



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

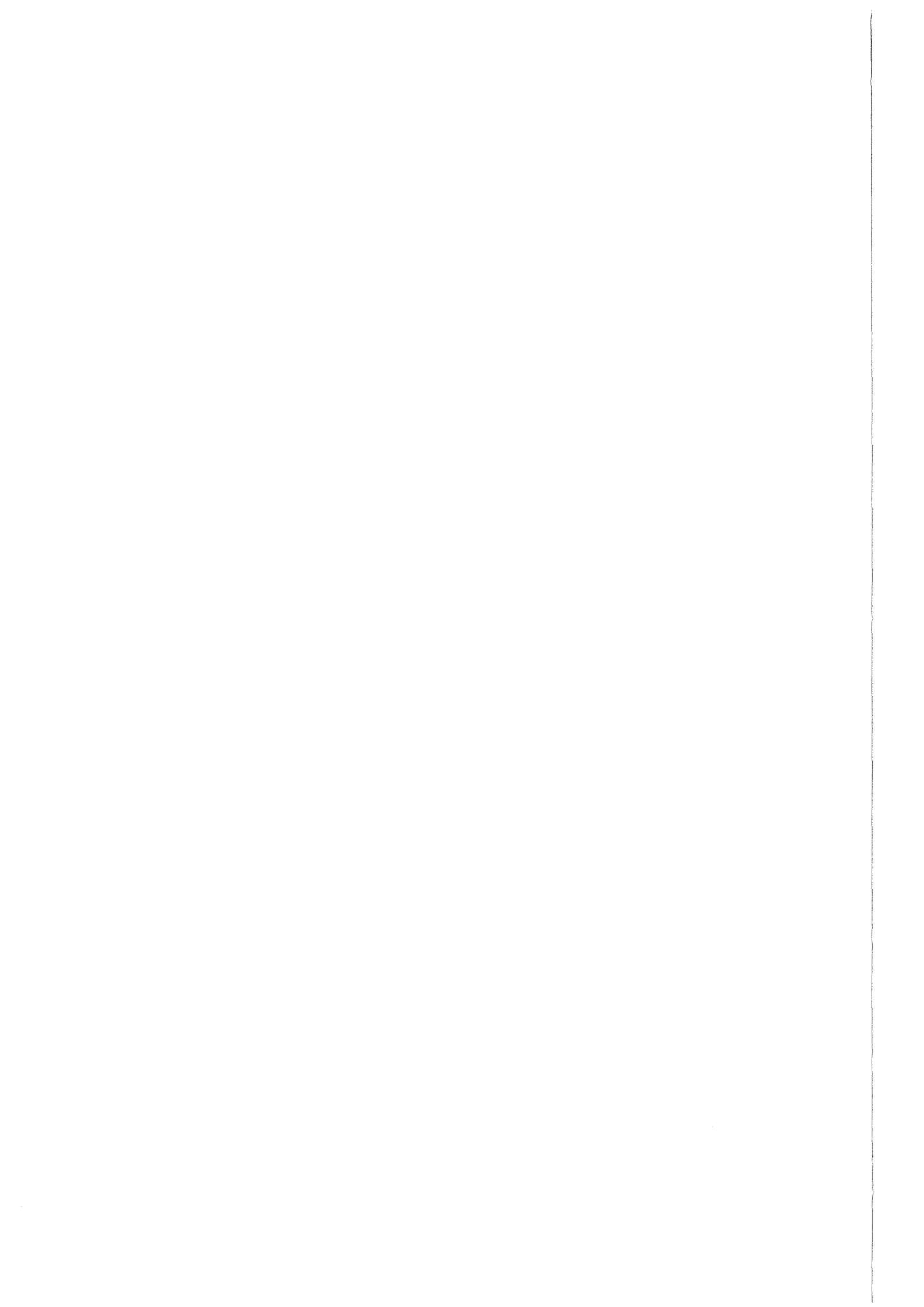
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6254

**Herstellung von
beweglichen metallischen
Mikrostrukturen auf
prozessierten Siliziumwafern**

K.-D. Müller

Institut für Mikrostrukturtechnik

Februar 1999



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6254

**Herstellung von beweglichen metallischen
Mikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern**

Klaus-Dieter Müller
Institut für Mikrostrukturtechnik

von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein neuartiges Verfahren zur Herstellung von beweglichen metallischen Mikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern am Beispiel der komplexen Struktur des LIGA-Beschleunigungssensors entwickelt worden. Das Verfahren gewährleistet eine zuverlässige elektrische Kontaktierung des Sensors zur CMOS-Auswerteschaltung.

Im ersten Verfahrensschritt werden freitragende Kunststoffolien auf einer unstrukturierten Trägerschicht mit einer Dicke von einigen $10\ \mu\text{m}$ hergestellt. Dieser Vorgang wird auf einem speziell an den Abformprozeß anpaßbaren Substrat durchgeführt. Es wurden unterschiedliche amorphe und teilkristalline Kunststoffe mit einem Strukturhöhen zu Wandstärkenverhältnis von bis zu 50 hergestellt und anschließend ohne die Mikrostrukturen zu beeinflussen vom Abforms substrat mechanisch gelöst.

Für die Bestückung des Wafers mit Foliensegmenten wurde ein Magazin in Kombination mit einem Greifer entwickelt. Das Magazin erlaubt es, die Folie nach der Abformung einzulegen, in ihm zu vereinzeln, zu transportieren, aufzubewahren und aus ihm die Bereitstellung am Handhabungsgerät und die Bestückung vorzunehmen. Die Handhabung der vereinzelt Kunststoffstrukturen wurde mit einem weiterentwickelten adhäsiven Greifer durchgeführt. Durch die gezielte Festlegung der Greifergeometrie und der Flüssigkeitsmenge des verwendeten Adhäsivs wurde eine laterale Positionierung und winkelgetreue Orientierung der Bauteile am Greifer mit einer Genauigkeit von $\pm 2\ \mu\text{m}$ bzw. $\pm 0,1^\circ$ erreicht. Durch die Abstimmung von Magazin und Greifer konnte ein rein passiver Montageprozeß realisiert werden.

Die Voraussetzung für die Integration von Beschleunigungssensorstrukturen ist eine CMOS-kompatible Strukturierungsfolge der metallischen Funktionsschichten auf der Waferoberfläche. Diese Schichten sind für die elektrische Kontaktierung und die Beweglichkeit der seismischen Masse des Sensors erforderlich (Opferschichtprozeß). Wolfram wurde als Leiterbahnmaterial eingesetzt, weil es eine gute Kontaktierbarkeit mit den Aluminiumanschlußpads der Auswertelektronik und eine gute Haftung der Nickel-Strukturen der Sensorkomponenten ermöglicht. Kupfer wurde als Opferschichtmaterial eingesetzt, da es das einzige Metall ist, das in dünnen Schichten auf die Waferoberfläche aufgebracht und selektiv zu Aluminium, Wolfram, Nickel und Siliziumverbindungen strukturiert werden kann.

Die Verbindung der freitragenden Kunststoffolien mit dem vorstrukturierten Wafer wurde durch thermisches Verschweißen erreicht. Nach dem Verschweißvorgang weisen die Strukturen keine Geometrieänderungen auf. Es konnte kein Einfluß der Mikrostrukturhöhe auf die maximal mögliche Verschweißtemperatur festgestellt werden. Im Experiment reichten zum Verschweißen der $200\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Sensorstrukturen auf der Opferschicht des CMOS-Wafers ein Druck von $0,03\ \text{MPa}$ und eine Temperatur von 119°C , die $26\ \text{K}$ über der Glastemperatur des Kunststoffs lag, aus.

Mit dieser Arbeit ist die Grundlage zur Integration von beweglichen LIGA-Mikrostrukturen mit Siliziummikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern zu komplexen Mikrosystemen geschaffen. Die entwickelte Technologie ist übertragbar auf alle abgeformten Mikrostrukturen und ermöglicht die hochgenaue positionierte Verbindung dieser Strukturen mit den unterschiedlichsten Materialoberflächen. Weiterhin können durch die Trennung von Abformung und Positionierung erstmals auch nichtplanare Oberflächen mit LIGA-Mikrostrukturen bestückt werden.

Fabrication of movable metal microstructures onto processed silicon wafers

Abstract

This Ph.D. thesis presents a novel process for the fabrication of movable metal microstructures on processed silicon wafers based on the example of the complex structure of the LIGA acceleration sensor. The process ensures a reliable electrical contacting between the sensor and the CMOS evaluation circuit.

In a first process step, self-supported plastic films are produced on an unstructured carrier layer of some 10 μm in thickness. This process is carried out on a special substrate that can be adapted to the respective molding process. Various amorphous and semi-crystalline plastics with a structural height to wall thickness ratio of up to 50 have been generated and separated mechanically from the molding substrate without affecting the microstructures.

For charging the wafer with the film segments, a magazine combined with a gripper has been developed. The magazine allows to insert the film after molding, to separate, transport and store it as well as to make it available to the handling unit and for charging. Handling of the separate plastic structures took place by means of an adhesive gripper that had been further developed for this purpose. By the precise specification of the gripper geometry and the liquid volume of the adhesive applied, a lateral aligning and conformal orientation of the components at the gripper with an accuracy of $\pm 2 \mu\text{m}$ or $\pm 0.1 \text{ deg.}$ was achieved. By matching the magazine and the gripper, a purely passive assembly process could be implemented.

The integration of acceleration sensor structures requires a CMOS-compatible structuring process of the metal functional layers on the wafer surface. These layers are needed for electrical contacting and the movability of the seismic mass of the sensor (sacrificial layer process). Tungsten served as the wire material, as it ensures good contacting to the aluminum connection pads of the evaluation electronics and good adhesion of the nickel structures of the sensor components. Copper was employed as the sacrificial layer material, as it is the only metal that can be applied in thin layers onto the wafer surface and may be structured selectively as regards aluminum, tungsten, nickel and silicon compounds.

The self-supported plastic films were connected with the prestructured wafer by means of thermal welding. Following welding, the structures do not exhibit any geometrical modifications. No influence of the microstructural height on the maximum possible welding temperature could be found. In the experiment, a pressure of 0.03 MPa and a temperature of 119 deg., 26 K above glass temperature, were sufficient for the welding of the 200 μm high sensor structures on the sacrificial layer of the CMOS wafer.

The present work may well be considered the basis for the integration of movable LIGA microstructures with silicon microstructures on processed silicon wafers such as to form complex microsystems. The technology developed may be transferred to all molded microstructures and allows the micrometer-precise aligning of the connection of these structures with a variety of material surfaces. Furthermore, the separation of molding and aligning for the first time enables even non-planar surfaces to be equipped with LIGA microstructures.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Ein Konzept zur Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen auf CMOS-Wafern	4
2 Funktionsschichten für bewegliche Strukturen auf CMOS-Wafern	9
2.1 CMOS-kompatible Strukturierungsfolge	10
2.2 Einfluß des Substratmaterials auf das Sensorverhalten	11
3 Herstellung von mikrostrukturierten Kunststofffolien durch Warmumformung	16
3.1 Grundlagen der Folienabformung	17
3.1.1 Abformung in Abhängigkeit von der Kunststoffart	17
3.1.2 Entformprozeß	18
3.1.3 Trennung der abgeformten Strukturen vom Abformsubstrat	24
3.1.4 Einfluß des Herstellungsprozesses auf die Maßhaltigkeit	25
3.2 Abformung von mikrostrukturierten PMMA- und POM-Folien	26
4 Positionierte Anordnung von Mikrostrukturen auf CMOS-Wafern	31
4.1 Magazinierung und Vereinzelung der abgeformten Folien	31
4.1.1 Realisierung	33
4.2 Greifertechnologie für abgeformte Mikrostrukturen	36
4.2.1 Auswahl des Greifprinzips	36
4.2.2 Entwicklung eines adhäsiven Greifers	37
4.2.2.1 Ermittlung der Haltekraft	37
4.2.2.2 Zentrierung des Sensors auf der Greiferfläche	39
4.3 Prozeßablauf für das Fixieren von abgeformten Mikrostrukturen	41

5	Verbindung von mikrostrukturierten Kunststoffolien mit CMOS–Wafeln	43
5.1	Grundlagen	44
5.1.1	Untersuchungen zur Kunststoffhaftung auf der Opferschicht	44
5.1.2	Verbindung der Kunststoffolien mit Siliziumwafern	47
5.2	Thermisches Bonden der abgeformten PMMA–Struktur des Beschleunigungs- sensors	50
5.3	Bonden der abgeformten POM–Struktur des Beschleunigungssensors	57
5.4	Entfernung der Kunststoffträgerschicht	61
5.4.1	Reaktives Ionen–Ätzen von PMMA beim thermischen Verschweißen	61
5.4.2	Reaktives Ionen–Ätzen von POM bei Kapillarklebung	62
5.5	Prozessvarianten zur Verbindung der abgeformten Folien mit der Waferoberfläche	64
6	Integration von LIGA–Beschleunigungssensoren auf CMOS–Wafeln	66
6.1	Integration auf der unstrukturierten Waferoberfläche separat vom CMOS	66
6.2	Integration direkt auf der strukturierten CMOS–Oberfläche	68
6.3	Funktionsfähigkeit der CMOS–Auswerteschaltung in Verbindung mit dem Sensorelement	68
	Zusammenfassung	71
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	79

Symbolverzeichnis

Variablen

A_{MS}	Oberfläche der Mikrostruktur
A	Kondensatorfläche
b_o	Bindungslänge
c_∞	kritisches Verhältnis
C_{par}	parasitäre Kapazität
d	Dicke der Trägerschicht
D	Diffusionskonstante
E_{Fo}	Elastizitätsmodul
F_{Re}	Reibungskraft zwischen Abformwerkzeug und Folie
G_{Fo}	Art und Anordnung der Mikrostrukturen auf dem Abformwerkzeug
j	Anzahl der Kettenbindungen des Monomers
$\frac{\Delta l}{l}$	rel. Längenänderung bezogen auf die Ausgangslänge
l_{Fo}	Folienabmessung auf dem Abforms substrat
M	Molekulargewicht
M_o	Molekulargewicht des Monomers
n	Anzahl der gemessenen Elastizitäts-Modulwerte
R	Vektor, der die Kettenenden eines Moleküls verbindet
s	Kondensatorspalt
t_r	Reptationszeit
T	Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Glas- und Entformungstemperatur
T_E	Entformungstemperatur
T_G	Glastemperatur
T_R	Raumtemperatur
T_V	Verschweißtemperatur
U	innere Energie der Folie

Griechische Buchstaben

$\alpha_{th,FE}$	thermischer Längenausdehnungskoeffizient des Abformwerkzeugs
$\alpha_{th,Fo}$	thermischer Längenausdehnungskoeffizient der Folie
ϵ	elastische Dehnung
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ϵ_R	Dielektrizitätszahl
μ	Reibungskoeffizient
ν_{Fo}	Querkontraktionszahl der Folie
σ_D	Druckspannung
σ	Spannung

Einleitung

In der Siliziumtechnik gelingt die monolithische Integration von mikromechanischen und mikroelektronischen Komponenten zu einem System in einer durchlaufenden Prozeßfolge. Allerdings lassen sich keine Sensor- und Aktorprinzipien, die auf anderen Materialien als Silizium und dessen Verbindungen basieren [1], realisieren. Werden andere Materialien als die in der Halbleiterindustrie üblichen benötigt, müssen auch andere Verfahren zur Herstellung von Mikrosystemen eingesetzt werden. Ein wichtiger Vertreter ist die LIGA-Technik (**L**ithographie, **G**alvanik und **A**bformung) mit ihrer Möglichkeit, Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen und Höhen von mehreren 100 Mikrometern herzustellen [2].

LIGA-Mikrostrukturen können durch Röntgentiefenlithographie und Galvanik hergestellt werden. Diese Technologie ist allerdings zu teuer für die Herstellung von großen Stückzahlen hoher und großflächiger Mikrostrukturen und direkt abhängig von der Röntgenstrahlungsquelle. Mit der LIGA-Technik können auch Abformwerkzeuge hergestellt werden mit denen im Spritzgießverfahren oder mit anderen Kunststoffabformtechniken Negative aus thermoplastischen Kunststoffen gefertigt werden können. Durch die speziell im Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelte Warmumformtechnik können Kunststoffmikrostrukturen direkt auf Schaltkreisen hergestellt werden [3]. Dieses Verfahren erfordert neben hohen Temperaturen bis 250 °C und Drücken von mehreren kN/mm² für die Integration der abgeformten Strukturen auf dem Wafer eine Positioniergenauigkeit dieser Mikrokomponenten zum CMOS-Design von wenigen Mikrometern. Daher mußten für die Fertigung von LIGA-Strukturen auf vorstrukturierten Substraten Spezialabformmaschinen entwickelt werden. Diese Maschinen sind derzeit noch in der Erprobung, eine ausreichende Prozeßsicherheit in der Waferhandhabung und die entsprechende Positioniergenauigkeit der Mikrostrukturen zur CMOS-Schaltung sind noch nicht im Langzeitbetrieb nachgewiesen. Außerdem muß bei dieser Technik für jede neue Anordnung von Mikrokomponenten relativ zur CMOS-Schaltung ein neues Abformwerkzeug hergestellt werden, wobei nur eine Abformung pro Wafer möglich ist, ohne die zuvor hergestellten Strukturen zu zerstören. Schließlich haben die Verfahren der Röntgentiefenlithographie und der Kunststoffabformung gegenwärtig noch den Nachteil, daß sie nur Flächen strukturieren können, die wesentlich kleiner sind als die in der Halbleiterindustrie eingesetzten Wafer mit 6 Zoll und darüber. Aufgrund der genannten Einschränkungen kann diese Variante der Herstellung von LIGA-Mikrostrukturen auf Siliziumwafern durch Kunststoffabformung nur für spezielle Anwendungen eingesetzt werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Herstellungsverfahrens mit dem bewegliche LIGA-Mikrostrukturen mit mikroelektronischen Schaltungen kombiniert werden können. Der grundlegende Gedanke für die Integration der LIGA-Strukturen ist eine Fertigung durch Kunststoffabformung, speziell durch Heißprägen, die absolut getrennt von

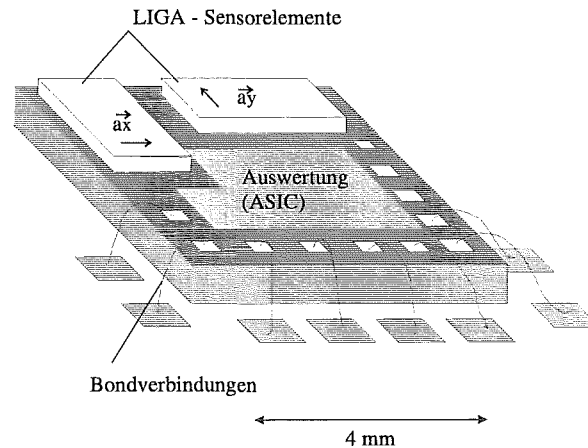


Abbildung 1: ASIC mit integrierten LIGA-Sensorelementen.

dem sich anschließenden positionierten Verbindungsprozeß mit der elektronischen Komponente stattfindet. Daraus erwachsen zunächst höhere Anforderungen an den Warmumformungsprozeß, da im Gegensatz zur positionierten Abformung die mikrostrukturierte Kunststoffschicht vom Abformsubstrat getrennt werden muß. Die LIGA-Kunststofffolien müssen mit einer Genauigkeit von einigen Mikrometern zu den Silizium-Strukturen angeordnet und eine schonende Handhabung der Mikrostrukturen garantiert werden muß. In der Siliziumtechnik werden Komponenten, die mit unterschiedlichen Fertigungstechniken hergestellt wurden, mit der Flip-Chip Technik verbunden. Für die Verbindung der abgeformten Mikrostrukturen mit dem prozessierten Wafer wurde ein neues Verfahren zur Handhabung, Positionierung und Verbindung dieser Mikrostrukturen entwickelt. Die Realisierung dieses Anordnungsprozesses wurde mit einem in der Industrie noch nicht eingesetzten Greiferprinzip mit Genauigkeiten im Mikrometerbereich erreicht, wobei dieser Greifer darüber hinaus in ein komplettes Handhabungs- und Einzelungskonzept eingebunden wurde. Der Herstellungsprozeß der LIGA-Komponenten darf bereits integrierte Komponenten eines Mikrosystems nicht schädigen. Weiterhin kann eine erfolgreiche industrielle Umsetzung des zu entwickelnden Verfahrens nur erfolgen, indem einzelne Prozessschritte soweit wie möglich mit den Standardanlagen der Chipindustrie durchgeführt werden können.

Die neue Technologie zur Verbindung von Polymerstrukturen mit unterschiedlichsten Materialien unabhängig vom Prägeverfahren eröffnet neue Einsatzmöglichkeiten für LIGA-Mikrostrukturen in Mikrosystemen, da der ganze Wafer unabhängig von der abformbaren Fläche mit geringer mechanischer und thermischer Belastung der beteiligten Komponenten bestückt werden kann. Deshalb bietet das entwickelte Verfahren eine umfassendere Lösung für die Integration von Silizium- und LIGA-Strukturen als die bisherigen Prozesse an.

Das zu entwickelnde Verfahren soll anhand der Integration der hochkomplexen Mikrostruktur des schon früher am Institut für Mikrostrukturtechnik entwickelten LIGA-Beschleunigungssensors auf CMOS-Substraten evaluiert werden [4]. Durch den Einsatz anwendungsspezifischer intelligenter Schaltungen (ASICs) (Abb. 1) kann eine hohe Integrationsdichte der Sensoren bei gleichzeitig geringem Energieverbrauch in Bezug zum hybriden Schaltungsaufbau in SMD-Technik erreicht werden. Dadurch können auf einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern redundante und somit funktionssichere Mikrosysteme aufgebaut werden.

Beschleunigungssensoren finden ihren Einsatz beispielsweise in der Aufzeichnung von Bewegungsabläufen beim Transport bruchgefährdeter Güter, in Navigationsinstrumenten oder im Automobil zur Fahrwerksstabilisierung [4]. Der geometrische Aufbau des LIGA-Beschleunigungssensor erfordert die Abformung von Kunststoffmikrostrukturen mit Aspektverhältnissen oberhalb von 20 und die Beherrschung des Opferschichtprozesses zur Herstellung von beweglichen Strukturen [5]. Hierfür müssen mehrere elektrisch leitfähige Schichten CMOS-kompatibel auf den Schaltkreis aufgebracht, strukturiert und z.T. wieder entfernt werden. Wegen des Einsatzes des Halbleiters Silizium als Substrat muß eine elektrische Isolationschicht zwischen den Leiterbahnen der LIGA-Struktur und dem Silizium entwickelt werden. Die elektrischen Signale, die in den Leiterbahnen zum CMOS transportiert werden sollen, werden durch Kapazitäten zwischen den Leiterbahnen und den Siliziumschichten des Wafers geschwächt. Deshalb ist neben der rein elektrischen auch eine kapazitive Entkopplung der Schichten notwendig, so daß diese Effekte ausgeschlossen oder unterdrückt werden können.

Kapitel 1

Ein Konzept zur Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen auf CMOS–Wafern

Der entscheidende Nachteil der bisher zur Herstellung von beweglichen Strukturen eingesetzten Verfahren, der Röntgentiefenlithographie und der positionierten Abformung, ist ihre beschränkte Größe des strukturierbaren Mikrostrukturbereiches auf vorstrukturierten Substraten. Das neue Verfahren besteht aus zwei Prozessschritten. Zuerst werden abgeformte mikrostrukturierte Kunststoffolien hergestellt [6]. Anschließend erfolgt ihre positionierte Verbindung mit der CMOS–Oberfläche [7]. Erstmals werden LIGA–Mikrostrukturen nicht auf dem Ziel– sondern auf einem Hilfssubstrat hergestellt, welches an den Warmumformvorgang angepaßt werden kann. Dadurch, daß die Kunststoffstrukturen nicht positioniert auf wenige Mikrometer genau zu den Strukturen des CMOS abgeformt werden müssen, ist es möglich, mehrere Abformwerkzeuge gleichzeitig für die Kunststoffstrukturierung zu nutzen. Die Verbindung der Kunststoffstrukturen mit dem Zielsubstrat ist mit unterschiedlichen Bondtechniken möglich, die an Randbedingungen des zu bestückenden Substrats, wie z.B. thermische Beständigkeit und mechanische Festigkeit, angepaßt werden können. Die positionierte Anordnung der abgeformten Strukturen auf dem Substrat erfolgt mit der aus der Halbleiterindustrie bekannten der pick– and place–Technik. Durch Folgeprozesse werden die abgeformten Komplementärstrukturen mit Metall galvanisch gefüllt und anschließend der Kunststoff und die Opferschicht entfernt, so daß ein Teil der metallischen Struktur beweglich wird.

Anforderungen an den zu entwickelnden Prozeß zur Integration von beweglichen Metallmikrostrukturen auf CMOS–Wafern

- Elektrische Kontaktierung der Strukturen mit der Siliziumauswerteschaltung
- CMOS–kompatible Funktionsschichten für die Kontaktierungs– und Opferschichtebene
- Mikrostrukturherstellung durch Abformung
- Abformung von mikrostrukturierten Kunststoffolien mit einer nur wenige 10 μm dicken unstrukturierten Trägerschicht

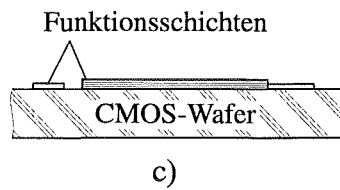
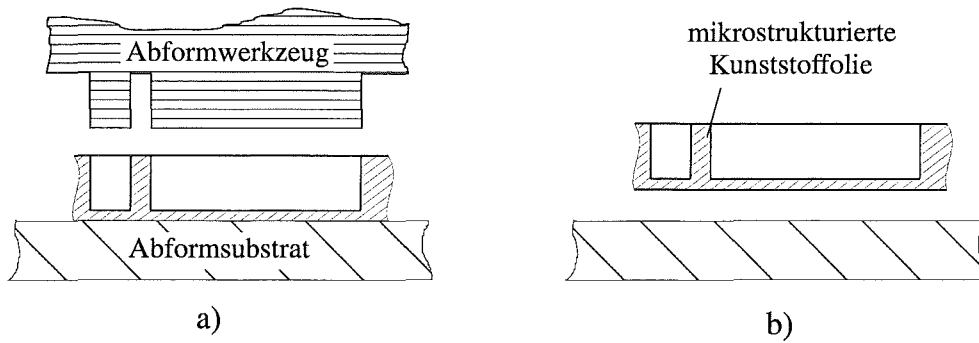
- Flexible Anordnung der Mikrostrukturen auf den prozessierten Siliziumwafern
- Hohe Genauigkeit der Positionierung der abgeformten Strukturen auf der CMOS-Schaltung im Mikrometerbereich
- Möglichst geringe thermische und mechanische Einwirkungen auf den Wafer

Diese Prozessschritte werden anhand der komplexen Struktur des LIGA-Beschleunigungssensors im folgenden erläutert. Die Herstellung von mikrostrukturierten Folien mit einer mehrere 10 Mikrometer dicken unstrukturierten Basisschicht, der sogenannten Trägerschicht, erfordert die Weiterentwicklung des Abformprozesses, da nach der Abformung die mikrostrukturierte Kunststoffschicht vom Abformsubstrat getrennt werden muß.

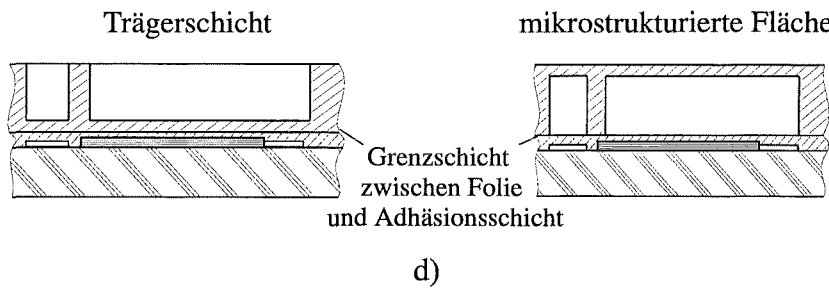
Nachdem der thermoplastische Kunststoff über seine Erweichungstemperatur erwärmt wurde und die Mikrostrukturen des Abformwerkzeugs befüllt sind (Prägeprozeß), wird die Prozeßtemperatur bis unter die Erweichungstemperatur abgesenkt und der Abformstempel wird aus dem Kunststoff gezogen (Entformprozeß). Die Entformung dieser Folien ist schwierig, da die auftretenden Normalkräfte von mehreren hundert Newton, bezogen auf die Abformwerkzeugoberfläche von $60 \cdot 20 \text{ mm}^2$, von der Grenzschicht Kunststoff-Waferoberfläche übertragen werden müssen (Abb. 1.1 a)). Die Haftung der mikrostrukturierten Folie darf jedoch nicht so hoch sein, daß nach Abkühlung des Abformsubstrats auf Raumtemperatur die Folie nicht mehr vom Abformsubstrat getrennt werden kann, ohne daß eine mechanische Beschädigung auftritt (Abb. 1.1 b)). Weiterhin treten, bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der an der Abformung beteiligten Materialien, thermisch induzierte laterale Maßabweichungen der abgeformten Folie auf. Diese müssen analysiert werden, um im Folgeprozeß die abgeformten Folien auf dem Wafer mikrometergenau anzuordnen.

Der CMOS-Wafer, das Substrat, muß für die Herstellung von beweglichen Strukturen mit der Opferschichttechnik mit unterschiedlichen metallisch leitenden Funktionsschichten beschichtet werden [5]. Diese Schichten müssen zusätzlich für die Verbindung des Substrats mit den abgeformten Folien eine ausreichende Kunststoffhaftung aufweisen. Die Funktionsschichten müssen z.T. mit den Bondpads kontaktiert sein und auf dem CMOS-Wafer haften, strukturiert und z.T. im Laufe des Prozesses wieder entfernt werden (Abb. 1.1 c)). Die Auswahl geeigneter Metallschichten ist kompliziert, da die freiliegenden Anschlußpads (Bondpads) aus dem chemisch unedlen Aluminium bestehen, das unbeständig gegenüber Säuren und Basen ist.

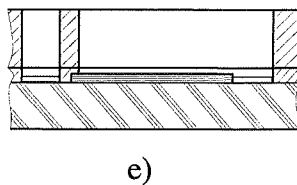
Die abgeformten mikrostrukturierten Folien und der mit allen Funktionsschichten beschichtete CMOS müssen miteinander auf wenige Mikrometer genau positioniert verbunden werden. Die Folie muß vor dem Bestückungsvorgang in Segmente vereinzelt werden. Für die Vereinzlung und Handhabung der Folie und der Folienausschnitte wurde ein neues Verfahren – die positionierte Anordnung – entwickelt. Das Verfahren setzt sich aus einer Greifer- und Magazinertechnologie zusammen, die für alle abgeformten Folien eingesetzt werden kann und an bestehende Bestückungsautomaten aus der Halbleiterindustrie adaptiert werden. Die abgeformten Folien können über die Trägerschicht oder über ihre mikrostrukturierte Seite mit unterschiedlichen Bondtechniken mit dem CMOS-Funktionsschichten verbunden werden (Abb. 1.1 d)). Das Kapillarkleben bietet für thermisch gering belastbare Substratmaterialien den Vorteil, daß die Folie bei Raumtemperatur gebonded wird. Das Verfahren des thermischen



Positionierte Verbindung der Abformfolienausschnitte auf dem Substrat über die



Reaktives Ionen-Ätzen (RIE)



Galvanik, Entfernen des PMMA und der Opferschicht

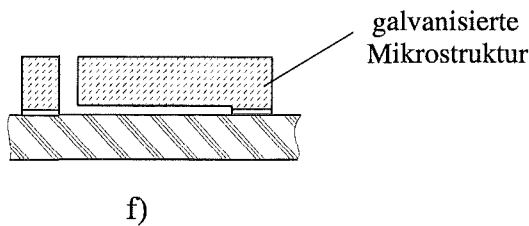


Abbildung 1.1: Herstellung von beweglichen Strukturen auf Siliziumwafern durch die Prozessschritte Abformung und positionierte Anordnung von mikrostrukturierten Kunststoffolien.

Verschweißen ermöglicht im Gegensatz zur direkten Abformung auf dem Substrat, die Folien über die mikrostrukturierte Seite durch thermisches Verschweißen mit der Waferoberfläche zu verbinden.

Nachdem die mikrostrukturierte Folie mit der Waferoberfläche verbunden wurde, muß die Trägerschicht entfernt werden, um die metallischen Funktionsflächen für den sich anschließenden Galvanikprozeß freizulegen. Für die Entfernung der Trägerschicht wird das Trockenätzverfahren Reaktive Ionen-Ätzen (RIE) eingesetzt. Wird zur Verbindung der abgeformten Folie das Verfahren des thermischen Verschweißens eingesetzt, so ist kein anisotropes Plasma zur Entfernung der Trägerschicht notwendig (Abb. 1.1 e)). Nach dem Galvanikprozeß müssen der abgeformte Kunststoff und die Opferschicht selektiv zum CMOS und der metallischen Mikrostruktur entfernt werden (Abb. 1.1 f)).

Das neu entwickelte Verfahren soll anhand des LIGA-Beschleunigungssensors realisiert werden. Die prinzipielle Funktion des Sensors ist in Abb. 1.2 dargestellt. Eine seismische

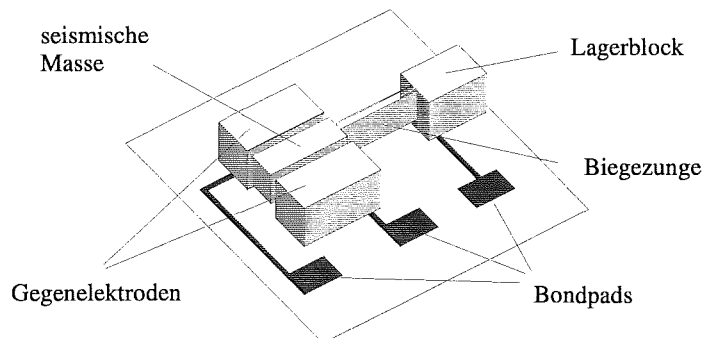


Abbildung 1.2: Prinzipskizze des Beschleunigungssensors.

Masse ist über eine Biegezungge an einem Lagerblock aufgehängt. Sie kann sich 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 Maß für die wirkende Beschleunigung dar. Mit dem in Abb. 1.2 vorgestellten Sensoraufbau konnte die prinzipielle Funktion eines Beschleunigungssensors gezeigt werden. Für den Einsatz als Präzisionsmeßinstrument ist ein so einfaches Sensordesign jedoch nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden folgende Verbesserungen an dem Sensor vorgenommen.

Der Temperaturgang (T_k) des Ausgangssignals, der sich aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von beweglicher Masse 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 Abb. 1.3 zeigt das Design des am IMT entwickelten Präzisionssensors [4]. Das Substrat, auf dem der Beschleunigungssensor aufgalvanisiert werden soll, ist ein Siliziumwafer mit einem Durchmesser von 4 Zoll mit Sensorauswerteschaltungen in CMOS-Technologie bestückt [8]. Die Fläche für das Sensorelement wurde separat von der CMOS-Schaltung vorgesehen, um störende Einflüsse durch das elektrische Feld des Sensors auszuschließen (Abb. 1.4). Die Herstellung von beweglichen elektrisch kontaktierten Mikrostrukturen wird mit der Opferschichttechnik realisiert [5]. Für dieses Verfahren ist es

notwendig, mehrere elektrisch leitfähige Funktionsschichten auf dem Substrat abzuscheiden, zu strukturieren und selektiv zu entfernen. Dabei kann auf Erfahrungen aus der Röntgentiefenlithographie [5] und der positionierten Abformung [9] zurückgegriffen werden.

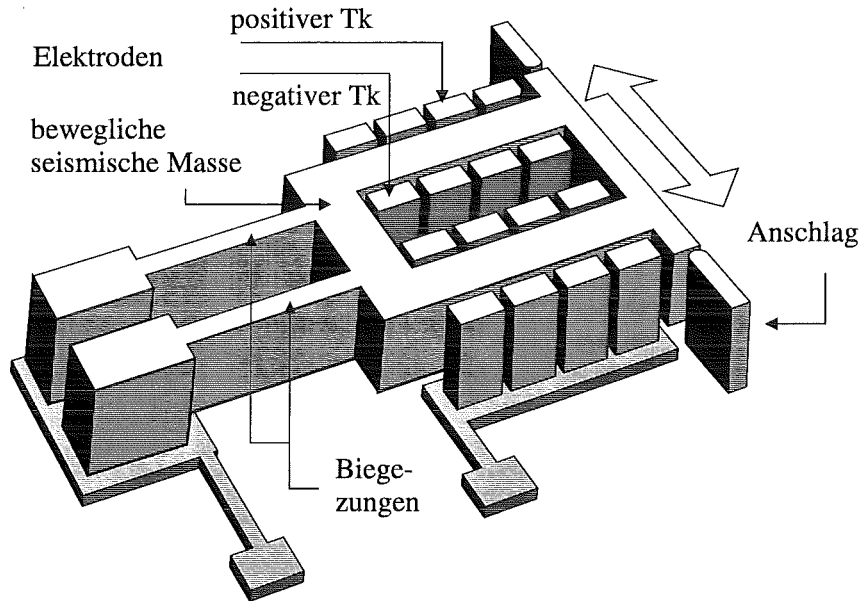


Abbildung 1.3: Prinzipskizze des temperaturkompensierten Beschleunigungssensors.

