sehr nahe und berücksichtigt den Ausfluß über alle Grenzflächen. Die von [Müll62] vorgestellte Differentialgleichung geht von rotationssymmetrischen Platten mit dem Radius R aus. Die Bewegungsrichtung der Platten ist die z-Richtung. Wird in z-Richtung nun eine Kraft aufgegeben, so wird ein Druck im Formstoff erzeugt, der den Formstoff radial nach außen abströmen läßt. Der Vorgang wird im folgenden für den Grenzübergang zur infinitesimalen Betrachtung mit  $\lim dH \rightarrow 0$  betrachtet. Der Plattenabstand sinkt von H auf H-dH. Ein beliebiges, um die z-Achse rotationssymmetrisches Volumen verkleinert sich daher um den Betrag  $\pi \cdot r^2 \cdot dz$ .



**Abb.3.3:** Rotationssymmetrisches Modell zum Verdrängungsvorgang.

Dieses Volumen wird durch das Druckgefälle  $dp$  nach außen gedrückt, wobei  $dp$  der Druckänderung über die Radienänderung  $dr$  entspricht. Das treibende Druckgefälle  $dp$  läßt das Fluid von dem Ring  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dz$  bis zu dem Ring  $2 \cdot \pi \cdot (r + dr) \cdot dz$  strömen. Die treibende Kraft ergibt sich damit zu  $F_t = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dz$ . Unter Verwendung der Reibungsterme aus den Navier-Stokes-Gleichungen, die in einer laminaren inkompressiblen Strömung die einzigen in diesem Zusammenhang maßgeblichen sind, ergibt sich der Plattenabstand H in Abhängigkeit von der Zeit. Dieser Ansatz wird nun erweitert auf ellipsenförmige Platten. Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Plattenabstand H und der Zeit t:

$$H = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{F \cdot t \cdot (a^2 + b^2)}{\eta \cdot \pi \cdot a^3 \cdot b^3} + \frac{1}{H_0^2}}} \quad (3.1)$$

mit a, b Halbachsen der Ellipse  
 $H_0$  Anfangsschichtdicke  
 $\eta$  Formstoffviskosität

Um mit diesem Modell zu einem nachvollziehbaren Ergebnis zu kommen, werden die Halbachsen  $a$  und  $b$  so an die Maße  $L$  und  $B$  angeglichen, daß die Grundfläche der Ellipse identisch wird mit der des Abformwerkzeugs und das Verhältnis  $a/b$  gleich dem von  $L/B$  wird.

### 3.1.3. Experimentelle Bestimmung der Restschichtdicke

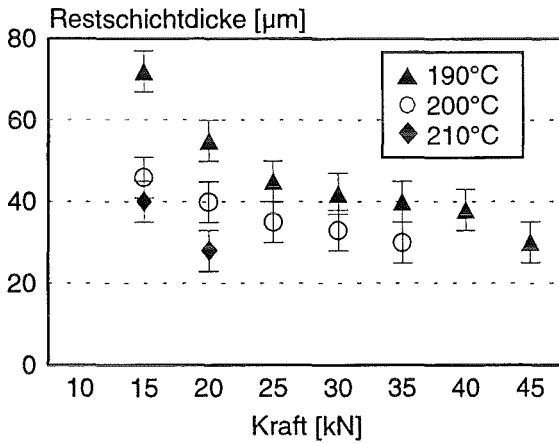
Zur Überprüfung der in Abschnitt 3.1.2. durchgeführten Berechnungen wurden mit Abformwerkzeugen mit Strukturhöhen von 100 - 200  $\mu\text{m}$  mit identischem Strukturdesign und mit einem unstrukturierten Werkzeug Abformversuche auf ebenen Stahlsubstraten durchgeführt. Dabei wurden die beiden die Restschichtdicke beeinflussenden Parameter, die Umformkraft und die Umformtemperatur verändert. Die Zeit, während der die Umformkraft anliegt, beeinflusst nach Gleichung 3.1 ebenfalls die Restschichtdicke. Allerdings wird die Geschwindigkeit, mit der die Platten sich aufeinander zu bewegen, für große Zeiten sehr klein. Wenn der Abformvorgang in diesem Bereich immer an einem bestimmten Punkt abgebrochen wird, so kann der Einfluß der Zeit auf das Ergebnis in erster Näherung vernachlässigt werden. Daher wird der Abformvorgang abgebrochen, wenn die Geschwindigkeit des Plattenvorschubs auf 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  abgesunken ist. Der Zeitpunkt an dem diese Geschwindigkeit vorliegt, kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  Minuten abgeschätzt werden. Damit ist der Einfluß der Zeit auf die Restschichtdicke auf  $\pm 3 \mu\text{m}$  bekannt. Dieser Wert ist im Bereich der Unebenheit der Restschichtdicke und kann akzeptiert werden. Da im Rahmen dieser Arbeit ein Kennfeld für die bei der Abformung entstehende Restschichtdicke in Abhängigkeit von Umformkraft und -temperatur der Beschleunigungssensorstrukturen in verschiedenen Strukturhöhen benötigt wurde, wurde bei der Versuchsdurchführung hierauf das Gewicht gelegt. Die Versuche mit unstrukturiertem Werkzeug (Strukturhöhe 0) wurden nur für 2 verschiedene Temperaturen auf einem Kraftniveau durchgeführt, um die Berechnung in Abschnitt 3.1.2. zu verifizieren.

Diese beiden Versuche sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

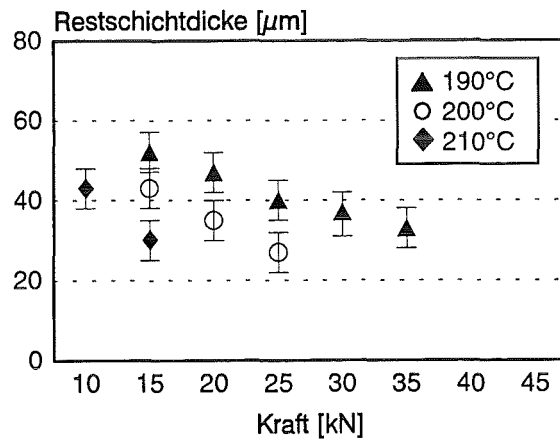
Versuch Nr.	Umformkraft $F$	Umformtemperatur $T$	Restschichtdicke $R_0$
1	15 kN	190 °C	115 $\mu\text{m}$
2	15 kN	200 °C	71 $\mu\text{m}$

**Tab.3.1:** Versuchsfeld mit unstrukturiertem Abformwerkzeug.

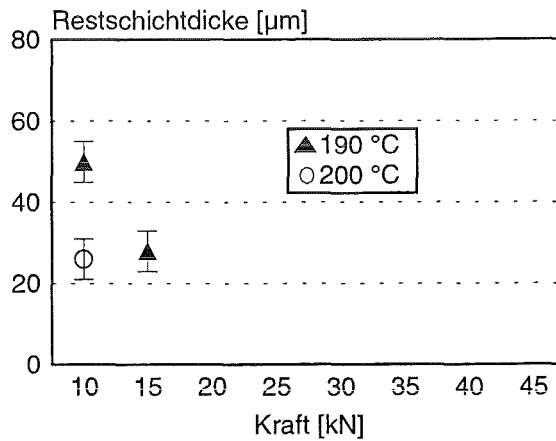
Die Versuchsergebnisse mit Abformwerkzeugen mit einer Strukturhöhe von 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  sind in den Abbildungen 3.4 bis 3.6 dargestellt.



**Abb.3.4:** Restschichtdicke für die Strukturhöhe 100 µm in Abhängigkeit von Temperatur und Kraft.



**Abb.3.5:** Restschichtdicke für die Strukturhöhe 150 µm in Abhängigkeit von Temperatur und Kraft.

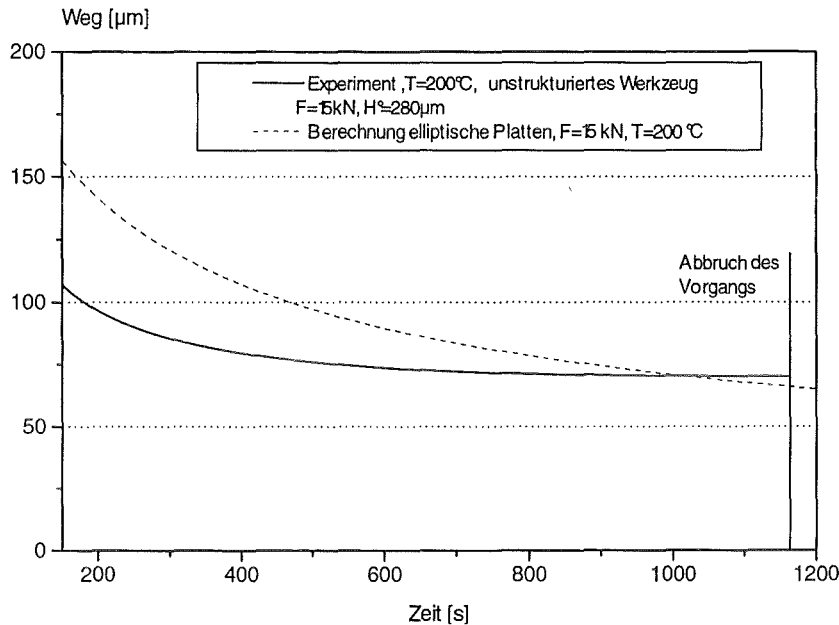


**Abb.3.6:** Restschichtdicke für die Strukturhöhe 200 µm in Abhängigkeit von Temperatur und Kraft.

Diese Meßwerte bilden einen Versuchsraum, aus dem für das in Abbildung 3.2 vorgestellte Design für die Strukturhöhen von 100 ÷ 200 µm die Abformparameter für die Abformung mit Restschichtdicken von 70 ÷ 30 µm abgelesen werden können. Alle Messungen wurden an 6 unterschiedlichen Stellen am Substrat aufgenommen, wobei die Meßwerte maximal um  $\pm 5$  µm schwanken. Damit stehen die Abformparameter zur Verfügung, um die Komplementärstrukturen der Beschleunigungssensoren mit einer Restschichtdicke von  $35 \pm 5$  µm in Strukturhöhen von 100 ÷ 200 µm abzuformen.

### 3.1.4. Diskussion der Ergebnisse

In Abbildung 3.7 ist das berechnete Verhalten der Restschichtdicke und das experimentell bestimmte für den Parametersatz 190 °C und 15 kN aufgetragen.

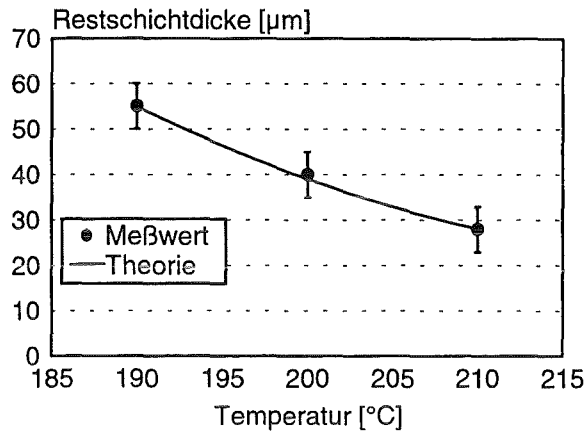


**Abb.3.7:** Berechnetes und experimentell bestimmtes Verhalten der Restschichtdicke. Die Meßpunkte des Experiments liegen so dicht, daß sich eine durchgehende Linie ergibt.

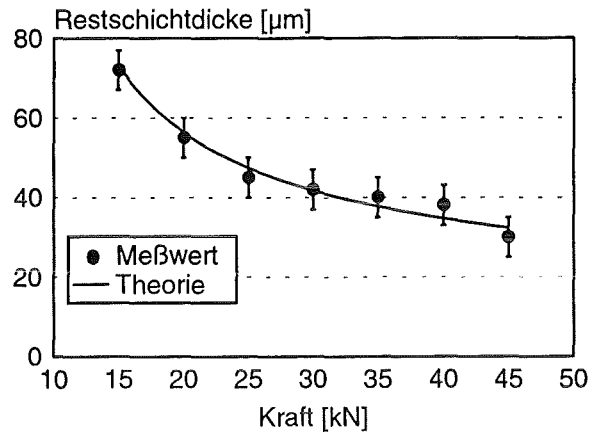
Aus der Gleichung 3.1 geht hervor, daß für den Grenzübergang  $t \rightarrow \infty$  die Restschichtdicke  $H \rightarrow 0$  strebt. Daher wurde ein Kriterium gesucht, bei dem der Abformvorgang als beendet definiert wird (vgl. Abschnitt 3.1.3.). Dieser Punkt ist erreicht, wenn die Änderung der Höhe nach der Zeit  $dH/dt < 1 \mu\text{m}/\text{min}$  wird. Unter dieser Annahme stellt die berechnete Kurve das Ende des realen Abformvorgangs mit ausreichender Genauigkeit dar. Damit zeigt das elliptische Modell eine gute Übereinstimmung mit der rechteckigen realen Geometrie.

Aus den Versuchsräumen für die drei strukturierten Abformwerkzeuge zeigt sich generell die theoretische Abhängigkeit der Restschichtdicke von der Temperatur über die Viskosität mit  $H \sim \sqrt{\eta}$ , wobei generell gilt, daß die Viskosität halbiert wird für eine Temperaturerhöhung von 10 °C [Kast95]. Dieser Zusammenhang kann für die Meßwerte 100 µm Strukturhöhe und 15 kN Umformkraft sehr gut nachvollzogen werden (vgl. Abbildung 3.8). Zusätzlich ergibt sich für die Schichtdicke die Abhängigkeit von der Umformkraft in der Form:  $H \sim \sqrt{1/F}$ . Auch dieser Zusammenhang kann im Experiment gut bestätigt werden und ist exemplarisch für den

Parametersatz 100  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe und 190  $^{\circ}\text{C}$  Umformtemperatur in Abbildung 3.9 dargestellt.

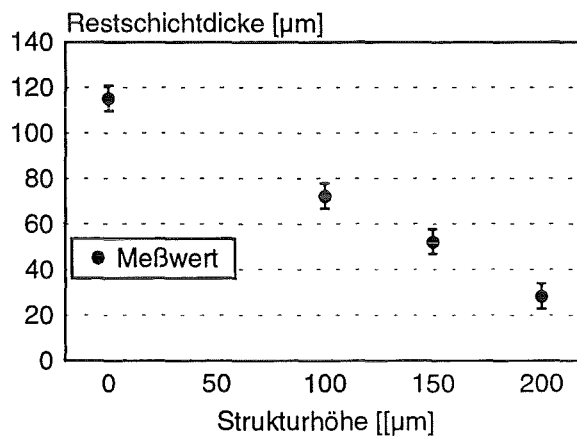


**Abb.3.8:** Restschicht in Abhängigkeit von der Temperatur. Vergleich Theorie zu Experiment für 100  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe und 15 kN Umformkraft.



**Abb.3.9:** Restschicht in Abhängigkeit von der Umformkraft. Vergleich Theorie zu Experiment für 100  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe und 190  $^{\circ}\text{C}$  Umformtemperatur.

Schließlich läßt sich noch ein weiteres Phänomen beobachten. Die Restschichtdicke zeigt für identische Abformparameter eine Abhängigkeit von der Strukturhöhe.



**Abb.3.10:** Abhängigkeit der Restschichtdicke von der Strukturhöhe bei einer Umformtemperatur von 190  $^{\circ}\text{C}$  und einer Umformkraft von 15 kN.

Die Abnahme der Restschichtdicke bei steigender Strukturhöhe läßt sich mit der Strukturierung der Abformwerkzeugoberfläche erklären. In Abbildung 3.2 ist die Strukturverteilung auf den Formeinsätzen erkennbar. Alle schwarzen Flächen stellen Erhebungen in der einheitlichen Strukturhöhe  $h$  dar. Es ist deutlich zu erkennen, daß sich zwischen den Strukturfeldern Strömungskanäle in  $x$ - und in  $y$ -Richtung ausbilden können, die tiefer sind, als die Restschichtdicke, die schließlich erreicht wird. Damit ist dort der

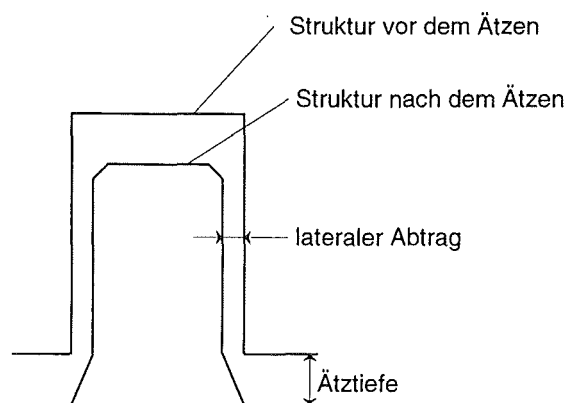
Strömungswiderstand geringer und die Polymerschmelze kann dort besser fließen. Dieser Effekt wird verstärkt, je tiefer die Strukturen im Werkzeug sind, was in den Meßwerten deutlich zum Ausdruck kommt.

Alle vorgestellten Meßwerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Daten. Die auftretenden Abweichungen bewegen sich alle im Bereich weniger Mikrometer. Die gute Reproduzierbarkeit der abgeformten Strukturen stellt einen wesentlichen Fortschritt zu früheren Untersuchungen dar [Rupr93, Kalb94]. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß erstmals eine Materialprüfmaschine mit automatischer Kräfteinstellung und -regelung und automatischer Temperaturführung verwendet wurde [Müll94].

### 3.2. Maßbeeinflussung durch den Trockenätzprozeß

#### 3.2.1. Grundlagen und Anforderungen an den Prozeß

Die im Strukturgrund auf der Galvanikstartschicht verbliebene Polymerrestschicht muß entfernt werden, um die Galvanoformung zu ermöglichen. Hierfür wird das Reaktive Ionenätzen (RIE)<sup>1</sup> verwendet. Eine typische Eigenschaft der LIGA-Mikrostrukturen sind die senkrecht zum Substrat stehenden Wände. Diese Eigenschaft sollte möglichst wenig verändert werden, da sie für die Funktion der Mikrostrukturen wichtig ist. Daher muß der Ätzprozeß so anisotrop wie möglich stattfinden, d.h., der laterale Strukturverlust muß möglichst klein sein gegenüber der Ätztiefe (vgl. Abbildung 3.11). In Abschnitt 2.2. wurde festgelegt, daß ein Ätzverhältnis von Tiefe zu Seite von mindestens 12:1 erreicht werden muß.



**Abb.3.11:** Abtrag des Polymers während des Reaktiven Ionenätzens.

<sup>1</sup> Verwendete Anlage: Plasmalab80 Plus, Fa. Oxford/Great Britain

Wenn dieses Anisotropieverhältnis gut bekannt ist, können die Strukturen mit einem entsprechenden Vorhalt versehen werden, der während des RIE-Prozesses abgetragen wird, so daß nach dem Prozeß die gewünschte Strukturbreite erreicht wird. Ferner soll die Ätzgeschwindigkeit aus wirtschaftlichen Gründen so groß wie möglich sein. Die für diese Arbeit relevanten Anforderungen an den RIE-Schritt sind in der Tabelle 3.2 aufgetragen.

Zielgröße	Geforderter Wert
Anisotropie	>12
Abtragsrate	>25 µm/h

**Tab.3.2:** Zielgrößen für das Reaktive Ionenätzen.

Beim RIE-Prozeß wird in einem Rezipienten ein Niederdruckplasma erzeugt. Die dort entstehenden Teilchen sorgen für eine gerichteten Materialabtrag auf der Probe. Für Polymere ist Sauerstoff gut als Prozeßgas geeignet [BoMa84]. Dabei treten zwei grundsätzliche Abtragsmechanismen auf. Zum einen findet eine chemische Reaktion des Sauerstoffs mit dem Polymer statt, die isotrop ist. Der physikalische Abtrag wird durch Sauerstoffionen ausgelöst, die im elektrischen Feld beschleunigt werden und auf die Probe treffen. Dieser Abtrag ist anisotrop. Die den Ätzprozeß wesentlich beeinflussenden Variablen sind im folgenden aufgeführt.

#### Gasfluß

Das Arbeitsgas stellt die für die chemische Reaktion an der Substratoberfläche benötigten Teilchen zur Verfügung. Der Gasfluß bestimmt die Menge der zugeführten reaktiven Teilchen und den Abtransport von Reaktionsprodukten aus dem Rezipienten und hat damit Einfluß auf die Abtragsrate.

#### Temperatur

Die Reaktionen des Plasmas mit dem Polymer sind exotherm. Mit einer Veränderung der Temperatur wird das chemische Gleichgewicht verschoben. Nach [BoMa84] vermindert eine niedrige Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit der ätzenden Radikale und erhöht damit die Anisotropie, weil sich der Anteil dieser chemischen ungerichteten Reaktion gegenüber dem physikalischen gerichteten Anteil vermindert.

#### Gasdruck

Ein hoher Druck bedingt eine hohe Teilchendichte und damit eine hohe Wahrscheinlichkeit



der Radikalbildung durch beschleunigte Elektronen. Die größere Zahl von Radikalen bedingt eine steigende Ätzrate und eine Erhöhung des chemischen ungerichteten Abtrags.

### Leistung

Eine höhere eingespeiste elektrische Leistung erhöht in der verwendeten Anlage die Energie der Elektronen. Somit werden im Plasma mehr Radikale und Ionen erzeugt. Daher steigt wieder die Abtragsrate durch den chemischen ungerichteten Abtrag. Die größere Zahl an Ionen erhöht gleichzeitig den physikalischen gerichteten Abtrag.

### 3.2.2. Versuchsplanung und Auswertung

Aufgrund der Vielzahl der Variablen und des hohen Aufwandes für Probenherstellung und Auswertung war eine sehr gute Organisation der Experimente nötig, um mit einem Minimum an Versuchen die optimalen Parameter zu ermitteln. Hierzu wurde die statistische Versuchsplanung verwendet.

Aus Vorversuchen waren die sinnvollen Grenzen, innerhalb derer die optimalen Parameter zu finden waren, bekannt. Sie sind in Tabelle 3.3 zusammen mit den Ausgangsparametern, die für diesen Wertebereich ermittelt wurden [Wegn94], aufgeführt.

Variable	Untergrenze	Obergrenze	Ausgangswert
Druck D [Pa]	1.3	4.7	3.6
Temperatur T [K]	280	320	300
Leistung L [W]	250	320	300
Fluß F [sccm]	20	40	30

**Tab.3.3:** Grenzen und Ausgangswerte der Einstellvariablen.

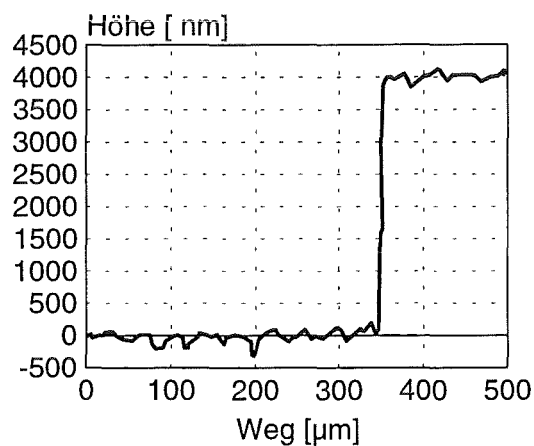
Bei der Untersuchung des Versuchsraums sollte die Möglichkeit, Extrema auch innerhalb des Versuchsraums zu finden, vorhanden sein [Wegn94]. Daher muß der Einfluß jeder Einstellvariablen auf die Zielgrößen Anisotropie A und Abtragsrate B mindestens als Polynom 2. Ordnung angenommen werden. Je höher die Ordnung des angesetzten Polynoms ist, um so mehr Versuche müssen zur eindeutigen Lösung durchgeführt werden. Um den Versuchsaufwand zu minimieren, wurde daher der Zusammenhang zwischen Einstellvariablen und Zielgrößen mit einem Polynom 2. Grades angesetzt. Man erhält folgende Gleichungen:

$$A = x_0 + x_1 \cdot D + x_2 \cdot T + x_3 \cdot L + x_4 \cdot F + x_5 \cdot D^2 + x_6 \cdot T^2 + x_7 \cdot L^2 + x_8 \cdot F^2 \quad (3.2)$$

$$B = y_0 + y_1 \cdot D + y_2 \cdot T + y_3 \cdot L + y_4 \cdot F + y_5 \cdot D^2 + y_6 \cdot T^2 + y_7 \cdot L^2 + y_8 \cdot F^2 \quad (3.3)$$

Zur eindeutigen Lösung des Gleichungssystems müssen jeweils 9 voneinander unabhängige Gleichungen gefunden werden. Dazu wurden 9 Versuche durchgeführt, bei denen die Variablen nach der Methode 'One factor by a time' [BoHu78] verändert wurden. Die Variablen wurden also von den Ausgangswerten ausgehend einzeln auf die Grenzwerte des Einstellbereichs gesetzt. Eine Versuchsdurchführung und Diskussion der Ergebnisse auf dieser Basis ist zulässig, da gezeigt wurde, daß die Variablen sich in dem Versuchsraum unabhängig voneinander optimieren lassen, d.h. es treten keine Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Variablen auf [Wegn94]. Das Versuchsprogramm mit seinen Ergebnissen ist in Tabelle 3.4 angegeben. Dabei wurden die beiden zu messenden Größen Anisotropie und Abtragsrate wie folgt bestimmt.

Die Abtragsrate wurde mit einem Tastschnittgerät<sup>1</sup> bestimmt. Um die Ausgangshöhe zu erhalten, wurde ein Referenzort mit Klebestreifen während der Prozessierung der Proben abgedeckt. Mit dem Tastschnittgerät wurde die so entstandene Stufe abgefahren und ihre Höhe gemessen. Abbildung 3.12 zeigt ein typisches abgetastetes Profil nach einem Ätzschritt.



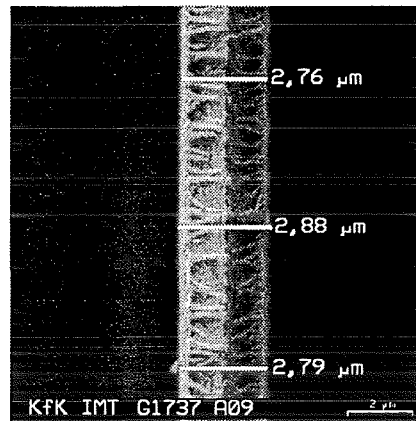
**Abb.3.12:** Abgetastetes Höhenprofil nach einem Ätzschritt.

Der Abtrag wurde an vier verschiedenen Stellen auf dem Substrat gemessen. Über die einzelnen Werte wurde arithmetisch gemittelt.

Nach der Prozessierung der Proben wurde im REM die Verminderung der Stegbreite vermessen. Es wurden jeweils 12 Messungen auf einem Substrat durchgeführt. Die gemittelte

<sup>1</sup> Dektak IIA, Fa. VEEKO Instruments GmbH/ München

Stegbreite wird dabei aus dem arithmetischen Mittel aller Meßwerte berechnet. Abbildung 3.13 zeigt ein typisches REM-Bild beim Vermessen der Stegbreite nach dem Reaktiven Ionenätzen.



