

Mikrofluidische Dünnschicht-Drucksensoren mit Kunststoffgehäuse und Kreisplatten aus Glas oder Nickel

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Johannes Evers
aus Meschede im Sauerland

Tag der mündlichen Prüfung: 27. 10. 2006

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. V. Saile
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. W. K. Schomburg

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden neuartige Dünnschicht-Drucksensoren mit Kreisplatten aus Glas oder Nickel als Verformungselementen zur Druckmessung von Flüssigkeiten oder Gasen vorgestellt. Die Kreisplatte ist an einer 2 µm dünnen, schlaffen Trägermembran aus Polyimid (PI) gleichsam frei beweglich in einer Sensorkammer aufgehängt. Die Sensorkammer wird von zwei Gehäuseplatten aus Kunststoff gebildet, die aufeinander geklebt sind und zwischen denen die Trägermembran eingeklebt ist. Bei Druckbeaufschlagung setzt die Kreisplatte des Drucksensors mit ihrem Rand in der kugelschalenförmigen Sensorkammer auf und verformt sich elastisch. Durch die Verformung entstehen Dehnungen auf der Kreisplattenoberfläche, welche mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS), die in Dünnschichttechnik auf der Kreisplatte hergestellt wurden, in ein Spannungssignal gewandelt werden. Da der Sensor aus chemisch beständigen Werkstoffen aufgebaut wird, ist er besonders für Druckmessungen in mikrofluidischen Systemen mit aggressiven Flüssigkeiten geeignet. Der Druckbereich der Differenzdrucksensoren beträgt -1 bis 2 bar.

Hergestellt wurden die Drucksensoren nach einem Verfahren, mit dem membranbasierte, mikrofluidische Komponenten aus Kunststoff preiswert gefertigt werden können [Scho97]. Hierbei wird eine wenige Mikrometer dicke Membran aus Kunststoff oder Metall von einem Siliziumwafer abgelöst und zwischen zwei durch Abformung mittels Heißprägen hergestellte, plattenförmige Gehäusehälften aus Kunststoff geklebt. Die Membran wird durch Aufschleudern oder einem PVD-Verfahren auf einem Siliziumwafer hergestellt und kann selbst mikrostrukturiert sein oder mit Mikrostrukturen besetzt werden. Eine dünne Goldschicht auf dem oxidierten Siliziumwafer dient im Falle der Kunststoffmembran als Trennschicht, mit deren Hilfe sich die Membran vom Siliziumwafer ablösen lässt. Die Gehäusehälften enthalten Kanäle und Kammern, welche für fluidische, sensorische oder aktorische Funktionen der membranbasierten Mikrofluidkomponenten benötigt werden.

Die Herstellung des Drucksensors mit Glas-Kreisplatte, im Folgenden kurz ‚Glasdrucksensor‘ genannt, weicht von dem oben beschriebenen Herstellungsverfahren insofern ab, als die Membran nicht auf einem Siliziumwafer als Substrat prozessiert worden ist, sondern auf einem 50 µm starken, so genannten Dünnglas. Die Konzeption des Glasdrucksensors, die Fertigung von ersten Mustern und die Aufnahme erster Kennlinien wurde in einer vorangegangenen Arbeit vorgenommen [Wulf01]. Der Sensor wurde mit Gehäuseplatten aus Polysulfon (PSU) aufgebaut. Eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit bestand darin, die Ausbringung von beidseitig lithografisch prozessierten Dünnglassubstraten zu erhöhen. Hierzu war es notwendig, verschiedene Halter für die Handhabung des in der Reinraumfertigung wenig gebräuchlichen Substrats, z. B. für das Aufschleudern und Entwickeln von Fotolacken, zu entwickeln. Auch zur Kontaktbelichtung von mit Fotolack beschichteten Dünnglassubstraten war die Entwicklung einer speziellen Vorrichtung erforderlich. DMS wurden in [Wulf01] durch nasschemisches Ätzen hergestellt und wiesen stark streuende Widerstandswerte auf. In dieser Arbeit wurde daher die Herstellung von DMS auf das Abhebeverfahren (Lift-off) umgestellt. Hierzu wurden Versuche mit zwei verschiedenen Abhebelacken durchgeführt. Um Forderungen nach hoher chemischer Beständigkeit des Drucksensors zu erfüllen, wurde in der vorliegenden Arbeit der Gehäusewerkstoff PSU ersetzt durch den chemisch sehr beständigen Werkstoff Polyetheretherketon (PEEK). Zu den Forderungen nach chemischer Beständigkeit gehört ferner, dass Flüssigkeiten in der Sensorkammer nicht in Berührung mit dem Klebstoff zwischen den Gehäuseplatten gelangen dürfen. Daher wurden umfangreiche Versuche unternommen, die Sensorkammer durch Widerstandsheizungen von Leiterbahnen, die als Heizelemente dienten, zu umschweißen und auf diese Weise zum Klebstoff hin abzudichten.

Weiterhin wurde in dieser Arbeit eine neue Drucksensor-Variante mit einer galvanisch hergestellten Nickel-Kreisplatte, im Folgenden kurz ‚Nickeldrucksensor‘, entwickelt. Der Nickeldrucksensor lässt sich wesentlich einfacher als der Glasdrucksensor auf einem Siliziumwafer herstellen. Kennlinien von Glas- und Nickeldrucksensoren werden vorgestellt und diskutiert.

Thin-film pressure sensors with plastic housing and disks out of glass or nickel

Abstract

In this work a novel thin-film pressure sensor with disks out of glass and nickel as deformation elements are introduced. The pressure sensor is suitable for measuring pressures in liquids or gases. The disk is hung quasi free movable on a 2 μm thin, limp polyimide membrane in the sensor chamber. The sensor chamber is formed by two housing plates of plastic with the membrane glued in between. Under impact of pressure the disk of the pressure sensor touches one half shell of the sensor chamber only alongside its circular edge and bends elastically. Through the deformation tensions and strains develop on the surface of the disk and are detected by strain gauges which are fabricated in thin-film technique on the disk surface and converted into a voltage signal. Because the sensor is built of highly chemical resistant materials, it is suitable for aggressive liquids in micro-fluidic systems. Pressure from -1 to 2 bar can be measured.

The pressure sensor is produced according to a procedure which allows the fabrication of cheap, membrane based, micro-fluidic components of plastics. Therefore a few micrometer thin membrane of plastic or metal is removed from a silicon wafer and glued between two hot embossed, plate-shaped housing halves. The membrane is produced by spinning or PVD (physical vapour deposition) on a silicon wafer and can itself be micro-structured or carry microstructures. A thin gold layer on the oxidised silicon wafer serves in case of a polymer membrane as a separating layer, by means of which the membrane can be removed from the wafer. The housing halves contain canals and chambers, which are needed for fluidic, sensory or actuator functions of the membrane based micro-fluidic components.

The production concept of pressure sensors with glass-disks, in the following shortly named glass-sensors, differs from the above described production process in the way that the membrane is not fabricated on a silicon wafer but on a 50 μm thin glass pane as substrate. In a foregoing work the glass pressure sensor has been conceived, examples have been produced and first characteristic curves were taken. The glass-sensors were built with housing halves of polysulphone (PSU). One of the main tasks of this presented work was to improve the output of pressure sensors considerably. Therefore it was necessary to develop special carriers for the handling during clean room production steps, e.g. like spin coating, of the very thin glass substrates which are seldom used in clean room productions. Even before the contact exposure of photo resists on thin glass substrates the development of a special apparatus was inevitable. Strain gauges up to now had been produced by wet chemical etching and showed high differing resistance values. This work describes the introduction of the lift-off method for the production of strain gauges to get reproducible results. To meet the demand for high chemical resistance of the pressure sensor the housing material PSU of the foregoing work was replaced by the high chemical resistive material PEEK. The demand for chemical resistance also includes, that liquids in the pressure chamber of the sensor can not come into contact with the adhesive between the housing halves. Hence substantial trials have been accomplished to seal the sensor chamber by resistance welding with conductors circular rounding the sensor chamber.

At last a new pressure sensor variant is presented in this work in which the disk of the sensor is galvanically fabricated of nickel, in the following named nickel pressure sensor. The nickel pressure sensor had been produced on silicon wafers which was much easier than processing it on thin glass substrates. Characteristic curves of glass and nickel pressure sensors are presented and discussed.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	VII
Abkürzungen	VII
Griechische Formelzeichen	VIII
Lateinische Formelzeichen	VIII
Glossar	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 Vorarbeiten.....	2
1.1.1 Drucksensor mit Kreisplatte aus Polyimid.....	2
1.1.2 Drucksensor mit Kreisplatte aus Glas.....	3
1.2 Lastenheft / Spezifikation	6
1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	6
2 FERTIGUNG VON DRUCKSENSOREN MIT GLASKREISPLATTEN	9
2.1 Fertigungsablauf im Überblick.....	9
2.2 Reinigen der Dünngläser.....	11
2.3 Beschichtung mit Chrom	14
2.4 Einsatz von Dünnglas in der Mikrofertigung	16
2.4.1 Vorschädigung von Dünngläsern	18
2.4.2 Verbesserung der Glaskantenoberfläche	19
2.4.3 Handhabung von Dünnglas.....	21
2.4.3.1 Vakuum-Glashalter.....	22
2.4.3.2 Magnetfolienhalter.....	23
2.4.3.3 Allgemeine Regeln zur Handhabung von Dünngläsern.....	25
2.4.4 Belichten von Dünnglas-Substraten	25
2.5 Heiz- und Chromhafringe	28
2.6 Trägermembran aus Polyimid.....	30
2.7 Herstellung der Dehnungsmessstreifen	31
2.7.1 Nasschemisches Ätzen von DMS.....	31
2.7.2 Abheben von DMS	32
2.7.3 Abhebelack AZ 5214 E.....	33
2.7.4 Abhebelack AR-P 5350	36
2.7.4.1 Dosisfehler beim Belichten	36
2.7.4.2 Abhebeversuche mit AR-P 5350	37
2.7.4.3 Sputtern auf Abhebelack	39
2.7.5 Trockenätzen von DMS.....	43
2.7.6 Sputtern konstanter Schichtdicken	45
2.8 PI-Ringe und Chrompunkte.....	51
2.9 Kammerkleben von PEEK-Gehäusen.....	51

2.10	Glasätzen mit Flusssäure	56
2.11	Abdichten der Sensorkammer durch Heizelementschweißen	62
2.11.1	Schweißen mit parallel geschalteten Ringheizelementen.....	64
2.11.2	Schweißen mit einzelnen Ringheizelementen.....	67
2.11.2.1	Ringheizelemente aus Chrom.....	67
2.11.2.2	Ringheizelemente direkt auf Kunststoff.....	68
2.11.3	Regelung zum Heizelementschweißen.....	69
2.11.3.1	Leistungsgeregeltes Schweißen mit linearen Heizelementen.....	73
2.11.3.2	Entstehung von Schweißspannungen in Thermoplasten.....	76
3	DRUCKSENSOREN MIT GALVANISCH ERZEUGTER KREISPLATTE	77
3.1	Fertigungsablauf im Überblick	77
3.2	Fertigung von Drucksensoren mit Nickelkreisplatten	80
3.2.1	Herstellung der DMS.....	80
3.2.2	Galvanoformen von Nickel-Kreisplatten.....	83
3.2.3	Kugelfräsen von Sensorkammern.....	84
3.3	Temperaturfehler durch die PI-Trägermembran	87
4	KENNLINIEN VON DRUCKSENSOREN	89
4.1	Messaufbau	89
4.2	Kennlinien von Glasdrucksensoren	90
4.3	Kennlinien von Nickeldrucksensoren	94
5	ANALYSE DER DRUCKSENSOREN UND VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN	103
5.1	Optimierung der DMS	103
5.1.1	Theoretische Grundlagen zur DMS-Auslegung.....	103
5.1.1.1	Empfindlichkeit.....	103
5.1.1.2	Einfluss der Querdehnung.....	104
5.1.1.3	Auslegung von DMS-Rosetten.....	106
5.1.1.4	Linearitätsbedingung.....	106
5.1.2	Gelenkig gelagerte Kreisplatten.....	107
5.1.3	Alternative Kreisplatten-Formen.....	111
5.1.3.1	Überlagerung von Lastfällen.....	112
5.1.3.2	Kreisplatte mit Außenring.....	114
5.1.3.3	Kreisringmembran mit Außenring.....	115
5.1.4	Fazit aus den Berechnungen.....	116
5.1.5	Überprüfung der Lagerungsbedingungen.....	117
5.2	Möglichkeiten zum Abdichten der Sensorkammer	118
5.2.1	Heizelementschweißen.....	118
5.2.2	Ultraschallschweißen.....	120
5.2.3	Abdichten mit Indiumlot.....	121
5.2.4	Abdichten durch Kaltschweißen.....	121
5.3	Fluidischer Anschluss	122
5.4	Schrumpf heißgeprägter Gehäuse	123

5.4.1.1	Ermittlung von Schrumpfwerten und eines Skalierungsfaktors für PEEK.....	127
6	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	131
7	ANHANG.....	139
7.1	Vorgaben zur Materialauswahl und Beständigkeit	139
7.2	Aufbau des Glasdrucksensors	140
7.3	Messung der Schichtdickenverteilung.....	142
7.3.1	Strukturierung von Schichten zur Schichtdickenmessung	142
7.3.2	Berechnung einer Sputterblende.....	143
7.4	Ausrichter zum Belichten.....	145
7.5	Kammerkleben	146
7.5.1	Kammerklebeapparatur.....	146
7.5.2	Dünnglassubstrate auf Gehäusenutzen kammergeklebt	147
7.5.3	Zum Kammerkleben getestete Klebstoffe.....	148
7.5.4	Schnitt durch zwei Gehäusenutzen	149
7.6	Heizelementschweißen.....	150
7.6.1	Parallel geschaltete Ringheizelemente.....	150
7.7	Kennlinien von Drucksensoren	151
7.8	DMS-Optimierung	153
7.8.1	Vergleich analytischer und mit FEM berechneten Ergebnisse	154
8	SCHRIFTTUM	157

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

2K	Zwei Komponenten
ACN	Acetonitril
Au	Gold
a-Si:H	amorphes, hydrogenisiertes Silizium
a-SiN:H	amorphes, hydrogenisiertes Siliziumnitrid
AMANDA	Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung (englisch: Surface Micromaching, Molding and Diaphragm Transfer)
Cr	Chrom
DI	Deionisiertes Wasser
DMS	Dehnungsmessstreifen
DMF	Dimethylformamid
ERG	Energierichtungsgeber
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEP	Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylen-Copolymerisat
HF	Flusssäure
HMDS	Hexamethyldisiloxan
IFIA	Institut für instrumentelle Analytik, Forschungszentrum Karlsruhe
IMT	Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe
ITO	Indiumtin-oxide, Indiumzinnoxid
I ₂ /Kal-Lösung	Iod/Kaliumjodid-Lösung in Wasser, Lugolsche Lösung
KT	Kammerklebetemperatur
LOC	Lab-On-Chip
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MST	Mikrosystemtechnik
MOEMS	Micro-Optical-Electro-Mechanical System
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PFA	Perfluoralkoxy-Copolymer
PI	Polyimid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physical vapour deposition
PVDF	Polyvinylidenfluorid

REM	Rasterelektronenmikroskop
RF-MEMS	Radio Frequency-Micro-Electro-Mechanical Systems
RIE	Reaktiv Ion Etching
RT	Raumtemperatur
THF	Tetrahydrofuran
TKR	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient

Griechische Formelzeichen

α_{Au}	Wärmeausdehnungskoeffizient von Gold
α_{Ni}	Wärmeausdehnungskoeffizient von Nickel
α_{PI}	Wärmeausdehnungskoeffizient von PI
α_{PSU}	Wärmeausdehnungskoeffizient von PSU
Δp	Druckdifferenz
ε	Dehnung
ε_{rad}	Radialdehnung
ε_{r_DMS}	Effektivwert der vom DMS aufgenommenen Radialdehnung
ε_{r_max}	Maximalwert der Radialdehnungen
ε_{tan}	Tangentialdehnung
ε_{t_DMS}	Effektivwert der vom DMS aufgenommenen Tangentialdehnung
ε_{t_max}	Maximalwert der Tangentialdehnungen
μ	Querdehnungszahl
ν_{KP}	Querdehnungszahl der Kreisplatte
ρ	Spezifischer Widerstand
ϑ_1	Anfangstemperatur
ϑ_2	Endtemperatur

Lateinische Formelzeichen

A	Fläche, Querschnittsfläche
b_R	Ringbreite
C_{rad}	Effektivwertfaktor der erfassten Radialdehnungen
C_{tan}	Effektivwertfaktor der erfassten Tangentialdehnungen
d_{KP}	Dicke der Kreisplatte
d_R	Ringdicke

dR / R	Widerstandsänderung
E_{KP}	Elastizitätsmodul
F_{mittel}	Mittelwert der Linearitätsfehler der Spannungen am Kreisplattenrand und in Plattenmitte
k	k-Faktor, Empfindlichkeit eines Dehnungsmessstreifens
l	Länge
Linab Spg außen	Linearitätsabweichung der Spannungen am Plattenrand
Linab Spg innen	Linearitätsabweichung der Spannungen in Plattenmitte
N	Plattensteifigkeit
p	Druck
p_{Ref}	Referenzdruck
r	Variable für den Radius der Kreisplatte
R_{KP}	Radius der Kreisplatte
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze
R_{Ra}	Ringradius außen
s	Sekunden
Spg_{max}	Maximale Zug- oder Druckspannung in der Kreisplatte
U_B	Brückenspannung
U_0	Speisespannung
V_{fest}	Verhältnis aus maximaler Durchbiegung und Kreisplattendicke einer am Rand fest eingespannten Kreisplatte
V_{gel}	Verhältnis aus maximaler Durchbiegung und Kreisplattendicke einer am Rand gelenkig gelagerten Kreisplatte
w_{max}	Maximale Durchbiegung der Kreisplatte

Glossar

Abhebelack..Lift-off-Lack. Fotolack, mit denen unterschrittene Fotolackkanten hergestellt werden können, aufgrund dessen sich der Fotolack als Maske zum Aufdampfen von Metallschichten auf ein Substrate eignet.

Aspektverhältnis..Höhe- zu Breite-Verhältnis

Bedampfen..Das Beschichten von Substraten mit Hilfe von Aufdampfanlagen.

Bildbelichtung..Strukturbelichtung. Belichtung mit einer Chrommaske. Das Bild bzw. die Struktur auf der Chrommaske wird auf den Fotolack übertragen.

Dunkelabtrag..Unerwünschte Auflösung von Fotolack, z. B. bei Positivlacken an nicht belichteten Stellen, durch zu lange Entwicklungszeiten.

Entferner..Remover, Stripper. Lösungsmittel zum Entfernen von Fotolack.

Heizplatte..Hot plate. Temperaturgeregelter Heizplatte zum Trocknen von Fotolacken.

X

Nahabstand..Proximity-Abstand. Abstand der Chrommaske vom Fotolack bei der so genannten Proximity-Belichtung. Kontaktbelichtung mit definiertem sehr geringem Abstand zur Fotolackschicht.

Lackschleuder..Spin coater, Belacker.

Piranha-Lösung..Peroxomonoschwefelsäure, Mischung aus 30%iger Wasserstoffperoxidlösung und konzentrierter Schwefelsäure

Strippen..Entfernen von Fotolack von einer Substratoberfläche.

1 Einleitung

International wird die Mikrosystemtechnik (MST) als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gesehen. Der Weltmarkt für Mikrosystemtechnik wächst seit 1996 überdurchschnittlich stark mit einer Wachstumsrate von ca. 18 % pro Jahr. Betrag der weltweite Umsatz 1996 noch 14 Mrd. US\$, so waren es 2002 bereits 38 Mrd. US\$. Für 2005 prognostiziert Nexus, das europäische Mikrosystem-Netzwerk, ein Marktvolumen von 68 Mrd. US\$ [VDI04]. Erste Schätzungen für die Zeit bis 2010 gehen von einem weiteren Wachstum der MST-Märkte auf über 200 Mrd. US\$ aus. Zu diesem enormen Marktwachstum sollen vor allem neue, bisher noch nicht erschlossene Marktfelder und Produkte, wie z. B. polytronische Systeme oder Bio-MEMS-Applikationen, beitragen.

Die gesamte wirtschaftliche Bedeutung der MST geht jedoch noch über diese Zahlen hinaus. Sie erschließt sich erst durch die Integration von Mikrosystemen in Produkte. Viele Produkte sind nur in Verbindung mit Mikrosystemen wettbewerbsfähig. Vom Endverbraucher unbemerkt, bringen die filigranen Baugruppen Intelligenz, Präzision und Zuverlässigkeit in Produkte des Maschinen- und Gerätebaus, der Kommunikations- und Medizintechnik, der chemischen und der Automobilindustrie. So sind in moderne Autos heute bis zu 50 Mikrosysteme eingebaut. Sie erhöhen im Auto die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, dosieren die Kraftstoffzufuhr oder überwachen den Reifendruck. 25 % beträgt der wertmäßige Anteil von Mikrosystem-Komponenten in jedem Personenwagen. Auch in der Medizintechnik werden, vor allem in Deutschland, vielfach Mikrosysteme eingesetzt.

Den größten Bedarf an mikrosystemtechnischen Lösungen haben der IT-Bereich, die Medizintechnik und die Datentechnik. Die Telekommunikationsbranche mit ihrem gigantischen Stückzahlenbedarf und ihrem kontinuierlichen Miniaturisierungsdruck in Verbindung mit Leistungssteigerung stellt den größten Innovationsmotor der MST dar. Besonders groß ist der Bedarf der Telekommunikation an optischen Komponenten (MOEMS, Micro-Optical-Electro-Mechanical System) und drahtloser Funktechnik (RF-MEMS, Radio-Frequency-MEMS) in Mikrosystembauweise. Zu den größten Umsatzträgern der Mikrosystemtechnik zählen, laut Nexus-Studie [Nexu02], Festplattenleseköpfe, Tintendruckerköpfe, Hörgeräte, Herzschrittmacher, Komponenten für In-vitro-Diagnostik sowie Drucksensoren.

In dieser Arbeit wird ein Drucksensor behandelt, der vor allem in mikrofluidischen Systemen eingesetzt werden soll, worunter fallen: Chemische und biologische Analysegeräte, Lab-On-Chip Entwicklungen (LOC), Mikroreaktoren oder Mikrodosiersysteme. Für die Herstellung des Drucksensors wird eine am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) entwickelte Aufbau- und Verbindungstechnik [Scho97] benutzt, mit der bisher schon eine Reihe von membranbasierten Sensoren und Aktoren hergestellt worden sind, wie: Mikromembranpumpe [Büst96], Mikroventile [Goll97], [Rogg01], Entgaser [Rumm98], Druck- und Durchflusssensor [Mart98], Drucksensor [Wulf01], Durchflusssensor [Ditt01] und Durchflussregler [Wolk04]. Membranbasierte Mikrokomponenten werden mit verschiedenen Verfahren der Mikrosystemtechnik, wie PVD, Mikrogalvanik, Lithografie, Nass- und Trockenätzen sowie Heißprägen gefertigt. Kernstück dieser Mikrokomponenten ist eine Membran, die auf einem goldbeschichteten oxidierten Siliziumwafer lithografisch hergestellt wird. Typische Mikrostrukturen auf einer Membran sind z. B. Leiterbahnen, Anschlussflächen, Dehnungsmessstreifen (DMS), Elektroden, temperaturabhängige Widerstände oder Heizwendeln. Auf die fertige Membran wird ein Gehäusenutzen geklebt, der sich anschließend zusammen mit der Membran vom Wafer ablösen lässt. Hierbei wird die auf dem oxidierten Siliziumwafer nur schwach haftende Goldschicht als Trennschicht genutzt. Nach der Entfernung der Goldschicht von der Membran wird ein zweiter Gehäusenutzen auf die Rückseite der Trägermembran geklebt, so dass die Trägermembran beidseitig von Gehäusenutzen umschlossen ist. Als Gehäusenutzen dienen 0,6 bis 2 mm dünne Kunststoffplatten, die mikrofluidische Strukturen wie Kanäle oder Messkammern enthalten. Sie werden durch Heißprägen oder Spritzgießen hergestellt. Die Außenabmessungen bisher verwendeter Nutzen betragen ca. 30 x 70 mm².

Zur Verbindung der Membran mit dem Gehäusenutzen kommen verschiedene Verbindungstechniken in Frage. Neben dem am IMT häufig angewandten Kammerkleben [Büst94] sind dies Kapillarkleben, Kleben mit Klebstofffolien oder Klebstofffilmen [Fu04] sowie UV- bzw. Degradationsbonden [Truc04]. Durch anisotropes Leitkleben, Lötens oder eventuell durch Drahtbonden auf Anschlussflächen der Membran, die am Rand der Gehäusenutzen offen zugänglich sind, können die membranbasierten Komponenten elektrisch kontaktiert werden.

1.1 Vorarbeiten

Der vorliegenden Arbeit gingen zwei am IMT durchgeführte Dissertationen voran [Mart98], [Wulf01], die sich jeweils mit der Entwicklung von Drucksensoren zur Messung von Drücken in mikrofluidischen Systemen beschäftigten.

1.1.1 Drucksensor mit Kreisplatte aus Polyimid

In [Mart98] wird ein mikromechanischer Druck- und Durchflusssensor vorgestellt, welcher – abgesehen von elektrischen Leiterbahnen – vollständig aus Kunststoffen besteht. Das Verformungselement des Drucksensors stellt eine Kreisplatte aus Polyimid (PI) dar, auf welcher eine so genannte DMS-Rosette, eine Vollbrückenschaltung aus vier DMS, aufgebracht ist. Die Kreisplatte ist an einer 1,5 μm dünnen, straff gespannten Trägermembran aus PI in einer Sensorkammer aufgehängt. Auch bei Druckbeaufschlagung berührt die Kreisplatte die Gehäusewände nicht, sondern wird von der PI-Membran in der Mitte der Sensorkammer gehalten. Zwei Gehäusehälften aus Polysulfon (PSU) umschließen einerseits die PI-Membran und bilden andererseits die Drucksensorkammer (Bild 1.1-1).

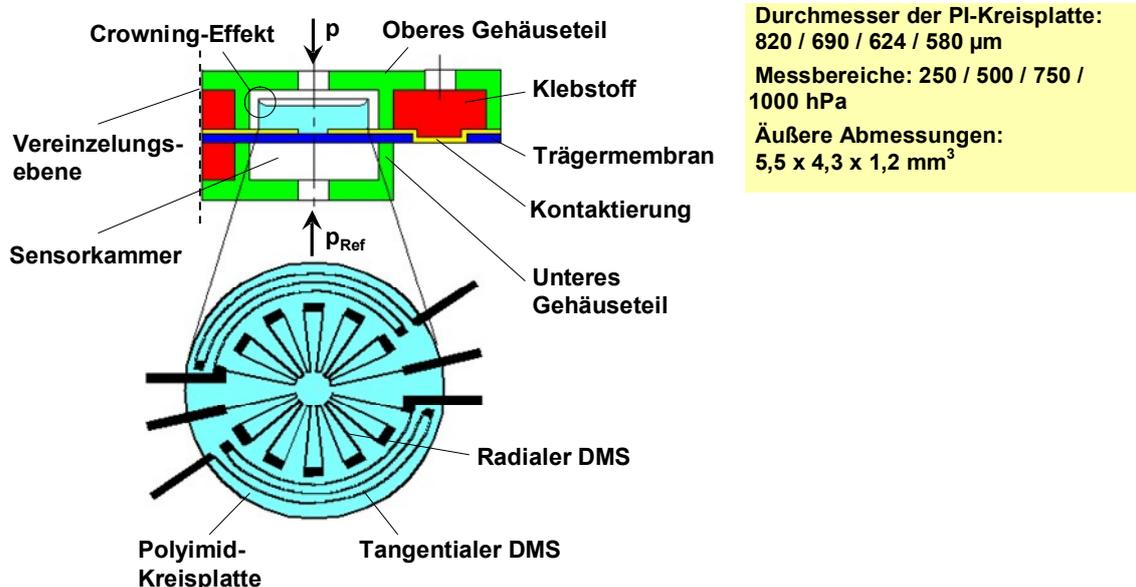


Bild 1.1-1: Schematische Darstellung des Drucksensors mit PI-Kreisplatte (aus [Mart98]).

Die Gehäusehälften werden durch Heißprägen abgeformt. Elektrisch kontaktiert werden die DMS mit Leiterbahnen, die über die Trägermembran zu freiliegenden Anschlussflächen am Rand des Sensorgehäuses verlaufen. Wird der Drucksensor mit Druck beaufschlagt, biegt sich die PI-Membran und die darauf befindliche PI-Kreisplatte durch. Dies führt zu einer Widerstandsänderung der tangentialen und radialen DMS. Da die DMS zu einer Wheatston'schen Brücke verschaltet sind, wird die Widerstandsänderung, bei konstant anliegender Versorgungsspannung, in ein Spannungssignal gewandelt.

In Dauerversuchen mit über längere Zeit konstant anliegendem Druck wurde eine Drift des Messsignals festgestellt. Zu den wesentlichen Gründen für die Signaldrift des Drucksensors

mit PI-Kreisplatte, im Folgenden PI-Drucksensor genannt, gehört die generelle Neigung von Polymeren zum Kriechen. Alle Arten von Polymeren seien es Thermoplaste, Elastomere oder Duroplaste kriechen unter Last, z. B. unter ständig angelegter Zugspannung [Domi05]. Die am IMT verwendeten PI-Fotolacke, Durimide von Arch Chemicals GmbH, Ratingen sind nicht vernetzte, lineare Thermoplaste, welche sicherlich leichter zum Kriechen neigen als hoch vernetzte Duromere. In Versuchen an 25 μm dünnen PEEK¹- und 36 μm dünnen SU-8²-Membranen wurde in [Wulf01] gezeigt, dass Membranen aus diesen Kunststoffen unter ständig einwirkendem Druck stark kriechen. Bei über längere Zeit einwirkendem Druck werden sich Kreisplatten aus Kunststoff also verformen, was sich als Drift des Sensorsignals bemerkbar macht. Kunststoffe scheinen somit grundsätzlich nicht als Werkstoff für Kreisplatten von Drucksensoren geeignet zu sein.

Weiterhin zeigte der PI-Drucksensor eine hohe Temperaturdrift. Hierfür lassen sich folgende Gründe vermuten. Bei Temperaturerhöhung nimmt der E-Modul von PI ab [Domi05], wobei die Kriechneigung gleichzeitig zunimmt. Beide Ursachen führen zu einer stärkeren Durchbiegung der Kreisplatte und damit zu einer Temperaturdrift des Sensorsignals. Der Unterschied in der Wärmeausdehnung der Kreisplatte aus PI ($\alpha_{\text{PI}} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und dem Gehäusewerkstoff PSU ($\alpha_{\text{PSU}} = 56 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) könnte ebenfalls zur Temperaturdrift beigetragen haben. Die PI-Kreisplatte wird von einer straff gespannten Trägermembran aus PI in der Mitte der Sensorkammer gehalten und ist somit nicht vom PSU-Gehäuse entkoppelt. Dagegen wurde eine mögliche Temperaturdrift durch die stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der Kreisplatte aus PI ($\alpha_{\text{PI}} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und den auf der Kreisplatte befindlichen DMS aus Gold ($\alpha_{\text{Au}} = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) durch die Vollbrückenschaltung der DMS kompensiert.

1.1.2 Drucksensor mit Kreisplatte aus Glas

In [Wulf01] wurden in einem Industrieprojekt Konzepte für einen mikrofluidischen Drucksensor erarbeitet und anhand eines Lastenheftes bewertet. Ausgewählt wurde ein Konzept, bei dem die Kreisplatte des Drucksensors abweichend von [Mart98] aus Glas besteht. Das Funktionsprinzip des Sensors ist in Bild 1.1-2 dargestellt.

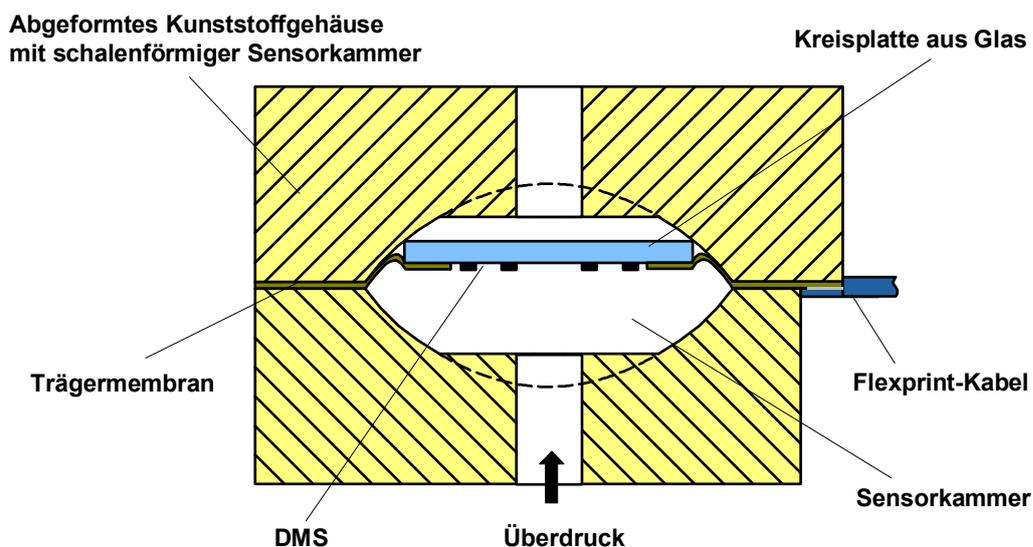


Bild 1.1-2: Funktionsprinzip des Drucksensors mit Glaskreisplatte (aus [Wulf01]).