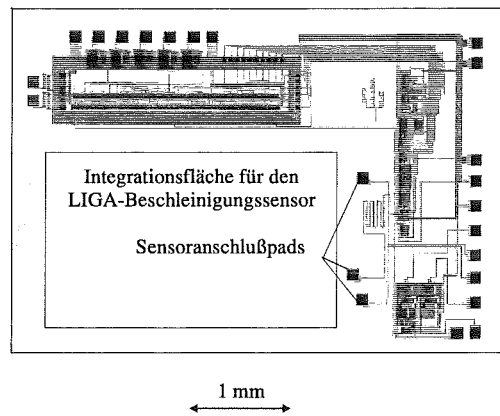


Abbildung 1.4: Design der CMOS-Schaltung.

Kapitel 2

Funktionsschichten für bewegliche Strukturen auf CMOS–Wafern

Das Substrat, auf dem die Beschleunigungssensoren integriert werden sollen, ist ein Siliziumwafer mit CMOS–Auswerteschaltkreisen für diesen Sensor. Der Sensor und der Schaltkreis müssen elektrisch über eine Leiterbahn kontaktiert sein. Weiterhin muß zwischen der Waferoberfläche und dem nach der kompletten Prozeßfolge beweglichen Teil des Sensorelements eine elektrisch leitfähige Schicht abgeschieden werden (Opferschicht), die nach dem Galvanikprozeß, der zur Herstellung der Sensorstrukturen eingesetzt wird, wieder entfernt wird. Die Anschlüsse des CMOS bestehen aus Aluminium und der Schaltkreis ist passiviert mit Siliziumnitrid [10]. Dies bedeutet, daß die Beschichtungs– und Strukturierungsvorgänge der Leiterbahn und Opferschicht (Funktionsschichten) selektiv zu dieser CMOS–Oberfläche durchführbar sein müssen, um auf zusätzliche Passivierungsschritte verzichten zu können. Das Siliziumnitrid ist in Bezug zu Aluminium gegenüber vielen Chemikalien inert und deshalb wesentlich unempfindlicher für die erforderlichen Strukturierungsprozesse der Funktionsschichten.

In der Siliziumtechnik werden als elektrische Kontaktierungsschichten außer dotierten Halbleitermaterialien und Siliziumverbindungen auch eine Reihe von Metallen eingesetzt [11, 12]. Fast alle diese Metalle müssen mit Diffusionsbarrieren an ihren Grenzflächen beschichtet werden, da es schon bei Raumtemperatur zu Interdiffusion von Atomen und somit zu elektrischen Fehlfunktionen des Schaltkreises kommen kann [13]. Nur Aluminium und Wolfram können ohne Diffusionsbarrieren eingesetzt werden. Am Institut für Mikrostrukturtechnik wurden Untersuchungen zur Direktabformung von nichtbeweglichen und nicht zum CMOS kontaktieren Kunststoffmikrostrukturen auf elektronischen Schaltungen durchgeführt, wobei Wolfram als Startschicht für die galvanische Abscheidung genutzt wurde [3]. Nach dem Prozeßdurchlauf war kein verändertes Verhalten der Schaltkreise festzustellen. Deshalb muß für die Integration des Sensors noch das Kontaktierungsverhalten von Wolfram als Leiterbahnebene zum CMOS–Schaltkreis untersucht werden. Der Opferschichtprozeß muß neu entwickelt werden, da die in der Siliziumtechnologie eingesetzten Materialien entweder nicht in Höhen von mehreren Mikrometern abgeschieden werden können oder die Medien zur Entfernung dieser Schichten Aluminium angreifen [10].

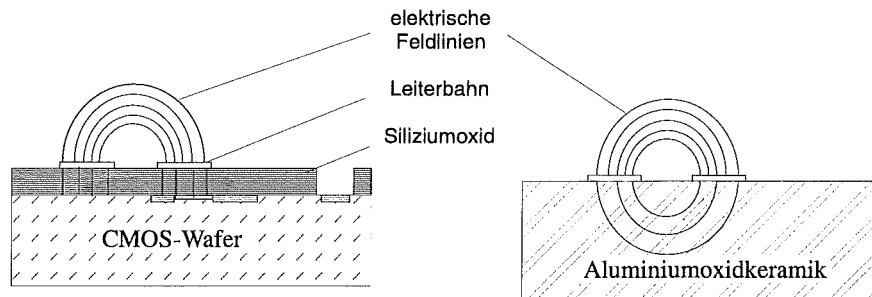


Abbildung 2.1: Feldlinienverläufe in Abhängigkeit des Substratmaterials.

Die Qualität der Sensorsignale wird wesentlich durch das Substratmaterial bestimmt. Mit dem Einsatz des Halbleiters Silizium ändert sich das elektrische und mechanische Verhalten des Sensors in Bezug zu der bisher eingesetzten Aluminiumoxidkeramik [4, 9]. Der elektrische Einfluß läßt sich mit dem Feldlinienverlauf des elektrischen Feldes verdeutlichen (Abb. 2.1). Bei Keramik verlaufen die Feldlinien zwischen den Leiterbahnen, deren Distanz größer als $50 \mu\text{m}$ ist. Bei prozessierten Siliziumwafern fungiert statt Keramik eine Siliziumoxid- oder Siliziumnitridschicht als Dielektrikum mit einer Dicke von $2,7 \mu\text{m}$ [10]. Daraus wird deutlich, daß mit sehr viel höheren Kapazitäten zwischen Leiterbahnen bei Verwendung von Silizium gerechnet und eine Reduzierung dieser den kapazitiven Sensor störenden sogenannten parasitären Kapazitäten erreicht werden muß. Auch das mechanische Werkstoffverhalten des Substratmaterials wirkt sich auf Meßbereich, die Resonanzfrequenz und die Temperaturempfindlichkeit des Sensors aus [4].

2.1 CMOS-kompatible Strukturierungsfolge

Die besonderen Anforderungen an eine CMOS-kompatible Strukturierungsfolge liegt in der Verwendung von freiliegendem Aluminium als Bondpads beim CMOS-Prozeß. Im Hinblick auf möglichst geringe Prozeßkosten sollten Schichten, die während der Abscheide-, Strukturierungs- und Ätzprozesse der Leiterbahn- und Opferschicht das Aluminium passivieren, vermieden werden. Das in Voruntersuchungen eingesetzte Wolfram [3, 14] wurde als Leiterbahn auf dem Schaltkreis strukturiert und ein vollständiger Kontakt an den Anschlüssen zum Schaltkreis gemessen. Die Opferschicht mit einer Höhe von $5 \mu\text{m}$ muß auf der CMOS-Oberfläche (Aluminium, Silizium und Siliziumnitrid) und der Wolfram-Leiterbahn haften und zu diesen Schichten selektiv strukturierbar sein. Aufgrund dieser Anforderungen wurde eine Literaturrecherche erstellt. Dies ergab, daß nur Kupfer aufgrund seiner chemisch selektiven Ätzbarkeit zu Aluminium und seiner homogenen Abscheidbarkeit in dünnen Schichten eingesetzt werden kann. Die Beständigkeit von Aluminium gegenüber Chemikalien nimmt um ein Vielfaches zu, je reiner es vorliegt. Das in der Halbleiterindustrie eingesetzte Aluminium verfügt über eine Reinheit von 99,9999 % [15, 16]. Nach zwei Stunden Ätzzeit in konzentrierter Salpetersäure konnte kein Angriff der Aluminiumanschlußpads sowie der anderen Materialien festgestellt werden. Kupfer wurde, wie auch das Wolfram, mit dem PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) abgeschieden, um den Wärmeeintrag und somit die Diffusionsneigung der Metalle im Gegensatz zum CVD-Verfahren (Chemical Vapor Deposition) so gering wie möglich zu halten. Die Temperaturen lagen unter $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Funktionsfähigkeit des Sensors

nach der kompletten Strukturierungsfolge für den Opferschichtprozeß konnte nachgewiesen werden. Nach der Strukturierung der Funktionsschichten und den folgenden Prozeßschritten einschließlich der Galvanik (siehe Kapitel 1) muß die Opferschicht entfernt werden, so daß sich die seismische Masse des Sensors frei bewegen kann. Dies erfordert, daß das Ätzmedium für Kupfer das Sensormaterial Nickel nicht angreift. Die stark oxidierende Wirkung der konzentrierten Salpetersäure führt zu einem Angriff der Nickeloberfläche, die viel stärkere Ätzwirkung auf Kupfer, jedoch Ätzzeiten von nur zwanzig Minuten bei einem Nickelabtrag von unter einem halben Mikrometer ermöglicht. Dieser Strukturverlust des Nickels kann entweder durch eine weitere Verkürzung der Ätzdauer oder durch einen Prozeßvorhalt der zu galvanisierenden Struktur erreicht werden. Die Ätzdauer läßt sich weiter verkürzen, indem die zu unterätzenden Flächen der Mikrostrukturen im Designentwurf so klein wie funktionell möglich ausgelegt werden und somit die Fläche der zu unterätzenden Bereiche abnimmt. Der PMMA-Entwicklungsprozeß des LIGA-Verfahrens wird unterstützt durch Ultraschalleinwirkung [17] für eine schnellere und saubere Entfernung des Kunststoffes. Dieses Verfahren kann auch zur schnelleren Ätzung der Opferschicht eingesetzt werden. Die Frequenz beträgt 1 MHz, so daß es zu keiner mechanischen Anregung der Mikrostrukturen kommt, da die Eigenfrequenzen des Beschleunigungssensors kleiner als 60 kHz sind. Im Experiment wurde ein Ultraschallsender in einem Wasserbad installiert und ein Gefäß mit dem Sensor im Ätzmedium in das Wasserbad eingesetzt. Erste Versuche wurden mit einer Senderleistung von 2 W/cm^2 durchgeführt. Die Ätzzeit konnte dadurch von 20 Minuten auf 10 Minuten reduziert werden.

2.2 Einfluß des Substratmaterials auf das Sensorverhalten

Die Sensorfunktion wird durch den Materialunterschied zwischen seismischer Masse (Nickel) und dem Substratmaterial beeinflusst (siehe Kapitel 1). Insbesondere die Werkstoffparameter wie thermische Ausdehnung, Elastizitätsmodul und die Dielektrizitätskonstante haben Einfluß auf das elektrische und mechanische Verhalten. Bisher wurde Aluminiumoxidkeramik als Substratmaterial eingesetzt und aufgrund der guten elektrischen Isolationseigenschaften des Materials konnten die metallischen Funktionsschichten direkt auf der Keramikoberfläche aufgebracht werden. Für die Integration von Sensorelementen auf dem Halbleitermaterial Silizium muß dessen Materialeinfluß auf das Sensorverhalten untersucht werden.

Einfluß des Substratmaterials auf das elektrische Sensorverhalten

Wie eingangs erwähnt, müssen die Kapazitäten (C_{par}) zwischen der Leiterbahn und dem Substrat sowie zwischen den Leiterbahnen minimiert werden (parasitäre Kapazitäten), um das Nutzsignal, die Sensorkapazität, maximal zur Auswertung zur Verfügung zu haben. Dies kann durch ein Dielektrikum mit geringer Dielektrizitätskonstante (ϵ_R) und einer großen Dicke (s) erreicht werden (Glg. 2.1).

$$C_{par} = \frac{\epsilon \epsilon_R A}{s} \quad (2.1)$$

Beim Einsatz von Siliziumsubstraten kommt es, wie oben erwähnt, durch dessen Halbleitereigenschaften und der geringen Dielektrikumschichtdicke von wenigen Mikrometern zu

einer Erhöhung des Betrags der parasitären Kapazitäten. Die weitere Erhöhung der Dielektrikumschicht (elektrische Passivierungsschicht) muß CMOS-kompatibel auf dem Schaltkreis erreicht werden. Deshalb ist zu prüfen, ob Schichten des CMOS-Prozesses in größeren Dicken als in der Halbleiterindustrie erforderlich, realisiert werden können. Weiterhin darf sich die Festigkeit dieser Schicht im Einsatzbereich des Sensors bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht verändern. Deshalb ist es nicht möglich, z.B. Kunststoffe mit sehr niedriger Dielektrizitätskonstante zwischen 2 – 2,3 einzusetzen. Siliziumoxid kann in Dicken von einigen Mikrometern abgeschieden werden und besitzt eine Dielektrizitäts-Konstante (ϵ_R) von 3,9.

Für die Berechnung der Kapazitäten der Sensorleiterbahnen zum Siliziumgrundkörper der Schaltung werden die sich ausbildenden Kapazitäten im folgenden anhand eines Ersatzschaltbildes diskutiert (Abb. 2.2). Die Kapazitäten C3 und C4 kennzeichnen die aktiven

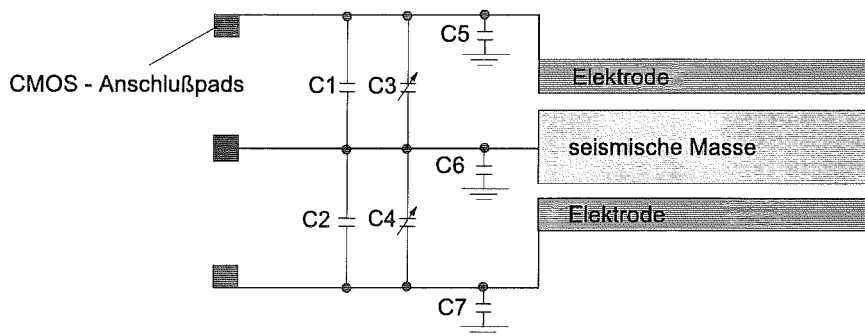


Abbildung 2.2: Ersatzschaltbild: Kapazitäten des Beschleunigungssensors.

Kapazitäten der zwei Sensorelektroden. Bei Einwirkung von Beschleunigungskräften verändert die seismische Masse ihre Lage gegenüber den Elektroden und führt zu einer Kapazitätsänderung zwischen diesen Komponenten. Die Kapazitätsänderung ist die Meßgröße des Sensors und sollte so groß wie möglich ausgelegt werden. Die Kapazitäten der Leiterbahnen zum Siliziumgrundkörper sind mit C5, C6 und C7 gekennzeichnet. Weiterhin gehen in die Empfindlichkeit des Sensors die parasitären Kapazitäten der Gegenelektroden und der seismischen Masse zueinander ein. Diese Größe ist gleich der bei Verwendung von Keramik als Substratmaterial und wird im folgenden nicht mehr berücksichtigt. Die Kapazitäten der Sensorzuleitungen zum CMOS-Anschlußpad sind gekennzeichnet durch C1 und C2. Kritisch für das Sensorausgangssignal sind die zu den Sensorkapazitäten C3 und C4 parallel liegenden parasitären Kapazitäten C1, C2 und C6, die das Nutzsignal abschwächen. Nur die Einflüsse der Kapazitäten C5 und C7 können durch die Auswerteschaltung eliminiert werden [18].

Die Angaben zu den elektrischen Eigenschaften der CMOS-Schichten wurden der Literatur [10] entnommen. Eine Leiterbahn, die auf einem Siliziumgrundkörper mit einer Zwischenschicht aus Siliziumoxid mit einer Dicke von 2,7 Mikrometern strukturiert wurde, besitzt eine Flächenkapazität von $0,014\text{ fF}/\mu\text{m}^2$ und eine Umfangskapazität von $0,041\text{ fF}/\mu\text{m}$. Jeder CMOS-Prozeß besitzt andere Kennwerte und deshalb kann mit diesen Werten nur eine Überschlagsrechnung durchgeführt werden, die mit Experimenten auf ihre Eignung überprüft werden. Die Fläche einer Elektrode beträgt $0,5 \cdot 10^6\ \mu\text{m}^2$ mit einem Umfang von $2,4 \cdot 10^4\ \mu\text{m}$. Der Luftspalt zwischen der seismischen Masse (Fläche $2,05 \cdot 10^6\ \mu\text{m}^2$) und der Siliziumoxidschicht beträgt $5\ \mu\text{m}$. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Kapazitäten.

	Kapazitäten des Sensoraufbaus zum Siliziumgrundkörper in Abhängigkeit der Siliziumoxidschichtdicke		
Dielektrikum- schichtdicke (s)	Anschlußleitungen C1 / C2	Sensorelektroden C5 / C7	seismische Masse C6
SiO ₂ 2,7 µm	1,4 pF	8,7 pF	4,6 pF
SiO ₂ 10 µm	0,4 pF	2,5 pF	1,3 pF

Tabelle 2.1: Kapazitäten der Sensorleiterbahnen und der seismischen Masse in Abhängigkeit der Siliziumoxidschichtdicke zum Siliziumgrundkörper.

Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurden die Kapazitäten der Elektroden zum Siliziumgrundkörper gemessen. Der Meßwert betrug pro Elektrode 10 pF und errechnet wurde ein Wert von 8,7 pF. Die Summe der für die Auswertung entscheidenden parasitären Kapazitäten C1, C2 und C6 beträgt ca. 10 pF und somit ist eine weitere Erhöhung der Siliziumoxid-dicke erforderlich. Durch die lineare Abhängigkeit der Kapazität von der Dielektrikumschicht-dicke beträgt sie bei einer SiO₂-Schichtdicke von 10 µm nur noch ca. 2,5 pF. Die Sensorkapazität abgeformter Sensoren mit einer Höhe von 150 Mikrometern beträgt (C3 und C4) ca. 2 · 3 pF. Deshalb kann nur 50 Prozent des Sensorsignal genutzt werden. Bei Keramik-substraten betragen die parasitären Kapazitäten 0,2 – 0,4 pF bei einer Sensorkapazität von 2 · 4,5 pF. Die parasitären Kapazitäten können außer der Erhöhung der Schichtdicke des Dielektrikums auch durch eine Verringerung der Leiterbahnfläche reduziert werden.

Einfluß des Substratmaterials auf das mechanische Sensorverhalten

Die thermische Kompensation des Sensors im Temperaturbereich zwischen 0 und + 100 °C in Abhängigkeit vom Substratmaterial wurde mit einem Simulationsprogramm für den LIGA-Beschleunigungssensor mit einem Meßbereich von ± 1 g getestet [19]. Dadurch, daß die Siliziumoxid- und die Leiterbahnebene nur eine Dicke von maximal zwei Prozent des Substratgrundkörperstärke besitzen, müssen diese Schichten weitestgehend diesem in dessen Ausdehnung bei Temperatureinwirkung folgen. Siliziumoxid weist den größten Unterschied der mechanischen Materialeigenschaft zu der bisher verwendeten Aluminiumoxidkeramik auf (siehe Anhang) und wird im folgenden als Extremfall betrachtet. Der Sensor wird mit dem Kraftkompensationsverfahren betrieben [4]. Die Sensorelektronik regelt die Kraft aufgrund der Beschleunigung, die auf die seismische Masse wirkt und die elektrische Kraft, die durch das Anlegen einer Spannung zwischen den Elektroden und der seismischen Masse entsteht, stationär aus (Gleichgewichtslage). Bei Beschleunigungseinwirkung wird die seismische Masse ausgelenkt und durch die Regelung wieder in ihre Gleichgewichtslage verschoben. Die dafür erforderliche elektrische Spannung ist das Meßsignal für die Beschleunigung. Für die Funktion des temperaturkompensierten Sensors sind vor allem der Verlauf des Offsets (Volt) und die Steilheit (Volt/g) des Sensorsignals in Abhängigkeit der Temperatur von Bedeutung. Ein Offset liegt vor, wenn kein Eingangssignal an der Elektronik anliegt aber ein Ausgangssignal zustande kommt. Der Betrag dieser Ausgangsspannung ist der Offset. Der Offset wird durch Herstellungstoleranzen der geometrischen Mittelstellung der seismischen Masse zu den Elektroden verursacht. Die Steilheit beschreibt das Verhalten des Sensorsignals als Funktion der Auslenkung der seismischen Masse. Die Kurvenverläufe von Offset und Steilheit sollten linear und parallel zur Abszisse verlaufen. Die Ergebnisse zeigen (Abb. 2.3, Abb. 2.4), daß

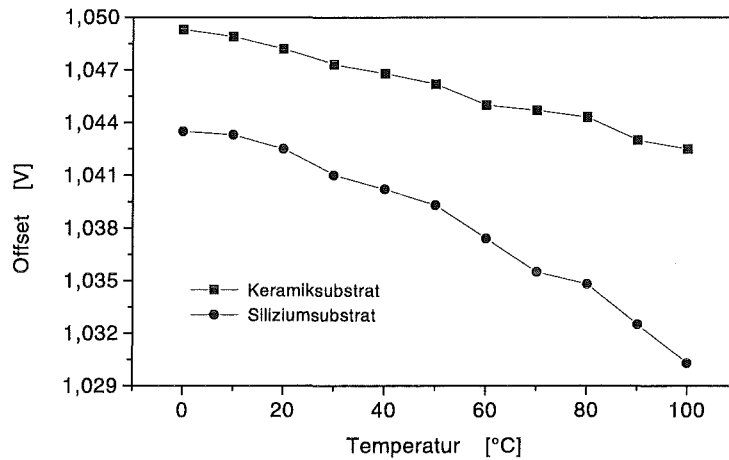


Abbildung 2.3: Offset des Sensors in Abhängigkeit vom Substratmaterial.

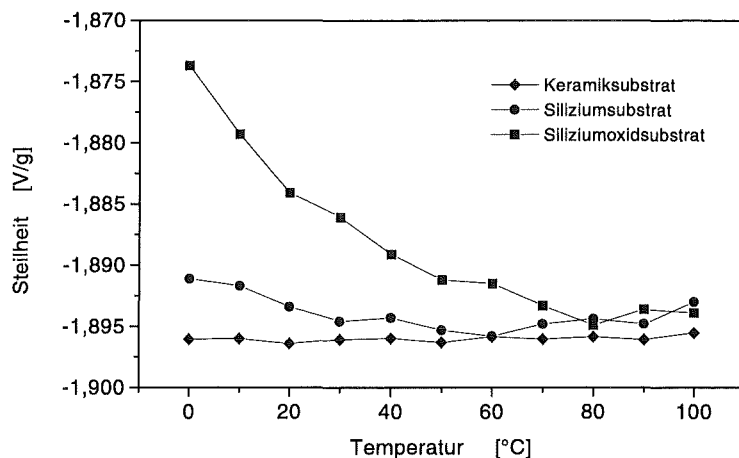


Abbildung 2.4: Steilheit des Sensorsignals in Abhängigkeit vom Substratmaterial.

bei Einsatz von Silizium sinkt der Offset und die Steilheit in ihrer Linearität in Bezug zur Aluminiumoxidkeramik verschlechtern. Dieses resultiert aus dem nicht für Silizium optimierten Sensordesign. So kann der Offset durch Abstimmung der positiven und negativen Temperaturkoeffizienten (siehe Kapitel 1) der Gegenelektroden linearisiert werden. Durch den Einsatz von Siliziumdioxid als Substratmaterial sinken im Vergleich zur Aluminiumoxidkeramik der Elastizitätsmodul auf 20 % und der thermische Ausdehnungskoeffizient auf 7 % (siehe Anhang). Dennoch ist es auch auf Siliziumoxid möglich, durch ein modifiziertes Sensordesign für einen begrenzten Temperaturbereich Sensoren herstellen zu können.

Durch die Entwicklung einer CMOS-kompatiblen Strukturierungsfolge ist die Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern möglich. Weiterhin konnte durch den Einsatz von Siliziumoxid eine elektrische Passivierung des kapazitiven LIGA-Beschleunigungssensors zum Siliziumgrundkörper und zur CMOS-Schaltung erreicht werden. Alle Funktionsschichten wurden ohne zusätzliche Passivierungsschritte der CMOS-Schaltung abgeschieden, strukturiert und z.T. entfernt. Diese Ergebnisse bilden die Voraussetzung für eine monolithische Integration des Beschleunigungssensors auf einer leistungsstarken Mikroelektronik.

Kapitel 3

Herstellung von mikrostrukturierten Kunststofffolien durch Warmumformung

Am Institut für Mikrostrukturtechnik wurde das Kunststoff-Warmumformverfahren (Prägen) für Strukturen mit einem Höhen- zu Breitenverhältnis (Aspektverhältnis) von über 30 entwickelt [20]. Für die Abformung wird ein LIGA-mikrostrukturiertes Abformwerkzeug eingesetzt. Nach der Erwärmung des Kunststoffs über die Erweichungstemperatur wird das Abformwerkzeug in diesen eingepreßt und nach der vollständigen Befüllung der Formnester des Abformwerkzeugs, wird der Verbund unter die Erweichungstemperatur abgekühlt und der mikrostrukturierte Stempel aus dem Kunststoff gezogen (Entformung). Voraussetzung für diesen Prozeß ist eine ausreichende Haftung des Formstoffs auf dem Abformsubstrat. Wie in Kapitel 1 erläutert, ist durch die Trennung der Verfahrensschritte Abformung und positionierte Anordnung der Mikrostrukturen die Herstellung von freitragenden Kunststofffolien erforderlich. Diese Forderung führt zu einem Entformprozeß, bei dem die Strukturen auf dem Abformsubstrat beim Herausziehen des Abformwerkzeugs nicht nur ausreichend auf dem Abformsubstrat haften, wie beim Verfahren der positionierten Abformung [9], sondern auch anschließend von diesem ablösbar sein müssen. Daraus folgt, daß die Haftung des Kunststoffs im Abformwerkzeug minimiert und auf dem Abformsubstrat nur so groß sein muß, daß die Entformkräfte übertragen werden. Möglichkeiten zur Lösung dieser Forderungen liegen in der Modifizierung der Materialeigenschaften des Kunststoffs und der Oberfläche des Abformsubstrats. Der Folienherstellungsprozeß führt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien und der Trennung der Folie vom Abformsubstrat zu Maßveränderungen (Verzügen) der Folie in Bezug zum Design des Abformwerkzeugs. Diese Verzüge müssen für die anschließende positionierte Anordnung von Foliensegmenten auf dem prozessierten Wafer mit Genauigkeiten von wenigen Mikrometern kompensiert werden.

3.1 Grundlagen der Folienabformung

3.1.1 Abformung in Abhängigkeit von der Kunststoffart

Das Umformverhalten eines thermoplastischen Kunststoffes wird maßgeblich durch die Änderung der mechanischen Eigenschaften im Erweichungsbereich bestimmt. Dieses Materialverhalten läßt sich anhand des Verlaufs des Elastizitätsmoduls als Funktion der Temperatur erklären (Abb. 3.1). In Abhängigkeit von der Kunststoffart können zwei charakteri-

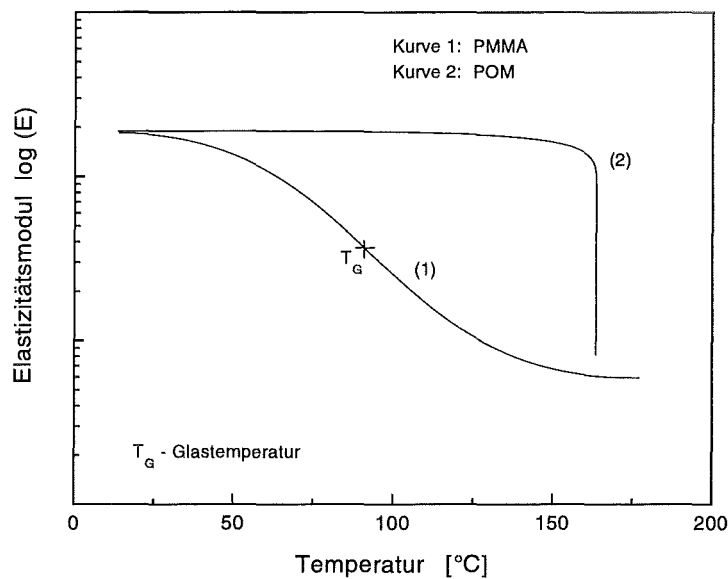


Abbildung 3.1: Skizze des Erweichungsverhaltens eines amorphen (PMMA) und eines teilkristallinen Kunststoffes (POM) als Funktion der Temperatur.

stische Kurvenverläufe auftreten. Bei amorphen Kunststoffen z.B. Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einer breiten Streuung des Molekulargewichts wird keine scharfe Erweichungstemperatur beobachtet, sondern ein Erweichungsbereich mit einer durch den Wendepunkt des Elastizitätsmodulverlaufs definierten Glasstemperatur (T_G) (Kurve 1 Abb. 3.1). Hingegen tritt bei teilkristallinen Kunststoffen bei Temperaturerhöhung von wenigen Kelvin über dem Kristallitschmelzpunkt ein Elastizitätsmodulabfall von einer Größenordnung auf (Kurve 2 Abb. 3.1). Ein Vertreter der teilkristallinen Kunststoffe ist Polyoxymethylen (POM). Dieses Polymer wird im Spritzguß industriell eingesetzt, da dieser Werkstoff im Vergleich zu anderen Kunststoffen eine geringe Haftungsneigung gegenüber Metallen aufweist [21]. Bedingt durch die hohe Kristallinität von bis zu 90 % sind diese Materialien wesentlich niederviskoser als amorphe bei gleicher Temperaturdifferenz über der Glasstemperatur. PMMA besitzt noch bei Temperaturen, die 100 K über der Glasstemperatur liegen, immernoch eine hartgummiähnliche Konsistenz, hingegen fließt POM schon bei 5 K über dem Kristallitschmelzpunkt wie dünnflüssiger Honig. Durch das bessere Fließverhalten von teilkristallinen Kunststoffen können diese Materialien beim Prägevorgang leichter verdrängt werden und ermöglichen deshalb dünnere Folienträgerschichten und kürzeren Prägezykluszeiten.

Der in Bezug zu PMMA niedrigere Reibkoeffizient¹ von POM bewirkt geringere Entformkräfte (Glg. 3.3) und dementsprechend geringer sind auch die notwendigen Haftungskräfte auf dem Abformsubstrat. Allerdings führt die geringe Haftneigung gegenüber anderen Materialien im Gegensatz zu PMMA zur schlechteren Haftung des Polymers auf dem Abformsubstrat beim Herausziehen des Abformwerkzeugs aus dem strukturierten Kunststoff nach dem Prägevorgang. Ebenfalls wirkt sich diese Materialeigenschaft negativ auf die Verbindungseigenschaften der mikrostrukturierten Folie mit dem prozessierten Wafer aus. Aus diesem Grund wurde POM bisher nicht zur Herstellung von mikrostrukturierten Halbzeugen genutzt. Neben der einfacheren Entformung besitzt POM durch seine höhere Zähigkeitswerte und der somit geringeren Spannungsrückempfindlichkeit bei Temperatureinwirkung und bei mechanischer Belastung, wie sie z.B. bei der Weiterverarbeitung der abgeformten Folien auftreten, einen weiteren Vorteil in Bezug zu PMMA. Die Materialeigenschaften des POM sprechen für den Einsatz beim Prägen und deshalb wird dieser Kunststoff stellvertretend für seine Kunststoffart betrachtet. Durch die Prozeßfolge Abformung und Verbindung der mikrostrukturierten Folien mit dem Substrat können die schlechteren Verbindungseigenschaften von POM in Bezug zu dem bisher in der Abformung eingesetzten PMMA separat für beide Prozesse optimiert werden.

Bisherige phänomenologische Untersuchungen zum Abform- und Entformverhalten [23,24] führten zu speziellen Aussagen für eine betrachtete Geometrie in Abhängigkeit der Abformparameter. In den folgenden Untersuchungen wird das Abform- und Entformverhalten der Kunststoffe PMMA und POM parallel untersucht, um den Einfluß der Kunststoffart (amorph und teilkristallin) auf diese Prozesse zu analysieren. Ein optimales Entformergebnis wird erzielt, wenn die Reibungskraft, hervorgerufen durch die Entformspannungen zwischen dem Abformwerkzeug und den Kunststoff-Mikrostrukturen, so gering ist, daß es zu keinen plastischen Verformungen der abgeformten Strukturen kommt. Deshalb werden im folgenden ausgehend von der thermischen Werkstoffanalyse der Kunststoffe die Entformspannungen im Kunststoff berechnet als Grundlage für eine gezieltere Einstellung der Abformparameter.

3.1.2 Entformprozeß

Nachdem die Mikrokavitäten des Abformwerkzeugs vollständig befüllt sind, wird das abgeformte Polymer unter seine Verfestigungstemperatur abgekühlt und das Prägewerkzeug aus dem Polymer gezogen. Bis zur Entformung des Kunststoffs aus dem Abformwerkzeug ist dem abgeformten Material ein Druck (Nachdruck) aufgeprägt, so daß es während des Abkühlprozesses zu keiner Lunkerbildung, bedingt durch den Materialschrumpf, kommt. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Kunststoffs, des Prägewerkzeugs und des Abformsubstrats kommt es zu mechanischen Spannungen an den Grenzflächen. Bei einer Relativbewegung zwischen Substrat und Abformwerkzeug treten infolge mechanischer Reibung Entformspannungen auf, die geringer sein müssen als die Dehngrenze und die Zugfestigkeit des Polymers, da es sonst zu Defekten der Mikrostruktur kommt [23, 25]. Deshalb ist die Kenntnis der Entstehungsmechanismen der Entformspannungen entscheidend für die Vermeidung von Strukturdefekten.

¹ [22] POM gegen Stahl: 0,2; PMMA gegen Stahl: 0,54

Die Abformwerkzeuge bestehen meist aus Metall. Es werden aber auch Silizium oder Siliziumverbindungen verwendet. Diese Materialien besitzen einen Elastizitätsmodul, der um zwei Größenordnungen über denen der abgeformten Kunststoffe liegt und besitzen einen um eine Größenordnung geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Daraus folgt, daß das Abformwerkzeug beim Entformprozeß thermisch ohne Beeinträchtigung durch den Formstoff schwinden kann und andererseits ist der Formstoff in seiner Bewegung eingeschränkt, was zu mechanischen Spannungen im Material führt. Ein Modell zur Beschreibung der thermisch bedingten Spannungen wurde von Michel [24] vorgestellt. Dabei wurde von rein elastischem Materialverhalten ausgegangen und keine Änderungen der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur quantitativ untersucht. Diese Untersuchungen gestatten keine Aussagen über den Spannungszustand zwischen dem Abformwerkzeug und dem Formstoff, da in dem für die Entformung wichtigen Temperaturbereich der Elastizitätsmodul von PMMA um drei Größenordnungen geringer ist als bei Raumtemperatur.

Die Spannungen im Formstoff lassen sich mit dem Hookeschen Gesetz berechnen:

$$\sigma = \sigma_D + \frac{E_{Fo}}{1 - 2\nu_{Fo}} (\alpha_{th,Fo} - \alpha_{th,FE}) \Delta T \quad (3.2)$$

Dabei ist (ν_{Fo}) die Querkontraktionszahl des Formstoffes und (ΔT) die Temperaturdifferenz zwischen der Erweichungs- und der Entformungstemperatur des Formstoffes. Die temperaturabhängigen Stoffgrößen werden über dieses Temperaturintervall gemittelt. Die Spannungen (σ) sind beim Übergang vom viskoelastischen zum elastischen Zustand des Formstoffs betragsmäßig so groß wie der daran abgeleitete, über die Abformparameter der Prägemaschine eingestellte Nachdruck (p_N) , wobei $(p_N = -\sigma_D)$ gilt. Gleichzeitig bewirken die unterschiedlichen Wärmedehnungen $(\alpha_{th,Fo} - \alpha_{th,FE})$ von Formstoff und Formeinsatz eine Verringerung der Druckspannungen beim Abkühlen. Die berechneten Spannungen können zur Ermittlung der Entformkraft genutzt werden, die zur Überwindung der Reibung erforderlich ist. Die Druckspannungen zwischen Formeinsatz und Formstoff führen beim Entformen zu Schubspannungen in den Grenzflächen der senkrechten Mikrostrukturwände. Die Integration dieser Schubspannungen über die gesamte Fläche der senkrechten Wände (A_{MS}) ergibt die durch Reibung verursachte Entformkraft (F_{Re}) :

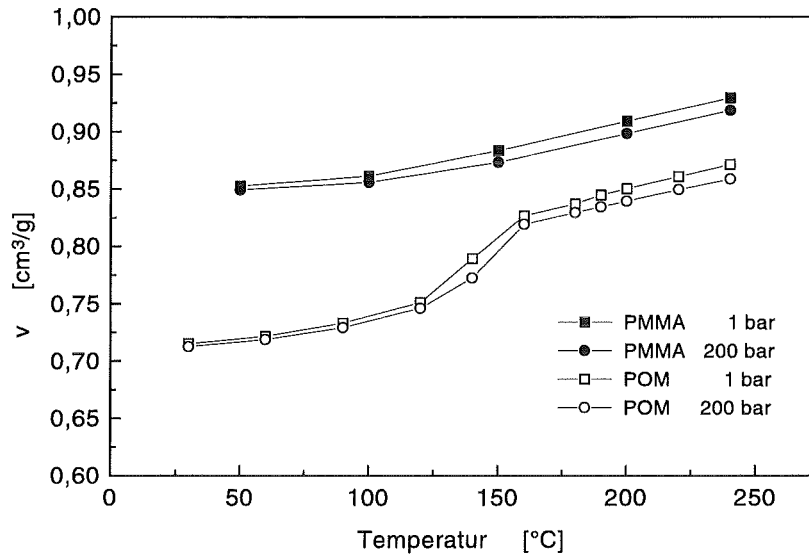
$$F_{Re} = \sigma \mu A_{MS} \quad (3.3)$$

wobei (μ) der Reibungskoeffizient zwischen Formstoff und Formeinsatz ist. Aus der Glg. 3.3 folgt, daß die durch Reibung verursachte Entformkraft minimal wird, wenn die Druckspannungen Null sind, also der Nachdruck durch den thermischen Schwund gemäß Glg. 3.2 gerade ausgeglichen ist.