**Abb.3.13:** REM-Bild beim Vermessen der Stegbreite nach dem Reaktiven Ionenätzen.

Die Anisotropie A berechnet sich nach:

$$A = \frac{2 \times \text{Abtrag}_{\text{gemittelt}}}{\text{Stegbreite}_{\text{gemittelt, vorher}} - \text{Stegbreite}_{\text{gemittelt, nachher}}} \quad (3.4)$$

Die Abtragsrate B entsteht aus:

$$B = \frac{\text{Abtrag}_{\text{gemittelt}}}{\text{Zeit}} \quad (3.5)$$

Versuch Nr.	Druck D	Temperatur T	Leistung L	Gasfluß F	Anisotropie- verhältnis A	Abtragsrate B [µm/h]
1	D <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>A</sub>	7.7±0.5	28.2±0.8
2	D <sub>U</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>A</sub>	11.8±1.2	22.9±1.4
3	D <sub>O</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>A</sub>	8.0±0.3	32.5±0.8
4	D <sub>A</sub>	T <sub>U</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>A</sub>	9.6±0.9	28.3±1.1
5	D <sub>A</sub>	T <sub>O</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>A</sub>	8.9±0.6	26.8±1.0
6	D <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>U</sub>	F <sub>A</sub>	10.0±0.4	26.2±0.5
7	D <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>O</sub>	F <sub>A</sub>	8.5±0.4	30.3±0.8
8	D <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>U</sub>	9.1±0.6	27.5±0.6
9	D <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	F <sub>O</sub>	9.1±0.3	30.2±0.9

**Tab.3.4:** Versuchsplan und -ergebnisse für den Versuchsraum; Index A für Ausgangswert, U für unteren Grenzwert und O für oberen Grenzwert des Versuchsraums.

Es wurde gezeigt, daß die Größen Temperatur und Gasfluß nur einen kleinen Einfluß auf die Anisotropie und nur mittleren Einfluß auf die Abtragsrate haben [Wegn94]. Da der wichtigere Aspekt für diese Arbeit die Anisotropie ist, wird der Einfluß der Variablen Druck und Leistung auf die Zielgrößen in den folgenden Diagrammen dargestellt. Die Kurven wurden dabei jeweils für die Ausgangszustände der drei übrigen Parameter ermittelt.

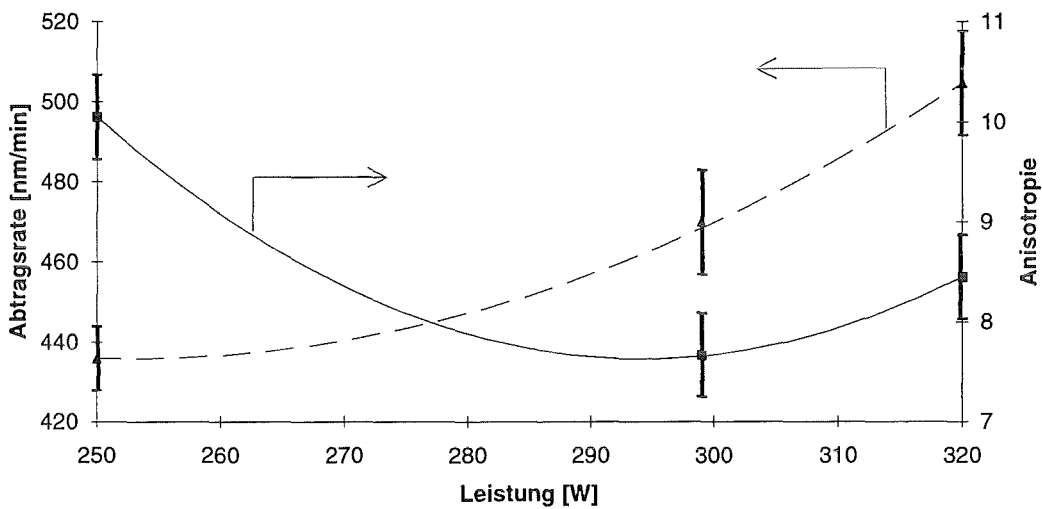


Abb.3.14: Abtragsrate — — und Anisotropie — — beim RIE in Abhängigkeit von der Leistung.

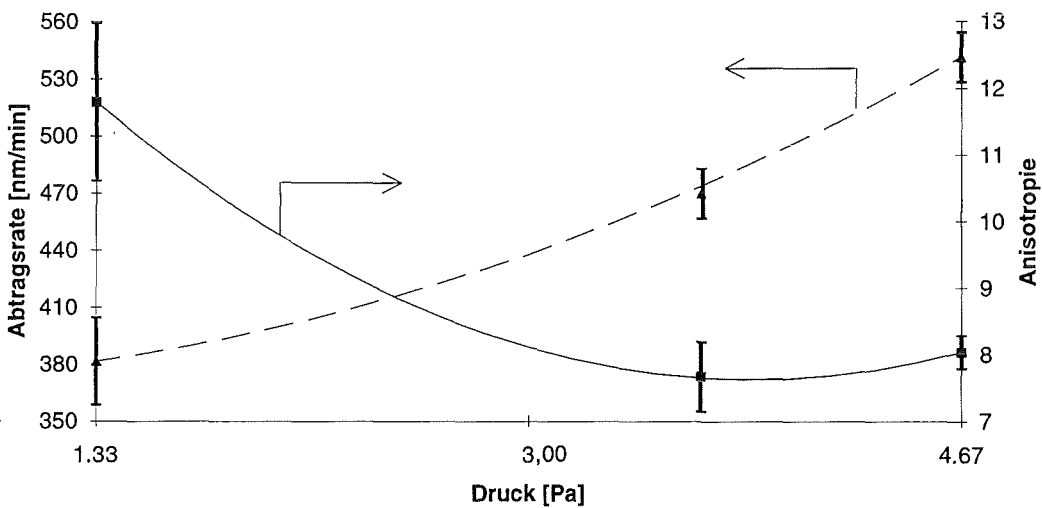


Abb.3.15: Abtragsrate — — und Anisotropie — — beim RIE in Abhängigkeit vom O<sub>2</sub>-Druck.

Die Abbildungen 3.14 und 3.15 zeigen eindeutig, daß der Druck beide Zielgrößen stark beeinflusst. Auch die Leistung nimmt erheblichen Einfluß auf die Abtragsrate und mittleren Einfluß auf die Anisotropie. Allerdings ist der Einfluß auf die Zielgrößen gegenläufig. Die

Gewichtung der Zielgrößen zueinander wird also die Bestimmung der Versuchsparameter beeinflussen.

Um mit einer weiteren Minimalzahl an Versuchen ein möglichst gutes Ergebnis zu erreichen, werden im folgenden nur noch die Variablen Druck und Leistung untersucht. Die Temperatur wird auf 280 K und der Fluß auf 40 sccm festgesetzt. Diese Werte wurden in den bisherigen Versuchen als sinnvoll ermittelt. Die Kurven 3.14 und 3.15 zeigen, daß die maximale Anisotropie jeweils am Rand des Versuchsraums erreicht wird. Daher werden noch vier weitere Versuche durchgeführt, wobei alle vier möglichen Randwertkombinationen eingestellt werden. Der Versuchsplan ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

Versuch Nr	Druck [Pa]	Leistung [W]	Anisotropie	Abtragsrate [µm/h]
1	1.3	250	12.2±0.8	20.8±0.7
2	1.3	320	15.2±1.5	25.0±0.8
3	4.6	250	10.6±0.6	29.9±0.7
4	4.6	320	10.2±0.8	35.8±0.8

**Tab.3.5:** Anisotropie und Abtragsrate an den Grenzen des Versuchsraums für Druck und Leistung bei T=280 K und F=40 sccm.

### 3.2.3. Diskussion

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß beide Zielgrößen Anisotropie und Abtragsrate am stärksten durch den Druck beeinflusst werden. Die Leistung beeinflusst im wesentlichen die Abtragsrate. Zusätzlich zeigt sich, daß sich an den Grenzen des für diese Anwendung sinnvollen Versuchsraums die besten Einstellungen finden. Für die Einstellungen aus dem vierten Versuch (siehe Tab.3.5) wird eine Abtragsrate von ca. 36 µm/h und eine Anisotropie von ca.10 erreicht. Im zweiten Versuch aus Tabelle 3.5 ergibt sich eine Anisotropie von ca. 15 bei einer Abtragsrate von ca. 25 µm/h. Die Einstellungen aus dem vierten Versuch führen zwar zu einer höheren Abtragsrate, aber eine Anisotropie von nur 10 ist für die Anforderungen nicht ausreichend. Daher befriedigen nur die Einstellungen aus Versuch 2 sowohl die Anforderungen für die Anisotropie wie für die Abtragsrate. Sie werden für die Prozessierung der Proben verwendet.

### 3.3. Laterale Maßabweichungen beim Abformprozeß

In [Kalb94] wurde gezeigt, daß beim Abformen von Mikrostrukturen auf einem Substrat laterale Maßabweichungen der Mikrostrukturen gegenüber dem Sollmaß auftreten. Für die positionierte Abformung von Mikrostrukturen auf einem vorstrukturierten Substrat müssen die Zusammenhänge dieser lateralen Maßabweichungen bekannt sein. Sie werden zum einen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Werkzeug beeinflusst. Zum anderen bewirken auch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Formstoff Maßabweichungen. Nur wenn die Ursachen bekannt sind, kann durch geeignete Vorhalte beim Design der Masken, die zur Vorstrukturierung des Substrats genutzt werden, eine hohe laterale Maßgenauigkeit zwischen den vorstrukturierten und den durch Abformung entstandenen Mikrostrukturen über das gesamte Designfeld erreicht werden.

#### 3.3.1. Überlegungen zur Entstehung der lateralen Maßabweichungen beim Abformen

##### 3.3.1.1. Einfluß des Substratmaterials

Der Einfluß der Dicke des Formstoffs, auf dem die abgeformten Mikrostrukturen stehen, soll hier vernachlässigt werden. Nach dem Einpressen des Abformwerkzeugs in den Formstoff wird der Verbund aus Substrat, Formstoff und Werkzeug abgekühlt. Unterschiedliche Längenänderungen von Substrat und Werkzeug werden, solange die Temperatur des Formstoffs über der Glasübergangstemperatur liegt, kräftefrei ausgeglichen. Unterschreitet der Formstoff diese Temperatur, ist dies nicht mehr möglich. Da zwischen Formstoff und Substrat ideale Haftung angenommen wird und die Mikrostrukturen durch Formschluß im Werkzeug eine vorgegebene Position einnehmen, treten Spannungen auf. Wenn die Mikrostrukturen aus dem Werkzeug entformt werden, werden diese Spannungen frei und die Mikrostrukturen auf dem Substrat folgen den vom Substrat vorgegebenen Längenänderungen. Dies beschreibt die folgende Gleichung:

$$\Delta l^*/l_0 = (\alpha_{\text{therm, Werkzeug}} - \alpha_{\text{therm, Substrat}}) * \Delta T \quad (3.6)$$

mit  $l_0$ : Gesamtlänge  
 $\alpha_{\text{therm}}$ : thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 $\Delta T$ : Temperaturdifferenz  $T_{\text{Glasübergang}} - T_{\text{umgebung}}$

### 3.3.1.2. Einfluß der Restschichtdicke

Für die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der am IMT verwendeten Substrate aus Silizium, Keramik, Glas und verschiedenen Stählen gilt:

$$\alpha_{\text{Substrat}} \ll \alpha_{\text{Formstoff}}$$

Aufgrund des größeren Ausdehnungskoeffizienten möchte der Formstoff sich beim Abkühlen weiter zusammenziehen als das Substratmaterial. Um das Verhalten des Verbundes beider Materialien zu bestimmen, müssen die Steifigkeiten der einzelnen Partner verglichen werden. Wie in [Jehl94] beschrieben, beträgt die Steifigkeit des Substrats ein Vielfaches der Steifigkeit des Formstoffs. Im Falle idealer Haftung des Formstoffs auf dem Substrat gibt das Substrat daher die Längenänderung des Formstoffs auf der Grenzfläche vor. Mit zunehmender Entfernung von der Grenzfläche Substrat/Formstoff nimmt der Einfluß des Substrats auf die Längenänderung des Formstoffs ab. Die Längenänderung wird mehr und mehr vom Ausdehnungsverhalten des Formstoffs bestimmt. Für die lateralen Maße der abgeformten Mikrostrukturen heißt das, daß für eine sehr dünne Restschichtdicke  $s_{R_s}$  folgendes gilt:

$$\text{für } \lim s_{R_s} \rightarrow 0 \quad \Delta l_{\text{Mikrostruktur}} \rightarrow \Delta l_{\text{Substrat}}$$

Für eine dicke Restschicht gilt dagegen:

$$\lim s_{R_s} \rightarrow \infty \quad \Delta l_{\text{Mikrostruktur}} \rightarrow \Delta l_{\text{Formstoff}}$$

### 3.3.2. Versuchsdurchführung

Um ein gutes Verständnis für die Lageabweichungen zu bekommen, wurde ein Versuchsfeld mit allen gängigen LIGA-Substratmaterialien aufgestellt. Die Werkstoffkennwerte der verwendeten Materialien sind in Tabelle 3.6 dargestellt. Alle thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  wurden im Temperaturbereich von 20 bis 120 °C gemessen<sup>1</sup>, da diese Werte nicht von allen Materialien verfügbar waren. Als Formstoff wurde das Spritzgießmaterial G77Q11<sup>2</sup> verwendet. Dieses Material genügt den Anforderungen für die Abformung von Meßmarken vollauf. Die Materialdaten sind sehr ähnlich denen des Formstoffs aus Kapitel 2.2., eine kleine Differenz in den Glasübergangstemperaturen kann durch Korrekturen kompensiert werden.

---

<sup>1</sup> gemessen mit TMA 402, Fa. Netsch/Selb

<sup>2</sup> Handelsname Fa. BASF/Ludwigshafen

	Werkstoff		$\alpha_{\text{thermisch}}$ [10 <sup>-6</sup> 1/K] Literatur	$\alpha_{\text{thermisch}}$ [10 <sup>-6</sup> 1/K] experimentell	$\Delta l/l$ für $\Delta T = 100\text{K}$ [10 <sup>-6</sup> ] $\alpha_{\text{thermisch}}$ aus Literatur
Substrate	Stahl Nr.1.4301	sandgestrahlt	16	16.22	-282
	Stahl Nr.1.2842	sandgestrahlt			80
	Glas	1 $\mu\text{m}$ Wolfram, mit H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> geätzt	9.3	8.24	516
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Keramik	1 $\mu\text{m}$ Wolfram, mit H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> geätzt	8.1	6.08	732
	Silizium- Wafer	1 $\mu\text{m}$ Wolfram, mit H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> geätzt	2.5	2.76	1064
Abformwerk- zeug	galvanisches Nickel	LIGA Mikrostruk- tur	13	13.4	0
Formstoff	PMMA	warmumge- formt	80		-6660

**Tab.3.6:** Daten der bei der Abformung verwendeten Materialien.

Die Abformversuche für diese Untersuchungen wurden an der Warmumform- und Reaktionsgießmaschine RIM3 des IMT durchgeführt [Fing94]. Um den Einfluß der Restschichtdicke auf die Maßabweichungen zu minimieren, wurden alle Versuche mit denselben Parametern durchgeführt. Um sicherzustellen, daß das Abformwerkzeug durch Kontakt mit den Substraten, die teilweise Unebenheiten aufwiesen, nicht beschädigt wird, wurde die Restschichtdicke mit den Versuchparametern aus Tabelle 3.7 auf 180  $\mu\text{m}$  eingestellt.

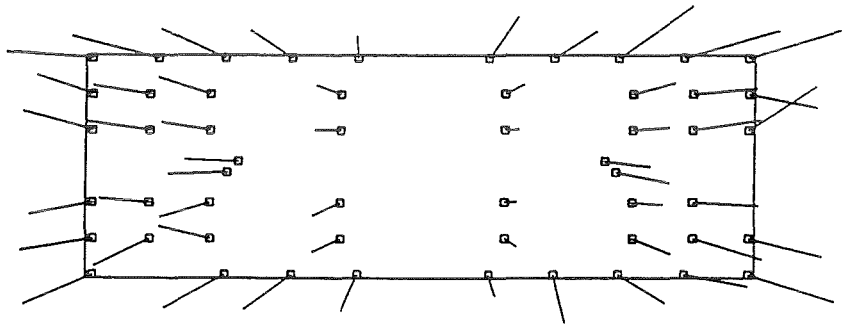
Versuchsparameter	eingestellter Wert
Umformkraft	24 kN
Umformtemperatur	170°C
Abformwerkzeugtiefe	100 $\mu\text{m}$

**Tab.3.7:** Einstellung der Versuchsparameter.



### 3.3.3. Versuchsauswertung

Die Position der Meßmarken wurde an einem Lichtmikroskop<sup>1</sup> mit einem X-Y-Meßtisch<sup>2</sup> unter klimatisierten Bedingungen durchgeführt. Die Meßgenauigkeit dieser Anordnung wurde zu  $\pm 2 \mu\text{m}$  bestimmt [Jehl94]. Die ausgemessenen Positionen der abgeformten Meßmarker wurden in einem Programm [Kalb94] mit denen des Abformwerkzeugs verglichen. Dieses Programm ermittelt den gemeinsamen Mittelpunkt aller Meßmarker eines Versuchs und legt diesen Mittelpunkt auf den Mittelpunkt der Markerpositionen des Abformwerkzeugs. Dann werden die Lageabweichungen der einzelnen Marker zueinander bestimmt. Graphisch lassen sich die Maßabweichungen in einem Diagramm als Vektoren darstellen.



**Abb.3.16:** Maßabweichungen am Beispiel Versuch 4, Substratmaterial Keramik.

Im nächsten Schritt setzt das Programm die aufgetretenen Maßabweichungen in Relation zur Entfernung des Meßpunktes zur Designmitte und berechnet daraus eine relative Maßabweichung. Dies geschieht für alle Meßpunkte und schließlich wird die relative Maßabweichung für alle Meßpunkte eines Versuchs ermittelt. Das Ergebnis der gemittelten Maßabweichungen für alle Versuche ist in Tabelle 3.8 dargestellt.

---

<sup>1</sup> Ergoplan, Fa. Leitz, Wetzlar, Germany

<sup>2</sup> Scan 2000, Fa. Leitz, Wetzlar, Deutschland

Substratmaterial		Versuch 1 [10 <sup>-6</sup> ]	Versuch 2 [10 <sup>-6</sup> ]	Versuch 3 [10 <sup>-6</sup> ]	Versuch 4 [10 <sup>-6</sup> ]	Versuch 5 [10 <sup>-6</sup> ]	Theoretischer Wert [10 <sup>-6</sup> ]
Silizium	Mittel über Substrat	602	562	571	569	Bruch der Probe	1064
	Standardabweichung	136	152	150	133		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Keramik	M	438	495	571	613	507	732
	S	152	144	171	140	126	
Glas	M	243	251	236	249	272	516
	S	117	155	161	165	139	
Stahl Nr 1.2842	M	-29	-39	-34	-65	-20	80
	S	155	180	164	168	143	
Stahl Nr 1.4301	M	-323	-320	-332	-286	-358	-282
	S	140	149	145	169	148	

Tab.3.8: Versuchsergebnisse für die relativen Maßabweichungen.

Mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 3.17 entsteht ein Gesamteindruck über die Maßabweichungen.

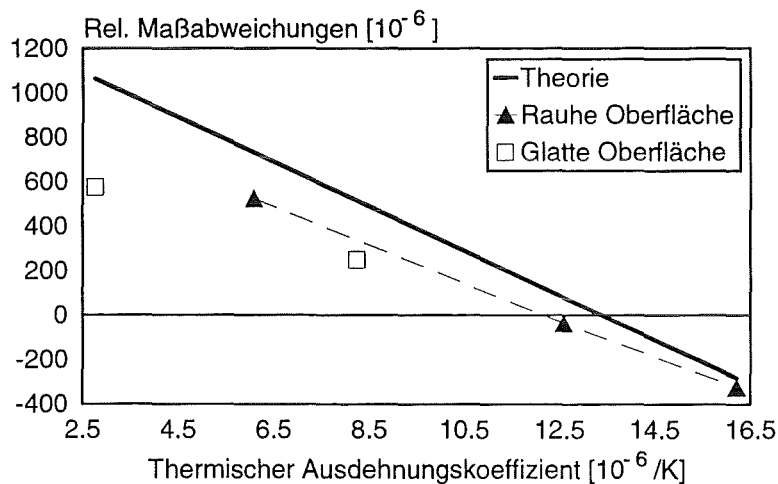


Abb.3.17: Relative Maßabweichungen in Abhängigkeit vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Für alle Materialien mit einer rauhen Oberfläche (sandgestrahlter Stahl oder poröse Keramik) liegen die Meßwerte annähernd auf einer Geraden und zeigen eine gute Abhängigkeit der Maßabweichungen von den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Diese Gerade liegt

unterhalb der theoretisch erwarteten Kurve, was auf einen Einfluß der Restschichtdicke auf die Meßwerte schließen läßt. Die Maßabweichungen für Keramik liegen bei etwa 72% der theoretischen Werte. Damit sind für diese Materialien die tatsächlichen Maßabweichungen für Restschichtdicken von 180 µm und kleiner auf  $\pm 14\%$  bekannt. Auch für die anzustrebende Restschichtdicke von 35 µm (vgl. Abschnitt 3.1.) sind die Maßabweichungen damit auf  $\pm 14\%$  bekannt. Dieser Wert ist für die vorliegende Arbeit befriedigend, da die maximalen absoluten Verzüge für Keramiken bei einer Temperaturänderung von 100 °C bei ca. 30 µm liegen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist eine Kompensation dieser Abweichungen auf  $\pm 14\%$  oder  $\pm 3$  µm möglich. Dieser Wert liegt über der Genauigkeit, die für die absolute Positioniergenauigkeit bei der Abformung angestrebt wird.

Hingegen liefern die Versuche mit glatter Substratoberfläche eine wesentlich schwächere Abhängigkeit. Dies läßt darauf schließen, daß die Formstoffhaftung auf dem Substrat stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt und daß diese für Glas und Silizium offenbar nicht vollkommen ausreicht. In diesem Fall beeinflußt der Formstoff die Verzüge mehr als im Falle guter Haftung und daher liegen die Meßergebnisse weit unter den erwarteten.

### **3.4. Kompatibilität zur CMOS-Technologie**

Durch vorangegangene Untersuchungen wurde gezeigt, daß die Herstellung von LIGA-Mikrostrukturen auf Integrierten Schaltkreisen nur schwierig möglich ist [Burb91]. Durch die harte Röntgenstrahlung während des Bestrahlungsprozesses können die Schaltungen geschädigt oder zerstört werden. Da bei der Erzeugung von Mikrostrukturen durch Abformung auf den Bestrahlungsprozeß verzichtet wird, erscheint es möglich, mit diesem Prozeß LIGA-Mikrostrukturen direkt auf Integrierten Schaltkreisen aufzubauen. Prinzipiell sind dafür alle in Kapitel 2.2. vorgestellten Verfahren geeignet. Hier wird auf die besonderen Anforderungen eingegangen, die für die Abformung auf diesen Substraten gestellt werden. Die notwendigen Untersuchungen werden mit ihren Ergebnissen vorgestellt.

#### **3.4.1. Prozeß zur Herstellung von Mikrostrukturen auf Integrierten Schaltkreisen**

Der in Kapitel 2.2. dargestellte Prozeß muß mit speziellen Materialien und Prozeßparametern auf den Integrierten Schaltkreisen ausgeführt werden, um eine Beschädigung der Schaltkreise zu vermeiden. In den folgenden Ausführungen werden die Materialien und Prozeßschritte diskutiert, die an diese Anwendung angepaßt werden müssen. Als Beispiel für Integrierte

Schaltkreise werden Wafer, die nach dem CMOS-Prozeß, einem der gängigen Halbleiterprozesse, prozessiert worden waren, verwendet.

#### 3.4.1.1. Galvanikstartschicht

Die Oberfläche eines nach CMOS-Technik prozessierten Wafers ist standardmäßig mit einer elektrisch nichtleitenden  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Schicht überzogen. Daher muß zuerst eine ganzflächige elektrisch leitfähige Galvanikstartschicht auf seine Oberfläche aufgebracht werden. Die Anforderungen an diese Schicht und ihre Herstellung sind:

- der Beschichtungsvorgang und die Schicht selbst müssen kompatibel zum CMOS-Prozeß sein.
- gute Haftung zum Abformmaterial.
- kein Abtrag im  $\text{O}_2$ -Plasma während des Reaktiven Ionenätzens.
- gute Galvanikstarteigenschaften.
- gute Haftung zum galvanisch abzuschneidenden Nickel.
- der Ätzprozeß zum Entfernen dieser Schicht muß kompatibel zur CMOS-Technik sein.
- selektiv ätzbar zum abgeschiedenen Nickel.

Die Galvanikstartschicht wird, wie die Metallschichten im CMOS-Prozeß, durch Sputtern aufgebracht. Die am IMT üblichen Galvanikstartschichten sind Titan, Wolfram und Chrom/Silber. Da Titan einerseits im sauren Milieu nur durch HF geätzt werden kann und andererseits HF sowohl die  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Passivierung der Schaltkreise, wie auch die Al-Leiterbahnen angreift, kann Titan nicht verwendet werden. Die Chrom/Silber-Schicht ist während des Reaktiven Ionenätzens im  $\text{O}_2$ -Plasma nicht beständig und kann daher auch nicht verwendet werden. Wolfram dagegen wird mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  geätzt, das weder die Passivierung noch die Al-Leiterbahnen angreift und im  $\text{O}_2$ -Plasma nicht abgetragen wird. Daher wird eine 1  $\mu\text{m}$  dicke Wolframschicht aufgesputtert, deren Oberfläche durch naßchemisches Ätzen aufgeraut wird.

#### 3.4.1.2. Opferschicht

Als Standardopferschicht wird am IMT Titan oder Kupfer verwendet. Die Verwendung von Titan ist jedoch in Verbindung mit CMOS-Schaltkreisen nicht möglich (vgl. Abschnitt 3.4.1.1.). Daher wurde Kupfer bezüglich seiner Eignung als Opferschicht untersucht. An eine

Opferschicht werden dieselben Anforderungen wie an die Galvanikstartschicht gestellt. Zusätzlich muß die Opferschicht noch selektiv ätzbar gegen die Galvanikstartschicht sein..

Die Verwendung von Kupfer als Opferschicht auf Keramik wurde in [Both95a] demonstriert. Zum Ätzen von Kupfer auf Integrierten Schaltkreisen, ohne diese zu beschädigen, wird eine kommerzielle Ätzlösung<sup>1</sup> verwendet [Schn95].

#### 3.4.1.3. Abformprozeß

Die Versuche wurden mit einem Abformwerkzeug mit Teststrukturen von 150 µm Höhe und auf der am IMT vorhandenen Abformmaschine RIM3 durchgeführt. Die Versuche wurden mit einer Kraft von 50 kN und einer Temperatur von 200 °C durchgeführt.

#### 3.4.1.4. Reaktives Ionenätzen

Die Entfernung der Polymerrestschicht wurde durch RIE im O<sub>2</sub>-Plasma noch nicht mit den in Abschnitt 3.2. vorgestellten optimierten Prozeßparametern durchgeführt. Die Restschichtdicke wurde mit den in Tabelle 3.9 angegebenen Parametern vollständig entfernt.

Prozeßparameter	Wert
Leistung	65 W
Temperatur	295 K
Druck	1 Pa
Fluß	20 sccm

**Tab.3.9:** Prozeßparameter zum Entfernen des Polymers auf CMOS.

#### 3.4.1.5. Galvanoformung

Während der Galvanik besteht die Möglichkeit, daß Ionen des Elektrolyts in die oberen Siliziumschichten der ICs, etwa in das Gateoxid der Transistoren, diffundieren und diese dadurch verändert oder zerstört werden. Besonders Natriumionen haben bereits bei Raumtemperatur erhebliche Diffusionskoeffizienten in SiO<sub>2</sub>. Am IMT wird Nickelgalvanoformung standardmäßig in einem Sulfamatelektrolyten [Hars88] durchgeführt,

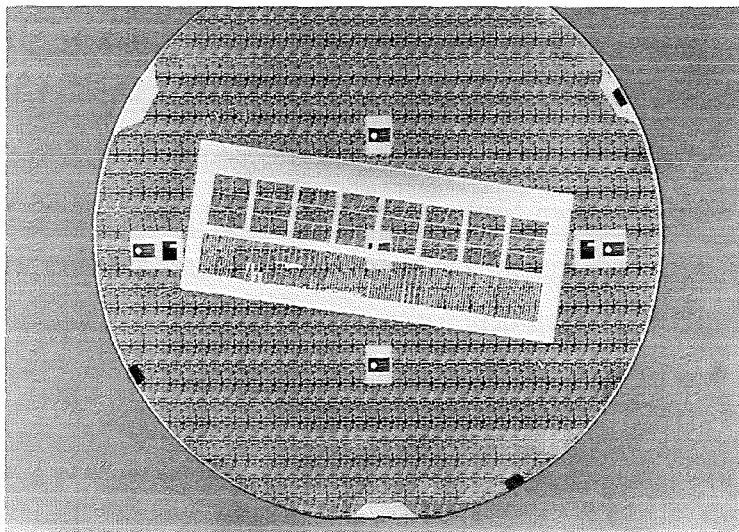
---

<sup>1</sup> Alketch, Fa. Begal, Romanshorn/Schweiz

der natriumfrei ist. In diesem Bad wurden auf den Wafern komplementär zu den Polymermikrostrukturen 100 µm hohe Nickelstrukturen abgeschieden.