Auf der Oberfläche der Kreisplatte aus Glas befinden sich DMS, welche die Dehnungen auf der Kreisplatte erfassen, wenn sich die Kreisplatte aufgrund des anliegenden Drucks

¹ PEEK...Polyetheretherketon

² SU8...Epoxid-Fotoresist, Firma MicroChem Corp., USA

durchbiegt. Damit mechanische Spannungen und Dehnungen des Gehäuses nicht auf die sensitive Kreisplatte übertragen werden können, ist diese über eine dünne, schlaife Trägermembran aus PI mit dem Gehäuse verbunden. Die obere und untere Hälfte der Sensorkammer sind kugelschalenförmig ausgelegt. Liegt eine Druckdifferenz am Sensor an, setzt die Kreisplatte mit ihrem Rand auf die Oberfläche einer Kammerhälfte auf und biegt sich durch. Die Kugelschalenform der Sensorkammer bewirkt auch, dass der Drucksensor tolerant ist gegenüber Lageabweichungen der Kreisplatte, d. h. die Kreisplatte darf ca. 100 µm exzentrisch in der Sensorkammer liegen. Wenn die Kreisplatte sich z. B. aufgrund von Montage- oder Fertigungstoleranzen nicht genau in der Mitte der Sensorkammer befindet, setzt die Kreisplatte bei Druckbeaufschlagung dennoch mit ihrem Rand auf die Kammerhälfte auf. Die immer gleiche Randlagerung der Kreisplatte ist Voraussetzung für eine gleichförmige Durchbiegung der Kreisplatte bei Druckbeaufschlagung und damit für ein stabiles Messsignal.

Aus fertigungstechnischen Gründen wurden die Kammerhälften später nicht schalenförmig sondern ‚zylindrisch‘ ausgeführt, wobei die obere und untere Kammerhälfte sich voneinander unterscheiden (Bild 1.1-3).

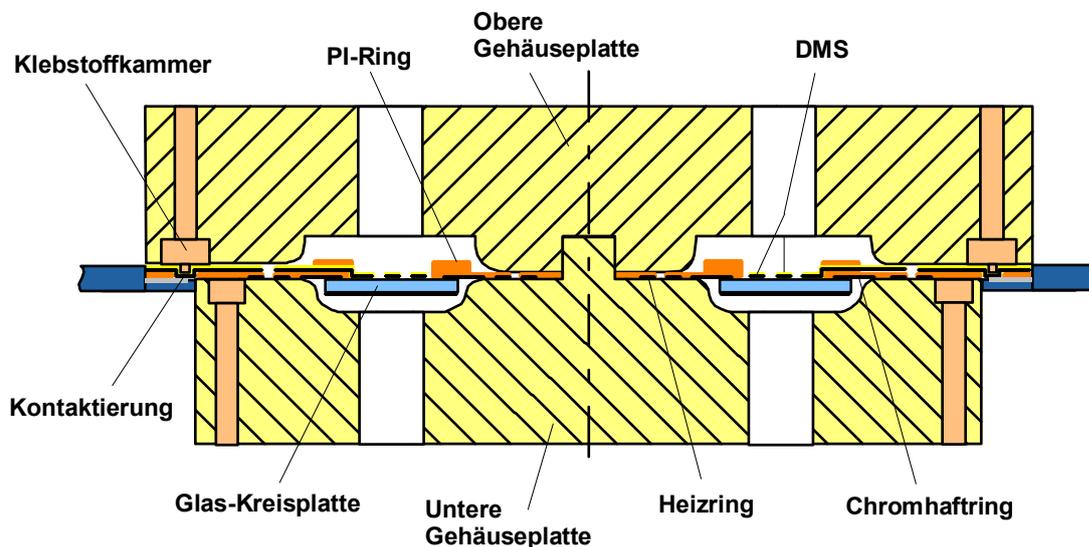


Bild 1.1-3: Aufbau des Drucksensors; Schnitt durch die Gehäuseutzen (aus [Wulf01]).

Die obere und untere Kammerhälfte haben jeweils die Form eines zylindrischen Sacklochs, wobei die Innenkante des Sacklochs in der unteren Kammerhälfte im Gegensatz zur oberen Kammerhälfte verrundet ist. Die untere Kammerhälfte stellt mit ihrer verrundeten Innenkante einen Kompromiss zu einer kugelschalenförmigen Sensorkammer dar. Die Kreisplatte kann sich, ähnlich wie in einer Kugelschale, bei von oben wirkendem Druck mit ihrem Rand in die Verrundung der unteren Kammerhälfte legen. Die obere Kammerhälfte ist nicht mit einer verrundeten Innenkante ausgeführt, weil die scharfe Kante der Glaskreisplatte die auf dieser Seite der Kreisplatte befestigte dünne Trägermembran beim Aufsetzen auf die Kammerwand zerschneiden könnte. Als Ersatz für die Funktion der verrundeten Innenkante ist auf der Oberseite der Kreisplatte ein ca. 20 µm dicker PI-Ring vorgesehen. Bei von unten wirkendem Druck liegt die Kreisplatte in der oberen Kammerhälfte auf dem PI-Ring auf und kann sich durchbiegen.

Die Kreisplatten, die als Verformungselemente der Drucksensoren dienen, werden aus einem 50 µm starken Dünnglas, D 263 T von Schott Desag, Grünenplan, durch isotropes Ätzen mit Flußsäure hergestellt. Nach dem Ätzen sollen die Kreisplatten einen Durchmesser von ca. 2 mm haben. Der Durchmesser der Kreisplatte wurde bei vorgegebener Dicke des Dünnglases so berechnet, dass bei Belastung der Kreisplatte mit Druckdifferenzen von ± 1000 hPa ein guter linearer Zusammenhang zwischen der wirkenden Druckbelastung und

den dadurch hervorgerufenen radialen und tangentialen Dehnungen auf der Kreisplattenoberfläche und damit dem Drucksignal besteht.

Eine Forderung des Lastenheftes war die hohe chemische Beständigkeit des Drucksensors. Zur Verbindung der Gehäuseplatten mit der PI-Trägermembran wurde ein Epoxidklebstoff verwendet, dessen relativ hohe chemische Beständigkeit jedoch gemäß Lastenheft als nicht ausreichend angesehen wurde. Daher musste verhindert werden, dass Flüssigkeiten in der Sensorkammer in Kontakt mit dem Klebstoff treten können, indem sie durch den Spalt zwischen der PI-Membran und den aufgeklebten Gehäuseplatten bis zu den Klebstoffkammern (s. Bild 1.1-3) vordringen. Dies sollte mit einem Heizring auf der PI-Membran geschehen, mit dessen Hilfe die Sensorkammer zukünftig durch Heizelementschweißen [Saec86] der Gehäuseplatten umlaufend abgedichtet werden sollte. Ein weiterer Grund für den zu unterbindenden Kontakt von Flüssigkeiten im Drucksensor mit dem Klebstoff war, dass die Festigkeit der Klebeverbindung durch physikochemischen Angriff des Klebstoffs nicht beeinträchtigt werden sollte.

Der im Schnitt durch den Nutzen dargestellte Chromhafring dient als Haftvermittler zwischen dem Glas und der PI-Trägermembran. Nach mehreren Versuchen zur Erzielung einer guten Haftung von PI auf Glas stellte sich in [Wulf01] heraus, dass Chrom als Haftvermittler für PI auf Glas verwendet werden kann. Weiterhin kann die Chromschicht als Schutzschicht für den nach Lastenheft als chemisch eingeschränkt beständigen Werkstoff PI dienen, wobei vorausgesetzt wird, dass die Flüssigkeit nur in die untere Kammerhälfte des Differenzdrucksensors eingeleitet wird, da anderenfalls die DMS insbesondere von elektrolytischen Flüssigkeiten kurzgeschlossen würden.

Leiterbahnen führen von den DMS auf den Kreisplatten über die PI-Trägermembran nach außen an den Rand der Gehäuseplatten. Dort befinden sich Anschlussflächen, an denen die Sensoren elektrisch kontaktiert werden können. Jeweils zwölf Drucksensoren werden gleichzeitig im Nutzen auf einem Dünnglassubstrat hergestellt. Deshalb wird in dieser Arbeit häufig von ‚Gehäusenutzen‘ gesprochen. Synonym werden auch die Begriffe ‚Gehäuseplatten‘ oder ‚Gehäusehälften‘ verwendet.

Einige Drucksensoren aus dem nach Lastenheft chemisch unbeständigen Material PSU wurden in [Wulf01] hergestellt und ihre charakteristischen Kennlinien aufgenommen (Bild 1.1-4).

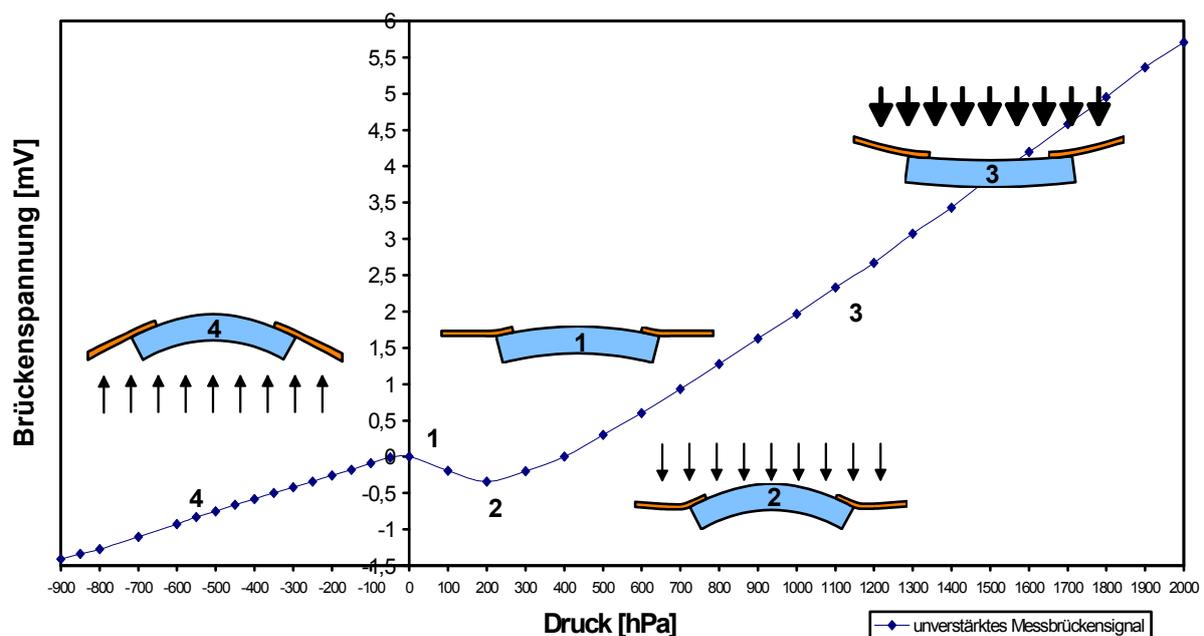


Bild 1.1-4: ‚Knie‘ in der Kennlinie des Drucksensors und Erklärungsmodell (aus [Wulf01]).
Halbbrücke an 10 Volt.

Die Kennlinien zeigten einen linearen Verlauf. Ein Messbereich von -900 hPa bis +2000 hPa konnte abgebildet werden. Um 0 bar wiesen die Kennlinien allerdings ein ‚Knie‘ auf. Das Knie wurde damit erklärt, dass die Kreisplatte nach der Fertigung des Drucksensors straff, also nicht wie vom Konzept her vorgesehen schlaff, an der PI-Membran aufgehängt ist. Die an der Kreisplatte ziehende PI-Membran bringt um 0 bar möglicherweise ein Drehmoment am Rand der Kreisplatte ein, so dass diese sich leicht durchbiegt. Dieses Drehmoment nimmt mit ansteigendem Druck möglicherweise zunächst zu, bis die Kreisplatte an der Kammerwand anliegt und sich dann entgegengesetzt, d. h. in Richtung des Überdrucks, durchbiegt.

1.2 Lastenheft / Spezifikation

Für den Drucksensor aus [Wulf01] wurde in Zusammenarbeit mit einer Firma ein Lastenheft erstellt (Tabelle 1.2-1).

Messbereich	-1000 bis +2000 hPa
Lineare Kennlinie zwischen	-1000 und +1000 hPa
Maximale, kurzzeitige Überlastsicherheit	bis 10 000 hPa
Genauigkeit	1 % vom Endwert = 20 hPa
Wiederholgenauigkeit	0,5 % vom Endwert = 10 hPa
Betriebstemperatur	0 bis 65 °C
Betriebsdauer	> 5 Jahre
Lagertemperatur	- 40 bis + 70 °C
Inneres Volumen	< 0,5 µl
Max. Druckabfall bei 10 ml/min und 2,5 cp	10 hPa
Permanente Belastung (ohne Zeitbegrenzung)	-100 hPa / +300 hPa
Anzahl Lastwechsel -500 hPa / +1000 hPa / 0,5 Hz	80 Mio.

Tabelle 1.2-1: Lastenheft.

In einem mikrofluidischen Gerät der Firma soll der Drucksensor zur Druckmessung sowie zur Überwachung des Leitungssystems dienen. Ein Druckanstieg oder Druckabfall würde eine Verstopfung bzw. Leckage im Leitungssystem bedeuten. Der Drucksensor soll vor allem chemisch beständig gegenüber Lösungsmitteln, Benzin, Ölen, Säuren und Laugen sein. Als Gehäusewerkstoff des Sensors ist der chemisch hoch beständige Kunststoff PEEK vorgeschrieben. Weitere Vorgaben zur Materialauswahl und chemischen Beständigkeit befinden sich im Anhang, [Kapitel 7.1](#).

1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Die Arbeit führt die Entwicklung des Drucksensors mit Kreisplatte aus Glas [Wulf01], im Folgenden ‚Glasdrucksensor‘ genannt, weiter. Große Schwierigkeiten bei der Fertigung des Glasdrucksensors wurden in [Wulf01] nicht erwähnt, stellten sich jedoch im Verlauf der vorliegenden Arbeit als Hauptproblem heraus. Die als Substrate verwendeten Dünngläser

erwiesen sich als äußerst zerbrechlich. Nach wenigen Fertigungsschritten war bereits die Mehrzahl der Dünngläser zerbrochen. Als ein Ziel dieser Arbeit wurde daher nachträglich definiert, die Fertigungsausbeute im Hinblick auf eine spätere Serienfertigung wesentlich zu verbessern.

Weiterhin wurden die ersten Sensormuster in [Wulf01] nicht wie im Lastenheft gefordert mit Gehäuseplatten aus PEEK, sondern aus PSU aufgebaut, einem chemisch nicht ausreichend beständigen Werkstoff. PSU neigt z. B. zu Spannungsrissbildung bei Kontakt mit dem Lösungsmittel Aceton. In [Wulf01] wurde PSU verwendet, weil PSU transparent ist und für das am IMT entwickelte Kammerkleben von Gehäuseplatten auf Substrate [Büst94] bis dahin transparente Gehäuse verwendet worden waren. Transparente Gehäuse sind für das Kammerkleben vorteilhaft, da der Klebstofffluss gut sichtbar ist und daher leicht kontrolliert werden kann.

Die 5 µm breiten DMS wurden in [Wulf01] durch nasschemisches Ätzen hergestellt, wobei es zu unregelmäßigen Unterätzungen kam, was zu starken Schwankungen der Widerstandswerte führte. Die alternative Fertigung von DMS mittels des Abhebeverfahrens (Lift-off-Verfahren) wurde noch nicht ausreichend beherrscht.

Der Drucksensor soll eine möglichst lineare Kennlinie im Bereich von -1 bis +1 bar haben und darf im Bereich von 1 bar bis 2 bar stärker von der linearen Kennlinie abweichen. In [Wulf01] wurde im Bereich von 0 bis 0,3 bar eine Senke in der Kennlinie festgestellt. Da die Senke ein zweideutiges Signal darstellt, sollte sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht und nach Möglichkeit beseitigt werden.

Als weiteres Ziel ist die Abdichtung der Sensorkammer zu nennen. Die Sensorkammer ist über einen Spalt, zwischen einem Dichtungssteg des Gehäusenutzens und der PI-Trägermembran, mit der Klebstoffkammer des Gehäusenutzens verbunden. Eine Flüssigkeit in der Sensorkammer könnte durch diesen Spalt hindurchtreten und den Klebstoff aufquellen bzw. Bestandteile aus dem Klebstoff herauslösen, was einerseits zur Schwächung der Klebstoffverbindung führen und andererseits die Flüssigkeit im mikrofluidischen System verunreinigen würde. In dieser Arbeit wird versucht, durch Heizelementschweißen mit dem dafür vorgesehenen Schweißring die Sensorkammer ringförmig abzudichten.

Die Ziele dieser Arbeit lauten stichpunktartig:

- Fertigungsausbeute der Glasdrucksensoren auf ein Niveau steigern, das eine Serienfertigung ermöglichen könnte
- Sensoren mit chemisch beständigen PEEK-Gehäusen aufbauen
- Widerstandsstreuung der DMS durch Anwenden des Abhebeverfahrens absenken
- Kennlinie verbessern, d. h. die Senke in der Kennlinie beseitigen
- Sensorkammer durch Umschweißen abdichten

In Kapitel 2 wird die Fertigung von Glasdrucksensoren beschrieben. Darin enthalten sind u. a. die Handhabung von Dünngläsern in der Reinraumfertigung, die Fertigung von DMS mittels des Abhebeverfahrens und das Kammerkleben von nicht transparenten PEEK-Gehäusen. In Kapitel 3 wird eine neue Drucksensorvariante mit galvanisch aus Nickel hergestellter Sensorplatte, im Folgenden ‚Nickeldrucksensor‘ genannt, vorgestellt. In Kapitel 4 werden Kennlinien von Glas- und Nickeldrucksensoren aufgeführt und diskutiert. Vorschläge zur Weiterentwicklung der Drucksensoren enthält Kapitel 5. In diesem Kapitel wird u. a. das physikalische Wirkprinzip piezoresistiver Dünnschicht-Drucksensoren beschrieben und nachfolgend eine Optimierung der DMS vorgenommen.

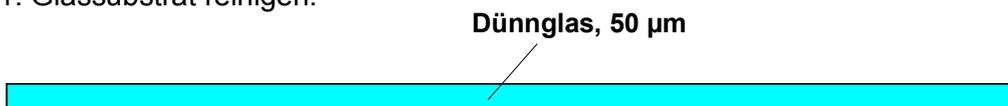
2 Fertigung von Drucksensoren mit Glaskreisplatten

Dieses Kapitel beschreibt die Fertigung von Glasdrucksensoren. Der Fertigungsablauf basiert auf Vorgaben aus [Wulf01]. Zunächst wird der Fertigungsablauf schematisch dargestellt. Danach werden einzelne Prozessschritte und die dabei festgestellten Fertigungsprobleme sowie Maßnahmen zu deren Überwindung behandelt.

2.1 Fertigungsablauf im Überblick

In Bild 2.1-1 sind die Fertigungsschritte zur Herstellung von Glasdrucksensoren schematisch dargestellt.

Schritt 1: Glassubstrat reinigen.



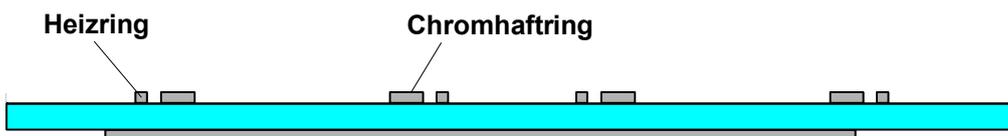
Schritt 2: Oberseite des Glassubstrats verchromen.



Schritt 3: Unterseite des Glassubstrats verchromen.



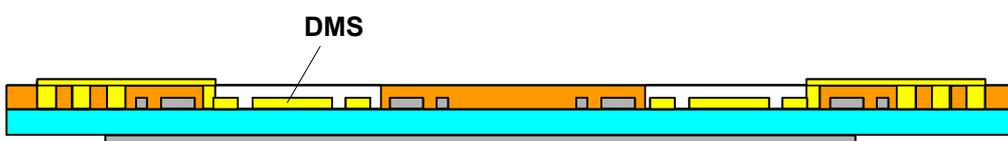
Schritt 4: Heizringe und Haftringe aus der Chromschicht strukturieren.



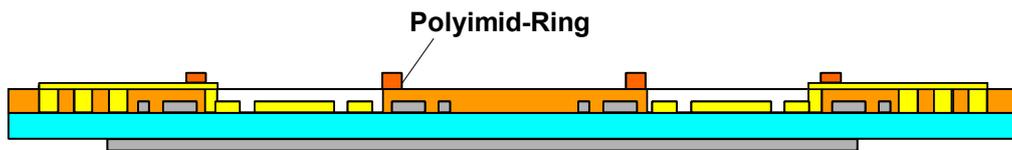
Schritt 5: Trägermembran aus PI-Fotolack lithografisch strukturieren und ausbacken.



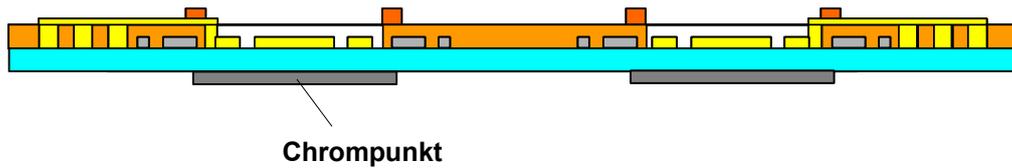
Schritt 6: DMS mit dem Abhebeverfahren herstellen.



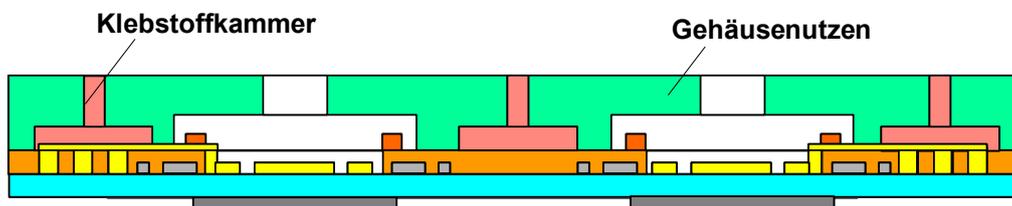
Schritt 7: PI-Ring strukturieren.



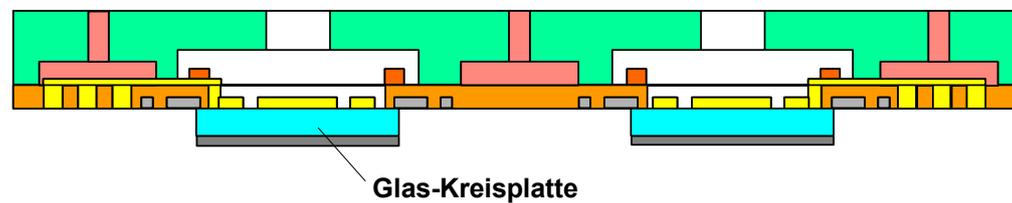
Schritt 8: Chrompunkte zur Maskierung der Kreisplatten strukturieren.



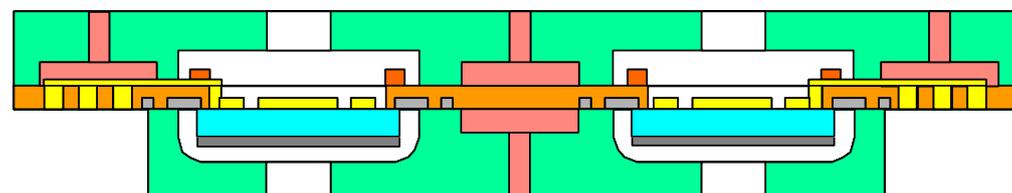
Schritt 8: Großen Gehäusenutzen positioniert aufkleben.



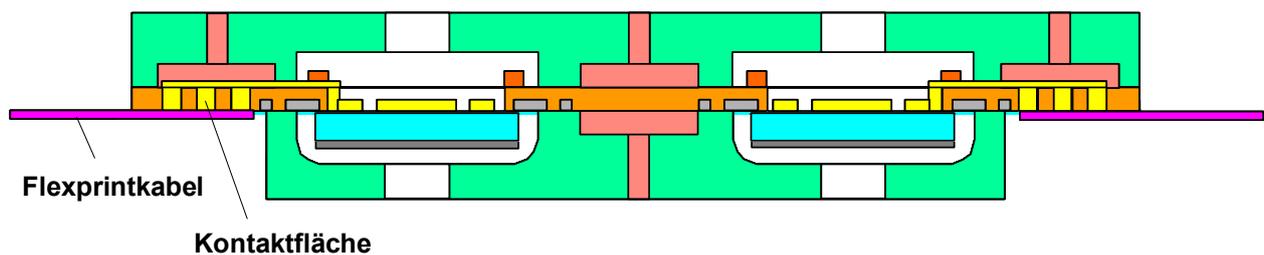
Schritt 9: Maskierte Kreisplatten mit Flusssäure aus dem Dünnglas herausätzen.



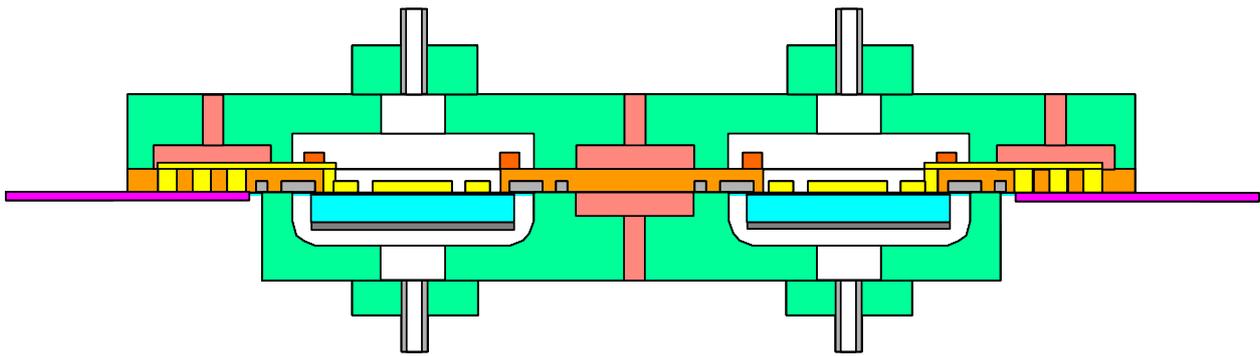
Schritt 10: Kleinen Gehäusenutzen positioniert aufkleben.



Schritt 11: Flexprintkabel auf die Anschlussflächen heißsiegelbonden.



Schritt 12: Fluidische Anschlüsse ankleben.



Schritt 13: Sensoren vereinzeln.

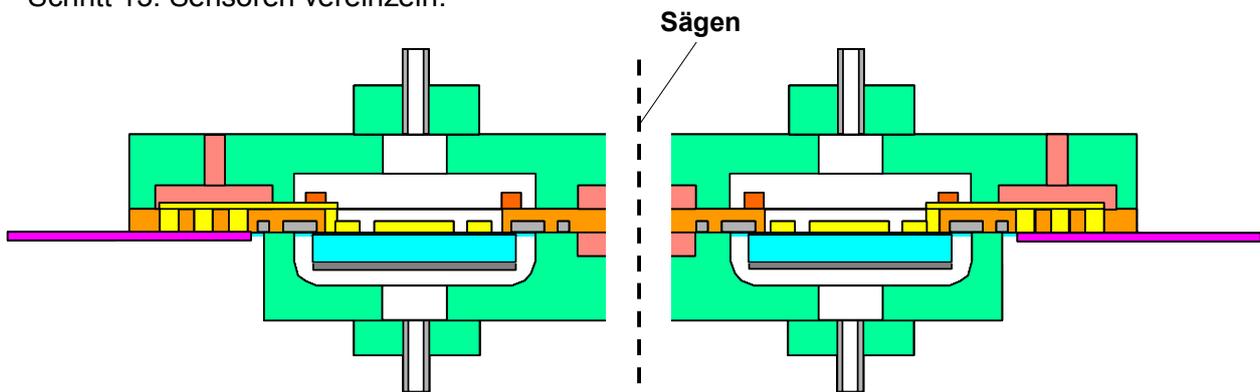


Bild 2.1-1: Fertigungsschritte des Drucksensors mit Glas-Kreisplatte.

Der Aufbau des Glasdrucksensors geht anschaulich auch aus CAD-Abbildungen im Anhang, [Kapitel 7.2](#) hervor.

2.2 Reinigen der Dünngläser

Als Substrate wurden Borosilikat-Dünngläser D 263 T von der Schott Desag AG, Grünenplan, in den Abmessungen 60 mm x 70 mm x 50 µm verwendet. Jeweils 12 Drucksensoren wurden parallel auf einem Glassubstrat gefertigt. Dünngläser werden von Schott ungereinigt ausgeliefert. Die Glasoberflächen waren von einer staubartigen Schicht überzogen (s. Bild 2.2-2). Teilweise waren Fingerabdrücke sichtbar.

Zur Reinigung wurde zunächst die Reinigungsroutine aus [\[Wulf01\]](#) befolgt:

- Reinigen mit Aceton
- Reinigen mit Isopropanol
- Spülen mit DI-Wasser (deionisiertes Wasser)
- Trocknen im Umluftofen, 40 °C, 30 Minuten
- Sauerstoff-Plasmabehandlung im Planarätzer, 100 W Vorwärtsleistung, 7 min

Die Gläser wurden mit Aceton und Isopropanol einzeln in Bechergläser gestellt und im Ultraschallbad, Sonorex Super 10P von der Firma Bandelin, Berlin, für 2 min auf Stufe 2 (von 10) gereinigt. Die Ultraschallfrequenz betrug 35 kHz, als maximale Leistung des Geräts waren 200 W angegeben. Danach wurden die Gläser in einen 2"-Waferständer gestellt und mit DI-Wasser aus einem Schlauch vorsichtig abgespült. Nach dem Trocknen erfolgte eine Sauerstoff-Plasmareinigung. Die so gereinigten Gläser waren nicht ausreichend sauber. Es zeigte sich, dass Chrom nach dem Sputtern an manchen Stellen nicht auf den Gläsern

haftete oder dass nach der Strukturierung der Chromschicht Fehlstellen in den Chromstrukturen zu finden waren.

Da alle Gläser mehrfach einzeln gehandhabt werden mussten - sowohl beim Reinigen in den Bechergläsern als auch beim Plasmaätzen - war die Reinigung zudem sehr zeitaufwändig. Daher wurde zunächst angestrebt, die Gläser nicht mehr einzeln in Bechergläsern sondern parallel zu reinigen. Als geeignete Halterung für den Reinigungsvorgang konnte der schon erwähnte 2“-Wafer-Ständer verwendet werden. Zunächst wurde versucht, 25 Gläser pro Wafer-Ständer zu reinigen. Beim Absenken des Ständers in das Ultraschallbad berührten sich die dicht nebeneinander stehenden Gläser jedoch aufgrund der entstehenden Strömung in der Reinigungslösung. Sobald sich die Gläser im Ultraschallbad berührt hatten, hafteten sie aufgrund von Adhäsionskräften zwischen den glatten Flächen aneinander. Nach der Entnahme aus dem Ultraschallbad ließen sich die Gläser nur schwer voneinander trennen. Um dies zu vermeiden, wurden anschließend nur noch jeweils 9 Gläser in einen 2“-Wafer-Ständer gestellt, so dass zwischen den Gläsern ein größerer Abstand blieb und die Gläser sich beim Absenken und Bewegen im Ultraschallbad nicht berühren konnten.

Für das Ultraschallbad wurde ein geeignetes Reinigungsmittel gesucht. Ausgewählt wurde Tickopur TR3 von der Firma Bandelin, Berlin. Dieses Reinigungsmittel ist geeignet zur Entfernung von mineralischen Rückständen, Flugrost, Pigmenten, Fetten, Ölen und Wachsen auf Glas. Das Reinigungsmittel basiert auf Zitronensäure. Es wurde eine 5 %ige Lösung von TR3 in DI-Wasser angesetzt. Die Gläser wurden bei 60 °C 1–2 min lang mit Ultraschall der Stufe 2 (von 10) gereinigt.