Diese Untersuchungen zeigen, daß Entformungen unter Druck- und Zugspannungen nicht zu optimalen Entformergebnissen führen. Somit ist der Zustand von Interesse, bei dem der Nachdruck auf den Kunststoff, aufgeprägt durch die Abformmaschine, durch den Schwund des Abformwerkstoffes bei Abkühlung auf die Entformungstemperatur ausgeglichen wird. Im Temperaturbereich zwischen einsetzender Verfestigung des Kunststoffs und der Entformung ändern sich die Materialeigenschaften erheblich. Deshalb sind Berechnungen mit gemittelten Materialdaten wie in Glg. 3.2 unzulässig. Bei Berücksichtigung des Temperatureinflusses lautet diese Gleichung:

$$\sigma = \sigma_D + \int_{T_E}^{T_G} \left(\frac{E_{Fo}(T)}{1 - 2\nu_{Fo}(T)} \right) (\alpha_{th,Fo}(T) - \alpha_{th,FE}) dT \quad (3.4)$$

Besonders abhängig von der Temperatur ist der Elastizitätsmodul des Formstoffs. Die Querkontraktionszahl von Kunststoffen steigt mit der Temperatur [26] von 0,35 bis maximal 0,45. In den folgenden Berechnungen wird mit dem konstanten Wert von 0,35 gerechnet.



- v – spezifische Volumen bezogen auf das Gewicht der Probe

Abbildung 3.2: Darstellung des thermischen Ausdehnungsverhaltens von PMMA und POM unter Einbeziehung der Prägebedingungen (200 bar) im p,v,T -Diagramm.

Das p,v,T -Diagramm (Abb. 3.2) beschreibt das Ausdehnungsverhalten von Stoffen als Funktion der Temperatur. Aus dem Anstieg der Kurven kann der thermische Ausdehnungskoeffizient ermittelt werden. Die hohen Drücke geben die Prägebedingungen wieder. Hieraus kann abgelesen werden, daß es im Gegensatz zu dem amorphen Kunststoff PMMA beim teilkristallinen POM zur sprunghaften Änderung der Ausdehnung im Erweichungsbereich kommt. Dies bedeutet, daß die Entformungstemperatur von POM präziser eingestellt werden muß als bei PMMA, um Strukturverzügen vorzubeugen. In den weiteren Berechnungen der hydrostatischen Spannungen gemäß Glg. 3.4 wird mit der Näherung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei Raumtemperatur gerechnet. Die Aussage dieser Gleichung wird wesentlich durch die Änderung des Elastizitätsmoduls und der Kunststoffausdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Durch die Berechnung mit diskreten E -Modulwerten ändert sich Glg. 3.4 zu:

$$\sigma = \sigma_D + \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{Fo}(T_i)}{1 - 2\nu_{Fo}} \right) (\alpha_{th,Fo}(T_i) - \alpha_{th,FE}) \Delta T_i \quad (3.5)$$

Die Randbedingungen, die für Glg. 3.2 gelten, sind ebenfalls relevant für Glg. 3.4 und Glg. 3.5 jedoch fließt jetzt in die Berechnungen neben dem elastischen auch das plastische Werkstoffverhalten ein. Das plastische Materialverhalten tritt bei hohen Temperaturen und geringem Elastizitätsmodul auf. Jedoch kommt es nahe der Erweichungstemperatur zur Spannungsrelaxation. Aus der Abhängigkeit der Formstoffspannungen vom Elastizitätsmodul wird deutlich,

daß der plastische Bereich mit den geringen Elastizitätsmoduln zu einen vergleichweise geringen Spannungsanteil führt und somit nur geringe Fehler bei der Berechnung auftreten. Deshalb liefern Berechnungen für niedrige Entformungstemperaturen genauere Ergebnisse als bei höheren nahe dem Erweichungsbereich. Für die Aufnahme der Werkstoffparameter von PMMA und POM für die Entformungsberechnung wurden mit der Dynamisch-Mechanisch-Thermischen-Analyse (DMTA) Messungen des Biegeelastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Temperatur (Abb. 3.3) durchgeführt. Die Probe wird für die Messungen an zwei Stellen aufgelegt und mittig mit einem Stempel, der mit einer Frequenz von 1 Hz ausgelenkt wird, belastet. Zur Aufnahme der Elastizitätsmodulwerte wurden die Proben mit Abmessungen von $45 \cdot 12 \cdot 1 \text{ mm}^3$ eingesetzt und mit einem Standard-Programm nach DIN [27] temperiert. In den Verläufen des Elastizitätsmoduls (Abb. 3.3) wird der unter-

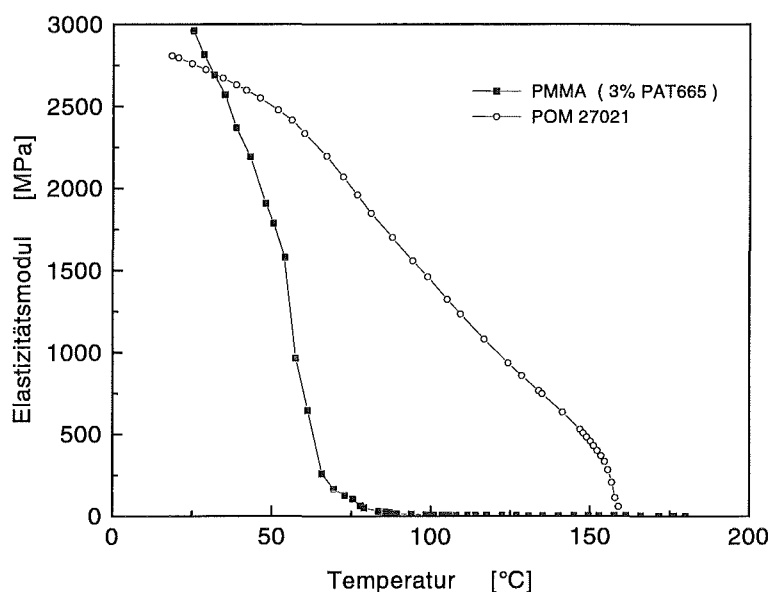


Abbildung 3.3: Elastizitätsmodul als Funktion der Temperatur für PMMA und POM.

schiedliche Materialcharakter zwischen amorphen und teilkristallinen Kunststoffen deutlich. Das teilkristalline POM behält bis circa 5 K unterhalb seines Kristallitschmelzpunktes eine hohe mechanische Festigkeit. Somit wird deutlich, daß POM schon im Gegensatz zu PMMA wenige Kelvin unterhalb seines Schmelzpunktes entformbar ist.

Weiterhin ist in Abb. 3.4 der Einfluß der Elastizitätsmoduländerung in Abhängigkeit der Zeit auf die Entstehung von Spannungen beim Abkühlprozeß nach dem Abformprozeß dargestellt. Der Spannungsanstieg von POM schon wenige Kelvin unter dem Kristallitschmelzpunkt resultiert aus dem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in diesem Temperaturbereich (Abb. 3.2) und deshalb muß es bei Entformungstemperaturen unter 150 °C zu erheblichen Verformungen der Mikrostrukturen kommen. Dieses Diagramm kann zur Ermittlung des notwendigen Nachdrucks bei gegebener Entformungstemperatur genutzt werden. Weiterhin wird deutlich, daß schon geringe Abweichungen von der optimalen Entformungstemperatur zu erheblichen Zug- oder Druckspannungen im Abformwerkstoff führen. Wird der Werkstoffwiderstand überschritten, kommt es zur plastischen Verformung. Werden

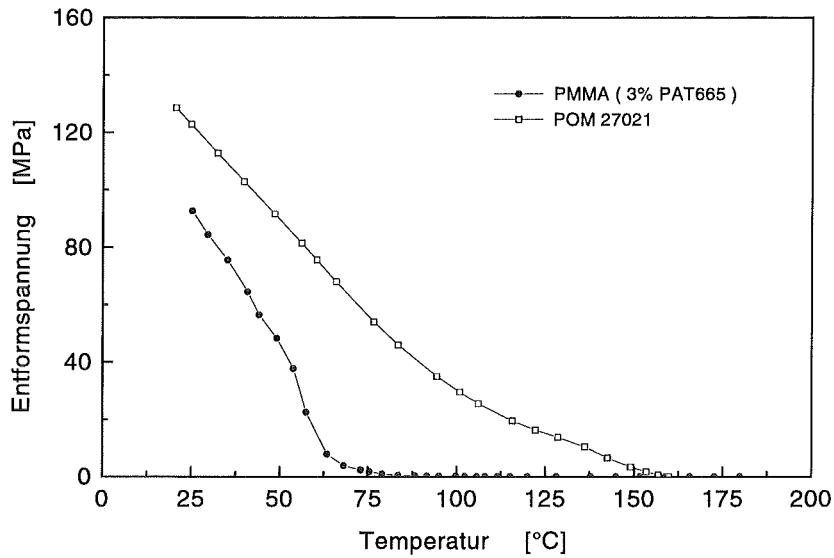


Abbildung 3.4: Entformspannungen als Funktion der Temperatur für PMMA und POM, Abformwerkzeug und Abformsubstrat bestehen aus den gleichen Materialien.

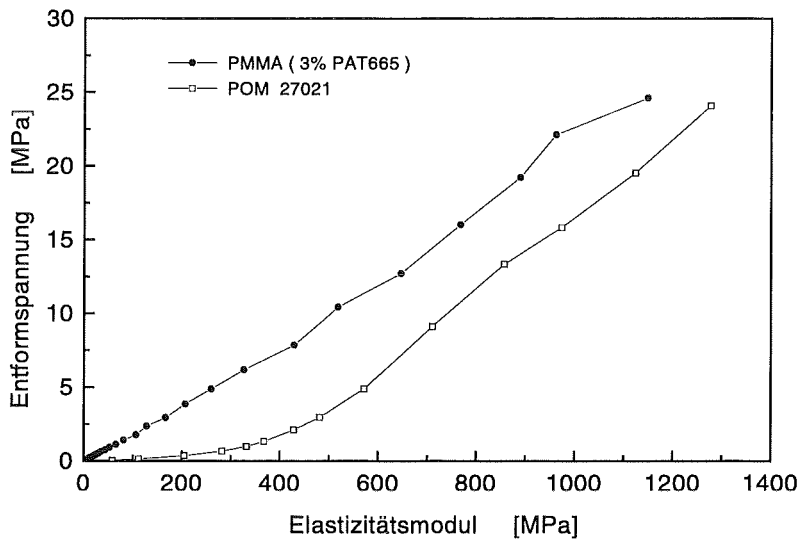


Abbildung 3.5: Entformspannungen als Funktion des Elastizitätsmoduls für PMMA und POM, Abformwerkzeug und Abformsubstrat bestehen aus den gleichen Materialien.

die berechneten Spannungen über dem Elastizitätsmodul aufgetragen, so können weitere mechanische Eigenschaften des Abformwerkstoffs beim Abkühlvorgang ermittelt werden. Bei geringen thermischen Spannungen haben die Kunststoffe einen bereits hohen Elastizitätsmodul. Die Zugfestigkeit von vielen Kunststoffen verhält sich linear zum Elastizitätsmodul

und deshalb kann der Entformvorgang schon wenige Kelvin unter dem Erweichungspunkt stattfinden.

In [28] sind noch weitere Kunststoffe bezüglich ihres thermischen Verhaltens charakterisiert worden. Die Untersuchungen der Entformspannungen in Abhängigkeit der Temperatur besitzen folgende Auswirkungen auf den Abformprozeß:

- Durch die Berechenbarkeit der Entformspannungen in Abhängigkeit der Temperatur kann der erforderliche Nachdruck an der Prägemaschine eingestellt werden, so daß die Mikrostrukturen weitgehend frei von thermischen Spannungen entformt werden können (Abb. 3.4).
- Für jedes Polymer gibt es einen minimalen Nachdruck, der Entformungen bei ausreichender Festigkeit und geringen thermischen Spannungen zuläßt (Abb. 3.5).
- Es sind genaue Regelungen für die Einstellung der Entformungstemperatur ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) und der Nachdruckkraft ($\pm 0,5 \text{ MPa}$) erforderlich.
- Durch die Ermittlung der Elastizitätsmodulverlauf weiterer Kunststoffe können die bisherigen Aussagen auf weitere Kunststoffe übertragen werden.

Bei diesen Betrachtungen wurde von Abformwerkzeugen mit senkrechten Wänden ausgegangen. Die mit der LIGA-Technologie hergestellten Werkzeuge zeichnen sich durch eine geringe Oberflächenrauigkeit aus, besitzen aber keine Entformschrägen zur Reduzierung von Entformspannungen. Durch Überbeanspruchung, z.B. zu hohe Spannungen beim Entformvorgang, kann es zu Deformationen des Abformwerkzeugs und somit zu negativen Entformwinkeln kommen. In Abb. 3.6 ist ein deformiertes Abformwerkzeug und seine Auswirkungen

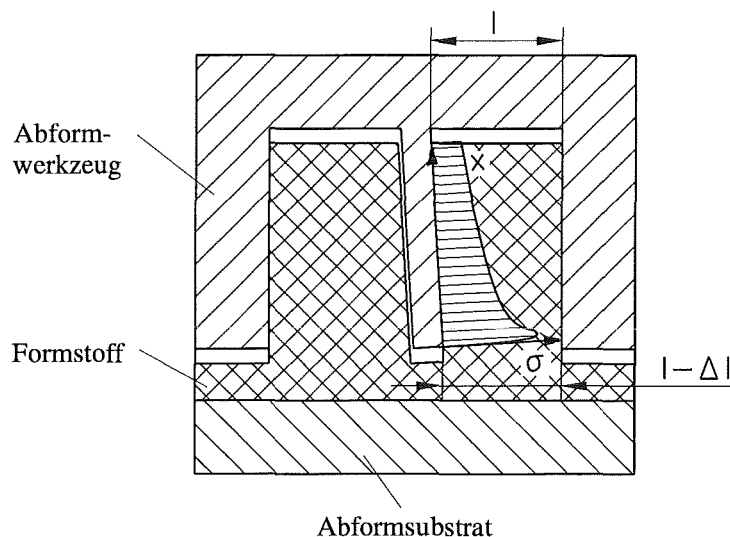


Abbildung 3.6: Entformung deformierter Abformwerkzeugstrukturen.

auf die Spannungsverteilung in der Kunststoffstruktur dargestellt. Die Kunststoffstruktur in dem sich vom Werkzeuggrund an verjüngenden Formnest ist zusätzlichen Spannungen

während des Entformprozesses ausgesetzt. Da die Entformung bei Temperaturen nahe dem Erweichungspunkt der Polymere durchgeführt wird, können für eine rechnerische Abschätzung der auftretenden Kräfte die Verformungen des Abformwerkzeugs vernachlässigt werden. Unter der Annahme eines einachsigen Druckzustandes und elastischen Materialverhaltens des Kunststoffs lassen sich die Druckspannungen berechnen:

$$\sigma = \epsilon E = \frac{\Delta l}{l} E \quad (3.6)$$

wobei (ϵ) die elastische Dehnung ist. Die Kunststoffstruktur soll eine Stegbreite von ($l = 100 \mu\text{m}$) haben und das Formnest soll sich um einen Mikrometer verjüngen. Somit ergeben sich im PMMA mechanische Spannungen von 20 MPa und bei einer Verjüngung von zehn Mikrometer eine Materialbelastung von 200 MPa. Diese hohen Belastungen führen zu Defekten bei Entformungstemperaturen von über ca. 70 °C, da PMMA erst bei dieser Temperatur einen Elastizitätsmodul von 200 MPa aufweist. Höhere Entformungstemperaturen führen zu geringeren Entformspannungen (Abb. 3.3) und gleichzeitig zu plastischen Verformungen, bedingt durch den geringen Elastizitätsmodul. Diese Strukturen weisen in Entformrichtung Dehnungen auf, die zum Abreißen der Strukturen führen und partielle Ablösungen von Strukturbereichen vom Abforms substrat hervorrufen können.

3.1.3 Trennung der abgeformten Strukturen vom Abforms substrat

Nach der Abformung des Kunststoffs muß dieser vom Substrat getrennt werden. Die Kunststoffschicht besitzt eine mehrere 10 μm dicke unstrukturierte Trägerschicht, die zur Handhabung der abgeformten Strukturen notwendig ist und durch die Prägeparameter in ihrer Dicke eingestellt werden kann. Eine solche Polymerschicht, die auf einer Metalloberfläche haftet und erst bei Raumtemperatur (T_R) vom Abforms substrat abgelöst wird, steht unter thermischen Spannungen (Glg. 3.4). Als Randbedingung für die Berechnungen wird angenommen, daß bei der Entformungstemperatur (T_E) ein spannungsfreier Zustand in der Folie vorliegt. Zur Beschreibung wird der Dehnungseinfluß des vergleichsweise steifen Substrats auf die Folie vernachlässigt. Im Gegensatz zum hydrostatischen Spannungszustand vor dem Entformen steht die entformte Folie unter einem zweiachsigen Spannungszustand, da die Oberfläche der Folie frei liegt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Formstoffs ist größer als der des Substrats und demzufolge steht die Folie beim Ablösen stets unter Zugspannungen. Bei symmetrischen Anordnungen der Mikrostrukturen und bei Verwendung von amorphen Kunststoff führen die Zugspannungen zu dem Bestreben der Folie, sich zum Zentrum hin zusammenzuziehen. Aus Glg. 3.4 geht weiterhin hervor, daß die Spannungen in der Trägerschicht nicht von deren Dicke (d) abhängen. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, daß dünne und dicke Folienträgerschichten gleichermaßen gut auf der Metalloberfläche haften. Für Ablösungen und Risse ist vielmehr die in der Folie gespeicherte Energie (U) (Glg. 3.7), die beim Ablösen freigesetzt wird, entscheidend. Die in der abgeformten Folie gespeicherte Energie ist abhängig vom mechanischen Spannungszustand des Materials (σ), vom Elastizitätsmodul (E_{F0}) und von der Dicke der Folie (d).

$$U = \frac{\sigma^2}{2 E_{F0}} d \quad (3.7)$$

Bei gleichbleibender Adhäsionsenergie zwischen Formstoff und Substrat lösen sich Folien mit größerer Trägerschichtdicke (d) leichter ab als solche mit geringer Schichtdicke. Durch die

Spannungseinleitung in die Grenzschicht zwischen Abformsubstrat und Formstoff können diese Materialien voneinander getrennt werden. Die eingeleitete Energie muß größer sein als die Adhäsionsenergie zwischen Kunststoff und Abformsubstrat. Zum Aufbringen und Einleiten dieser Energie in die Folie sind jedoch nur Spannungen (σ) zulässig, die unterhalb der Bruchspannung der Folie liegen. Diese für das Ablösen der Folie notwendigen Spannungen können durch ein weiteres Abkühlen unter Raumtemperatur oder durch Krafteinleitung in die Grenzschicht zwischen Folie und Substrat erzeugt werden. Aus der gegebenen Spannung (σ) und der inneren Energie der Folie (U) kann geschlossen werden, daß ein bestimmtes Folienmaterial nur bis zu einer minimalen kritischen Trägerschichtdicke durch mechanische Spannungen abgelöst werden kann, ohne daß in der Folie Spannungsrisse induziert werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die unter Zugspannungen stehenden abgeformten Folien vom

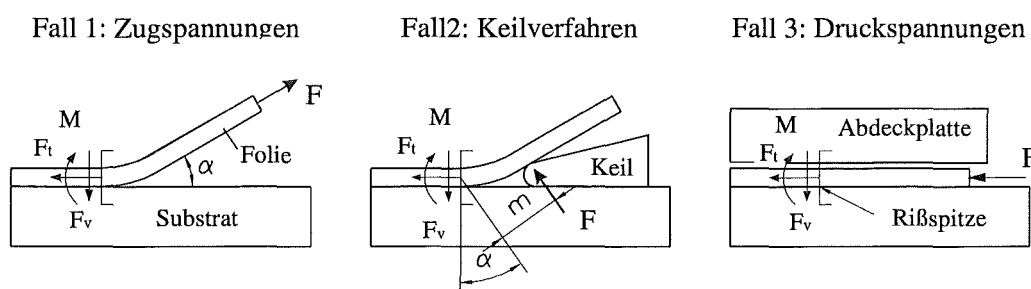


Abbildung 3.7: Verfahren zur Kunststoffablösung von Abformsubstraten.

Substrat zu trennen. Die in Abb. 3.7 vorgestellten Verfahren unterscheiden sich in der Art der Einbringung der Kräfte und Momente, die zur Ablösung führen. An der Rißspitze wirken unterschiedliche Spannungszustände und diese haben Auswirkungen auf die Trennung und die mechanische Belastung des mikrostrukturierten Folienmaterials. Die Fälle 1 und 2 führen durch das auftretende Moment (M) und die hohe vertikale Kraft (F_v) zu erheblicher Biege- oder Querbruchgefahr. Bei der dritten Verfahrensvariante werden durch die eingeleitete Kraft (F) nur Tangentialspannungen (F_t) in der Folie hervorgerufen. Diese Variante war im Experiment zur Trennung von Folien mit $50 \mu\text{m}$ Restschicht am wirksamsten. Um ein Ausbeulen der Folie zu unterbinden, kann diese während des Trennvorgangs abgedeckt werden. Weitere Trennmöglichkeiten, wie das selektive chemische Lösen einer Haftschrift zwischen Folie und Substrat, sind denkbar, aber für eine industrielle Anwendung kaum geeignet. Zusätzlich zur längeren Prozedurdauer sind auch noch ausreichende Selektivitäten im Lösungsverhalten der Schichten erforderlich.

3.1.4 Einfluß des Herstellungsprozesses auf die Maßhaltigkeit

In der Literatur [28, 29] wurden die Lageabweichungen der abgeformten Mikrostrukturen in Abhängigkeit vom Material des Abformwerkzeugs und des Abformsubstrats erklärt und z.T. mit Experimenten bestätigt. Diese Untersuchungen zeigten eindeutig, daß ein optimales Entformresultat nur mit Abformsubstraten erzielt werden kann, die aus dem Material des Abformwerkzeugs bestehen. Mit dem Verfahren der positionierten Anordnung von Mikrostrukturen besteht keine Abformsubstratabhängigkeit mehr wie beim Verfahren der positionierten

Abformung [9]. Deshalb können für die Herstellung der mikrostrukturierten Folien passend zum Nickel-Prägestempel Nickel-Abformsubstrate genutzt werden. Für die Abmessungen der Folie sind nur noch die Verzüge zwischen dem Entform- und Ablösevorgang entscheidend. Diese Feststellung wird unter der Randbedingung getroffen, daß beim Erreichen der Entformungstemperatur die Folie durch den angelegten Nachdruck (Absatz 3.1.2) spannungsfrei ist. Die Lageabweichungen der freitragenden Folie sind zusätzlich abhängig von der Art und Anordnung der Mikrostrukturen (G_{Fo}). Die Strukturen beeinflussen die Folienspannungen in den unterschiedlich gedehnten und mechanisch verschieden steifen Schichten. Die relative Längenänderung der abgeformten Folie (Δl_{Fo}) zu den Strukturen des Abformwerkzeugs (FE) können mit Glg. 3.8 berechnet werden, wobei die Einflüsse der Trägerschichtdicke (d) und die Mikrostrukturordnung (G_{Fo}) über eine unbekannt Funktion Berücksichtigung finden.

$$\Delta l_{Fo} = l_{Fo} (\alpha_{Fo} - \alpha_{FE}) (T_E - T_R) + f(G_{Fo}, d) \quad (3.8)$$

3.2 Abformung von mikrostrukturierten PMMA- und POM-Folien

Wie aus Absatz 3.1.4 hervorgeht, können minimale laterale Strukturverzüge der abgeformten Strukturen auf dem Abformsubstrat nur erreicht werden, wenn das Abformsubstrat und der Formeinsatz aus dem gleichen Material bestehen. Diese Anforderung wird um so wichtiger, je höher die abgeformten Strukturen werden, weil dann die Entformfläche zunimmt. Die Mikrostruktur des Beschleunigungssensors weist sehr schmale Stege von $10 \mu\text{m}$ Breite mit einer Strukturhöhe von $200 \mu\text{m}$ auf. Für das Verfahren der positionierten Anordnung (siehe Kapitel 1) der abgeformten Folien auf dem Wafer sind die Maße der Folien entscheidend. Mit Glg. 3.8 kann der Schrumpf der vom Abformsubstrat gelösten Folien teilweise berechnet werden. Das Designfeld hat eine Abmessung von $52 \cdot 20 \text{ mm}^2$ und so beträgt der Schrumpf vom Rand der Folie zum Mittelpunkt bei ($l_{Fo} = 26 \text{ mm}$, $(\alpha_{Fo} - \alpha_{FE}) = 57 \cdot 10^{-6} \mu\text{m/mK}$ und $(T_E - T_R) = 70 \text{ K}$) $104 \mu\text{m}$. Die Sensoren haben eine Ausdehnung von $3000 \cdot 2000 \mu\text{m}^2$ und der Schrumpf beträgt mit den oben genannten Bedingungen $12 \mu\text{m}$ bzw. $8 \mu\text{m}$. Dies bedeutet, daß auch die maßliche Veränderung innerhalb der einzelnen Sensoren nicht mehr vernachlässigbar ist und im Design des Formeinsatzes berücksichtigt werden muß. Um diese Überlegungen experimentell zu untermauern, wurden $150 \mu\text{m}$ hohe Komplementärstrukturen des Beschleunigungssensors auf einem Nickelsubstrat abgeformt². Eine ausreichende Haftung des Abformwerkstoffs auf Nickel konnte durch die Beschichtung der Nickeloberfläche mit Titan erreicht werden. Das Titan wurde zur Haftungsverbesserung naßchemisch oxidiert³. Nach der Abkühlung der noch nicht vom Nickelsubstrat abgelösten Strukturen auf Raumtemperatur wurden Verzugsmessungen der Kunststoffstrukturen bezüglich des Designs des Abformwerkzeugs durchgeführt. Es wurde infolge des Einsatzes des gleichen Materials für Abformwerkzeug und Abformsubstrat, keine Abweichungen festgestellt. Die Halbzeuge wurden durch Einleitung von Druckspannungen (Absatz 3.1.3) vom Abformsubstrat getrennt. In

²Umformkraft: 27 kN, Umformtemperatur: 190 °C, Umformzeit: 10 Minuten

Haltekraft bis zur Entformung: 6 kN, Entformungstemperatur: 90 °C

PMMA Zusammensetzung in Gew.- % 92,5 Plexit60, 3 PAT665, 3 BPO, 1,5 DMA

³H₂O + NaOH + H₂O₂; T = 65 °C; t = 120 s

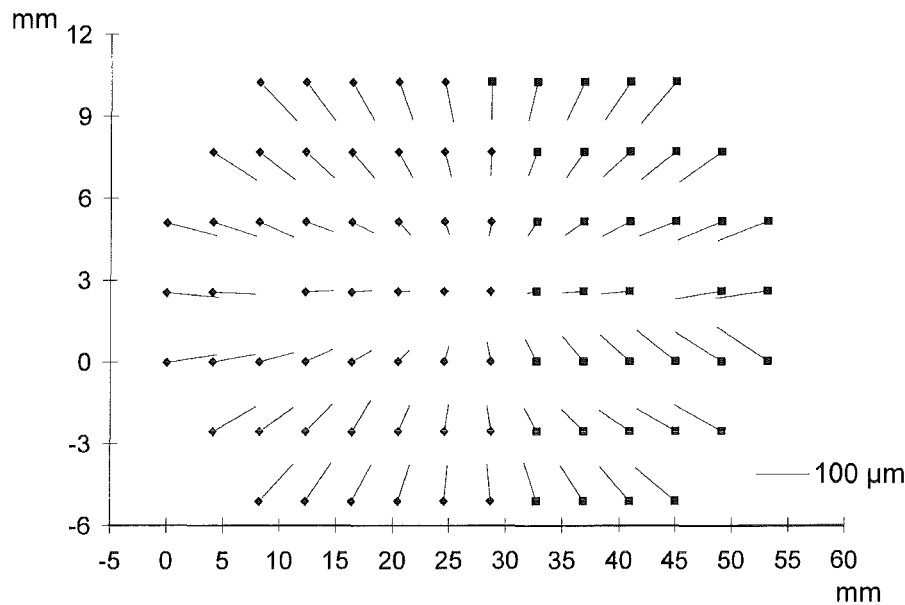


Abbildung 3.8: Maßverzug der vom Abforms substrat gelösten PMMA-Folien.

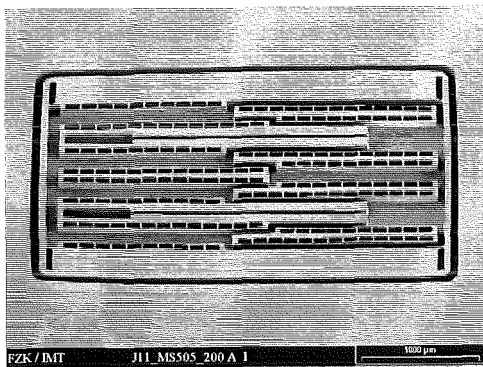
Abb. 3.8 sind die Verzüge⁴ der abgelösten Folie mit einer Trägerschicht von $50\ \mu\text{m}$ dargestellt. Als Bezugswerte (in der Abbildung als Vierecke gekennzeichnet) dienten die Designdaten des Abformwerkzeugs an ausgewählten Strukturkanten⁵. Das Ende der von den Bezugswerten ausgehenden Vektoren stellt die Position der ausgewählten Strukturkanten auf der Folienwerte dar. Nachdem die abgeformten Strukturen auf dem Nickelsubstrat vermessen waren, wurden die mikrostrukturierten Folien vom Abforms substrat gelöst und vermessen. Es wurde ein Schrumpf von 0,27 Prozent ermittelt. Die Maßabweichungen zwischen den vermessenen Folien lagen im Bereich der Meßgenauigkeit von $\pm 2\ \mu\text{m}$. Die Vektoren der Verzüge sind zum Mittelpunkt des abgeformten Designs gerichtet und dies bestätigt die Aussagen zum symmetrischen Schrumpf von abgelösten amorphen Kunststofffolien (siehe Absatz 3.1.3). Nach einer Woche⁶ wurden die Folien nochmals vermessen und der Schrumpf betrug nun 0,34 Prozent und war ebenfalls symmetrisch zum Designmittelpunkt (Abb. 3.8). Durch die Lagerung kommt es zu einer weiteren Relaxation der durch den Abform- und Ablöseprozeß der Folie vom Abforms substrat in der Folie induzierten mechanischen Spannungen. In der theoretischen Betrachtung wurde ein Schrumpf von 0,39 Prozent errechnet. Diese Abweichung läßt sich durch den Einfluß der Trägerschichtdicke erklären [29]. Die gemessene Abweichung von 0,34 Prozent muß beim Design des Abformwerkzeugs oder der Leiterbahn- und Opferschichtebene für den sich anschließenden positionierten Bondprozeß der abgeformten Folien auf den elektronischen Schaltungen berücksichtigt werden. Die Untersuchungen ergaben neben einer Abhängigkeit der Folienmaße von den Umformparametern mit ihrem Einfluß auf die Trägerschichtdicke, daß auch die zeitliche Abfolge der Schritte Abformung und Ablösen der Folie vom Abforms substrat einen entscheidenden Einfluß auf die Folienmaße besitzen. Neben den Verzügen der abgeformten Folien ist die Mikrostrukturqualität für die Funktion und den anschließenden Bondprozeß entscheidend. Die Sollbreite des Kondensatorspaltes

⁴Meßwertanalyse [30]

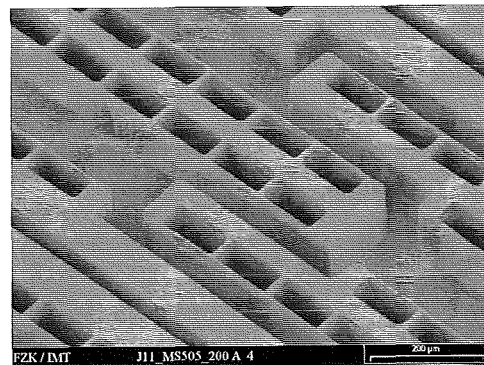
⁵gemessen mit Mikrokoptisch Fa. Leica, Genauigkeit $\pm 2\ \mu\text{m}$

⁶Lagerung bei Raumtemperatur und lichtabgeschirmt

des Beschleunigungssensors beträgt $4\ \mu\text{m}$. Die abgeformten Strukturen beim Verfahren der positionierten Abformung [9] besitzen eine Breite von $10\ \mu\text{m}$, um den Strukturverlust beim Reaktiven Ionen-Ätzen der Trägerschicht, die sich zwischen der Oberfläche des Abformsubstrats und dem Grund der Mikrostrukturen befindet, zu kompensieren. Besonders schwierig war die Entfernung von PMMA in schmalen Gräben mit einer Breite von unter $10\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von über $100\ \mu\text{m}$. Das Verfahren des thermischen Verschweißens benötigt keinen so hohen Strukturvorhalt, weil nur noch während der Entfernung der dünnen Adhäsivschicht von $5\ \mu\text{m}$ auf der Oberfläche des Wafers die Mikrostrukturseitenwände dem reaktiven Plasma ausgesetzt sind (siehe Kapitel 1). Deshalb war es von Interesse, ob es möglich ist, die abgeformten Kunststoffstegbreiten, die nach dem Gesamtprozeß den Kondensatorspalt bilden, weiter zu reduzieren. Im Experiment wurde versucht, den Extremfall eines $200\ \mu\text{m}$ hohen Abformwerkzeugs mit einer minimalen Strukturweite von $4\ \mu\text{m}$ abzuformen und die Strukturen vom Abformsubstrat zu trennen. Dem Abformkunststoff PMMA wurde zur Reduzierung des Reibungskoeffizienten gegenüber dem Abformwerkzeug 3 % des Trennmittels PAT665⁷ zugemischt [9]. Dieser Trennmittelanteil reichte nicht aus, um die Strukturen zu entformen. Deshalb wurde untersucht, ob auch höhere Trennmittelgehalte dem Kunststoff zugesetzt werden können. Ab einem Trennmittelgehalt von 7 % konnten die Mikrostrukturen mit hoher Qualität entformt werden (Abb. 3.9). Die Entformungstemperatur wurde so weit gesteigert,



Gesamtansicht einer abgeformten PMMA-Beschleunigungssensorstruktur



Detail der abformkritischen Strukturen

Wandstärke : $4\ \mu\text{m}$
 Wandlänge : $110\ \mu\text{m}$
 Strukturhöhe: $200\ \mu\text{m}$

Abbildung 3.9: Abgeformte PMMA-Struktur des Beschleunigungssensors mit $4\ \mu\text{m}$ minimaler Stegbreite und $200\ \mu\text{m}$ Höhe.

daß keine plastischen Verformungen des Materials auftraten, um die Entformspannungen zu minimieren. Somit konnte eine Steigerung des Aspektverhältnisses von 15 auf 50 am Beispiel des temperaturkompensierten Beschleunigungssensors erreicht werden.

Für die Abformbarkeit bei gleichen Umformbedingungen und unterschiedlichen Mikrostrukturhöhen stellte das Verhältnis der Entformfläche zur Grundfläche der Mikrostruktur eine aussagekräftigere Größe als das Aspektverhältnis von Wandstärke zu Strukturhöhe dar. Denn für eine sichere Entformung muß die Haftreibung der Mikrostruktur im Formeinsatz überwunden

⁷Fa. Würtz Bingen

werden. Die Entformkraft muß von der Grundfläche der Mikrostruktur über die Restschicht auf den Substratgrund übertragen werden. Zu einer Übereinstimmung des Entform- zum Grundflächenverhältnisses und des Aspektverhältnisses kommt es bei der Betrachtung gleicher Mikrostrukturgeometrien. Die Zugfestigkeit des Abformmaterials in Abhängigkeit von der Entformungstemperatur und der Haftreibung des Polymers im Formeinsatz begrenzt die maximale Strukturhöhe. Dabei ist eine ausreichende Haftung zur Oberfläche des Substrats Voraussetzung.