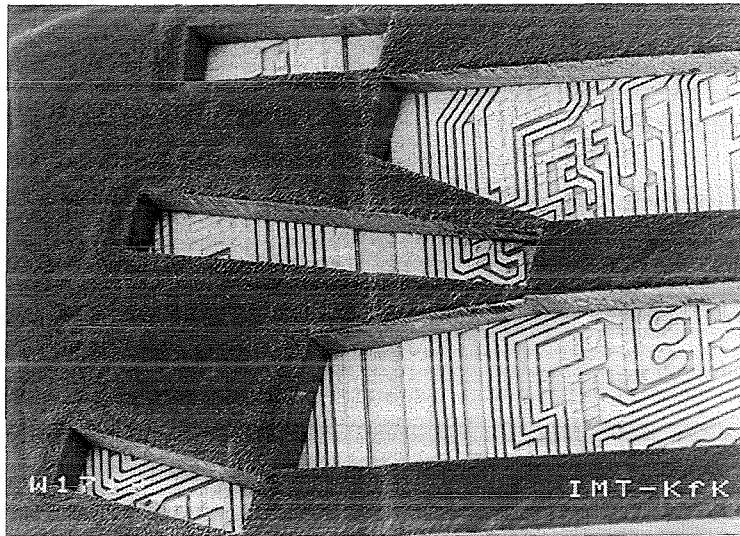
### 3.4.2. Versuchsergebnisse

Nach den in Kapitel 3.4.1. erwähnten Versuchsparametern wurden auf Wafern, die nach dem CMOS-Prozeß prozessiert worden waren, feststehende Nickelmikrostrukturen erzeugt. Bewegliche Mikrostrukturen waren nicht hergestellt worden, da keine optische Maske zur Verfügung stand, mit der eine Opferschicht auf Silizium so vorstrukturiert werden konnte, daß die beim Abformen auftretenden Maßabweichungen kompensiert worden wären (vgl. Abschnitt 3.3.). Die Abbildung 3.18 zeigt einen Wafer mit CMOS-Schaltungen, auf den Nickelmikrostrukturen aufgalvanisiert wurden. Die erzeugten Mikrostrukturen entsprechen dabei genau denen des Abformwerkzeugs. Daher sind die Mikrostrukturen in einem Feld von  $20 * 60 \text{ mm}^2$  angeordnet und von einem ca. 3 mm breiten Rahmen umgeben. Diese Anordnung entspricht genau der Stirnseite des Abformwerkzeugs.



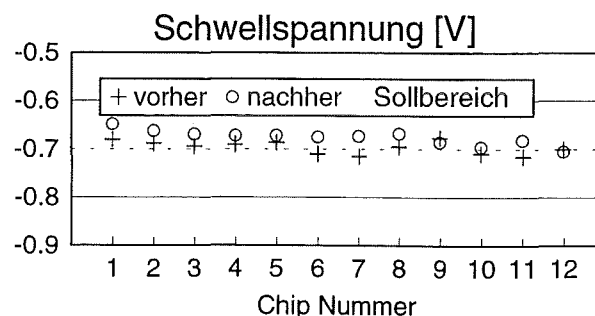
**Abb.3.18:** 4"-Siliziumwafer mit CMOS-Schaltkreisen und metallischen LIGA-Mikrostrukturen.

Bemerkenswert für dieses Bild ist, daß der Siliziumwafer keinen mechanischen Schaden davongetragen hat, obwohl beim Abformen eine Kraft von 50 kN aufgebracht wurde. Die Abbildung 3.19 zeigt eine REM-Aufnahme, auf der einige Mikrostrukturen herausvergrößert sind. Die Leiterbahnen auf dem Wafer sind deutlich zu erkennen. Die kleinste Breite der LIGA-Mikrostrukturen beträgt ca. 20 µm.



**Abb.3.19:** LIGA-Mikrostrukturen auf einem 4"-Wafer mit ICs; REM-Aufnahme; Vergrößerung 100 fach.

Um die tatsächliche Kompatibilität des Verfahrens zur CMOS-Technik nachzuweisen, wurde eine in der Halbleitertechnik übliche Testmethode angewendet: Zwischen den einzelnen Chips sind Process Control Monitors, d.h. Testfelder zur Prozeßkontrolle, angebracht. Diese PCMs werden vom Halbleiterhersteller selbst genutzt, um seine eigene Prozeßqualität zu überprüfen. Auf den Wafern wurden 12 PCMs in der Umgebung der LIGA-Mikrostrukturen vor und nach dem zusätzlichen Prozeß vermessen. In den nachfolgenden Diagrammen sind die für die Funktion der ICs entscheidenden Meßwerte dargestellt [Both95c]. Jeder Meßwert wurde auf jedem der 12 PCMs einmal aufgenommen. Dabei stellt das Plus-Zeichen den Originalwert dar, das Kästchen den Wert nach dem LIGA-Prozeß und die grau unterlegte Zone stellt den zulässigen Wertebereich für die Meßgröße dar.



**Abb.3.20:** Schwellspannung eines p-Kanal-Transistors.

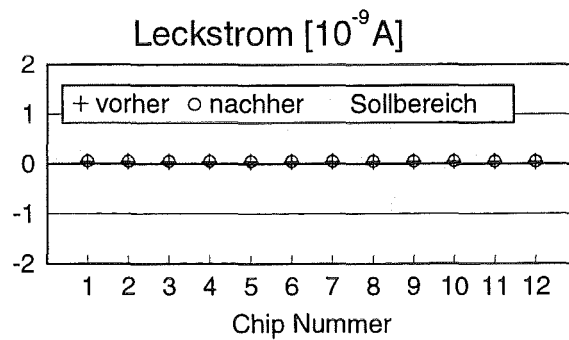


Abb.3.21: Leckstrom eines p-Kanal-Transistors.

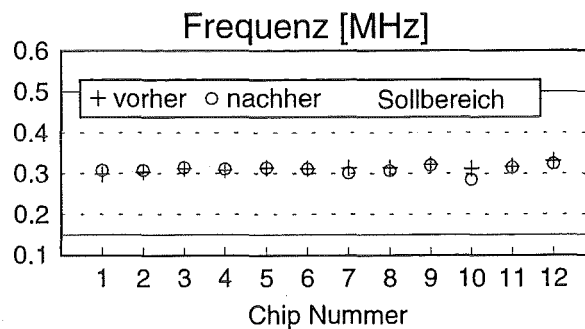


Abb.3.22: Eigenfrequenz eines Ringoszillators.

Die erste Meßgröße stellt die Schwellspannung eines Kondensators dar. Diese Meßgröße könnte durch Ionenbeschuß, wie er beim reaktiven Ionenätzen auftritt, verändert werden. Der Leckstrom durch das Gateoxid, der zweite Meßwert, könnte durch naßchemisches Ätzen oder galvanische Abscheidung verändert werden. Der letzte Meßwert stellt die Eigenfrequenz eines Ringoszillators dar. Ein Ringoszillator stellt bereits einen vollständigen IC dar. Um die Funktion dieses Schaltkreises zu testen, wird seine Eigenfrequenz bestimmt. Die Funktion des Ringoszillators ist ein Hinweis für die Funktionsfähigkeit der Schaltkreise.

### 3.4.3. Diskussion

Wie die Meßwerte in Abschnitt 3.4.2. zeigen, liegen alle nach dem LIGA-Prozeß gemessenen Größen im zulässigen Bereich und unterscheiden sich nicht oder unwesentlich von den Meßwerten, die vor dem zusätzlichen Prozeß gemessen wurden. Damit ist die Kompatibilität der Prozesse, die in Abschnitt 2.2.2.2. und 2.2.2.3. vorgestellt wurden, nachgewiesen. Weitere Untersuchungen bezüglich der Erhöhung der Leistung beim Reaktiven Ionenätzen bieten sich an, da die hier durchgeführten Tests noch keine Grenze erkennen lassen. Für den in Abschnitt 2.2.2.1. vorgestellten Prozeß wurden außer dem Aufbringen und Ätzen der Kupfer-Opferschicht alle Prozeßschritte durchgeführt. Das Sputtern und Ätzen einer Kupferschicht



auf CMOS-Schaltungen wurde aber bereits von [Schn95] gezeigt. Daher sind hier keine Kompatibilitätsprobleme zu erwarten. Die vorgestellten Verfahren zeigen also eine vollständige Eignung bezüglich ihrer Durchführung auf integrierten Schaltkreisen.

## 4. Konzeption und Realisierung einer Maschine zur positionierten Abformung

Ein Verfahren und eine Apparatur zur positionierten Abformung ist der Schlüssel zur Herstellung der beweglichen Mikrostrukturen durch Abformung. Dieser Prozeßschritt war bisher nicht verfügbar und wird im Rahmen dieser Arbeit erstmals bearbeitet. Dabei ist zuerst die prinzipielle Problematik der spielfreien Führung zueinander bewegter Maschinenteile zu lösen. Zusätzlich müssen Konzepte entwickelt werden, die eine Überdeckung zweier optisch nicht transparenter Partner ermöglicht, ohne deren äußere Konturen zu berücksichtigen. Schließlich muß dieses Konzept so realisiert werden, daß die Überdeckung der beiden Partner auch bei Temperaturwechseln von 200 °C und Kräften von mehreren 10 kN im Mikrometerbereich erhalten bleibt.

### 4.1. Anforderungen an die Maschine zur positionierten Abformung und Vorversuche

#### 4.1.1. Anforderungen und Prozeßparameter

Folgende Anforderungen an den Gesamtprozeß aus Abschnitt. 2.2 sind für die Entwicklung der Abformmaschine wichtig:

Anforderung	Wert
Positioniergenauigkeit	$\pm 10 \mu\text{m}$
Ebenheit der Restschicht	$\pm 5 \mu\text{m}$
Umformtemperatur	max. 250 °C
Umformung im Vakuum	$(p \leq 10^{-1} \text{ mbar})$
Messgenauigkeit Umformkraft	$\pm 5 \text{ N}$
Umformkraft stufenlos erzeugbar	50 kN
Umformkraft ohne Überschwingen aufbringen	
Wegmessgenauigkeit für Zustellweg	$\leq 1 \mu\text{m}$
Wegeinstellung	$\pm 1 \mu\text{m}$

**Tab.4.1:** Anforderungsliste für die positionierte Abformanlage.

Im Rahmen der Entwicklung des LIGA-Verfahrens wurden am IMT verschiedene Verfahren der Kunststoffabformung entwickelt. Die dazu benötigten Maschinen wurden im Eigenbau hergestellt, weil die Dimensionen der beim LIGA-Verfahren hergestellten Kunststoffteile im

Vergleich zu denen, die bisher in der Kunststofftechnik hergestellt werden, eine so spezielle Prozeßführung erfordern, daß die am Markt verfügbaren Maschinen nicht einsetzbar sind.

#### 4.1.2. Ausbau der bereits betriebenen Maschinen mit Führungsbolzen und -buchsen

Bei der Entwicklung der Maschine zur positionierten Abformung wurde auf bereits vorhandene Erfahrungen zurückgegriffen und als erstes die Tauglichkeit der Abformmaschine RIM 3 [Fing94], die im Institut zur Verfügung stand, zur positionierten Abformung geprüft. Als Schlüsselforderung bei der positionierten Abformung wird die Erzeugung der Mikrostrukturen auf einer vorbestimmten Position auf dem Substrat mit einer Genauigkeit von 10 µm angesehen. Daher wurde zunächst versucht, durch Umbau der Maschine RIM 3 eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen.

Beim Abformvorgang befindet sich das Abformwerkzeug im Oberteil der Maschine, während in das bewegliche Unterteil der Maschine das Substrat eingebaut wird. Um die Strukturen des Abformwerkzeugs reproduzierbar auf dem Substrat erzeugen zu können, muß das Maschinenunterteil zum Maschinenoberteil geführt sein. Im klassischen Maschinenbau wird eine solche Führung durch Verwendung von genormten Passbauteilen realisiert [Pahl87]. Dabei wird die zu verwendende Passung aus einem Funktionskatalog ausgewählt. Für diesen Fall wird eine Passung der Kategorie und Güte H7/g6 verwendet. Diese Passung wird für die Größenverhältnisse in der Abformmaschine dimensioniert. Dabei werden konstruktiv bedingt Führungen mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet. Daraus ergeben sich nach [Pahl87] folgende Maße für die Führung.

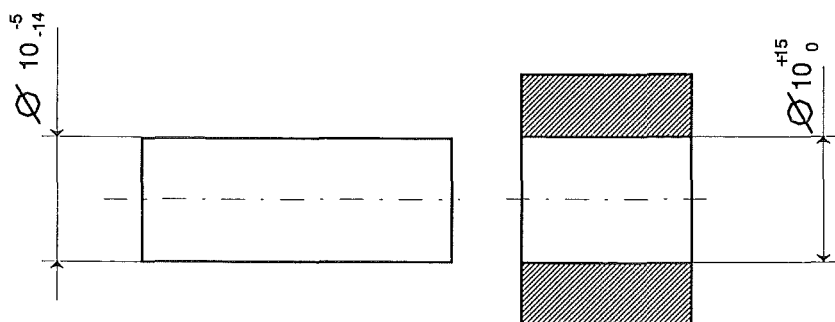


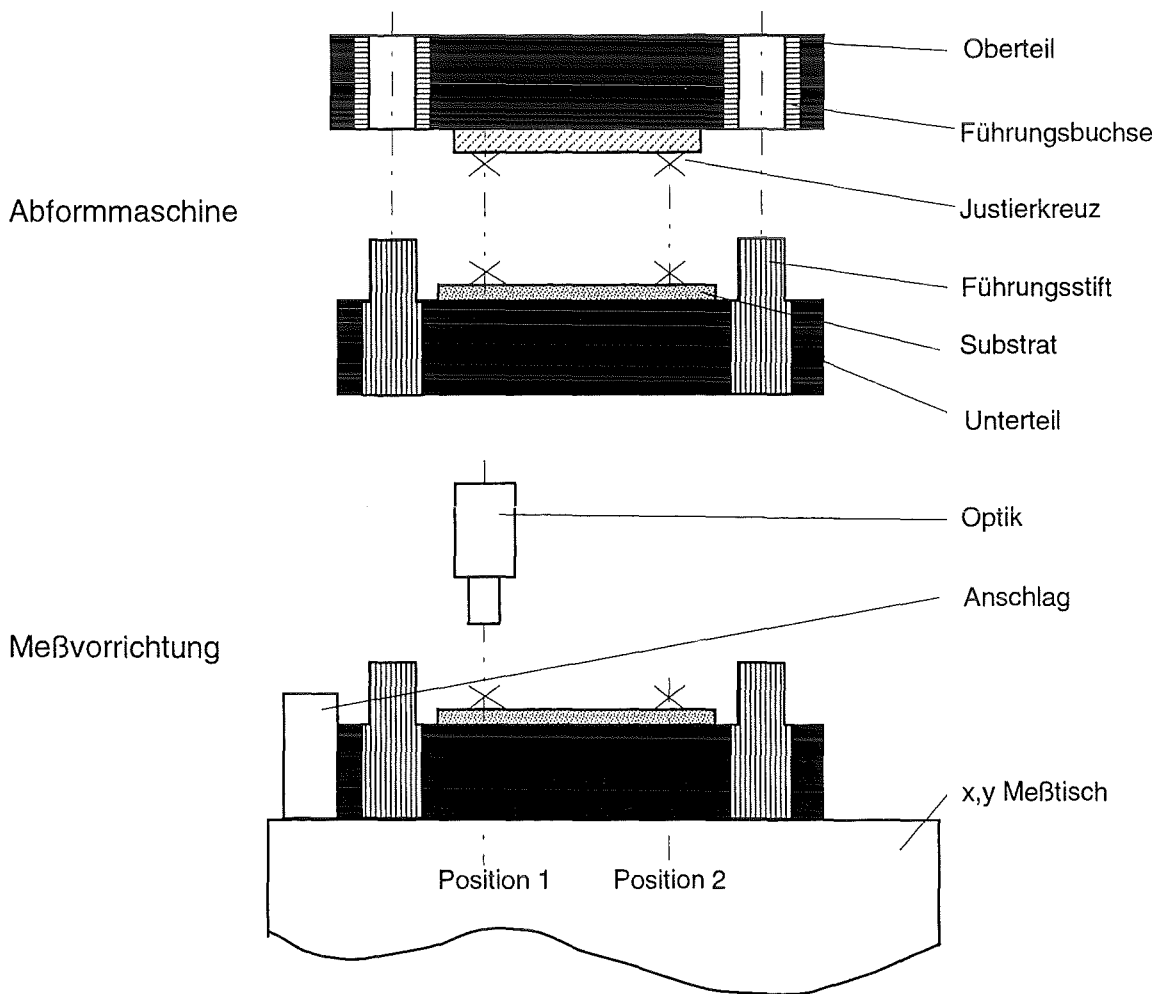
Abb.4.1: Paßmaße für den engen Laufsitz H7/g6 für  $\varnothing 10$  mm.

Aus diesen Maßen ergibt sich ein kleinstes Spiel von 9 µm und ein Maximalspiel von 29 µm. Mit dem Aufbau eines solchen Führungssystems läßt sich nun eine theoretische Paßgenauigkeit von Maschinenoberteil und -unterteil von 9 µm bis 29 µm erreichen. Also

sollte die laterale Wiederholgenauigkeit der abgeformten Mikrostrukturen bestenfalls bei  $\pm 5 \mu\text{m}$  und im schlechtesten Fall bei  $\pm 15 \mu\text{m}$  liegen.

#### 4.1.3. Experimentelle Überprüfung der Genauigkeit von Führungsbolzen und -buchse

Für die tatsächliche Überprüfung der erreichbaren Genauigkeit wurde die Abformmaschine RIM3 mit einem System aus Führungsstift und -bolzen ausgebaut. Dieser Aufbau ist im oberen Teil der Abbildung 4.2 schematisch dargestellt.

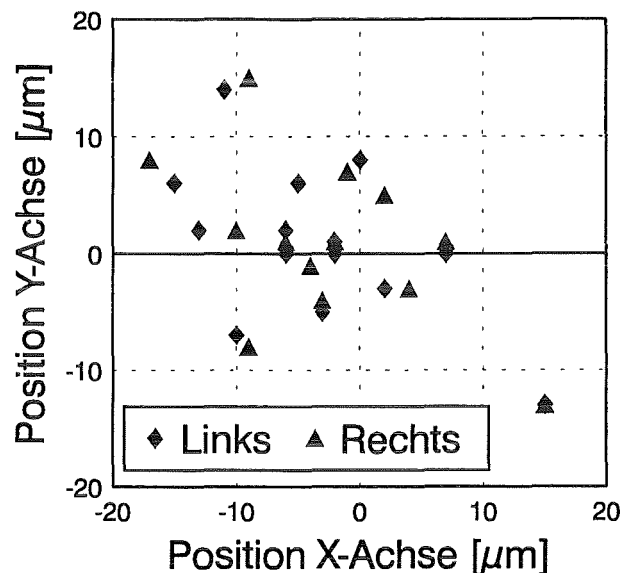


**Abb.4.2:** Aufbau der Vorrichtung zur positionierten Abformung mit Führungen H7/g6.

Für die Versuche wurde ein Abformwerkzeug mit Justierkreuzen eingebaut. Während des Abformvorgangs werden die Justierkreuze des Abformwerkzeugs im Formstoff auf dem Substrat erzeugt. Nach dem Abformvorgang wird das Unterteil (vgl. Abbildung 4.2) aus der Abformmaschine herausgenommen und definiert in eine Meßvorrichtung eingelegt. Dieser

Zustand wird im unteren Teil der Abbildung 4.2 gezeigt. Der Meßtisch wird jetzt so eingestellt, daß die abgeformten Justierkreuze genau mit dem Fadenkreuz im Okular des Mikroskops zur Deckung gebracht werden. Diese Positionen des Meßtischs werden zur Auswertung der Wiederholgenauigkeit genutzt.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.3 dargestellt.



**Abb.4.3:** Wiederholgenauigkeit der Abformmaschine RIM3 mit Führungsstiften und -bolzen. Die erste Messung wurde jeweils als relativer Nullpunkt angenommen. Die Meßgenauigkeit beträgt  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

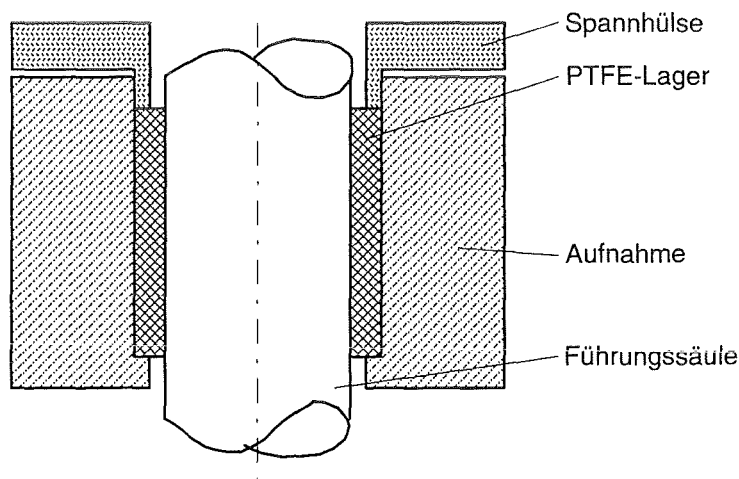
Die Messungen bestätigen den theoretischen Wert der Wiederholgenauigkeit von  $\pm 15 \mu\text{m}$  sehr gut. Damit ist das Potential der bereits vorhandenen Abformmaschinen bezüglich ihrer Eignung zur positionierten Abformung ausgeschöpft, und wurde deshalb nur für grundsätzliche Prozeßmodifikationen herangezogen. Andererseits konnte aber gezeigt werden, daß die beim Abformen erreichbare Wiederholgenauigkeit in erster Linie von der Führungsgenauigkeit von Maschinenoberteil zu -unterteil abhängt. Andere wesentliche Einflüsse konnten während der Untersuchungen nicht beobachtet werden. Daraus folgt, daß ein verbessertes Führungssystem der zueinander bewegten Teile gefunden werden muß.

#### 4.1.4. Untersuchung einer Führung mit verpreßten PTFE-Lagern

Bei der Suche nach einem geeigneten System liegt es nahe, auch die anderen Forderungen der Liste aus Abschnitt 4.1.1. bereits mit einzubeziehen. Bei der Analyse dieser Forderungen wird offensichtlich, daß die Meßgenauigkeit für Kraft und Zustellweg im Bereich der

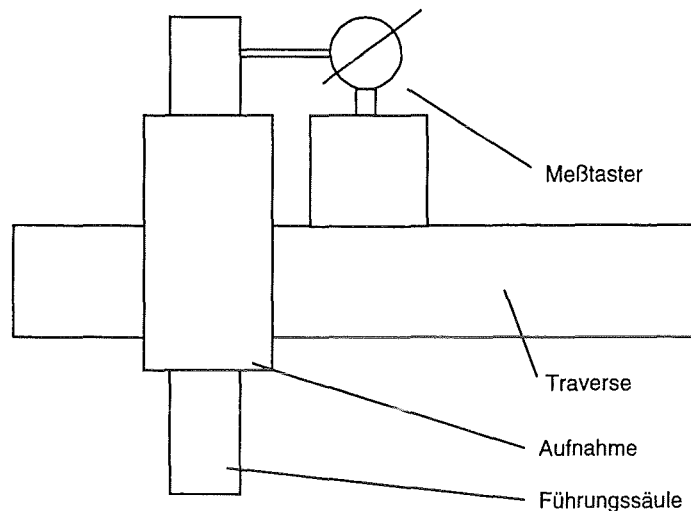
Präzisionsmeßtechnik liegen. Es bietet sich also an, diese Anforderungen mit vorhandenen Lösungen der Präzisionsmeßtechnik zu lösen. Eine weitere Forderung neben der Meßgenauigkeit ist die präzise Regelung für die Krafterzeugung und die Wegzustellung. Bei einer Analyse des Marktes für Meßgeräte mit einer zusätzlichen Regelung für Krafterzeugung und Wegzustellung liegt es nahe, Werkstoffprüfmaschinen eingehend zu betrachten.

Die Untersuchung von Werkstoffprüfmaschinen zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Forderungen bezüglich Kraftmessung, -einstellung und -regelung, wie auch für die Wegmessung, -zustellung und -regelung. Daher wurde auch auf diesem Marktsegment nach einem besonderen Modell der Führungsgenauigkeit der zueinander bewegten Hauptteile, der Traversen, gesucht. Hier verwendet fast jeder Hersteller ein anderes Prinzip. Das von der Fa. Zwick verwendete Prinzip wird in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt.



**Abb.4.4:** Prinzip der Lagerung und Führung der bewegten Traverse bei Zwick-Prüfmaschinen.

Das Wirkprinzip dieser Lagerung beruht darauf, daß die Spannhülse mit der Aufnahme verpreßt wird. Dadurch wird das PTFE-Lager entlang der Säule gestaucht und erfährt quer zur Stauchrichtung eine Ausdehnung. Diese Ausdehnung ist dadurch begrenzt, daß das PTFE-Lager Kontakt zu Führungssäule und Aufnahme hat. Durch eine weitere Erhöhung der Verpressung von Spannhülse und Aufnahme entsteht eine spielfreie Lagerung der Aufnahme um die Säule. Dabei bleibt die Verschiebbarkeit der Aufnahme entlang der Säule erhalten, da PTFE sehr günstige Gleiteigenschaften auf der Führungssäule hat. Diese Lagerung wurde auf ihre Führungsgenauigkeit in einem weiteren Vorversuch untersucht. Der Aufbau ist in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.



**Abb.4.5:** Test der Führungsgenauigkeit der vorgespannten PTFE-Lager.

Die Führungsgenauigkeit dieser Lager wurde gemessen, während die Traverse 2 mm auf- und abgefahren wurde. Dabei tastete der Meßtaster eine Längenänderung zwischen Traverse und Führungssäule ab. Die Meßgenauigkeit der Anordnung wurde zu  $1\ \mu\text{m}$  bestimmt. Die Relativbewegung zwischen Säule und Traverse wurde über 10 Bewegungen auf und ab mit  $\pm 1\ \mu\text{m}$  gemessen. Dieser Wert liegt noch in der Meßgenauigkeit und zeigt, daß diese Art von Führungsprinzip eine um 1 Größenordnung bessere Führung gewährleistet als eine Passung H7/g6.

Eine Werkstoffprüfmaschine mit einer Lagerung der beweglichen Traverse wie oben beschrieben erfüllt also die Anforderungen bezüglich Kraft/Weg/Regelung und der Lagerung der zueinander beweglichen Teile. Damit stand der Weg offen zum Bau einer Abformmaschine auf der Basis einer Prüfmaschine. Die Anforderung bezüglich der Umformtemperatur und des Vakuums in der Prozeßkammer kann in Anlehnung an die Maschine RIM3 auch dort integriert werden. Schließlich besteht die Anforderung der positionierten Abformung, für die ein Konzept auf der Basis der in diesem Kapitel vorgestellten Experimente und Schlußfolgerungen zu entwickeln ist.