Ultraschalleinwirkung über längere Zeit schädigt oder zerstört das Glas. Nach 60 min Ultraschall der Stufe 5 waren große Schadstellen sowohl innerhalb des Glases als auch an dessen Rand (s. Bild 2.2-1) zu finden. Nach Auskunft der Firma Bandelin sind 30–120 s

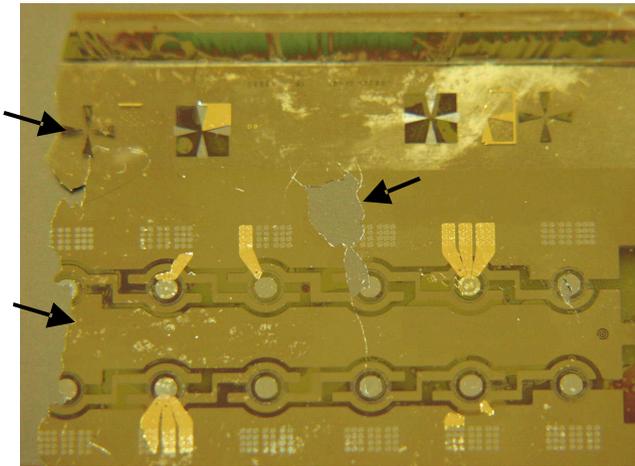


Bild 2.2-1: Beschädigungen an einem Dünnglassubstrat mit DMS und Hezelementen nach 60 min Ultraschall mit 50 % Leistung (Stufe 5).

Ultraschallanwendung auf Stufe 2 völlig ausreichend, um das Glas gründlich zu reinigen [Band03]. Die bei Ultraschallreinigung oft verwendete Warenbewegung zur Vermeidung von punktuell-kavitativem Angriff auf Warenoberflächen, sei bei dieser kurzen Reinigungszeit nicht notwendig. Da sich im weiteren Verlauf dieser Arbeit jedoch eine große Bruchempfindlichkeit des Glases herausstellte, wurde der Waferständer mit den Gläsern dennoch an Drähten hängend während der Ultraschallreinigung langsam bewegt. Auch die Firma Schott bestätigte auf Anfrage [Scho03], dass Dünngläser zerbrechen, wenn sie lange bei niedrigen Ultraschall-Frequenzen (< 35–40 kHz) und hoher Leistung gereinigt werden. Bei

Schott werden Dünngläser 2–3 min, höchstens aber 5 min lang in Ultraschallgeräten mit ca. 200 W Leistung auf maximal Stufe 5 von 10 gereinigt. Die Ultraschallfrequenz der Geräte von Schott betragen 45 kHz und höher. Zusätzlich wird der Korb, in dem die Gläser stehen auf und ab bewegt, so dass punktuell angreifende Ultraschall-Belastungen auf den Dünngläsern vermieden werden.

Nach der Reinigung im Ultraschall wurden die Gläser mit DI-Wasser gespült und danach mit Selectipur abgespritzt. Selectipur, Firma Merck, Darmstadt ist der Handelsname von besonders sauberem Isopropanol, welches auch in der Chipfertigung als Reinigungsmittel eingesetzt wird. Verwendet wurde Selectipur mit 20–100 ppb Kationen (niedrigste Qualitätsstufe). Der Vorteil der Anwendung von Isopropanol zum abschließenden Spülen ist, dass die Glassubstrate bei Raumtemperatur (RT) schnell trocknen. Nach dem Abspülen mit Selectipur nicht zu vermeidende Selectipur-Tropfen auf den Gläsern hinterlassen beim

Eintrocknen aufgrund der hohen Reinheit des Isopropanols keine erkennbaren Rückstände. Auf die abschließende Sauerstoff-Plasmareinigung von [Wulf01] konnte in der geänderten Reinigungsroutine verzichtet werden. Dadurch entfiel ein zeitaufwändiger Fertigungsschritt, da die Dünngläser beidseitig plasmageätzt werden mussten und der verwendete Planarätzer jeweils nur drei Gläser gleichzeitig fassen konnte.

In den Bildern 2.2-2 und 2.2-3 ist ein Dünnglas vor und nach der beschriebenen Reinigungsroutine abgebildet.

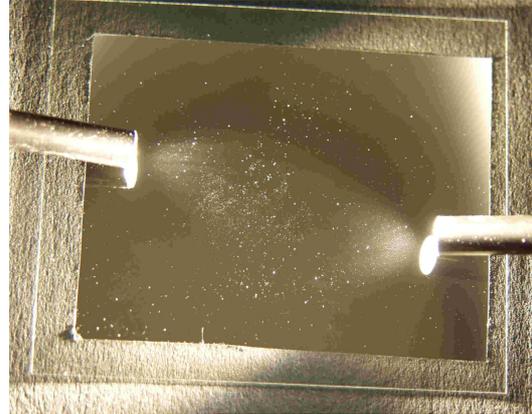


Bild 2.2-2: Dünnglas im Anlieferungszustand. Bild 2.2-3: Dasselbe Dünnglas wie in Bild 2.2-2 nach der Reinigungsroutine. Das Glas liegt über einer Aussparung in schwarzer Pappe und wird mit flach einfallendem Licht beleuchtet.

Weder Aceton noch normales Isopropanol oder DI-Wasser sind zum Abspülen der Gläser nach der Reinigung im Ultraschallbad geeignet, da in diesen Flüssigkeiten noch geringfügig Verunreinigungen (Mineralien) gelöst sind. Auf der Glasoberfläche zurückbleibende Tropfen verdampfen und hinterlassen Rückstände. In Bild 2.2-4 ist ein Dünnglas dargestellt, auf welchem Tropfen von DI-Wasser verdampft sind. Die Tropfenrückstände sind deutlich erkennbar. Solche anorganischen Reste können nur schwer durch Sauerstoff-Plasmaätzen, wie in [Wulf01] angewendet, entfernt werden, besser geeignet wäre hier Sputterätzen. Welchen Einfluss eingetrocknete Rückstände von DI-Wasser auf die Haftung von durch Sputtern aufgetragenen Schichten haben, zeigt das Bild 2.2-5.

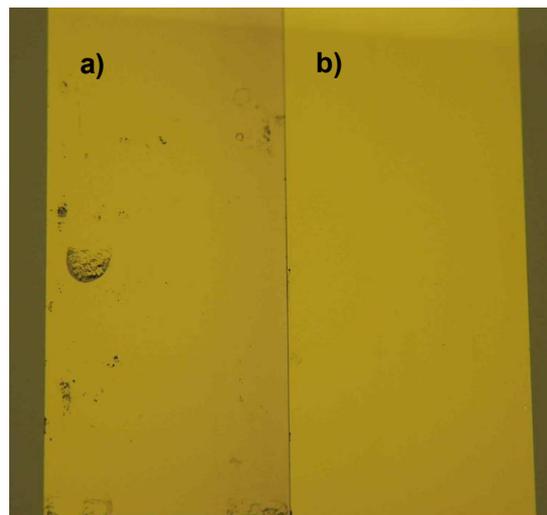


Bild 2.2-4: Dünnglas mit eingetrockneten Rückständen von DI-Wasser.

Bild 2.2-5: Mit 15 nm Chrom und 60 nm Gold beschichtete Glas-Objektträger, die nach der Reinigung abschließend mit a) DI-Wasser, b) Selectipur gespült worden waren.

Darin sind zwei Glas-Objektträger zu sehen, die im Ultraschallbad gereinigt und abschließend mit DI-Wasser a) und Selectipur b) gespült worden sind. Die Objektträger wurden mit 15 nm Chrom und 60 nm Gold besputtert. Anschließend wurden die Objektträger in ein Ultraschallbad gehalten, um die Haftung der Metallschicht auf dem Glas zu testen. Die

Beschichtung löste sich über den auf dem Objektträger a) eingetrockneten Rückständen aus DI-Wassers durch die mechanische Belastung der Ultraschallreinigung ab. Dagegen haftete die Beschichtung auf dem mit Selectipur gespülten Objektträgers b) an allen Stellen gut.

Destilliertes, deionisiertes, demineralisiertes oder hochreines Wasser wird kurz VE-Wasser, d. h. vollentsalztes Wasser, genannt. Deionisiertes oder demineralisiertes Wasser wird gewonnen, indem man Wasser über Ionenaustauscher leitet. Dabei werden dem Wasser alle Ionen bis auf H⁺ und OH⁻ entzogen [Band04]. Wie gezeigt enthält deionisiertes Wasser (DI-Wasser) jedoch immer noch kleine Mengen gelöster mineralischer Stoffe. In der Reinraumfertigung ist DI-Wasser vermutlich trotzdem zum Spülen von Wafern ausreichend, weil die Wafer nach dem Spülen mit DI-Wasser ohne zeitliche Verzögerung trockengeschleudert werden. Das DI-Wasser wird hierbei von den Wafern abgeschleudert und kann somit nicht auf den Waferoberflächen eintrocknen. Zum Spülen durch Abspritzen oder Tauchen ohne anschließendes Trockenschleudern sind gemäß der eigenen, gemachten Erfahrungen nur doppelt destilliertes Wasser oder besonders reines Isopropanol, z. B. Selectipur, geeignet.

2.3 Beschichtung mit Chrom

Die Chromschichten wurden mit einer Sputteranlage Z400 von Leybold auf die Dünngläser gesputtert (Bild 2.3-1).

a)



b)

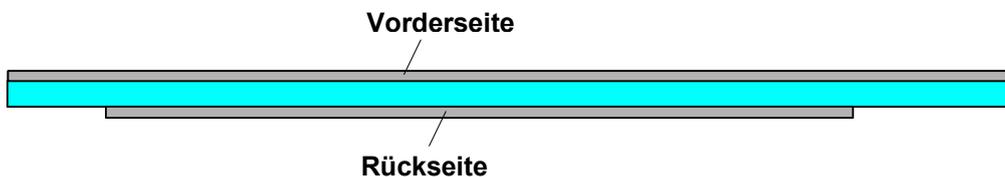


Bild 2.3-1: a) Beschichten der Glasoberseite mit 100 nm Chrom (Schritt 2). b) Beschichten der Glasunterseite mit 100 nm Chrom unter Verwendung einer Sputtermaske (Schritt 3).

Damit die Gläser beim Sputtern zentral unter dem Target liegen, wurde eine Glasaufnahme konstruiert. Diese lässt sich leicht mit einem unterseitigen Ring auf den zylinderförmigen Substratsockel der Anlage zentrieren. In eine passende, 30 µm tiefe Tasche der Glasaufnahme wurde das 50 µm starke Dünnglas eingelegt. Der Rand des Glases wurde mit dem Gewicht einer Blende auf die Oberfläche der Glasaufnahme gedrückt, um einen möglichst guten Wärmekontakt herzustellen. Durch einen guten Wärmekontakt sollte die beim Sputtern in das Glas eingebrachte hohe Wärmeenergie in die Glasaufnahme und den wassergekühlten Substratsockel der Anlage abgeleitet werden. Für die Vorder- und Rückseite des Glases wurden zwei verschiedene Blenden verwendet. Nach dem Sputtern der Glasvorderseite mit Blende A wurde das Glas gewendet. Die Glasrückseite wurde mit Blende B besputtert. Während die Vorderseite bis auf einen ca. 3 mm breiten Glasrand vollständig verchromt wurde, durfte die Rückseite nur im mittleren Bereich verchromt werden. Der Grund hierfür ist, dass auf beide Glasseiten zueinander positioniert belichtet werden musste. Auf der Glasvorderseite entstehen nach der ersten lithografischen Strukturierung Positionierkreuze, die auf der Glasrückseite sichtbar sein müssen. Auf diese Positionierkreuze können zur Strukturierung der Glasrückseite Chrommasken ausgerichtet werden.

Vor dem Sputtern der Chromschicht wurden die Gläser 30 s lang in der Z400 sputtergeätzt. Durch Sputterätzen können Verunreinigungen und aus der Luft angelagerte Wassermoleküle

von Substratoberflächen entfernt werden. Beim Sputterätzen mit Argon in der Z400 werden Substrate schnell sehr heiß. Daher wurde die ursprüngliche Sputterätzzeit von 1 min auf 30 s reduziert, um die Gläser durch die schnelle Temperaturerhöhung nicht vorzuschädigen. Anfänglich wurden die Gläser ohne Bias besputtert. Ohne Bias mit 100 nm Chrom beschichtete Gläser wiesen nach dem Sputtern eine starke Durchbiegung auf, die so aussah, dass die längeren Glaskanten des rechteckigen Substrats in Richtung zum Target gebogen waren (s. Bild 2.3-2). Diese Art der Durchbiegung bedeutete, dass die Chromschicht unter Zugspannung stand. Bei der Handhabung der Gläser in der Reinraumfertigung bereitete die Durchbiegung der Dünngläser große Schwierigkeiten. Zur Durchführung von lithografischen Schritten, müssen die Gläser flach auf Trägersubstraten aufliegen. Als Träger wurden zu Beginn oxidierte Wafer verwendet, auf welche die Gläser mit schwach haftendem Klebeband befestigt wurden. Bild 2.3-3 zeigt, dass manche der stark gewölbten Gläser hierbei zerbrochen sind. Später wurden Vakuumträger für die Gläser konstruiert. Die starke Glaswölbung machte es jedoch schwierig, die Gläser zum Belackern auf die Vakuumhalterungen anzusaugen.

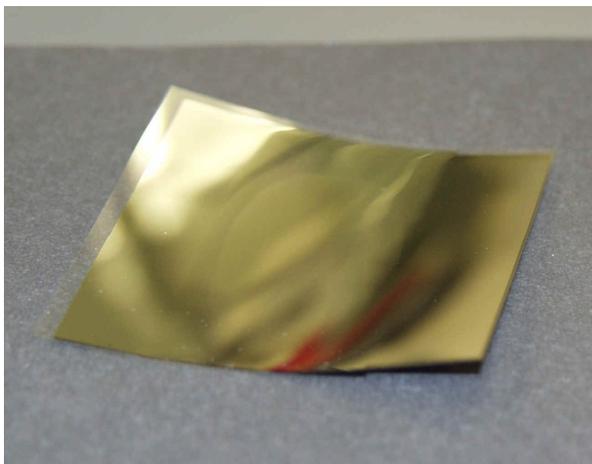


Bild 2.3-2: Stark gewölbttes Dünnglas nach dem Sputtern von 100 nm Chrom ohne Bias.

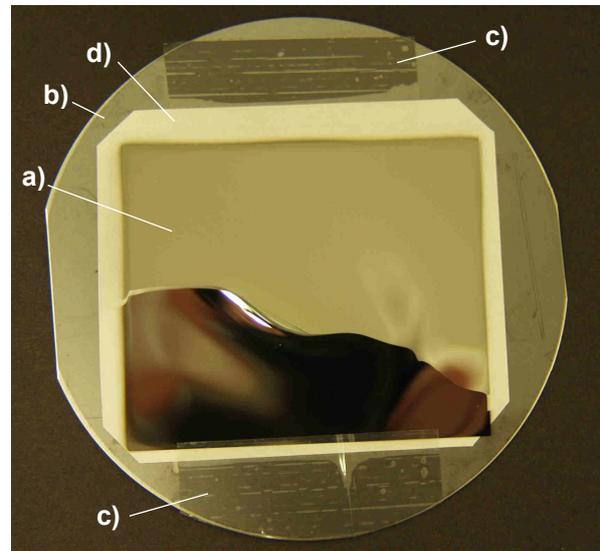


Bild 2.3-3: Dünnglas a) zerbrochen beim Aufkleben auf einem als Träger verwendeten Silizium-Wafer b); c) Klebeband; d) unterlegtes Reinraumpapier.

Ein weiterer Nachteil ergab sich beim Lackrocknen auf der Heizplatte. Die Gläser lagen nicht vollflächig auf, so dass die Gefahr bestand, dass der Fotolack ungleichmäßig erwärmt und getrocknet wurde. Außerdem stellte die starke Wölbung für das - wie sich noch herausstellte - sehr empfindliche Glas eine starke mechanische Belastung dar, die es zu vermeiden galt.

Es bestand am IMT außerdem die Möglichkeit, Dünngläser mit einer Aufdampfanlage mit Elektronenstrahlverdampfer, Univex 450 von Leybold, mit Chrom zu beschichten. Auch durch Aufdampfen aufgebrachte Chromschichten standen unter Zugspannung. Die Wölbung bedampfter Dünngläser war unwesentlich geringer als die von besputterten Gläsern. Gläser mit kaum feststellbarer Wölbung konnten erst durch Biassputtern mit der Sputteranlage Z400 erzielt werden. Hierbei wurden beim Sputtern am Target 850 V und am Substrat 50 V Biasspannung (negative Spannung am Substrat) angelegt. Das entspricht einem Verhältnis von Targetspannung zu Biasspannung von 6,47 %. Mit Biassputtern können höchstwertige Schichten mit hoher Reinheit und großer Härte sowie ohne Gaseinschlüsse hergestellt werden [Leyb89]. Auch die Möglichkeit, mit Biassputtern spannungsfreie Schichten zu erzeugen, ist bekannt.

Zur Messung der Sputterrate, d. h. der auf einem Substrat abgeschiedenen Schichtdicke pro Zeit, werden in Sputteranlagen oder Aufdampfanlagen so genannte Schwingquarze verwendet. Die Schwingfrequenz der Quarze ändert sich mit der Dicke der auf die Quarzoberfläche gesputterten oder gedampften Schichten. Beim Sputtern mit Bias muss

beachtet werden, dass die vom Schichtdickenmessgerät der Anlage angezeigte Sputterrate nicht mehr mit der Sputterrate übereinstimmt, die zuvor für das Sputtern ohne Bias bestimmt worden ist. Daher muss der so genannte Tool-Faktor 1 des Messgeräts auf die jeweilige Biasspannung angepasst werden. Mit dem Tool-Faktor 1 des Schichtdickenmessgeräts kann die vom Messgerät angezeigte auf die tatsächliche Sputterrate korrigiert werden (Kalibrierung).

Zur Korrektur des Tool-Faktors 1 wurde ein Wafer mit einer ca. 400 nm dicken Schicht Chrom mit 6,47 % Biasspannung besputtert. Die Chromschicht wurde nasschemisch zu zwei senkrecht aufeinander stehenden ‚Linealen‘ mit Teilstrichen im Abstand von 2,5 mm strukturiert (Anhang, Bild 7.3-1). Die Lineale wurden so auf dem Wafer platziert, dass sie sich genau im Mittelpunkt des Wafers kreuzten. Die Teilstriche waren 0,3 mm breit. Die Schichtdicke der aus Chrom strukturierten Teilstriche wurden mit dem Tastschnittgerät P-2 Long Scan Profiler, Tencor GmbH, Neuwied gemessen. Aus der gemessenen Chromschichtdicke und der am Messgerät der Z400 angezeigten Schichtdicke wurde der Tool-Faktor 1 für die Biasspannung 6,47 % berechnet.

Erwähnt werden soll hier auch, dass beim Sputtern mit der Z400, in der 3“-Targets eingebaut waren, die Schichtdicke auf einem zentrisch unter dem Target angeordneten 4“-Wafer vom Zentrum des Wafers bis zum Radius 45 mm um 50 % abnimmt. Bis zum Radius eines 3“-Targets bei 38,1 mm nimmt die Schichtdicke auf dem Wafer um 45 % ab. Diese starke Schichtdickenabnahme hat Konsequenzen für die Herstellung von den DMS, worauf später noch eingegangen wird.

Bei Versuchen mit 12,5 % Biasspannung (Bild 2.3-4) verlängerte sich die Sputterzeit erheblich, da mit steigender Biasspannung die Sputterrate stark abnimmt. Targets, die gesputtert werden, erhitzen sich bekanntlich stark und werden aus diesem Grunde wassergekühlt. Durch die am Substrat anliegende Biasspannung wird zum Teil auch das Substrat gesputtert. Genauer gesagt wird die auf dem Substrat sich anlagernde

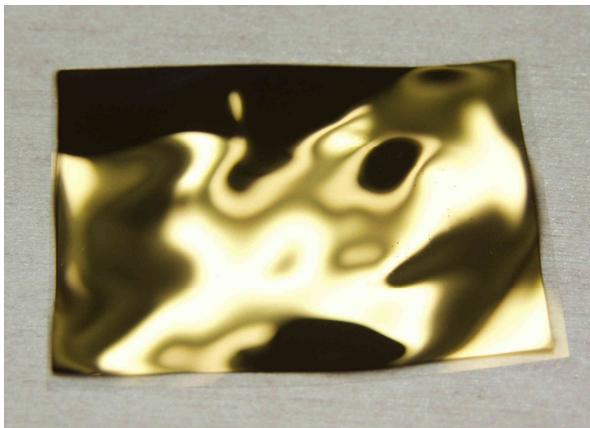


Bild 2.3-4: Stark verformtes Dünnglas, welches durch Sputtern mit 12,5 % Biasspannung mit 150 nm Chrom beschichtet wurde.

Targetschicht zum Teil wieder zerstäubt. Dabei erhitzt sich das Substrat, in diesem Fall das Dünnglas, besonders stark. Unterschiede im Wärmekontakt zur Substrataufnahme bewirkten eine unterschiedlich starke, lokale Erhitzung des Glases. Nach dem Sputtern zogen sich beim Abkühlen auf RT das Dünnglas und die aufgebraute Chromschicht, abhängig von den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) der beteiligten Werkstoffe sowie der lokalen Temperatur des Substrats zusammen. Dadurch ergaben sich unterschiedlich große Zugspannungen im Substrat, wodurch sich das Dünnglas nach dem Sputtern stark unregelmäßig verformt hatte.

2.4 Einsatz von Dünnglas in der Mikrofertigung

In der Mikrosystemtechnik werden üblicherweise Wafer zur lithografischen Strukturierung verwendet. Sämtliche Geräte einer lithografischen Reinraumfertigung sind auf Wafer verschiedener Größe ausgelegt. Am IMT konnten Wafer von 2“ bis 6“ mit den in den Geräten vorhandenen Halterungen prozessiert werden. Für das als Substrat verwendete Dünnglas waren die vorhandenen Halter jedoch ungeeignet. Wie in [Wulf01] wurden daher zunächst oxidierte 4“-Siliziumwafer als Träger für die Dünngläser verwendet. Die Gläser wurden mit schwach haftendem, transparentem Klebeband auf die Wafer geklebt. Dabei wurde ein Reinraumpapier, etwas größer als die Abmessungen des Dünnglases, zwischen den Wafer und das Dünnglas gelegt. Ohne unterlegtes Papier haften Dünngläser auf der polierten Oberfläche von Siliziumwafern stark an. Gerät zusätzlich Wasser zwischen Dünnglas und

Wafer, werden die Adhäsionskräfte noch verstärkt. Nur durch Tauchen in ein Wasserbad und seitliches Abschieben über den Waferrand kann ein Glas in solchen Fällen wieder vom Wafer gelöst werden.

Die Kreisplatten der Drucksensoren hätten theoretisch anstelle von Dünnglas auch aus Silizium durch nasschemisches Ätzen hergestellt werden können. In diesem Fall hätten die vorhandenen Halterungen und Vakuumträger der Reinraumfertigung verwendet werden können. Silizium als Werkstoff für die Kreisplatten wurde jedoch in [Wulf01] ausgeschlossen, weil Kreisplatten aus Silizium in alkalischen Medien wenig beständig sind und daher den Anforderungen des Lastenheftes nicht genügte. Messzellen aus Silizium in kommerziellen Drucksensoren werden u. a. aufgrund ihrer Unbeständigkeit in alkalischen Medien gekapselt, d. h. die Silizium-Druckmesszelle befindet sich innerhalb einer Kammer, die gefüllt ist mit einem chemisch neutralen Druckübertragungsmedium, wie z. B. Silikonöl. Die Kammer wird von einer dünnen, leicht beweglichen Edelstahl-Wellmembran verschlossen. Über die Wellmembran und das Übertragungsmedium wird der im Messmedium herrschende Druck auf die Silizium-Druckmesszelle übertragen.

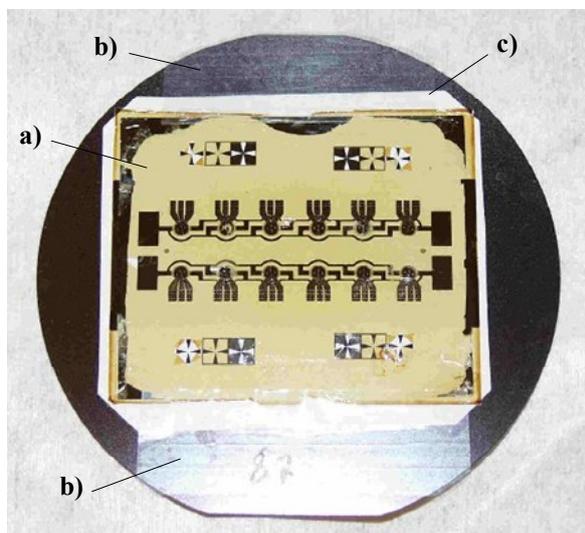


Bild 2.4-1: Glassubstrat a) mit Klebestreifen b) auf einen Siliziumwafer geklebt. Reinraumpapier c) ist unterlegt.

Es stellte sich heraus, dass die Verwendung von ‚Wafer und Klebeband‘ (s. Bild 2.4-1) als Trägersystem für Dünngläser sehr zeitaufwändig und problematisch war. Zunächst mussten Unterlegpapiere und Klebestreifen vorbereitet werden. Die Klebestreifen durften möglichst nur ca. 2–3 mm weit über die Glasränder geklebt werden. Es war notwendig, das Klebeband abschließend vorsichtig, z. B. mit der Seitenfläche einer Pinzette, anzureiben. Wurde das Klebeband zu schwach auf das Glas angerieben, war die Haftung u. U. so gering, dass sich das Glas im Entwickler, Firma HamaTech, Sternenfels, vom Wafer ablöste. Stärker haftendes Klebeband durfte nicht verwendet werden, da sich dieses anschließend nicht mehr ohne Beschädigung des Dünnglases ablösen ließ.

Weiterhin mussten die Gläser vor jedem Belichtungsschritt von den Wafern abgelöst und zum Entwickeln, Chromätzen und Strippen (Lack ablösen) erneut aufgeklebt werden. Anderenfalls hätte die Chrommaske bei der Kontaktbelichtung auf das Klebeband aufgesetzt. Dadurch wäre ein Nahabstand von 150 µm zwischen der Chrommaske und der Fotolackoberfläche entstanden. Die daraus sich ergebende Strukturauflösung von ca. 8 µm wäre für die Herstellung der 5 µm breiten DMS-Leiterbahnen zu groß gewesen. Durch das Aufliegen der Chrommaske auf den Fotolackwülsten an den Glas- und Klebefilmrändern wäre der Nahabstand sogar noch größer ausgefallen.

Beim Ablösen des Klebebands mit einer hierzu notwendigen Pinzette bildeten sich häufig Risse im Glasrand, kleinere oder größere Glasstücke brachen aus den Rändern der Gläser aus, einige Dünngläser zerbrachen vollständig. In jedem Fall bedeutete das Ablösen des Klebebands eine große mechanische Belastung und damit Vorschädigung für das Dünnglas. Ca. 80 % aller Gläser waren bereits nach der Strukturierung der ersten Chromschicht unbrauchbar. Die restlichen 20 % der Gläser zerbrachen in den beiden sich anschließenden Prozessschritten, d. h. der Strukturierung der Trägermembran und der Herstellung der DMS. Oft zerbrachen Gläser unerwartet, sie wurden im Moment des Brechens scheinbar nicht stark belastet. Es entstand der Eindruck, dass die Gläser durch die mechanischen Belastungen beim Handhaben mit dem Trägersystem ‚Wafer und Klebeband‘ zunehmend und nicht sichtbar vorgeschädigt wurden, so dass schließlich eine geringe Belastung zum Zerbrechen ausreichte.

Dünngläser werden zur Herstellung von Bildschirmen (Displays) eingesetzt. Hierbei werden mehrere Prozessschritte auf dem Dünnglas durchgeführt, wozu gehören: Vorreinigen, Aufspütern von Indiumzinnoxid (ITO), Fotolackbeschichten, Belichten, Entwickeln, Ätzen, etc.. Die Firma Optrex Europe GmbH, Ulm [Optr03] gab an, aufgrund der Zerbrechlichkeit von Dünnglas minimal 400 µm dickes Glas – und damit acht mal dickeres Glas als für die Herstellung von Glasdrucksensoren in dieser Arbeit eingesetzt – in den Abmessungen von 300 x 400 mm² zur Herstellung von Bildschirmen oder Displays zu verwenden. Weiterhin teilte die Firma mit, dass Versuche zur Prozessierung von 50 µm dünnem Glas aufgrund des festgestellten hohen Glasbruchanteils eingestellt worden waren.

2.4.1 Vorschädigung von Dünngläsern

Die hohe Bruchempfindlichkeit der verwendeten 50 µm dünnen Glassubstrate lag neben der geringen Materialstärke wahrscheinlich auch darin begründet, dass Dünngläser bei der Schott Desag AG durch Ritzen mit einem Diamantwerkzeug und Brechen auf die gewünschten Abmaße gebracht worden sind. Beim Ritzen und Brechen entstehen an den Bruchkanten Mikrorisse und Ausmuschelungen. Das Dünnglas in Bild 2.4-2 ist vermutlich an der unteren Kante geritzt worden, worauf die ca. 5 µm breite Riefe am unteren Glasrand hindeutet. Große Risse durch das Glas gehen meistens von den Mikrorissen am Glasrand aus.

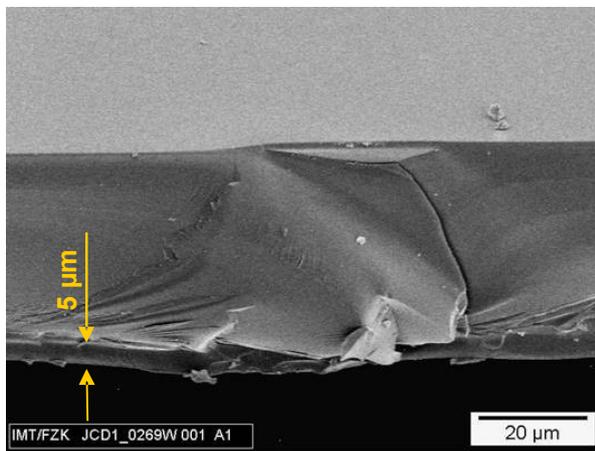


Bild 2.4-2: Mikrorisse und Ausmuschelungen am Glasrand eines Dünnglases nach dem Ritzen und Brechen (Anlieferungszustand, REM³-Aufnahme).

Um die Bruchanfälligkeit geritzter Glasplatten zu vermindern, können Ränder von Glasplatten bis zu einer Dicke von 0,3 mm durch Schleifen verrundet werden. Bei 50 µm dünnen Gläsern ist ein Verrunden der Kanten nach Aussage der Firma Schott jedoch nicht mehr möglich. Die Gläser würden den mechanischen Belastungen durch das Einspannen und die Randbearbeitung nicht standhalten.

In den bisherigen Versuchen zur Prozessierung von Dünngläsern entstand der Eindruck, dass die Gläser durch mechanische Belastungen jeglicher Art, vor allem durch die Handhabung während und zwischen den einzelnen Prozessschritten, nicht sichtbar vorgeschädigt wurden. Dies

konnte daran erkannt werden, dass die Gläser scheinbar unmotiviert in Situationen zerbrachen, in denen sie keiner besonders großen Belastung ausgesetzt waren. Dass Dünngläser durch die Handhabung tatsächlich an Oberflächenfestigkeit verlieren, wurde in einem BMBF-Projekt [Webe02] der Firma Schott Displayglas GmbH, Mainz, festgestellt (s. Bild 2.4-3).

³ REM...Rasterelektronenmikroskop

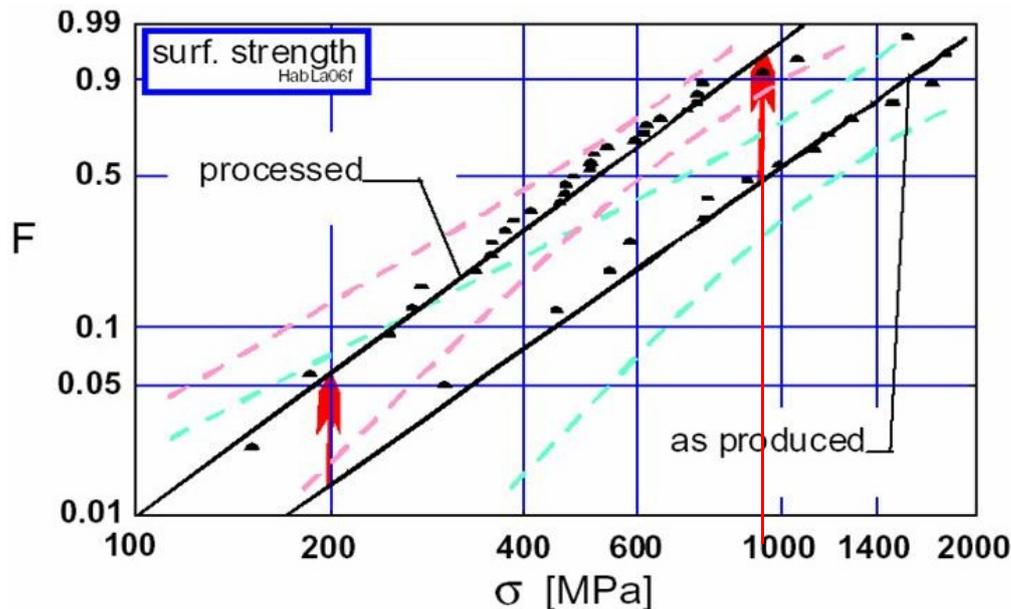


Bild 2.4-3: Oberflächenfestigkeit σ und Glasbruchhäufigkeit F von angelieferten, noch nicht gehandhabten Gläsern (as produced) und von prozessierten Gläsern (processed) aus [Webe02].