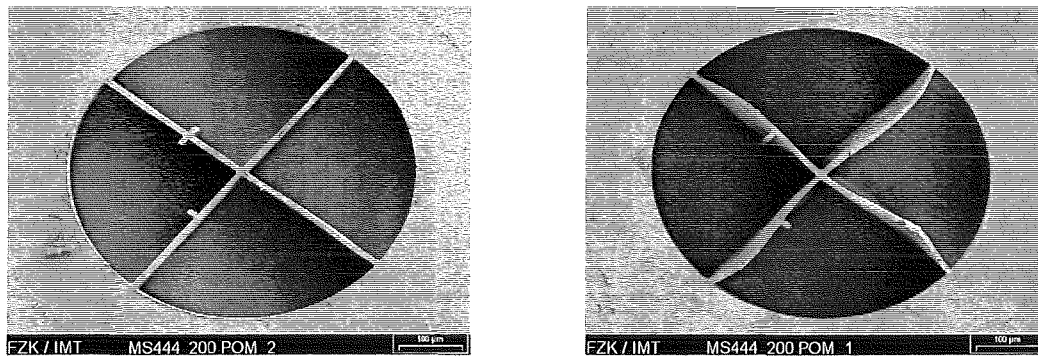
Die theoretischen Betrachtungen zum Entformverhalten zeigten, daß der teilkristalline Kunststoff POM günstigere Entformeigenschaften besitzt. Die Ursache dafür ist seine 40 fach höhere Festigkeit bei einer für die Entformung günstigen Entformspannung von 0 – 3 MPa als bei PMMA (Abb. 3.4). Daraus folgt eine geringere Empfindlichkeit des POM gegenüber plastischen Verformungen während des Entformprozesses. Zusätzlich tritt bei POM eine geringere Entformkraft, bedingt durch den kleineren Haftreibungskoeffizienten auf. Diese Haftungseigenschaften gegenüber anderen Stoffen führt zu Schwierigkeiten bei der Übertragung der Entformkräfte zum Abformsubstrat. Deshalb muß eine haftvermittelnde Schicht zwischen POM und dem Abformsubstrat eingesetzt werden. Aufgrund der Variationsmöglichkeit der stofflichen Zusammensetzungen wurde PMMA ohne Trennmittel als Haftvermittler zum Nickelabformsubstrat eingesetzt. Durch die hohen Entformungstemperaturen bei POM, die weit über der Glasatemperatur von PMMA liegen, ist das PMMA beim Entformvorgang niederviskos und besitzt so eine ausreichende Klebwirkung zu POM und der Abformsubstratoberfläche. Die Festigkeit von POM sinkt beim Erreichen des Kristallitschmelzpunktes so stark, daß der Kunststoff schon 2 K über dem Schmelzpunkt abgeformt werden kann. Dieses Verhalten tritt auch bei der Abkühlung von POM unter den Kristallitschmelzpunkt auf, so daß der Entformvorgang 5 K unter dem Schmelzpunkt von 156 °C beginnen kann.

Die Herstellung von mikrostrukturierten POM-Folien des Beschleunigungssensors wurden mit einem Abformwerkzeug mit einer Höhe von 200 µm und einer minimalen Stegbreite von 9 µm durchgeführt. Zur Abformung wurde die aus den theoretischen Betrachtungen zum Entformungsverhalten der Kunststoffe ermittelten Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Temperatur (Abb. 3.4) genutzt. Daraus ist ersichtlich, daß schon 15 K unterhalb des Kristallitschmelzpunktes eine Spannung von 5 MPa vorliegt und durch den entsprechenden Prägenachdruck (Glg. 3.2) kompensiert werden muß. Deshalb wurde die Entformungstemperatur⁸ so nah wie möglich an den Kristallitschmelzpunkt gelegt. Die abgeformten Strukturen wiesen die gleiche Qualität auf wie die PMMA-Strukturen und ließen sich von der PMMA-Haftschrift einfach durch Abziehen entfernen oder z.T. lösten sie sich aufgrund der großen Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von PMMA und POM von selbst. Die Entformkräfte waren nur ein zehntel so groß wie bei PMMA und bestätigten damit die theoretischen Betrachtungen zur mechanischen Reibungskraft. Entformungstemperaturen von unter 145 °C führten zu Verzügen der Strukturen. Im Experiment wurden ebenfalls 200 µm hohe Justierkreuzstrukturen mit einer Steglänge von 500 µm und einer Wandstärke von 7 µm abgeformt. Durch die hohe Festigkeit des POM kam es nicht wie bei PMMA zu Strukturabrissen

⁸Prägematerial: POM 27021 (Hostaform Fa. Hoechst)

Umformkraft: 40 kN, Umformtemperatur: 160 °C, Umformzeit: 2 Minuten

Haltekraft bis zur Entformung: 10 kN, Entformungstemperatur: 150 °C



abgeformte POM-Justierkreuze mit einer Strukturhöhe von 200 µm, einer Steglänge von 500 µm und einer Stegbreite von 7 µm

Entformtemperatur von 150 °C

Entformtemperatur von 140 °C

Abbildung 3.10: POM-Justierkreuze abgeformt mit unterschiedlichen Abformparametern.

und zu Deformationen in der Strukturhöhe. Diese Strukturen wiesen nur laterale Verzüge in der Mikrostrukturebene auf (Abb. 3.10).

Die Werkstoffanalyse zum Festigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur ermöglichte die Berechnung der Entformspannungen und eine genauere Einstellung der Umformparameter zur Herstellung von abgeformten Strukturen. Aufgrund dieser Untersuchungen besteht die Möglichkeit, abgeformte PMMA-Strukturen mit höheren Aspektverhältnissen und erstmalig POM-Strukturen mit dem Warmumformverfahren als freitragende Folien herzustellen.

Die Erhöhung des Aspektverhältnisses bei PMMA konnte neben der genaueren Einstellung der Abformparameter durch den Einsatz von höheren Trennmittelgehalten im Kunststoff erzielt werden. Weiterhin wurden die Kunststoffverzüge quantifiziert, um die positionierte Anordnung der Folien auf dem Wafer auf wenige Mikrometer genau zu garantieren.

Für die Abformung von POM war es erforderlich, eine Haftschrift zur Übertragung der Entformkräfte zwischen POM und dem Abforms substrat zu entwickeln. Eine wenige Mikrometer dicke Schicht aus PMMA ermöglicht die Entformung von POM, weil die Entformtemperatur von POM über der Glastemperatur von PMMA liegt und das PMMA bei dieser Temperatur so niederviskos ist, daß es eine gute Klebewirkung besitzt. Allerdings gehen die Materialien PMMA und POM keine stoffliche Verbindung ein, so daß sie nach der Abkühlung auf Raumtemperatur physikalisch voneinander getrennt werden können. Dieser Vorgang wird zusätzlich durch den großen Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten erleichtert.

Diese Überlegungen zum Entformungsverhalten von Thermoplasten zeigen eine Vorgehensweise, um neue Materialien für weitere Anwendungen des Warmumformverfahrens einsetzen zu können.

Kapitel 4

Positionierte Anordnung von Mikrostrukturen auf CMOS–Wafers

Nur ein geringer Teil mikrotechnisch hergestellter Produkte kann monolithisch aufgebaut werden. In vielen Fällen werden die einzelnen Mikrokomponenten mittels unterschiedlicher Technologien hergestellt, so daß eine Mikromontage unvermeidbar ist. Dabei muß die Positionierung der abgeformten Mikrostruktur mit hoher Präzision erfolgen, im Fall des Beschleunigungssensors auf $\pm 5 \mu\text{m}$ genau. Dafür werden Prozesse zur Magazinierung, Vereinzelung und Handhabung benötigt, die kompatibel zu den Bestückungsautomaten der Halbleiterindustrie sein müssen, um eine schnellere industrielle Umsetzung zu ermöglichen. Nach dem Abformprozeß liegen die Kunststoff–Mikrostrukturen des Beschleunigungssensors im Folienverbund vor. Der zu lösende Gesamtprozeß umfaßt den Materialfluß der mikrostrukturierten Folie nach der Abformung bis zur Bestückung des CMOS–Wafers (dem Zielsubstrat). Die Magazinierung muß die makroskopische Ausrichtung der Folie und der vereinzelt abgeformten Sensoren im Magazin ermöglichen. Die Vereinzelung der Strukturen darf zu keiner Ablagerung von Partikeln auf der strukturierten Seite der Folie führen. Weiterhin muß eine Greifertechnik entwickelt werden, die eine schonende Handhabung der Bauteile erlaubt [31].

Bisher wurden häufig makroskopische Prinzipien und Maschinen zur Handhabung von mikroskopischen Bauteilen, wie z.B. mechanische Fingergreifer [32–34], angepaßt. Dadurch kommt es zu unzulässigen Bauteilbelastungen und u.U. zur Oberflächenschädigung.

Die unterschiedlichen Verbindungstechniken der abgeformten Folien mit dem Wafer führen zu verschiedenen Prozeßabläufen. So erfordert die thermische Verbindung von PMMA–Mikrostrukturen mit dem Zielsubstrat Prozeßzeiten von mindestens zwei Stunden (siehe Kapitel 5), so daß eine direkte Verschweißung nach jedem Positionierprozeß nicht sinnvoll ist.

4.1 Magazinierung und Vereinzelung der abgeformten Folien

Die abgeformten mikrostrukturierten Strukturen auf der Folie besitzen Abmessungen, die vom LIGA–Prozeß abhängig sind. Um diese Kunststoff–Mikrostrukturen für die positionierte Anordnung auf dem Wafer bereitzustellen, ist ein Magaziniersystem erforderlich. Das Magazin sollte so entwickelt werden, daß es an bestehende Bestückungsanlagen der Halbleiterindu-

strie adaptiert werden kann, da es den Automatisierungsgrad des gesamten Montageprozesses beeinflusst. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit des gesamten Verfahrens im Vergleich zu den in der Mikrotechnik derzeit üblichen manuellen Montagetechniken erhöht [35, 36]. Nach dem Abformprozeß sind die Mikrostrukturen über die Trägerschicht verbunden und müssen aus dem Folienverbund vereinzelt werden. Der Erhalt des Ordnungszustandes der einzelnen Foliensegmente im Magazin, unter Berücksichtigung des Greifprinzips für den sich anschließenden Bestückungsprozeß, ist die Voraussetzung für eine allgemeine Magazinauslegung für abgeformte Strukturen. Die Auslegung der Magazinbauform soll sich am Prinzip — Aufrechterhaltung einmal geschaffener Ordnung — orientieren. Dieses Prinzip sagt aus, daß die Teile während des gesamten Materialflusses nicht in ihrem Ordnungsgrad verändert werden, um so die aufwendigen und für die weitere Montage oder Bearbeitungsprozesse nötigen Schritte zur Wiederherstellung des Ordnungsgrades zu vermeiden. Im Makroskopischen besitzen die zu magazinierende Teile Geometriemerkmale für die Ausrichtung im Magazin. Für Mikrostrukturen ist diese Bauteilmarkierung nicht zu realisieren, da die Teile Strukturen im Mikrometerbereich aufweisen und die zulässige mechanische Flächenpressung beim Greif- und Einsetzvorgang ins Magazin überschritten wird.

In der Feinwerktechnik und Elektronik werden insbesondere Flachmagazine eingesetzt. Für die Befüllung der Magazine wird ein Umsetzungsvorgang benötigt, bei dem die vereinzelt Chips von einer Haftfolie abgenommen werden und anschließend in einem Chip-Tray [37, 38] oder in einem nach firmeninternen Richtlinien gestalteten Magazin abgesetzt werden. Somit ist für die abgeformten Bauteile ein zusätzlicher Umsetzungsvorgang erforderlich. Weiterhin ergibt sich neben der mechanischen Belastung eine Verschmutzungsgefahr durch Staubpartikel, die sich nachteilig auf die folgenden Prozeßschritte auswirkt.

Aufgrund der geringen Abmessungen der zu magazinierenden Teile, ist ein durchgängiges Konzept von der Herstellung bis zur Bestückung vorteilhaft. Das heißt, daß die Vereinzelung und die Teilebereitstellung mit nur einem Magazin zu realisieren sind. Das Magazin für das Verfahren der positionierten Anordnung muß Schnittstellen für das Handhabungsgerät und für die Vereinzelung beinhalten. Für die Vereinzelung der Folien bietet sich das in der Halbleiterindustrie für die Wafereinzelnung angewandte Sägen an [39]. Die Eignung dieses Prozesses wurde an der Beschleunigungssensor-Mikrostruktur nachgewiesen. Darüber hinaus waren die hohe Zuverlässigkeit, die realisierbare Genauigkeit ($\pm 3 \mu\text{m}$) und der zur Zeit höchste Automatisierungsgrad des Sägeprozesses ebenfalls entscheidende Auswahlkriterien. Die Folien konnten ohne Beschädigung vereinzelt werden, was vor allem durch die geringen Schnittkräfte zu erklären ist. Diese geringe Krafteinwirkung ermöglicht einen neuen Ansatz, das pneumatische Klemmen, zur Aufbringung der Haltekraft während der Vereinzelung.

Anforderungen an das Magazin

Für ein durchgängiges Konzept für die Magazinierung ergeben sich für den Magazinaufbau die folgenden Anforderungen:

- Einfaches bestimmtes Einlegen der abgeformten Folie
- Erhalt des Ordnungsgrades vom Einlegen der Strukturen in das Magazin nach der Abformung bis zum Bestückungsprozeß
- Lagerung und Transport

- Vereinzelung der abgeformten Folie
- Bereitstellung für den Bestückungsprozeß
- Reinigung der Abformteile und des Magazins

4.1.1 Realisierung

Wie eingangs erläutert, werden die in der Halbleiterindustrie verwendeten Chip-Trays in verschiedenen Standardgrößen angeboten. Die Sicherung des Ordnungsgrades ist vom Rastermaß abhängig und erfolgt durch Formschluß. Diese standardisierte Magazinieretechnik ist für die Handhabung der abgeformten Folien nicht geeignet, da sich die Folien nicht im Magazin vereinzeln lassen und somit ein Umsetzungsvorgang nach der Vereinzelung notwendig wäre. Dieser Vorgang dürfte außerdem die Oberflächen und die filigranen Kunststoffstrukturen nicht schädigen. Weiterhin werden zur Waferhandhabung Adhäsivfolien eingesetzt. Allerdings eignet sich diese Methode nicht für eine längere Lagerung, da die Haltekraft mit der Zeit abnimmt. Im Experiment zeigte sich bei der Handhabung von abgeformten Mikrostrukturen, daß die Haltekraft so stark ist, daß beim Ablösen der Strukturen für den Bestückungsvorgang die Strukturen zerstört werden.

Zwischen den abgeformten Mikrostrukturen der Folie befinden sich, bedingt durch das Abformverfahren, unstrukturierte Kunststoffstege. Jede Mikrostruktur besitzt eine Einrahmung, die die Tiefe der Mikrostruktur besitzt. Dieser Rahmen wird zur Vereinzelung genutzt, indem mit einer Wafersäge die Trägerschicht im Strukturgrund des Rahmens aufgetrennt wird (Abb. 4.1). Anschließend können sich die einzelnen Strukturen lateral mit der doppelten Rahmenbreite zu den Kunststoffstegen zwischen den Strukturen frei bewegen. Deshalb kann in

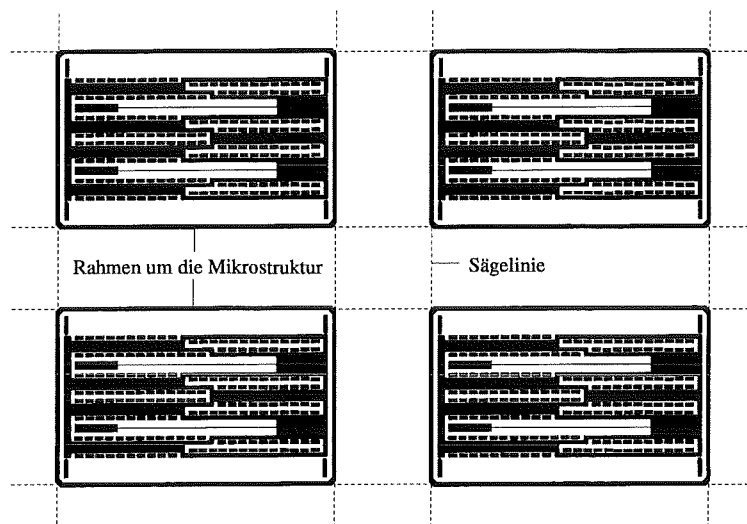


Abbildung 4.1: Folienschnitt mit vier abgeformten Strukturen mit dem Sägelinienverlauf zur Vereinzelung der Mikrostrukturen, die schwarzen Bereiche stellen die Vertiefungen in der Folie dar.

dem neu entwickelten Magazin auf ein Raster verzichtet werden, wie es für eine formschlüssige Sicherungsfunktion zur Erhaltung des Ordnungsgrades im allgemeinen benötigt wird. Durch

die geringen Sägekräfte für die Vereinzelung können die Folien durch Unterdruck z.B. auf Metallflächen fixiert werden. Im Experiment wurde mit einem Unterdruck von 0,8 bar, bei Berücksichtigung des Reibungskoeffizienten zwischen Aluminium und PMMA von 0,4, eine Haltekraft von 80 mN pro Sensor realisiert. Diese Variante zum Erhalt des Ordnungsgrades der Folie ermöglicht eine definierte Lagegenauigkeit durch das Design des Rahmens. Die Entnahmekräfte der vereinzelt Strukturen sind im Vergleich zu den Adhäsionsfolien gering, da nur die Gewichtskraft der vereinzelt Struktur überwunden werden muß.

Das realisierte Magazin (Abb. 4.2) zeigt die Schritte: Positionierung der Abformfolie im Magazin, Vereinzelung der Folie durch Sägen, Bereitstellung und Entnahme der vereinzelt Mikrostrukturen am Handhabungsgerät. Nach der Abformung wird die Folie in einer

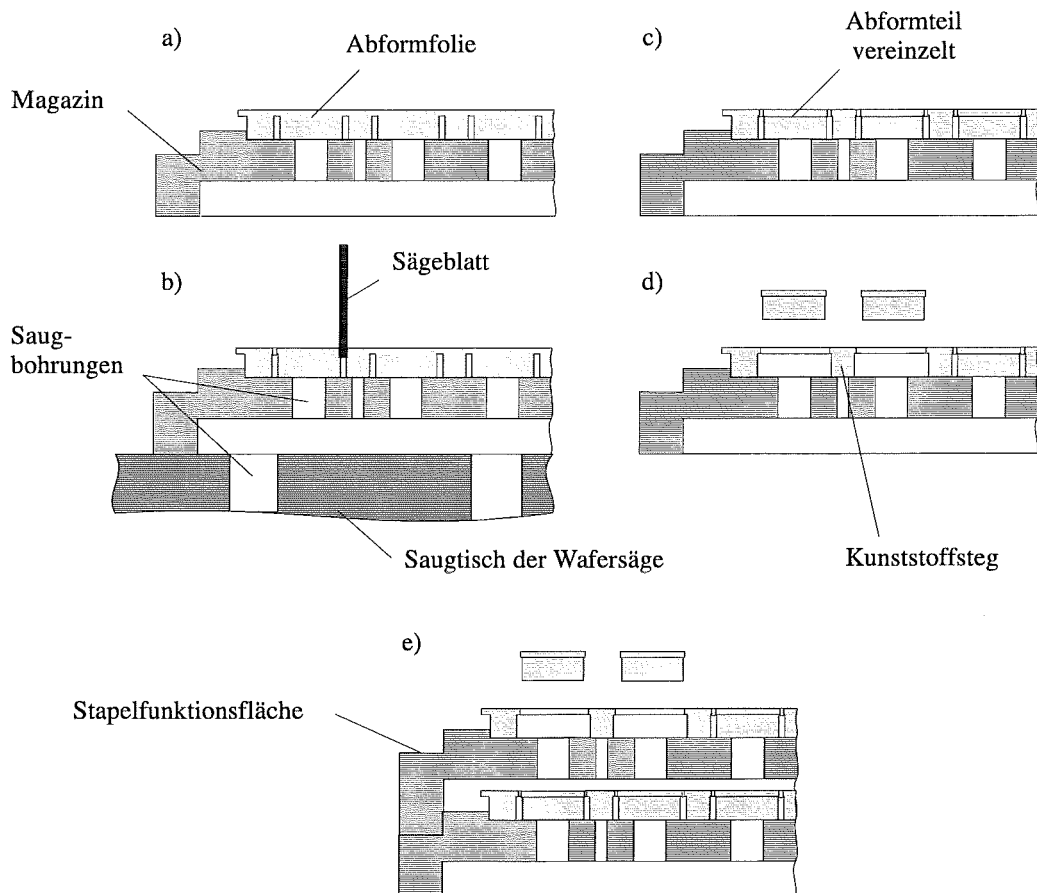


Abbildung 4.2: Magazin für Abformfolien.

Aussparung des Magazins positioniert mit der strukturierten Seite zur Magazinauflagefläche eingelegt (Abb. 4.2a)). Das Magazin wird anschließend auf der Wafersäge durch Unterdruck fixiert. Gleichzeitig wird auch die mikrostrukturierte Folie an jedem Sensor und an den Stegen zum Magazin mittels Saugbohrungen fixiert. Zwischen den Sensorstrukturen und den Stegen befinden sich Vertiefungen, die die Höhe der abgeformten Strukturen aufweisen. Die nicht strukturierte Trägerschicht wird an diesen Vertiefungen durch den Sägeprozeß aufgetrennt (Abb. 4.2b)). Der Ordnungsgrad der vereinzelt abgeformten Sensorelemente bleibt durch die abgeformten Stege erhalten (Abb. 4.2c)). Nun können die Sensoren aus dem Magazin entnommen werden, wobei nur eine Gewichtskraft von wenigen Mikronewton durch

den Greifer aufgebracht werden muß (Abb. 4.2d)). Durch eine Aussparung auf der Unterseite des Magazins können die Magazine gestapelt werden. Diese Aussparung ist so bemessen, daß die eingelegten vereinzelt Folien während des Transports nicht ihre Ordnung in vertikaler Richtung verlieren (Abb. 4.2e)).

Dieses Magazinierkonzept hat den Vorteil, daß es einfach an unterschiedliche Foliengeometrien angepaßt werden kann. Unter der Berücksichtigung von Gestaltungsrichtlinien [39] für die Vereinzelung der Abformfolien können die Magazine standardisiert und normiert werden. Die Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein einer Trägerschicht, die beim Vereinzelungsvorgang aufgetrennt wird, wobei Abschnitte dieser Schicht als Lagesicherung der Folie fungieren. In Abb. 4.3 ist das realisierte Magazin aus Aluminium dargestellt. Das obere Magazinteil deckelt die im unteren Magazinteil eingelegte 150 μm dicke Folie mit einem Abstand zur Trägerschicht, der geringer ist als die Mikrostrukturhöhe. Somit sind die vereinzelt Strukturen beim Transport des Magazins in vertikaler Richtung fixiert. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Durchmesser der Saugbohrungen zur Halterung der Strukturen und der Kunststoffstege zwischen den Strukturen.

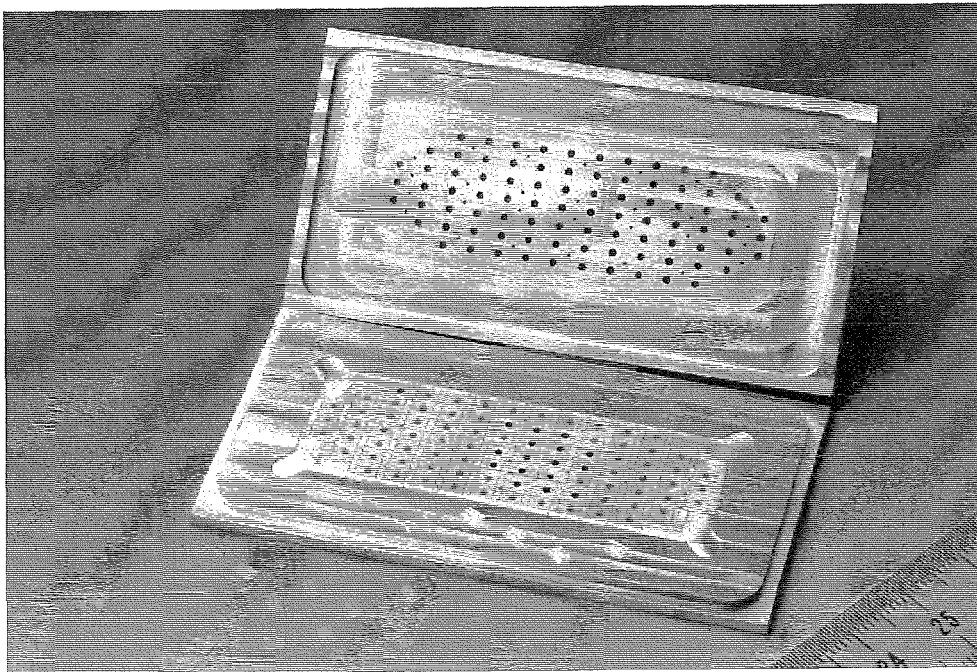


Abbildung 4.3: Magazin mit vereinzelter Abformfolie.

Dieses durchgängige Konzept für die Teilehandhabung zeichnet sich dadurch aus, daß die Folie nach der Abformung in das Magazin einlegt, in ihm vereinzelt, aufbewahrt, transportiert und für die Bestückung mit dem Handhabungsgerät bereitgestellt werden kann. Um die Abformteile aus dem Magazin herauszunehmen und auf dem Wafer anzuordnen, wird ein Handhabungsprozeß benötigt, der im folgenden betrachtet wird.

4.2 Greifertechnologie für abgeformte Mikrostrukturen

Für die Integration von Mikrosystemen aus Komponenten, die mit unterschiedlichen Technologien und Materialien hergestellt werden, wird z.Z. hauptsächlich die manuelle Montage eingesetzt. Erste Ansätze für eine teilautomatisierte Montage dieser Komponenten sind bei [35, 36] aufgezeigt. Ein Hauptproblem bei der Automatisierung liegt in der Entwicklung spezieller Greifertechnologien für Mikrostrukturen in Abstimmung mit dem Magazin. Die Handhabungsgeräte für die Bestückung von Leiterplatten in der Halbleiterindustrie besitzen standardmäßig Genauigkeiten im Mikrometerbereich, die für viele mikrotechnischen Anwendungen ausreichend sind [40]. Diese hochgenaue Handhabungstechnik würde sich deshalb für die passive Montage eignen. Somit kann auf zusätzliche aktive Ausrichtmechanismen mit Bildverarbeitungssystemen und mechanische Ausrichthilfen für die Justierung des zu greifenden Teils zum Koordinatensystem der Bestückungseinrichtung verzichtet werden. Um diese Geräte für die passive Montage nutzen zu können, ist es erforderlich, Greifertechniken mit vergleichbarer Genauigkeit in Abstimmung mit dem Magaziniersystem zu entwickeln.

Weiterhin erfordert die Entwicklung von Greifern für die Mikrotechnik eine neue Denkweise aufgrund folgender Unterschiede zur Makrotechnik:

- Verhältnis zwischen Volumen- und Oberflächenkräften (z.B. geringe Gewichtskräfte in Bezug zur Oberflächenspannung von Flüssigkeiten)
- Anpassung an unterschiedliche Greifobjektgeometrien (z.B. Flächen mit optischer Funktion und Bauteile mit geringen Höhen im Mikrometerbereich)
- Die Anzahl der Greifobjektflächen ist durch die geringe Höhe der zu handhabenden Bauteile begrenzt.
- Die geringe zulässige Flächenpressung zwischen Greifer und Greifobjekt stellt hohe Anforderungen an die Handhabungstechnik.

4.2.1 Auswahl des Greifprinzips

In der Halbleiterindustrie werden für die Montage von Mikrobauteilen Sauggreifer eingesetzt. Mechanische Fingergreifer, basierend auf dem elektrodynamischen, Piezo- und Formgedächtniseffekt, werden in verschiedenen Forschungsgruppen entwickelt [32–34]. Diese Greiferprinzipien sind jedoch aufgrund ihrer lateralen Greifgenauigkeit von mehreren zehn Mikrometern und ihrer mechanischen Flächenpressung nicht für die passive Montage von filigranen abgeformten Kunststoffmikrostrukturen geeignet. Um Greifgenauigkeiten im Mikrometerbereich zu erzielen, werden Bestückungseinheiten mit aktiven Ausrichtungsmechanismen oder mit mechanischen Anschlägen zur Bauteilausrichtung am Greifer eingesetzt. Andere für die Mikrotechnik interessante Greifprinzipien, wie das adhäsive, elektrostatische und magnetische, werden in der Fachliteratur erwähnt, aber es fehlt bislang ein entsprechendes Anwendungsgebiet für die Weiterentwicklung [41]. Die Ursache ist darin zu sehen, daß so hohe Anordnungsgenauigkeiten bisher nicht erforderlich waren. Auch wurde diesen Technologien die jetzt erreichte Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit nicht zugetraut. Ein Vergleich der unterschiedlichen Greifprinzipien [39] zeigt, daß für das Greifen und positionierte Absetzen von

abgeformten Strukturen nur der Sauggreifer, kombiniert mit einer Relativbewegung gegen ein Anschlagssystem oder der adhäsive Greifer ohne Zusatzeinrichtungen zur Bauteilausrichtung, für die passive Montage geeignet sind. Nur diese beiden Greifertypen nutzen eine Bauteilfläche zur Handhabung und können die vereinzelt Teile aus dem in Absatz 4.1 beschriebenen Magazin entnehmen. Der adhäsive Greifer zeichnet sich gegenüber dem Sauggreifer durch die Selbstzentrierung des Greifobjekts am Greifer aus, verursacht durch die Minimierung der Oberflächenenergien des Adhäsivs zwischen der Greifer- und Greifobjektfläche. Weiterhin kann es durch den rein fluidischen Kontakt zum Bauteil zu keiner Beschädigung der Oberfläche kommen. Die für die Funktion benötigten Subsysteme, wie die Dosierungseinrichtung für das Adhäsiv und ein Heizsystem für das schnellere Verdunsten des Adhäsivs beim Absetzen der Probe auf dem Wafer, kann mit Standardkomponenten erreicht werden. Aus der Literatur ist ein Adhäsivgreifer bekannt [41], der jedoch die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Zentrierung der Greiferfläche zur zu greifenden Fläche des Bauteils von wenigen Mikrometern nicht erreicht. Dieser Greifer besitzt nur eine Genauigkeit von über $30 \mu\text{m}$. Deshalb mußte ein neuer adhäsiver Greifer entwickelt werden.

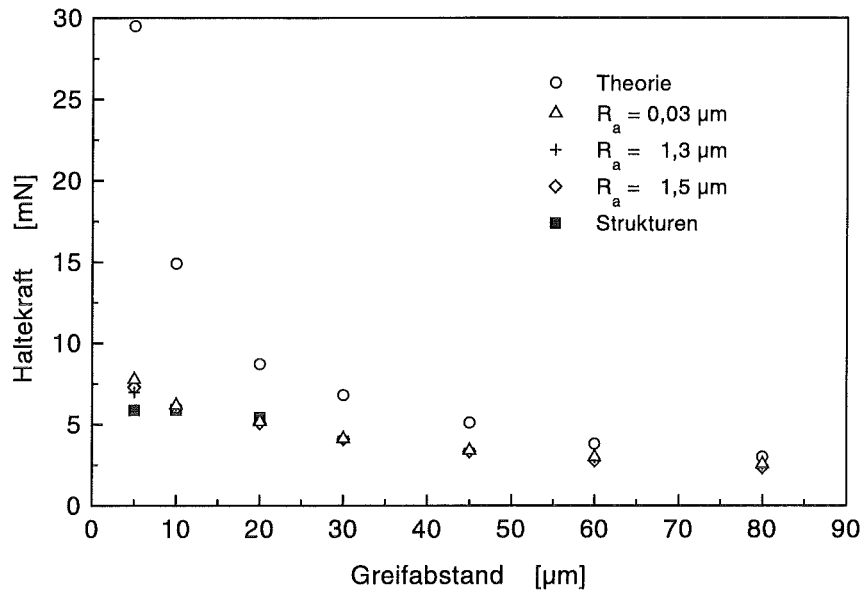
4.2.2 Entwicklung eines adhäsiven Greifers

Der adhäsive Greifer muß eine Haftkraft zum zu greifenden Teil aufweisen, die mindestens so groß ist, wie die Gewichtskraft des zu greifenden Bauteils. Weiterhin muß die Zentrierung des Bauteils am Greifer, aufgrund der Minimierung der Oberflächenspannung der sich ausbildenden Flüssigkeitsbrücke, mindestens auf $\pm 5 \mu\text{m}$ genau sein.

4.2.2.1 Ermittlung der Haltekraft

Die Berechnung der Haltekraft entspricht der Problematik der Haltekräfte zwischen Partikeln in der Verfahrenstechnik. Hierfür hat Schubert [42] Berechnungen für unterschiedliche rotationssymmetrische Flüssigkeitsbrücken durchgeführt. Da der Abstand zwischen dem Greifer und dem zu greifenden Teil so gering wie möglich ausgelegt werden soll, um ein schnelles Verdunsten des Adhäsivs nach der Positionierung auf dem Wafer zu erreichen, muß der Einfluß der Rauigkeit der Greifer- und Greifobjektflächen auf die Haltekraft untersucht werden. Die bei realen nicht rotationssymmetrischen Körpern ungleiche Benetzung der Oberflächen durch Inhomogenitäten im Material oder einer nicht vollständigen Reinigung der zu benetzenden Flächen führt zu weiteren Abweichungen von den errechneten Werten. Für die Berechnung der theoretischen Haltekraft wurde die rechteckige Benetzungsfläche, die sich beim Greifen des abgeformten Beschleunigungssensorelements ausbildet, in die flächengleiche zylindrische umgerechnet (siehe Anhang). Für die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Haltekraft wurde eine Mikrozugprüfmaschine¹ eingesetzt. Als Greifer wurde ein Glasquader verwendet. Die Messungen wurden für unterschiedliche Trägerschichtrauigkeiten der abgeformten Strukturen, bis zum Extrem des Greifens der mikrostrukturierten Fläche, durchgeführt (Abb. 4.4). Die Ergebnisse der Messung lassen sich in einen Bereich relativ guter Übereinstimmung mit der theoretischen Berechnung mit einem Abstand zwischen der Greifer- und Greifobjektfläche von über $60 \mu\text{m}$ und in einen Abschnitt mit einer zunehmenden Diskrepanz mit abnehmenden Abstand des Greifobjekts zur Greiferfläche unterteilen.

¹Elastomer μl 1000, Fa. Microtronic



- Greiferfläche: G_f ; Greifobjektfläche: G_o
- G_f : Glas $3,208 \cdot 2,039 \text{ mm}^2$ ($R_a = 7,5 \text{ nm}$)
- G_o : PMMA $3,189 \cdot 2,023 \text{ mm}^2$ ($R_a = 1,3 \text{ μm}$), Meßwertabweichung: $\pm 0,12 \text{ mN}$
- G_o : PMMA $3,215 \cdot 2,018 \text{ mm}^2$ ($R_a = 1,5 \text{ μm}$), Meßwertabweichung: $\pm 0,70 \text{ mN}$
- G_o : PMMA $3,205 \cdot 1,984 \text{ mm}^2$ ($R_a = 0,03 \text{ μm}$), Meßwertabweichung: $\pm 0,05 \text{ mN}$
- G_o : PMMA $3,117 \cdot 1,955 \text{ mm}^2$ (Strukturhöhe: 150 μm), Meßwertabweichung: $\pm 0,13 \text{ mN}$

Abbildung 4.4: Rauigkeitseinfluß auf die Haltekraft mit dem Adhäsiv Wasser.

Die Meßwerte für den ersten Abschnitt zunehmender Konvergenz ab 60 μm werden in der Literatur bestätigt [41], wo Messungen bis 400 μm durchgeführt wurden. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe bei geringem Greifabstand sind auf ein schlechteres Benetzungsverhalten der Grenzflächen aufgrund nicht rotationssymmetrischer Geometrien zurückzuführen. Es kommt zu einem Abreißen des Flüssigkeitsfilms in den Eckbereichen der rechteckigen Flächen. Dieser Effekt wird noch durch die unterschiedlichen Randwinkel zwischen dem Adhäsiv und den zu benetzenden Oberflächen verstärkt [42]. Deshalb sind die theoretischen Werte als die maximal zu erreichenden Kräfte anzusehen. Weiterhin kann festgestellt werden, daß der Rauigkeitseinfluß der Oberflächen auf die Haltekräfte vernachlässigt werden kann, jedoch kommt es, wie in der Theorie beschrieben [42], zu einer Kraftreduzierung aufgrund der Oberflächenrauigkeit bei Greifabständen kleiner als $5 \cdot R_a$. Diese Kraftänderung ist vernachlässigbar, da die gemessene Kraft z.B. für den Beschleunigungssensor, bei einem Greifabstand von 10 μm , 200 mal so groß ist wie die Gewichtskraft der abgeformten Komplementärstruktur des Sensors.