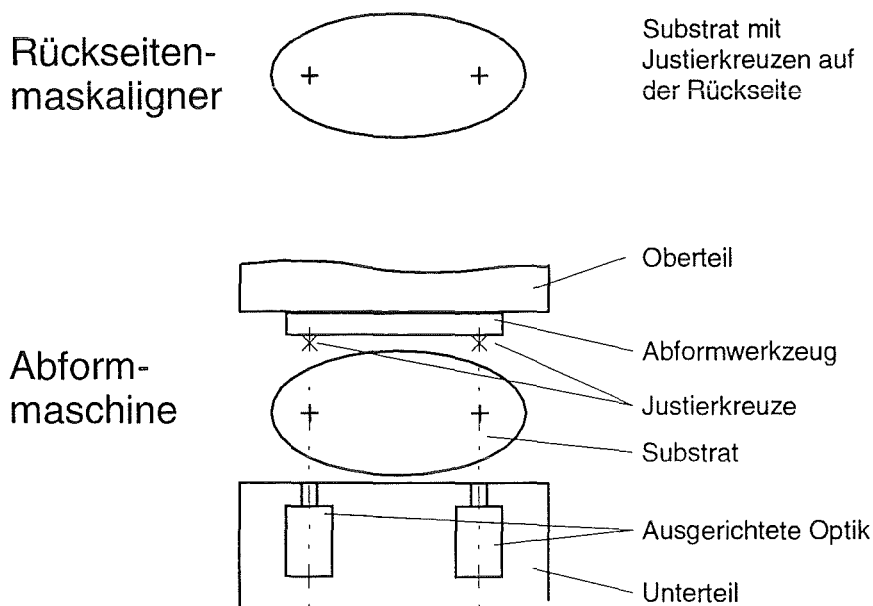
#### **4.2. Entwicklung eines Konzepts zur positionierten Abformung**

Die Entwicklung eines Konzepts zur positionierten Abformung von LIGA-Mikrostrukturen stützte sich zu Beginn auf die aus der Halbleitertechnik bekannten Methoden und Geräte zur justierten Belichtung [MeB192]. Hier wird in einem Gerät die Positionierung von Substrat zu

Maske vorgenommen und durch Belichtung die Struktur der Maske auf das Substrat übertragen. Dabei wird zur Justage zuerst eine Optik auf die Justierkreuze der Maske ausgerichtet. Da die Maske im Bereich der Justierkreuze teilweise lichtdurchlässig ist, kann mit derselben Optik auch das hinter der Maske liegende Substrat betrachtet werden. Damit können mit einer Optik sowohl die Justierkreuze von der Maske als auch die des Substrats erkannt werden. Durch Manipulatoren wird das Substrat dann zur Maske ausgerichtet. Anschließend wird die Belichtung durchgeführt.

#### 4.2.1. Variante 1: Justierkreuzerkennung in der Abformmaschine auf der Substratrückseite

Bei der positionierten Abformung werden die Strukturen des Abformwerkzeugs auf das Substrat übertragen. Dieses Werkzeug ist aber, ebenso wie das Substrat, im Gegensatz zur fotolithografischen Maske lichtundurchlässig. Daher kann das gängige optische Verfahren zur Justierung einer optischen Maske zu einem Strukturuntergrund aus der Halbleitertechnik nicht genau übertragen werden. Aber mit einem Zwischenschritt wird eine dem Halbleiterprozeß ähnliche Variante möglich.



**Abb.4.6:** Variante 1 zur positionierten Abformung. Justierkreuzerkennung auf der Substratrückseite in der Abformmaschine.

Der in Abbildung 4.6 dargestellte Prozeß beginnt mit dem Zwischenschritt in einem Rückseiten-Maskaligner. Dabei werden auf der Substratrückseite Justierkreuze justiert zu denen auf der Vorderseite erzeugt. Zur positionierten Abformung werden jetzt die Optiken im Maschinenunterteil zu den Justierkreuzen im Abformwerkzeug ausgerichtet. Dann wird das



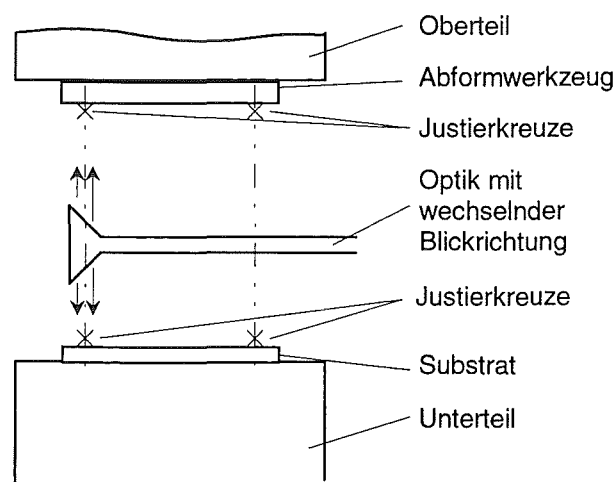
Substrat in die Abformmaschine eingelegt und über die Optiken werden die Justierkreuze auf der Rückseite erkannt. Damit ist eine exakte Positionierung des Substrats bezüglich des Abformwerkzeugs möglich.

Diese Variante basiert auf den bekannten Verfahren aus der Halbleitertechnik. Bei der Abformung wird zur Strukturierung aber nicht die Belichtung und Entwicklung wie in der Halbleitertechnik eingesetzt, sondern ein Warmumformprozeß. Daher ist es sehr leicht verständlich, daß an die Konstruktion des Maschinenunterteils und die Optik ganz andere Ansprüche gestellt werden. In das Maschinenunterteil muß eine Heizung/Kühlung integriert werden und die auftretenden Druckkräfte müssen während des Umformens homogen auf das Substrat übertragen werden. Die Optik muß eine Umgebungstemperatur von bis zu 250 °C ertragen, ohne Schaden zu nehmen.

Aus diesen Bedingungen wird deutlich, daß diese Variante nicht ohne großen Entwicklungsaufwand realisierbar ist. Daher werden Überlegungen angestellt, diese Variante so zu verändern, daß auf die aufwendige Integration der Optiken in das Maschinenunterteil verzichtet werden kann. Aus diesen Überlegungen entsteht die zweite Variante.

#### 4.2.2. Variante 2: Justierkreuzerkennung über eine Optik mit wechselnder Blickrichtung

Die Abbildung 4.7 zeigt die Möglichkeit der direkten Justierkreuzerkennung, ohne die Optiken in die Abformmaschine zu integrieren.



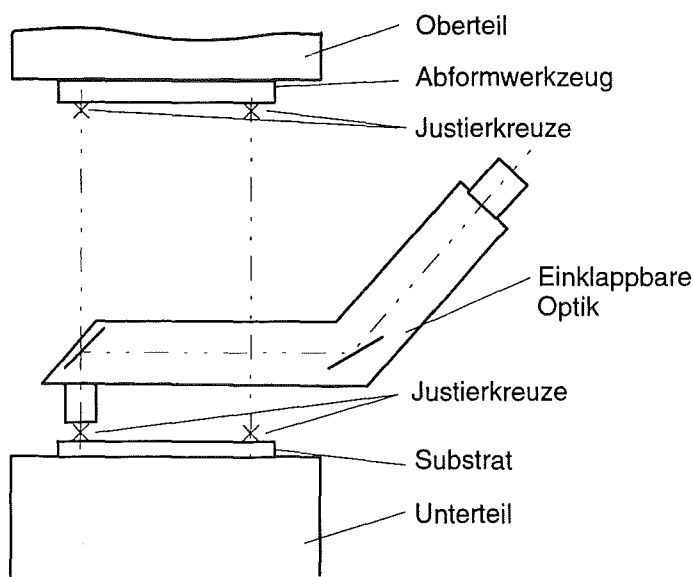
**Abb.4.7:** Variante 2 zur positionierten Abformung. Einschwenkbare Optik mit wechselnder Blickrichtung.

Die Entwicklung gegenüber Variante 1 wird sofort sichtbar. Das Maschinenunterteil ist frei von optischen Einbauten. Statt dessen wird eine Optik in die geöffnete Abformmaschine eingeschwenkt. Diese Optik blickt abwechselnd nach oben bzw. unten und erkennt dabei die Justierkreuze des Abformwerkzeugs und des Substrats. Durch eine geeignete Bildverarbeitung kann das nach oben bzw. nach unten erscheinende Bild zur Überdeckung gebracht werden und so das Substrat zum Abformwerkzeug ausgerichtet werden.

Eine Optik mit den angeführten Eigenschaften kann jedoch nicht standardmäßig bezogen werden. Daher ist ein erheblicher Entwicklungsaufwand zur Bereitstellung einer solchen Optik nötig. Außerdem werden an die Mechanik zum Einschwenken der Optik große Anforderungen bezüglich ihrer Genauigkeit gestellt, denn bereits kleine Winkelfehler erzeugen einen unzulässigen Fehler bei der Ausrichtung von Substrat zu Abformwerkzeug.

#### 4.2.3. Variante 3: Justierkreuzerkennung durch einschwenkbare Optik mit einer Blickrichtung

Da die Optik mit wechselnder Blickrichtung einige Nachteile mit sich bringt, wird eine weitere Variante vorgestellt, die wieder eine Optik verwendet, die in die Abformmaschine eingeschwenkt wird, die aber nur in eine Richtung blickt. Dabei verzichtet dieses Verfahren (vgl. Abbildung 4.8) vollkommen auf die Betrachtung der Justierkreuze im Abformwerkzeug.



**Abb.4.8:** Variante 3 zur positionierten Abformung. Einklappbare Optik mit nur einer Blickrichtung.

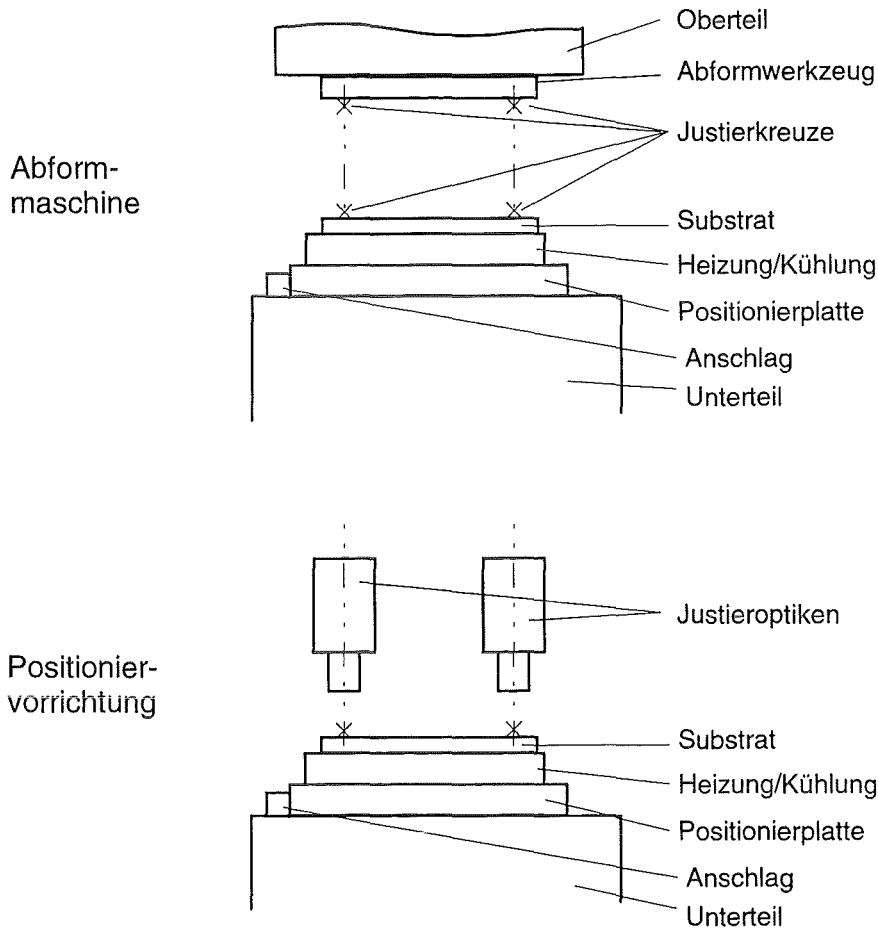
Der Prozeß beginnt mit der Abformung auf einem Vorlaufsubstrat. Dabei werden auch die Justierkreuze des Abformwerkzeugs auf dem Substrat erzeugt. Nach der Abformung wird die Optik in die aufgefahrene Abformmaschine geklappt und auf die abgeformten Justierkreuze ausgerichtet. Die Lage der Justierkreuze wird über eine Videokamera mit einstellbaren Fadenkreuzen gespeichert. Abschließend wird dieses Substrat aus der Abformmaschine entfernt und ein zweites Substrat mit Justierkreuzen in der Leiterbahn- oder Opferschichtebene in die Maschine eingelegt. Dieses Substrat wird jetzt so ausgerichtet, daß die Justierkreuze des Substrats mit den in der Optik gespeicherten zur Deckung gebracht werden. Jetzt wird die Optik aus der Abformmaschine herausgeklappt und der Abformprozeß erneut durchgeführt. Die abgeformten Justierkreuze entstehen nun auf den bereits vorhandenen des Substrats.

Die wesentliche Neuerung dieses Verfahrens liegt darin, daß die Justierkreuze des Werkzeugs nicht mehr als Referenzposition genutzt werden. Statt dessen wird die erste abgeformte Struktur dieser Justierkreuze auf einem Vorlaufsubstrat als Referenzposition genutzt.

Diese Variante zeigt bezüglich der technischen Realisierung der Optik keine wesentlichen Probleme. Die Komponenten können als Standardkomponenten bezogen und miteinander verknüpft werden. Allerdings muß der optische Aufbau an einem Arm in die Abformmaschine eingeführt werden. Hier besteht die Gefahr, daß dieser Arm verschiedene Temperaturen erfährt, da aus wärmetechnischen Gründen nicht alle Teile der Abformmaschine nach dem Abformen so schnell wie das Substrat auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Dabei dehnt sich dieser Arm wegen seiner großen Dimensionen und der Temperaturänderung erheblich aus. Damit entsteht eine Drift der Optiken an der Spitze des Arms und die erforderliche Genauigkeit zur Festlegung der Justierkreuze ist nicht gewährleistet.

#### 4.2.4. Variante 4: Justierkreuzerkennung außerhalb der Abformmaschine

Um das oben angeführte Problem zu beseitigen, bietet es sich an, die Positionskontrolle an einem zweiten temperaturkonstanten Arbeitsplatz durchzuführen. Aus diesen Überlegungen entsteht Variante 4, die in Abbildung 4.9 vorgestellt wird.



**Abb.4.9:** Variante 4 zur positionierten Abformung. Justierkreuzerkennung außerhalb der Abformmaschine.

Die Arbeitsschritte zur positionierten Abformung sind bei dieser Variante ähnlich wie bei der dritten Variante. Durch eine Abformung werden auf dem Substrat die Justierkreuze des Werkzeugs erzeugt und als Referenzposition genutzt. Dann wird die Positionierplatte aus der Abformmaschine ausgebaut und in die Positioniervorrichtung eingebaut. In der Positioniervorrichtung werden die Optiken auf die Justierkreuze ausgerichtet. Die Position der Kreuze wird über Videokameras auf Monitore übertragen und dort mit einem Fadenkreuzgenerator gespeichert. Dann wird das Substrat von der Heizung entfernt und ein neues Substrat mit vorgeätzten Marken auf die Heizung aufgelegt und ausgerichtet. Die Positionierplatte wird mit Heizung und Substrat in die Abformmaschine eingelegt.

Anschließend wird der Abformprozeß wieder durchgeführt. Dabei entstehen die abgeformten Justierkreuze des Werkzeugs auf den vorgeätzten des Substrats, denn aufgrund der identischen Geometrie der Anschläge in der Abformmaschine und in der Positioniervorrichtung findet die Positionierplatte sowohl in der Abformmaschine wie auch in der Positioniervorrichtung immer die exakt gleiche Position.

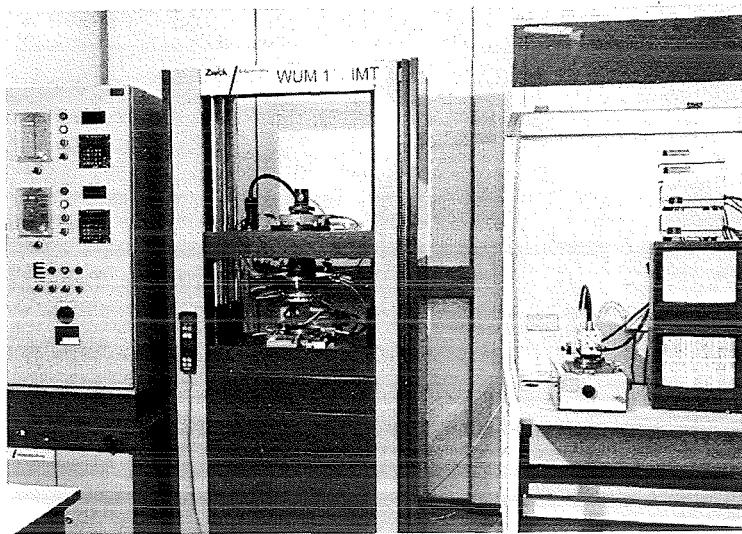
Diese Variante bietet jetzt auch den Vorteil, daß die optischen Komponenten fest an einem temperaturstabilen Ort bleiben. Statt dessen wird die Positionierplatte mit Heizung und Substrat zwischen der Abformmaschine und der Positioniervorrichtung hin- und hertransportiert. Da alle Teile symmetrisch zur stabilen Mittenposition des Substrats befestigt werden können, bleibt auch die Position des Substrats auf der Positionierplatte und der Heizung stabil.

Die vorgestellte Variante 4 vereinigt alle vorgestellten Varianten. Mit der Realisierung dieser Variante lassen sich die an die Positioniergenauigkeit gestellten Forderungen erfüllen.

### **4.3. Realisierung und Überprüfung des ausgewählten Konzepts**

In Abschnitt 4.1. wurde das Konzept zum Aufbau einer Abformmaschine entwickelt und in Abschnitt 4.2. verschiedene Prozesse zur positionierten Abformung diskutiert. Nach den dort angeführten Vorgaben wurde eine Anlage zur positionierten Abformung aufgebaut. Sie besteht aus den Einzelkomponenten:

1. Universalprüfmaschine (UPM) mit Steuerung
2. Prozeßkammer
3. 2 Öltemperiergeräte mit Ventileinheit
4. Vakuumpumpe
5. PC mit Schnittstelle zu Universalprüfmaschine, Ventileinheit und Vakuumpumpe
6. Positioniereinheit



**Abb.4.10:** Gesamtansicht der Anlage zur positionierten Abformung.

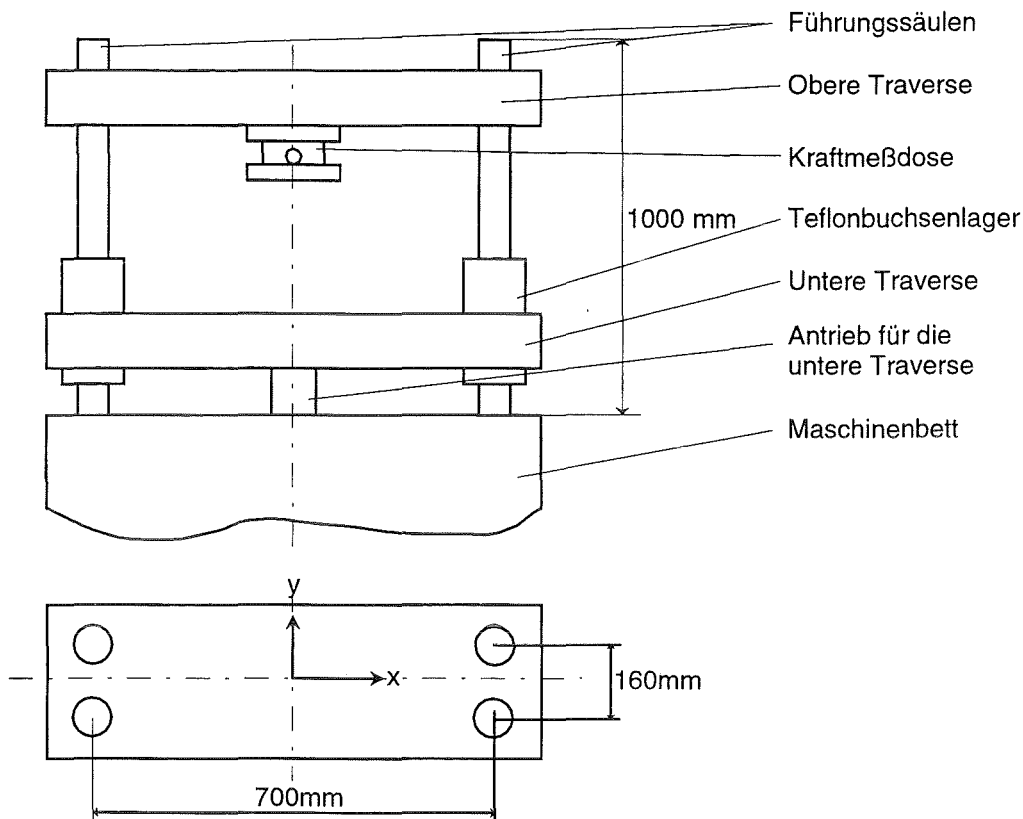
Die Abbildung 4.10 zeigt die Gesamtansicht der Anlage. Die Prüfmaschine mit der geöffneten Prozeßkammer steht im Zentrum. Ganz rechts sieht man die Positioniervorrichtung mit Videomikroskopen. Links befindet sich ein Schaltschrank, in dem alle Hilfsgeräte zur Steuerung der Anlage durch einen PC untergebracht sind. Die Öltemperiergeräte und die Vakuumpumpe sind aus Lärmschutzgründen im Gebäude ein Stockwerk unter der UPM aufgestellt. Die Versorgung der Anlage mit Temperieröl und Vakuum wird über Zuleitungen geregelt.

### **4.3.1. Anlage zur positionierten Abformung**

#### 4.3.1.1. Universalprüfmaschine

Im Maschinenbett sitzen vier Führungssäulen mit einem Durchmesser von 80 mm jeweils an den Eckpunkten eines Rechtecks mit einer Breite von 700 mm und einer Tiefe von 160 mm. An diese Säulen ist die obere Traverse fest montiert. Die untere bewegliche Traverse ist an jeder der vier Säulen über die in Abschnitt 4.1. beschriebenen PTFE-Lager geführt. Angetrieben wird die untere Traverse durch einen Schrittmotor im Maschinenbett, der über eine Kugelumlaufspindel die Traverse hebt und senkt. Aus Gründen der symmetrischen Kraftverteilung greift diese Kugelumlaufspindel im Diagonalschnittpunkt der Führungssäulen an. Die Kraftmessung in der Universalprüfmaschine findet in der Kraftmeßdose statt, die in der oberen Traverse genau über dem Angriffspunkt der

Kugelumlaufspindel eingebaut ist. Die Abbildung 4.11 zeigt den prinzipiellen Aufbau mit den Hauptmaßen.



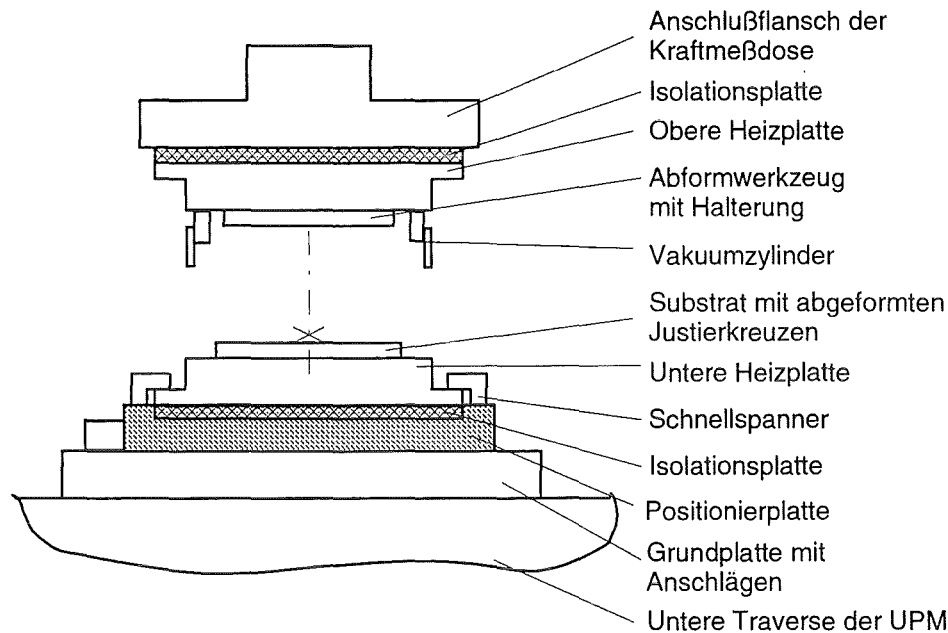
**Abb 4.11:** Schematische Darstellung der Universalprüfmaschine mit Hauptmaßen.

#### 4.3.1.2. Prozeßkammer

Die Prozeßkammer (vgl. Abb. 4.12) befindet sich zentrisch zwischen den beiden Traversen der UPM. Das Oberteil befindet sich innerhalb eines nach unten offenen Vakuumzylinders, der direkt an den Flansch der Kraftmeßdose montiert ist. Dieses Oberteil besteht aus einer Isolationsplatte, die einen Wärmefluß aus der Prozeßkammer in die Kraftmeßdose verhindert. Darauf sitzt die obere Heiz- und Kühlplatte. Sie ist mit Öldurchflußkanälen versehen und wird zur Heizung oder Kühlung mit Öl der gewünschten Temperatur durchspült. An die Heizplatte wird direkt das Abformwerkzeug in seiner Aufnahme befestigt.

Der untere Teil der Prozeßkammer wird auf eine Grundplatte mit Justieranschlügen aufgebaut. An die Anschläge wird eine Positionierplatte angesetzt, auf der zunächst eine Isolationsplatte und dann die untere Heiz- und Kühlplatte sitzt. Diese Heiz- und Kühlplatte arbeitet nach demselben Prinzip wie im oberen Teil. Sie ist auf der Positionierplatte aber nicht starr befestigt, sondern kann darauf verschoben und durch Schnellspanner auf der Positionierplatte

niedergespannt werden. Auf der Heiz- und Kühlplatte werden der Substrathalter und das Substrat aufgebracht. Der obere Vakuumzylinder setzt beim Zusammenfahren der Traverse auf die untere Heizplatte auf und schließt mit einem Dichtring die Prozeßkammer während des Abformvorgangs gegen die Umgebung ab.