Die Untersuchungen wurden an Dünngläser mit einer Dicke von 100 μm durchgeführt. In dem Diagramm aus dem veröffentlichten BMBF-Schlussbericht ist die Oberflächenfestigkeit von Dünngläsern im Anlieferungszustand ('as produced') und nach einem durchgeführten Beschichtungsprozess ('processed') dargestellt. Im Gegensatz zu dieser Arbeit wurde in dem BMBF-Projekt nur ein Belattungsschritt mit den Teilvorgängen Auflegen, Lackschleudern, Abnehmen und Trocknen auf den Dünngläsern durchgeführt. Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, dass bei einer Oberflächenspannung von 950 MPa, die durch eine Biegebelastung der Gläser erzeugt wurde, 50 % aller Gläser im Anlieferungszustand zu Bruch gingen, während die prozessierten Gläser bei derselben Belastung bereits zu 95 % ausfielen. Die Abnahme der Oberflächenfestigkeit wurde in erster Linie auf Handhabungsprobleme der Gläser zurückgeführt. Es wurde vermutet, dass die Glasoberflächen durch den Kontakt mit den Auflageflächen der Lackschleuder oder der Heizplatte während der Prozessierung verletzt worden sind.

In dem BMBF-Projekt konnte Schott zeigen, dass die Verletzungen der Oberflächen von prozessierten Gläsern durch Aufbringen einer wenige Mikrometer dicken, transparenten Polymerschicht 'ausgeheilt' werden können. D. h. prozessierte Gläser weisen nach einer Polymerbeschichtung wieder annähernd die Festigkeitswerte von Dünngläsern im Anlieferungszustand auf. Von Schott angebotene, vorbeschichtete und damit haltbarer gemachte Dünngläser konnten zur Herstellung von Glasdrucksensoren leider nicht verwendet werden. Die Polymer-Beschichtung der Gläser hätte sich bei einer Temperatur von 400 $^{\circ}\text{C}$, die zum Ausbacken des PI-Fotolacks benötigt wurde, zersetzt.

2.4.2 Verbesserung der Glaskantenoberfläche

Um Mikrorisse an den Glasrändern bzw. deren schädigenden Einfluss auf die Bruchanfälligkeit von Gläsern zu beseitigen, wurden einige Versuche zur Verbesserung der Glaskantenoberflächen durchgeführt. Folgende Versuche wurden unternommen bzw. angedacht:

- Glasrand anätzen mit Flußsäure
- Schleifen auf Schmirgelpapier
- mit Gasflamme anschmelzen

- Polymerbeschichten, z.B. mit 2K-Epoxidharz-Kleber⁴
- Sägen mit einer Diamanttrennscheibe (Wafersäge)
- Laserschneiden

Eine Glaskante nach 5 min Anätzen mit 20 %iger Flusssäure zeigt Bild 2.4-4. Mikrorisse und gratige Bruchkanten waren nicht mehr vorhanden. Die Kantenoberfläche war muschelartig angeätzt. Da pro Glas vier Ränder geätzt werden müssen, ist der Zeitbedarf für das Anätzen von Glasrändern hoch.

Anschleifen von Gläsern mit Siliziumcarbid-Schmirgelpapier der Körnung 1200, welches auf einer rotierenden Vakuumscheibe eben auflag, war ebenfalls eine Möglichkeit zum Glätten der Kanten (Bild 2.4-5). Es war möglich, die Gläser beim Schleifen von Hand zu halten, ohne dass sie zerbrachen. Dennoch war zu vermuten, dass die Gläser hierbei hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt waren und vorgeschädigt wurden.

Anschmelzen der Glaskanten z. B. mit einer Gasflamme wurde aufgrund fehlender, spezieller Werkzeuge und zu erwartender Schwierigkeiten nicht verfolgt. Stattdessen wurde versucht, Glaskanten mit einer dünnen Schicht Klebstoff zu verstärken bzw. die Mikrorisse der Kanten mit Klebstoff auszufüllen. Dazu wurde ein dünnflüssiger Zweikomponenten-Epoxidharzkleber (2K-Epoxidharzkleber), Epotek 301, verwendet. Der Klebstoff wurde in eine 0,5 x 0,5 mm² große Nut einer geschliffenen Metallplatte gerakelt. Anschließend wurde das Glas in die klebstoffbefüllte Nut getaucht. Einige so verstärkte Gläser wurden prozessiert und erwiesen sich beim Prozessieren als weniger bruchanfällig. In Prozessschritt 5, dem Ausbacken der PI-Trägermembran bei 400 °C, verkohlte der Klebstoff an den Glaskanten. Dies hatte keinen negativen Einfluss auf die nachfolgenden Prozessschritte.

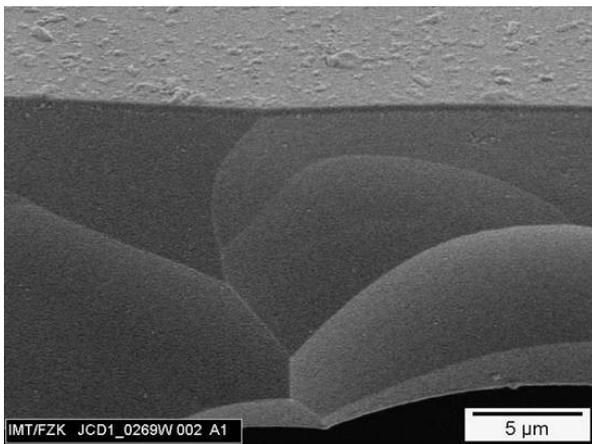


Bild 2.4-4: Glasrand nach 5 min Ätzen mit 20 %iger Flusssäure. (REM-Aufnahme)

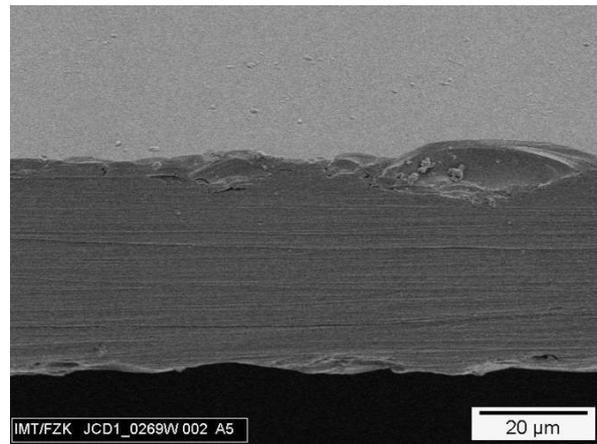


Bild 2.4-5: Mit Siliziumcarbid-Schleifpapier angeschliffener Glasrand. (REM-Aufnahme)

Besonders glatte Glaskanten ließen sich auch durch Wafersägen mit einer Diamanttrennscheibe herstellen (Bild 2.4-6). Dabei entstanden sehr kleine, 1 µm lange Mikrorisse an der Kante des Glasrandes, an der die Diamanttrennscheibe während des Schneidvorgangs ausgetreten war (Bild 2.4-7)

⁴ 2K-Klebstoff...Zwei-Komponenten-Klebstoff

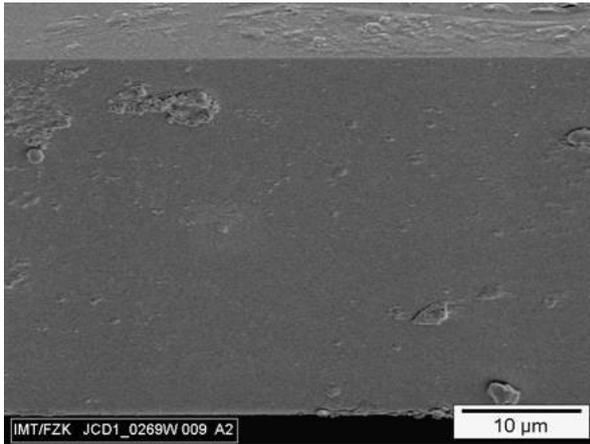


Bild 2.4-6: Mit der Diamanttrennscheibe einer Wafersäge geschnittener Glasrand. (REM-Aufnahme)

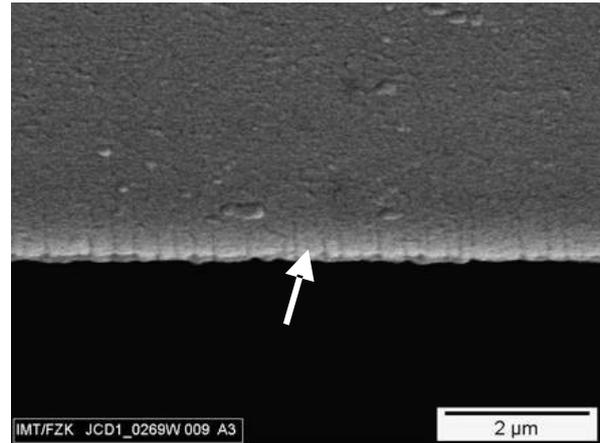


Bild 2.4-7: Ca. 1 µm lange Mikrorisse an der Glaskante, an der die Diamanttrennscheibe beim Schneiden austrat. (REM-Aufnahme)

Als Letztes wurde das Laserschneiden von Gläsern betrachtet. Es stellte sich heraus, dass die Schott Desag AG Anlagen zum Volltrenn-Laserschneiden von Gläsern entwickelt hatte



Bild 2.4-8: Volltrenn-Laserschneiden von Dünngläsern [Scho05].

und auf ihren Internetseiten anbot (Bild 2.4-8, [Scho05]). Bei diesem Verfahren erhitzt ein Laserstrahl die Glasoberfläche während gleichzeitig über eine Düse, die dem Laserstrahl nachgeführt wird, die erhitzte Glasstelle mit Druckluft sofort wieder abgekühlt wird. Durch die dabei entstehenden plötzlichen Dehnungen im Glas kann das Glas durchtrennt werden, ohne dass Mikrorisse oder Splitter entstehen. Ein abschließendes Brechen des Glases ist nicht notwendig. Das Glas wird

materialverlustfrei geteilt. Durch den Laser wird Glas nicht verdampft oder geschmolzen. Gläser in Dicken von 30 µm–1 mm können mit diesem Verfahren zerteilt werden.

Vorteile des Volltrenn-Laserschneidens:

- hohe Genauigkeit
- keine Mikrorisse, Splitter oder Ausmuschelungen
- kaum Materialverlust
- optische Kantenqualität erreichbar
- Einsatz in Reinräumen möglich

Mit dieser Methode geschnittene 50 µm dünne Gläser konnten zum damaligen Zeitpunkt jedoch nicht bei der Schott Desag AG bestellt werden. Die weiter oben beschriebenen Möglichkeiten zur Verbesserung der Kantenqualität waren aufgrund des damit verbundenen hohen Fertigungsaufwands nicht sinnvoll anwendbar.

2.4.3 Handhabung von Dünnglas

Bis hierher war klar, dass die Dünngläser generell durch mechanische Belastungen zunehmend vorgeschädigt werden. Das Trägersystem ‚Wafer und Klebeband‘ war offenbar ungeeignet zur Handhabung von Dünnglas, da spätestens nach der Hälfte der Prozessschritte sämtliche Glassubstrate zerbrochen waren. Es wurde vermutet, dass die Dünngläser vor allem durch das Aufkleben und wieder Abziehen von Klebeband stark vorgeschädigt wurden. Ein Weg, den Glasbruch zu minimieren, war die Verbesserung der Glaskanten, die aber zu aufwändig erschien. Volltrenn-lasergeschnittene Dünngläser konnten von der Schott Desag AG noch nicht bezogen werden. Also wurde versucht, neue,

geeignete Halter für die Dünnglas-Processierung zu entwickeln. Folgende Anforderungen sollte ein neuer Dünnglashalter erfüllen:

- Geringe mechanische Belastung der Gläser beim Halten während der Prozessierung
- Geringe mechanische Belastung der Gläser beim Legen auf und wieder Abnehmen vom Träger
- Universelle Einsatzfähigkeit an möglichst vielen Geräten im Reinraum

Geräte zur Prozessierung von Wafern besitzen entweder Halterungen zum Einsetzen und Klemmen von Wafern oder Vakuumhalter. Am IMT wurden beide Gerätearten in der Mikrofertigung eingesetzt. Deshalb wurden zwei unterschiedliche Dünnglashalter entwickelt.

2.4.3.1 Vakuum-Glashalter

Für Geräte im Reinraum, die mit Vakuum ausgestattet waren, wurde ein Vakuumhalter entworfen (Bilder 2.4-9 und 2.4-10). Der Vakuumhalter hat den Durchmesser eines 4"-Wafers. Auf dem Halter befindet sich ein Sockel mit 0,2 mm großen Vakuumbohrungen. Anfänglich wurde ein Vakuumhalter mit 0,3 mm großen Vakuumbohrungen getestet, die sich aber als zu groß erwiesen hatten. Über den Vakuumbohrungen bildeten sich sternförmige Risse im Dünnglas, was auf die Spannungen zurückzuführen war, die durch die wirkende Ansaugkraft im Dünnglas entstanden waren. Der Sockel des Vakuumhalters ist 2 mm hoch und besitzt kleinere Abmaße (56 x 66 mm²) als das Glas (60 x 70 mm²). Wenn das Glas mittig auf den Sockel platziert wird, haben die Gläser folglich einen 2 mm großen, allseitigen Überstand über die Ränder des Sockels. Der kleinere Sockel (56 x 66 mm²) entstand aufgrund von Erfahrungen, die mit einer ersten Vakuumhalter-Version gemacht wurden. Bei einem Überstand des Glases von nur 0,5 mm gelangte beim Lackschleudern Fotolack unter die überstehenden Glasflächen, was dazu führte, dass das Glas am Sockelrand anklebte. Teilweise zog sich der Fotolack sogar kapillar in den Spalt zwischen Glasunterseite und Sockeloberfläche. Bei einem Überstand von 2 mm traten diese Probleme nicht mehr auf.

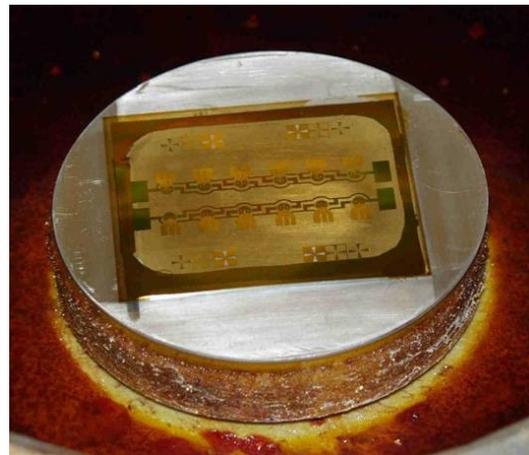
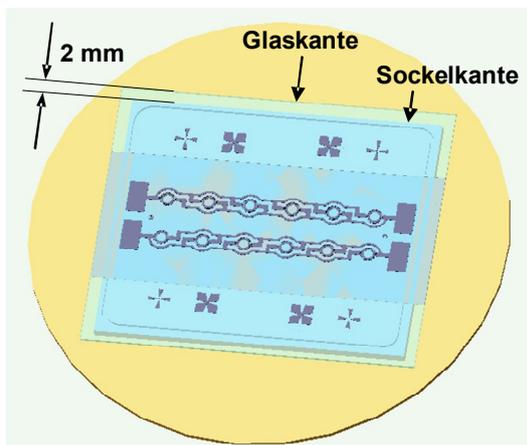


Bild 2.4-9: Ein Glassubstrat liegt auf dem Sockel des Bild 2.4-10: Vakuumhalter mit Glassubstrat auf einer Lackschleuder. Der Überstand des Glases über den Sockel beträgt 2 mm. (CAD-Bild)

Wie bereits erwähnt, haften Dünngläser auf glatten Oberflächen, wie z. B. einer polierten Waferoberfläche, fast unlösbar an, besonders wenn sich Flüssigkeit zwischen das Glas und die glatte Oberfläche zieht. Um starkes Anhaften der Gläser auf der Sockelfläche des Trägers zu verhindern, wurde die Oberfläche des Sockels durch Sandstrahlen aufgeraut. Mit Sand der Körnung 0,06–0,12 mm und einem Luftdruck von 3 bar konnte der Sockeloberfläche des Vakuumträgers eine optimale Rauigkeit verliehen werden. Wurden 4 bar zum Sandstrahlen verwendet, war die Rauigkeit der Sockeloberfläche so groß, dass sich beim Vakuumansaugen des Glases auf den Sockel deutlich ‚Spitzen‘ auf der

Glasoberfläche abzeichneten. Zu große Rauigkeitsspitzen der Sockeloberfläche hätten das Glas punktuell belasten und vorschädigen können.

Mit Wasser auf der angerauten Sockeloberfläche haftende Dünngläser ließen sich durch Schieben über den Sockelrand des Vakuumhalters leicht ablösen. Es war nicht notwendig, wie bei Dünngläsern, die auf einer Waferoberfläche anhaften, den Vakuumhalter zum Ablösen des Glases in ein Wasserbad zu tauchen.

Vorteile des Vakuumhalters:

- Gläser können auf dem herausstehenden Sockel leicht abgelegt und wieder abgehoben werden.
- Die Gefahr von Glasbruch beim Abziehen von Klebeband entfällt.
- Dünngläser werden bis zum Rand gleichmäßig belackt (keine störende Klebefolie).
- Ein 2 mm großer Überstand des Dünnglases über einen als Auflage dienenden Sockel verhindert, dass beim Lackschleudern unter das Glas gelangter Fotolack das Dünnglas an den Sockelrand bzw. auf die Sockeloberfläche ankleben lässt.
- Eine definierte Rauigkeit der Sockeloberfläche verhindert zu starkes Anhaften des Dünnglases auf dem Sockel des Vakuumhalters

2.4.3.2 Magnetfolienhalter

In der Lackschleuder von HamaTech, Sternenfels sowie in einem zur Entwicklung von PI-Fotolack verwendeten Sprühentwickler WS-400-6T2/IND, Laurell Technologies Corp., ist eine Vakuumansaugung integriert. Der Vakuum-Glashalter konnte in diesen Geräten problemlos eingesetzt werden. Andere Geräte, die zur Prozessierung der Glassubstrate benötigt wurden, wie ein HamaTech-Sprühentwickler, der für die Entwicklung von Novolacken eingesetzt wurde, und ein Sprühentwickler CPP70 von Convac Technologies, China, der zum Chromätzen verwendet wurde, waren mit Klemmaufnahmen ausgestattet. An diesen Geräten war kein Vakuum verfügbar, so dass der Vakuum-Glashalter hier nicht verwendet werden konnte. Auch zum Strippen von Novolacken konnte der Vakuumhalter nicht eingesetzt werden, da das Strippen im Becherglas durchgeführt wurde. Deshalb wurde ein weiterer Glashalter entwickelt.

Entworfen wurde ein Halter, bei dem das Dünnglas an seinem Rand von einer magnetischen Elastomerfolie (Magnetfolie) auf einem Stahlwafer gehalten wird (Bild 2.4-11). Bild 2.4-12 zeigt eine Variante der Magnetfolie, die zum Strippen von Fotolack im Becherglas benötigt wurde.

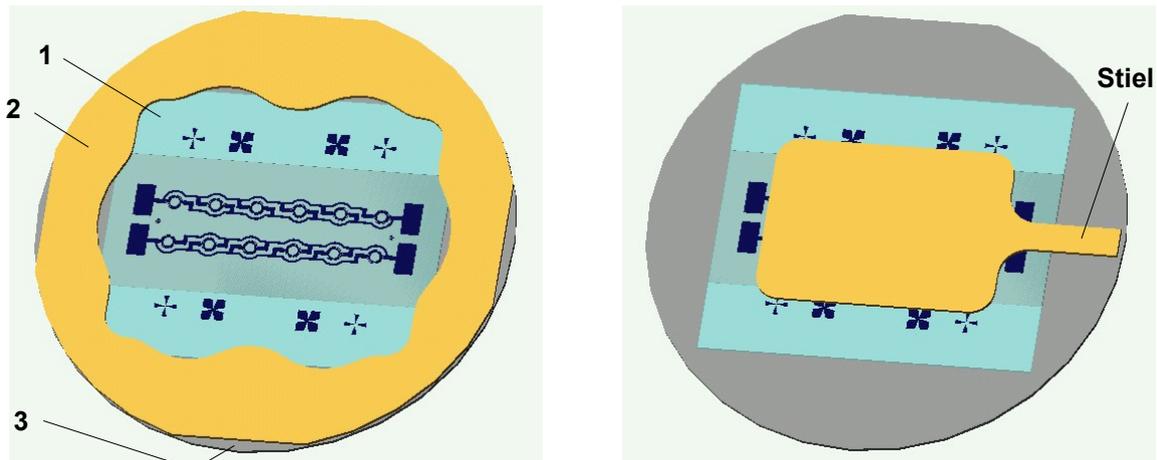


Bild 2.4-11: Dünnglas (1) gehalten von einem Rahmen Bild 2.4-12: Stahlwafer mit Magnetfolie auf Dünnglas. aus Magnetfolie (2) auf einem Wafer (3) aus St37. Verwendung: Strippen von Fotolack. Verwendung: Entwickeln und Strippen von Fotolack.

Der Wellrand der Magnetfolie in Bild 2.4-11 sollte ermöglichen, dass der Rand des Dünnglases zur genaueren Platzierung der Magnetfolie sichtbar war. Weiterhin sollte der Glasrand möglichst wenig von der Magnetfolie abgedeckt werden, da sich beim Strippen der Fotolack an den von der Magnetfolie abgedeckten Stellen des Dünnglases wesentlich langsamer auflöste. Das Strippen wurde in zwei Schritten durchgeführt. Im zweiten Schritt wurde die Magnetfolie von Bild 2.4-12 verwendet. Diese Magnetfolie ließ den Rand des Dünnglases frei, so dass zuvor abgedeckter, nicht aufgelöster Fotolack an den Glasrändern aufgelöst werden konnte. Um die Magnetfolie von Bild 2.4-12 nach dem Strippen leicht vom Glassubstrat abnehmen zu können, ist an der Magnetfolie ein ‚Stiel‘ angebracht.

Der Stahlwafer des Magnetfolienhalters wurde aus einem 1 mm dicken St37-Blech hergestellt. St37 wurde verwendet, da der Werkstoff magnetisch ist, so dass die Elastomerfolie auf dem Stahlwafer magnetisch halten konnte. Nachteilig war jedoch, dass St37 rosten kann. Weiterhin sollte das Dünnglas möglichst wenig auf dem Stahlwafer anhaften, auch wenn Wasser unter das Dünnglas gelangen würde. Daher wurde der Stahlwafer als Rostschutz vernickelt und zur Erzielung einer geringen Haftung mit einer PTFE⁵-Beschichtung versehen. Als Vorbereitung zur PTFE-Beschichtung wurden die Kanten des Wafers verrundet und der Wafer wurde allseitig sandgestrahlt. Zum Sandstrahlen ist anzumerken, dass sich dünne Bleche durch Sandstrahlen verziehen. Die sandgestrahlte Oberfläche wird verfestigt und es entstehen Druckspannungen auf der Blechoberfläche, wodurch sich die sandgestrahlte Fläche konvex wölbt. Durch gleichmäßiges Sandstrahlen von Vorder- und Rückseite eines Bleches kann ein Verzug vermieden werden. Als Rostschutz wurde nach dem Sandstrahlen eine 30 µm dicke Nickelschicht galvanisch auftragen. Der Stahlwafer wurde abschließend vollständig mit einer 30 µm dicken, schwarzen PTFE-Schicht beschichtet. Die Beschichtung wurde von der Firma Starnberger, Nidda-Borsdorf durchgeführt.

Es wurden zwei PTFE-beschichtete Stahlwafer hergestellt. Die Magnetfolienhalter erwiesen sich als äußerst nützlich beim Entwickeln und Strippen von Fotolacken. Obwohl die Magnetfolie nur schwach auf dem Stahlwafer haftete, löste sie sich auch bei hohen Umdrehungszahlen, z. B. beim Trockenschleudern von Glassubstraten, nicht ab. Das Dünnglas haftete durch unter das Glas gelangtes Wasser am PTFE-beschichteten Stahlwafer nur schwach an. Vom Stahlwafer abgenommen wurden Glassubstrate, indem sie zunächst weit über den Rand des Stahlwafers geschoben und dann abgezogen wurden.

⁵ PTFE...Polytetrafluorethylen

2.4.3.3 Allgemeine Regeln zur Handhabung von Dünngläsern

Dünngläser dürfen nicht – wie in der Mikrofertigung sonst üblich – mit Waferpinzetten angefasst werden. Diese Pinzetten lassen sich nur am empfindlichen Glasrand ansetzen. Aufgrund der geringen Fläche von Waferpinzetten besteht außerdem die Gefahr, das Glas zu fest zu greifen und an diesem Stellen vorzuschädigen. Empfehlenswert ist das Greifen von Dünngläsern mit drei Fingern, wobei Reinraumhandschuhe zu tragen sind. Mit den Fingern sollte das Dünnglas jedoch nicht am Glasrand sondern weiter im Glasinneren gefasst werden, um die empfindlichen Glasränder möglichst wenig zu belasten. Vakuumpinzetten zum Handhaben von Dünnglas wurden in dieser Arbeit nicht eingesetzt, da Dünngläser auf feuchten Trägeroberflächen stark haften und auch mit Vakuumpinzetten nicht abgehoben werden können.

Weiterhin können zum Handtieren Reinraumpapierstücke verwendet werden, die sich unter die Dünngläser schieben lassen. In einer 4“-Waferbox - für einen einzelnen Wafer - liegende Gläser können aufgrund der statischen Aufladung des Kunststoffes an den Boxendeckel gezogen werden. Am Deckel einer Waferbox haftende Gläser lassen sich ablösen, indem der Deckel in Richtung des Glases gewölbt und an einer sich ablösenden Seite des Glases Reinraumpapier unter das Glas geschoben wird.

Auf glatten Flächen, z. B. von Wafern, haften Dünngläser besonders in Verbindung mit Flüssigkeiten zwischen dem Dünnglas und dem Wafer stark an. Durch längeres Tauchen der Gläser unter Wasser werden die Gläser auf dem Wafer beweglich und lassen sich über den Waferrand abschieben. Das Dünnglas darf hierbei nicht gezogen werden, da es durch Zugspannungen leicht beschädigt oder vorgeschädigt wird. Am besten wird das Glas mit zwei Fingern, die in Glasmitte angesetzt werden, über den Waferrand geschoben. Nachdem das Dünnglas relativ weit über den Waferrand absteht, lässt es sich greifen und leicht vom Wafer abziehen.

Dünngläser haften nach dem Kontaktbelichten abhängig vom verwendeten Fotolack mehr oder weniger stark an der Chrommaske. Vor allem mit Dickschichtlack beschichtete Dünngläser, z. B. 20 µm dicke Schichten des PI-Fotolacks Durimide 7020, können nach dem

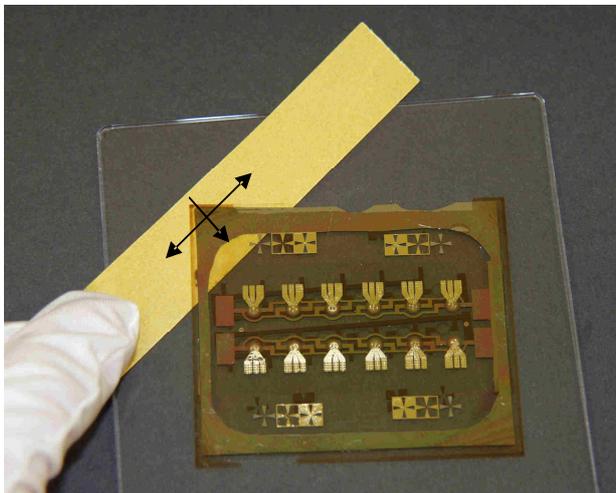


Bild 2.4-13: Ablösen eines Dünnglases von einer Chrommaske mit Hilfe eines Streifens nichthaftender Folie, z. B. von Doppelklebeband.

Belichten mit Vakuumkontakt stark an der Chrommaske kleben. Das Ablösen von Wafern, die nach dem Kontaktbelichten an Chrommasken haften, gelingt problemlos. Dünngläser dagegen können beim Ablösen zerbrechen. Eine gute Möglichkeit, ein Dünnglas von einer Chrommaske abzulösen, besteht darin, einen Streifen Antihafffolie, z. B. 12 x13 cm² groß, unter das Glas zu schieben (Bild 2.4-13). Als nichthaftende Folie kann z. B. die Deckfolie von Doppelklebeband verwendet werden. Hartnäckig klebende Glasstellen können durch Ziehen des Streifens und gleichzeitiges leichtes Drücken in Richtung der klebenden Stelle gelöst werden. Hochbiegen des Glases zum Ablösen schädigt das Glas vor und muss vermieden werden.

2.4.4 Belichten von Dünnglas-Substraten

Obwohl die Dünngläser nach den im vorhergehenden Kapitel genannten Regeln und mit den beschriebenen Glashaltern gehandhabt wurden, war der Glasbruch weiterhin so hoch, dass die Fertigung von Drucksensoren auf Dünnglassubstraten sinnlos erschien. Nach erneuter Betrachtung der Fertigungsschritte wurde vermutet, dass der bleibend hohe Glasbruchanteil

auf mechanische Belastungen beim Kontaktbelichten zurückzuführen war. Belichtet wurde mit einem Maskenausrichter MA6 (Mask Aligner) der Firma Karl Süss. Beim Ausrichten im MA6 wurden die Glassubstrate auf eine Vakuumplatte angesaugt. Die Chrommaske wurde mittels Weichkontakt an das Glassubstrat gepresst, wobei mit Weichkontakt das Andrücken der Chrommaske mit geringer Federkraft ohne Vakuumansaugung gemeint ist.

Zwei Ursachen sind für die starke mechanische Belastung und die daraus resultierende Vorschädigung der Dünngläser bei der Belichtung mit dem Kontaktbelichter MA6 zu nennen: Erstens wurde von den Technikern, die am IMT das MA6 bedienen, während des Ausrichtens die Chrommaske oft mehrfach auf das Dünnglas abgesenkt und wieder abgehoben. Problematisch hierbei ist, dass einige der verwendeten Fotolacke, wie z. B. AZ 4533, ein Dickschichtlack von Clariant GmbH, Wiesbaden, an der Chrommaske haften können. Wurde ein Versatz der Positionierkreuze von Substrat und Maske festgestellt, wurde die auf das Glassubstrat gepresste Chrommaske wieder abgehoben. Hierbei blieben die Gläser häufig an der Chrommaske haften und wurden von der Vakuumplatte des Kontaktbelichters abgerissen. Die Gläser mussten in solchen Fällen wie in [Kapitel 2.4.3.3](#) beschrieben mit einem Antihafband von der Chrommaske getrennt werden und dazu dem MA6 entnommen werden. Es kam vor, dass Glassubstrate bis zu einer guten Ausrichtung der Chrommaske auf dem Glassubstrat mehrfach aus dem MA6 genommen und wieder von der Chrommaske abgelöst werden mussten. Durch diesen hohen Aufwand beim Kontaktbelichten wurde dem Techniker am MA6 viel Geduld und hohe Aufmerksamkeit beim Ablösen der Dünnglassubstrate abverlangt. Eine starke mechanische Beanspruchung der Gläser war aufgrund der notwendigen Vorgehensweise unvermeidbar.

Zweitens entstehen beim Belacken an den Kanten der Dünngläser Lackrandwülste, wie dies auch vom Belacken von Wafern bekannt ist. Lackrandwülste lassen sich von Wafern, die auf einer Lackschleuder rotieren, z. B. durch Aufspritzen von Lösungsmittel auf den Wafferrand, entfernen. Da das Glassubstrat jedoch rechteckig war, konnte diese Methode beim Glassubstrat nicht angewandt und somit die Lackrandwülste nicht entfernt werden. Die Lackrandwülste ragten deutlich über die belackte Oberfläche des Glassubstrats hinaus. Der Andruck der Chrommaske wirkte deshalb bei der Kontaktbelichtung hauptsächlich auf die Lackrandwülste ein. Die dort befindlichen rissempfindlichen Glasränder der Dünngläser wurden hierdurch besonders stark beansprucht.

Um die große mechanische Belastung der Glassubstrate beim Kontaktbelichten zu beseitigen, die durch das mehrfache Anhaften und wieder Ablösen der Gläser von der Chrommaske sowie insbesondere durch den Andruck der Chrommaske auf die Lackrandwülste der Gläser gegeben war, wurde ein einfacher Ausrichter konstruiert, der in [Bild 2.4-14](#) dargestellt ist. Der Ausrichter besteht aus einer Justierplatte mit einem Sockel zur Aufnahme der Substrate und vier magnetisch auf der Justierplatte gehaltenen Messschrauben. Im Sockel befindet sich eine Vakuumplatte, auf welcher das Substrat angesaugt werden kann. Mit den Messschrauben kann eine Chrommaske, die auf das Substrat gelegt wird, mikrometergenau auf dem durch Ansaugen fixierten Substrat verschoben werden. Damit die Positionierkreuze der Chrommaske exakt auf die Positionierkreuze des Substrats ausgerichtet werden können, müssen die Kreuze während des Ausrichtens mit Hilfe eines Lichtmikroskops vergrößert werden. Daher wurde der Ausrichter so konstruiert, dass er unter eines der Lichtmikroskope ,Modell Leitz Ergolus, Firma Carl Zeiss Jena, passt, die im Reinraum des IMT zur Verfügung standen. Genauer gesagt kann die Justierplatte des Ausrichters in den Fahrtisch eines Lichtmikroskops eingesetzt werden (s. Bilder im Anhang [Kapitel 7.4](#)). Die Vakuumplatte, auf welche das Glassubstrat beim Ausrichten ausgesaugt wird, ist kleiner als das Glassubstrat. Die Glasränder mit ihren Lackrandwülsten stehen ca. 3 mm weit über die Ränder der Vakuumplatte hinaus und haben über einem Absatz im Auflagerahmen ca. 1 mm Luft (s. [Bild 2.4-15](#)).