Diese Untersuchungen zeigten, daß ein sicheres Greifen von abgeformten Kunststoffbauteilen mit dem Adhäsivgreifer möglich ist. Dies gilt ebenfalls für die mikrostrukturierte Fläche. Die auftretenden Haltekräfte sind aufgrund ihrer Größe auch für ein Greifen von Silizium-

und metallischen Mikrostrukturen geeignet. Die passive Montage der abgeformten PMMA-Strukturen des Beschleunigungssensoren erfordert eine Ausrichtungsgenauigkeit (Zentrierung) des zu greifenden Teils an der Greiferfläche von wenigen Mikrometern und wird im folgenden behandelt.

4.2.2.2 Zentrierung des Sensors auf der Greiferfläche

Der Versuchsaufbau für die Messungen der Zentriergenauigkeit zwischen der Greiferfläche und der zu greifenden abgeformten Sensoroberfläche ist in Abb. 4.5 dargestellt. Neben der Ausrichtung der zu vermessenden Struktur mit dem Mikroskoptisch ist eine Relativbewegung zwischen dem Greifer und dem Greifobjekt erforderlich. Dies wurde über einen zweiten x - y - z -Tisch realisiert, der auf dem Mikroskoptisch befestigt war. Als Greifer wurde ein Glasquader eingesetzt. Somit konnte das Greifobjekt nach der Aufnahme an der Greiferfläche mit dem Lichtmikroskop durch den Glasquader in seiner lateralen Lage vermessen werden. Als Adhäsivmedium wurde deionisiertes Wasser eingesetzt. Zur Vermessung der Orientie-

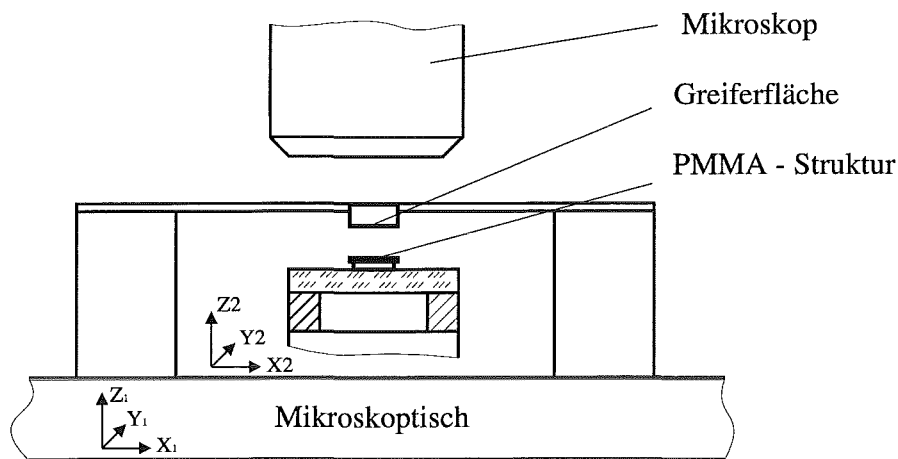


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau für Messungen der Zentrierung des Sensors zur Greiferfläche.

rung wurden zwei Punkte auf dem Greifobjekt definiert und als Maß diente deren Abstand zu den Randbegrenzungen der Greiferfläche (Abb. 4.6). Die Meßgenauigkeit des Mikroskoptisches betrug $\pm 2 \mu\text{m}$ und die Dosierung des Adhäsivs erfolgte mit einem Dispenser² mit einer Dosiergenauigkeit von $\pm 20 \text{ nl}$. Die dosierten Tropfen wurden von der Kanülenspitze des Dispensers auf die Greiferfläche übertragen. Das Adhäsivvolumen des Wassers wurde von 50 nl bis 650 nl in 50 nl Schritten gesteigert. Anschließend wurde das Greifobjekt dem Greifer soweit angenähert, daß sich eine Adhäsivbrücke zwischen dem abgeformten Sensorelement und der Greiferfläche ausbildete. Dadurch wurde das Greifobjekt an die Greiferfläche gezogen. Im Ergebnis der Versuche konnte festgestellt werden, daß die Zentrierwirkung von den Abmessungen der Greifer- zur Greifobjektfläche und von der verwendeten Adhäsivmenge abhängig ist (Tab. 4.1). Für eine ausreichende Benetzung der Greiferflächen mit dem Adhäsiv ist eine Flüssigkeitsmenge von 20 nl/mm^2 erforderlich, die in Abhängigkeit der Greifer- zur Greifobjektfläche (Flächendifferenz) zur Zentrierung dieser zueinander führte. Der Zentrierungseffekt tritt nur in einem bestimmten Adhäsivmengenbereich auf. Liegt eine

²1000 DVE, Fa. GLT, Germany

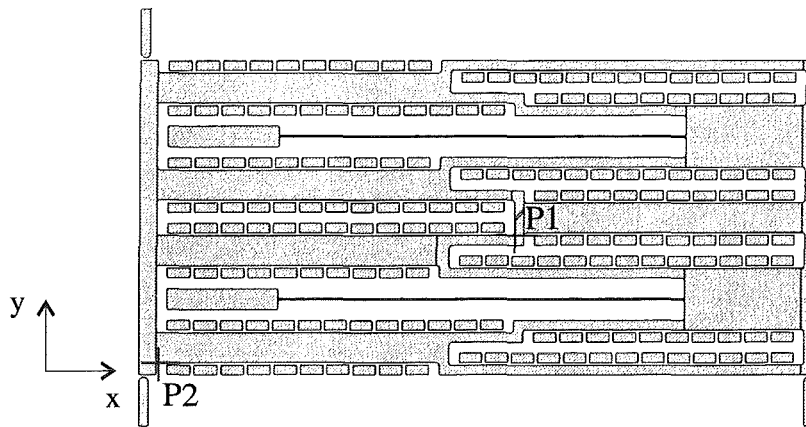


Abbildung 4.6: Lage der Punkte zur Positions- und Orientierungsbestimmung.

Δ (Greifer- zur Greifobjektfläche) [μm]	Adhäsiv- menge [nl]	Greifabstand [μm]	Ergebnis
$\Delta x < + 50$ $\Delta y < + 50$	150 – 400	23 – 62	Positions- und Orientierungsgenauigkeit innerhalb der Meßgenauigkeit ($\pm 2 \mu\text{m}$)
$\Delta x < - 50$ $\Delta y < - 50$	150 – 400	23 – 62	Positions- und Orientierungsgenauigkeit innerhalb der Meßgenauigkeit ($\pm 2 \mu\text{m}$)
$\Delta x < + 50$ $\Delta y < - 50$	400 – 550	62 – 88	Positions- und Orientierungsgenauigkeit innerhalb der Meßgenauigkeit ($\pm 2 \mu\text{m}$)
$\Delta x > \pm 50$ $\Delta y > \pm 50$	150 – 450	23 – 70	Positions- und Orientierungsgenauigkeit innerhalb der Abmessungsdifferenz $\Delta x, \Delta y$

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Zentrierung zwischen Greifer und Greifobjekt.

Flächendifferenz von $< + 50 \mu\text{m}$ oder $< - 50 \mu\text{m}$ bei gleichen Werten in der x- und y-Achse vor, so kann eine Positioniergenauigkeit, die innerhalb der Meßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ liegt, erreicht werden. Die Orientierungsgenauigkeit beträgt $\pm 0,1$ Grad. Eine Benetzung der Oberflächen mit mehr als $60 \text{ nl}/\text{mm}^2$ ruft eine Verkippung des Greifobjektes hervor und es kommt dadurch zu keinem Zentrierungseffekt. Der Adhäsivmengenbereich, bei dem eine Zentrierung von $\pm 2 \mu\text{m}$ auftritt, verringert sich, wenn die Flächendifferenz nicht in beiden lateralen Abmessungen der Proben unterschiedlich ist. Im Experiment kam es zu einer Einschränkung des Adhäsivmengenbereichs um 40 %. Bei Flächendifferenzen größer als $\pm 50 \mu\text{m}$ lag die Zentrierengenauigkeit innerhalb der Abmessungsdifferenz der Greifer- zur Greifobjektfläche. Nach dem Verdunsten des Adhäsivs kam es zu keiner Lageänderung des Sensors am Greifer, so daß ein Absetzen des Sensors ohne Flüssigkeitsfilm möglich ist. Diese Haltekräfte werden durch Flüssigkeitsbrücken, die aufgrund der Kapillarkondensation [43] bestehen, hervorgerufen.

Durch die gezielte Festlegung der Greifergeometrie und der Flüssigkeitsmengen des Adhäsivs konnte eine Genauigkeit bei lateraler Positionierung und winkelgetreuer Orientierung der Bauteile am Greifer im Mikrometerbereich erreicht werden. Dadurch, daß in einem großen

Adhäsivmengenbereich von $20 - 60 \text{ nl/mm}^2$ hohe Zentriergenauigkeiten erreicht werden, kann auf ein aufwendiges Dosiersystem verzichtet werden. Der entwickelte Greifer ist so konzipiert, daß die im Magazin vereinzelt vorliegenden Strukturen durch das Adhäsiv am Greifer mit diesen hohen Genauigkeiten entnommen und auf dem Wafer mit einem Lateral- und Winkelversatz, der unterhalb der Meßgenauigkeiten von $\pm 2 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 0,1$ Grad liegt, abgesetzt werden können. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, darf die Differenz der Abmessungen der Greifer- zur Greifobjektfläche nicht mehr als $\pm 50 \mu\text{m}$ betragen. Zur Entnahme der vereinzelt Strukturen im Magazin ist eine Genauigkeit von mehreren $100 \mu\text{m}$ ausreichend. Begrenzend wirkt, daß der Adhäsivtropfen an der Greiferfläche beim Entnahmevorgang nur die zu greifende Struktur benetzt und nicht die Kunststoffstege sowie eine benachbarte Struktur. Wie im Absatz 4.1 erläutert, liegen die Genauigkeiten von Standard-Wafersägen im Bereich von wenigen Mikrometern und sind somit ausreichend für die Vereinzelung der Mikrostrukturen und den Zuschnitt der Greiferabmessungen. Der entwickelte Greifer ist in Abstimmung mit dem realisierten Magaziniersystem für das vorgestellte passive Montagekonzept geeignet.

4.3 Prozeßablauf für das Fixieren von abgeformten Mikrostrukturen

Im folgenden wird der Handhabungsablauf (Abb. 4.7) für die Entnahme der abgeformten Mikrostrukturen aus dem Magazin, ihrer Positionierung und Fixierung auf dem Wafer am Beispiel des thermischen Verschweißens des LIGA-Beschleunigungssensors dargestellt (siehe Kapitel 5). Nachdem der Greifer an ein Handhabungsgerät integriert wurde, wird auf der Greiferfläche das Adhäsiv dosiert. Der Greifer wird nun mit einer lateralen Genauigkeit von

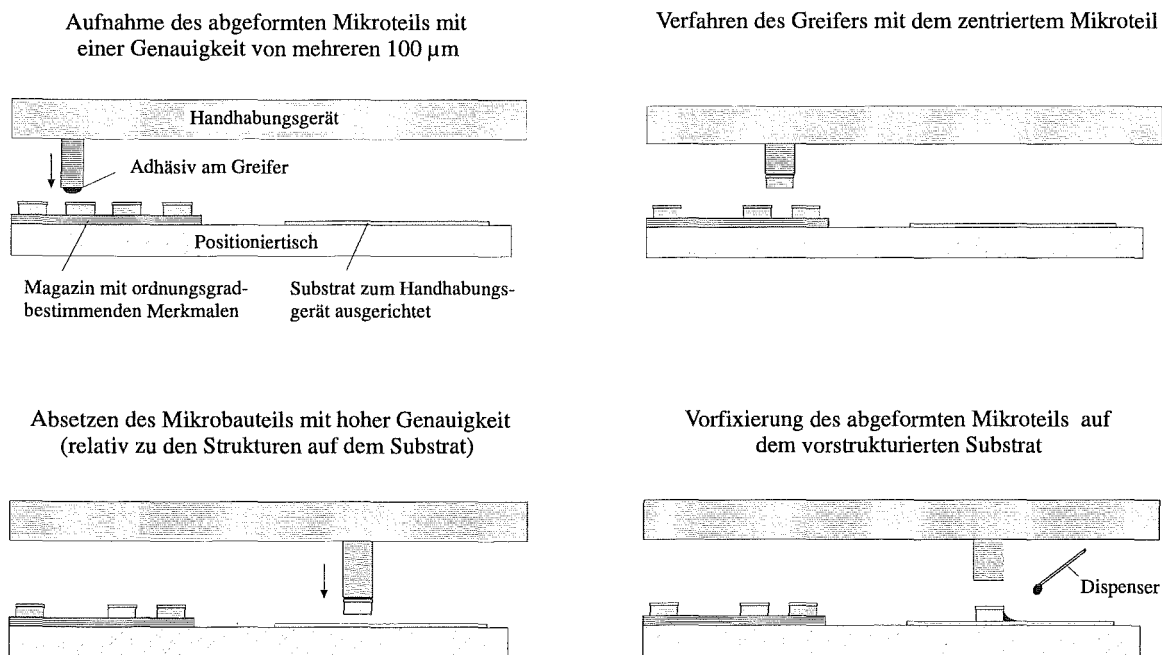


Abbildung 4.7: Handhabungsablauf für die passive Montage von abgeformten Mikrokomponenten auf vorstrukturierten Substraten.

mehreren $100\ \mu\text{m}$ über dem zu greifenden Teil positioniert. Durch die Benetzung der Greifobjektfläche wird durch die Oberflächenspannungskräfte die abgeformte Sensorstruktur aus dem Magazin gehoben. Dabei bildet sich eine vollständige Flüssigkeitsbrücke auf der Greiferoberfläche aus. Gleichzeitig wird das Greifobjekt ausgerichtet und kann zum Bestückungsort auf dem prozessierten Wafer transportiert werden. Zur Justierung des Wafers relativ zum Greiferkoordinatensystem können die bekannten Methoden und Geräte zur justierten Belichtung aus der Halbleitertechnik eingesetzt werden [44]. Für ein schnelleres Verdunsten des Adhäsivs kann Wärmeenergie mit einer Widerstandheizung auf der Greiferoberfläche eingebracht werden. Eine weitere Möglichkeit ist das Absaugen des Adhäsivs mit einer Mikropumpe, die gleichzeitig auch die Benetzung der Greiferfläche zur Handhabung ermöglicht. Nach dem vollständigen Verdunsten des Adhäsivs wird die Haltekraft durch verbleibende mikroskopisch kleine Flüssigkeitsbrücken erzeugt. Beim positionierten Absetzen der Struktur werden diese Flüssigkeitsbrücken durch eine Relativbewegung zwischen Greifer- und Greifobjektfläche, die unterhalb der Meßgenauigkeit des Mikroskops von $\pm 2\ \mu\text{m}$ liegt, zerstört und das Sensorelement löst sich von der Greiferfläche. Das Absetzen des Sensorelements auf dem Wafer sollte mit einer definierten Kraft erfolgen, um die Mikrostrukturen vor zu großer mechanischer Belastung zu schützen.

Die Bestückungszeit von der Entnahme des Bauteils aus dem Magazin bis zum Absetzen der Kunststoffmikrostruktur auf dem Wafer wird durch die Dauer der Entfernung des Adhäsivs zwischen der Greifer- und Greifobjektfläche bestimmt. Die geringe Gewichtskraft des zu handhabenden Bauteils, im Vergleich zu den hohen Haltekräften am Greifer, ermöglicht hohe Beschleunigungen bei der Greiferpositionierung. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die Adaption dieses Greifprinzips an die pick- and place-Automaten der Halbleiterindustrie.

Der thermische Verschweißprozeß benötigt Prozeßzeiten von mehr als zwei Stunden. Deshalb werden die positionierten Strukturen mit der Kapillarklebetchnik auf dem Wafer vorfixiert und anschließend gemeinsam thermisch verschweißt.

Die passive Montage in Verbindung mit der exakten Abstimmung von Magazin und Greifer erlaubt eine hohe Anordnungs-Flexibilität bezüglich der zu handhabenden Teile. Weitere Einsatzmöglichkeiten können die Herstellung von Mikrosystemen in der Hybridtechnik sein, wo verschiedene Mikrokomponenten unterschiedlicher Herstellungstechnologien angeordnet werden sollen.

Kapitel 5

Verbindung von mikrostrukturierten Kunststofffolien mit CMOS–Wafers

Die Verbindung von Kunststoffen mit Kunststoff- und Metalloberflächen kann mit unterschiedlichen Verfahren, wie z.B. dem Kapillarkleben [45], dem thermischen Verschweißen [46, 47] und dem Ultraschallschweißen [48] realisiert werden. Das Ultraschallschweißen ist nicht geeignet für die Verbindung der abgeformten Struktur des Beschleunigungssensors mit dem CMOS–Wafer, da wegen der Rauigkeit von einigen Mikrometern, die durch die CMOS- und Funktionschichten hervorgerufen wird, kein vollständiger Kontakt der Mikrostrukturen mit der Waferoberfläche garantiert werden kann. Das Kapillarkleben von Mikrostrukturen auf unterschiedlichen Materialien wird seit Jahren in der Mikrotechnik z.B. für die Einhausung von Mikrokomponenten eingesetzt [45]. Dieses Verfahren ist jedoch nur anwendbar, wenn eine geschlossene Struktur vollständig benetzt werden kann. Dies ist für den Beschleunigungssensor nur möglich, indem die Trägerschicht mit der Waferoberfläche mit einem Adhäsiv fixiert wird. Es kann nicht eingesetzt werden, um die mikrostrukturierte Kunststoffseite mit dem Schaltkreis zu verbinden, da sich auf der Folie in sich abgeschlossene Strukturen befinden. Weiterhin ist die eingesetzte Bondvariante von der zu verbindenden Kunststoffart abhängig. So haben teilkristalline Werkstoffe, wie z.B. POM, schlechtere Verbindungseigenschaften aufgrund ihres großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der geringen Haftungsneigung gegenüber anderen Materialien (siehe Kapitel 3). Mikrostrukturierte amorphe Polymere können durch Erwärmung über die Glasatemperatur (T_G) mit anderen Materialien verschweißt werden. Eine entsprechende Erwärmung bei teilkristallinen Polymeren über den Kristallit-schmelzpunkt führt jedoch zur Zerstörung der Strukturen. Deshalb muß für diesen Kunststoff ein Verfahren zur Verbindung mit dem strukturierten Wafer (siehe Kapitel 2) entwickelt werden.

Die Verfahrensvariante des thermischen Verschweißens gestattet die Verbindung mit der mikrostrukturierten Seite zum Zielsubstrat. Dieser Prozeß verlangt die Beherrschung der Parameter Temperatur und Andruckkraft, da der Verschweißvorgang oberhalb der Glasatemperatur des Kunststoffs durchgeführt werden muß und die Mikrostrukturen somit leicht verformbar sind. Ebenso müssen die auf der Oberfläche der Substrate abgeschiedenen Metallschichten ausreichende adhäsionsfördernde Eigenschaften für die darauf aufzubondenden Polymerschichten aufweisen. Bevor die Mikrostruktur verbunden werden kann, muß eine

Kunststoffschicht auf das Zielsubstrat aufgebracht werden, da ein sicheres Verschweißen von Mikrostrukturen direkt auf Metallschichten nicht möglich ist. Die zu verbindenden Kunststoffschichten müssen in ihrem Erweichungsverhalten bei Temperatureinwirkung aufeinander abgestimmt sein, um Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen ohne Maßverzüge mit dem Wafer verbinden zu können. Dieser Prozeß wird anhand der Verbindung von abgeformten PMMA-Strukturen des temperaturkompensierten LIGA-Beschleunigungssensors im folgenden Kapitel behandelt. Die Untersuchungen zur Verbindung von POM-Folien mit der CMOS-Oberfläche beinhalten das Kapillarkleben und das thermische Verschweißen.

5.1 Grundlagen

5.1.1 Untersuchungen zur Kunststoffhaftung auf der Opferschicht

Die Herstellung von beweglichen Strukturen wird in der LIGA-Technik mit der Opferschichttechnik realisiert [5]. Als Opferschicht auf CMOS-Wafern wird Kupfer eingesetzt (siehe Kapitel 2). Die Anforderungen an diese Schicht sind neben ihrer CMOS-Kompatibilität eine ausreichende Haftung von aufgebondeten Polymerschichten zu gewährleisten (siehe Absatz 5.2). Die Grenzfläche zwischen der Opfer- und der mikrostrukturierten Kunststoffschicht ist durch die Folgeprozesse wie RIE und Galvanik mechanischen Spannungen ausgesetzt, die durch Temperaturgradienten hervorgerufen werden. Durch die geringe Rauigkeit des Siliziumsubstrats und den Einsatz des Sputterprozesses für die Kupferabscheidung besitzt die Kupferoberfläche eine mittlere Rauigkeit von einigen Nanometern und somit schlechte mechanische Haftungseigenschaften für den Kunststoff. Dies erforderte ein Versuchsprogramm, um eine geeignete Methode zur Oberflächenmodifikation des Kupfers zu entwickeln.

Die Haftung zwischen Polymeren und Metallen wird auf verschiedene Adhäsionseffekte wie:

- zwischenmolekulare Kräfte
- chemische Bindungen
- Mikroverzahnung

zurückgeführt. Aufgrund des komplexen Substrataufbaus und der erforderlichen Selektivität gegenüber den Funktionsschichten (siehe Kapitel 2) kommt für prozessierte Siliziumsubstrate nur ein chemisches, CMOS-kompatibles Ätzverfahren zur Behandlung der metallischen Oberfläche in Frage. Die zur Entfernung der Opferschicht eingesetzte ammoniakalische Ätze¹ enthält Natriumionen, die ein hohes Diffusionsvermögen [12] durch CMOS-Schutzschichten aufweisen. Weiterhin führt diese Ätze zum Angriff der Aluminiumanschlußpads des Schaltkreises und nur zu einer geringen Aufräuhung der Opferschicht. Da die Schichtdicke der aufzurauhenden Kupferschicht nur einige Mikrometer beträgt, ist auch die Abtragsrate von Bedeutung und muß deshalb erfaßt werden. Die Ätze sollte eine hohe mittlere Rauigkeit (R_a) bei niedriger Abtragsrate hervorrufen. Die Abtragsrate bzw. Stärke des Angriffs wird

¹Patent Nr. DE 40 24 909.3-45

über die Konzentration der reaktiven Komponente eingestellt. Um eine Oberflächenmodifikation zu erreichen, wurden Untersuchungen mit chemischen und elektrochemischen Reaktionen durchgeführt. Die Wirkung von chemischen Ätzmedien beruht auf dem oxidativen Angriff an der Oberfläche von Materialien mit unterschiedlicher Oxidationskraft. Im Falle der elektrochemischen Korrosion übernimmt der elektrische Strom der Anodenreaktion durch Elektronenentzug die Rolle des Oxidationsmittels. Diese Ätzmedien enthalten daher keine oxidierenden Chemikalien. Aus der Leiterplattentechnik und aus der Fachliteratur [49] konnten zwanzig Ätzen zusammengestellt werden. Diese Ätzen wurden auf ihre Eignung zur Oberflächenaufräuhung untersucht [50].

Die bisher zur Aufräuhung von Kupfer verwendete verdünnte ammoniakalische Ätze C (Tab.5.1) erhöht die Rauhmigkeit der Opferschicht gegenüber der unbehandelten Kupferschicht auf dem Siliziumsubstrat ($R_a = 2,5$ nm) nur um das Doppelte. Zwei der untersuchten Ätzmedien (A und B), die die oben genannten Kriterien erfüllten, bewirkten die größten Aufräuhungen von 13,5 bzw. 20 nm.

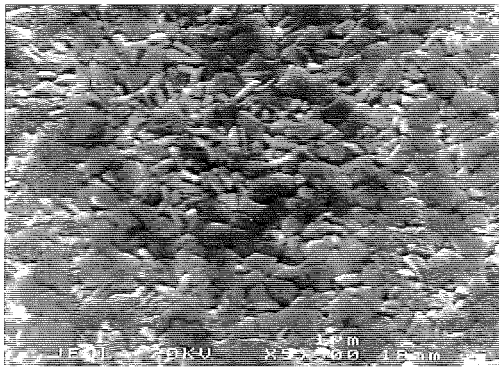
Symbol	wirksamer Bestandteil	Matrix
A	FeCl_3	HCl
B	CuCl_2	HCl
C	$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$	$\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$

Tabelle 5.1: Qualitative Zusammensetzung der favorisierten Ätzmedien für Kupfer.

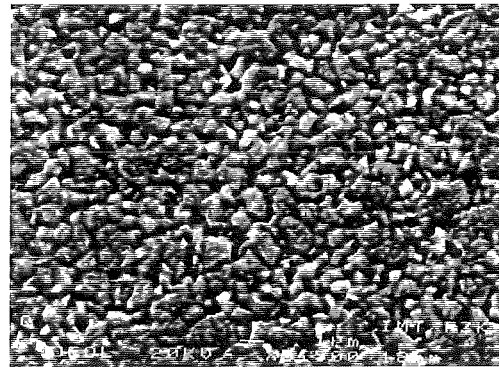
Der Ätzzvorgang der elektrochemischen Versuche lief bei der Mehrzahl der Proben vorrangig an den Korngrenzen ab. Aus diesem Grund kommt es zu relativ hohen maximalen Rauhmigkeiten R_t , hohen Abtrags- und gleichzeitig kaum veränderten R_a -Werten. Allerdings zeigten einige der Ätzen eine ähnliche Charakteristik wie die der naßchemischen Untersuchungen. Da sich keine wesentlichen Verbesserungen gegenüber der chemischen Ätzversuche zeigten, wurden diese Untersuchungen nicht weitergeführt. Ein weiterer Grund war der erhöhte apparative Aufwand für eine spätere Anwendung.

Aus den REM-Aufnahmen (Abb. 5.1) war festzustellen, daß die drei oben genannten Ätzmedien die größten spezifischen Kupferoberflächen durch eine sehr feingliedrige Topographie erzeugten, obwohl Oberflächen, die mit anderen Ätzen behandelt wurden, wesentlich höhere R_a -Werte aufwiesen. Diese Untersuchungen zeigten, daß eine alleinige Charakterisierung durch den Rauhmigkeitsparameter (R_a) keine Aussage zum Haftungsverhalten zuläßt. Letztendlich entscheidend für die Aussage der Haftungsveränderung sind Untersuchungen mit der Zugprüfmaschine, bei denen modifizierte, mit PMMA beschichtete Proben definierter Geometrie dem Zugversuch unterzogen werden. Als Versuchsmaterial wurden Keramikscheiben wegen ihrer sicheren Verbindung an der Schnittstelle zur Zugprüfmaschine eingesetzt. Es entsteht dadurch kein Informationsverlust, da die Ätzwirkung relativ zum unbehandelten Ausgangsmaterial von Interesse ist.

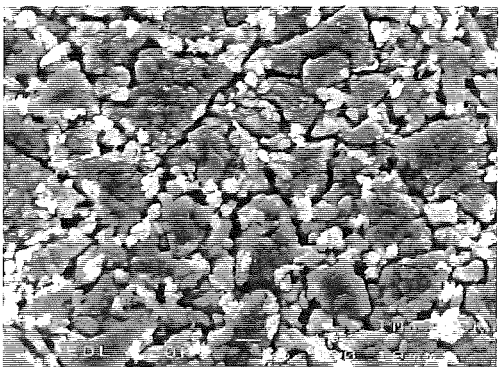
Die Proben, deren Oberfläche nicht behandelt wurden, zeigten, wie erwartet, eine äußerst geringe Haftung zwischen Kupfer und PMMA (Abb. 5.2). Die Modifikation mit der Ätzzlösung B und C führten zu einer Verbesserung der Haftung, aber die Festigkeitswerte der Verbindung wiesen eine breite Streuung auf. Bei Verwendung der Ätzzlösung B und bei der mit



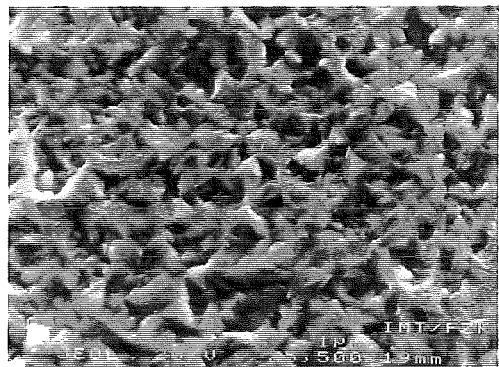
Silizium + 4μm Kupfer



Silizium + 4μm Kupfer + Ätze A



Silizium + 4μm Kupfer + Ätze B



Silizium + 4μm Kupfer + Ätze C

Abbildung 5.1: REM-Bilder unterschiedlicher Ätzmedien angewandt auf Kupfer.

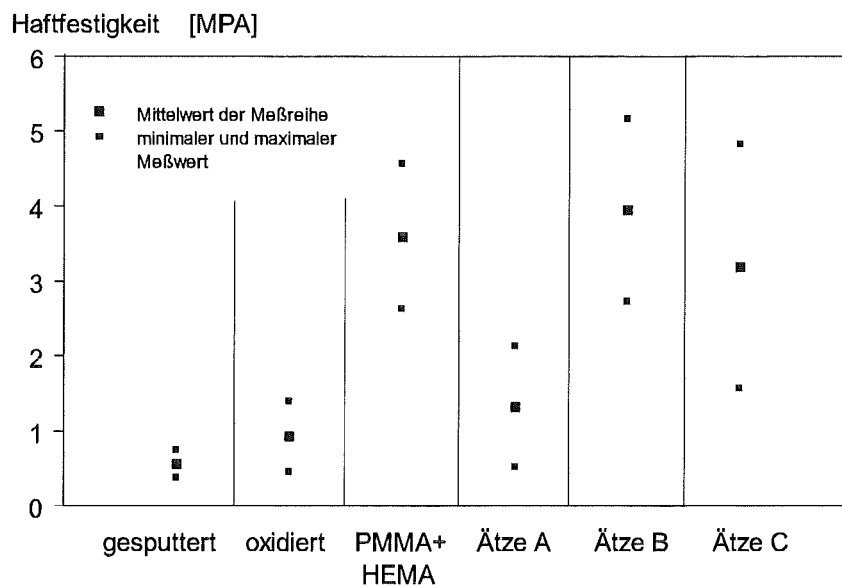


Abbildung 5.2: Haftungsmessungen auf modifizierten Kupferoberflächen.

HEMA–Haftvermittler (Hydroxyethylmethacrylat) [51] einpolymerisierten Kunststoffschicht vollzog sich in einigen Fällen der Bruch nicht zwischen Kupfer und PMMA, sondern es kam stattdessen zum Bruch zwischen der Keramikscheibe und deren Halterung. Somit war die Haftfestigkeit zwischen PMMA und Kupfer noch größer als der Meßwert.

Die chemische Aufrauung der Kupferopferschichtoberfläche mit der Ätze B ermöglicht eine ausreichende Haftung der abgeformten PMMA– und POM–Folien (siehe Absatz 5.1.2). Weiterhin greift diese Ätze das Leiterbahnmaterial Wolfram nicht an, so daß die Aufrauung ohne einen zusätzlichen Passivierungsschritt des Wolframs durchgeführt werden kann. Das Problem der Aufrauung der Kupferopferschicht besteht auch bei der direkten Abformung auf vorstrukturierten Keramikscheiben mit dem Verfahren der positionierten Abformung. Es konnte mit der Ätze B eine Strukturhöhung von 100 auf 150 μm erreicht werden.

5.1.2 Verbindung der Kunststoffolien mit Siliziumwafern

Wie eingangs erwähnt, bestehen mehrere Möglichkeiten, um Kunststoffe mit metallischen Oberflächen zu verbinden. Die Mikrostrukturen aus PMMA und POM besitzen unterschiedliche Bondeigenschaften. Im folgenden Kapitel sollen das Kapillarkleben (für POM) und das thermische Verschweißen (für PMMA und POM) als Verbindungstechniken für die Kunststoffe untersucht werden. Die verwendeten Kunststoffproben wurden durch Abformung strukturiert (siehe Kapitel 3). Zur Untersuchung der Verschweißeeigenschaften von PMMA–Folien wurden Proben mit unterschiedlichem Trennmittelgehalt getestet, da das Trennmittel zwar eine leichtere Entformung des Kunststoffs aus dem Abformwerkzeug ermöglicht, aber gleichzeitig verändert sich auch die Glas- bzw. Kristallitschmelztemperaturen und den nötigen Verschweißdruck und die Verschweißdauer. Durch die Benutzung einer Adhäsivschicht als Bondfläche auf dem Substrat liegt ein Polymer–Polymer–Verschweißproblem vor. Zur thermischen Verbindung der PMMA– und POM–Folien müssen daher zur Beschreibung der Haftung verschiedene Grenzflächen betrachtet werden:

–Symmetrische Grenzflächen zwischen zwei identischen Polymerschichten

- amorph
- teilkristallin

–Asymmetrische Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Polymerschichten

- amorph (mischbar / unmischbar)
- teilkristallin (mischbar / unmischbar)
- amorph / teilkristallin

–Asymmetrische Grenzflächen zwischen Polymer und Metall

Ein Verschweißen kann nur bei Diffusion sowie Verschlaufung der Moleküle der Adhäsivschicht und der mikrostrukturierten Folie ineinander erfolgen [47]. Durch den Einsatz von

abgeformten PMMA- und POM-Folien müssen zwei Grenzschichtsysteme untersucht werden. Beim thermischen Bonden der PMMA-Folie entsteht eine asymmetrische Grenzschicht dadurch, daß zwei unterschiedliche Typen einer Kunststoffart zum Einsatz kommen. Das mikrostrukturierte Polymer beinhaltet Trennmittel, das sich negativ auf die Haftfestigkeit zur Substratoberfläche auswirken würde, wenn man diesen Kunststoff als Adhäsivschicht einsetzte. Aufgrund dessen, daß der Verschweißprozeß durch Diffusionsvorgänge gekennzeichnet ist, verschweißen kurzkettige Polymere scheller als langkettige. Deshalb wurde als Adhäsivschicht das Gießharz Plexit60 eingesetzt, die Grundkomponente des Abformwerkstoffs. Die Verbindung von mikrostrukturierten POM-Folien mit Metalloberflächen ist schwieriger als bei PMMA, da für eine ausreichende Beweglichkeit der Makromoleküle eine Temperatur über dem Kristallitschmelzpunkt erforderlich wäre. Dies würde zur Zerstörung der Mikrostrukturen führen. Weiterhin besitzt diese Kunststoffart einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der um einen Faktor 60 größer ist, als der von Silizium und somit kommt es zu höheren mechanischen Spannungen in der Grenzschicht beider Materialien bei Temperaturänderungen. Die Glastemperatur der amorphen Bereiche des POM liegt bei $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Bereiche besitzen aber nur eine beschränkte Beweglichkeit, da sie sich zwischen den Kristalliten befinden. Deshalb ist eine Verbindung von POM-Mikrostrukturen direkt oder mit teilkristallinen Zwischenschichten mit dem Siliziumwafer auszuschließen. Es war deshalb erforderlich, eine Bondtechnik mit amorpher Zwischenschicht zu entwickeln. Die Zwischenschicht muß für die Folgeprozesse RIE und Galvanik geeignet sein. Es wurde ein Versuchsprogramm mit PMMA als haftvermittelnde Schicht zwischen POM und der metallischen Substratoberfläche aufgestellt.