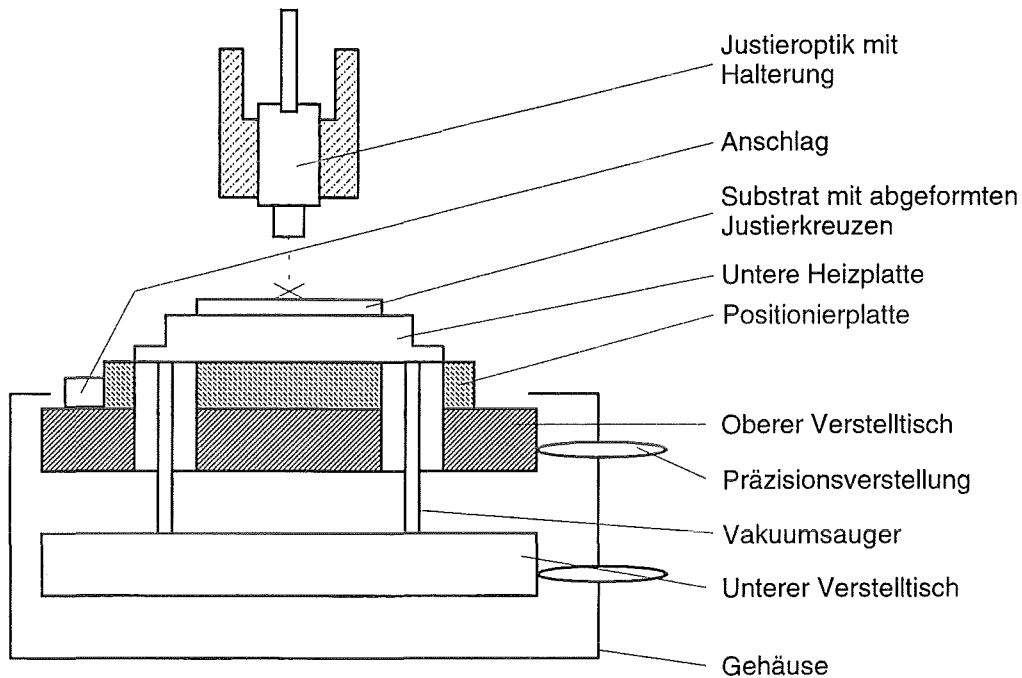
**Abb. 4.12:** Schematische Darstellung der Prozeßkammer.

#### 4.3.1.3. Positioniervorrichtung und deren Justierung

Die Positioniereinrichtung besteht aus einem oberen und einem unteren Präzisionsverstelltisch und einer Halterung für die Mikroskopoptiken (vgl. Abb.4.13). Auf dem oberen Verstelltisch sind genau gleich wie auf der Grundplatte der Abformmaschine Anschläge angeordnet, an welche die Positionierplatte angelegt wird. Zur Justage der Positioniervorrichtung wird die Positionierplatte mit Heizung, Substrathalter und abgeformtem Substrat auf den oberen Verstelltisch an dessen Anschläge gelegt. Der obere Verstelltisch wird so eingestellt, daß die Justierkreuze, die auf dem Substrat durch Abformung erzeugt wurden, von den Videomikroskopen auf zwei Bildschirmen dargestellt werden. Der obere Verstelltisch wird jetzt arretiert und die Position der abgeformten Justierkreuze auf den Bildschirmen durch elektronisch erzeugte Fadenkreuze dokumentiert. Damit ist die Position auf der Positionierplatte eindeutig festgelegt, auf der die durch Abformung erzeugten Justierkreuze entstehen. Auf der Heiz- und Kühlplatte wird ein neues Substrat mit vorgeätzten Justierkreuzen befestigt. Die Heizplatte wird über zwei Vakuumsauger, die an den unteren

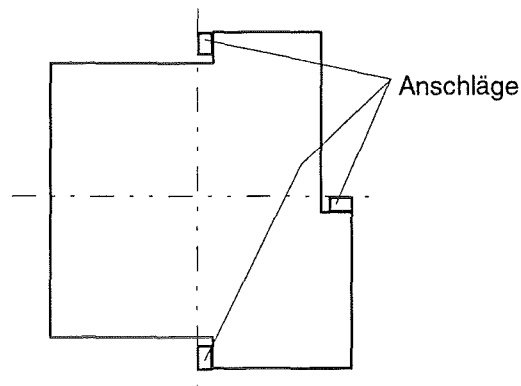


Verstelltisch angebracht sind und durch Öffnungen im oberen Verstelltisch und der Positionierplatte greifen, verschoben. Die Position des Substrats zu den dokumentierten Justierkreuzen wird dadurch eingestellt, daß die Heizplatte auf der Positionierplatte verschoben wird.



**Abb.4.13:** Schematische Darstellung der Positioniervorrichtung.

Während des Abformens wird die Prozeßkammer erheblich erwärmt und anschließend gekühlt. Eine Erwärmung der Positionierplatte kann nicht vollständig verhindert werden. Dabei erfährt diese Platte eine Wärmedehnung. Da die Heizplatte mit dem Substrat in der Mitte der Platte liegt, müssen die Anschläge, an welche die Platte angelegt wird, so angeordnet sein, daß die Mitte der Positionierplatte ortsfest ist. Nur so ist die hohe Genauigkeit für die positionierte Abformung zu erreichen. Die Abbildung 4.14 zeigt die Geometrie der Positionierplatte. Die gestrichelten Linien sind auch bei Temperaturschwankungen ortsfest.



**Abb.4.14:** Temperaturkompensierte Geometrie der Positionierplatte.

### 4.3.2. Überprüfung der mechanischen Genauigkeit der UPM

Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Messungen wurden mit zwei Meßtastern<sup>1</sup> mit einer Auflösung von 250 nm durchgeführt. Sie wurden mit Magnetspannhaltern an den jeweiligen Prüfstellen angebracht. Auf die Antastpunkte der Meßspitzen am Aufbau wurden immer Endmaße angebracht, um Oberflächeneinflüsse am Meßort auszuschließen. Die Meßgenauigkeit wurde für alle Messungen zu  $\pm 1 \mu\text{m}$  abgeschätzt.

#### 4.3.2.1. Traversenzu- und Traversenschragstellung

Für die Verwendung der Prüfmaschine zur Abformung von Mikrostrukturen, wie in Abschnitt 2.2. beschrieben, ist die Einstellung einer gleichmäßigen Restschichtdicke notwendig. Daher wurde gefordert, daß die Schragstellung der Traversen zueinander auf der Länge des Abformwerkzeugs weniger als  $5 \mu\text{m}$  betragen sollte. Dieser Wert entspricht der Ebenheit der Substrate, eine bessere Ebenheit ist daher nicht sinnvoll. Zur Messung der Parallelität der Traversen wurde der in Abbildung 4.15 dargestellte Meßaufbau verwendet. Zur Messung wurden zuerst die Meßtaster an die obere Traverse angelegt und auf Null gesetzt. Die Kraft wurde stufenweise erhöht und die jeweilige Lageabweichung abgelesen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4.2 und 4.3 für die x- und die y-Richtung zusammengestellt.

---

<sup>1</sup> MT25 Fa. Heidenhain, Traunreut

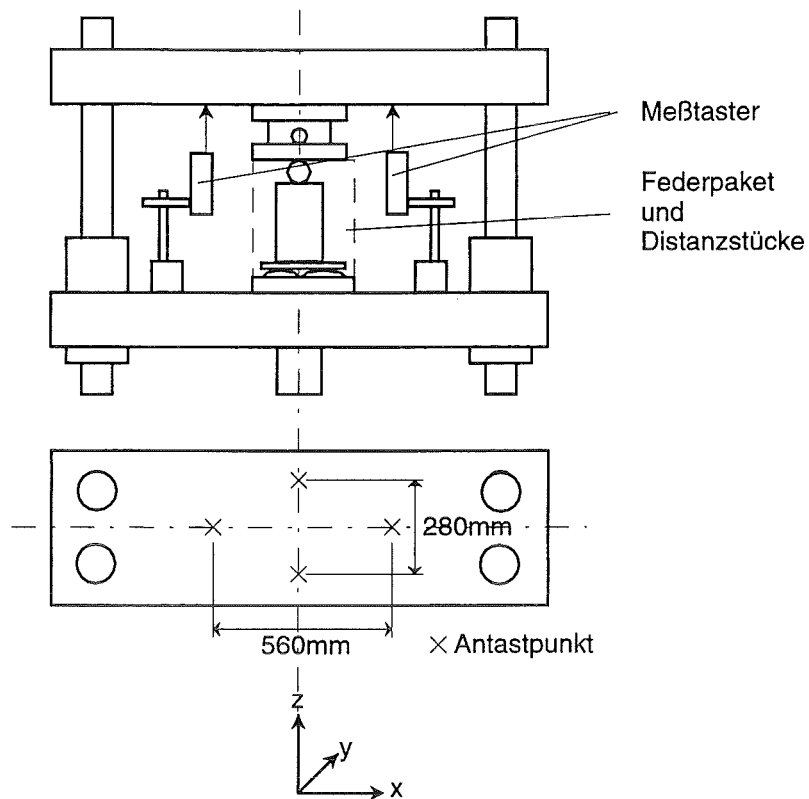


Abb.4.15: Aufbau zur Parallelitätsmessung.

Kraftniveau (kN)	Parallelitätsabweichung für die Traversengeschwindigkeiten ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )				Bemerkungen
	50	100	200	1000	
2	3	0	1	0	1. Messung
	0	0	1	0	2. Messung
5		0	1	0	1. Messung
		0	0	1	2. Messung
10		0	1	1	1. Messung
		0	1	2	2. Messung
15		3	4	4	1. Messung
		4	5	5	2. Messung
20		4	3	4	1. Messung
		5	4	3	2. Messung
25		4	3	4	1. Messung
		3	3	4	2. Messung
30			4	3	1. Messung
			4	6	2. Messung
50			5	5	1. Messung
			5	5	2. Messung
100			3	5	1. Messung
			4	4	2. Messung

Tab.4.2: Parallelitätsabweichung der Traversen gemessen in der x-Achse mit einem Abstand von 560 mm.

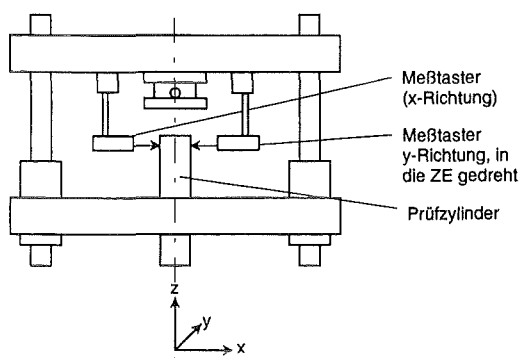
Kraftniveau (kN)	Parallelitätsabweichung für die Traversengeschwindigkeiten ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )				Bemerkungen
	50	100	200	1000	
2	1	0	0	0	1. Messung
	0	0	0	0	2. Messung
5		0	0	0	1. Messung
		0	0	0	2. Messung
10		0	0	0	1. Messung
		0	0	0	2. Messung
15			1	0	1. Messung
			1	0	2. Messung
20			0	1	1. Messung
			1	1	2. Messung
25			2	1	1. Messung
			1	1	2. Messung
30			2	3	1. Messung
			2	2	2. Messung
50			6	6	1. Messung
			6	6	2. Messung
100			11	10	1. Messung
			10	11	2. Messung

**Tab.4.3:** Parallelitätsabweichung der Traversen gemessen in der y-Achse mit einem Abstand von 280 mm.

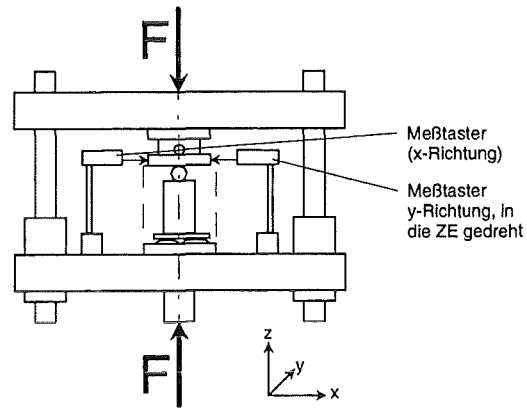
Die Meßwerte zeigen im Extremfall eine Schrägstellung von 11  $\mu\text{m}$  auf eine Länge von 280 mm. Dieser Wert beträgt nur 47% des maximal zulässigen Wertes. Dazu kommt, daß die zum Abformen geeigneten Kräfte (vgl. Abschnitt 3.1.) kleiner 50 kN sind. Die Schrägstellung der Traverse halbiert sich bei dieser Kraft noch einmal gegenüber dem Wert bei 100 kN. Damit sind die Forderungen bezüglich der Parallelität der Traversen erfüllt.

#### 4.3.2.2. Seitlicher Versatz der Traversen zueinander

Zum Test dieser Größe wurde zunächst ein Meßaufbau verwendet, der beim Verfahren der Traverse keine Kräfte erzeugt. Die Anordnung ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Auf die untere Traverse wurde ein Prüfzylinder gestellt, der auf seiner gesamten Höhe eine Zylindrizität von besser als 1  $\mu\text{m}$  hat und eine Winkligkeit von Boden zu Seitenfläche von ebenfalls besser 1  $\mu\text{m}$ . Die Taster wurden an der feststehenden Traverse hängend montiert, wobei ein Taster in x-Richtung und einer in y-Richtung am Prüfzylinder fühlt. Der vorgegebene Verfahrensweg betrug 1.5 mm bei einer Geschwindigkeit von 2 mm/min. Die Strecke wurde 10 mal abgefahren und an jedem Umkehrpunkt ein Meßwert aufgenommen. Dabei traten in y-Richtung keine meßbaren Verschiebungen auf, während in der x-Richtung der Meßwert im Rahmen der Meßgenauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$  schwankte.

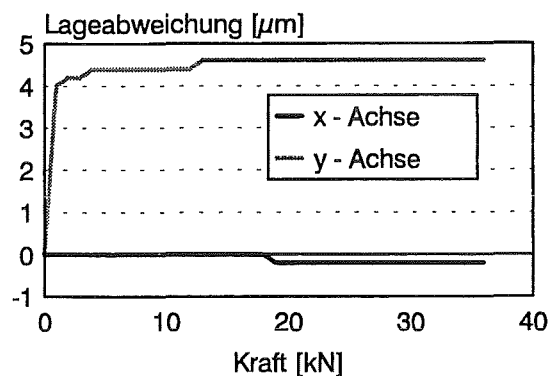


**Abb.4.16:** Aufbau zur Messung des Versatzes ohne Last.



**Abb.4.17:** Aufbau zur Messung des Versatzes unter Last.

Ein ähnliches Experiment wurde unter Kraft wieder durchgeführt. Dazu wurden die Meßtaster auf der unteren Traverse befestigt und an den Flansch der Kraftmeßdose angelegt, wobei einer in x-Richtung und der andere in y-Richtung maß. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 4.18 dargestellt.



**Abb.4.18:** Lageabweichung der Traverse in Abhängigkeit der Kraft.

Das Diagramm 4.18 zeigt, daß in x-Richtung nur ein Versatz, der kleiner als die Meßgenauigkeit ist, auftritt. In y-Richtung tritt zunächst eine Verschiebung um 4 µm ein, die dann im relevanten Kraftbereich weitgehend konstant bleibt. Dieses Verhalten war mit dem dargestellten Meßaufbau reproduzierbar und wird auf das Setzen eines Lagers zurückgeführt. Für die weiteren Untersuchungen ist diese Verschiebung jedoch nicht von Bedeutung, da sie unter der zulässigen Führungsgenauigkeit von 5 µm liegt. Damit sind die Forderungen bezüglich der Führungsgenauigkeit von oberer zu unterer Traverse erfüllt.

### 4.3.3. Einstellung der Regelparameter

Für das Anfahren eines Kraftniveaus ohne Einschwingvorgänge und das anschließende Einhalten dieses Niveaus sind die Regelparameter der Prüfmaschine an den Abformvorgang anzupassen. Die Kraftregelung erfolgt mit einem PID-Regler, wobei für den Anwender der Prüfmaschine nur der Proportionalanteil, der in diesem Fall die Verstärkung des Regelkreises darstellt, einstellbar ist [Kubb90]. Zur Einstellung der Verstärkung gibt es drei verschiedene Möglichkeiten:

manuell: Es kann ein Wert für die Verstärkung zwischen 0 und 100% eingegeben werden. Je steifer die Probe ist, um so kleiner muß die Verstärkung sein [Hand94].

adaptiv: Die Verstärkung wird während der Prüfung laufend an die während der Prüfung gemessene Steifigkeit des Prüflings angepaßt. Dazu müssen zwei Werte eingegeben werden:

- a) minimale Steifigkeit des Prüflings
- b) maximale Steifigkeit des Prüflings

automatisch: Die Steifigkeit der Probe wird von Hand eingegeben. Daraus berechnet sich die Software selbst die optimale Verstärkung.

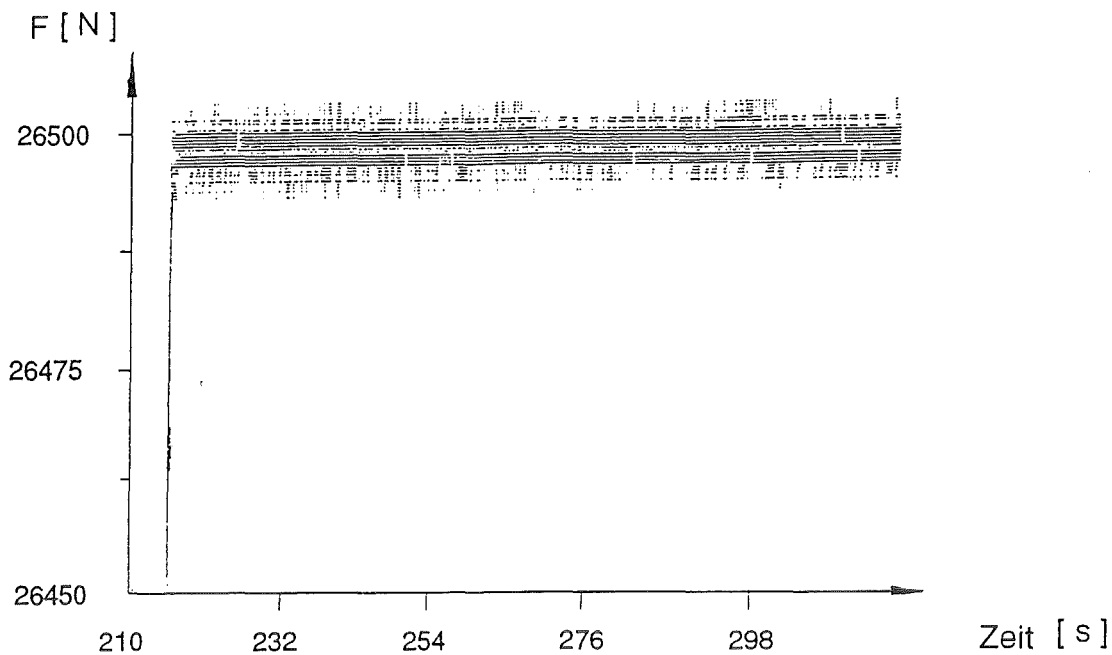
Zum Test des Regelparameters wurde zur Aufnahme der erzeugten Kräfte derselbe Aufbau verwendet, der auch in Abschnitt 4.3.2.1. verwendet wurde. Das verwendete Federpaket hat eine Steifigkeit von ca. 30000 N/mm. Dies entspricht etwa der Steifigkeit einer Probe während des Umformens. Es wurde bei jedem Versuch eine Sollkraft von 26500 N angefahren, wobei mit verschiedenen Zustellgeschwindigkeiten experimentiert wurde. In der Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Dabei wurde die Qualität des Kraftzustellverhaltens wie folgt bewertet:

- 1 gleichmäßiger Kraftverlauf, die Schwankung der Kraft  $\Delta F$  ist kleiner  $\pm 5$  N
- 2 gleichmäßiger Kraftverlauf, die Schwankung der Kraft  $\Delta F$  ist kleiner  $\pm 15$  N
- 3 gleichmäßiger Kraftverlauf, die Schwankung der Kraft  $\Delta F$  ist kleiner  $\pm 25$  N
- 4 kein gleichmäßiger Kraftverlauf, die Schwankung der Kraft  $\Delta F$  ist größer  $\Delta F \pm 25$  N
- 5 instabiles Verhalten, die Schwankung der Kraft  $\Delta F$  wird größer  $\pm 5$  kN.

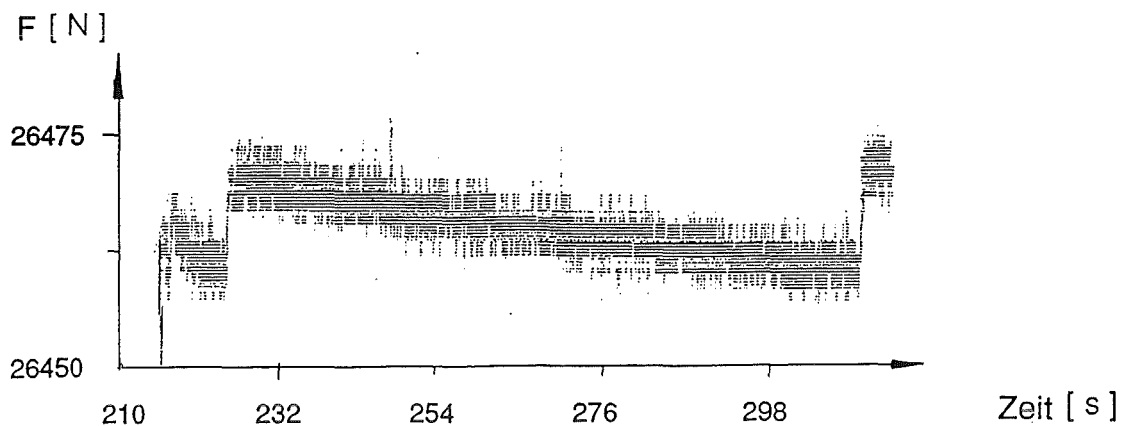
Einstellung P-Anteil	Zustellgeschwindigkeit [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]		
manuell Eingabe der Verstärkung	200	100	20
0.1%	3	3+	3-
1.0%	2	1-	1
1.5%	5	4-	5
adaptiv Eingabe a/b [N/mm]			
0/0	3-	3	-
0/30000	2-	2-	2-
0/800000	3	3-	4
4000/20000	1-	1-	2
4000/800000	3	2-	2
150000/20000	2+	2	2-
150000/800000	5	5	5
automatisch Eingabe Steifigkeit [N/mm]			
10000	5	5	5
15000	1-	1	1-
30000	1	1	1
50000	1-	1-	1-

**Tab.4.4:** Bewertungsliste zur Einstellung des P-Anteils für die Regelung der UPM während des Abformvorgangs. Tendenzen innerhalb einer Qualitätsstufe wurden mit + und - gekennzeichnet.

Die beiden Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen einen typischen guten und einen schlechten Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abb.4.19:** Kraft-Zeitverhalten bei automatischer Regelung mit vorgegebener Steifigkeit von 30000 N/mm. Das Rauschen der Kraftmeßdose mit ca.  $\pm 5$  N ist deutlich erkennbar. Das Verhalten ist optimal hinsichtlich Einschwingen und Konstanz der anliegenden Kraft.



**Abb.4.20:** Kraft-Zeitverhalten bei adaptiver Regelung mit  $a = 150000$  N/mm und  $b = 800000$  N/mm. Das Rauschen der Kraftmeßdose mit  $\pm 5$  N ist auch hier deutlich zu erkennen. Zusätzlich treten Kraftschwankungen von ca. 15 N auf.

Die Auswertung der Tabelle zeigt, daß alle Regelungsarten für den Geschwindigkeitsbereich von 20 - 200  $\mu\text{m}/\text{min}$  einsetzbar sind. Allerdings ist für die manuelle und die adaptive Regelung eine genaue Einstellung der Parameter auf die Abformverhältnisse nötig. Die automatische Regelung hingegen erlaubt bei der Einstellung der Steifigkeitswerte einen



Spielraum von  $\pm 30\%$ , ohne das Kraft-Weg-Verhalten zu verändern. Sie ist daher für die Anwendung völlig ausreichend.

#### 4.3.4. Abformung

##### 4.3.4.1. Ebenheit der Restschicht

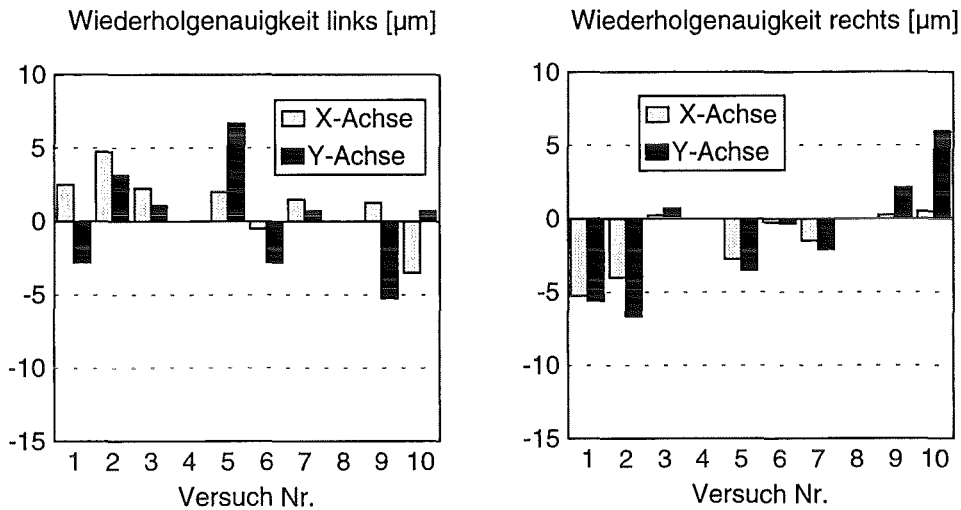
Mit der vorgestellten Anlage wurden, wie bereits in Abschnitt 3.1. beschrieben, alle Untersuchungen zur Einstellung der Restschichtdicke durchgeführt. Dabei wurden doppelseitig geschliffene Stahlplatten mit einer Ebenheit von  $5\ \mu\text{m}$  bei  $9\ \text{mm}$  Dicke als Substrat verwendet. Bei allen Abformungen zeigte die Restschicht eine Ebenheit von  $10\ \mu\text{m}$  über die strukturierte Fläche von  $20\ \text{mm} * 60\ \text{mm}$ . Diese Werte liegen im Bereich der Ebenheit der verwendeten Abformwerkzeuge. Dieser Wert erfüllt damit die an die Anlage gestellten Anforderungen bezüglich der Ebenheit der Restschicht.

##### 4.3.4.2. Wiederholgenauigkeit der Position bei der Abformung

Mit der Messung der Wiederholgenauigkeit soll festgestellt werden, wie genau die Mikrostrukturen von einem Abformversuch zum nächsten auf einem bestimmten Ort auf dem Substrat abgeformt werden. Zu diesem Zweck wird ein erster Abformversuch durchgeführt und die Lage zweier abgeformter Justierkreuze auf der Positioniervorrichtung vermessen. Dann wird das Substrat wieder in die Abformmaschine eingebaut und ein weiterer Abformversuch durchgeführt. Anschließend wird die Lage der bei dieser Abformung erzeugten Justierkreuze vermessen. Die Versuchsbedingungen für diese Versuche sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Es wurden 10 Versuche durchgeführt.

Versuchsparameter	Wert
Umformkraft	20 kN
Umformtemperatur	200°C
Entformtemperatur	75°C

**Tab.4.5:** Versuchseinstellungen zur Messung der Wiederholgenauigkeit.



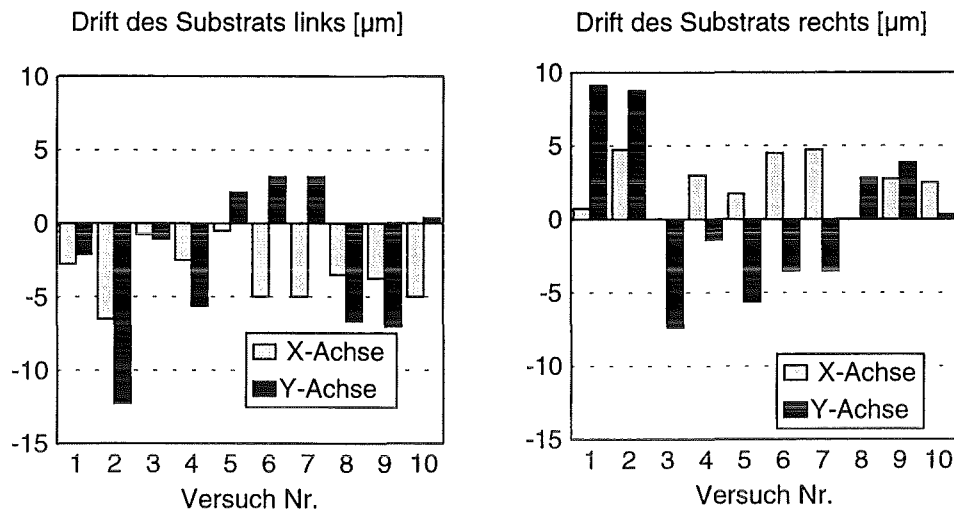
**Abb.4.21:** Wiederholgenauigkeit der Justierkreuze beim Abformen. Bei den Versuchen 4 und 8 wurde die Wiederholgenauigkeit mit 0 µm gemessen. Der Meßfehler beträgt  $\pm 1\mu\text{m}$ .