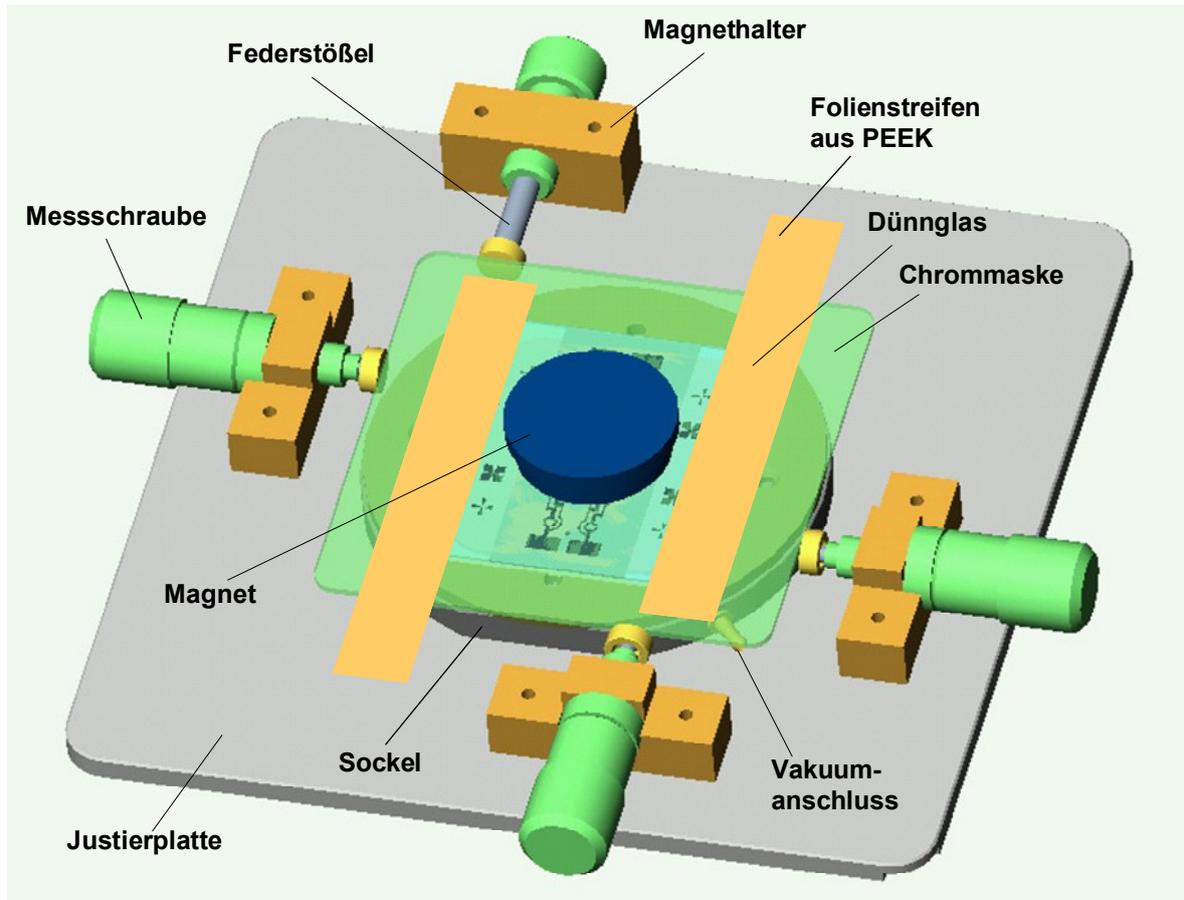


Bild 2.4-14: Einfacher Maskenausrichter zur Ausrichtung von Chrommasken auf Glassubstraten oder Wafern unter einem Lichtmikroskop.

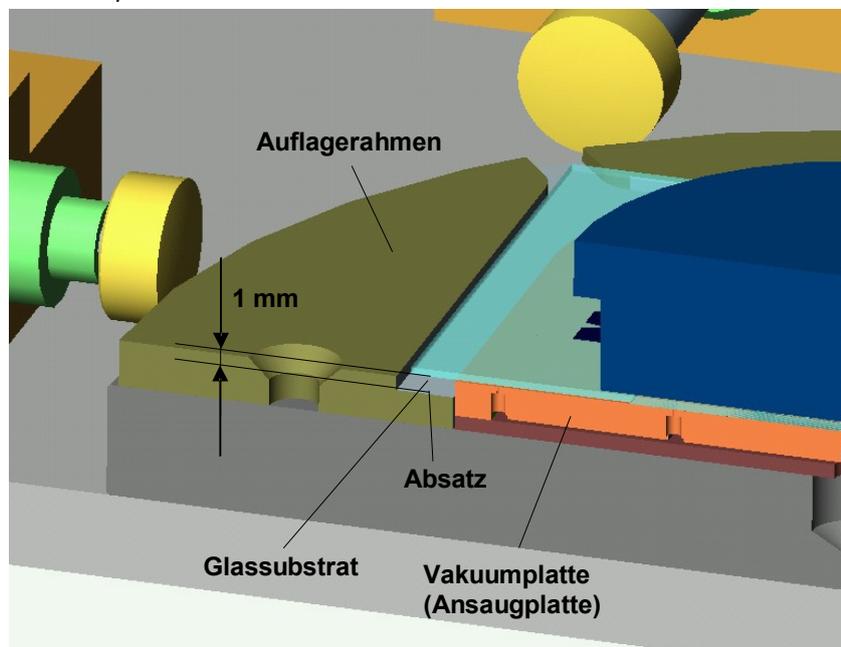


Bild 2.4-15: Schnitt durch den Maskenausrichter. Die Ränder des Glassubstrats ragen über den Rand der Vakuumpalte hinaus und haben ca. 1 mm Luft bis zur Fläche eines Absatzes im Auflagerahmen.

Um ein Ankleben des Glassubstrats an der Chrommaske zu verhindern, wurden $30\ \mu\text{m}$ dünne Folienstreifen aus PEEK als Abstandsfolie zwischen das Substrat und die Maske gelegt. Die Chrommaske konnte daher beim Ausrichten reibungsarm auf den Folienstreifen gleiten ohne das Substrat zu berühren. Sobald die Chrommaske auf dem Substrat ausgerichtet war, konnten die Folienstreifen unter der Chrommaske herausgezogen werden.

Abschließend wurde kontrolliert, ob sich beim Herausziehen der Folienstreifen die Chrommaske verschoben hatte. Ein geringer Versatz konnte in der Regel auch ohne Abstandsfolien mit Hilfe der Messschrauben noch korrigiert werden.

Die ausgerichtete Chrommaske wurde mit zwei Fingern leicht angedrückt und ein Magnet wurde in die Mitte der Chrommaske gesetzt. Da die Vakuumpalte ferromagnetisch ist, wird sie durch die Chrommaske und das Glassubstrat hindurch von dem Magnet angezogen. Das händische Niederhalten der Chrommaske ist notwendig, damit die Vakuumpalte nicht an den Magneten springt, bevor der Magnet auf die Chrommaske aufgesetzt werden kann. Zwischen Magnet und Vakuumpalte fixiert, wurde das Substrat mit der darauf ausgerichteten Chrommaske zu einem LH5-Belichter von Karl Süss transportiert und in eine einfache Vakuumvorrichtung eingelegt. Nach dem Anlegen von Vakuum konnte der Magnet von der Chrommaske abgenommen und das Glassubstrat positioniert belichtet werden.

Mit Hilfe des neu konstruierten Ausrichters konnten die eingangs genannten Ursachen für die starke Vorschädigung der Glassubstrate beseitigt werden. Mehrfaches Ankleben und wieder Ablösen des Glassubstrats von der Chrommaske wurde durch die erwähnten PEEK-Streifen, die zwischen das Glassubstrat und die Chrommaske gelegt wurden, vermieden. Die Belastung der Glassubstratkanten durch den Andruck der Chrommaske auf die Lackrandwülste entfiel, da die Dünnglasränder 3 mm weit über den Rand der Ansaugplatte hinaus standen. Die durch den Fotolack verdickten Glasränder wurden daher von der angepressten Chrommaske lediglich in den nach unten freien Raum gebogen und nicht wie zuvor im MA6 an die Vakuumpalte gepresst und dabei beschädigt. Mit diesem selbst konstruierten Ausrichter wurden erfolgreich viele positionierte Belichtungen auf Dünnglassubstraten durchgeführt. Nicht nur Glassubstrate sondern auch Wafer konnten mit dem Ausrichter problemlos positioniert belichtet werden. Glasbruch kam seit der Verwendung des Ausrichters nur noch selten vor und ließ sich in solchen Fällen auf manuelle Handhabungsfehler zurückführen.

2.5 Heiz- und Chromhafringe

Heiz- und Chromhafringe wurden durch nasschemisches Ätzen hergestellt (Bild 2.5-1).

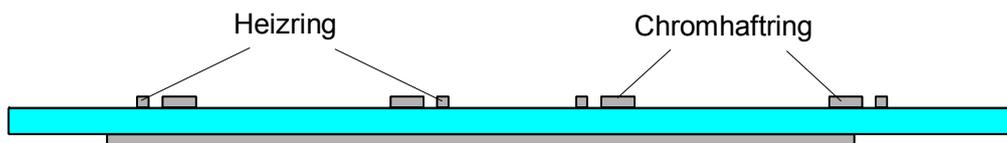


Bild 2.5-1: Strukturierung der Chromschicht auf der Glasoberseite durch nasschemisches Ätzen (Schritt 4).

Hierzu wurde die Chromschicht (Schritt 2) auf der Glasoberseite mit dem Dickschichtlack AZ 4533 überzogen. An der Lackschleuder wurden hierzu die Parameter 5000/15/60 eingestellt, was abgekürzt steht für Solldrehzahl: 5000 U/min, Dauer der gleichmäßigen Beschleunigung auf die Solldrehzahl: 15 s, gesamte Dauer der Belackung: 60 s. Es ergab sich eine Fotolackschichtdicke von 2,9 μm . Nach dem Belichten wurde der Fotolack an den belichteten Stellen aufgelöst. Die nicht mit Fotolack abgedeckte Chromschicht wurde mit einer Chromätze aus Cerammoniumnitrat und Essigsäure entfernt.

Beim Aufschleudern von Fotolack AZ 4533 bildeten sich kurze ‚Haare‘ aus Fotolack entlang der Glasränder. Bei der Beschichtung von 4“-Wafers mit denselben Parametern trat dieser Effekt nicht auf, was daran liegen könnte, dass Wafer im Gegensatz zu Dünngläsern verrundete Kanten besitzen, von denen sich der Fotolack möglicherweise besser ablösen kann. Die Lackhaare waren nach dem Trocknen des Lackes sehr spröde, brachen beim Handhaben der Dünngläser ab und gelangten dabei teilweise auf die Substratoberfläche. Im nächsten Arbeitsschritt hätte die Chrommaske beim Kontaktbelichten auf den Lackhaaren

aufgesetzt, wodurch sich ein unerwünschter Nahabstand der Chrommaske zum Fotolack ergeben hätte. Das Dünnglas wäre außerdem durch den Andruck der Chrommaske auf die Lackhaare und Lackpartikel punktuell belastet worden. Daher wurden die Lackhaare nach dem Trocknen des Fotolacks von den Glasrändern mit einem feinen Pinsel abgestreift. Auch beim Abstreifen der Dünnglasränder gelangten jedoch Lackhaare auf die Glasoberfläche. Die Lackhaare ließen sich durch Abblasen mit Stickstoff nicht vollständig von der Fotolack-Oberfläche entfernen, weil die Lackpartikel aufgrund von statischer Aufladung stark hafteten. Vollständig von Lackhaaren und Lackpartikeln befreien ließen sich die Glassubstrat-oberflächen jedoch ebenfalls mit Hilfe des Pinsels durch Abfegen.

In Bild 2.5-2 ist ein Magnetfolienhalter zu sehen, der anfänglich zum Chromätzen im Sprühentwickler CPP70 eingesetzt worden war. Zum Chromätzen wurden Glassubstrate in [Wulf01] mit Klebeband auf einem Wafer befestigt, wobei die Dünngläser mit einem Reinraumpapier unterlegt waren. In [Wulf01] wurde beobachtet, dass die Chromschicht auf der Unterseite des Glases beim Chromätzen am Rand angeätzt wurde. Daher enthält die zum Chromätzen verwendete Magnetfolie – im Gegensatz zur Magnetfolie für das Entwickeln von Fotolack (Bild 2.4-10) – ein ‚Fenster‘, das so bemessen wurde, dass die Magnetfolie umlaufend einen ca. 5 mm breiten Rand des Dünnglases abdeckt. Dennoch konnte der Glasrand von der Magnetfolie nicht ausreichend gegen die Chromätze abgedichtet werden. Es fand ein Ätzangriff auf der Glasunterseite statt, der sich bis in Bereiche erstreckte, in denen später Strukturen aus der Chromschicht geätzt werden sollte. Weiterhin traten teilweise störende, galvanische Effekte auf, die dadurch gekennzeichnet waren, dass auf der zu ätzenden Substratoberfläche Chromflecken stehen blieben, die sich auch durch verlängertes Chromätzen nicht auflösen ließen. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass sich beim Chromätzen ein galvanisches Element aus den magnetischen Partikeln in der Magnetfolie und der Chromschicht gebildet hatte, bei dem die Chromschicht das edlere Element und die magnetischen Partikel die sich auflösende Anode darstellten. Das galvanische Element könnte auch aus dem Stahl St37 des mit Teflon beschichteten Stahlwafers und der Chromschicht des Dünnglases bestanden haben. Dies wäre möglich gewesen, da die PTFE-Schicht am Rand des Stahlwafers beschädigt worden war.

Aufgrund der Schwierigkeiten mit dem Magnetfolienhalter wurde ein weiteres Trägersystem eingeführt, das aus einer 0,8 mm dicken Folie aus dem Silikonkautschuk Elastosil M4601, Wacker Chemie GmbH, und einem oxidierten 4“-Siliziumwafer bestand (Bild 2.5-3).

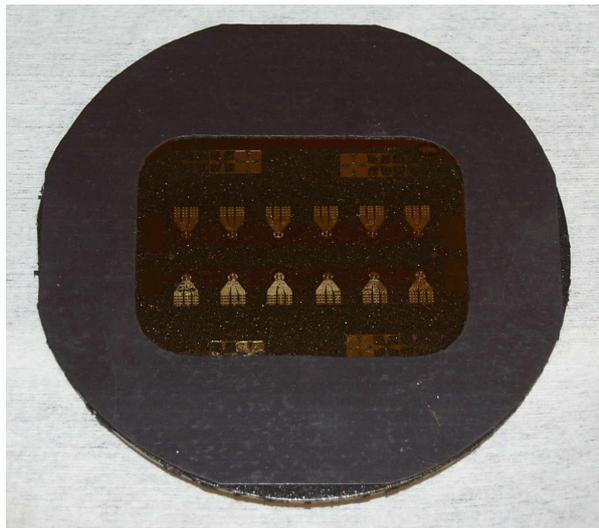


Bild 2.5-2: Dünnglas befestigt auf einem Magnetfolienhalter. Das Trägersystem wurde anfänglich verwendet zum Chromätzen.

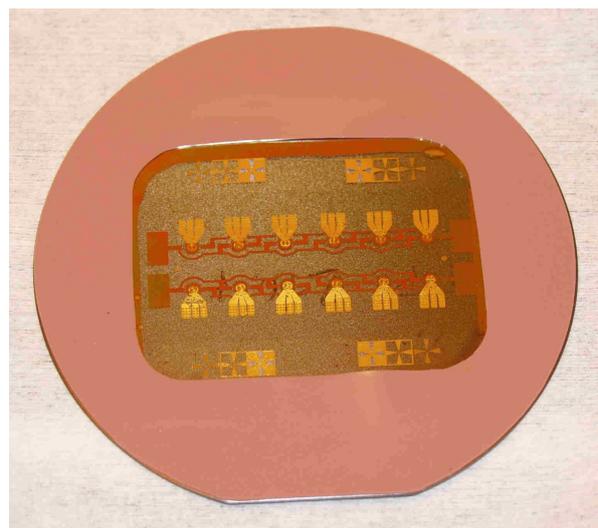


Bild 2.5-3: Dünnglas mit Silikonfolie auf einem Silizium-Wafer befestigt. Das Trägersystem wurde zum Chromätzen verwendet.

Das Fenster in der Silikonkautschukfolie, im Folgenden kurz ‚Silikonfolie‘, ist kleiner als die Fläche des Glassubstrates, so dass die Glasränder ca. 5 mm weit von der Silikonfolie abgedeckt werden. Da die Silikonfolie sehr gut auf dem Siliziumwafer und dem Glas haftet,

war die Glasunterseite beim Chromätzen wasserdicht abgedichtet und wurde nicht angeätzt. Die wohl galvanischen Effekte traten nicht mehr auf.

Nach dem Chromätzen wurde der Fotolack vom Glassubstrat entfernt (Strippen). Hierzu wurde ein Magnetfolienhalter verwendet. In Bild 2.5-4 ist ein Glassubstrat dargestellt, das in einem Becherglas mit Entferner (Lackentferner, Remover), AZ 400 K, Firma Microchemicals, gestrippt wurde. Der Stahlwafer mit der Magnetfolie befindet sich in einem Drahtgestell und konnte mit Hilfe des Gestells bequem in das Becherglas abgesenkt werden. Wie weiterhin im Bild erkennbar ist, reichen kleine Magnetfolienstücke aus, das Glassubstrat zu halten. Unter der Magnetfolie löste sich der Fotolack nur sehr langsam auf. Zum vollständigen Strippen musste das Glassubstrat daher aus dem Entferner genommen, die Magnetfolie auf dem Glassubstrat versetzt und das Glassubstrat erneut in den Entferner abgesenkt werden. Ebenfalls als praktisch erwiesen hatte es sich, das Glassubstrat zum Strippen auf einer PEEK-Scheibe mit Metallstücken, Quadratkantstücken aus Edelstahl, zu beschweren und mit Hilfe eines abgesägten Waferständers in ein Becherglas auf einem Magnetrührer zu stellen (Bild 2.5-5).

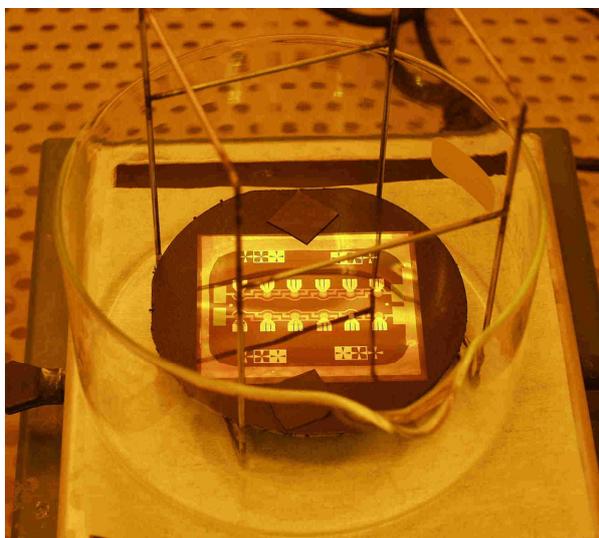


Bild 2.5-4: Magnetfolienhalter mit Glassubstrat zum Strippen mit Hilfe eines Drahtgestells in ein Becherglas gestellt. Das Becherglas steht auf einem Schwenker.

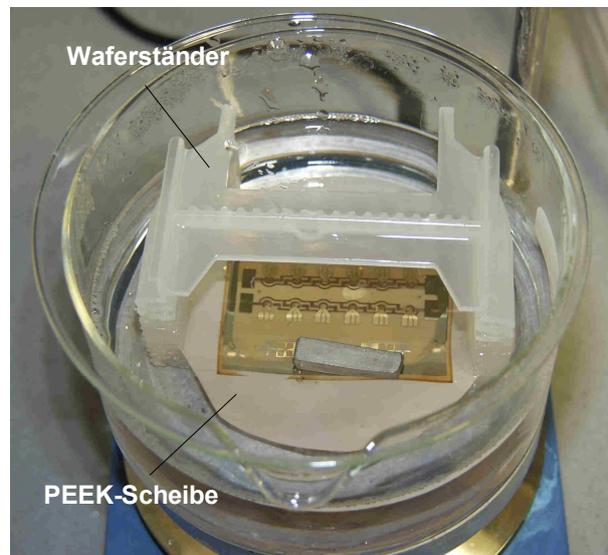


Bild 2.5-5: Glassubstrat beschwert mit Edelstahl-quadratkantstücken auf einer PEEK-Scheibe zum Strippen in einem Becherglas auf einem Magnetrührer.

Anfänglich wurden Glassubstrate auf einem oxidierten Siliziumwafer mit Metallstücken beschwert. Nach häufiger Benutzung löste sich jedoch die Oxidschicht der oxidierten Siliziumwafer in der Kalilauge AZ 400 K auf, so dass die Siliziumwafer anschließend stark von der Lauge angegriffen wurden. Daher wurden im Folgenden PEEK-Scheiben verwendet.

2.6 Trägermembran aus Polyimid

Beim Aufschleudern des PI-Fotolacks Durimide 7505 auf das Glassubstrat zur Herstellung der PI-Trägermembran (Bild 2.6-1) wurde beobachtet, dass die Lackschicht in den

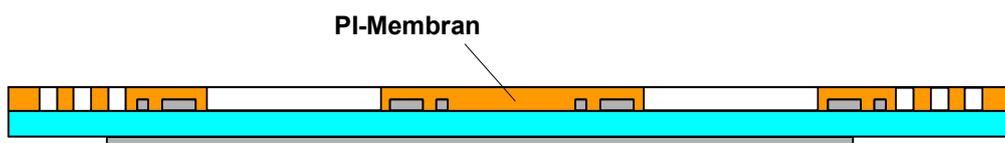


Bild 2.6-1: Strukturierte Trägermembran aus PI (Schritt 5).

Randbereichen des Dünnglases offensichtlich aufgrund von Verunreinigungen der Glasoberfläche aufriss und sich in einzelne, kleinere Lackflächen und -tropfen zusammenschloss. Als Ursache hierfür konnte die Silikonfolie, die beim Chromätzen zur

Befestigung der Glassubstrate auf einem Siliziumwafer verwendet worden war, ausgemacht werden. Vom Tampondrucken mit Stempeln aus Silikongummi ist bekannt, dass Silikonöl aus dem Gummi austritt [Tamp04]. Dieser Effekt ist beim Tampondrucken nicht störend sondern im Gegenteil sogar erwünscht, da die zu übertragende Druckfarbe auf dem Silikonöl schlecht haftet und deshalb leicht von der Stempeloberfläche abgegeben wird. Aus neuen Tamponstempeln tritt oft zu viel Silikonöl aus. Neue Tamponstempel werden daher anfänglich noch mit Alkohol von Silikonöl gesäubert. Basierend auf diesem Vorwissen war davon ausgegangen worden, dass auch die selbst gegossene Silikonfolie überschüssiges Silikonöl enthalten würde, welches die Haftung von Durimide 7505 auf dem Glassubstrat beeinträchtigen würde. Vor ihrer ersten Verwendung wurde die Silikonfolie daher mit Isopropanol und Aceton gereinigt. Dennoch ging beim Chromätzen offenbar zuviel Silikonöl auf das Glas über. Da die Oberflächenenergie des Silikonöls gering ist, zog sich das Durimide 7505 nach dem Aufschleudern über den silikonölverschmutzten Bereichen des Dünnglases zu einzelnen Lackflächen und -tropfen zusammen. Es wurde versucht, die Silikonfolie erneut zu reinigen, was aber keine Verbesserung erbrachte. Dennoch sollte das Trägersystem Wafer und Silikonfolie weiter verwendet werden. Daher wurde versucht, die Glassubstrate nach dem Chromätzen, d. h. nach dem Kontakt mit der Silikonfolie, zu reinigen. Probiert wurde die Reinigung der Dünngläser mit Lösungsmitteln, die zur Entwicklung von Durimidelacken verwendet werden. QZ 3501 wird hierbei als Entwickler und QZ 3512 als Rinse verwendet (Arch Chemicals GmbH, Ratingen). Gereinigt wurden die Dünngläser in einem Sprühentwickler mit einem Programm zur Entwicklung von PI-Fotolacken. Im Sprühentwickler konnte für die Dünngläser der in Kapitel 2.4.3-1 vorgestellte Vakuumhalter eingesetzt werden. Die Chemikalien zur Entwicklung von PI-Fotolacken erwiesen sich als sehr gute Lösungsmittel für das Silikonöl im verwendeten Silikonkautschuk. Die Dünngläser konnten nach dem Reinigungsschritt ohne Schwierigkeiten mit Durimide 7505 belackt werden.

2.7 Herstellung der Dehnungsmessstreifen

2.7.1 Nasschemisches Ätzen von DMS

In den Vorgängerarbeiten [Mart98] und [Wulf01] wurden die DMS (Bild 2.7-1) durch nasschemisches Ätzen von Chrom und Gold hergestellt.

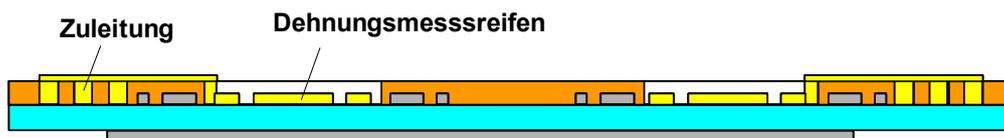


Bild 2.7-1: DMS und Zuleitungen wurden durch Aufdampfen von Chrom/Gold auf strukturierten Abhebelack und anschließendes Strippen des Fotolacks erzeugt (Schritt 6).

D. h. die Oberfläche des Substrats wurde zunächst mit einer 5 nm dicken Chromhaftschrift und mit einer 100 nm dicken Goldschicht bedampft. Dann wurde Fotolack AZ 4533 auf der Goldschicht so strukturiert, dass die herzustellenden DMS abgedeckt waren. In [Wulf01] wurde angegeben, dass der Fotolack AZ 4533 beim nasschemischen Ätzen der Metallschichten unregelmäßig unterätzt wurde. Die DMS hatten eine Sollbreite von 5 μm . Es ergaben sich jedoch schwankende Leiterbahnbreiten von 2 bis 3 μm . Dies hatte zur Folge, dass die DMS untereinander stark schwankende Widerstandswerte hatten, was zu stark streuenden Nullsignalen der Drucksensoren geführt hätte. Das Nullsignal und der Temperaturkoeffizient von DMS-Brückschaltungen kommerziell erhältlicher Drucksensoren mit Metallfolien- oder Dünnschicht-DMS werden durch Lasertrimmen von Kompensationswiderständen, die als Leiterbahnen neben den DMS angeordnet sind, abgeglichen. In dem bisherigen Drucksensorkonzept sind Kompensationswiderstände jedoch nicht vorgesehen. Weiterhin könnten an besonders großen Einschnürungen in den DMS-Leiterbahnen beim

Durchgang von Strom so genannte ‚heiße Punkte‘ entstehen. Eine Temperatur-Differenz zwischen den DMS-Widerständen von Bruchteilen eines Kelvin führt jedoch bereits zu einer recht großen Veränderung des Nullsignals [Ort83].

Die Erfahrungen aus [Wulf01] wurden in einem Versuch nachvollzogen. Auf einen Silizium-Wafer wurden 5 nm Chrom als Haftschrift und 60 nm Gold gesputtert. Anschließend wurde eine DMS-Ätzmaske aus dem Fotolack AZ 4533 auf dem Wafer strukturiert. In Bild 2.7-2 sind unterschiedlich weit fortgeschrittene Stadien die Unterätzung des Fotolacks AZ 4533 nach dem Ätzen der Goldschicht mit einer I_2/Kal -Lösung⁶ erkennbar. An der Stelle 1) liegt keine Unterätzung vor. Die Goldschicht zwischen den Leiterbahnen ist noch nicht vollständig entfernt. Die Leiterbahnbreite beträgt 5 μm . An der Stelle 2) ist die Goldschicht links von der Leiterbahn bereits aufgelöst und eine Unterätzung von der linken Seite her ist erfolgt. Die Leiterbahn ist nur noch 3 μm breit. Eine beidseitig unterätzte Leiterbahn ist an der Stelle 3) zu sehen. Die Leiterbahnbreite beträgt an dieser Stelle nur noch 2 μm . Die relativ weite Unterätzung von AZ 4533 könnte damit erklärt werden, dass Gold im Allgemeinen eine schlechte Lackhaftung besitzt im Gegensatz zu Metallen wie beispielsweise Aluminium und Titan. Bild 2.7-3 zeigt denselben Wafer nach der Entfernung der Chromhaftschrift mit Chromätze.

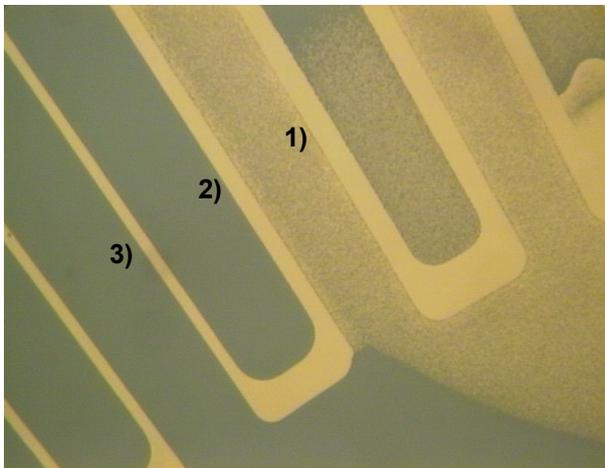


Bild 2.7-2: Siliziumwafer mit 5 nm Chrom und 60 nm Gold. Verschiedene Stadien der Unterätzung des im Bild bereits gestrippten Fotolacks AZ 4533: 1) Leiterbahn nicht unterätzt, 2) Unterätzung von links, 3) Leiterbahn beidseitig unterätzt.

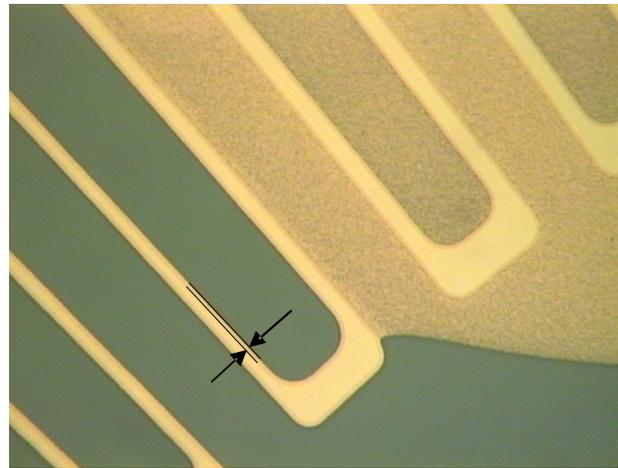


Bild 2.7-3: Siliziumwafer mit 5 nm Chrom und 60 nm Gold. Unterätzung von Gold nach dem Chromätzen sichtbar als tiefgelbe Ränder (s. Pfeile) entlang der DMS-Leiterbahnen.

Die Ränder der Leiterbahnen in Bild 2.7-3 sind ca. 0,5–1,0 μm weit tiefgelb verfärbt, was eventuell darauf hindeutet, dass die Goldschicht von der Chromätze unterätzt worden ist. Zur Entfernung der 5 nm dünnen Chromhaftschrift würde sich daher eher ein Trockenätzschritt empfehlen. Andererseits ist eine 5 μm dünne Chromhaftschrift nichtleitend, beeinträchtigt daher die Funktion der DMS nicht und kann auf dem Substrat belassen werden.

2.7.2 Abheben von DMS

Um kleine Strukturen mit geringen Abweichungen von der Struktursollbreite herzustellen, eignet sich das Abhebeverfahren (Lift-off-Verfahren). In [Wulf01] wurde an einem Dünnglas gezeigt, dass mit diesem Verfahren DMS-Leiterbahnen mit geringer Abweichung von der Sollbreite 5 μm , hergestellt werden können. Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Abhebeverfahren für die Herstellung von DMS anzuwenden und stabile Prozessparameter zu finden.

Abhebelacke ermöglichen die Herstellung von Lackkanten mit Unterschnitt zum Abheben dünner und dicker aufgedampfter, gesputterter oder mit PECVD aufgebrachtter Filme, wie

⁶ I_2/Kal -Lösung...Iod/Kaliumjodid-Lösung in Wasser, Lugolsche Lösung

z.B. Metalle, $a\text{-Si:H}^7$, $a\text{-SiN:H}^8$ etc.. Mit einem Metallfilm beschichteter herkömmlicher Fotolack kann normalerweise nicht mehr von der Substratoberfläche entfernt werden, da Entferner den unter der Beschichtung hermetisch abgeschotteten Fotolack nicht angreifen und auflösen kann. Bei Abhebelacken sind die Lackkanten nach dem Entwickeln des Fotolacks jedoch unterschritten (Bild 2.7-4) und werden beim Bedampfen nicht beschichtet. Beim Strippen können daher die Lackkanten des Abhebelacks vom Entferner angegriffen werden. Von dort ausgehend kann den Fotolack vollständig vom Substrat entfernt werden.