Thermisches Verschweißen von asymmetrischen amorphen Polymergrenzflächen

Für das Bonden der abgeformten PMMA-Mikrostrukturen wird nun auf das thermische Verschweißen von amorphen Kunststoffen theoretisch eingegangen. Die thermische Verbindung zweier Polymere setzt die Diffusion und Verschlaufung der Polymerketten der beteiligten Kunststoffe ineinander voraus. Zur Beschreibung des Verschweißens muß das dynamische Verhalten der Makromoleküle an den Grenzflächen betrachtet werden. Folgende Vorgänge laufen in zeitlicher Reihenfolge ab:

1. Die Enden der Makromoleküle sind frei in ihrer Bewegung (kurzräumige Fick'sche Diffusion)
2. Relaxation von Verknäulungen
3. Relaxation der ganzen Kette
4. Reptation
5. weiträumige Fick'sche Diffusion

Das Reptationsmodell [47] beschreibt die Bewegung eines Moleküls, das mit anderen Molekülen verknäult ist. Die Verschweißzeit (t_r) ist definiert als die Zeit, in der sich die Polymerkette 70 % von ihrer Position entfernt hat. Die Polymerkette muß sich über die Grenzfläche zwischen den zwei zu verbindenden Polymeren bewegen und zur erneuten Verschlaufungen führen. Die

Verschweißzeit muß über der Reptationszeit liegen, um eine vollständige Verbindung mit einer hohen Festigkeit zu erzielen. Neben der Zeit ist für die Molekülbewegung die Temperatur, die den Betrag des Vektors (R), der die Polymerkettenenden verbindet, beeinflusst, und das Molekulargewicht (M), das sich auf die Diffusionskonstante (D) auswirkt, entscheidend. Die Verschweißkraft, die auf den zu bondenden Komponenten anliegt, muß so hoch sein, daß ein vollständiger Kontakt vorliegt. Die Reptationszeit ist für symmetrische Flächen definiert als (Glg. 5.1):

$$t_r = R^2 / (3 \pi^2 D) \quad (5.1)$$

Folgende mit der Reptationstheorie berechnete Proportionalitäten stellen den Zusammenhang zwischen Verschweißzeit, Temperatur und Molekulargewicht dar:

$$R^2 \propto M \quad D \propto M^{-2} \quad t_r \propto T^{-1}$$

Für den zeitlichen Verlauf einer vollständigen Verbindung der Grenzschichten ist das Molekulargewicht die entscheidende Größe. Je größer die Makromoleküle, desto länger dauert der Verschweißprozeß. Diese Zusammenhänge werden zur Berechnung der Verschweißzeit der abgeformten PMMA-Folien mit 3 % Trennmittelgehalt angewandt. Der Betrag des Vektors, der die Polymerkettenenden verbindet, kann mit Glg. 5.2² berechnet werden und beträgt 38 nm.

$$R = \sqrt{\left(\frac{c_\infty M j}{M_o}\right)} b_o \quad (5.2)$$

Die Diffusionskonstante ergibt sich für PMMA mit einem Molekulargewicht von 120000 g/mol bei einer Temperatur, die 5 K über der Glasstemperatur liegt, zu $3,3 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$ [47]. Mit den oben genannten Abhängigkeiten für $D(M)$ und $t_r(T)$ ergibt sich für den abgeformten Kunststoff mit einem Molekulargewicht von 385000 g/mol [53] und einer Temperatur, die 25 K über der Glasstemperatur liegt, eine Reptationszeit (Glg. 5.1) (t_r) von 6,5 h. Diese lange Verschweißzeit widerspricht den experimentellen Ergebnissen, bei denen schon nach zwei Stunden eine nicht mehr weiter zunehmende Festigkeit der Verbindung mit einer PMMA-Adhäsivschicht gleichen Molekulargewichts festgestellt werden konnte. Für ein Molekulargewicht von 110000 g/mol ergibt die Berechnung eine Reptationszeit (t_r) von 1,8 h. Dies bedeutet, daß nur die niedermolekularen Polymerbestandteile sich über die Grenzschicht bewegen und mit dem gegenüberliegenden Polymer verschlaufen können. Der Abformwerkstoff ist für seine Anwendung optimiert und kann nicht zu niedrigeren Molekulargewichten modifiziert werden. Allerdings ist es möglich, eine Adhäsivschicht einzusetzen mit einem Molekulargewicht deutlich unter dem des abgeformten Werkstoffs. Deshalb wurde Plexit60 mit einem Molekulargewicht von 90000 g/mol eingesetzt. Analog zu den Verschweißzeitberechnungen des Formstoffs ergibt sich für die Adhäsivschicht eine Zeit von 1,5 h. Das Verschweißen erfordert eine genaue Kenntnis der Glasstemperaturen. Für relativ geringe Verschweißzeiten sollte die Verschweißtemperatur so hoch gesetzt werden, daß sich die mikrostrukturierte Folie nicht plastisch verformt.

² [47, 51, 52]

$c_\infty = 8,2$: kritisches Verhältnis; $M_o = 125 \text{ g/mol}$: Molekulargewicht des Monomers

$j = 2$: Anzahl der Kettenbindungen; $M = 385000 \text{ g/mol}$: Molekulargewicht der Kette

$b_o = 0,15 \text{ nm}$: Bindungslänge

Verbindung mit teilkristallinen Kunststoffen

Aus Experimenten ist bekannt, daß die Haftfestigkeit von unbehandelten POM mit Adhäsionsklebungen generell geringer ist als bei anderen teilkristallinen Werkstoffen. Bei vielen Polymeren ist es möglich, die Verbundfestigkeiten durch Oberflächenbehandlungen zu steigern [54–56]. Für diese Untersuchungen können auch Klebstoffe auf der Basis von PMMA zum Einsatz gebracht werden. Folgende Aspekte tragen zur Klebstoffauswahl bei:

- Polymerisationsklebstoffe auf Methacrylat-Basis führen gegenüber anderen Klebstoffen zu höherer Haftung auf POM [21].
- Bei den unvernetzten PMMA-Typen ist die Ätzrate beim Reaktiven Ionen-Ätzen so hoch, so daß eine Klebstoffschicht ohne Zerstörung der Mikrostrukturen zum Freilegen der Galvanikstartflächen entfernt werden kann, was bei vielen handelsüblichen Klebstoffen wie z.B. Epoxidharzen nicht gewährleistet ist.
- Weiterhin ist die Verträglichkeit von PMMA in der Galvanik nachgewiesen [57] und es bestehen umfangreiche Erfahrungen mit den Haftungseigenschaften von PMMA auf metallischen Oberflächen [58, 59].

5.2 Thermisches Bonden der abgeformten PMMA-Struktur des Beschleunigungssensors

Das Verschweißen von PMMA ist in der Literatur [47] ausführlich behandelt, jedoch stellt das thermische Verbinden von Mikrostrukturen mit der strukturierten Seite zum Substrat neue Anforderungen an die Führung und die Parameter des Prozesses. Auf der Opferschicht sollen Beschleunigungssensoren mit einer Höhe von 200 μm und einer minimalen Stegbreite von 10 μm verschweißt werden. Die für die Verbindung des abgeformten Kunststoffes notwendige PMMA-Adhäsivschicht auf der Opferschicht muß in Dicken von unter 5 μm mit einer Ebenheit von $\pm 2 \mu\text{m}$ aufgebracht werden, um eine homogene Entfernung der Trägerschicht beim RIE zu erreichen. Dies wurde erreicht, indem das Gießharz Plexit60 in MMA³ gelöst wurde. Diese Lösung wurde auf den Wafer aufschleudert. Für die Festlegung der Verschweißparameter ist neben der Glas temperatur der abgeformten Kunststoffstrukturen, die Formstabilität der Mikrostrukturen in Abhängigkeit vom Anpreßdruck und der Temperatur während des Bondprozesses von entscheidender Bedeutung. Die Verschweißtemperatur der strukturierten Kunststoffschicht muß über den Glas temperaturen der Adhäsiv- und der zu verschweißenden mikrostrukturierten PMMA-Schicht liegen. Die Glas temperaturen wurden mit dem Verfahren der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK) [60] ermittelt, da Kunststoffe nur oberhalb der Glas temperatur eine ausreichende Beweglichkeit ihrer Moleküle für die Diffusion und Verknäulung ineinander aufweisen. Der verwendete Abformkunststoff setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen (siehe Absatz 3.2). Eine Komponente ist das

³Mischung aus Plexit60 und MMA im Verhältnis 1 : 1

Gießharz Plexit60 (Fa. Röhm, Darmstadt)

Zusammensetzung: hochmolekularer Anteil Copolymerisat 96,5 Gew.- % MMA und 3,5 Gew.- % MA;
MMA – Methylmethacrylat, BPO – Dibenzoylperoxid, DMA – Dimethylanilin

Trennmittel⁴(PAT665), das zur leichteren Entformung des Kunststoffes aus dem Abformwerkzeug führt. Für sehr komplizierte und hohe Strukturen ist ein höherer Trennmittelgehalt als der üblich eingesetzte von 3 % notwendig und wird deshalb in die Betrachtungen des thermischen Verhaltens der Abformwerkstoffe einbezogen. Weiterhin wurde zur Ermittlung der Glastemperaturen neben dem polymerisierten Ausgangswerkstoff, der noch keinen thermischen Prozessen ausgesetzt war, auch in unterschiedlichen Atmosphären getempertes PMMA analysiert. Somit kann der Einfluß des Abformprozesses auf die Glastemperaturen untersucht werden (Tab. 5.2). Die Meßwerte zeigen eine eindeutige Abhängigkeit der Glastemperatur von

Prozeßbedingung	Glastemperaturen (T_G) [°C]		
	0 % PAT665	3 % PAT665	10 % PAT665
polymerisiert	59	57	57
getempert (Atmosphäre)	71	67	61
getempert (Stickstoff)	93	89	82
geprägt (Vakuum)	99	90	83
getempert (Atmosphäre) Aufheizen 25 °C bis 115 °C in 360 Minuten, Haltezeit 60 Minuten bei 115 °C Abkühlen 115 °C bis 25 °C in 685 Minuten getempert (Stickstoff): Temperaturzyklus wie beim Abformvorgang Aufheizen 25 °C bis 200 °C in 20 Minuten, Haltezeit 10 Minuten bei 200 °C Abkühlen 200 °C bis 25 °C in 10 Minuten geprägt (Vakuum): Temperaturzyklus wie beim Abformvorgang Prägekraft: 30 kN, Fläche 60 · 30 mm ²			

Tabelle 5.2: Glastemperaturen als Funktion des Trennmittelgehalts (PAT665) im PMMA und der Prozeßbedingungen.

den thermischen Prozessen denen der Kunststoff ausgesetzt war. Durch den Temperprozeß kommt es zu einem starken Anstieg der Glastemperatur bedingt durch die Nachpolymerisation der Kunststoffkomponenten. Diese Temperatur erhöht sich nochmals durch den Prägeprozeß. Durch den Zusatz des Trennmittels verringert sich der Anstieg der Glastemperaturen. Der Grund liegt darin, daß PAT665 aus einem Gemisch von gesättigten und ungesättigten Fettsäuren besteht [53]. Die ungesättigten Fettsäuren werden in die Molekülketten einpolymerisiert, während die gesättigten an der Polymerisation nicht teilnehmen und als Phase zwischen den Molekülen verbleiben. Beide Erscheinungsformen führen zu einer Herabsetzung der intermolekularen Wechselwirkung zwischen den Molekülen und erhöhen ihre Mobilität. Die Folge ist eine Herabsetzung der Glastemperatur. Aus diesen Untersuchungen können folgende Konsequenzen für die Abformung und den Verschweißprozeß gezogen werden:

- Die Glastemperaturen sind abhängig vom Temperaturzyklus, den der Kunststoff vor dem thermischen Bondprozeß erfahren hat.
- Mit zunehmendem Trennmittelgehalt verringert sich die Präge- und Entformungstemperatur.

⁴Fa. Würtz, Bingen

- Mit zunehmendem Trennmittelgehalt verschiebt sich der Erweichungsbereich des Kunststoffs bei Temperaturerhöhung zu tieferen Temperaturen.
- Mit zunehmenden Trennmittelgehalt nimmt die mögliche Verschweißtemperatur ab.

Nachdem die für den Verschweißprozeß notwendigen Minimaltemperaturen ermittelt wurden, muß das Festigkeitsverhalten von PMMA in Abhängigkeit vom Anpreßdruck und der Temperatur untersucht werden. Die Messungen werden mit einem modifizierten Verfahrensablauf der Thermomechanischen Analyse (TMA) durchgeführt. Auf der zu vermessenden Probe befindet sich ein Stempel (Abb. 5.3) mit einer definierten Auflagefläche. Die Probe wird mit einer bestimmten Heizrate über den interessierenden Temperaturbereich aufgeheizt. Die Ausdehnung der Probe verschiebt den Stempel, dessen Bewegung induktiv mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich gemessen werden kann. Zur Simulation der Anpreßkraft beim thermischen Bondprozeß wird der Stempel mit Gewichten belastet. Nach dem Erreichen der Glasübergangstemperatur kommt es zu einem Eindringen des Stempels ins Polymer, wenn der vorgegebene Druck die Festigkeit des Kunststoffs überschreitet. Die Eindringtemperatur ist gleichzeitig die Temperatur, bei der eine Verformung der abgeformten Mikrostrukturen beim Bondprozeß bei gegebenen Druck eintreten würde. Das Ziel ist, bei einer minimalen Kraft auf die Mikrostrukturen, die gerade ausreicht, daß die Mikrostrukturen vollständig auf dem Substrat aufliegen, eine maximale Verschweißtemperatur zu erreichen. Für die folgenden Messungen wurde die Heizrate zu 2 K/min. festgelegt, um eine maximale Auflösung der Meßwerte zu erreichen. Um die Zweckmäßigkeit der Methode zu prüfen, wurden unstruk-

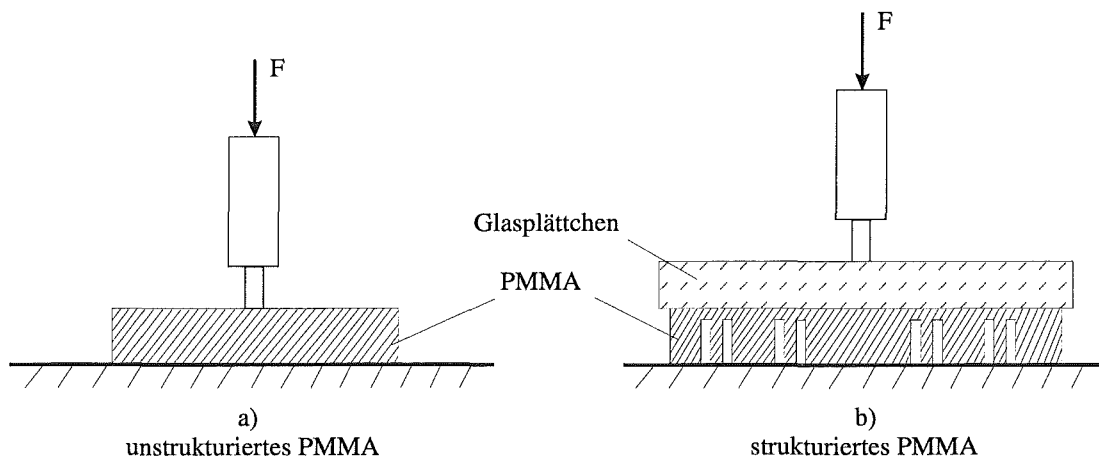


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau für die Ermittlung der Verschweißparameter Kraft und Temperatur.

turierte Proben mit unterschiedlichen Anpreßdrücken, jeweils in einem Temperaturintervall von 20 bis 160 °C, beaufschlagt (Abb. 5.3 a)). Der Anstieg der relativen Ausdehnung im Temperaturbereich zwischen 25 und 55 °C ist auf die thermische Ausdehnung der Probe zurückzuführen. Im Bereich des Maximums hat die Probe den Glasübergangsbereich erreicht. Das Material erweicht und der Stempel beginnt geringfügig in das Material einzudringen (Abb. 5.4). Wenige Kelvin über der Glasübergangstemperatur verändert sich die Lage des Stempels nicht, da der Kunststoff noch so fest ist, daß der Druck nicht ausreicht um ihn zu verdrängen. Erst wenn der Kunststoff durch die weiter steigende Temperatur so niederviskos ist, daß der

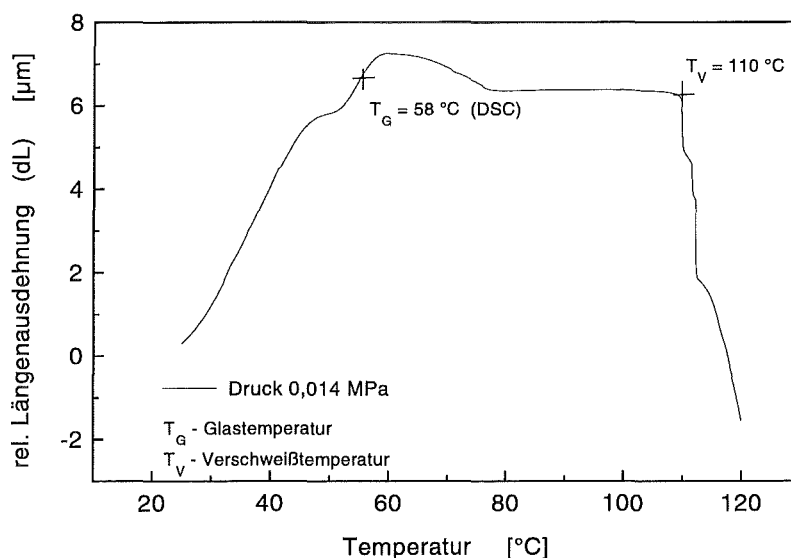


Abbildung 5.4: Ermittlung der thermischen Verschweißtemperatur von ungetemperten PMMA mit 3% PAT665 mit Hilfe der Eindringmethode der TMA.

Druck auf die Probe ausreicht, um in den Kunststoff einzudringen, bewegt sich der Stempel. Die extrapolierte Temperatur (T_V) im Abknickbereich der Kurve wird als die Temperatur definiert, bei deren Überschreitung eine Schädigung der abgeformten Mikrostrukturen eintritt. In diesem Moment kommt es zu einem für diesen Werkstoff charakteristischen Abknicken des Kurvenverlaufs. Diese Temperatur (T_V) lag 52 K über der Glastemperatur (T_G) von 58 $^{\circ}\text{C}$ (Abb. 5.4).

Im folgenden werden diese Untersuchungen für geprägte unstrukturierte und strukturierte Kunststofffolien durchgeführt, um den Einfluß der Nachpolymerisation durch Temperprozesse (Tab. 5.2) zu ermitteln. Die Ergebnisse der Messungen zeigten, daß mit zunehmendem Verschweißdruck die maximalen Verschweißtemperaturen abnahmen. Diese Verschweißtemperaturen lagen 20 bis 40 K über der Glastemperatur (Tab. 5.3). Die Nachpolymerisation des Polymers erhöht das Molekulargewicht und steigert deshalb die Glastemperatur [53]. Deshalb verringert sich die Differenz zwischen der Glas- und der maximalen Verschweißtemperatur. Weiterhin kam es zu einer Veränderung des Kurvenverlaufs im Gegensatz zu den ungetemperten Proben. Der Temperaturbereich des Eindringens des Stempels in den Kunststoff vergrößert sich (Abb. 5.5). Nachdem an den unstrukturierten Proben eindeutig der Zusammenhang zwischen Temperatur und Druck beim Verschweißprozeß gezeigt werden konnte, wurden die geprägten Mikrostrukturen und der Einfluß ihrer Strukturhöhe auf das Verschweißverhalten untersucht. Für die Experimente wurden vereinzelte Mikrostrukturen des Beschleunigungssensors in den Höhen von 100, 150 und 200 μm eingesetzt. Die Verschweißkraft wurde über ein Glasplättchen gleichmäßig über die Trägerschicht des Sensors eingeleitet (Abb. 5.3b)). Diese Untersuchungen zeigten, daß sich der Temperaturbereich, in dem die Strukturen ihre mechanische Stabilität verlieren, noch breiter ist als bei den unstrukturierten geprägten Proben (Abb. 5.6). Das erste Absinken der Stempels vollzieht sich

Verschweißdruck [MPa]	Verschweißtemperatur (T_V) [°C]
0,007	137
0,014	133
0,024	128
0,048	121

Probenabmessung : Glasstempel $0,863 \text{ mm}^2$
 Probenabmessung : PMMA-Halbzeug $5 \cdot 5 \cdot 1 \text{ mm}^3$
 Glasktemperatur : 93 °C
 Fehler bei Bestimmung von T_V : $\pm 2 \text{ K}$

Tabelle 5.3: Ermittlung der Verschweißtemperaturen (T_V) von unstrukturiert geprägtem PMMA mit 3% Trennmittelgehalt als Funktion der Verschweißkraft.

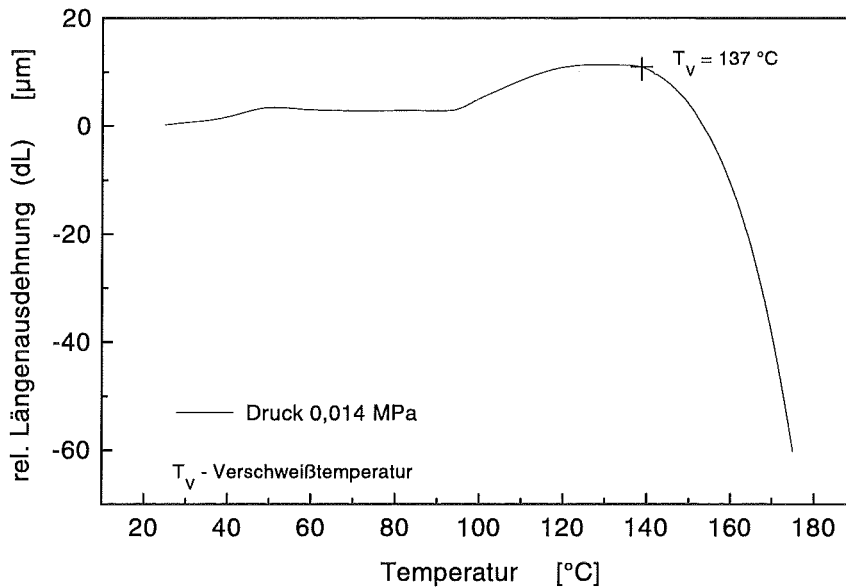


Abbildung 5.5: Ermittlung der thermischen Verschweißtemperatur von geprägten unstrukturierten PMMA-Mikrostrukturen mit 3% Trennmittelgehalt.

im Glasübergangsbereich. Als maximale Verschweißtemperatur wurde die Temperatur definiert, die am zweiten Wendepunkt des Wegkurvenverlaufs (dL) auftritt (Abb. 5.6), da der Stempel wesentlich langsamer einsinkt als bei den ungetemperten Proben. Die Verschweißtemperaturen der strukturierten Folien liegen 10 K unter denen der unstrukturierten. Dies ist begründet durch den Versuchsaufbau (Abb. 5.3). Bei Temperaturerhöhung über die maximal mögliche Verschweißtemperatur wird der Kunststoff der unstrukturierten Proben horizontal und vertikal verdrängt. Die vertikale Komponente wird dadurch erzeugt, daß der Kunststoff in seiner horizontaler Bewegung durch das umgebende Material behindert wird. Hingegen kann sich der Kunststoff beim Verschweißen der strukturierten Proben frei in horizontaler Richtung

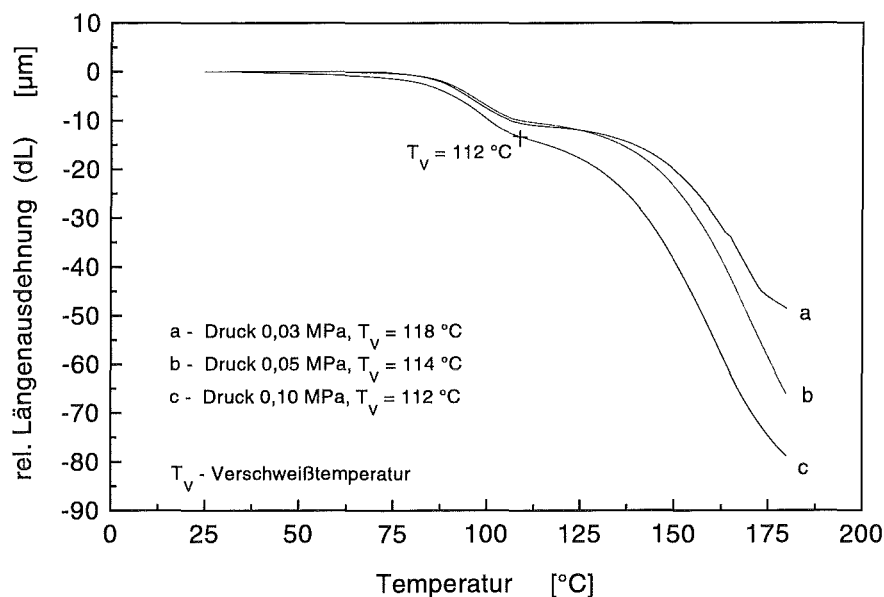


Abbildung 5.6: Verschweißtemperatur (T_V) von abgeformten PMMA-Mikrostrukturen mit 3% Trennmittelgehalt als Funktion des Verschweißdrucks.

Strukturhöhe [μm]	Verschweißdruck [MPa]	Verschweißtemperatur (T_V) [$^{\circ}\text{C}$]
100	0,03	116
	0,05	115
	0,10	113
150	0,03	118
	0,05	114
	0,10	112
200	0,03	116
	0,05	118
	0,10	111

Probenabmessung : Glasstempel $3218 \cdot 2037 \cdot 500 \mu\text{m}^3$
 Probenabmessung : PMMA-Mikrostruktur $3129 \cdot 1964 \mu\text{m}^2$
 Probenabmessung : mikrostrukturierte Fläche $3,03 \text{ mm}^2$
 Fehler bei Bestimmung von T_V : $\pm 2 \text{ K}$
 Glastemperatur : 93°C

Tabelle 5.4: Verschweißtemperaturen in Abhängigkeit von der Mikrostrukturhöhe und des Verschweißdrucks.

ausbreiten und erfährt somit einen geringeren Werkstoffwiderstand. Die Ergebnisse zeigen, daß die Strukturhöhe, bei gleichem Design, keinen Einfluß auf die maximale Verschweißtemperatur besitzt. Im untersuchten Beschleunigungssensordesign gibt es neben den sehr dünnen PMMA-Strukturen von $10 \mu\text{m}$ Breite jeweils zwei Flächen mit einer Ausdehnung von

3000 · 300 μm^2 und 2000 · 250 μm^2 . Diese Flächen bestimmen die thermische Stabilität der abgeformten Sensorstruktur. Ein weiteres Ergebnis ist der relativ große Druckbereich in dem Verschweißungen vorgenommen werden können. Im Experiment reichten Drücke von 0,027 MPa aus, um die Sensoren vollständig und ohne Strukturverzüge zu verschweißen. Dies ist für die mechanische Festigkeit der Verbindung vorteilhaft, weil der Verschweißprozeß bei relativ hohen Temperaturen in Bezug zur Glasübergangstemperatur durchgeführt werden konnte. Die Verschweißzeiten lagen unter zwei Stunden.

Mit der Meßmethode der Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) kann der Viskositätsverlauf des PMMA im Glasübergangsbereich bestimmt werden (Abb. 5.7). Damit ist es jetzt möglich, den ermittelten Verschweißtemperaturen eine Viskosität zuzuordnen. Mit dem Viskositätswert als Maß für die Festigkeit kann von verschiedenen PMMA-Mischungen und von unterschiedlichen Kunststoffen die maximale Verschweißtemperatur (T_V) verglichen werden. Die Kurvenverläufe der Zähigkeiten (Abb. 5.7) für PMMA mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen zeigen, daß mit zunehmendem Trennmittelanteil bei gegebener Temperatur die Festigkeit abnimmt. Daraus folgt, daß mit zunehmendem Trennmittelgehalt entweder bei gegebener Kraft die Verschweißtemperatur herabgesetzt oder bei gegebener Temperatur die Verschweißkraft verringert werden muß.

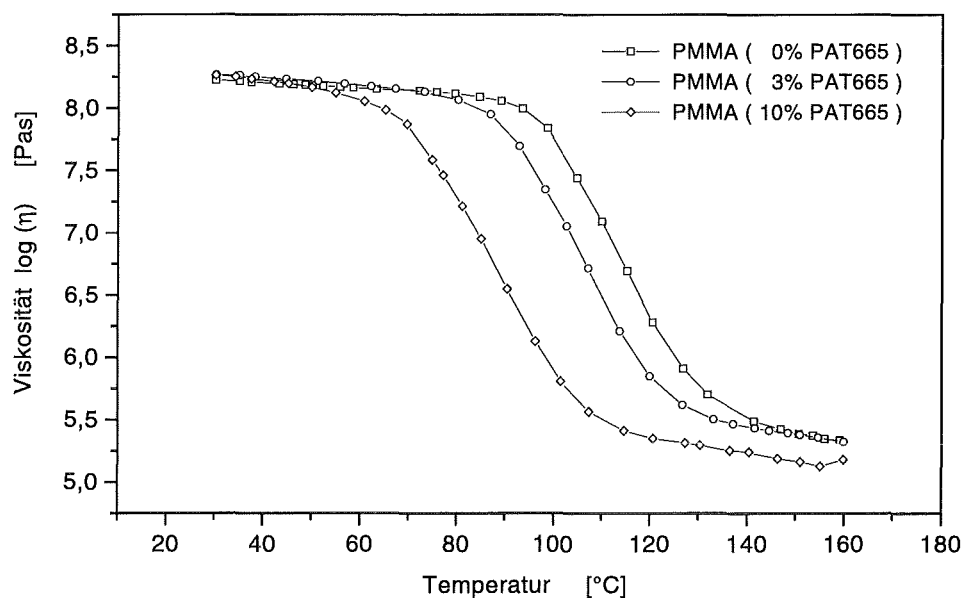
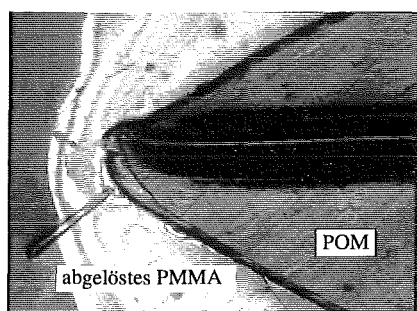


Abbildung 5.7: Viskositäten von PMMA mit unterschiedlichen Trennmittelanteilen.

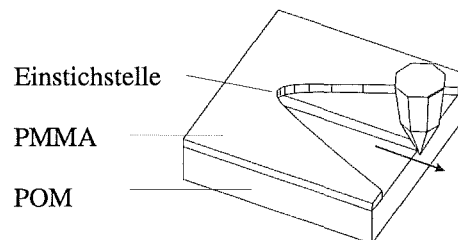
5.3 Bonden der abgeformten POM-Struktur des Beschleunigungssensors

Wie in Absatz 5.1.2 erläutert, ist für eine Haftungsverbesserung auf POM Oberflächenmodifikation notwendig. Dies kann durch eine Behandlung in Sauerstoffplasma⁵ erreicht werden. Dadurch kommt es zur Aufspaltung der Moleküle und somit zur Entstehung von reaktiven Gruppen, die mit der Adhäsivschicht reagieren können. Zur Ermittlung der Haftfestigkeit zwischen POM und der PMMA-Adhäsivschicht auf der Opferschicht wurden Proben von 1,5 mm Dicke drei Minuten lang geätzt. Die glatte und glänzende Oberfläche des Ausgangsmaterials wurde dabei rauh und matt. Eine 12-prozentige PMMA-Ethylacetatlösung

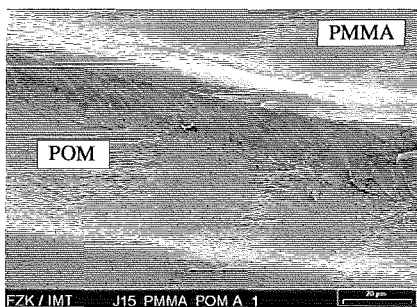
POM mit unbehandelter Oberfläche



100 μm



POM mit geätzter Oberfläche



abgebildeter Ausschnitt

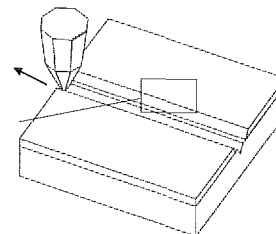


Abbildung 5.8: Haftungstest von PMMA-Schichten auf RIE-behandelten POM.

wurde mit einem Spatel auf die mit Ethylacetat gereinigte POM-Oberfläche aufgestrichen. Mit Ritztests kann die Haftfestigkeit einer Schicht qualitativ bestimmt werden (Abb. 5.8). Auf der unbehandelten Probe löst sich der Film von der Einstichstelle der Metallspitze her immer weiter ab, was an der breiter werdenden Bruchkante des PMMA zu erkennen ist. Die geätzten Proben wiesen keine Ablösungen in der Grenzfläche zwischen POM und PMMA auf. Dies ist an der dichten Grenzfläche zu erkennen, die in der unteren REM-Aufnahme von Abb. 5.8 abgebildet ist. Da Wartezeiten zwischen der Plasmabehandlung und der Weiterverarbeitung zu geringeren Haftfestigkeiten führen [61], wurden die geätzten Proben innerhalb von einer Stunde verarbeitet.

⁵Maschine Plasma Technology Typ AMR/80 Fa. Oxford Instruments

Druck in der Prozesskammer: 13,3 Pa, Temperatur der Probenhalterung: 273 K

Gasfluß: 30 sccm, HF-Leistung bei $f = 13,56$ Mhz: 100 W, Beschleunigungsspannung: 400 V

Wie aus Absatz 5.1.2 hervorgeht, sind zwei Möglichkeiten zur Verbindung von POM über amorphe Zwischenschichten möglich:

- Thermisches Verschweißen
- Bonden mit Fluiden auf PMMA-Basis

Thermisches Verschweißen

Das Verschweißen von POM mit der PMMA-Adhäsivschicht kann bei Temperaturen bis unterhalb des POM-Kristallitschmelzpunktes erfolgen. Dieser Temperaturbereich erlaubt nur den PMMA-Makromolekülen zu diffundieren. POM-Proben mit den Abmessungen $10 \cdot 20 \cdot 1,2 \text{ mm}^3$ wurden 5 Minuten im Sauerstoffplasma geätzt und bei 160 °C mit PMMA-Proben unter einem Druck von $0,04 \text{ MPa}$ eine Stunde lang verschweißt. Die Verschweißung wurde zum Vergleich auch mit unbehandelten Proben durchgeführt. Die unbehandelten POM-Proben lösten sich ohne äußeren Krafteinfluß von der PMMA-Adhäsivschicht. Beim mechanischen Trennen des Verbundes kommt es dagegen bei geätzten Proben zum Mischbruch (Abb. 5.9). Zu Mischbrüchen kommt es, wenn lokal der Bruchwiderstand des Vollmaterials erreicht wird. Damit ist gezeigt, daß auch die Heißklebung durch die Plasmabehandlung positiv beeinflusst wird. Nachdem die Probekörper erfolgreich verschweißt wurden,

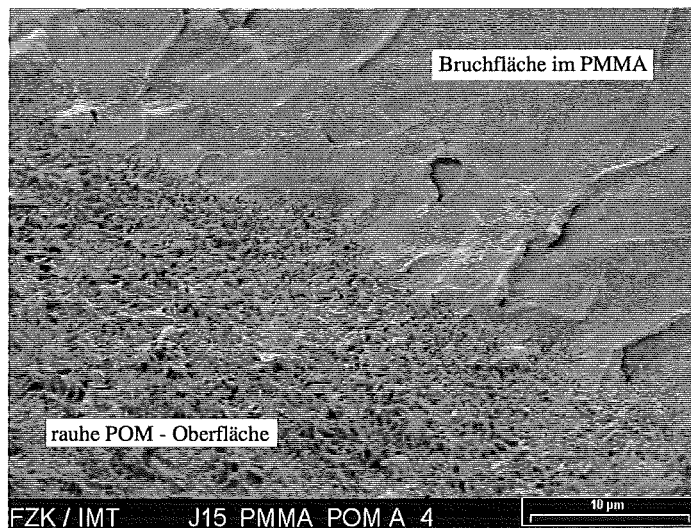


Abbildung 5.9: Mischbruch an der Grenzfläche PMMA-POM.

stellt sich die Frage, ob auch POM-Mikrostrukturen mit ihrer mikrostrukturierten Seite zur Substratoberfläche verbunden werden können. Es besteht ein Unterschied im thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen POM und dem Siliziumsubstrat von einem Faktor 60. Deshalb kommt es bei der Abkühlung des Stoffverbundes zu extrem hohen Spannungen, die zu unzuverlässigen Verbindungen führen und sich negativ auf die Folgeprozesse der Entfernung der Trägerschicht mit RIE und den Galvanikprozeß auswirken. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, daß es durch die hohe Rauigkeit der POM Oberfläche nur zu partiellen Verschweißungen kommt [28].