Aus den Diagrammen in Abbildung 4.21 wird ersichtlich, daß in 90% der Fälle die Drift der Justierkreuze 5 µm oder kleiner ist. In keinem Fall tritt eine Drift von mehr als 7 µm von einem zum nächsten Versuch auf. Unter Berücksichtigung der beim Abformen auftretenden Temperaturschwankungen und Kräfte stellen diese Messungen ein sehr gutes Ergebnis für die Wiederholgenauigkeit dar.

#### 4.3.4.3. Substratdrift

Die Substratdrift ist die Lageabweichung, die das Substrat während des gesamten Abformprozesses erfährt. Zur Messung dieser Größe wird zunächst ein Substrat mit vorgeätzten Justierkreuzen auf der Heizplatte montiert. Die Positionierplatte mit Heizplatte und Substrat wird in die Positioniereinrichtung eingelegt. Die Lage der Justierkreuze wird über die Videomikroskope erkannt. Die Position der Justierkreuze auf dem Bildschirm wird mit dem Fadenkreuzgenerator dokumentiert. Die Positionierplatte mit Heizplatte und Substrat wird aus der Positioniervorrichtung aus- und in die Abformmaschine eingebaut. Dort wird eine Abformung durchgeführt. Dabei werden dieselben Parameter verwendet, die auch in Abschnitt 4.3.4.2. verwendet werden. Nach der Abformung werden Positionierplatte und Heizplatte mit Substrat aus der Abformmaschine aus- und in die Positioniervorrichtung eingebaut. Jetzt werden die vorgeätzten Justierkreuze wieder mit den Videomikroskopen erkannt und deren Lageabweichung zu der vor der Abformung bestimmt, indem die Differenz zwischen den durch Fadenkreuzgenerator und dem auf dem Substrat befindlichen Justierkreuz

bestimmt wird. Auch dieser Versuch wird 10 mal durchgeführt. Die Meßergebnisse sind in Abbildung 4.22 dargestellt.



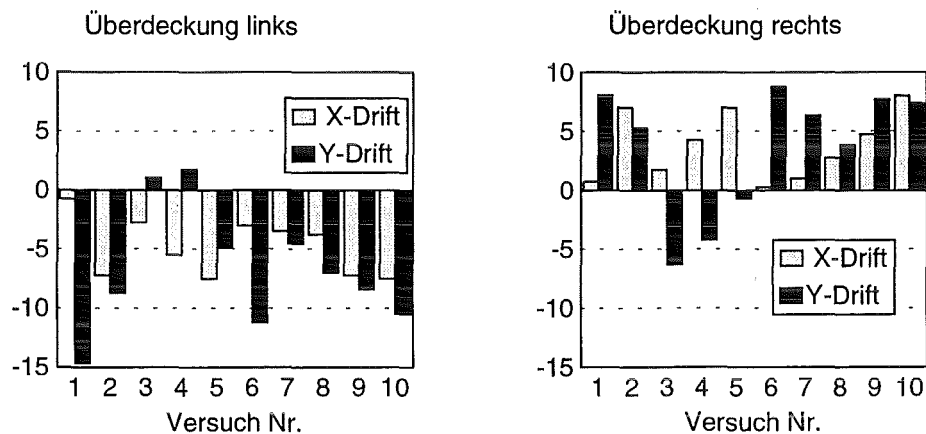
**Abb.4.22:** Drift des Substrats während des Abformvorgangs; Meßpunkte liegen an den Positionen der Justierkreuze. Der Meßfehler beträgt  $\pm 1\mu\text{m}$ .

Die Meßdaten zeigen, daß die Bewegung des Substrats während der Abformung in 90% der Fälle kleiner  $7\mu\text{m}$  ist. Ein Meßwert zeigt eine Bewegung von  $12\mu\text{m}$  und stellt einen Ausreißer dar, dessen Ursache bisher nicht bekannt ist. Dennoch zeigen diese Meßwerte, daß die Positionsstabilität des Substrats während der Abformung gegeben ist.

#### 4.3.4.4. Positionierte Abformung

In der letzten Versuchsreihe zur Überprüfung der aufgebauten Anlage wurde auf 10 Substraten positioniert abgeformt. Die abgeformten Justierkreuze sollen bei diesem Versuch mit größtmöglicher Genauigkeit auf den Justierkreuzen eines vorstrukturierten Substrats erzeugt werden.

Zunächst wird die Positioniervorrichtung ausgerichtet, wie bereits in Abschnitt 4.3.1.3. beschrieben. Dann wird ein Substrat mit vorgeätzten Justierkreuzen zu den auf dem Bildschirm dokumentierten ausgerichtet. Anschließend wird der Aufbau aus Positionier- und Heizplatte mit Substrat in die Abformmaschine eingelegt und eine Abformung durchgeführt. Danach wird das Substrat aus der Abformmaschine ausgebaut und die Abweichung zwischen den vorgeätzten und den abgeformten Justierkreuzen gemessen.



**Abb.4.23:** Überdeckung von vorgeätztem Justierkreuz auf Substrat und dem abgeformten Justierkreuz. Der Meßfehler beträgt  $\pm 1\mu\text{m}$ .

Die Diagramme in Abbildung 4.23 zeigen, daß 90% der Meßwerte  $8\mu\text{m}$  oder kleiner sind. Also ist die Herstellung von Mikrostrukturen auf einer bestimmten Position des Substrats durch Abformung auf  $\pm 8\mu\text{m}$  nachgewiesen.

#### 4.3.5. Diskussion

Die Prinzipien der Führung zueinander bewegter Teile vor dem Hintergrund der Kernanforderung, der Genauigkeit von  $\pm 10\mu\text{m}$ , sind der entscheidende Punkt für die positionierte Abformung. Eine solche exakte Führung kann mit vorspannbaren PTFE-Buchsen erreicht werden. Diese Buchsen finden sich der am IMT spezifizierten Universalprüfmaschine. Es wurde gezeigt, daß die ausgewählte Prüfmaschine auch unter Last eine Führungsgenauigkeit von besser  $5\mu\text{m}$  gewährleistet. Zusätzlich ermöglicht die Maschine die Kraft- und Wegmessung und die Kraft- und Wegzustellung im Rahmen der gestellten Forderungen. Die Kraftzustellung konnte bei einem Kraftniveau von 26500 N auf 5 N eingehalten werden. Die Wiederholgenauigkeit der abgeformten Mikrostrukturen konnte mit extrem guten Werten von  $\pm 5\mu\text{m}$  gemessen werden. Die Drift des Substrats war dabei kleiner  $\pm 7\mu\text{m}$ . Die Überdeckung von Substrat und durch Abformung erzeugten Justierkreuzen konnte mit der vorgestellten Anlage auf  $\pm 8\mu\text{m}$  erfüllt werden, was die Anforderung um 20% übertrifft. Damit liefert die vorgestellte Anlage sehr gute Voraussetzungen für die Herstellung beweglicher Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren. Die wichtigste Anforderung, die positionierte Abformung von Mikrostrukturen mit einer Genauigkeit von  $10\mu\text{m}$ , ist nicht nur erfüllt, sondern übertroffen. Beispielsweise lassen sich mit diesen Leistungsdaten die in

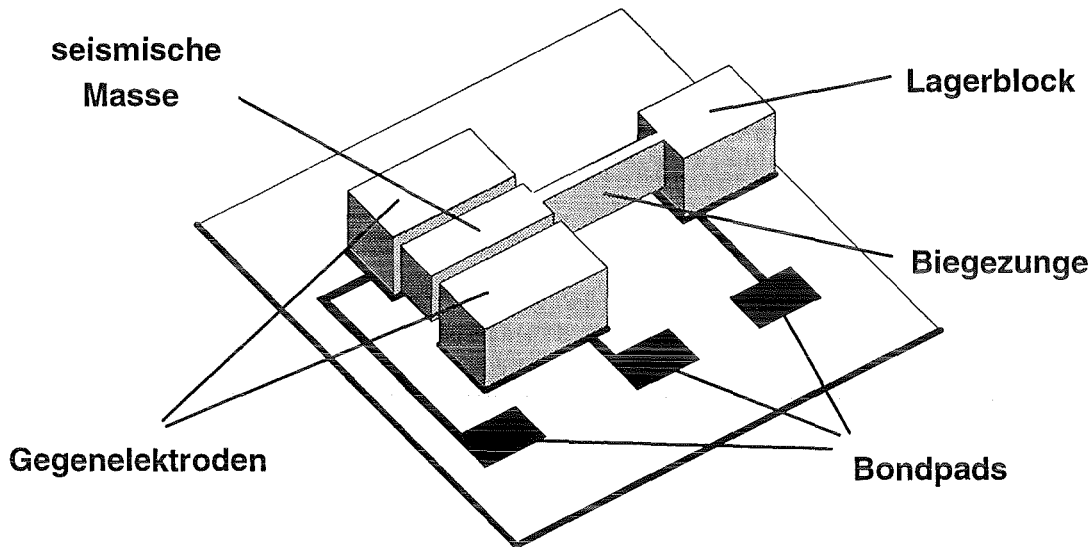
[Stro95] vorgestellten temperaturkompensierten Beschleunigungssensoren mit dem in Abschnitt 2.2. vorgestellten Abformprozeß auf einem vorstrukturierten Substrat herstellen.

## 5. Herstellung und Charakterisierung von Funktionsmustern

Als erstes Funktionsmuster wurden die bereits in Kapitel 1 erwähnten Beschleunigungssensoren ausgewählt.

### 5.1. Funktionsprinzip des Beschleunigungssensors

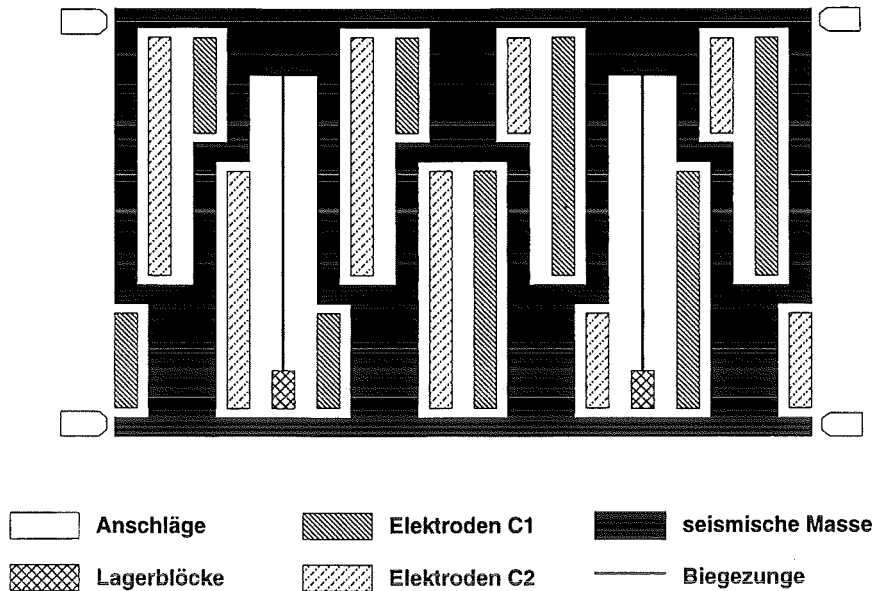
Der Beschleunigungssensor und seine prinzipielle Funktion sind in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abb.5.1:** Prinzipskizze des Beschleunigungssensors.

Eine seismische Masse ist über eine Biegezungge an einem Lagerblock aufgehängt. Sie kann sich frei zwischen zwei feststehenden Gegenelektroden bewegen, die zusammen mit der seismischen Masse jeweils einen Kondensator bilden. Wirkt auf den Sensor eine Beschleunigung, wird die seismische Masse aus der Ruhelage so weit ausgelenkt, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Federrückstellkraft und Massenkraft einstellt. Die dadurch entstehende Änderung der Spaltweite der Kondensatoren führt zu einer Kapazitätsänderung. Diese Kapazitätsänderung wird gemessen und stellt ein exaktes Maß für die wirkende Beschleunigung dar. Mit dem in Abbildung 5.1 vorgestellten Design konnte die prinzipielle Funktion eines Beschleunigungssensors gezeigt werden. Für den Einsatz als Präzisionsmeßinstrument ist ein so einfaches Design jedoch nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden folgende Verbesserungen an dem Sensor durchgeführt. Der Temperaturgang des Ausgangssignals, der sich aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von beweglicher Metallstruktur und Substrat ergibt, kann durch eine Gabelstruktur der seismischen Masse reduziert werden. Das nichtlineare Verhalten der

Kapazität in Abhängigkeit von der Beschleunigung kann durch eine parallele Auslenkung der seismischen Masse verbessert werden. Die Abbildung 5.2 zeigt das Design des am IMT entwickelten Präzisionsensors [Stro95].



**Abb.5.2:** Strukturschema des temperaturkompensierten Beschleunigungssensors.

Mit diesen Strukturen kann die Funktionalität des Prozesses bewiesen werden, da die Beweglichkeit der Strukturen nur zu erreichen ist, wenn eine Positioniergenauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  von abgeformter Struktur zu Opferschicht auf dem Substrat gewährleistet ist. Andernfalls kommen während des Galvanikprozesses Teile der beweglichen Struktur auf den Leiterbahnen zu stehen und die Struktur wird nach dem Entfernen der Opferschicht nicht beweglich. Zusätzlich werden extrem hohe Anforderungen an die Qualität der abgeformten Strukturen gestellt. Die späteren Kondensatorspalte müssen als schmale, hohe Kunststoffwände erzeugt werden, deren Herstellung durch Kunststoffabformung schwierig ist. Bereits eine einzige Fehlstelle in dem gesamten Sensor führt zur Funktionsunfähigkeit. Es muß daher eine gleichmäßig gute Mikrostrukturqualität über makroskopisch große Bereiche des Substrats erreicht werden.

## **5.2. Anpassung des Beschleunigungssensordesigns an den Prozeß**

Zur Herstellung von Beschleunigungssensoren durch Abformung wurde das in [Stro95] und [Burb91] vorgestellte Design übernommen und an den neuen Herstellungsprozeß angepaßt. Diese Anpassung soll die in Abschnitt 3.2. und 3.3. beschriebenen Strukturverluste und Maßabweichungen, die gegenüber dem Röntgentiefenlithographieprozeß auftreten,

kompensieren. Ein Maskensatz, der dieses berücksichtigt, bestehend aus LIGA-Arbeitsmaske und optischen Lithographiemasken für Leiterbahn- und Opferschichtebene, wurde erstellt. Mit der fertigen LIGA-Arbeitsmaske werden durch Röntgentiefenlithographie und Galvanoformung Abformwerkzeuge hergestellt, die zur Abformung der komplementären Kunststoffstrukturen verwendet werden. Mit den optischen Lithographiemasken sollten sowohl Leiterbahn- als auch Opferschichtebene auf Keramiksubstraten vorstrukturiert werden.

### 5.2.1. Kompensation des Strukturverlusts beim Trockenätzprozeß

In Abschnitt 3.2. wurde beschrieben, daß durch den RIE-Prozeß zum Entfernen der Kunststoffrestschicht im Grund der abgeformten Struktur auch lateraler Abtrag an den Strukturen auftritt. Dieser laterale Abtrag kann jetzt, nachdem alle Prozeßgrößen analysiert sind, durch einen Vorhalt kompensiert werden. Die für die Berechnung des Vorhalts maßgeblichen Prozeßgrößen sind hier nochmals aufgelistet.

Prozeßgröße	Wert
Restschichtdicke	30 - 40 µm
Anisotropie	15

**Tab.5.1:** Maßgebliche Prozeßgrößen für die Kompensation des lateralen Strukturverlusts durch RIE.

Der Abtrag A pro Strukturkante errechnet sich nach der Formel:

$$A = \frac{\text{Restschichtdicke}}{\text{Anisotropie}} \quad (5.1)$$

Daraus ergibt sich:  $2.00 \mu\text{m} < A < 2.67 \mu\text{m}$ .

Mit diesen Werten wurden die lateralen Abmessungen der Beschleunigungssensorstrukturen sowohl des herkömmlichen, wie auch des temperaturkompensierten Designs an den Prozeß angepaßt. Im Prozeß zur Herstellung des Abformwerkzeugs treten kleine, aber bisher nicht systematisch untersuchte, Strukturverluste an den Kanten auf. Damit besteht die Gefahr, daß die Kondensatorspalte am Beschleunigungssensor zu eng werden und keine Bewegung der seismischen Masse mehr zwischen den Gegenelektroden möglich ist. Daher wurde im Design ein entsprechender Vorhalt berücksichtigt, der unter Umständen zur Folge hat, daß den



fertigen Sensoren unter Umständen geringfügig zu große Kondensatorspalte entstehen, was sich aber lediglich in einer kleineren Grundkapazität bemerkbar macht. Zur Korrektur besteht im CAD-System, das am IMT zur Erstellung der Röntgenmaskendesigns verwendet wird, die Möglichkeit, einen sogenannten 'Grow' auf jede Strukturkante vorzugeben. Dabei wird die Strukturkante so verschoben, daß mit der Eingabe eines Wertes die gesamte Struktur angepaßt wird. Der 'Grow' für die Strukturen wurde von Struktur zu Struktur variiert und zwar mit den Werten 2.5 µm, 3.0 µm und 3.5 µm. Mit diesen Werten sollte sichergestellt werden, daß auf jeden Fall Sensoren mit den richtigen Maßen hergestellt werden können.

### **5.2.2. Kompensation der durch den Abformprozeß verursachten Lageabweichungen**

Bei der Herstellung von Beschleunigungssensoren auf einer Opferschicht durch Röntgentiefenlithographie werden Masken mit den gleichen relativen Positionen der Strukturen zu den Justierkreuzen in der lichtoptischen Maske zur Herstellung der Opferschicht und der Röntgenmaske verwendet. Durch die Abformung von Mikrostrukturen auf einem Substrat, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient sich von dem des Abformwerkzeugs unterscheidet, treten Maßabweichungen auf, die in Abschnitt 3.3. untersucht wurden. Für die Herstellung von Beschleunigungssensoren durch Abformung auf einer Opferschicht war daher eine Anpassung der optischen Masken zur Strukturierung von Leiterbahn- und Opferschichtebene relativ zur Röntgenarbeitsmaske nötig, die zur Herstellung des Abformwerkzeugs genutzt wird. Dabei wurde das Designfeld der Masken von 20 \* 60 mm<sup>2</sup> in einzelne Strukturfelder unterteilt, von denen jedes einen Sensor aufnimmt. Für die Mitte jedes Strukturfeldes wurde die zu erwartende Maßabweichung zur Mitte des Designfeldes errechnet und das Strukturfeld entsprechend versetzt. Mit dieser Methode bleiben die Maßabweichungen, die innerhalb eines Strukturfeldes auftreten, unberücksichtigt. Dies ist im Fall des Beschleunigungssensors aber unproblematisch, da die Größe jedes Strukturfeldes 3 \* 5 mm<sup>2</sup> beträgt, und die Maßabweichungen im Bereich von 1 µm liegen.

In Abschnitt 3.3. wurden die Maßabweichungen auf einem Keramiksubstrat mit einer 180 µm dicken Restschicht im Mittel zu 72% des theoretischen Wertes von 0.732 µm/mm bestimmt. Die tatsächlich auftretenden Maßabweichungen werden, wie bereits in Abschnitt 3.3. erwähnt, weil die zu erwartende Restschicht kleiner als 180 µm sein wird, zwischen 72% und 100% des theoretischen Wertes liegen. Die Maßabweichungen können zu ±14% eingestellt werden, wenn sie zwischen den gerechneten und gemessenen Werten gemittelt werden. Dies ist für

diese Anwendung vollkommen ausreichend (vgl. Abschnitt 3.3.). Daher werden die Vorhalte beim Maskendesign auf 86% des theoretisch erwarteten Wertes gesetzt.

Zusätzlich tritt für den zur Abformung von Beschleunigungssensorstrukturen verwendeten Formstoff (vgl. Abschnitt 2.2.) ein anderer Temperaturunterschied zwischen Glasübergangs- und Umgebungstemperatur auf als bei den in Abschnitt 3.3. beschriebenen Messungen. Statt 100 K beträgt die Temperaturdifferenz in diesem Fall nur 90 K. Daher werden die Maßabweichungen auf das 0.9 fache des bis jetzt gerechneten Wertes reduziert, also auf 77%.

Die Maßabweichungen, die bei der Herstellung von Abformwerkzeugen auftreten, wurden in [Kalb94] untersucht. Hier wurden die Abweichungen zu + 0.125  $\mu\text{m}/\text{mm}$  bestimmt. Dieser Wert wird für diese Arbeit übernommen, da der gleiche Prozeß zur Werkzeugherstellung genutzt wird.

Damit setzt sich der beim Maskendesign insgesamt einzuhaltende Vorhalt für die Maßabweichungen zusammen aus:

Prozeßschritt	Maßabweichungen [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]
Abformung auf Keramik	0.560
Abformwerkzeugherstellung	0.125
Gesamt	0.685

**Tab.5.2:** Kompensation der Maßabweichungen bei der Herstellung von Beschleunigungssensoren.

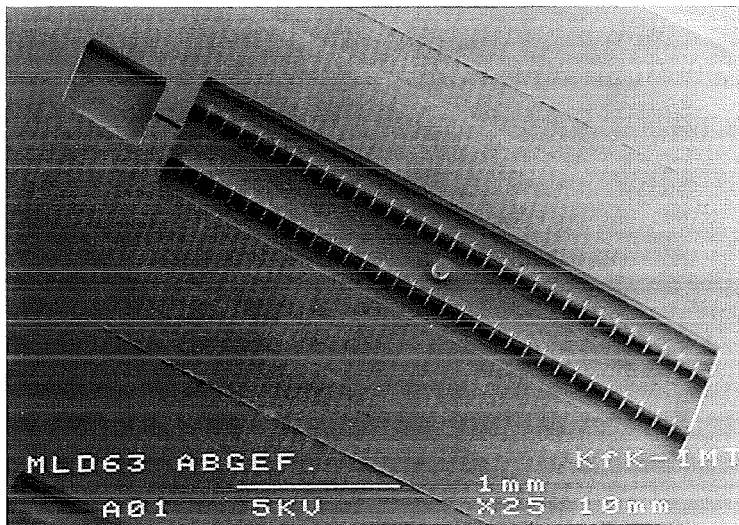
Die notwendige Kompensation für die Maßabweichungen für den gesamten Prozeß liegt somit bei 0.685  $\mu\text{m}/\text{mm}$ . Um diesen Wert wurden die Strukturen der optischen Masken gegenüber denen der Röntgenmaske vergrößert.

### 5.3. Herstellung der Komplementärstrukturen des Beschleunigungssensors

#### **5.3.1. Abformung schmaler Stege**

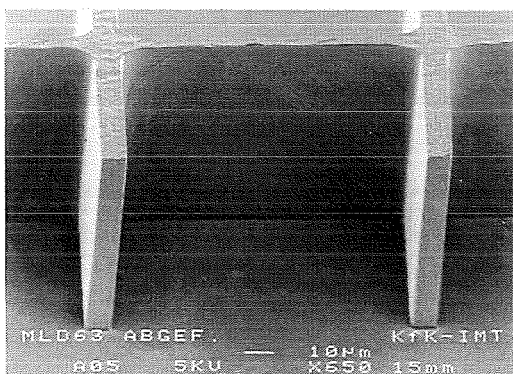
Abgeformte Stege werden in der metallischen Mikrostruktur, welche die Kunststoffstruktur invertiert, zu Gräben. Diese Gräben bilden beim Beschleunigungssensor unter anderem die Kondensatorspalte. In der Struktur des Beschleunigungssensors führt bereits ein einziger ausgerissener Steg zu einer unbrauchbaren Struktur, da dann in der metallischen Mikrostruktur eine feste Verbindung zwischen Gegenelektrode und seismischer Masse entsteht, die zu einem Kurzschluß führt. Die Versagensursache, die zum plastischen Verformen oder zum Ausreißen der PMMA-Stege führt, ist im Entformvorgang zu suchen. Nach dem Abformen befindet sich der PMMA-Steg im Spalt des Abformwerkzeugs. Dort haftet das PMMA an allen Kontaktflächen zum Abformwerkzeug. Es müssen Zugkräfte aufgebracht werden, um diese Haftkräfte zu überwinden und den PMMA-Steg aus dem Spalt des Abformwerkzeugs herauszuziehen. Die notwendige Kraft steigt mit der Höhe der Struktur an, da die Haftfläche zwischen PMMA und Abformwerkzeug größer wird. Ist die Strukturhöhe zu groß, kann die PMMA-Struktur die Kraft nicht mehr übertragen und reißt im Grund der Struktur ab. Daher wurde untersucht, bis zu welchem Aspektverhältnis der PMMA-Stege diese fehlerfrei hergestellt werden können.

Dazu wurde ein Abformwerkzeug mit einer Röntgenmaske, die Beschleunigungssensorstrukturen mit Stegbreiten von 5.3  $\mu\text{m}$ , 4.3  $\mu\text{m}$ , 3.3  $\mu\text{m}$  und 2.3  $\mu\text{m}$  Spaltbreite enthielt, mit 100  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe hergestellt. Dieses Abformwerkzeug wurde in den Formstoff, der in Abschnitt 2.2. beschrieben wurde, abgeformt. Die abgeformten Strukturen wurden im REM auf ihre Qualität untersucht. Dabei ergibt sich der in Abbildung 5.3 dargestellte Gesamteindruck.

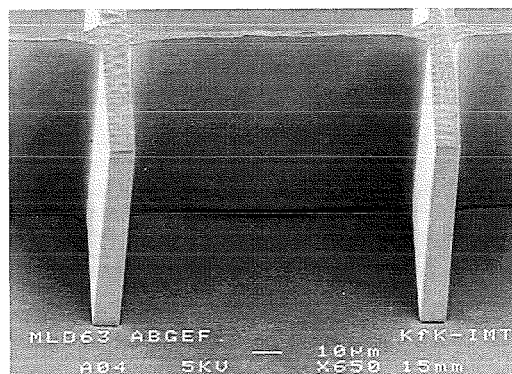


**Abb.5.3:** Überblick über eine Beschleunigungssensorstruktur zur Untersuchung der Abformung von PMMA-Stege. REM-Aufnahme mit 25facher Vergrößerung.

In dem Übersichtsbild ist bereits der PMMA-Steg, der später den Kondensatorspalt bildet, zu erkennen. Die Stege sind regelmäßig mit Querstützen versehen, die der Kunststoffwand den notwendigen Halt gegen Verkippen bieten. Die beiden folgenden Bilder zeigen jeweils ein einzelnes Segment dieses PMMA-Stege zwischen zwei Querstützen.



**Abb.5.4a:** PMMA-Steg mit 100 µm Höhe und 3.3 µm Breite. Die gesamte Struktur haftet fest auf dem Boden. REM-Aufnahme mit 650facher Vergrößerung.



**Abb.5.4b:** PMMA-Steg mit 100 µm Höhe und 2.3 µm Breite. Im Bereich des Stege ist die Struktur vom Substrat gerissen. REM-Aufnahme mit 650facher Vergrößerung.