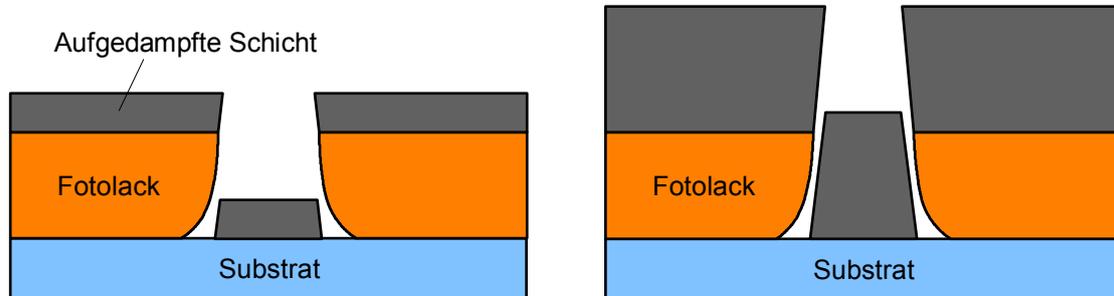


Bild 2.7-4: Links: Abhebelack mit aufgedampfter Schicht. Die Lackwände sind unbeschichtet. Rechts: Die aufgedampfte Schicht ist dicker als die Fotolackschicht. Dennoch bleiben die Lackwände unbeschichtet. In beiden Fällen kann der Fotolack wieder vom Substrat abgehoben (entfernt) werden.

2.7.3 Abhebelack AZ 5214 E

Zunächst wurde der Abhebelack AZ 5214 E von Firma Clariant, Wiesbaden verwendet. Es handelt sich hierbei um einen Bildumkehrlack, d. h. die Unterschnittstruktur wird nach einem zweiten Belichtungsschritt durch Bildumkehrbacken erzeugt. Es können V- und T-förmige Unterschnittprofile mit diesem Lack hergestellt werden (s. Bild 2.7-5). Versuche wurden mit T-Profil-Strukturen unternommen.

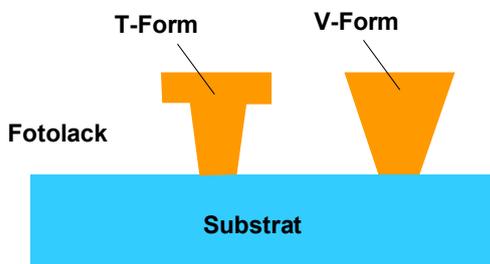


Bild 2.7-5: V- und T-Unterschnittprofile eines Abhebelacks.

Um T-förmige Lackstrukturen zu erhalten, muss der Lack zunächst mit einer kleinen Strahlungs-dosis vollflächig flutbelichtet werden. Durch die geringe Strahlungs-dosis wird nur die oberste Lackschicht ausreichend belichtet und dort eine fotoaktive Komponente freigesetzt. Anschließend folgt der Umkehrbackschritt. Dabei muss die Umkehrback-Temperatur von 119 °C über $2\text{ min} \pm 1\text{ °C}$ genau eingehalten werden. Beim Umkehrbacken wird im Fotolack ein Vernetzungsmittel aktiviert, welches zusammen mit der fotoaktiven Komponente den Fotolack an den belichteten Stellen unlösbar vernetzt. Durch das Flutbelichten und Umkehrbacken wird daher die Lackoberfläche stark vernetzt. Durch die nachfolgende Bildbelichtung werden die belichteten, noch nicht vernetzten Stellen für den Entwickler löslich gemacht. Zur Bildbelichtung wird daher eine Positivmaske benötigt. Weil jedoch die Lackoberfläche bereits stark vernetzt ist, wird zum Durchbrechen der obersten Schicht eine hohe Lichtdosis von $> 200\text{ mJ/cm}^2$ benötigt. Die Lackkanten erhalten beim Entwickeln einen T-förmigen Unterschnitt, da die Löslichkeit der obersten Lackschicht besonders gering ist und darunter mit zunehmender Lacktiefe ansteigt.

Vorhandene Parameter für den Abhebelack AZ 5214 E wurden zunächst auf oxidierten 4"-Silizium-Wafern getestet (Tabelle 2.7-1, alte Parameter). Die Parameter wurden dann zum

⁷ a-Si:H...amorphes, hydrogenisiertes Silizium

⁸ a-SiN:H...amorphes, hydrogenisiertes Siliziumnitrid

Abheben auf Glassubstraten angewendet. Vor der Belackung wurden die Substrate mit HMDS⁹ bekeimt, um eine gute Haftung des Abhebelacks auf dem Substrat zu erzielen. Nach der Entwicklung des Abhebelacks wurden die Substrate mit 5 nm Chrom und 100 nm Gold in einer Univex 450 Aufdampfanlage mit Elektronenstrahlverdampfer von Firma Leybold, Köln bedampft. Im Gegensatz zu den guten Abhebeergebnissen auf den oxidierten Wafern waren die Abhebeergebnisse auf den Glassubstraten schlecht. Zwischen den DMS-Leiterbahnen blieben zusammenhängende Metallfilme stehen, die auch durch längeres Strippen nicht entfernt werden konnten (Bild 2.7-6). Die notwendigen Stripptimepunkte betrug oft mehrere Tage. Teilweise wurde eine schlechte Haftung der Goldschicht auf der Chromschicht beobachtet (Bild 2.7-7), wohingegen die Chromschicht in solchen Fällen gut auf dem Glassubstrat haftete. Die schlechte Haftung der Goldschicht auf der zur Haftvermittlung aufgetragenen Chromschicht kann eventuell auf die Bekeimung der Substratoberfläche mit HMDS vor der Belackung erklärt werden. Die bekanntlich hohe Haftfähigkeit der dünnen Chromhaftschrift wurde durch das HMDS vermutlich kaum beeinträchtigt. Dagegen wurde die ohnehin schlechte Haftfähigkeit von Gold von den HMDS-Keimen, welche durch die dünne Chromhaftschrift nicht vollständig abgedeckt waren, vermindert.

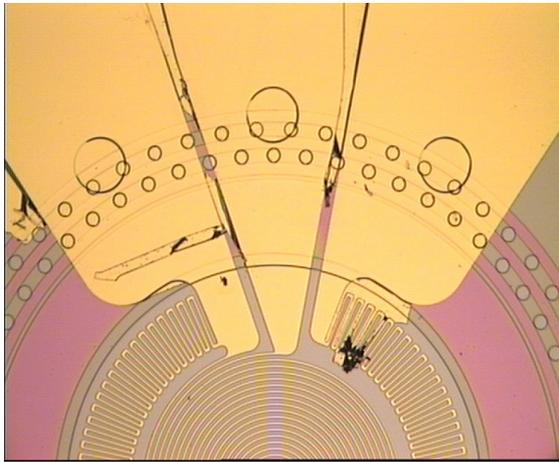


Bild 2.7-6: Glassubstrat mit Metallfilmresten in DMS-Strukturen, die mit dem Abhebelack AZ 5214 E hergestellt worden war.

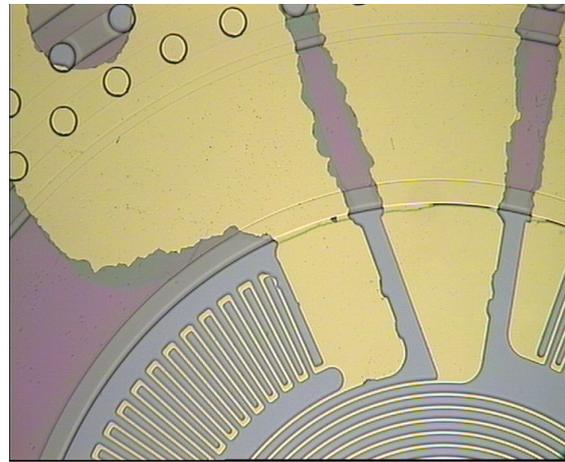


Bild 2.7-7: Geringe Haftung von Gold auf Chrom in DMS-Strukturen hergestellt mit AZ 5214 E auf einem Glassubstrat, das zuvor HMDS bekeimt worden war.

Die zum Abheben auf oxidierten Wafern ermittelten Parameter waren offenbar nicht unverändert zur Prozessierung auf Dünnglass-Substraten übertragbar. Deshalb wurden für die Dünngläser neue Parameter bestimmt (Tabelle 2.7-1, Neue Parameter). Auf die Bekeimung mit HMDS wurde im Folgenden verzichtet. Weiterhin wurde die Entwicklertemperatur nach einem Hinweis der Vertriebsfirma des Abhebelacks, Micro-Chemicals GmbH, Ulm von 38 °C auf 28 °C reduziert, um eine längere Entwicklungszeit und somit ein größeres Prozessfenster zu erhalten. Versuche wurden auf oxidierten Siliziumwafern und Glassubstraten durchgeführt. Da die DMS später auf einer PI-Schicht hergestellt werden sollten, wurden die Substrate vor dem Abheben der DMS mit einer PI-Schicht versehen. Es ergaben sich stark unterschiedliche Entwicklungszeiten abhängig vom Werkstoff des Substrats. Bei sonst gleichen Prozessparametern betrug auf Siliziumwafern mit PI-Schicht die Entwicklungszeit 4:10 min. Für Abheben auf Dünnglasssubstraten mit PI-Schicht waren 2:40 min Entwicklungszeit notwendig. Die differierenden Entwicklungszeiten des Abhebelacks auf Glassubstraten mit PI und auf oxidierten Siliziumwafern mit PI können mit der unterschiedlich starken Reflexion der Substrate beim Belichten erklärt werden. Das Strippen dauerte mit den neuen Parametern ca. 6 Stunden. In der weiteren Fertigung von Drucksensoren auf Dünnglasssubstraten konnten auch mit den neuen Parametern häufig keine zufrieden stellenden Abhebeergebnisse erzielt werden. Kollegen, die mit dem gleichen

⁹ HMDS...Hexamethyldisiloxan

Lack auf oxidierten Wafern arbeiten, bestätigten ebenfalls schlecht wiederholbare Ergebnisse.

	Alte Parameter	Neue Parameter	Neue Parameter
Substrat	Oxidierter Siliziumwafer	Oxidierter Siliziumwafer (mit PI-Schicht)	Dünnglassubstrat (mit PI-Schicht)
Bekeimen	HMDS, 30 min	—	—
Belacken	5000/15/60	5000/15/60	5000/15/60
Lackschichtdicke	1,7 µm	1,7 µm	1,7 µm
Fotolack trocknen	110 °C, 50 s	110 °C, 50 s	110 °C, 50 s
Flutbelichtung	10 mJ/cm ²	10 mJ/cm ²	10 mJ/cm ²
Bildumkehrbacken	119 °C, 2 min	119 °C, 2 min	119 °C, 2 min
Strukturbelichten	300 mJ/cm ²	250 mJ/cm ²	250 mJ/cm ²
Entwickeln	AZ400 K : H ₂ O = 1:4 38 °C, 80 s	AZ400 K : H ₂ O = 1:4 28 °C, 4:10 min	AZ400 K : H ₂ O = 1:4 28 °C, 2:40 min
Bedampfen	5 nm Chrom, 100 nm Gold	5 nm Chrom, 100 nm Gold	5 nm Chrom, 100 nm Gold

Tabelle 2.7-1: Parameter für den Abhebelack AZ 5214 E.

Als Grund für die Schwierigkeiten mit dem Abhebelack AZ 5214 E sind die engen Toleranzen der Prozessparameter zu nennen, die vermutlich nicht exakt eingehalten werden konnten. Besonders kritisch beim Prozessieren von AZ 5214 E ist die Flutbelichtung mit 10 mJ/cm². Dies ging aus einem Versuch hervor, in dem bei sonst gleichen Parametern eine Erhöhung der Flutbelichtung von 8 mJ/cm² auf 10 mJ/cm² eine Verlängerung der Entwicklungszeit des Lackes um 1:20 min bewirkte. Die äußerst geringe Belichtungs-dosis von 10 mJ/cm² für das Flutbelichten konnte mit den vorhandenen Belichtern, MA6 oder LH5, nur ungenau eingehalten werden, da aufgrund der hohen Belichtungsintensität der Geräte eine sehr kurze Belichtungszeit eingestellt werden musste. Mit Hilfe eines Absorbers hätte die Flutbelichtungszeit verlängert und so die Flutbelichtungs-dosis genauer eingehalten werden können. Hierauf wird in [Kapitel 2.7.4.1](#) noch näher eingegangen. Weiterhin konnte vielleicht die ebenfalls kritische Umkehrbacktemperatur von 119 °C nicht genau auf ± 1 °C eingehalten werden. Ein weiterer Nachteil dieses Abhebelacks ist seine vergleichsweise aufwändige Prozessierung. Der Lack muss zwei Mal belichtet und zwei Mal gebacken werden.

Nachteile von AZ 5214 E (T-Profil-Verfahren)

- Geringe Flutbelichtungsdosis von 10mJ/cm²
- Enge Toleranz der Umkehrback-Temperatur: 119°C ±1°C, 50 s
- 2x Belichten, 2x Backen notwendig

Beschichtet wurden die Substrate in den Abhebeversuchen mit einer Aufdampfanlage Univex 450. Versuche, den Lack mit der Sputteranlage Z400 von Leybold zu besputtern, waren gescheitert. Der Lack wurde beim Sputtern zu heiß und ‚verbrannte‘, d. h. er warf Blasen aufgrund der beim Sputtern entstehenden hohen Temperaturen. Auch durch Einstellen einer sehr geringen Sputterrate oder durch Variation des Arbeitsdruckes konnte die entstehende Temperatur auf der Substratoberfläche nicht wesentlich vermindert werden. Auf weitere Versuche mit diesem Fotolack wurde aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten verzichtet. Ein weiterer Abhebelack wurde im Folgenden ausprobiert.

2.7.4 Abhebelack AR-P 5350

Der Lack AR-P 5350 der Firma Allresist, Strausberg, ist ein positiv zu belichtender Abhebelack, jedoch im Gegensatz zum AZ 5214 E kein Bildumkehrabhebelack. Lackstrukturen mit Unterschnitt können daher in einem Belichtungs- und Backschritt hergestellt werden. Die Firma Allresist empfahl folgende Prozessparameter, die nicht aus dem im Internet verfügbaren Datenblatt des Fotolacks hervorgingen:

- Strukturbelichtung: 40–60 mJ/cm²
- Heizplatte: 95–100 °C; 2 min
- Entwicklungszeit: 30–60 s mit Entwickler AR 300-35
- Strippzeit bei RT: 30–60 s mit Entferner AR 300-70

Auch für den AR-P 5350 wird eine relativ geringe Belichtungs-dosis zur Strukturbelichtung benötigt, die allerdings immerhin 4–6-mal größer ist als die Belichtungs-dosis zur Flutbelichtung des Fotolacks AZ 5214 E und daher genauer eingehalten werden konnte. Wie schon erwähnt waren die Abhebeergebnisse von AZ 5214 E nicht stabil, weil die besonders kritische Belichtungs-dosis für die Flutbelichtung von 10 mJ/cm² an den verfügbaren Belichtern ohne Absorber nicht exakt eingehalten werden konnte. Im Folgenden wurden zunächst Überlegungen zur erzielbaren Genauigkeit der Belichtungs-dosis angestellt.

2.7.4.1 Dosisfehler beim Belichten

Das Ausrichten der Glassubstrate erfolgte mit dem in [Kapitel 2.4.4](#) beschriebenen, für die Belichtung von Dünnglassubstraten konstruierten Maskenausrichter. Als Belichter wurde ein LH5 verwendet, dessen UV-Strahlung von einer Quecksilberdampf-lampe erzeugt wird. Es ist bekannt, dass Quecksilberdampf-lampen stetig an Intensität verlieren. Deshalb wurde am IMT von Reinraumtechnikern die Belichtungsleistung des LH5 alle 30 Tage gemessen und am Belichter protokolliert. In allen Versuchen mit dem Abhebelack AZ 5214 E wurde mit diesen am Belichter angegebenen und bis zu 30 Tage alten Intensitätswerten gearbeitet. Bei der Durchsicht der dokumentierten Intensitätswerte zeigte sich, dass in einem betrachteten Zeitraum von 16 Monaten die Belichtungsleistung alle 30 Tage um durchschnittlich 3,36 % gesunken war, wobei die Standardabweichung 4,73 % betrug. Dies deckte sich mit der später gemachten Beobachtung, dass bei der Durchführung von Belichtungsserien am selben Tag mit einem Zeitabstand von vielleicht 8 h festgestellt wurde, dass sich die Belichtungsintensität der dauernd eingeschalteten Quecksilberdampf-lampe um ca. 4 % geändert hatte. Die maximal vorkommende Abnahme der Belichtungsleistung nach 30 Tagen im betrachteten Zeitraum betrug sogar 15 %. Das bedeutet, dass bei Verwendung der am Belichter notierten Intensitätswerte eine Dosisabweichung von bis zu 15 % pro Belichtung möglich war.

Zu dem ‚30-Tage-Intensitätsmessfehler‘ muss noch der Fehler addiert werden, der sich durch die Einstellgenauigkeit der Belichtungszeit am LH5 ergibt. Die kleinste einstellbare Zeiteinheit am LH5 beträgt 0,1 s, wodurch sich ein Einstellfehler von maximal $\pm 0,05$ s ergeben kann. In der Tabelle 2.7-2 sind für vorgegebene Belichtungs-dosen jeweils die ungünstigsten Werte der Belichtungsintensität des LH5 angegeben, so dass sich jeweils der maximal mögliche Einstellfehler von 0,05 s ergibt.

Belichtungsdosis	[mJ/cm ²]	10	20	30	40	50	60
Angenommene Belichtungsintensität des LH5	[mW/cm ²]	28,58	30,77	28,57	29,63	30,30	29,27
Benötigte Belichtungszeit	[sek]	0,3499	0,6499	1,0499	1,3499	1,6499	2,0499
Einstellbare Belichtungszeit	[sek]	0,3	0,6	1,0	1,3	1,6	2,0
Einstellfehler	[sek]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Einstellfehler	[%]	14,26%	7,68%	4,75%	3,70%	3,02%	2,43%
Maximaler, bisher festgestellter 30-Tage- Intensitätsmessfehler	[%]	15,12%	15,12%	15,12%	15,12%	15,12%	15,12%
Gesamtfehler	[%]	29,38%	22,80%	19,87%	18,82%	18,14%	17,55%

Tabelle 2.7-2: Maximal mögliche Gesamtfehler der Belichtungsdosis beim Belichten mit einem LH5 abhängig von der vorgegebenen Belichtungsdosis.

Bezogen auf die benötigte Belichtungszeit kann der Einstellfehler in Prozent angegeben werden und beträgt bei einer Belichtungsdosis von 10 mJ/cm² bis zu 14,26%. Zusammen mit dem 30-Tage-Intensitätsmessfehler ergibt sich bei einer gewünschten Belichtungsdosis von 10 mJ/cm², die der Flutbelichtungsdosis des Abhebelacks AZ 5214 E entspricht, ein möglicher maximaler Gesamtfehler der Belichtungsdosis von ca. 29%. Die besonders bei kleinen Belichtungs Dosen am LH5 ohne Absorber möglichen großen Belichtungsfehler könnten eine Erklärung für die nicht konstanten Ergebnisse mit dem Abhebelack AZ 5214 E sein.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde im Weiteren bei der Belichtung des neuen Abhebelacks AR-P 5350 die Lichtintensität des Belichters unmittelbar vor jeder kleinen Serie von Belichtungen gemessen. Auf Anfrage beim Lacklieferanten Allresist war zu erfahren, dass Allresist bei eigenen Versuchen mit Abhebelacken die Lichtintensität ebenfalls vor jeder Belichtung neu bestimmt.

2.7.4.2 Abhebeversuche mit AR-P 5350

In den ersten Versuchen zur Bestimmung der optimalen Prozessparameter von AR-P 5350 wurde der Fotolack in einem Becherglas auf einem Schüttler entwickelt. Folgende Parameter wurden verwendet:

- Belacken 4000/15/60
- Lackschichtdicke 1,7 µm
- Fotolack trocknen 100 °C, 5 min (Heizplatte)
- Strukturbelichten 60 mJ/cm²
- Entwickeln 55–60 s, Becherglas mit Entwickler AR 300-35 im Verhältnis 1:1 mit DI-Wasser gemischt.

Aus den ersten REM-Bildern (Bild 2.7-8 und 2.7-9) wurde geschlossen, dass die gewählten Parameter für die Prozessierung des Abhebelacks auf Dünngläsern geeignet wären. Die Lackkanten waren glatt und ein Unterschnitt war gut erkennbar

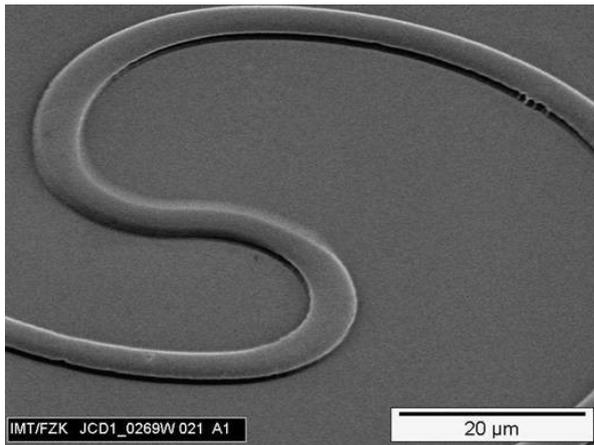


Bild 2.7-8: REM-Aufnahme von strukturiertem Abhebelack AR-P 5350 auf Dünnglas.

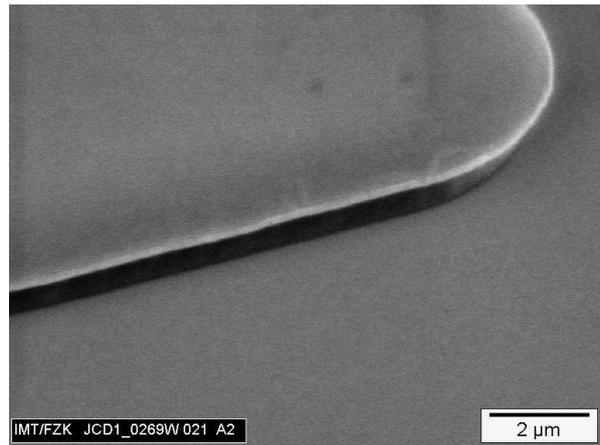


Bild 2.7-9: Querschnitt im Abhebelack AR-P 5350, Vergrößerung von Bild 2.7-8 (REM-Aufnahme).

Danach wurde der Fotolack mit 10 nm Chrom und 100 nm Gold beschichtet. Die Metallschichten wurden mit einer MED 010 REM-Sputteranlage von Balzers aufgebracht, da die Bedampfungsanlage Univex 450 zu diesem Zeitpunkt außer Betrieb stand. Die Dünnglasssubstrate ließen sich ohne Blasenbildung im Fotolack beschichten. Allerdings wiesen die DMS-Leiterbahnen nach dem Strippen Filmränder auf (Bild 2.7-10), was darauf hindeutete, dass entweder das Querschnittprofil des Abhebelacks zu klein war oder der Lack beim Sputtern zu heiß geworden war, so dass die überhängenden Lackkanten zurückgeschmolzen waren und die Lackseitenwände beim Sputtern nicht vollständig beschattet waren.

Da die Dünnglasssubstrate teuer waren und lange Lieferzeiten hatten, wurden im Folgenden auch Abhebeversuche auf oxidierten Siliziumwafern durchgeführt. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass die Abhebeparameter sich für Siliziumwafer und Dünnglasssubstrate beim Abhebelack AR-P 5350 nicht wesentlich voneinander unterscheiden würden. Um das Querschnittprofil zu vergrößern, wurde auf oxidierten Siliziumwafern die Entwicklungszeit auf 65–75 s verlängert. In den REM-Aufnahmen des entwickelten Fotolacks war das Querschnittprofil dennoch kaum erkennbar und die Lackränder waren aufgrund der längeren Entwicklungszeiten ausgefranst. So hergestellte DMS auf Siliziumwafern wiesen wiederum dünne Filmränder auf (Bild 2.7-11).

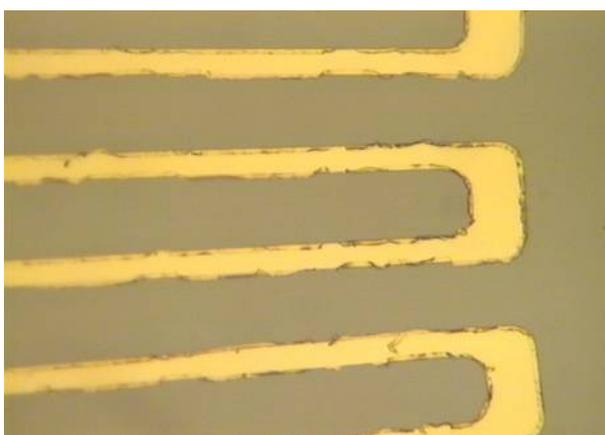


Bild 2.7-10: Filmränder an 5 µm breiten DMS-Leiterbahnen aus Gold auf einem Dünnglasssubstrat, das mit einer MED 010 besputtert wurde.



Bild 2.7-11: Filmränder sind als schwarze Linien an 5 µm breiten DMS-Leiterbahnen aus Gold auf einem Siliziumwafer erkennbar. Der Pfeil zeigt auf einen abgelösten Filmrand. Der Wafer wurde mit einer MED 010 besputtert.

Um bessere und stabilere Abhebeergebnisse zu erzielen, wurde von der bislang praktizierten Entwicklung des Lackes im Becherglas übergegangen zur Sprühentwicklung. Angestrebt wurde eine Entwicklungszeit um eine Minute, um das Prozessfenster des Lackes beim

Entwickeln groß zu halten. Eine Mischung des Entwicklers AR 300-35 mit DI-Wasser von 1:1,4 erwies sich hierzu als geeignet. Zunächst wurden Versuche durchgeführt, in welchen die Entwicklungszeit und die Belichtungsintensität variiert wurden. Zur Strukturierung wurde die Chrommaske TM232 eingesetzt, eine Testmaske mit parallelen Linien von abgestufter Breite bis unter $1\ \mu\text{m}$. Weiterhin besitzt diese Chrommaske Punktreihen mit unterschiedlichen Durchmessern. Anhand von REM-Bildern wurden die Entwicklungsparameter des Fotolacks beurteilt. Wie Bild 2.7-12 zeigt, wurde angestrebt den Unterschnitt im Abhebelack genau senkrecht auf den Querschnitt einer durchgebrochenen Linie aus Fotolack zu betrachten. Dadurch konnte der Unterschnitt besser als mit Schrägaufnahmen, wie in den Bildern 2.7-8 und 2.7-9, beurteilt werden.

Zur Betrachtung von Fotolackstrukturen im Querschnitt wurden sowohl Wafer als auch Dünngläser, die in den Versuchen als Substrate verwendet wurden, mit einer Hartmetall-Glasreißnadel angeritzt und über eine Kante gebrochen. Leider war es mit dem REM sehr schwierig, Stellen zu finden, an welchen der Unterschnitt im Querschnitt einer Fotolacklinie so gut sichtbar war wie in Bild 2.7-12. Die meisten Lackquerschnitte waren durch das Brechen des Substrates zerstört oder ‚unsauber‘. Auf der erwähnten Testmaske befinden sich jedoch außer Linien auch Punktreihen mit unterschiedlichen Punktdurchmessern. Die Profile der daraus im Fotolack entstehenden Kreise oder Lacksäulen, konnten wesentlich einfacher als Querschnitte von durchbrochenen Lackstegen betrachtet werden (Bild 2.7-13). Das lag daran, dass Lackkreise nicht in der Bruchebene des Substrats liegen, d. h. nicht durchbrochen sein müssen, um den Unterschnitt der Lackkanten betrachten zu können. Der Umstand, die REM-Optik genau senkrecht auf eine Bruchfläche der Lackstruktur ausrichten zu müssen, entfällt bei Lackkreisen, da diese aus beliebigen Ansichten parallel zur Substratebene immer gleich aussehen und das Unterschnittprofil zeigen. Die Lackkreise mussten zur Aufnahme des Lackprofils nicht unmittelbar an der Glasbruchkante liegen sondern konnten z. B. 2 mm davon entfernt liegen.

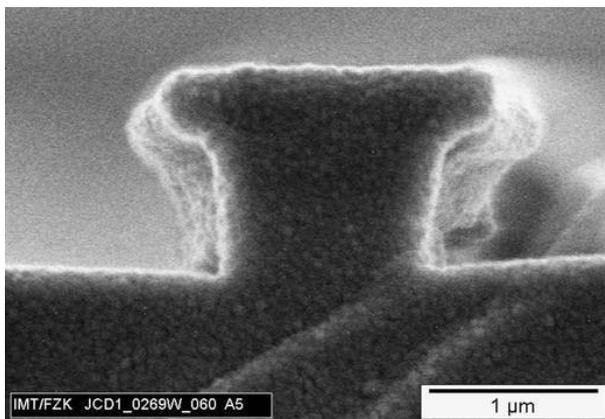


Bild 2.7-12: Unterschnitt einer durchgebrochenen Fotolacklinie aus AR-P 5350 auf Dünnglas (REM-Aufnahme). Parameter: $70\text{mJ}/\text{cm}^2$, 90s Entwicklung.

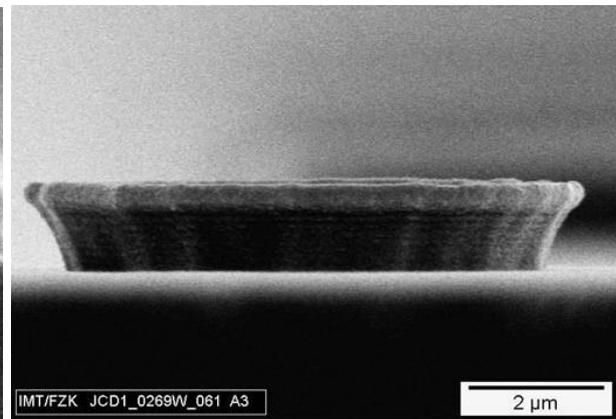


Bild 2.7-13: Unterschnitt sichtbar an einem Kreis aus Fotolack AR-P 5350 auf Dünnglas (REM-Aufnahme). Parameter: $70\text{mJ}/\text{cm}^2$, 100s Entwicklung.

2.7.4.3 Sputtern auf Abhebelack

Da in der REM-Sputteranlage MED 010 nur ein schlechtes Vakuum von 1×10^{-4} mbar erreicht werden konnte und die Bedampfanlage Univex 450 ca. 12 Monate lang stark eingeschränkt zur Verfügung stand, wurden weitere Beschichtungen am Institut für Instrumentelle Analytik (IFIA) des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt. Am IFIA wurde die PM VII, eine von sieben selbst konstruierten Sputteranlagen, für Sputterversuche auf Abhebelack genutzt. Es handelte sich um eine Wechselspannungs-Magnetron-Sputteranlage. Der Targetabstand der PM VII konnte flexibel von 2–25 cm variiert werden. Die Sputterleistung war an modernen Hochfrequenzgeneratoren digital einstellbar. Zur Evakuierung der Anlagen wurden kompakte Vorvakuum-Turbo-Kombipumpen von Pfeifer, Asstar, eingesetzt, welche in der Lage waren, innerhalb von einer Stunde ein für das Sputtern ausreichendes Vakuum von 5×10^{-6} mbar in der Sputterkammer herzustellen.

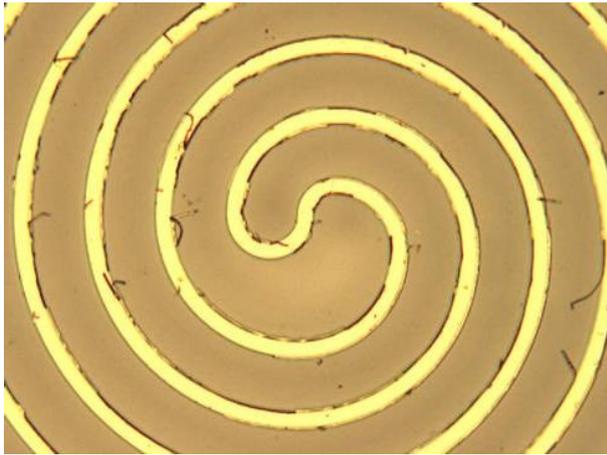


Bild 2.7-14: Filmränder am Rand von DMS-Leiterbahnen auf Dünnglas. 15 nm Chrom, 100 nm Gold, Sputteranlage IFIA PM VII.