Bonden mit Fluiden auf PMMA-Basis

Das Bonden mit Fluiden auf PMMA-Basis besitzt gegenüber dem thermischen Verschweißprozeß den Vorteil, daß die Komponenten bei Raumtemperatur gefügt werden. Somit kommt es außer bei den Folgeprozessen RIE und Galvanik zu keiner thermisch induzierten Spannung in der Grenzschicht zwischen PMMA und POM. Die Verbindung kann auf physikalischem oder chemischen Wege erfolgen. Bei physikalisch abbindenden Fluiden verfestigt die Verbindung durch das Entweichen des Lösungsmittels, während bei chemischer Verbindung eine Reaktion mit Kettenwachstum der Polymere erforderlich ist. Durch die leichtflüchtigen Lösemittel und die geringen Schichtdicken im Mikrometerbereich ändert sich die Fluidzusammensetzung binnen weniger Sekunden. Deshalb sind geschlossene Versuchsräume, in denen die Partialdrücke der leicht flüchtigen Substanzen genau eingestellt werden können, Voraussetzung für weitergehende Untersuchungen. Es gibt Kunststoffsysteme, wie z.B. Epoxidharze, die keine flüchtigen Substanzen enthalten und daher auch unter Normbedingungen in dünnen Schichten aufgebracht werden können. Diese Schichten sind chemisch so beständig, daß sie nicht selektiv zu den abgeformten Strukturen durch den RIE-Prozeß entfernt werden können.

POM wird durch die PMMA-Lösungsmittel wenig gequollen und gelöst. Deshalb muß das Lösungsmittel in der Zwischenschicht bis zum POM-Strukturrand diffundieren und kann dann an der Atmosphäre verdunsten. Um eine ausreichende Benetzung des wenige Mikrometer betragenden Spaltes zwischen POM und dem Substrat zu gewährleisten, müssen Lösungsmittelgehalte > 40 Gewichtsprozent verwendet werden. Nach der Verdunstung ergibt sich daraus ein erheblicher Volumenverlust und es kommt in der Zwischenschicht zu Schwunderscheinungen. Nach einer halben Stunde beginnen baumartige Strukturen zu wachsen und dieser Vorgang ist nach circa zwei Stunden abgeschlossen. Ein Großteil der Bondfläche ist infolge der Schrumpferscheinungen inhomogen.

Alternativ zu den physikalisch abbindenden Fluiden sind Verbindungen durch Polymerisation von PMMA möglich. Diese Variante wird untersucht, weil der Polymerisationsschwind geringer ist im Vergleich zu auf Lösungsmitteln basierenden Fluiden. Für die Untersuchungen wurde das Gießharz Plexit60⁶ [51] mit unterschiedlichen Beimischungen des Monomers MMA verwendet. Um die Viskosität den Anforderungen der Kapillarklebung anzupassen, wurden folgende Zusammensetzungen getestet (Tab. 5.5). Der Schwund von Plexit60 durch Polyme-

Reaktionsfluid	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
Plexit60	95,5	86	76,5	57,5
MMA	0	9,5	19	38
BPO	3	3	3	3
DMA	1,5	1,5	1,5	1,5

Tabelle 5.5: Zusammensetzung der Reaktionsfluide in Gewichtsprozenten.

risation beträgt 14 Prozent [62]. Sind weitere Komponenten wie MMA beigemischt, so wird er erhöht. Die Vorversuche mit unstrukturierten POM-Proben mit der Reaktionsmasse des

⁶Plexit60 (Gießharz Fa. Röhm)

Zusammensetzung: hochmolekularer Anteil Copolymerisat 95,5 Gew.- % MMA und 3,5 Gew.- % MA
MMA-Methylmethacrylat, MA-Methacrylsäure, BPO-Dibenzoylperoxid, DMA-Dimethylanilin

Typs C ergaben eine homogene Verbundschicht und eine ausreichende Benetzung zwischen POM und der Substratoberfläche. Der angelegte Druck betrug 0,12 MPa, dabei ergab sich eine PMMA-Dicke von sechs bis zehn Mikrometern. Die Reaktionsfluide A und B ermöglichten keine vollständige Benetzung und bei Typ D kam es zu Schichtinhomogenitäten durch Schwund.

Die Versuche mit strukturiertem POM und dem Reaktionsfluid C wurden mit dem Aufbau A (Abb. 5.10) durchgeführt. Über eine Zwischenschicht aus einem Elastomer wird der Druck von 0,3 MPa eingeleitet. Zur Gewährleistung einer homogenen Fluidverteilung entlang des Verbindungsspalts wird das Siliziumsubstrat mit so viel Fluid benetzt, daß ein schnelles Verdampfen der Reaktionslösungs-Bestandteile verhindert wird. Trotz der analogen Vorgehensweise wie bei den unstrukturierten Proben kam es zu Schwunderscheinungen. Schwunderscheinungen mit der Reaktionsmasse Plexit60 können durch Druckeinwirkung beim Verbindungsprozeß verringert werden [58]. Für diese Untersuchungen wurde ein Teststand B (Abb. 5.10) realisiert, der dadurch gekennzeichnet ist, daß die Einleitung der Kraft über ein Glasplättchen erfolgt, das sich gegenüber dem Elastomer und POM nicht verformen kann. Das Elastomer wird zur gleichmäßigen Krafteinleitung auf die Kunststoffoberfläche eingesetzt. Der Druck kann nicht unbegrenzt gesteigert werden, da er über die mikrostrukturierte Seite der POM-Folie eingeleitet wird. Drücke von 0,53 MPa bzw. 0,8 MPa führten zu etwa 70 bzw. 15 % inhomogen verklebter Fläche zwischen der POM-Folie und dem Substrat. Daß bei

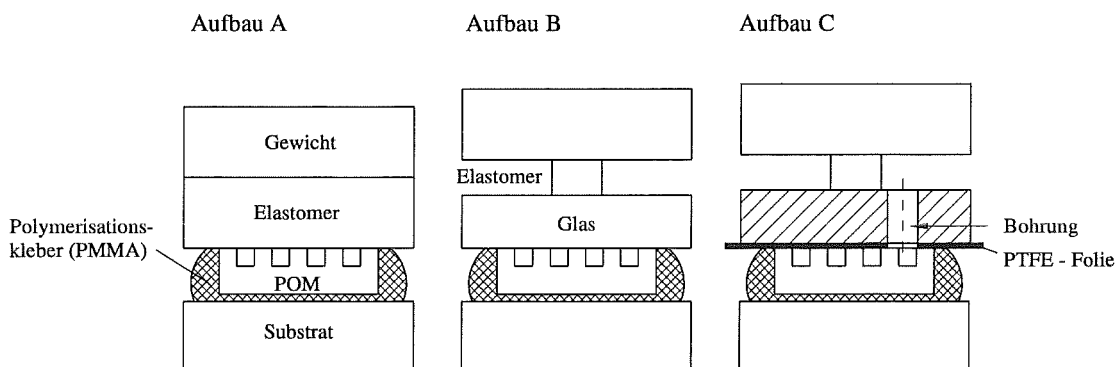


Abbildung 5.10: Versuchsaufbauten für Bondversuche mit POM-Mikrostrukturen.

den 1,2 mm starken unstrukturierten POM-Proben keine Schwunderscheinungen auftraten, legt den Schluß nahe, daß in den mikrostrukturierten Bereichen diese Erscheinungen durch Diffusionsprozesse auslöst werden. Der entscheidende Unterschied besteht in der dünnen Trägerschicht von unter 30 Mikrometern in den strukturierten Bereichen. Erste Untersuchungen zeigten besonders in den strukturierten Sensorbereichen Schwunderscheinungen. Diese Bereiche sind nicht abhängig von der zu verbindenden Foliengröße. Im Experiment wurde die POM-Folie nach einer Stunde vom Substrat gelöst und es konnte festgestellt werden, daß unter den dünnen Trägerschichtbereichen das Polymer noch niederviskos, d.h. nicht polymerisiert war.

Aus den eng, an die nur einige zehn Mikrometer dicken POM-Membranen, geknüpften Defekte folgt, daß sich durch Diffusionsprozesse⁷ die Schichteigenschaften nicht über weite Bereiche hinweg ausgleichen. Damit können Schwunderscheinungen nicht mit dem Eintrocknen der PMMA-Schicht von den POM-Folienrändern her begründet werden. Auch die Verdunstung von MMA durch POM-Membranen ist als Ursache für die Schwunderscheinungen nicht heranzuziehen, weil die defektbehafteten Bereiche gegenüber den homogenen Klebefugen höhere MMA-Anteile aufweisen. Niederviskose Schichten im strukturierten Trägerschichtbereich können allein mit enthaltenem MMA erklärt werden, da ausgetrocknete Polymerisationsschichten hart sind. Aus diesem Grund läßt sich bei einer harten Verbundschicht nicht sicher sagen, ob die Erhärtung durch Verdunsten des Monomers MMA oder durch Polymerisation erfolgt ist. Dafür sind Messungen der Molekulargewichtsverteilung der Klebeschicht notwendig, um einen Aufschluß über deren chemische Veränderungen zu erhalten. Aus der nicht abgeschlossenen Polymerisation in den dünnen Trägerschichtbereichen, bei gleichzeitig erfolgter Polymerisation unter den Mikrostrukturen, wird auf eine Inhibierung der Polymerisation geschlossen. Diese ist in erster Linie nicht auf Oberflächeneffekte zurückzuführen, weil an vergleichsweise dicken und unstrukturierten Proben die Polymerisation erfolgt. Die Inhibierung wird mit Diffusionsprozessen durch die POM-Membran der Trägerschicht in Verbindung gebracht, denn durch diese können Gase der Umgebungsatmosphäre eindiffundieren oder Bestandteile des Polymerisationsfluids ausdiffundieren. Die Produktinformationen der Firma Röhm zu Plexit60 enthalten einen Hinweis auf inhibierte Polymerisation unter Sauerstoffeinfluß [62]. Um zwischen den Vorgängen des Ein- und Ausdiffundierens unterscheiden zu können, wurden die Verklebungen unter Vakuum mit dem Versuchsaufbau C (Abb. 5.10) unter einem Druck von 0,27 MPa und mit den Fluidtypen A und C (Tab. 5.5) durchgeführt. Im Ergebnis konnten bei beiden Fluiden keine Schwunderscheinungen festgestellt werden. Wahrscheinlich wird der inhibierende Effekt durch den eindiffundierenden Luftsauerstoff bewirkt. Die Eignung dieses Prozesses bezüglich der Folgeprozesse RIE und Galvanik wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

5.4 Entfernung der Kunststoffträgerschicht

5.4.1 Reaktives Ionen-Ätzen von PMMA beim thermischen Verschweißen

Für die Entfernung der Kunststoffträgerschicht kann auf Untersuchungen zurückgegriffen werden, die für das Verfahren der positionierten Abformung durchgeführt wurden [9]. Dieser Prozeß erforderte eine hohe Anisotropie (Verhältnis des Tiefen- zum Seitenwandabtrag), da sich die zu entfernende Trägerschicht auf der Substratoberfläche befindet und die Kunststoffmikrostrukturen als RIE-Maske dienen. Beim thermischen Verschweißen muß zuerst die Trägerschicht (Abb. 1.1) entfernt werden und anschließend noch die 3 – 7 μm dicke Adhäsivschicht auf der Waferoberfläche. Nur für den zweiten Schritt wird ein Anisotropieverhältnis von maximal fünf benötigt. Die Adhäsivschicht besitzt nur noch ein sechstel der Stärke wie beim Verfahren der positionierten Abformung. Deshalb kann auch in sehr schmalen und tiefen

⁷Gasdurchlässigkeiten von POM innerhalb von 24 h bei $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $p = 10^5\text{ N/m}^2$ [21]:

Sauerstoff	:	49 cm^3/m^2	10^5 N/m^2	
Kohlendioxid	:	1110 cm^3/m^2	10^5 N/m^2	
Wasserdampf	:	32 g/m^2	10^5 N/m^2	(bei 85 % Feuchtigkeitsgefälle)

Grabenstrukturen der Kunststoff vollständig entfernt werden. Die einzigen Randbedingungen beim Entfernen der Adhäsivschicht sind die Prozeßtemperatur, die unterhalb der Glasstemperatur des zu verschweißenden Kunststoffs liegen muß und die Anisotropie, die so eingestellt sein muß, daß der Seitenwandabtrag den im Design eingegebenen Vorhalt nicht überschreitet. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zur Entfernung der Adhäsivschicht durchgeführt. Für diese Experimente wurden abgeformte 150 μm hohe Folien mit den Strukturen des temperaturkompensierten LIGA-Beschleunigungssensordesigns genutzt, die mit einer Wärmeleitpaste⁸ auf der Elektrode der RIE-Anlage⁹ fixiert wurden. Vorversuche ergaben, daß infolge zu hoher Temperaturen ab einer Plasmaleistung von 100 W Strukturverzüge auftreten. Weiterhin konnte kein Einfluß des Gasflusses auf die Anisotropie und den Abtrag festgestellt werden. Der Fluß wurde auf 40 sccm und die Prozeßzeit auf 30 Minuten festgelegt. Der Gasdruck wurde zwischen 0,6 und 13 Pa (Tab. 5.6) variiert. Es konnte bei dieser Druckerhöhung ein Anstieg des vertikalen Abtrags um den Faktor fünf registriert werden. Hingegen lag der laterale Abtrag pro Strukturkante bei maximalem Druck bei 0,5 μm . Dieser kontinuierliche Prozeß ermöglicht die Adhäsivschichtentfernung, ohne daß ein zu hoher lateraler Strukturverlust auftritt. In Abb. 5.11 ist eine thermisch verschweißte PMMA-Mikrostruktur, die über

Reaktionsgas	Druck [Pa]	Abtrag pro Strukturkante [μm]	Tiefenabtrag [μm]
Sauerstoff	0,6	0	2,2
	1,3	0	3,8
	2,6	0	4,8
	5,2	0	9
	13	0,5	10
Prozeßzeit: 30 Minuten, Gasfluß: 40 sccm, Temperatur: 273 K, Leistung: 100 W			
Meßgenauigkeit des Strukturkantenabtrags: $\pm 0,2 \mu\text{m}$			
Meßgenauigkeit des Tiefenabtrags: $\pm 0,1 \mu\text{m}$			

Tabelle 5.6: Reaktives Ionen-Ätzen von PMMA mit Sauerstoff.

die mikrostrukturierte Seite mit der Adhäsivschicht verbunden ist, dargestellt. Diese Probe wurde partiell mit Silizium abgedeckt. Deutlich zu erkennen ist der geringe Angriff des Sauerstoffplasmas auf der Seitenwände.

5.4.2 Reaktives Ionen-Ätzen von POM bei Kapillarklebung

Die POM-Mikrostrukturen werden mit PMMA-Polymerisationskleber über die Trägerschicht mit dem Wafer verbunden (siehe Absatz 5.2). Im Strukturgrund der Galvanikstartschicht befinden sich nach der Verbindung der POM-Folie eine 5 μm dicke PMMA-Schicht und die POM-Trägerschicht. Aus der Literatur [63, 64] ist bekannt, daß POM wesentlich leichter mit reaktiven Ionen ätzbar ist als PMMA. Voruntersuchungen mit Sauerstoffplasma ergaben aufgrund der leichteren Spaltbarkeit dieses Polymers höhere laterale Strukturabträge. Da nach der Entfernung der POM-Trägerschicht die PMMA-Adhäsivschicht entfernt werden

⁸Fa. Fischer Elektronik, Lüdenscheid

⁹Plasmalab80 Plus, Fa.Oxford

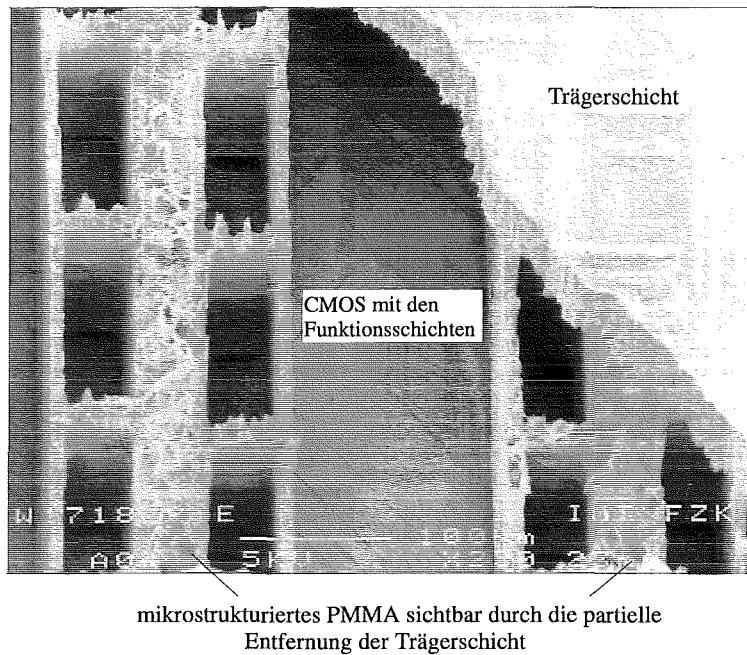


Abbildung 5.11: Thermisch verschweißte PMMA-Mikrostruktur auf CMOS mit partiell freigeätzter Trägerschicht.

muß, wurde für die Entfernung des POM mit maximalem Anisotropieverhältnis ein Versuchsprogramm notwendig. Der Kunststoffabtrag mit Ionenplasmen beruht auf chemischer und physikalischer oder rein physikalischer Wirkung. Der chemische Angriff durch reaktive Ionen und Radikale führt zur Oxidation. Hingegen tritt bei nicht reaktiv wirkenden Plasmen, wie Argon-Plasma, ein rein physikalischer Abtrag auf. Dabei bewirkt die kinetische Energie der Ionen ein Herausschlagen von Molekülteilen aus dem Polymeren. Somit dürfte es bei anisotroper Prozeßführung mit Argon-Plasma zu einem vorrangig physikalischen Abtrag im Strukturgrund und einem geringeren lateralen Strukturverlust an den Seitenwänden im Vergleich zum Sauerstoffplasma kommen. Während der Entfernung der POM-Trägerschicht darf es zu keiner so hohen thermischen Belastung des Polymerverbundes aus PMMA-POM kommen, daß sich die Mikrostrukturen verformen oder sich von der Adhäsivschicht lösen. Deshalb wurde die Plasmaleistung, ebenso wie beim Entfernen der Adhäsivschicht beim thermischen Verschweißen von PMMA, auf 100 W, die Substrattemperatur auf 273 K, der Gasfluß auf 40 sccm und die Prozeßzeit auf 30 Minuten begrenzt. Nur der Prozeßgasdruck wird für die Anisotropieuntersuchungen variiert (Tab. 5.7).

Die Untersuchungen bestätigen eindeutig die zusätzlich wirkende chemische Komponente des Sauerstoffplasmas auf den lateralen Strukturverlust wie auch auf den vertikalen Abtrag. Weiterhin kommt es bei Argon-Plasma zu keiner so starken Aufräuhung der Polymeroberfläche wie beim Sauerstoffplasma. Im Hinblick auf eine sichere Prozeßführung ist deshalb für die Entfernung der POM-Trägerschicht Argonplasma zu favorisieren. Die Entfernung der wenige Mikrometer dicken PMMA-Adhäsivschicht mit Argon-Plasma ist aufgrund der geringen Abtragsrate nicht möglich. PMMA muß beim Ätzvorgang oxidiert werden, aber die Polymerkette enthält nicht so viel Sauerstoff, um den Kunststoff vollständig verbrennen zu können. Deshalb muß Sauerstoffplasma eingesetzt werden. Ein weiteres Ausschlußkriterium ist die Ablagerung

Reaktionsgas	Druck [Pa]	Abtrag pro Strukturkante [μm]	Tiefenabtrag [μm]
Argon	0,6	0	10
	1,3	0,5	16
	2,8	0,5	14
	5,2	0,5	17
	13	1	17
Sauerstoff	0,6	0,5	14
	1,3	0,5	17,5
	2,6	1	20
	5,2	2	20
	13	2,5	20
Prozeßzeit: 30 Minuten, Gasfluß: 20 sccm, Temperatur: 273 K, Leistung: 100 W			
Meßgenauigkeit des Strukturkantenabtrags: $\pm 0,2 \mu\text{m}$			
Meßgenauigkeit des Tiefenabtrags: $\pm 0,1 \mu\text{m}$			

Tabelle 5.7: Reaktives Ionen-Ätzen von POM mit unterschiedlichen Prozeßgasen.

des Opferschichtmaterials Kupfer an den vertikalen Strukturbereichen durch die Sputterwirkung der Argon-Ionen. Dies behindert die galvanische Abscheidung in den komplementären abgeformten Strukturen. Dagegen sind für das Cracken der POM-Moleküle zu Formaldehyd Argon-Ionen mit hoher kinetischer Energie ausreichend.

Im Anschluß an den Galvanikprozeß wird der gebondete Kunststoff zwischen den metallischen Mikrostrukturen herausgelöst. Dieser Verfahrensschritt darf keine negativen Auswirkungen auf die Leiterbahn und Opferschicht haben. Der Kunststoff PMMA wird mit einem organischen Lösungsmittel entfernt, welches zu keinem Angriff der Metallschichten des Opferschichtprozesses führt. Das Entfernen von POM kann auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden, wie z.B. durch ionisierende Strahlung, reaktive Ionen oder Säuren. Eine Möglichkeit der naßchemischen Entfernung bietet Phosphorsäure. Dieses Medium ist für die Entfernung des POM unkritisch, da es das Leiterbahnmaterial nicht angreift und die anderen Funktionsschichten durch die PMMA-Adhäsivschicht passiviert sind (Absatz 5.2), die es nicht angreift.

5.5 Prozeßvarianten zur Verbindung der abgeformten Folien mit der Waferoberfläche

Der Einsatz von PMMA und POM zur Herstellung von mikrostrukturierten Folien führte, bedingt durch die jeweiligen Werkstoffeigenschaften, zu unterschiedlichen Bondtechniken. Somit stehen mehrere Verfahren zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturen auf vorstrukturierten Substraten zur Verfügung. Neben dem generellen Verfahrensvorteil der flexiblen Anordnung von Mikrostrukturen, unabhängig von der Geometrie des zu bestückenden Substrats, ergeben sich weitere Vorzüge in Abhängigkeit von der eingesetzten Bondmethode (Tab. 5.8). In dieser Arbeit wurden speziell die Kunststoffe PMMA und POM behandelt. Diese Polymere stehen stellvertretend für ihre Kunststoffart.

Prozeßvarianten zur Verbindung von abgeformten Folien mit der Waferoberfläche am Beispiel eines amorphen und teilkristallinen Kunststoffes			
Halbzeug	PMMA-Folie		POM-Folie
Abformung	Für geringe Entformkräfte und Folienverzüge muß das Abformsubstrat aus dem gleichen Material bestehen wie das Abformwerkzeug (z.B. Nickel) Modifizierung der Abformsubstratoberfläche (Ni) durch Beschichtung mit Titan und anschließender Oxidation zu TiO _x		
	<ul style="list-style-type: none"> - spannungsrißempfindlich durch geringe Werkstoffzähigkeit im Vergleich zu anderen Thermoplasten - gute Haftung auf metallischen Oberflächen - durch Zusatz von Trennmittel kann die Haftung des Polymers im Abformwerkzeug verringert werden - PMMA mit unterschiedlichen Trennmittelgehalten ist kommerziell nicht erhältlich 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Spannungsrißempfindlichkeit im Bezug zu PMMA - besseres Fließverhalten als bei PMMA - geringe Haftung an Metall 	
Positionierte Anordnung	Durch die Abstimmung von Magazin und Greifer kann die Folie nach der Abformung in das Magazin eingelegt, in ihm vereinzelt, transportiert und aus ihm die Bestückung vorgenommen werden, adhäsives Greifprinzip Ausrichtung der Greifer- zur Greifobjektfläche innerhalb der Meßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ und $\pm 0,1$ Grad		
Verbindung mit dem Wafer über	mikrostrukturierte Seite	Trägerschicht	Trägerschicht
Bondtechnik	thermisches Verschweißen	Kapillarkleben mit PMMA-Lösung	Kapillarkleben mit PMMA-Polymerkleber
	Flexible Anordnung der Strukturen auf unterschiedlichen Substratmaterialien, wie z.B. auf nicht planaren Oberflächen		
	<ul style="list-style-type: none"> - Abscheidung einer wenige μm dicken PMMA-Adhäsivschicht auf dem Wafer 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapillarklebung direkt auf der Waferoberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapillarklebung direkt auf der Waferoberfläche
Reaktives Ionen-Ätzen	Sauerstoffplasma		Sauerstoff- und Argonplasma
	<ul style="list-style-type: none"> - kein anisotropes O⁺-Plasma zur Entfernung der Trägerschicht notwendig - geringerer RIE-Abtrag an den Seitenwänden als beim Kapillarkleben 	<ul style="list-style-type: none"> - anisotropes O⁺-Plasma zur Entfernung der Trägerschicht notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - fünfmal höherer Abtrag als bei PMMA - Entfernung des POM mit Ar⁺-Plasma - Entfernung der PMMA-Adhäsivschicht mit O⁺-Plasma

Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Ergebnisse und Erläuterungen zu den Prozeßvarianten, die im Kapitel 1 (Abb. 1.1) vorgestellt wurden.

Kapitel 6

Integration von LIGA–Beschleunigungssensoren auf CMOS–Wafern

Die abgeformten komplementären Sensorstrukturen wurden mit dem Verfahren des thermischen Verschweißens mit ihrer mikrostrukturierten Oberfläche auf die Waferoberfläche gebondet. Die Bondfläche befindet sich separat von der CMOS–Auswerteschaltung auf unstrukturiertem Silizium. Diese Integrationsfläche besitzt vor dem Verschweißprozeß eine Oberflächenrauigkeit von $3\ \mu\text{m}$, die durch die Leiterbahn, Opferschicht und der PMMA–Adhäsivschicht hervorgerufen wird. Weiterhin wurden Sensorelemente direkt auf der CMOS–Schalten hergestellt. Dies führte zu einer Rauigkeitszunahme aufgrund der CMOS–Topographie von $3\ \mu\text{m}$ auf insgesamt $6\ \mu\text{m}$. Die Auswirkung dieser Unebenheiten auf den Verschweißprozeß muß untersucht werden, um eine noch höhere Integrationsdichte und damit eine bessere Ausnutzung der Waferfläche zu erreichen.

Die Funktionsfähigkeit der elektrischen Verbindung der Auswerteelektronik mit dem Sensorelement und das mechanische Verhalten des Sensors wurden mit einem Schwingtisch in Verbindung mit einer Auswertesoftware für die digitalen Signale des CMOS getestet.

6.1 Integration auf der unstrukturierten Waferoberfläche separat vom CMOS

Auf dem 4 Zoll Wafer wurden abgeformte Sensorstrukturen mit Höhen von 100, 150 und $200\ \mu\text{m}$ und einer minimalen PMMA–Stegbreite von $10\ \mu\text{m}$ positioniert zur Leiterbahn und der Opferschicht mit einer $3\ \mu\text{m}$ PMMA–Adhäsivschicht verschweißt. Die Anordnung der Strukturen erfolgte mit einem adhäsiver Greifer (siehe Kapitel 4). Nach der Positionierung der abgeformten Sensorstruktur auf dem vorstrukturierten Wafer wurde diese Struktur mit dem PMMA–Gießharz Plexit 60 vorfixiert. Das Verschweißen dieser Strukturen wurde mit einem Druck von $0,027\ \text{MPa}$ und einer Temperatur von $119\ ^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Heizrate betrug $3\ \text{K}/\text{min}$. und die Abkühlung auf Raumtemperatur vollzog sich mit $0,8\ \text{K}/\text{min}$, um die thermischen Spannungen in den Grenzschichten zwischen der Adhäsivschicht und der PMMA–Mikrostruktur und der Adhäsiv– und Opferschicht zu verringern. Nach zwei Stunden Verschweißzeit konnte eine für die Folgeprozesse des Reaktiven Ionen–Ätzens und der Galva-

nik ausreichende Festigkeit der Verschweißverbindung erreicht werden. Für ein vollständiges Verschweißen des abgeformten PMMA ist nach den theoretischen Betrachtungen eine Zeit von über 6 Stunden notwendig. Die Diffusion der kurz-kettigen Moleküle der beteiligte Polymere reicht für die Haftfestigkeit aus. Keine der verschweißten Proben wies eine Geometrie-Veränderung auf. Diese Untersuchungen bestätigten die ermittelten Verschweißparameter mit der Thermomechanischen Analyse (TMA) (siehe Kapitel 5). Durch das thermische Verschweißen mit der mikrostrukturierten Seite der abgeformten Strukturen sind die Strukturen nach der Verbindung mit dem Wafer durch die unstrukturierte Trägerschicht gedeckelt. Beim thermischen Verschweißen sind im Gegensatz zur positionierten Abformung die Mikrostrukturen nur einige Minuten zur Entfernung der wenige Mikrometer dicken Adhäsivschicht, dem Plasma, ausgesetzt. Aus diesem Grund muß kein so großer RIE-Strukturvorhalt der lateralen Abmessungen vorgesehen werden. Für den entwickelten Prozeß ist deshalb ein Abformwerkzeug mit Stegbreiten von $6\ \mu\text{m}$, statt den bisher $10\ \mu\text{m}$, erforderlich. In Abb. 6.1 ist der mit den galvanisierten Beschleunigungssensorelementen bestückter Wafer dargestellt. Abb. 6.2 zeigt ein mit

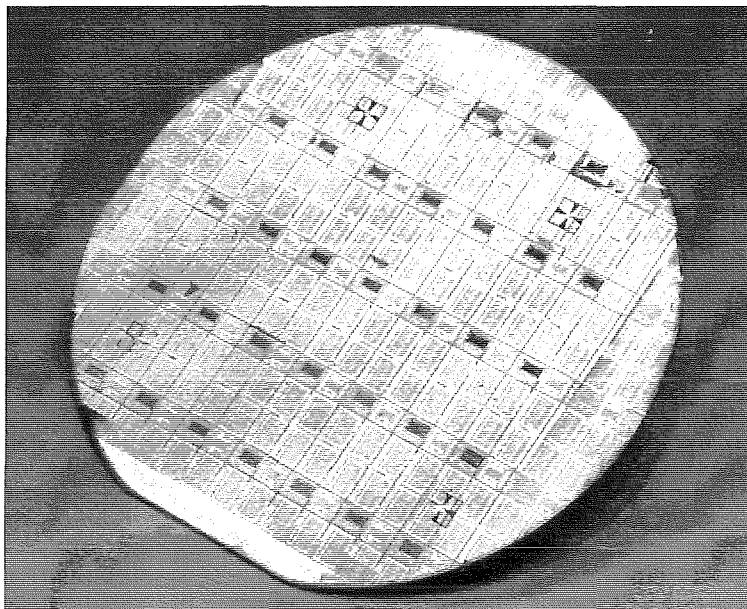


Abbildung 6.1: Mit LIGA-Beschleunigungssensoren bestückter CMOS-Wafer.

der Auswerteschaltung kontaktiertes Sensorelement. Die Sensorstruktur besitzt eine Nickelhöhe von $165\ \mu\text{m}$ und ist auf $\pm 5\ \mu\text{m}$ genau zur Leiterbahnebene positioniert. In den Wafer wurden zur Vereinzelung der Sensoren von der Rückseite mit einem YAG-Laser¹ Schnitte mit einer Tiefe von 80 % der Waferdicke eingebracht. Die Vereinzelung wurde durch das Anlegen einer Linienlast auf der vom Laser unstrukturierten Seite über der Strukturierung erreicht.

¹Festkörperlaser Fa. Haas mit CNC-Steuerung

Parameter: Leistung = 20 W, Pulsdauer = 10 ms, $\lambda = 1,06\ \mu\text{m}$

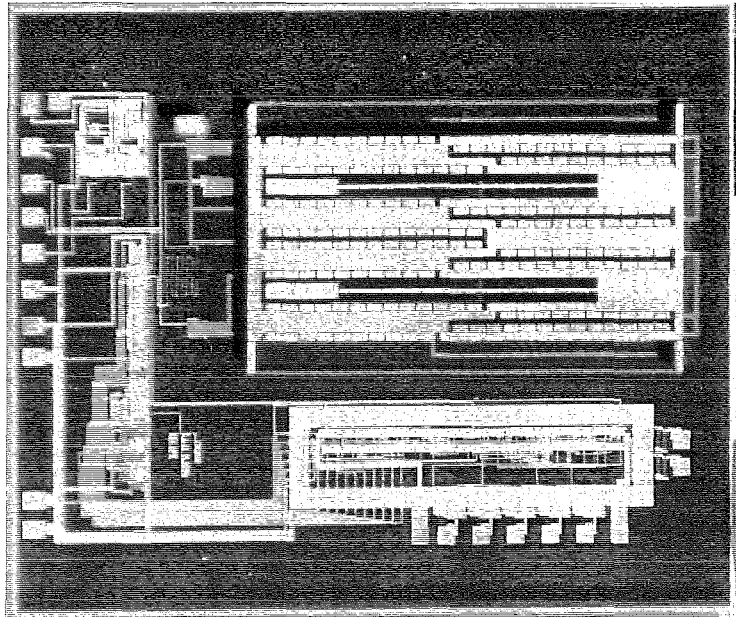


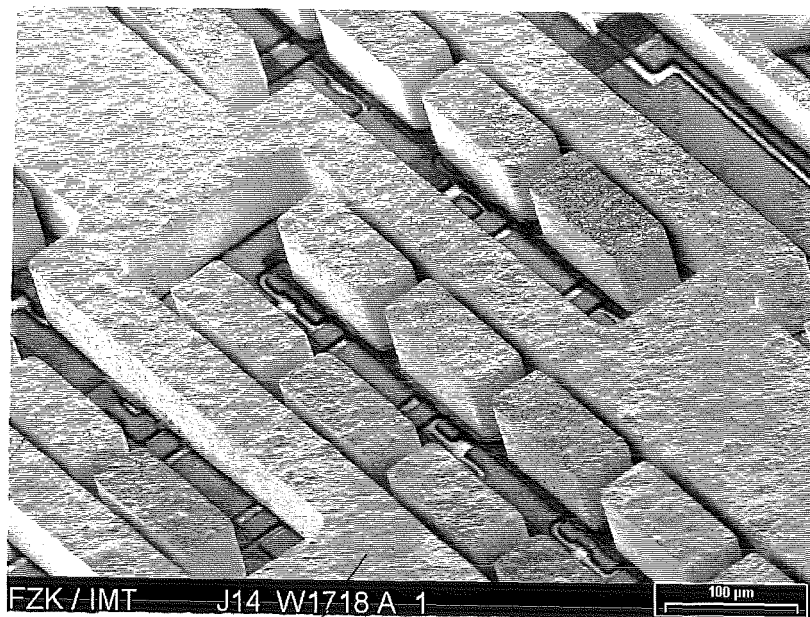
Abbildung 6.2: CMOS-Schaltung mit Beschleunigungssensor.

6.2 Integration direkt auf der strukturierten CMOS-Oberfläche

Die Herstellung von Sensoren direkt auf CMOS-Schaltungen wurden ebenfalls mit dem Prozeß des thermischen Verschweißens über die mikrostrukturierte Seite der abgeformten Folie durchgeführt. Trotz der weiteren Rauheitszunahme der Bondoberfläche durch die CMOS-Topographie, in Bezug zum Herstellungsprozeß separat vom CMOS, konnten die Strukturen vollständig mit der PMMA-Adhäsivschicht verschweißt werden. Dadurch, daß die Verschweißtemperatur 70 K über der Glastemperatur der Adhäsivschicht liegt, kommt es zur plastischen Verformung dieser Schicht während des Verschweißprozesses und somit zum vollständigen Kontakt zur mikrostrukturierten Seite der abgeformten Folie. In Abb. 6.3 sind Details eines Beschleunigungssensorelements auf einem CMOS dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Leiterbahnen, auf denen sich die Elektroden des Sensors befinden. Ebenfalls zeigen die Strukturwände nur einen geringen Oberflächenangriff durch das Reaktive Ionen-Ätzen.

6.3 Funktionsfähigkeit der CMOS-Auswerteschaltung in Verbindung mit dem Sensorelement

Der Beschleunigungssensor arbeitet auf der Grundlage der Kraftkompensation. Die durch die Einwirkung einer Beschleunigung auf die seismische Masse hervorgerufene Kraft wird durch die entgegengerichtete elektrostatische Kraft zwischen der seismischen Masse und den Elektroden des Sensors kompensiert. Diese Spannungsänderung dient als Meßsignal. Der hergestellte Sensor konnte bis zu einer Drehung von $\pm 25^\circ$ im Erdschwerefeld kraftkompensiert geregelt werden. Diese Auslenkung entspricht einer Beschleunigung von 0,42 g. Mit diesem maximalen



bewegliche seismische Masse

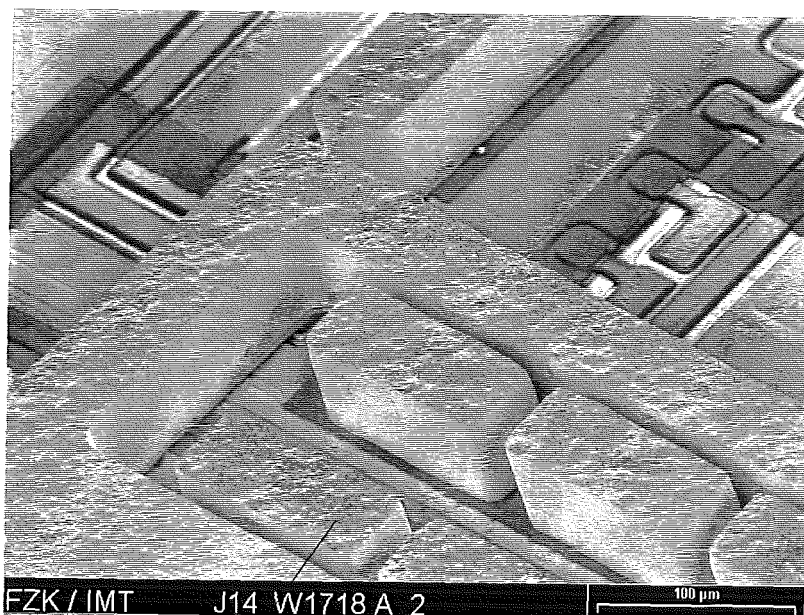
Sensorelektrode auf dem CMOS
mit der Leiterbahn

Abbildung 6.3: Details eines LIGA-Beschleunigungssensors direkt integriert auf einer CMOS-Schaltung.