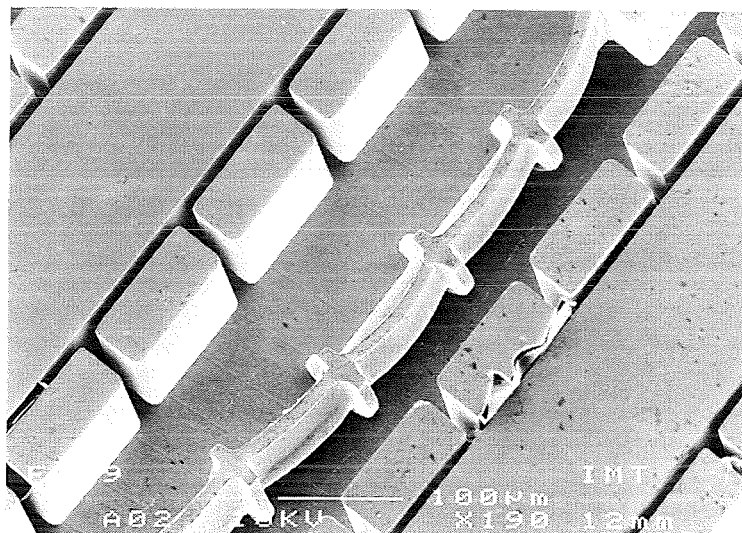
Aus diesen beiden Aufnahmen wird die derzeit existierende Grenze des Aspektverhältnisses der durch Abformung herstellbaren freistehenden LIGA-Mikrostrukturwände deutlich. Die nur 2.3 µm breite Wand zeigt Ablösungen vom Strukturgrund. Während des Galvanisierens einer solchen Probe trennt die PMMA-Wand nicht mehr den beweglichen vom unbeweglichen Teil einer Mikrostruktur. PMMA-Strukturen mit solchen Fehlern würden nicht zu

funktionsfähigen Beschleunigungssensoren führen. Die 3.3  $\mu\text{m}$  breite Wand hingegen zeigt keine Ablösungen vom Strukturgrund. Die Struktur ist fehlerfrei. Die Höhe der Mikrostrukturwand beträgt 100  $\mu\text{m}$  und die Breite 3.3  $\mu\text{m}$ . Das Aspektverhältnis von 30:1 reicht aus, Beschleunigungssensoren der geforderten Spezifikation durch Abformung herzustellen.

### 5.3.2. Abformung schmaler Gräben

Ein schmaler Graben in PMMA wird in der galvanisierten Mikrostruktur zu einem Metallsteg. Die Biegeungen der Beschleunigungssensoren stellen solche Metallstege dar. Zur Abformung eines Grabens in PMMA wird im Abformwerkzeug ein Steg benötigt. Dieser Steg im Abformwerkzeug darf durch das Einpressen des Werkzeugs in das PMMA nicht deformiert werden, da sonst das Werkzeug unbrauchbar wird. Dieses 'negative Aspektverhältnis' stellt eine weitere Bedingung für die Tauglichkeit des Prozesses zur Herstellung von Beschleunigungssensoren dar.

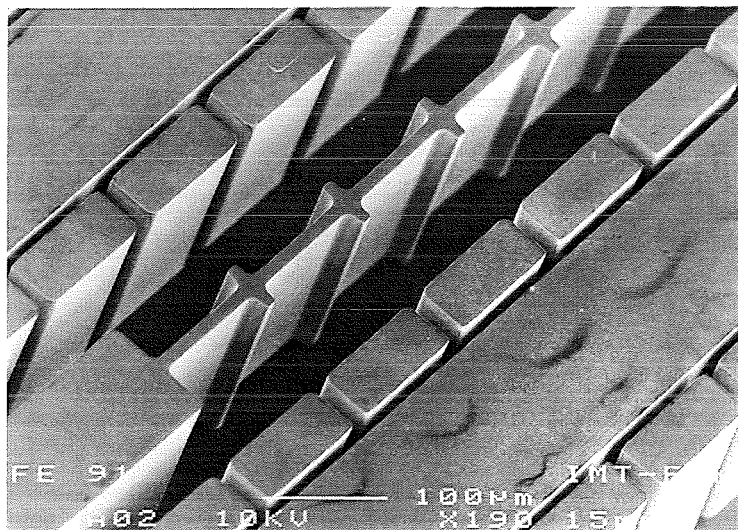
Die Abbildung 5.5 zeigt eine REM-Aufnahme einer deformierten Biegeung in einem Abformwerkzeug mit 100  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe.



**Abb.5.5:** Deformierter Steg im Abformwerkzeug, REM-Aufnahme mit 190facher Vergrößerung.

Die Breite des Stags in Abbildung 5.5 beträgt 11  $\mu\text{m}$  bei einer Höhe von 100  $\mu\text{m}$ . Die Aufnahme entstand nach dem 6. Abformversuch mit diesem Werkzeug. Dieses Werkzeug war zu diesem Zeitpunkt zur Abformung von Beschleunigungssensoren nicht mehr tauglich. Die hier verwendeten Abformbedingungen führen also zur Zerstörung des Abformwerkzeugs und müssen verbessert werden.

Ein entscheidender Faktor für die Haltbarkeit des Werkzeugs ist die Art und Weise, in der die Prägekraft aufgebracht wird, die das Werkzeug in den Formstoff preßt. Die in Abschnitt 4.3. beschriebene Universalprüfmaschine eröffnet in diesem Zusammenhang neue Möglichkeiten, verglichen mit der bisher am Institut vorhandenen Abformmaschine RIM 3. Die minimale Geschwindigkeit zum Aufbringen der Prägekraft betrug bei der RIM3 1 mm/s. Mit der in Kapitel 4 dargelegten Maschine sind Geschwindigkeiten bis zu 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  möglich. Da bei einer so kleinen Geschwindigkeit das Aufbringen der Prägekraft zu lange dauern würde, wurde untersucht, mit welchen sinnvollen Geschwindigkeiten die Prägekraft aufgebracht werden kann, ohne das Abformwerkzeug zu beschädigen. Folgende Vorgehensweise hat sich dabei als erfolgreich erwiesen: Zuerst wird eine kleine Prägekraft mit relativ großer Geschwindigkeit aufgebracht (mehrere 100 N mit 300  $\mu\text{m}/\text{min}$ ). Diese Kraft wird dann für einige Sekunden gehalten, wodurch der Temperaturgleich von Formstoff und Werkzeug sichergestellt wird. Anschließend wird mit kleiner Geschwindigkeit (100  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) die eigentliche Prägekraft (20000 N) angefahren. Die Geschwindigkeit ist also auf einen Wert von  $1.67 \cdot 10^{-3}$  des früheren Minimalwerts reduziert worden, und die Dauer des Prozesses zum Kraftanlegen wird auf 5 Minuten begrenzt. Mit diesen Werten wurden Abformversuche mit einem Abformwerkzeug mit 200  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe und einer Stegbreite von 11  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Die Abbildung 5.6 zeigt eine Biegezung des Abformwerkzeugs nach 40 Abformungen.



**Abb.5.6:** Biegezung mit 11  $\mu\text{m}$  Breite im Abformwerkzeug. Die Strukturhöhe beträgt 200  $\mu\text{m}$ . REM-Aufnahme mit 190facher Vergrößerung.

Die Abbildung 5.6 zeigt, daß die Biegezung bei gleicher Breite und dabei doppelter Höhe durch die Abformung nicht deformiert ist. Damit stehen Prozeßparameter zur Abformung von tiefen Gräben zur Verfügung, die das Abformwerkzeug nicht beschädigen.

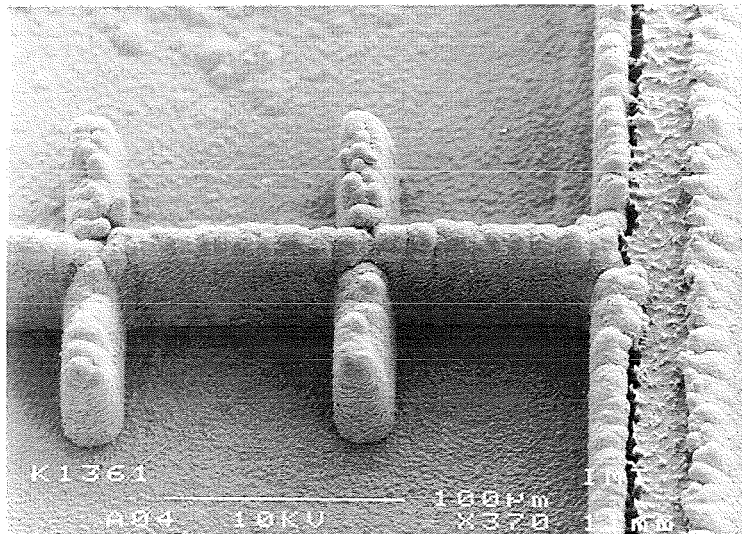
### 5.3.3. Auswahl der Opferschicht

Die zur Diskussion stehenden Materialien, die am IMT standardmäßig als Opferschicht verwendet werden, sind Titan und Kupfer. Zur Auswahl der richtigen Opferschicht wurden auf Keramiksubstraten zwei Kombinationen von Leiterbahn- und Opferschichtebene getestet. Die beiden Kombinationen sind Tabelle 5.3 aufgeführt.

	Leiterbahn	Opferschicht
Kombination 1	Titan	Kupfer
Kombination 2	Wolfram	Titan

**Tab.5.3:** Kombinationen von Leiterbahn- und Opferschichtebene.

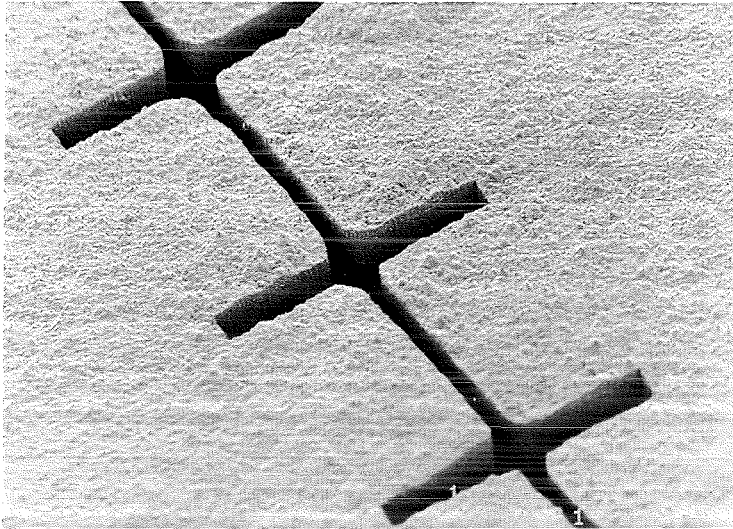
Die Abbildung 5.7 zeigt eine Probe, auf der durch Abformung und Reaktives Ionenätzen auf Wolfram/Titan Kunststoffstrukturen hergestellt wurden. Die galvanische Abscheidung wurde kurz nach dem Start unterbrochen.



**Abb.5.7:** Kunststoffwand mit Metallabscheidung an den Seitenflächen und anschließendem starkem Höhenwachstum. REM-Aufnahme mit 370 facher Vergrößerung.

Auf der REM-Aufnahme ist gut sichtbar, daß die Metallabscheidung zwar auf dem Substratgrund startet, dann aber an den Seitenwänden, die aus Kunststoff bestehen, verstärkt stattfindet. Die Kunststoffstrukturen werden überwachsen, wodurch die Struktur unbrauchbar wird. Die Metallabscheidung an der Wand deutet auf elektrische Leitfähigkeit der Wand hin.. Diese elektrische Leitfähigkeit der Kunststoffwand kann darauf zurückgeführt werden, daß

während des Reaktiven Ionenätzens, wenn die Kunststoffrestschicht teilweise entfernt ist, Material der Opferschicht abgetragen wird, und sich an den Seitenwänden niederschlägt.



**Abb.5.8:** REM-Aufnahme einer galvanisierten Struktur auf einer Kupferopferschicht. Es ist keine Übergalvanisierung zu erkennen. REM-Aufnahme mit 350facher Vergrößerung.

Die Abbildung 5.8 zeigt eine Struktur, die nach denselben Prozessschritten und -parametern prozessiert wurde, nach der vollständigen Galvanik und dem Entfernen des Kunststoffs auf einer Kupferopferschicht.

Diese Struktur zeigt keine Kennzeichen des galvanischen Überwachsens. Dies kann darauf zurückzuführen sein, daß die Kupferopferschicht durch das Reaktive Ionenätzen entweder nicht abgetragen wird oder daß das abgetragene Kupfer im  $O_2$ -Plasma vollständig oxidiert und damit nicht leitfähig an den Kunststoffwänden niedergeschlagen wird.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird Kupfer als Opferschicht für die Herstellung von Beschleunigungssensoren durch Abformung verwendet.



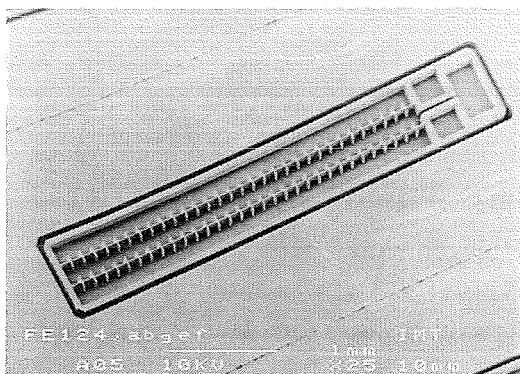
#### 5.4. Herstellung von Beschleunigungssensoren

Mit den in Abschnitt 5.2. beschriebenen Maßnahmen zur Anpassung des Beschleunigungssensors an den Abformprozeß wurden mit folgenden Prozeßparametern die Komplementärstrukturen des Beschleunigungssensors abgeformt (vgl. Tab.5.4):

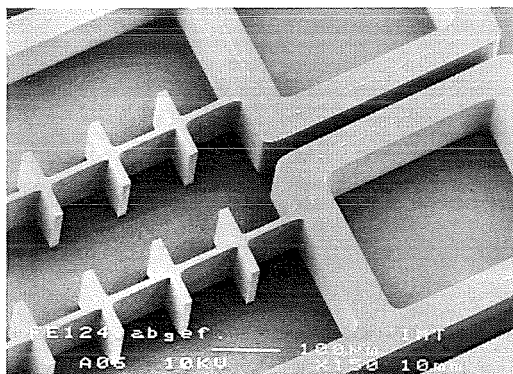
Prozeßschritt	Beschreibung
Substratmaterial	Keramik HA995 <sup>1</sup> 800 µm Dicke
Leiterbahnebene	Titan, 1 µm Dicke
Opferschicht	Kupfer, 4 µm Dicke
Formstoff	Plexit60
Strukturhöhe Abformwerkzeug	100 µm
Abformtemperatur	210 °C
Abformkraft	20000 N
Überdeckung Abformung zu Substrat	besser 5 µm
Restschichtdicke	35 ± 4 µm

**Tab.5.4:** Prozeßparameter zur Herstellung der Komplementärstrukturen der Beschleunigungssensoren auf Keramiksubstraten.

Die abgeformten Strukturen sind in den Abbildungen 5.9 - 5.11 dargestellt.



**Abb.5.9a:** Gesamtansicht der abgeformten Sensorkomplementärstruktur in PMMA. REM-Aufnahme 25fache Vergrößerung.

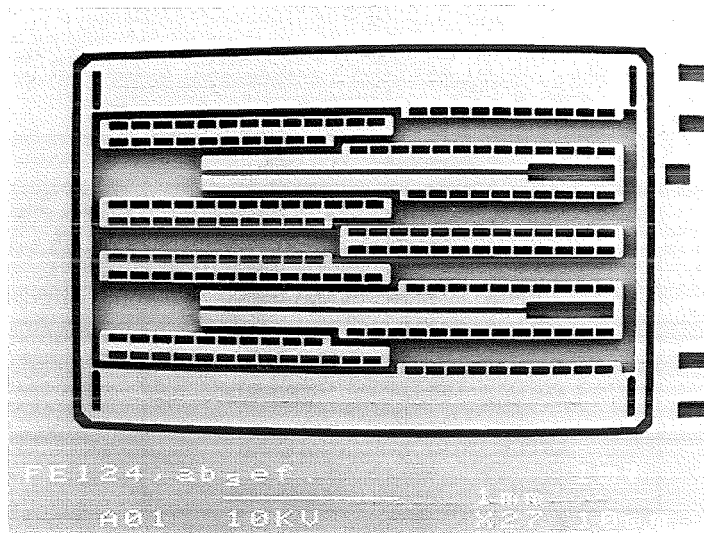


**Abb.5.9b:** Komplementärstruktur der Kondensatorstege und der Biegezunge in PMMA. REM-Aufnahme 150fache Vergrößerung.

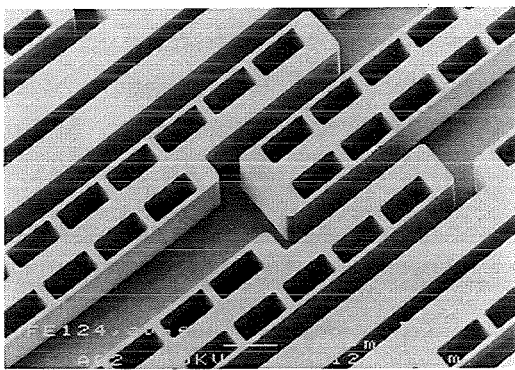
Die Abbildungen zeigen die abgeformten 100 µm hohen Komplementärstrukturen des herkömmlichen Beschleunigungssensors. Die empfindlichen PMMA-Stege, die

<sup>1</sup> Fa. NGK Spark Plug Europe GmbH, Ratingen

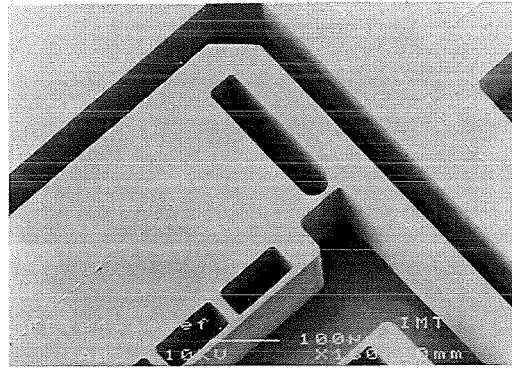
Gegenelektroden und seismische Masse voneinander trennen, sind gut zu erkennen und fehlerfrei.



**Abb.5.10:** Abgeformte Struktur des temperaturkompensierten Sensors. REM-Aufnahme 27fache Vergrößerung.



**Abb. 5.11a:** Zentrum der Struktur mit Gabelanordnung. REM-Aufnahme 120fache Vergrößerung.



**Abb.5.11b:** PMMA-Wand zwischen seismischer Masse und Anschlag. REM-Aufnahme 160fache Vergrößerung.

Abbildung 5.10 läßt erkennen, daß die Struktur des temperaturkompensierten Präzisions-sensors wesentlich komplizierter und aufwendiger ist. An die Abformung werden erheblich höhere Ansprüche gestellt als beim Ur-Design, da die Sensorgrundfläche näherungsweise gleich bleibt, aber die Strukturdichte für eine höhere Sensorkapazität wesentlich erhöht ist. Man erkennt, daß auch diese Struktur fehlerfrei im Kunststoff abgebildet ist. Das wichtigste Maß für die ordnungsgemäße Funktion der Sensoren ist die Breite des Luftspalts zwischen Gegenelektroden und seismischer Masse. Nach dem Abformen wird dieser Spalt von den bereits in Abschnitt 5.2. erwähnten PMMA-Stege gebildet. Die Sollbreite dieser Stege beträgt beim funktionsfähigen Sensor  $4.0 \mu\text{m}$  [Stro95]. Unter Berücksichtigung der in

Abschnitt 5.2. dargelegten notwendigen Vorhalte sollen sich nach dem Abformen Spaltbreiten von 9.0  $\mu\text{m}$ , 10.0  $\mu\text{m}$  und 11.0  $\mu\text{m}$  ergeben. Die tatsächlichen Spaltbreiten wurden mit 7.7  $\mu\text{m}$ , 8.7  $\mu\text{m}$  und 9.8  $\mu\text{m}$  gemessen<sup>1</sup>.

Die Substrate wurden anschließend durch Reaktives Ionenätzen behandelt. Dabei wurden die in Abschnitt 3.2. ermittelten Prozeßparameter eingestellt (vgl. Tab.5.5).

Prozeßparameter	Wert
Gas	O <sub>2</sub>
Flußrate	40 sccm
Temperatur	280 K
Leistung	320 W
Druck	1.3 Pa
Zeit	100 min

Tab.5.5: Prozeßparameter zum Reaktiven Ionenätzen.

Anschließend wurde in einem Nickelsulfamatbad zwischen den PMMA-Mikrostrukturen bei einer Stromdichte von 1 A/dm<sup>2</sup> [Hars88] 60 - 70  $\mu\text{m}$  hoch Nickel abgeschieden, das PMMA daraufhin in siedendem Ethylacetat gelöst und die Kupferopferschicht in einer Atzlösung<sup>2</sup> entfernt. Nach diesem Prozeßschritt standen funktionsfähige Beschleunigungssensoren zur Verfügung. Die Abbildungen 5.12 bis 5.14 zeigen die fertig prozessierten Sensoren [Both95a].

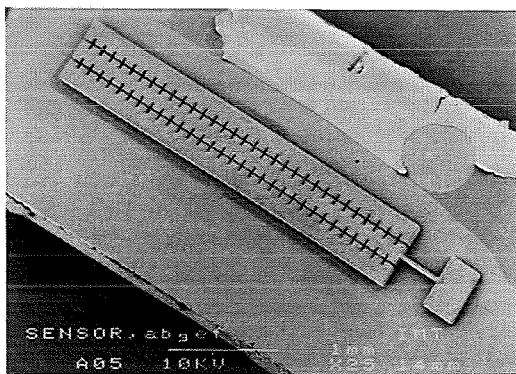


Abb.5.12a: Gesamtansicht des Beschleunigungssensors. REM-Aufnahme 25fache Vergrößerung.

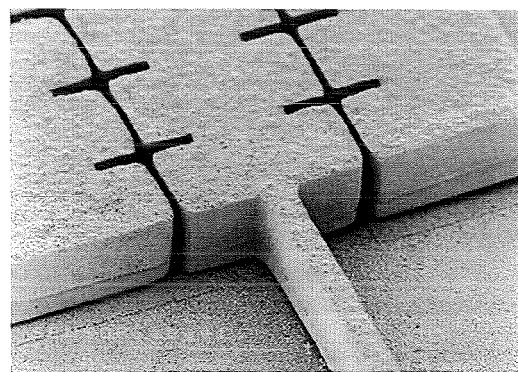


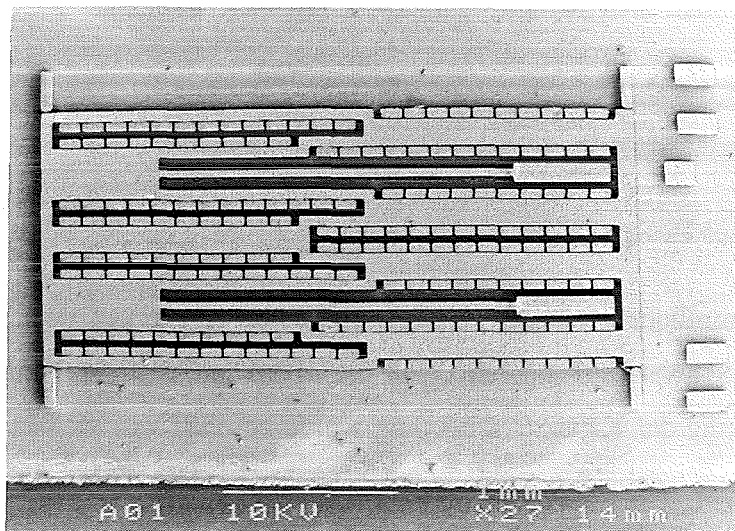
Abb.5.12b: Biegezone und seismische Masse zwischen den Gegenelektroden. REM-Aufnahme 120fache Vergrößerung.

<sup>1</sup> MFK II, Fa. Kappa, Gleichen

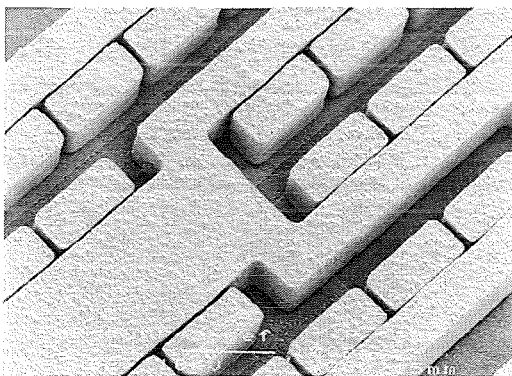
<sup>2</sup> NaClO<sub>2</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>OH in wässriger Lösung

Die Abbildungen 5.12 a und b zeigen den herkömmlichen Beschleunigungssensor. Das rechte Bild zeigt deutlich in der Strukturwand einen Grat. Dieser Grat ist von der Kunststoffwand auf die Nickelstruktur während der Galvanik übertragen worden. In der Kunststoffstruktur entsteht dieser Grat, weil die PMMA-Wände oberhalb dieses Grates während der gesamten RIE-Dauer dem Plasma ausgesetzt sind, während die untere Wandstruktur nach dem Abformen zunächst durch die Restschicht geschützt ist. Beim Entfernen der Restschicht wird dieser Teil der Strukturflanken mit zunehmender Ätzdauer immer weiter freigelegt. Daher sind die Strukturen unterhalb dieses Grates leicht kegelförmig, während die Strukturen oberhalb senkrecht zur Substratoberfläche stehen (vgl. Abschnitt 3.2.).

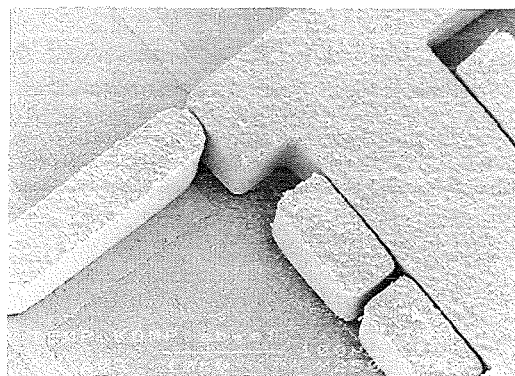
In den nachfolgenden Abbildungen sind die temperaturkompensierten Sensoren dargestellt, die in einer Prozeßfolge mit den herkömmlichen Sensoren hergestellt wurden.



**Abb.5.13:** Gesamtansicht des temperaturkompensierten Beschleunigungssensors. REM-Aufnahme 27fache Vergrößerung.



**Abb.5.14a:** Gabelförmige Anordnung der seismischen Masse in der Mitte. REM-Aufnahme 200fache Vergrößerung.



**Abb.5.14b:** Überlastschlag der seismischen Masse im Außenbereich. REM-Aufnahme 250fache Vergrößerung.

Die Gesamtansicht zeigt nicht nur den Sensor selbst; auch die Leiterbahnen, auf denen die feststehenden Strukturen aufgebaut sind, sind gut zu erkennen. Rechts neben dem Sensor befinden sich die Kontaktblöcke zum Anbringen der Bonddrähte, da auf die Leiterbahnebene aus Titan selbst nicht gebondet werden kann. Daher werden die Kontaktblöcke aus Nickel zusammen mit dem Sensor auf dem Substrat erzeugt. Die Abbildung 5.14b zeigt den Anschlag, der verhindert, daß die seismische Masse bei Überlast an die Gegenelektroden anschlägt. Der Spalt zwischen Anschlag und seismischer Masse ist daher  $1\ \mu\text{m}$  enger als der Kondensatorspalt und deshalb mit einer Breite von  $3\ \mu\text{m}$  die kritischste Struktur.

Die Vermessung der Kondensatorspaltbreiten der Sensoren ergab für die drei verschiedenen Kompensationen (vgl. Abschnitt 5.2.1.) Werte von  $3.5 \pm 0.2\ \mu\text{m}$ ,  $4.5 \pm 0.2\ \mu\text{m}$  und  $5.3 \pm 0.2\ \mu\text{m}$ . Damit stehen Sensoren mit Kondensatorspaltbreiten zur Verfügung, die zur Messung von Beschleunigungen geeignet sind.