Die ersten Abhebeergebnisse waren trotz der bereits ermittelten optimalen Prozessparameter zur Strukturierung des Abhebelacks ARP 5350 nicht zufrieden stellend (Bild 2.7-14). Nach dem Strippen des Abhebelacks blieben dünne Filmränder des gesputterten Metalls an den Rändern der DMS-Leiterbahnen stehen, welche sich in Fäden teilweise ablösen und DMS-Bereiche kurzschließen konnten. Die an den Rändern der DMS-Leiterbahnen hängenden Filmreste zeigten an, dass der untere Bereich der Lackwände beim Sputtern nicht von einer überhängenden Lackkante, wie bei einem ausreichenden Unterschnitt zu erwarten, abgeschirmt waren und deshalb beim Sputtern zusammen mit der DMS-Leiterbahn beschichtet worden waren. Da

jedoch REM-Bilder von Referenzsubstraten gezeigt hatten, dass die Unterschnittprofile zum Abheben hätten geeignet sein müssen, bedeutete das Entstehen der Filmränder, dass der Abhebelack beim Sputtern zu heiß geworden war. Die überstehenden Lackkanten der Unterschnittstrukturen schmolzen durch eine zu hohe Erwärmung des Fotolacks zurück, so dass der untere Bereich der Lackwände beim Sputtern nicht beschattet war und deshalb ebenfalls beschichtet wurde.

Mehrfach aufgefallen war, dass DMS auf Wafern bei gleichen Prozessparametern im Gegensatz zu DMS auf Dünngläsern ohne Filmränder in besserer Qualität hergestellt werden konnten. Bereits beim Sputtern auf Abhebelack AZ 5214 E auf Dünnglassubstraten wurde zur Wärmeabschirmung und zur Verbesserung der Wärmeableitung während des Sputterns eine Halterung mit Sputtermaske eingesetzt (Bild 2.7-15). Die Sputtermaske deckte weite Bereiche des Glases ab, die zur Herstellung von DMS nicht bedampft werden mussten. Dennoch wurden die Dünngläser beim Sputtern zu warm, so dass Filmränder an den DMS-Leiterbahnen entstanden waren. Es wurde vermutet, dass die Dünngläser einen sehr schlechten Wärmekontakt zu der in die Substrathalterung gefräste Tasche (Bild 2.7-16) hatten, die zur Aufnahme eines Dünnglases diente.

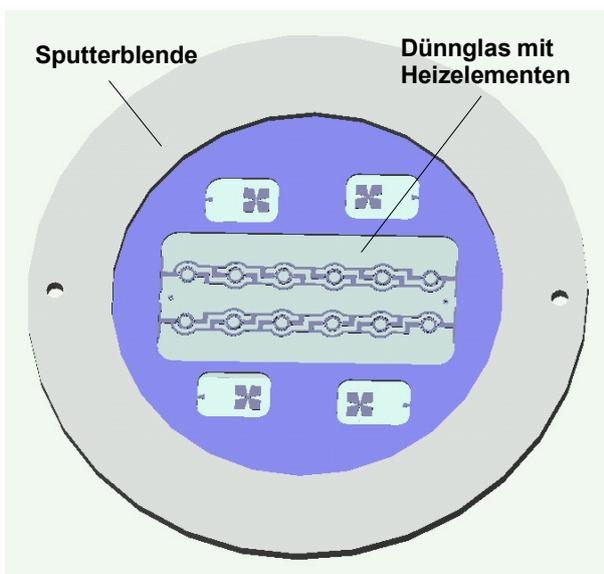


Bild 2.7-15: Eine Sputterblende auf einem Dünnglassubstrat mit bereits vorhandenen Heizelementen.

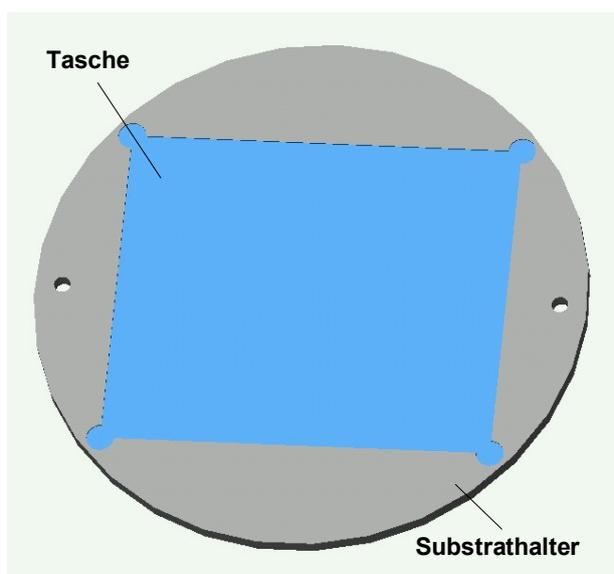


Bild 2.7-16: Eine zur Glasaufnahme gefräste Tasche im Substrathalter. Die Sputterblende in Bild 2.7-15 wird auf den Substrathalter geschraubt.

Deutlich verbessert werden konnte die Wärmeableitung mit einem Wafer, der unter das Dünnglas und die Sputterblende auf den Substrathalter von Bild 2.7-16 gelegt wurde. Die Wärmeableitung durch die am Glas anliegende glatte Waferoberfläche war so gut, dass die DMS-Leiterbahnen kaum noch Filmränder aufwiesen. Durch Verringern der Sputterleistung und Erhöhen des Targetabstandes konnte die Erwärmung des Fotolacks beim Sputtern weiter reduziert werden, so dass mit der Sputteranlage PM VII DMS ohne Filmränder auf Dünngläsern hergestellt werden konnten.

In dieser Arbeit wurde auch versucht, DMS aus Konstantan (Ni55Cu45) herzustellen. Konstantan ist ein klassischer DMS-Werkstoff, der zur Herstellung von Dünnschicht-DMS in der Drucksensorik gerne verwendet wird, weil er einen sehr kleinen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes (TKR) besitzt. DMS aus Konstantan liefern daher weitgehend temperaturunabhängige Messsignale. Bei der Herstellung von DMS aus Gold werden sowohl die DMS als auch deren Anschlussflächen (s. Anhang, Bild 7.2-3) gleichzeitig aufgedampft. Dies war bei der Herstellung von DMS aus Konstantan nicht möglich, was in Kapitel 3.2.1 über die Herstellung von DMS für Nickeldrucksensoren näher begründet wird. Während die DMS aus Konstantan hergestellt wurden, mussten die Anschlussflächen der DMS weiterhin aus Gold gesputtert werden. Es wurden zwei neue Sputterblenden angefertigt, mit denen beim Sputtern einmal die Anschlussflächen (Bild 2.7-17) und einmal die DMS (Bild 2.7-18) abgedeckt werden konnten. Da die Sputterblenden nur die minimal notwendigen Flächen zum Bedampfen freiließen und zudem für einen guten Andruck der Dünngläser an den unterlegten Wafer sorgten, war die Wärmebelastung des Abhebelacks auf den Substraten beim Sputtern gering. Zuerst wurden die Anschlussflächen aus Gold und danach die DMS aus Konstantan gesputtert. Gold überzieht sich beim Wechseln der Sputterblenden an Luft, im Gegensatz zu Konstantan, nicht mit einer Oxidschicht. Eine Oxidschicht zwischen den Anschlussflächen und den DMS hätte einen Übergangswiderstand bedeutet.

Es ließen sich DMS aus Konstantan ohne Filmränder herstellen. Die Strippzeiten so hergestellter DMS lagen bei 30 min. Die Herstellung von DMS aus Konstantan bedeutete jedoch einen höheren Fertigungsaufwand, da die Vakuumkammer zwischen den beiden Sputterschritten geflutet werden musste, um die Sputtermaske zu wechseln.

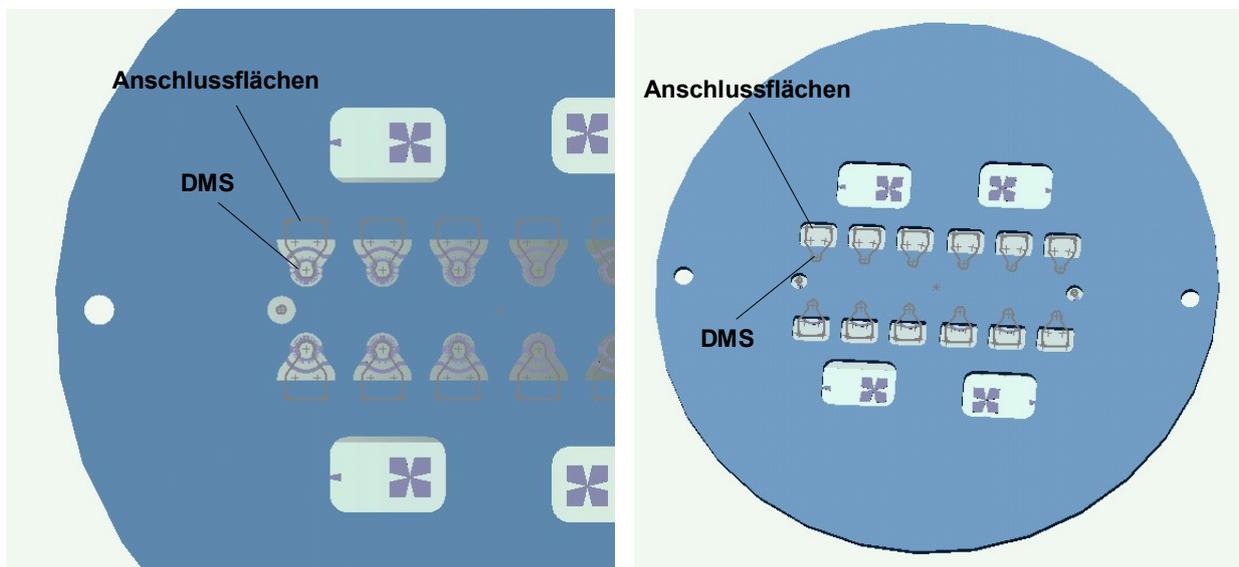


Bild 2.7-17: Sputterblende zum Sputtern der DMS aus Konstantan. Die Anschlussflächen sind abgedeckt. (CAD-Bild)
 Bild 2.7-18: Sputterblende zum Sputtern der DMS-Konstantan. Die DMS sind abgedeckt. (CAD-Bild)

Auch die Herstellung von 300 nm dicken DMS durch Abheben gelang. Trotz geringer Sputterleistung, großem Targetabstand, Verwendung von Sputterblenden und einem zur Wärmeableitung unterlegten Wafer war es jedoch notwendig, die Konstantanschicht in drei Schritten zu je 100 nm zu sputtern. Zwischen den Sputterschritten wurden Pausen von jeweils 45 min eingehalten, in denen sich die Gläser und die Halterung im Vakuum der

Sputterkammer abkühlen konnten. Das Vakuum musste während der Sputterpausen aufrechterhalten werden, damit die Konstantanschicht nicht oxidierte, was die Haftung nachfolgender Schichten verschlechtert hätte.

Um die Notwendigkeit langer Sputterpausen an der PM VII zu verstehen, muss der Sputtervorgang allgemein sowie der Aufbau der eingesetzten Sputteranlage betrachtet werden. Beim Sputtern wird die Substratoberfläche durch die auftreffenden schnellen Targetatome kontinuierlich erwärmt. Konvektive Kühlung kann im Vakuum einer Sputterkammer nicht stattfinden. Häufig ist daher in Sputteranlagen eine Substratkühlung eingebaut, die jedoch in der PM VII nicht vorhanden war. Die in das Substrat eingebrachte Wärmeenergie konnte daher nur durch Wärmeleitung aufgrund des vorhandenen Temperaturunterschieds von der Substratoberfläche durch das Substrat in die Substrathalterung abgeleitet werden. Die Substrathalterung war an einer 25 cm langen Stange von 15 mm Durchmesser aufgehängt. Da über die Stange die vom Substrat und der Sputterblende stammende Wärmeenergie nur sehr langsam weitergeleitet werden kann, wird das Glassubstrat sowie die Substrathalterung durch das Sputtern ständig weiter aufgeheizt. Nach einer bestimmten Sputterzeit steigt die Oberflächentemperatur des Dünnglassubstrats so weit an, dass das Unterschnittprofil des Abhebelacks zu schmelzen beginnt (ca. 120 °C). Mit den Sputterparametern von Tabelle 2.7-3 wird die kritische Erwärmung des Substrats nach Überschreiten von 30 min Sputterzeit erreicht, weshalb maximal 25 min lange Sputterschritte für die 300 nm dicken DMS aus Konstantan festgelegt wurden.

Targetwerkstoff	Konstantan
Targetgröße	3 Zoll
Targetabstand	145 mm
Hochfrequenzleistung	60 W
Sputterrate	4,0 nm/min
Solldicke	100 nm
Sputterzeit	25 min
Substratrotation	10 U/min
Arbeitsdruck (Argon)	5×10^{-3} mbar

Tabelle 2.7-3: Sputterparameter für das Beschichten eines Dünnglassubstrats mit 100 nm Konstantan auf der PM VII des IFIA.

Mit einem wassergekühlten Substrathalter ließe sich eine 300 nm dicke Metallschicht vermutlich in einem Sputterschritt auf den Abhebelack abscheiden, ohne die Unterschnittstruktur des Abhebelacks zu beschädigen. Wenn keine Wasserkühlung verfügbar oder nachrüstbar ist, kann die Kühlwirkung eines Substrathalters verbessert werden, indem der Substrathalter möglichst großvolumig aus Aluminium oder Kupfer hergestellt wird. Beide Werkstoffe besitzen eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit und können die eintretende Wärmeenergie schnell von der Substratoberfläche ableiten. Kupfer ist als Werkstoff für eine Substrathalterung in Sputteranlagen aufgrund einer höheren Wärmeleitfähigkeit besser als Aluminium geeignet. Weiterhin besitzt Kupfer einen größeren Wärmehalt, d. h. Kupfer kann im selben Volumen bei geringerer Temperaturerhöhung eine größere Wärmemenge speichern (s. Tabelle 2.7-4).

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Dichte	Wärmehalt	Wärmehalt
	[W/m·K]	[J/K·g]	[g/cm ³]	[J/K·cm ³]	[%] bzgl. Kupfer
Aluminium	273	0,9	2,7	2,43	69,54 %
Kupfer	390	0,39	8,96	3,49	100,00 %
Gold	310	0,13	19,32	2,51	71,88 %
Nickel	89	0,44	8,9	3,92	112,07 %
Eisen	78	0,45	7,87	3,54	101,35 %

Tabelle 2.7-4: Wärmehalt verschiedener Metalle

Ein großes Volumen des Substrathalters bewirkt, dass der Substrathalter mehr Wärmeenergie speichern kann und sich die Temperatur der Halterung langsamer erhöht. Die Auflagefläche eines Substrathalters muss eben und fein geschliffen sein, damit der Widerstand der Wärmeleitung vom Substrat zum Substrathalter gering ist.

2.7.5 Trockenätzen von DMS

Da es nicht absehbar war, ob die Entwicklung eines stabilen Abhebeverfahrens auf Dünnglas gelingen würde, wurde parallel zum Abheben auch das Trockenätzen von DMS versucht. Als Maskierung der DMS beim Trockenätzen wurden der Fotolack AZ 4533 und das fotostrukturierbare PI-Vorprodukt Durimide 7505 (kurz PI) getestet. Geätzt wurde in einer reaktiven Ionenätzanlage (RIE), Plasmalab 80 Plus der Firma Oxford. Als Arbeitsgas wurde Argon verwendet. Somit handelte es bei dem angewandten Trockenätzverfahren um ein rein physikalisches Sputterätzen. Die Ätzleistung betrug 55 W. Vor dem Sputterätzen wurden 10 nm Chrom und 100 nm Gold auf die Substrate gesputtert. Anschließend wurde AZ 4533- oder PI-Lack aufgeschleudert und strukturiert. Der PI-Lack wurde nach der Strukturierung bei 400 °C im Vakuumofen vollständig polymerisiert. Danach wurden die nicht durch AZ 4533 oder PI geschützten Stellen der Beschichtung durch 60- bis 90-minütiges Sputterätzen abgetragen. Mit einer PI-Maskierung sputtergeätzte DMS sind in den Bildern 2.7-19 und 2.7-20 zu sehen.

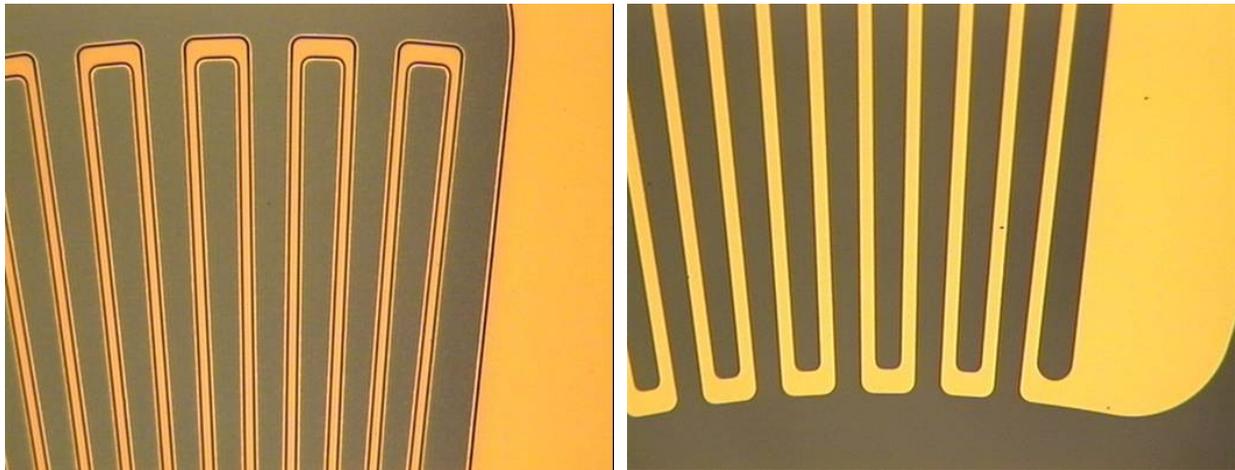


Bild 2.7-19: Dünnglassubstrat mit DMS und PI-Maske nach dem Sputterätzen. Blick auf die Glasoberseite (Glasoberseite). Bild 2.7-20: Blick auf die Glasunterseite desselben Glases wie in Bild 2.7-19.

Der AZ-Lack war nach dem Sputterätzen teilweise schwer vom Glassubstrat zu entfernen, da Fotolacke durch die ultraviolette Strahlung, der sie beim Plasmaätzen ausgesetzt sind, zunehmend vernetzen. Als beste Methode zur vollständigen Entfernung des AZ-Lacks erwies sich, die Glassubstrate auf einem beheizbaren Magnetrührer im Becherglas mit AZ 400 K zu stripfen. Vor dem Eintauchen der Glassubstrate wurde der Entferner bereits auf 80 °C vorgeheizt. Als Halterung zum Stripfen des AZ-Lacks wurde der in [Bild 2.5-5](#) vorgestellte Magnetfolienhalter verwendet. Als Träger diente eine PEEK-Scheibe, auf der die Dünnglassubstrate mit Quadratkantstücken aus Edelstahl beschwert wurden. Die PEEK-Scheibe wurde waagrecht in einen abgesägten Waferständer geschoben, welcher anschließend hochkant in ein Becherglas auf einem Schwenker oder Rührer gestellt wurde. Zum Spülen wurde das Glas in einen 2"-Waferständer gesetzt, mit DI-Wasser und abschließend mit Selectipur (Isopropanol) aus der Spritzflasche vorsichtig abgespült.

Das PI haftete im Allgemeinen gut auf der Goldschicht. Allerdings waren auf größeren Goldflächen, wie den Kontaktflächen der DMS (s. Bild 2.7-21), teilweise Blasen zwischen der Goldschicht und dem PI zu entdecken. Die PI-Maskierung der DMS-Leiterbahnen war jedoch blasenfrei. Alle in den Sputterätzversuchen hergestellten DMS-Strukturen waren fehlerfrei. Die Breite von DMS-Leiterbahnen, die durch 90-minütiges Sputterätzen von PI-maskierten Glassubstraten hergestellt worden waren, betrug ca. $5,6 \mu\text{m}$. Gemessen wurde die Leiterbahnbreite mit einem Lichtmikroskop mit Messvorrichtung von Leitz. Die Breite von DMS-Leiterbahnen der zur Strukturierung verwendeten Chrommaske betrug $5,2 \mu\text{m}$. Die durch Sputterätzen mit einer PI-Maskierung hergestellten Mikrostrukturen waren also ca. $0,4 \mu\text{m}$ breiter als die Strukturen der verwendeten Chrommaske.

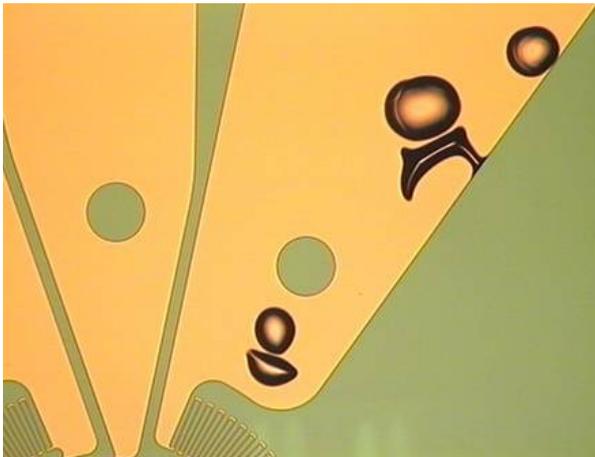


Bild 2.7-21: Blasen zwischen der Goldschicht und der PI-Trockenätzmaske auf den Kontaktflächen der DMS.

In einem anderen Versuch wurde festgestellt, dass Gold auf Chrom nur eingeschränkt gut haftete. Auf einen oxidierten Wafer waren zunächst 15 nm Chrom und 100 nm Gold mit einer Z400 gesputtert worden. Mit dieser Anlage sind erfahrungsgemäß sehr gut haftende Schichten auf Substraten herstellbar. Mit PI als Maskierung wurden anschließend DMS aus der Chrom-Gold-Schicht sputtergeätzt. Um die Haftung der PI-Maskierung auf den DMS zu testen, wurde ein transparenter Tesafilm auf die DMS geklebt und mit gleichmäßiger, geringer Geschwindigkeit senkrecht wieder abgezogen. In den Bereichen, in denen die DMS am Klebeband haften blieben, wurde die PI-Maskierung zusammen mit der Goldschicht abgerissen (Bild 2.7-22). Die Unterseite der abgerissenen DMS-Streifen zeigte keine Spuren von Chrom wie auch keine Goldreste auf der Chromschicht, die auf dem Wafer haften geblieben war, zu entdecken waren. Die Goldschicht hatte sich scheinbar vollständig von der Chromschicht abgelöst. Dieses Ergebnis erstaunte zunächst, da erwartet worden war, dass die Haftung der Gold- auf der Chromschicht durch eine Legierungsbildung der Metalle, begünstigt durch das Ausbacken bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1 h der als Maskierung dienenden PI-Schicht, stark zunehmen würde. Das Ergebnis muss jedoch so interpretiert werden, dass ein Teil der Chromschicht wesentlich stärker auf dem oxidierten Siliziumwafer haftete als die Grenzschicht auf der Unterseite der DMS-Leiterbahn, in welcher durchaus eine – jedoch nach wie vor gelbe - Chrom-Goldlegierung entstanden war. Weiterhin zeigte der Versuch, dass die PI-Schicht sehr gut auf der Goldschicht der DMS haftete. Eine PI-Maskierung könnte daher nach dem Sputterätzen auf den DMS belassen werden. In Zugfestigkeitstests an galvanisch hergestellten und kalt miteinander verschweißten Goldflächen wurde ebenfalls ein Versagen der Verbindung an der Chrom-Gold-Übergangsstelle der Galvanikstartschicht festgestellt [Maha99].

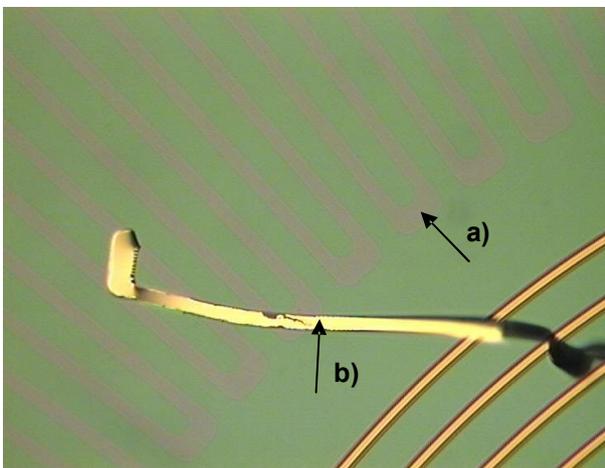


Bild 2.7-22: Ablösung der Goldschicht eines DMS von seiner Chromschicht auf einem Wafer. a) Blick auf die Chromschicht auf dem Wafer. b) Blick auf die Unterseite einer DMS-Leiterbahn.

Weiterhin zeigte der Versuch, dass die PI-Schicht sehr gut auf der Goldschicht der DMS haftete. Eine PI-Maskierung könnte daher nach dem Sputterätzen auf den DMS belassen werden. In Zugfestigkeitstests an galvanisch hergestellten und kalt miteinander verschweißten Goldflächen wurde ebenfalls ein Versagen der Verbindung an der Chrom-Gold-Übergangsstelle der Galvanikstartschicht festgestellt [Maha99].

Im Hinblick auf die Fertigung von Nickeldrucksensoren, die in Kapitel 3 beschrieben wird, war auch interessant, ob die Herstellung von sputtergeätzten DMS auf einer PI-Schicht gelingen würde. Daher wurde in einem Versuch eine PI-Schicht auf einen oxidierten Siliziumwafer aufgebracht und danach mit Chrom/Gold beschichtet. Maskiert wurden die DMS mit AZ 4533. Nach 95 min Sputterätzen waren die in Bild 2.7-23 zu sehenden tiefen Ätzgräben neben den DMS-Strukturen sichtbar. Teilweise waren DMS-Leiterbahnen

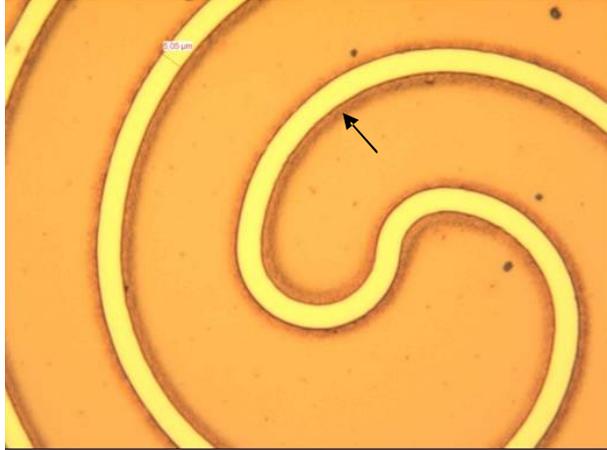


Bild 2.7-23: Tiefe Ätzgräben, erkennbar als dunkle Linien, in der PI-Schicht neben den DMS-Leiterbahnen.

regelrecht aus der PI-Schicht ausgeschnitten worden und lösten sich vom Wafer ab. Der Effekt der Ätzgrabenbildung beim Sputterätzen ist bekannt. Das Sputterätzen ist ein rein physikalisches Ionenätzen und neigt zur Grabenbildung [Menz97]. Schräg einfallende Ionen treffen auf die senkrechten Seitenwände der Maskierungsschicht, werden abgelenkt und landen neben der Maskierung auf der Substratoberfläche. Die Ionenstromdichte neben den Rändern der Ätzmaske wird dadurch erhöht und hat einen höheren Abtrag zur Folge. Die Bildung von Ätzgräben wurde beim direkten Sputterätzen von DMS auf Glassubstraten und Siliziumwafern nicht beobachtet.

In den Glasdrucksensoren kann das Sputterätzen aufgrund der Ätzgrabenbildung vermutlich nicht eingesetzt werden. Zwar werden die DMS in den Glasdrucksensoren direkt auf die Glaskreisplatte aufgebracht, jedoch verlaufen die Zuleitungen zu den DMS, welche gleichzeitig mit den DMS entstehen, über die PI-Trägermembran bis auf die Glaskreisplatte (Anhang, Bild 7.2-3). Ätzgräben in der PI-Membran auf der Glaskreisplatte würden nicht stören. Dagegen würden Ätzgräben neben den Zuleitungen zu den DMS, also in der PI-Trägermembran, die Druckfestigkeit der Membran beeinträchtigen. Eventuell könnte jedoch eine starke Bildung von Ätzgräben durch eine optimale Bestimmung der Sputterätzzeit, die in den Sputterätzversuchen auf PI sehr lang gewählt worden war, vermieden werden.

In Nickeldrucksensoren könnte Sputterätzen zur Herstellung von DMS dagegen eingesetzt werden. Hier würde die PI-Trägermembran zwar ebenfalls durch Ätzgräben geschwächt werden, jedoch wird bei Nickeldrucksensoren eine zweite PI-Schicht aufgebracht, um die DMS von der Kreisplatte aus Nickel elektrisch zu isolieren. Die Ätzgräben würden von der zweiten PI-Schicht aufgefüllt werden.

Die Herstellung von DMS durch Sputterätzen mit einer PI-Maskierung ist vom Aufwand her vergleichbar mit dem Abheben von DMS. In beiden Fällen wird Fotolack strukturiert sowie eine Metallschicht aufgedampft. Die Prozessschritte Entfernen des Fotolacks beim Abhebeverfahren und das Sputterätzen erfordern ungefähr die gleiche Fertigungszeit. Eine PI-Maskierung kann nach dem Sputterätzen auf dem Substrat verbleiben. Werden hingegen klassische Fotolacke als Maskierung verwendet, kommt nach dem Sputterätzen im Vergleich zum Abheben von DMS noch ein zusätzlicher Arbeitsschritt, das Entfernen des Fotolacks, hinzu.

2.7.6 Sputtern konstanter Schichtdicken

Glassubstrate wurden zur Herstellung von DMS durch Aufdampfen oder Sputtern mit Chrom/Gold oder Konstantan beschichtet. Typisch für beide Beschichtungsverfahren ist eine große Schichtdickenverteilung der auf dem Substrat abgeschiedenen Werkstoffe. Die Schichtdicke eines kreisförmigen Substrats, welches beim Sputtern coaxial über dem ebenfalls kreisförmigen Target angeordnet wird, ist in der Regel im Zentrum des Substrats am größten und nimmt konzentrisch zum Rand des Substrats hin ab. Im Bild 2.7-24 ist die Schichtdickenverteilung einer gesputterten Goldschicht auf einem 4"-Wafer dargestellt, die mit der Sputteranlage PM VII hergestellt wurde.

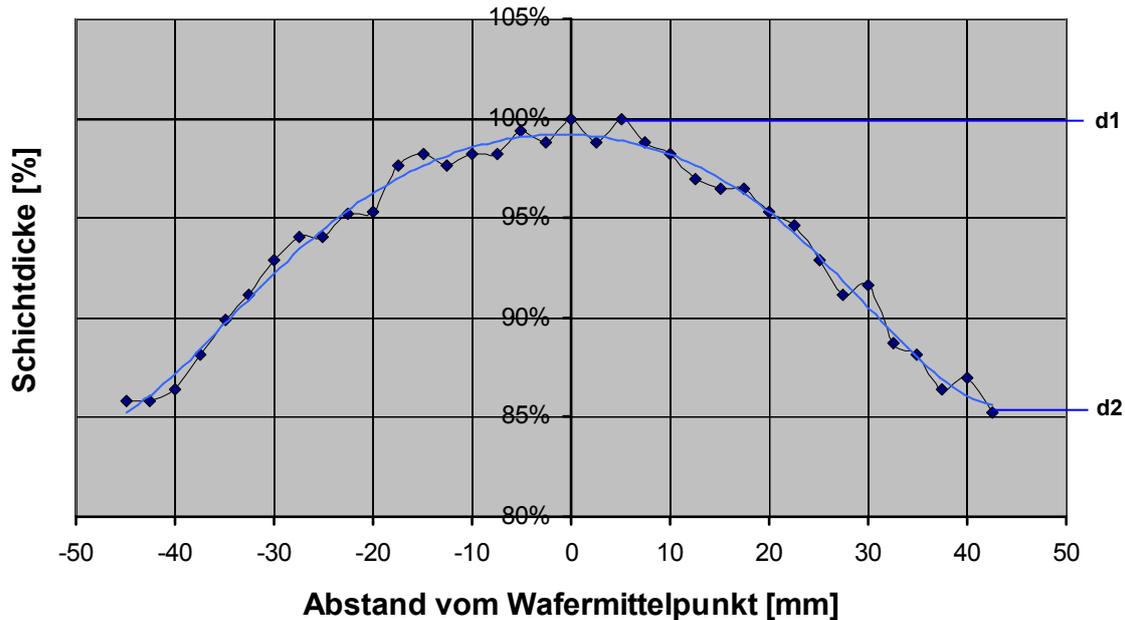


Bild 2.7-24: Schichtdickenverteilung von Gold auf einem 4"-Wafer. Sputteranlage PM VII, IFIA; Targetabstand 138 mm; Waferdrehung 10 U/min; Sputterrate 12 nm/min; Toolfaktor 100; HF-Leistung 55 W; Beschichtung 30 nm Chrom, 400 nm Gold.