Beschleunigungswert kann die maximale Amplitude des Schwingtisches zu $\pm 4,2$ mm bei einer Frequenz von 5 Hz berechnet werden. Der Schwingtisch wurde sinusförmig senkrecht zur Erdoberfläche angeregt. Dadurch ist die seismische Masse in Meßrichtung der Erdbeschleunigung ausgesetzt. Die digitalen Ausgangswerte der Sensorelektronik wurden über eine zusätzliche

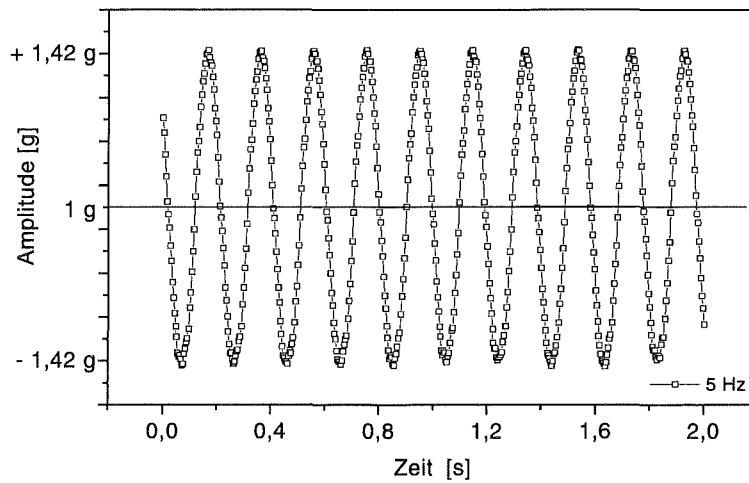


Abbildung 6.4: Messung der Beschleunigung auf einer sich alternierend im Erdschwerefeld bewegenden Ebene mit 5 Hz.

Elektronik [8] mit einer Frequenz von 244 Hz ausgegeben. In Abb. 6.4 ist das Ausgangssignal für eine harmonische Anregung des Beschleunigungssensors von 5 Hz dargestellt. Das harmonische Ausgangssignal zeigt die volle Funktionsfähigkeit der Auswertelektronik und die freie Beweglichkeit der seismischen Masse.

Mit dem entwickelten Prozeß ist es erstmals möglich, bewegliche und elektrisch zu einer elektronischen Schaltung kontaktierte LIGA-Mikrostrukturen herzustellen. Dies wird erreicht durch die elektrische und kapazitive Entkopplung der Mikrostruktur vom Schaltkreis mit einer CMOS-kompatiblen Passivierungsschicht. Der entscheidende Vorteil gegenüber den bisherigen Verfahren der Röntgentiefenlithographie und der positionierten Abformung besteht in der Anordnungsfreiheit der Strukturen auf vorstrukturierten Substraten.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit, ein Herstellungsverfahren zu entwickeln, mit dem bewegliche metallische Mikrostrukturen mit mikroelektronischen Schaltungen kombiniert werden können, wurde erreicht. Der neue Prozeß erforderte eine CMOS-kompatible Strukturierungsfolge zur Erzeugung von beweglichen und elektrisch kontaktierten Mikrostrukturen, die Weiterentwicklung des Warmumformprozesses und die Verbindung des mikrostrukturierten Kunststoffes mit der Schaltkreisoberfläche. Erstmals konnten unabhängig von der Größe der Röntgenmasken und der Abformwerkzeuge bewegliche LIGA-Mikrostrukturen elektrisch kontaktiert zur CMOS-Auswerteschaltung auf einem 4 Zoll Wafer appliziert werden. Dabei wurden folgende Verfahrensschritte entwickelt.

Das entwickelte Verfahren gliedert sich in die Abformung von freitragenden mikrostrukturierten Kunststoffolien und deren anschließende positionierte Verbindung mit dem Zielsubstrat mittels unterschiedlicher Bondtechnologien. Die technischen Möglichkeiten dieses Verfahrens wurden am Beispiel der komplexen Geometrie des LIGA-Beschleunigungssensors aufgezeigt. Der gesamte Prozeß von der Strukturierung der Funktionsschichten über die Herstellung der beweglichen Strukturen bis zur Vereinzelung des mit Sensoren bestückten Wafers führte zu keiner Einschränkung der CMOS-Elektronik. Als Anwendungsbeispiel wurde die mikrostrukturierte Seite einer 200 μm hohen abgeformten PMMA-Struktur des temperaturkompensierten Beschleunigungssensordesigns thermisch mit der Substratoberfläche verschweißt. Dabei konnte eine Positioniergenauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ erzielt werden. Nach den sich anschließenden Prozeßschritten des Reaktiven Ionen-Ätzens und der Galvanik der komplementären abgeformten Struktur konnte eine 165 μm hohe metallische Sensorstruktur, die elektrisch zum Auswerteschaltkreis kontaktiert ist, hergestellt werden. Die Funktionsfähigkeit der elektrischen Verbindung der Auswerteelektronik mit dem Sensorelement und das mechanische Verhalten des Sensors wurden mit einem Schwingtisch, der mit unterschiedlichen Frequenzen betrieben werden kann, getestet. Das harmonische Ausgangssignal der CMOS-Schaltung zeigte, daß die seismische Masse des Sensors frei beweglich und schwingungsfähig ist.

Die Voraussetzung für die Integration von Beschleunigungssensorstrukturen ist eine CMOS-kompatible Strukturierungsfolge der metallischen Funktionsschichten auf der Waferoberfläche. Diese Schichten sind für die elektrische Kontaktierung und die Beweglichkeit der seismischen Masse des Sensors erforderlich (Opferschichtprozeß). Die für die Direktabformung auf prozessierten Wafern entwickelte elektrische Kontaktierungsschicht Wolfram konnte durch ihre Kontaktierbarkeit mit den Aluminiumanschlußpads der Auswerteelektronik und der guten Haftung der Nickel-Strukturen als Leiterbahnmaterial eingesetzt werden. Kupfer ist das einzige Metall, das in dünnen Schichten auf die Waferoberfläche aufgebracht und selektiv zu

Aluminium, Wolfram, Nickel und Siliziumverbindungen strukturiert werden kann. Deshalb wurde Kupfer als Opferschichtmaterial eingesetzt. Die elektrische Isolierung der Leiterbahnebenen untereinander sowie zwischen der Leiterbahnebene und dem Schaltkreis ist durch eine zusätzliche, mit der CMOS-Technologie abscheidbare Siliziumoxidschicht möglich. Die Beschichtung und Strukturierung der Wolfram-Leiterbahn und Kupfer-Opferschicht kann ohne Passivierung der chemisch leicht angreifbaren Aluminiumanschlußpads der Auswerteschaltung erfolgen.

Das neu entwickelte Verfahren ist durch die Trennung des Abformprozesses vom Positionier- und Verbindungsprozeß von mikrostrukturierten Folien auf unterschiedlichen Materialien gekennzeichnet. Erstmals ist es möglich, das Abformsubstrat nur im Hinblick auf ein optimales Abformergebnis auszuwählen. Weiterhin konnte durch einen höheren Trennmittelzusatz im PMMA die Entformkraft reduziert werden. Dies ermöglichte die Abformung von freitragenden mikrostrukturierten Kunststoffolien mit Höhen von 200 μm und einer Wandstärke

von 4 μm . Dies entspricht einer Steigerung des bisher mit dem Verfahren der positionierten Abformung von temperaturkompensierten Beschleunigungssensoren erreichten Aspektverhältnisses von 15 auf 50. Durch die Trennung des Abform- vom Positionier- und Verbindungsprozeß können auch andere Kunststoffe als PMMA, die Vorteile aufgrund ihrer mechanischen und chemischen Eigenschaften haben, eingesetzt werden. Ausgehend von der Untersuchung der thermischen Eigenschaften von amorphen und teilkristallinen Kunststoffen wurde für beide Kunststoffarten ein Vertreter ausgewählt. PMMA als amorpher Kunststoff wird schon seit Beginn des Prägens von Mikrostrukturen erfolgreich eingesetzt. Dieser Kunststoff besitzt aber durch seine hohen Entformkräfte Nachteile bei der Herstellung von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis. Als Vertreter der teilkristallinen Kunststoffe wurde Polyoxymethylen (POM) gewählt, aufgrund seines in Verbindung zu anderen Materialien geringen Haftreibungskoeffizienten, der thermischen Verarbeitungseigenschaften und der leichteren Ätzbarkeit durch Plasmen in Bezug zu PMMA. Dieser Kunststoff konnte ebenfalls erfolgreich als Folie mit dem Prägeprozeß hergestellt werden. Allerdings muß noch die herstellungsbedingte geometrische Änderung der Folieverzüge analysiert werden, um auch größere Foliensegmente mit vorstrukturierten Oberflächen verbinden zu können. Die theoretischen Untersuchungen zu den Entformkräften, die durch die erfolgreiche Abformung von PMMA und POM bestätigt wurden, können auf alle thermoplastisch verformbaren Kunststoffe angewandt werden. Sie ermöglichen so neue mit dem Prägeprozeß vorteilhaft zu fertigende Anwendungen.

Die mikrostrukturierten Kunststoffolien müssen nach dem Abformprozeß einzeln und für den Bestückungsprozeß bereitgestellt werden. Für die Bestückung wurde ein Magazin in Kombination mit einem Greifer entwickelt. Durch die Abstimmung der Komponenten Magazin und Greifer im Montageprozeß sind keine aktiven Ausrichtungsmechanismen mit Bildverarbeitungseinheiten oder mechanischen Anschlagsystemen mehr nötig. Dies ermöglicht eine rein passive Montage. Das Magazin erlaubt es, die Folie nach der Abformung einzulegen, in ihm zu vereinzeln, zu transportieren, aufzubewahren und aus ihm die Bereitstellung am Handhabungsgerät und die Bestückung vorzunehmen. Die abgeformten Sensorelemente sind so gestaltet, daß die im Folienverbund vorhandene Ordnung nach dem Vereinzelungsprozeß der abgeformten Bauteile erhalten bleibt. Das Magazin kann an die Foliengeometrie angepaßt werden und unter Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien für Abformfolien einfach standardisiert und normiert werden. Handhabungsgeräte in der Halbleiterindustrie besitzen

standardmäßig Genauigkeiten im Mikrometerbereich, die für viele mikrotechnische Anwendungen ausreichend sind und sich deshalb für die passive Montage eignen. Um diese Geräte für die passive Montage zu nutzen, war es erforderlich, eine Greifertechnik mit vergleichbarer Genauigkeit zu entwickeln. Dazu wurde ein adhäsiver Greifer mit einer hohen Präzision in der Ausrichtung des zu greifenden Bauteils an der Greiferfläche entwickelt. Durch die gezielte Festlegung der Greifergeometrie und der Flüssigkeitsmengen des verwendeten Adhäsivs wurde eine laterale Positionierung und winkelgetreue Orientierung der Bauteile am Greifer mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 0,1$ Grad erreicht.

Die Verbindung der freitragenden Kunststoffolien mit dem vorstrukturierten Wafer kann durch unterschiedliche Bondtechnologien erfolgen. Mit diesem Prozeß ist es möglich, unabhängig von der Größe des Abformwerkzeugs und der Prägebedingungen Mikrostrukturen anzuordnen. Welcher Bondprozeß zum Einsatz kommt, hängt vom Substrat und Material der mikrostrukturierten Folie ab. Der realisierte Sensor wurde durch thermisches Verschweißen der mikrostrukturierten Seite einer PMMA-Folie mit dem Wafer hergestellt. Dieser Prozeß führt zu einer erheblichen Vereinfachung des Prozeßschrittes des RIE. Die abformbedingte Trägerschicht, die die Strukturen im Strukturgrund verbindet und nach dem Verschweißprozeß deckelt, benötigt zu ihrer Entfernung und zur Freilegung der Galvanikstartschichten keinen anisotropen Ätzprozeß. Die Verschweißbedingungen, Temperatur und Druck, wurden von PMMA, dem bis zu 10 % Trennmittel zugesetzt war, untersucht. Mit zunehmendem Verschweißdruck und Trennmittelgehalt verringert sich die maximal zulässige Verschweißtemperatur, um die Strukturen vollständig und ohne Strukturverzüge zu verschweißen. Zum Verschweißen der abgeformten Beschleunigungssensorstruktur wurde der Druck in der Grenzschicht der zu verbindenden Flächen gesteigert, wobei die maximale Verschweißtemperatur sank. Die Verschweißtemperaturen lagen 20 bis 26 K über der Glastemperatur des abgeformten Kunststoffes und ermöglichen so eine ausreichende Beweglichkeit der Moleküle für das Verschweißen. Es konnte kein Einfluß der Mikrostrukturhöhe auf die maximal mögliche Verschweißtemperatur festgestellt werden. Im Experiment reichten zum Verschweißen der 200 μm hohen Sensorstrukturen auf der Opferschicht des CMOS-Wafers ein Druck von 0,03 MPa und eine Temperatur von 119 °C, die 26 K über der Glastemperatur lag, aus. Den maximalen Verschweißtemperaturen können Viskositätswerte zugeordnet werden. Mit dem Viskositätswert als Maß für die Festigkeit ist es möglich, für unterschiedliche Kunststoffe die maximal zulässigen Verschweißtemperaturen zu ermitteln. Weiterhin wurden POM-Folien mit einem CMOS-Wafer mittels Kapillarklebung verbunden. Zuvor wurde eine Aktivierung der POM-Oberfläche durch Anätzen mit RIE vorgenommen. Verwendet wurde ein PMMA-Polymerisationskleber. Untersuchungen zum RIE-Verhalten von POM zeigten, daß aufgrund der chemischen Struktur des Polymers, ein nichtreaktiver Argon-Plasmaprozeß hohe Anisotropien des Tiefen- zum Seitenwandabtrag ermöglicht. Nur die wenige Mikrometer dicke PMMA-Adhäsivschicht muß mit Sauerstoffplasma entfernt werden.

Mit dieser Arbeit ist die Grundlage zur Integration von beweglichen LIGA-Mikrostrukturen mit Siliziummikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern zu komplexen Mikrosystemen geschaffen. Die entwickelte Technologie ist übertragbar auf alle abgeformten Mikrostrukturen und ermöglicht die positionierte Verbindung dieser Strukturen mit den unterschiedlichsten Materialoberflächen im Mikrometerbereich. Weiterhin können durch die Trennung von Abformung und Positionierung erstmals auch nichtplanare Oberflächen mit LIGA-Mikrostrukturen bestückt werden.

Für die weitere Entwicklung von elektrisch mit elektronischen Schaltungen kontaktierten LIGA-Strukturen ist zu prüfen, ob die Strukturierung der Leiterbahnebene in CMOS-Technologie erfolgen kann, so daß in Zukunft nur noch die Opferschicht nachträglich strukturiert werden muß. Da die Integrationsdichte der Elektronik auf den Siliziumwafern immer höher wird, aber die LIGA-Strukturen prozeß- und funktionsbedingt in ihrer lateralen Ausdehnung nicht kleiner werden, wäre es von Vorteil, LIGA-Mikrostrukturen direkt auf elektronischen Schaltungen integrieren zu können. Eine weitere Möglichkeit der Verbindung von Sensoren mit mikroelektronischen Schaltungen bietet die Herstellung der Sensoren auf Siliziumsubstraten und ihre anschließende elektrische und mechanische Verbindung mit dem Schaltkreis mit der Flip-Chip-Technik. Dadurch, daß die einzelnen Komponenten separat geprüft und sortiert werden können, kann eine höhere Ausbeute an integrierten Systemen erreicht werden.

Die entwickelte Prozeßtechnik zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffolien mit dünnen Trägerschichten ermöglicht weitergehende Anwendungen als die in dieser Arbeit geschilderten. Für viele Anwendungen werden vereinzelte Mikrostrukturen benötigt, wie z.B. mechanische Komponenten für Getriebe. Dies kann mit einem Prägeprozeß in einen Kunststoffverbund erreicht werden, der aus zwei chemisch nicht mischbaren Kunststoffen besteht. Während des Umformprozesses wird die vom Abforms substrat aus gesehene obere Kunststoffschicht vollständig und die untere nur zum Teil mikrostrukturiert. Die untere Kunststoffschicht besitzt beim Umformvorgang noch eine so hohe mechanische Festigkeit, daß das Abformwerkzeug nur wenige Mikrometer in dieses Material eindringt. Deshalb wird der vollständig strukturierte Kunststoff in der Grenzschicht zum unteren durch das Abformwerkzeug abgeschert. Nach dem Entformprozeß können die Kunststoffe, dadurch daß sie nicht chemisch mischbar sind, physikalisch voneinander getrennt werden. Dieser Vorgang wurde mit einer 500 μm hohen gestuften Struktur aus POM, die auf einer Kunststoffschicht aus Zelluloseacetat geprägt wurde, nachgewiesen (siehe Anhang).

Literaturverzeichnis

- [1] K. Najafi: *Silicon Micromachining Technologies: Future Needs and Challenges*. SPIE Vol. 2879 (1996), pp. 206–215.
- [2] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner und D. Münchmeyer: *Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming and plastic molding (LIGA process)*. *Microelectron. Eng.*, Vol. 4 (1986), p.35.
- [3] A. Both, W. Bacher und R. Ruprecht: *Quasimonolithic Integration of LIGA-Microstructures and Microelectronic Circuits*.ACHEMA, Frankfurt am Main, 1993.
- [4] M. Strohrmann, F. Eberle, O. Fromhein, W. Keller, O. Krömer, T. Kühner, K. Lindemann, J. Mohr und J. Schulz: *Smart acceleration sensor based on LIGA micromechanics*. *Microsystem Technologies* 94, Berlin (1994), pp. 969–977.
- [5] J. Mohr, C. Burbaum, P. Bley, W. Menz und U. Wallrabe: *Movable Microstructures Manufactured by the LIGA-Process as Basic Elements for Microsystems*. Proc. MST'90, Berlin (1990), pp. 529–537.
- [6] K.-D. Müller et al.: *Verfahren zur Herstellung einer strukturierten Beschichtung*. Patent Nr. DE 19701568.
- [7] K.-D. Müller, W. Bacher und M. Hecke: *Flexible Integration of Nonsilicon Microstructures on Electronic Circuits*. Proc. MEMS, Heidelberg (1998), pp. 263–267.
- [8] S. Wüstling: *Hochintegriertes triaxiales Beschleunigungssensorsystem*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997.
- [9] A. Both, W. Bacher, M. Hecke, K.-D. Müller und R. Ruprecht: *Molding process with high alignment precision for the LIGA-technology*. Proc. MEMS, Amsterdam (1995), pp. 186–190.
- [10] R. L. Geiger, P. E. Allen und N. R. Stader: *Design Technologies for Analog and Digital Circuits*. Mc Graw-Hill Publishing Company, Electronic Engineering Series, 1990.
- [11] S. R. Wilson, C.J. Tracy und J. L. Freeman: *Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits*. Noyes Publications, 1994.
- [12] R. F. Bunshah: *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*. Noyes Publications, 1994.

- [13] D. Gupta und P. S. Ho: *Diffusion Phenomena in Thin Films and Microelectronic Materials*. Noyes Publications, 1990.
- [14] K. Kadel, W.K. Schomburg und G. Stern: *X-Ray Masks With Tungsten Absorbers For Use In The LIGA-Process*. *Microelectronic Engineering* 21 (1993), pp. 123 - 126.
- [15] S. Wernick: *Die Oberflächenbehandlung von Aluminium*. 2. Aufl. Leuze, Saulgau/Württ., 1977.
- [16] Aluminium-Verlag Düsseldorf: *Das chemische Verhalten von Aluminium*. 1955.
- [17] A. El-Kholi, J. Mohr und S. Stransky: *Ultrasonic supported development of irradiated microstructures*. *Microelectronic Engineering* 23 (1994), pp. 219-222.
- [18] S. Wüstling, O. Fromhein, H. Gemmeke, M. Tschuch und O. Wollersheim: *Planar-assembly triaxial microaccelerometer with electromechanical sigma-delta ADCs*. *Sensors and Actuators A* 61 (1997), pp. 436-440.
- [19] O. Wollersheim. interner Bericht des IMT, Forschungszentrum Karlsruhe, 1997.
- [20] W. Bacher, M. Hecke und J. Mohr: *Industrielle Fertigung von Mikrokomponenten und -systemen: Aufstieg in die erste LIGA*. *SMM Schweizer Maschinenmarkt* 12 (1997), pp. 24 - 29.
- [21] Firma Hoechst: *Datenblatt Hostaform, Acetalcopolymerisat (POM)*. Hoechst AG, Frankfurt am Main, 1995.
- [22] W. Beitz und K.-H. Grote (Hrsg.): *Dubbel - Taschenbuch für Maschinenbau*. 19. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York; Springer-Verlag, 1997.
- [23] M. Finger: *Statistische Untersuchungen der Steuergrößen des LIGA- Abformprozesses und deren Einfluß auf die Qualität von PMMA-Mikrostrukturen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994.
- [24] A. Michel, R. Ruprecht und W. Bacher M. Harmening: *Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993.
- [25] H. Kalb: *Grundlegende Untersuchungen zur Fertigung gestufter Mikrostrukturen aus fluorierten Polymeren*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994.
- [26] G. Menges: *Werkstoffkunde der Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München, 1984.
- [27] DIN: *Differenzthermoanalyse DTA*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.
- [28] G. Reinhardt: *Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffolien und deren Verbindung mit dem Zielsubstrat*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1997.
- [29] E. Jehle: *Untersuchung thermisch bedingter Lageabweichungen beim Abformen von Mikrostrukturen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994.
- [30] M. Heidinger: *Herstellungseinflüsse auf globale und lokale Maßhaltigkeiten von Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994.

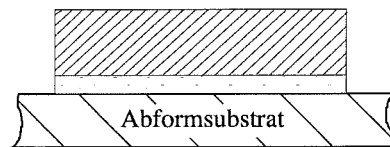
- [31] K.-D. Müller, K. Pollak, W. Bacher, M. Heckeke und U. Gengenbach: *Holistic Concept of Sensitive Gripping and Magazining of Microcomponents*. Proc. Microsystem Technologies, Potsdam (1998), pp. 243–248.
- [32] J. Hesselbach und R. Pitschellis: *Greifer für die Mikromontage*. wt-Produktion und Management (85)Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995.
- [33] G. Thornell, M. Bexell, J.-Å. Schweitz und S. Johansson: *Design and fabrication of a gripping tool for manipulation*. Sensors and Actuators A 53 (1996), pp. 428–433.
- [34] G. Greitmann und R. A. Buser: *Tactile microgripper for automated handling of micro-parts*. Sensors and Actuators A 53 (1996), pp. 410–415.
- [35] B. Pontani und M. Pontani: *Automatische Mikromontage ist machbar*. F & E (105) 6, Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [36] U. Gengenbach, F. Engelhardt, P. Ruther und R. Scharnowell: *Montagesystem für die Duplexermontage*. Proc. Micro Engineering, Stuttgart (1997), 1997.
- [37] Firmenschrift: *Chip Handling Products, Fluoroware*. Metron Technologie GmbH, Ascheim, 1996.
- [38] K. Schade: *Mikroelektroniktechnologie*. Verlag Technik, Berlin-München, 1991.
- [39] K. Pollak: *Konzeption und Entwicklung eines Verfahrens zur positionierten Anordnung von Kunststoffmikrostrukturen auf strukturierten Substraten*. Diplomarbeit an FH Furtwangen und Universität Karlsruhe am Institut für Mikrostrukturtechnik, 1997.
- [40] H.-J. Hacke: *Montage integrierter Schaltungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- [41] C. Bark, T. Binnenböse, G. Vögele, T. Weisener und M. Widmann: *Gripping with Low Viscosity Fluids*. Proc. MEMS, Heidelberg (1998), pp. 301–305.
- [42] H. Schubert: *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- [43] C. Bischof und W. Possart: *Adhäsion*. Akademie Verlag Berlin, 1983.
- [44] W. Menz und J. Mohr: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. 2. erw. Aufl. VCH Weinheim, 1997.
- [45] D. Maas, B. Büstgens, J. Fahrenberg, W. Keller und D. Seidel: *Application of adhesive bonding for integration of microfluidic components*. Proc. Actuator, Bremen (1994), pp. 149–152.
- [46] K. Jud, H.H. Kausch und J.G. Williams: *Fracture mechanics studies of crack healing and welding of polymers*. Journal of Materials Science 16 (1981), pp. 204–210.
- [47] R.P. Wool: *Polymer Interfaces: Structure and Strength*. Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [48] E. Mori, S. Kanehr und Y. Okawa: *Ultrasonic welding of plastics*. Proc. Ultrasonics International, 1993.

- [49] E. Pietsch (Hrsg.): *Gmelin-Handbuch der anorganischen Chemie Kupfer*. Teil A-D, 8. Aufl. Verlag-Chemie, Weinheim/Bergstraße, 1955.
- [50] K.-D. Müller und R. Schwarz. interner Bericht des IMT, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [51] J. Mohr, W. Ehrfeld und D. Münchmeyer: *Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1988.
- [52] H.-H. Kausch: *Polymer Fracture*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987.
- [53] M. Saumer, K. Feit, O. Rötting und W. Bacher: *Charakterisierung von Kunststoffen für die Mikrosystemtechnik*. FZKA Nachrichten Heft 4, 199-206, 1998.
- [54] A. Landrock: *Adhesives Technology Handbook*. Noyes Publications, 1985.
- [55] C.-M. Chan: *Polymer Modification and Characterization*. Carl Hanser Verlag, München, 1994.
- [56] G. Habenicht: *Kleben: Grundlagen, Technologie und Anwendungen*. 2. Aufl., Springer Verlag, München, 1990.
- [57] H. Vollmer und H. Hein: *Untersuchungen zur Herstellung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit extremer Strukturhöhe durch Abformung mit Kunststoff im Vakuum-Reaktionsgießverfahren*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1987.
- [58] B. Menz, A. El-Kholi und J. Mohr: *Untersuchungen zum Kleben von PMMA auf titanbeschichtete Substrate*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1993.
- [59] G. Mohn: *Haftungsuntersuchungen an Mikrostrukturen auf unterschiedlichen Metallschichten unter variierendem Haftvermittlergehalt*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1995.
- [60] DIN 53765: *Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren; Thermische Analyse, Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK)*. Beuth, Berlin, 1994.
- [61] L. Dorn et al.: *Kleben von Kunststoffen nach Vorbehandlung im Niederdruckplasma*. Kunststoffe 73, 1983.
- [62] Firma Röhm: *Produktinformation Plexit M60*. Röhm GmbH, Darmstadt, 1988.
- [63] J. Bartha, T. Bayer und J. Wittlinger: *Verfahren zur Herstellung beliebig geformter mikromechanischer Bauteile aus planparallelen Platten aus Polymermaterial oder beliebig geformter Durchführungsöffnungen in denselben*. Europäische Patentschrift Nr. EP 0 283 546 B1, 1993.
- [64] H. Gokan, S. Esho und Y. Ohnishi: *Dry Etch Resistance of Organic Materials*. 3. Electrochem. Soc. Solid-State Science and Technology (1993), pp. 143-146.
- [65] K.-D. Müller et al.: *Vorrichtung zur Erzeugung von Mikrostrukturen aus mehrlagigen Kunststoffschichten*. Patent Nr. DE 19652966.

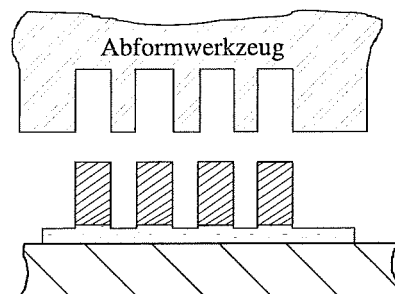
Anhang

Warmumformung von Verbundfolien

Beschichtung des Abformsubstrats mit der Kunststoffverbundschicht



Warmumformung des Folienverbunds, so daß der obere Kunststoff vollständig und der untere nur zum Teil strukturiert wird



Der vollständig strukturierte Kunststoff kann mechanisch von der unteren Schicht getrennt werden

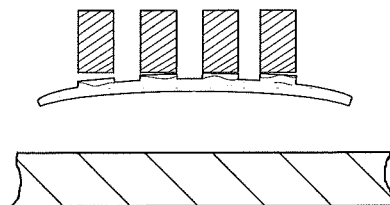


Abbildung 1: Prozessschema zur Herstellung von vereinzelt Mikrostrukturen [65].

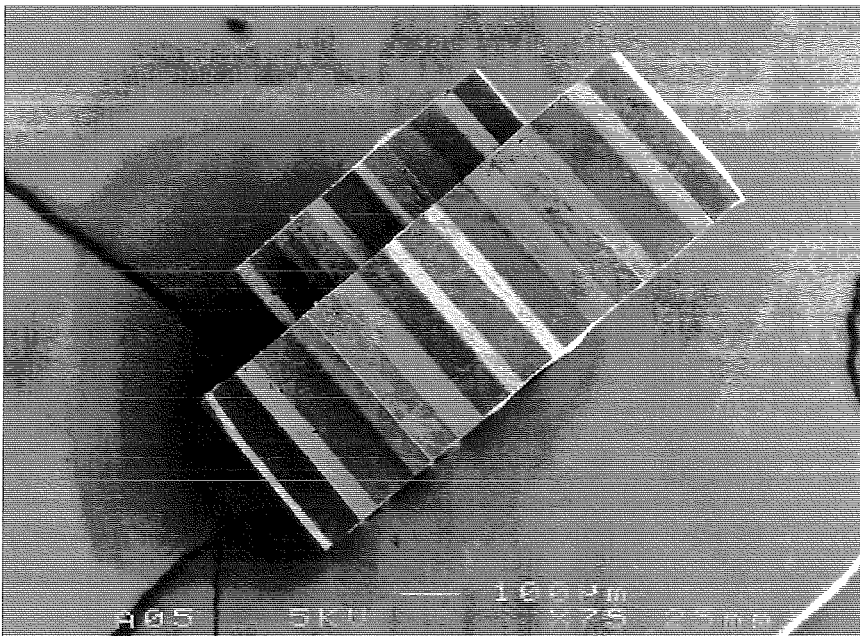
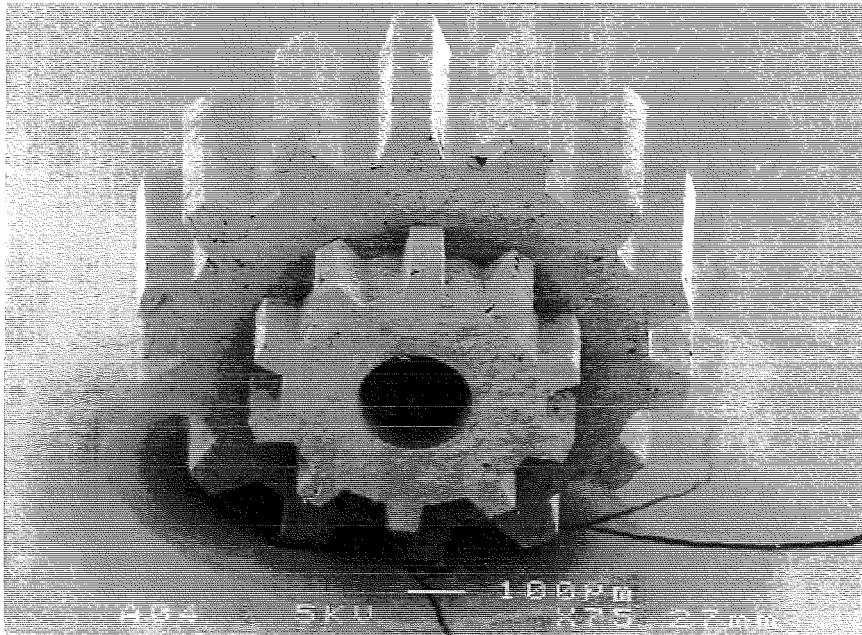


Abbildung 2: POM-Zahnradstrukturen mit einer Gesamthöhe von 500 μm abgeformt und anschließend physikalisch abgelöst von einer Zelluloseacetatschicht.

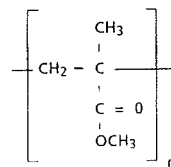
Materialdaten für die Simulation des Substratmaterialeinflusses auf die Sensorfunktion

	Elastizitätsmodul [kN/mm ²]	th. Ausdehnungskoeffizient [$\mu\text{m}/\text{mK}$]
Keramik (Aluminiumoxid)	37	$8,1 \cdot 10^{-6}$
Silizium	190	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Siliziumoxid (Quarz Einkristall)	75	$0,6 \cdot 10^{-6}$

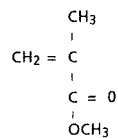
Tabelle 1: Werkstoffkennwerte, der für die Untersuchungen des Substrateinflusses auf die Sensorfunktion eingesetzten Materialien.

Strukturformeln der im Experiment eingesetzten Kunststoffe

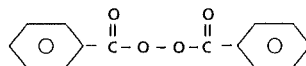
Polymethylmethacrylat (PMMA)



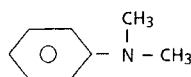
Methylmethacrylat (MMA)



Dibenzoylperoxid (BPO)



Dimethylanilin (DMA)



Hydroxyethylmethacrylat (HEMA)

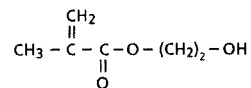


Abbildung 3: Gießharzbestandteile des Polymethylmethacrylats.



Abbildung 4: Polyoxymethylen (POM).

Haltekraftberechnung am adhäsiven Greifer

Gegeben ist ein PMMA-Bauteil mit der Abmessung von $3,03 \text{ mm}^2$ (Strukturen) mit einer Dicke von $150 \text{ }\mu\text{m}$ und ein Trägerschichtvolumen von $3,2 \cdot 2,04 \cdot 0,05 \text{ mm}^3$. Daraus ergibt sich eine Gewichtskraft von $F_G = 93 \text{ }\mu\text{N}$ mit $\rho_{PMMA} = 1,2 \text{ g/mm}^3$, das mit einem adhäsiven Greifer gegriffen werden soll. Der Greifabstand soll $a = 80 \text{ }\mu\text{m}$ betragen. Als Adhäsiv wird Wasser verwendet. Der Randwinkel für die Benetzung der Greifer- und Griffflächen durch das Adhäsiv wird mit $75 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben. Zu berechnen ist die maximale Haltekraft. Das Flüssigkeitsvolumen berechnet sich mit:

$$V_L = 3,2 \cdot 2,04 \cdot 0,08 \text{ mm}^3 = 0,52 \text{ mm}^3 \text{ hiermit berechnet sich:}$$

$$\frac{V_L}{\pi a^3} = 323$$

aus Diagramm (Abb. 4) :

$$\frac{F}{\gamma a} \approx 700$$

Haltekraft: $F_H \approx 700 \cdot 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \text{ m} \approx 4 \text{ mN}$

Die Haltekraften liegen ungefähr um den Faktor 40 höher als die Gewichtskraft des zu greifenden Teils. Die Haltekraften steigen mit abnehmenden Greifabstand noch entscheidend an.

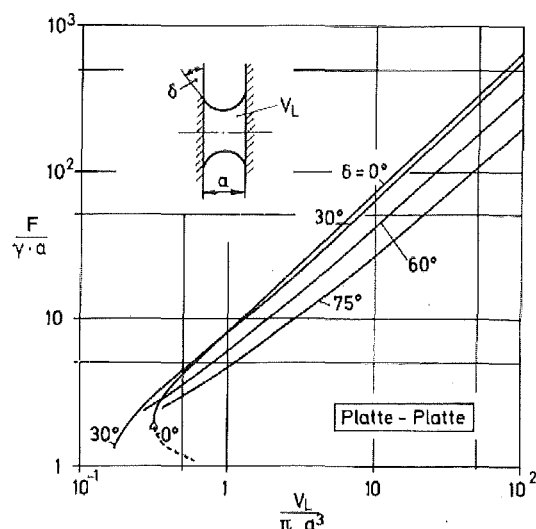


Abbildung 4: Diagramm zur Berechnung der Haltekraft rotationssymmetrischer Flächen nach Schubert [42].