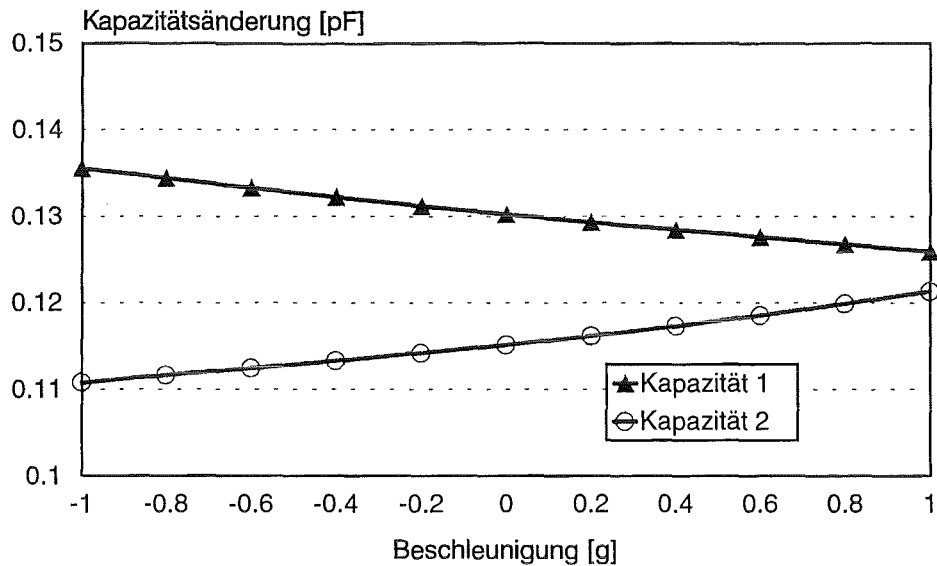
## **5.5. Messungen an durch Abformung und Galvanoformung hergestellten Beschleunigungssensoren**

### **5.5.1. Herkömmliches Design**

Ein Sensor des herkömmlichen Designs mit einer Höhe von  $65\ \mu\text{m}$  und einer Spaltweite von  $3.6\ \mu\text{m}$  wurde im Schwerfeld gedreht und die dabei auftretende Kapazitätsänderung vermessen. Zur Messung der Kapazitätsänderung wurde am IMT ein Meßstand [Stro95] zur statischen Vermessung der Sensoren durch Drehung im Schwerfeld mit einer Kapazitätsmeßbrücke<sup>1</sup> aufgebaut. Es wurden beide Kapazitäten, welche die seismische Masse mit jeder der beiden Gegenelektroden bildet (vgl. Abb.5.1), vermessen. Das Meßergebnis ist in Abbildung 5.15 dargestellt.

---

<sup>1</sup> Meßbrücke HP 4278, Fa. Hewlett Packard, Waldbronn



**Abb.5.15:** Kapazitätsänderung bei Drehung des herkömmlichen Sensors im Schwerfeld. Die Kapazitäten 1 und 2 werden von jeweils einer Gegenelektrode mit der seismischen Masse gebildet (vgl. Abb.5.1).

Die Meßergebnisse zeigen eindeutig die Beweglichkeit der seismischen Masse zwischen den Gegenelektroden. Theoretisch ist zu erwarten, daß die gegenüberliegenden Kapazitäten in der Ruhelage gleich groß sind. Dies ist nach der Messung aber nicht der Fall und kann mit unterschiedlicher Länge und daher unterschiedlicher Streukapazität der Bonddrähte erklärt werden, deren Länge experimentell nicht besser eingestellt werden kann. Der Sensor zeigt bei einer Grundkapazität von ca. 0.1 pF eine Empfindlichkeit von 0.01 pF/g. Umgerechnet auf die Gesamtkapazität ergibt sich eine Empfindlichkeit von 10%  $C_0/g$ .

### 5.5.2. Temperaturkompensierter Sensor

In [Stro95] wurden temperaturkompensierte Sensoren durch Röntgentiefenlithographie hergestellt und vermessen. In dieser Arbeit wurden diese Sensoren durch Abformung hergestellt. In der Tabelle 5.6 sind die geometrischen Daten der beiden Sensoren zusammengestellt. Daraus lassen sich die elektrischen und mechanischen Daten nach [Stro95] berechnen. Zusätzlich sind die Meßdaten der durch Abformung hergestellten Sensoren zusammengestellt.

Wert	Röntgentiefenlithographie	Abformung
geometrische Meßdaten der Sensorstruktur		
Höhe h	200 $\mu\text{m}$	65 $\mu\text{m}$
Spaltweite s	4.0 $\mu\text{m}$	2.2 $\mu\text{m}$
Biegezugbreite b	14.5 $\mu\text{m}$	36 $\mu\text{m}$
Berechnete elektrische und mechanische Daten		
Grundkapazität $C_0$	4.5 pF	2.67 pF
Empfindlichkeit $E_{\text{soil}}$	20% $\cdot C_0/g$	1.3% $C_0/g$
Resonanzfrequenz	557Hz	2180Hz
Kapazitätsänderung durch Temperaturänderung von -10 °C auf +100 °C	10 fF	10 fF
Gemessene elektrische und mechanische Größen		
Grundkapazität	4.5 pF	2.67 pF
Empfindlichkeit	20% $C_0/g$	1.3% $C_0/g$
Resonanzfrequenz	557Hz	2300Hz
Dämpfung	0.1	0.1
Kapazitätsänderung durch Temperaturänderung von -10 °C auf +100 °C	10 fF	10 fF

**Tab.5.6:** Daten der temperaturkompensierten Beschleunigungssensoren.

Es wurden funktionsfähige Muster des temperaturkompensierten Beschleunigungssensors hergestellt. Diese Muster zeigten trotz der Abweichung der geometrischen Daten des Sensors von den optimalen Maßen, die in [Stro95] vorgeschlagenen wurden, sehr gute Meßergebnisse. Die Abweichung ist auf prozeßtechnische Gründe zurückzuführen.

Die Messungen, die an dem temperaturkompensierten Sensor durchgeführt wurden, sind nachfolgend dargestellt und kommentiert. Die Abbildung 5.16 zeigt die Sensorkapazität in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Beschleunigungen.

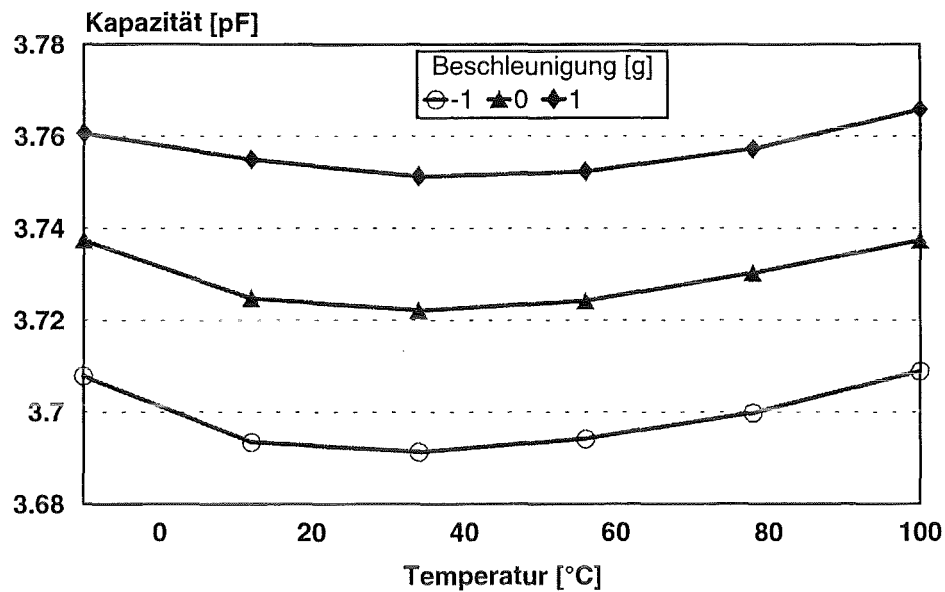


Abb.5.16: Kapazitätsänderung für verschiedene Beschleunigungen als Funktion der Temperatur.

Die gemessene Grundkapazität des Sensors liegt bei ca. 3.7 pF. Gegenüber dem Sollwert ist dies um ca. 1 pF zu groß. Das liegt an den Zuleitungen des Sensors zum Meßgerät, deren Kapazität zu 1 pF berechnet wurde [Stro95b]. Die gemessene Kapazitätsänderung für eine Beschleunigung von 1g beträgt 0.035 pF. Bezogen auf die Grundkapazität von 2.67 pF entspricht dieser Wert einer Empfindlichkeit von 1.35%  $C_0/g$ . Die durch die Temperaturänderung von -10 °C bis +100 °C bewirkte Kapazitätsänderung liegt bei ca. 10 fF.

Der Frequenzgang des abgeformten Sensors [Both95b] ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

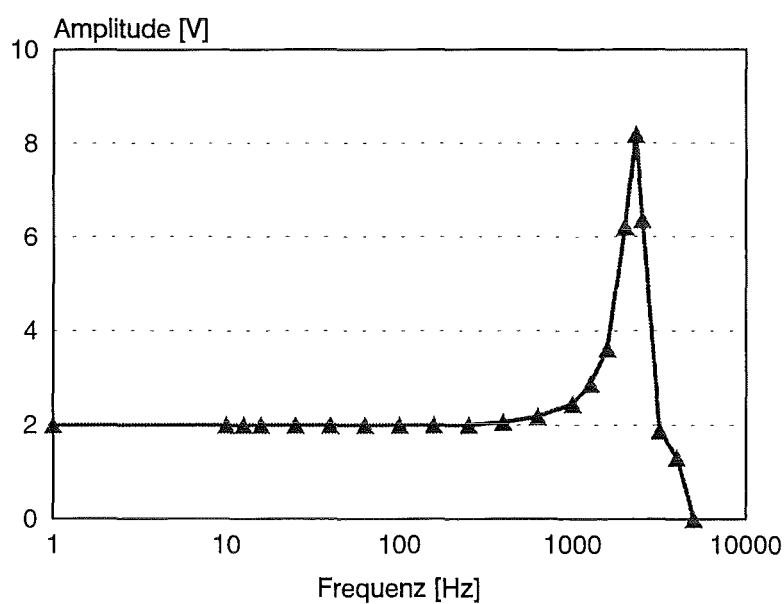


Abb.5.17: Frequenzgang des Sensors.



Die Eigenfrequenz kann aus der Abbildung 5.17 zu 2300 Hz bestimmt werden. Aus dem Amplitudenverhältnis bei niederfrequenter Anregung und Resonanzfrequenz läßt sich die Dämpfung des Sensors bestimmen. Diese beträgt bei dem durch Abformung hergestellten Sensor 0.1.

Die Meßdaten von Grundkapazität und Empfindlichkeit zeigen beide eine sehr gute Übereinstimmung mit den aus den geometrischen Abmessungen berechneten Daten von 2.7 pF Grundkapazität und einer Empfindlichkeit von 1.35%  $C_0/g$ . Die gemessene Kapazitätsänderung über den Temperaturbereich von 10 fF entspricht den Berechnungen und ist sehr gut mit den Daten der durch Röntgentiefenlithographie hergestellten Sensoren vergleichbar. Die Resonanzfrequenz zeigt ebenfalls gute Übereinstimmung von Berechnung und Experiment. Die Dämpfung des Sensors wird durch die Herstellung durch Abformung nicht verändert und beträgt ebenfalls 0.1.

Damit kann konstatiert werden, daß unter der Berücksichtigung der kleineren Strukturhöhe die durch Abformung hergestellten Sensoren denen, die durch Röntgentiefenlithographie hergestellt wurden, in ihrer Qualität nicht nachstehen. Durch eine Vergrößerung der Strukturhöhe bei Verwendung von Kunststoffen, mit noch größerer Zugfestigkeit bei gleichen Entformeigenschaften kann dieser Nachteil behoben werden.

## 6. Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Herstellung von beweglichen und feststehenden Mikrostrukturen auf einem Substrat in einer Prozeßsequenz durch Abformung entwickelt. Mit diesem Verfahren wurden erstmals bewegliche Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren auf dem Weg der Kunststoffabformung hergestellt. Die wesentlichen Prozeßschritte dieses Verfahrens, mit dem als Funktionsmuster Beschleunigungssensoren hergestellt wurden, sind: Positionierte Abformung eines LIGA-Abformwerkzeugs, Reaktives Ionenätzen und Galvanoformung. Dabei bildet die positionierte Abformung den zentralen Punkt der Entwicklung. Dieser Verfahrensschritt mußte von Grund auf entwickelt werden und konnte auf ein so hohes Qualitätsniveau gebracht werden, daß auch Strukturen mit hohen Anforderungen in Bezug auf Strukturtreue und Aspektverhältnis hergestellt werden können.

Bei dem Verfahren zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen durch positionierte Abformung wird ein Keramiksubstrat mit einer Titan-Leiterbahnebene und einer Kupfer-Opferschichtebene vorstrukturiert. Darauf wird eine thermoplastische PMMA-Schicht aufgebracht. Diese Kunststoffschicht wird durch Abformung eines einstufigen LIGA-Abformwerkzeugs strukturiert. Zur Abformung dieser LIGA-Mikrostrukturen auf dem Substrat wurde für verschiedene Strukturhöhen die Abhängigkeit der Restschichtdicke von den Prozeßgrößen Umformkraft und -temperatur ermittelt. Mit diesen Parametern kann die Restschichtdicke mit einer Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  auf Werte bis hinunter zu  $30 \mu\text{m}$  eingestellt werden (vgl. Abschnitt 3.1.). Die bei der Abformung verbleibende Kunststoffrestschicht wird durch Reaktives Ionenätzen vollständig vom Substrat entfernt und damit die Opferschicht freigelegt. Das Reaktive Ionenätzen der Kunststoffstrukturen wird im  $\text{O}_2$ -Plasma durchgeführt. Es wurden Prozeßparameter experimentell ermittelt, mit denen eine Abtragsrate von  $25 \mu\text{m/h}$  und eine Anisotropie von 15 erreicht wird (vgl. Abschnitt 3.2.). Durch die Galvanoformung wird Nickel zwischen den Kunststoffstrukturen auf dem Substrat abgeschieden. Zur Fertigstellung der Strukturen werden der verbliebene Kunststoff und die Opferschicht selektiv zum Nickel und zum Substrat entfernt.

Die Strukturierung der Kunststoffschicht bei dem entwickelten Prozeß muß mit größter lateraler Genauigkeit zu Leiterbahnen und Opferschicht erfolgen. Hierfür wurde der Prozeß zur positionierten Abformung entwickelt. Schlüsselfunktion hatte dabei die Führungsgenauigkeit der zueinander bewegten Maschinenteile der Abformvorrichtung. Dieses Problem wurde durch PTFE-Buchsen mit einstellbarer Vorspannung gelöst. Die

Führungsgenauigkeit von Maschinenober- zu -unterteil mit diesen Lagern wurde unter Abformbedingungen reproduzierbar mit  $4 \pm 1 \mu\text{m}$  gemessen.

Zur Justierung von Abformwerkzeug und Substrat wurde ein Verfahren entwickelt und eine Apparatur aufgebaut. Es wurde gezeigt, daß diese Apparatur über viele Abformversuche hinweg mit einer Umformtemperatur von  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Kraft von  $20 \text{ kN}$  eine Ausrichtung der abgeformten Mikrostrukturen zu den auf dem vorstrukturierten Substrat befindlichen mit einer Genauigkeit von  $\pm 8 \mu\text{m}$  leistet (vgl. Abschnitt 4.3.).

Eine der hervorstechendsten Eigenschaften des LIGA-Verfahrens sind die senkrecht zur Substratoberfläche stehenden Mikrostrukturwände und das hohe Aspektverhältnis. Es wurde gezeigt, daß durch Abformung von LIGA-Abformwerkzeugen in thermoplastisches PMMA für Stege im Kunststoff über große Bereiche der Designfläche nutzbare Aspektverhältnisse von 30 erreicht werden können. Für Gräben im Kunststoff wurde durch die Herabsetzung der Umformgeschwindigkeit um 3 Größenordnungen gegenüber dem bisherigen Wert das nutzbare Aspektverhältnis von bisher 5 auf 18 erhöht.

Alle analysierten Phänomene wurden beim Design eines Maskensatzes zur Herstellung von Beschleunigungssensoren, die bisher durch Röntgentiefenlithographie hergestellt wurden, berücksichtigt. Mit diesem Maskensatz wurden  $100 \mu\text{m}$  hohe LIGA-Abformwerkzeuge hergestellt und nach dem beschriebenen Verfahren Beschleunigungssensoren gefertigt. Diese Sensoren haben eine Höhe von  $60 \div 70 \mu\text{m}$  und eine Spaltbreite von  $3.5 \div 5.3 \mu\text{m}$ . Sensoren mit diesen geometrischen Daten zeigen bereits gute Leistungsdaten. Ein durch Abformung hergestellter Sensor des Ur-Designs wurde durch Drehung im Schwerfeld vermessen. Die Grundkapazität des Sensors betrug  $0.1 \text{ pF}$  bei einer Empfindlichkeit von  $10\% C_0/g$ . Ein ebenso hergestellter Sensor des temperaturkompensierten Designs mit einer Höhe von  $65 \mu\text{m}$  und einer Spaltbreite von  $2.2 \mu\text{m}$  wurde zunächst durch Drehung im Schwerfeld bei Temperaturen von  $-10 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$  vermessen. Die Grundkapazität des Sensors betrug  $2.7 \text{ pF}$  bei einer Empfindlichkeit von  $1.35\% C_0/g$ . Die Kapazitätsänderung der Sensoren über den Temperaturbereich betrug dabei ca.  $10 \text{ fF}$ . Mit diesen Leistungsdaten sind die durch Abformung hergestellten Sensoren durchaus mit den durch Röntgentiefenlithographie hergestellten vergleichbar, wenn man die kleinere Strukturhöhe berücksichtigt.

Die Kompatibilität des vorgestellten Prozesses zur CMOS-Technik wurde überprüft. Dazu wurden auf  $4''$ -Wafers, die CMOS-Schaltkreise enthielten, feststehende LIGA-

Mikrostrukturen erzeugt. Auf den Wafern wurden die Process Control Monitors vor und nach den LIGA-Prozeßschritten vermessen; dabei konnten keine Abweichungen außerhalb der Toleranzgrenze festgestellt werden. Die Schaltkreise wurden durch die LIGA-Prozeßschritte in keiner Weise beeinflusst. Die Kompatibilität dieses Verfahrens zur CMOS-Technik ist dadurch nachgewiesen.

Eine Aufgabe für die weitere Entwicklung ist es, die Kapazität der Sensoren zu erhöhen. Dazu muß die Strukturhöhe vergrößert werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Qualifizierung eines anderen Kunststoffes für den Abformprozeß, der über höhere Festigkeiten als PMMA verfügt und damit die Entformbarkeit noch größerer Strukturhöhen bei gleicher Breite ermöglicht. Gleichzeitig muß dieser Kunststoff durch RIE mit hohen Abtragsraten bei gleicher Anisotropie strukturierbar sein. Dazu sind Versuche mit Polyoxymethylen (POM) in Vorbereitung. Aber auch die in Abschnitt 2.2 verworfenen Prozeßschritte bergen noch ein Potential, wenn es gelingt, die erwähnten Probleme zu beseitigen.

Für die Integration von CMOS-Schaltkreisen und beweglichen LIGA-Mikrostrukturen wurden die Grundlagen gelegt. Die hier vorgestellten Prozesse können auf Siliziumsubstrate übertragen werden durch eine Anpassung der lichteptischen Masken zur Strukturierung von Opferschicht- und Leiterbahnebene an den Ausdehnungskoeffizienten des Siliziums. Damit wurden im Rahmen dieser Arbeit die prozeß- und anlagentechnischen Voraussetzungen zur Herstellung von Mikrosystemen auf Silizium geschaffen. Dabei können zuerst durch den CMOS-Prozeß geeignete integrierte Schaltkreise auf dem Substrat hergestellt werden. Anschließend können auf dem Substrat mit dem Abform- und Galvanikprozeß positioniert zur Mikroelektronik z. B. Beschleunigungssensoren als Sensoren oder elektrostatische Motoren als Aktoren auf dem Substrat erzeugt werden.

Mit den in dieser Arbeit entwickelten Prozessen können Wege zur kostengünstigen Massenfertigung beschritten werden. Damit ist die Grundlage zum integrierten Aufbau von Mikrosystemen durch eine Kombination von Integrierten Schaltkreisen mit der LIGA-Technik geschaffen.

## Literaturverzeichnis

- [Albr66] W. Albring: Angewandte Strömungslehre. Verlag Theodor Steinkopf, 3. Auflage (1966)
- [Alle93] M. G. Allen: Polyimide-based processes for the fabrication of thick electroplated microstructures, Digest of Technical Papers, Transducers '93, S. 60 - 65, Yokohama, Japan, 7. - 10. Juni 1993
- [Beck86] E. W. Becher, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer: Fabrication of Microstructures with high Aspect Ratios and Great Structural heights by Synchrotron Radiation Lithography, Electroforming and Plastic Moulding (LIGA-Process), Microelectronic Engineering 4, Seiten 35 - 56, 1986
- [Bant93] Dr. Bantien, Fa. Bosch/Reutlingen Bereich Halbleiterfertigung, persönliche Mitteilung
- [Börn95] M. Börner, W. Schomburg: Movable Microstructures Made by a Sub-Micron LIGA-Process, zur Veröffentlichung als Vortrag bei HARMST'95, Karlsruhe, Deutschland, 3. - 5. Juli 1995
- [Both94] A. Both, M. Börner, K. Kadel, H. Kalb, R. Ruprecht, G. Stern: Verfahren zur Herstellung gestufter Mikrostrukturen, Patentanmeldung P4434009.5, 23.9.1994
- [Both95a] A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K.D. Müller, R. Ruprecht, M. Strohrmann: Molding Process with high Alignment Quality, Tagungsband MEMS'95, S. 186 - 190, Amsterdam Niederlande, 29. Januar - 2. Februar 1995
- [Both95b] A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K.D. Müller, M. Strohrmann: Fabrication of LIGA Acceleration Sensors by Aligned Molding, zur Veröffentlichung als Vortrag bei HARMST'95, Karlsruhe, Deutschland, 3. - 5. Juli 1995
- [Both95c] A. Both, W. Bacher, R. Ruprecht: Quasimonolithic Integration of LIGA Microstructures and Microelectronic Circuits, eingeladene Veröffentlichung in Sensors and Materials, MYU Scientific Publishing Division, 2-32-3 Sendagi, Bunkyo -ku Tokio 113, Japan

- [Burb91] C. Burbaum, P. Bley, J. Mohr: Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik, Dissertation, Universität Karlsruhe 1991
- [BoMa84] D. Bollinger, S. Ida, O. Matsumoto: Reactive Ion Etching: Its Basis and Future Part II, Solid State Technology, Vol. 27 Nr.6, 1984, S. 167 - 173
- [BoHu78] Bos, Hunter, Hunter: Statistics for Experimenters, John Wiley & Sons, New York, Chister, Brisbane, Toronto, 1978
- [Fing94] M. Finger: Statistische Untersuchungen der Steuergrößen des LIGA-Abformprozesses und deren Einfluß auf die Qualität von PMMA-Mikrostrukturen, Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1994
- [Hand94] Handbuch zum Programm ZIMT Version 2.0, (Zwick Interpreter for Material Testing), Fa. Zwick Ulm
- [Harm90] M. Harmening, W. Ehrfeld: Untersuchung zur Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit großer Strukturhöhe aus elektrisch isolierenden und leitfähigen Kunststoffen, Dissertation, Universität Karlsruhe 1990
- [Hars88] S. Harsch, W. Ehrfeld, A. Maner: Untersuchungen zur Herstellung von Mikrostrukturen großer Strukturhöhe durch Galvanoformung in Nickelsulfamatelektrolyten, Dissertation, Universität Karlsruhe 1988
- [Jehl94] E. Jehle: Untersuchung thermisch bedingter Lageabweichungen beim Abformen von Mikrostrukturen, Studienarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1994
- [Kast95] K. Kasten: Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Restschichtdicke bei der Abformung von LIGA-Mikrostrukturen, laufende Studienarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1995

- [Kalb94] H. Kalb: Grundlegende Untersuchungen zur Fertigung gestufter Mikrostrukturen aus fluorierten Polymeren, eingereichte Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994
- [Kohl95] M. Kohl, J. Göttert, J. Mohr: Verification of the Micromechanical Characteristics of Electrostatic Linear Actuators, zur Veröffentlichung als Vortrag bei Transducers'95, Stockholm, Schweden, 25.-29. Juni 1995
- [Kowa91] B. Kowanz, W. Ehrfeld: Systemtechnische Analys und Entwicklung eines Mikroventils in LIGA-Technik, Dissertation, Universität Karlsruhe 1991
- [Kubb90] Kubbat: Script zur Vorlesung Regelungstechnik für Ingenieure, Fakultät Maschinenbau, Technische Hochschule Darmstadt, Sommersemester 1990
- [MeBl93] W. Menz, P. Bley: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, VCH-Verlag, Weinheim, 1993
- [Mich93] A. Michel, W. Bacher, M. Harmening, R. Ruprecht: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern, Dissertation, Universität Karlsruhe 1993
- [Müll62] H. Müller: Der Einfluß der Viskosität auf den Preßdruck von Metallklebeverbindungen, Plaste und Kautschuk Band 9, Leipzig 1962, S. 330 - 332.
- [Müll94] K. D. Müller: Charakterisierung und Inbetriebnahme einer Anlage zum positionierten Abformen von Kunststoff-Mikrostrukturen, Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1994
- [Pahl87] G. Pahl: Script zur Vorlesung Maschinenelemente 2, Fakultät Maschinenbau, Technische Hochschule Darmstadt, Wintersemester 1987/88
- [Rupr93] R. Ruprecht, W. Bacher, A. Both, H. Dinglreiter, H. Kalb: Darstellung einfacher Mikrosysteme durch Kunststoffabformung und Galvanofaormung auf integrierten Schaltkreisen, Tagungsband 1. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, S.122 - 127, Kernforschungszentrum Karlsruhe 23./24. September 1993

- [Schn95] M. Schneider, R. Castagnetti, M. G. Allen, H. Baltes: Integrated Flux Concentrator improves CMOS Magnetotransistors, Tagungsband MEMS '95, S. 151 - 156 Amsterdam Niederlande, 29. Januar - 2. Februar 1995
- [Schu94] persönliche Mitteilung von Dr. J. Schulz, Institut für Mikrostrukturtechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Mai 1994
- [Seid89] H. Seidel: Naßchemische Tiefenätztechnik, in A. Heuberger (Hrsg.) Mikromechanik, Springer Verlag, Berlin 1989
- [Stro95] M. Strohrmann: Intelligentes Mikrosystem zur Messung von Beschleunigungen basierend auf LIGA-Mikromechanik, Dissertation, Universität Karlsruhe 1995
- [Stro95b] persönliche Mitteilung von Dr. M. Strohrmann, Institut für Mikrostrukturtechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1995
- [Tro93] Untersuchungen zur Optimierung der Herstellung ebener Abformwerkzeuge, Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1993
- [Voll87] H. Vollmer, W. Ehrfeld, P. Hagmann: Untersuchungen zur Herstellung von galvanisierbaren mit extremer Strukturhöhe durch Abformung mit Kunststoff im Vakuum-Reaktionsgießverfahren, Dissertation, Universität Karlsruhe 1987
- [Wall92] U. Wallrabe, P. Bley, J. Mohr: Entwicklung, Optimierung und Test von elektrostatischen Mikromotoren nach dem LIGA-Verfahren, Dissertation, Universität Karlsruhe 1992
- [Wegn94] U. Wegner: Entwicklung eines RIE-Prozesses für die Fertigung von Beschleunigungssensoren durch Abformung und Galvanik, Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1994