Der Wafer wurde mit 10 U/min während des Sputterns über dem Target gedreht. Die dargestellte Goldverteilung ist rotationssymmetrisch zur Waferachse. Vom Wafermittelpunkt bis zum Radius 45 mm, was ungefähr der nutzbaren Fläche eines 4"-Wafers entspricht, nimmt die Schichtdicke um ungefähr 15 % ab. Die Widerstände von DMS, die auf dem Radius 45 mm, im Folgenden R45, entstehen, wären demnach 15 % kleiner als DMS-Widerstände im Wafermittelpunkt. Betrachtet man die Schichtdickenverteilung innerhalb einer einzelnen DMS-Rosette mit Vollbrückenschaltung, die sich z. B. zwischen den Radien R20 und R30 auf dem Wafer befinden könnte, so ergibt sich im ungünstigsten Fall bei einem Durchmesser der DMS-Rosette von ca. 2 mm durch den Schichtdickenunterschied ein Widerstandsunterschied der DMS von maximal ca. 0,8 %. In einem Artikel war zu erfahren, dass ein Hersteller von Folien-DMS¹⁰-Drucksensoren Widerstandstoleranzen von $\pm 0,2$ % vom Nennwert für seine Fertigung vorgeschrieben hat. Durch enge Widerstandstoleranzen kann die Anfangsverstimmung der Brückenschaltung so klein gehalten werden, dass Sie mit den Nullabgleichseinrichtungen von Messverstärkern problemlos kompensiert werden kann [Hoff86].

TKR innerhalb einer DMS-Rosette dürfen nur um $5 \cdot 10^{-7}$ 1/K voneinander abweichen, sonst entsteht ein unzulässig großer Temperaturgang des Sensornullsignals, der kompensiert werden muss [Ort77]. Schichtdickenunterschiede innerhalb einer DMS-Rosette lassen jedoch auf unterschiedliche TKR der einzelnen DMS-Widerstände schließen. Dies gilt vor allem für DMS, die mittels einer Haftschrift auf Substrate aufgebracht werden, also z. B. für DMS aus 100 nm Gold mit 10 nm Chrom als Haftschrift. Aus Chrom und Gold bildet sich bei erhöhter Temperatur durch Diffusion der Metallatome langsam eine Legierung. Durch Tempern kann die Legierungsbildung beschleunigt werden. Das Tempern der Chrom-Gold-Schicht ist sogar notwendig, da sich durch die Legierungsbildung sowohl der spezifische Widerstand als auch der TKR der Legierung stark ändern. Der Vorgang der Legierungsbildung sollte daher abgeschlossen sein, bevor der Drucksensor abgeglichen wird. Untersuchungen zur Legierungsbildung von Chrom-Gold-Schichten wurden am IMT vorgenommen und werden in Kapitel 2.11-3, Regelung zum Heizelementschweißen, noch

¹⁰ Folien-DMS...Aus einer dünnen Metallfolie auf einer Polyimidkunststoffolie geätzter DMS

näher erläutert. Es muss nun weiterhin bedacht werden, dass eine gesputterte Chromschicht auf einem 4"-Wafer ebenfalls eine Schichtdickenverteilung aufweist, die sich aber von der Schichtdickenverteilung von Gold unterscheidet. Bis zum Radius 45 mm nimmt die Chromschichtdicke auf einem 4"-Wafer, der mit der Sputteranlage PM VII beschichtet wird, um ca. 5% ab, während jedoch die Goldschichtdicke um bis zu 15% absinkt. Nach einem Temperschritt würde sich daher über den Wafer eine Chrom-Gold-Legierung mit unterschiedlicher Legierungszusammensetzung bilden. Die TKR von DMS-Rosetten würden dementsprechend abhängig von ihrer Lage auf dem Wafer voneinander abweichen. Innerhalb einer DMS-Vollbrücke würden DMS – bei ungünstiger Anordnung der DMS - unterschiedliche TKR aufweisen.

Aus den angeführten Gründen wurde in dieser Arbeit ein Verfahren gesucht, mit dem DMS mit geringen Schichtdickentoleranzen hergestellt werden können. Eine gleichmäßige Schichtdickenverteilung über die gesamte Fläche eines Wafers kann mit Hilfe einer Blende erzielt werden, die zwischen dem rotierenden Wafer und dem Target befestigt wird. Die Verwendung von Blenden beim Sputtern zur Angleichung der Beschichtungsrate auf Substratoberflächen ist auch bei Herstellern großer CVD- und PVD-Anlagen bekannt. Auf telefonische Anfrage bestätigte z. B. die Firma FHR Anlagenbau GmbH, Ottendorf-Okrilla [FHR04], dass in Magnetron-Sputteranlagen, in denen Substrate, befestigt auf einer großen Trommel, an feststehenden Targets vorbei gedreht werden, kammartige Blenden zum Einsatz kommen. Am IFIA, wo die Sputterversuche durchgeführt wurden, war in der Vergangenheit bereits mit einfachen Blenden experimentiert worden. Diese Blendentechnik wurde in dieser Arbeit aufgegriffen und verbessert.

Die Blendenform muss so ausgelegt werden, dass bei jeder Umdrehung des Wafers über dem ‚brennenden‘ Target Waferbereiche mit größerer Schichtdicke stärker von der Blende abgedeckt werden als Bereiche mit geringerer Schichtdicke. Die Blendenform lässt sich aus der Schichtdickenverteilung ohne Blende berechnen. Für die Berechnung ist einfache Dreisatzmathematik ausreichend.

Beispielrechnung:

Angenommen eine Keilblende mit einem Öffnungswinkel von 15° würde beim Sputtern über dem rotierenden Substrat angeordnet (Bild 2.7-25). Dann würden bei feststehender Blende und einer Umdrehung des Wafers vor dem ‚brennenden‘ Target 15 von 360 Anteile weniger verdampftes Targetmaterial auf jede Kreisbahn des Wafers auftreffen. Das bedeutet, dass die Schichtdicke auf allen Kreisbahnen des Wafers um $15 / 360^\circ = 4,71\%$ gleichmäßig abnehmen würde. Für die Berechnung der Blendenform muss ein erster Öffnungswinkel auf einem frei wählbaren Kreisbahnradius des Wafers festgelegt werden. Mit der Festlegung eines Öffnungswinkels auf einem der Radien können die Blenden-Öffnungswinkel für alle anderen Radien des Wafers berechnet werden. Die fertig berechnete Sputterblende ist in Bild 2.7-26 dargestellt.

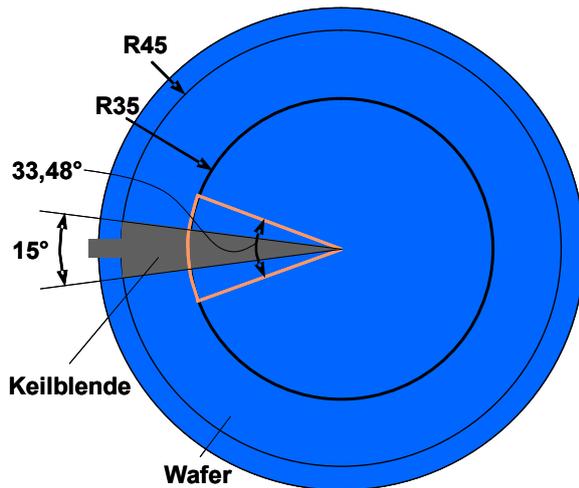


Bild 2.7-25: Keilblende mit konstant 15° Öffnungswinkel.

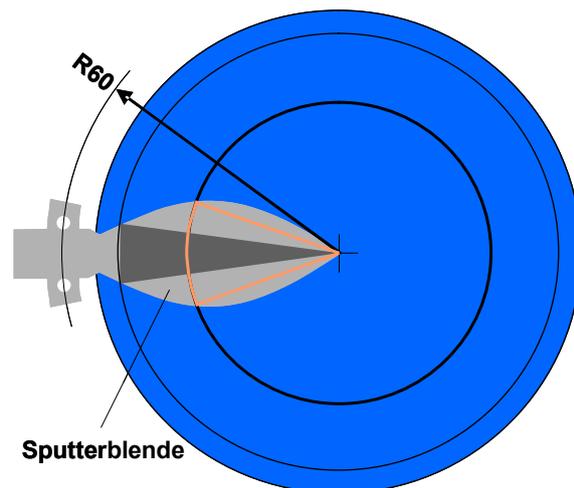


Bild 2.7-26: Fertig berechnete zeigerförmige Sputterblende für einen 4"-Wafer.

Am besten wird der erste Öffnungswinkel auf dem Radius des Wafers festgelegt, wo die kleinste Schichtdicke gemessen wurde, damit die Blende an dieser Stelle aus konstruktiven Gründen nicht zu schmal wird. Die kleinste gemessene Schichtdicke trat, wie aus dem Diagramm in Bild 2.7-24 hervorgeht, auf Radius 45 mm (R45) auf. Die Breite der Blende an dieser Stelle beträgt bei einem gewählten Öffnungswinkel von 15°:

$$(2.1) \quad b_{R45} = \frac{15^\circ}{360^\circ} * 2 * 45\text{mm} * \pi = 11,65\text{mm}$$

Die Sputterblende würde auf R45 mit 11,65 mm relativ breit werden, was aus Festigkeitsgründen nicht erforderlich wäre. Durch Wahl eines kleineren ersten Öffnungswinkels könnte die Breite der Sputterblende auf R45 noch verkleinert werden. Die Blendenwinkel für weitere Wafer-Radien werden so berechnet, dass auf den dort liegenden Kreisbahnen die gleiche Schichtdicke wie auf der Kreisbahn R45 entsteht. 352,87 nm betrug die Schichtdicke auf der Kreisbahn R45 ohne Blende. Mit Keilblende beträgt die Schichtdicke auf R45:

$$(2.2) \quad d_{R45} = 352,87\text{nm} * \left(1 - \frac{15^\circ}{360^\circ}\right) = 338,17\text{nm}$$

Auf eine Schichtdicke von 338,17 nm muss nun mit Hilfe der Blende die Schichtdicke auf allen anderen Kreisbahnen des Wafers verringert werden. Die Schichtdicke auf R35 betrug ohne Blende 372,84 nm. Der notwendige Öffnungswinkel der Blende auf R35 zur Erzielung einer Schichtdicke von 338,17 nm wird folgendermaßen berechnet:

Dreisatz:

372,84 nm	360°
338,17 nm	360°-x

$$(2.3) \quad x = 360^\circ * \left(1 - \frac{338,17\text{nm}}{372,84\text{nm}}\right) = 33,48^\circ$$

In gleicher Weise kann der Öffnungswinkel für andere Radien des Wafers berechnet werden. Ein Anzahl von Kreiskoordinaten, d. h. von Radien und dazu berechnete Blendenwinkel, reichen aus, um die Blende geometrisch darzustellen. Stellt man die Öffnungswinkel symmetrisch zu einer Achse eines Kreiskoordinatensystems dar, so erhält man eine Blendenform, die wie ein Uhrzeiger aussieht. Wie in Bild 2.7-26 erkennbar ist, steht die Sputterblende mit ihrer Spitze genau im Mittelpunkt des Wafers. Daten der Schichtdickenverteilung und der Umrechnung in die Geometrie einer Blende sind in [Tabelle 7.3.1](#) enthalten. Die Umrechnung der Schichtdickenverteilung in die Geometrie einer

Sputterblende wird auch im Anhang in [Kapitel 7.3.2](#) beschrieben. In [Kapitel 7.3.1](#) wird außerdem beschrieben, wie Sputterschichten zur Messung der Schichtdickenverteilung auf Wafern strukturiert worden sind.

In ersten Versuchen wurden Blenden von Hand ausgesägt und mit Klemmen in der Sputterkammer zwischen Wafer und Target befestigt. Mit einem Spiegel wurde versucht, die Spitze der Blende genau auf den Mittelpunkt des Wafers auszurichten. Die Ausrichtung konnte auf diese Weise nur ungenau gelingen. Außerdem wurde festgestellt, dass die ca. 25 cm lange Antriebsachse der Waferhalterung nicht rund lief. Bei einer Umdrehung beschrieb dadurch der Mittelpunkt des Wafers einen Kreis. Dementsprechend waren die Ergebnisse der ersten Sputterversuche mit Blende noch schlecht. Besonders große Schichtdicken ergaben sich in der Wafermitte, während die Schichtdickenverteilung nach außen hin deutlich gleichmäßiger war. Erst mit einer neu konstruierten Sputtervorrichtung (Bild 2.7-27) ließen sich die gewünschten Ergebnisse erzielen.

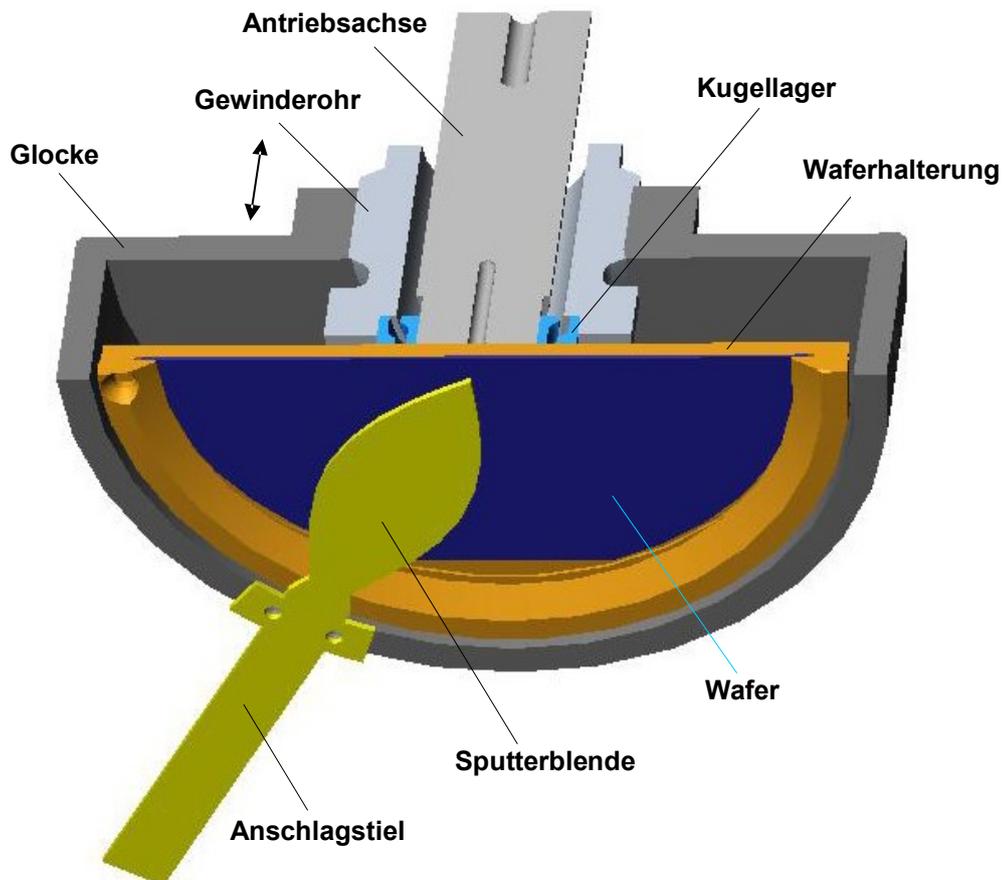


Bild 2.7-27: Vorrichtung für die Sputteranlage PM VII zum Sputtern gleichmäßiger Goldschichten auf 4"-Wafern.

Die Sputtervorrichtung besteht aus einer Waferhalterung, welche koaxial mit einer Antriebsachse in der Sputteranlage verbunden wurde. Ein Gewinderohr ist über ein Kugellager auf der Antriebsachse gelagert. Auf das Außengewinde des Gewinderohrs ist eine Glocke geschraubt, welche die Waferhalterung umgibt. Die Sputterblende wird am Rand der Glocke angeschraubt. Durch Drehen der Glocke bei festgehaltenem Gewinderohr oder umgekehrt kann die Glocke axial verschoben werden. Auf diese Weise kann ein geringer Abstand der Sputterblende zur Waferhalterung und einem darin eingespannten Wafer eingestellt werden. Die Sputterblende wurde durch CO₂-Laserstrahlschneiden präzise aus Aluminiumblech geschnitten. An der Blende schließt sich ein Stiel an, der als Anschlag dient. Wenn sich die Antriebsachse der Waferhalterung dreht, werden die Glocke und die Sputterblende zunächst mitgedreht, bis der Blendenstiel gegen eine senkrecht stehende Schraube in der Sputterkammer stößt. Von da an dreht sich nur noch die Waferhalterung, während die koaxial zur Waferhalterung gelagerte Glocke am Stiel der Blende von der Schraube angehalten wird. Auf diese Weise kann der in der Halterung eingespannte Wafer

über die unbeweglich bleibende Blende gedreht werden. Die Vorrichtung stellt außerdem sicher, dass die Spitze der Blende während der Drehbewegung immer exakt auf den Mittelpunkt des Wafers ausgerichtet bleibt.

Bis auf einen Kreisbereich mit ca. 5 mm Durchmesser im Mittelpunkt des 4“-Siliziumwafers konnte mit der Vorrichtung eine Goldschicht mit einer Schichtdickentoleranz von $\pm 1\%$ erreicht werden (Bild 2.7-28).

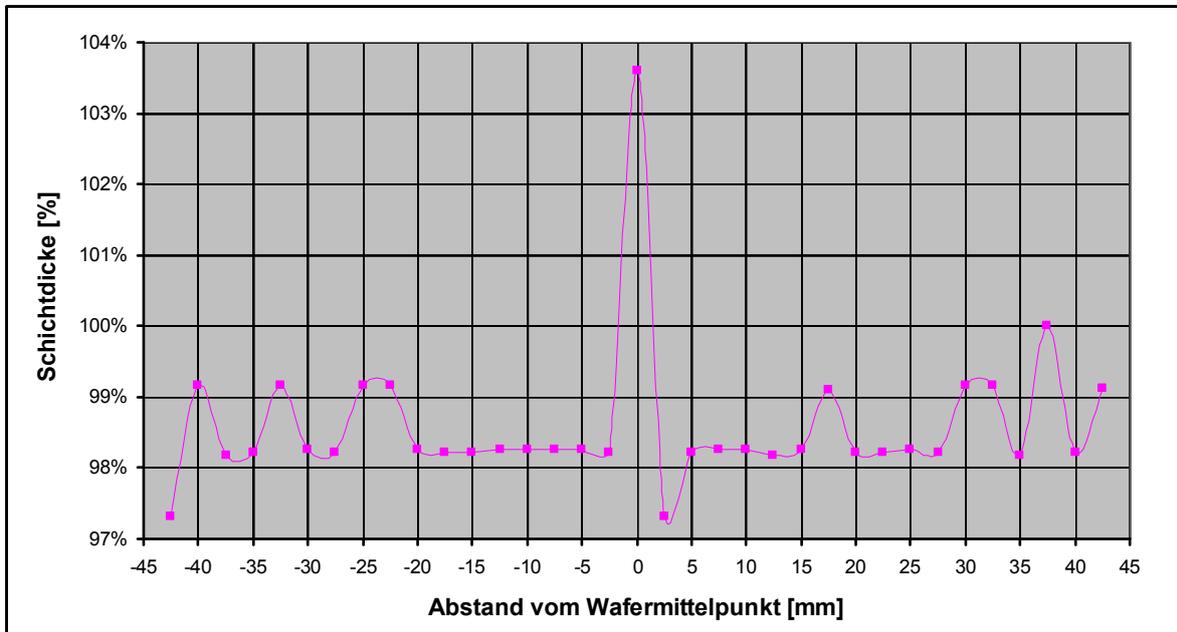


Bild 2.7-28: Schichtdickenverteilung von Gold gesputtert mit Zeigerblende auf einen 4“-Wafer. Sputteranlage PM VII, IFIA; Targetabstand 138 mm; Waferdrehung 10 U/min; Sputterrate 12 nm/min; Toolfaktor 100; HF-Leistung 55 W, Beschichtung 10 nm Chrom / 300 nm Gold.

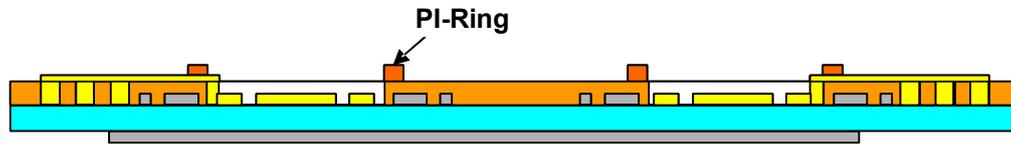
Die Schichtdickenverteilung wird mit steigendem Waferradius generell besser. Dies liegt daran, dass Konturfehler der Blende mit zunehmender Entfernung vom Wafermittelpunkt einen immer geringer werdenden Einfluss auf die Schichtdicke haben. Umgekehrt führen kleinste Konturfehler an der Spitze der Blende sowie eine geringe Abweichung der Position der Blendenspitze vom Mittelpunkt des Wafers zu einer großen Schichtdickenänderung in der Wafermitte.

Die Sputtervorrichtung mit kugelgelagerter Glocke könnte konstruktiv weiter verbessert werden. Das Kugellager war nicht exakt koaxial zur Achse des Waferhalters eingebaut worden und hatte außerdem Spiel. Mit Hilfe von Passstiften im Rand der Glocke könnte die Zeigerblende noch genauer über dem Mittelpunkt des Wafers bzw. der Waferhalterung befestigt werden. Auch die Vorgehensweise beim Messen der Schichtdickenverteilung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht optimal. Das für die Goldverteilung erreichte, gute Ergebnis könnte also noch verbessert werden.

2.8 PI-Ringe und Chrompunkte

Nach der Herstellung der DMS mit dem Abhebeverfahren wurde ein ca. 20 μm hoher PI-Ring aufgebracht (Schritt 6, Bild 2.8-1 a) oder Bild 7.2-3 im Anhang). Danach wurde auf der Rückseite des Dünnglases die Chromschicht strukturiert (Schritt 7, Bild 2.8-1 b)).

a)



b)

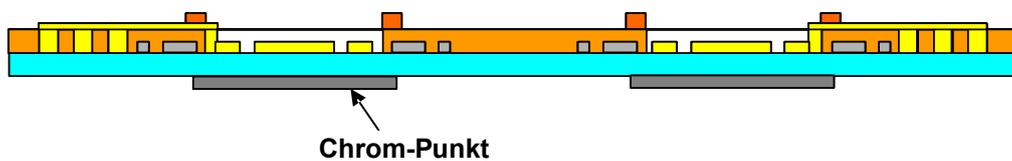


Bild 2.8-1: a) Aufbringen von PI-Ringen (Schritt 6) b) Nasschemisches Ätzen der Chromschicht auf der Substratunterseite (Schritt 7).

Die entstandenen Chrompunkte dienen in Schritt 9 (Bild 2.10-1) als Maskierung beim Ätzen des Dünnglassubstrats zu ca. 2 mm großen Kreisplatten. Die Chrompunkte wurden durch nasschemisches Ätzen hergestellt. Zur Strukturierung wurde, wie bei der Herstellung der Chromhaftringe und Heizelemente, der Fotolack AZ 4533 verwendet. Nach dem Chromätzen wurde der Fotolack auf der Glasoberfläche belassen. Dies war notwendig, um durch die Kombination von Chrom und Fotolack eine ausreichend starke Maskierung für das Ätzen des Dünnglases mit Flußsäure zu erhalten, wie noch in Kapitel 2.10 näher erläutert wird. Bei der Kontaktbelichtung von AZ 4533 in Schritt 7 durfte die Chrommaske nur schwach, z. B. mit -0,5 bar Vakuumkontakt, angesaugt werden. Durch den Vakuumkontakt wurden vor allem die 20 μm hohen PI-Ringe auf die Ansaugplatte des Belichters gedrückt. Bei zu starkem Andruck wären die PI-Ringe beschädigt worden. Die Fertigungsreihenfolge, zuerst die PI-Ringe und dann die Chrompunkte zu strukturieren, war so gesehen ungünstig, konnte jedoch nicht umgedreht werden. Die zusätzliche Maskierung der Chrompunkte mit AZ 4533 war aber unverzichtbar und wäre bei der hohen Aushärtungstemperatur von 400 $^{\circ}\text{C}$, die für den PI-Fotolack benötigt wurde, thermisch zersetzt worden. Durch den schwachen Vakuumkontakt von -0,5 bar konnte eine Beschädigung der PI-Ringe vermieden werden.

2.9 Kammerkleben von PEEK-Gehäusen

In diesem Fertigungsschritt wird der große Gehäusenutzen durch Kammerkleben mit dem Glassubstrat verbunden (Bild 2.9-1). Diese Klebetechnik wurde zuerst in [Büst94] zur Herstellung von Mikromembranpumpen angewendet. Die Gehäusenutzen für die Drucksensoren wurden durch Vakuumheißprägen [Heck98] einer 1 mm dicken PEEK-Platte hergestellt. Auf der heißgeprägten Seite des Gehäusenutzens entstanden zwölf Sensorkammern, die von einer 150 μm hohen Stegstruktur umgeben waren. Wird der Gehäusenutzen beim Kammerkleben auf das Substrat gepresst, bilden sich durch die Stegstruktur zwischen dem Substrat und dem Gehäusenutzen Klebstoffkammern. Die Klebstoffkammern werden über in Befüllbohrungen des Gehäusenutzens eingeklebte Gummischläuche mit Klebstoff befüllt. Nach dem Heißprägen waren Löcher und Öffnungen im Gehäusenutzen noch von einer dünnen, so genannten Prägerestschicht verschlossen. Durch Bohren oder Fräsen mit einem Handbohrer wurden die Restschichten entfernt.

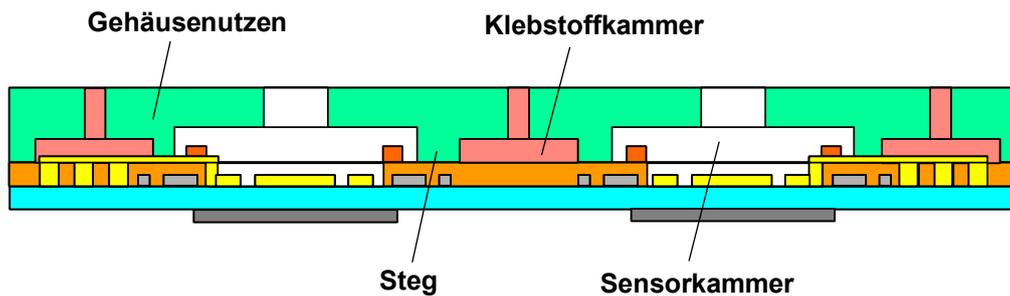


Bild 2.9-1: Aufkleben eines Gehäusenutzens durch Kammerkleben (Schritt 8).

Aus einer Diplomarbeit [Koll01] war bekannt, dass durch Polieren der Stegoberflächen eine höhere Ausbeute an fehlerfreien Klebungen erzielt werden kann. Dies wurde damit erklärt, dass der Spalt zwischen den Stegen und dem Substrat bei polierten Stegen kleiner wird. Mit abnehmender Spalthöhe erhöht sich quadratisch die viskose Reibung, so dass der Klebstoff länger braucht, um den Spalt zu durchkriechen. Die Stege wurden in den Klebeversuchen dieser Arbeit jedoch nicht poliert. Das Polieren der Stege hätte erstens einen weiteren Arbeitsschritt bedeutet und zweitens war die Bearbeitung der Stegflächen des kleinen Gehäusenutzens gar nicht möglich. In den kleinen Gehäusenutzen waren Positionierstifte angebracht, die ca. 0,5 mm über die Stegflächen hinaus ragten (Anhang, Bild 7.5-6). Beim Schleifen der Stegoberflächen hätten diese Stifte gestört und wären beschädigt worden. Die Positionierstifte wurden in [Wulf01] dafür vorgesehen, den kleinen Gehäusenutzen durch Stecken auf dem großen Gehäusenutzen zu positionieren. Positionierbohrungen anstelle von Positionierstiften wären in den Gehäusenutzen vorteilhafter, da diese beim Anschleifen der Stegoberflächen nicht stören würden. Die Gehäusenutzen könnten beim Kammerkleben mit Hilfe von Positionierstiften in einer Trägerplatte aufeinander ausgerichtet werden.

Das Kammerkleben wurde in einer Kammerklebeapparatur vorgenommen (Anhang, Bild 7.5-1). Mit der Apparatur konnte ein Gehäusenutzen auf Positioniermarken eines Glassubstrats ausgerichtet, mit einem Druckfedersystem auf das Substrat gepresst und durch Einspritzen von 2K-Epoxidharz in die Klebstoffkammern auf das Substrat geklebt werden. Beim Ausrichten hing der Gehäusenutzen in geringem Abstand über dem Glassubstrat an einer Vakuumplatte, während das Glassubstrat auf einem Positioniertisch lag. Mit Hilfe des Positioniertischs konnte das Glassubstrat unter dem Gehäusenutzen verfahren werden. Durch Zentrieren von Kreisringmarken des Substrats in Positionierbohrungen des Nutzens wurde der Nutzen auf das Substrat ausgerichtet. Anschließend wurde der Nutzen mit kontrolliertem Andruck, von z. B. 280 N, auf das Substrat gepresst, wobei die Stegstruktur des Nutzens auf dem Substrat aufsetzte. Durch die Stegstruktur entstanden zwischen dem Substrat und dem Nutzen Klebstoffkammern, die durch Bohrungen im Nutzen mittels darin eingeklebter Schläuche mit Klebstoff befüllt werden konnten. Das Substrat und der Gehäusenutzen werden in der Kammerklebeapparatur üblicherweise, z. B. auf 100 °C, erwärmt. Durch die erhöhte Temperatur wird der bei RT einfließende Klebstoff zunächst niederviskos und kann mit geringem Druck relativ schnell in die Klebstoffkammer eingespritzt werden. Die hohe Temperatur lässt den Klebstoff jedoch gleichzeitig schnell aushärten, wobei die Viskosität des Klebstoffs wieder ansteigt.

Das Glassubstrat wurde nicht direkt auf die Vakuumansaugplatte des Positioniertischs gelegt, sondern lag auf einem Reinraum- oder Seidenpapier auf einem Wafer. Der Wafer wurde unterlegt, weil anderenfalls das Glassubstrat durch die großen Vakuumbohrungen im Positioniertisch beim Ansaugen zerstört worden wäre. Ein als Auflagefläche verwendeter Wafer besitzt zudem eine sehr gute Ebenheit und geringe Oberflächenrauigkeit. Das Seidenpapier sollte ein besseres Gleiten des Glases auf der Waferoberfläche ermöglichen, wenn sich das Glas beim Andruck der Stegstruktur des Nutzens verformt und dabei kleine Bewegungen auf der Waferoberfläche ausführt. Alle Oberflächen wurden sorgfältig mit Stickstoff abgeblasen, damit Schmutzpartikel zwischen Wafer und Glassubstrat keine

punktuelle Belastungen auf das Glas verursachen konnten. Befüllt wurden die Klebekammern mit einem elektro-pneumatischen Dosiergerät, bei dem der Einspritzdruck einstellbar war.

In den Vorgängerarbeiten [Wulf01] und [Mart98] waren Gehäusenutzen aus den Kunststoffen PMMA und PSU zum Aufbau von Drucksensoren verwendet worden. Da diese Werkstoffe transparent sind und die Andruckplatte der Gehäusenutzen aus Glas gefertigt war, konnte der Klebstofffluss beim Kammerkleben beobachtet und der Einspritzvorgang rechtzeitig beendet werden. Eines der angestrebten Ziele dieser Arbeit war die Verwendung von Gehäusenutzen aus dem chemisch sehr beständigen Werkstoff PEEK. Im Gegensatz zu PMMA und PSU ist PEEK jedoch nicht transparent. Dadurch ergab sich beim Kammerkleben die Schwierigkeit, dass der Klebstofffluss nicht beobachtet werden konnte. Rechtzeitiges Beenden des Einspritzvorgangs war jedoch notwendig, weil pro Gehäusenutzen mehrere Klebekammern zu befüllen waren. Wurde eine Kammer zu lange mit Klebstoff befüllt, trat der Klebstoff an den Austrittsöffnungen der Kammer aus und floss in den Ausgang einer benachbarten, noch nicht befüllten Klebstoffkammer. Durch anschließendes Einspritzen von Klebstoff in die Nachbarkammer konnte die dort eingeschlossene Luft nicht mehr vollständig ausgetrieben werden. Durch die erhöhte Temperatur beim Kammerkleben war der zuvor in die Ausgänge der Nachbarkammer geflossene Klebstoff bereits stark ausgehärtet und verstopfte die Ausgänge. Befüllen von Klebstoffkammern mit abgestimmter, immer gleicher Dosierzeit war nicht möglich, da die Viskosität der verwendeten 2K-Epoxidharz-Klebstoffe, aufgrund der geringen Topfzeit von ca. 2 h bei RT, beim Verkleben - vor allem von mehreren Gehäusenutzen nacheinander - ständig zunahm und die Dosierparameter zeitabhängig hätten geändert werden müssen.

Der große Gehäusenutzen, der zuerst auf das Substrat geklebt wurde, hatte vier Klebstoffkammern. Für das Verkleben von Drucksensoren aus PEEK waren an den Ausgängen der großen Klebstoffkammern ‚Fenster‘ vorgesehen, die den an den Austrittsöffnungen der Kammern angekommenen Klebstoff beobachtbar machen sollten. Die Fenster grenzten jedoch nicht unmittelbar an die Austrittsöffnungen der Klebekammern an. Dadurch konnte Klebstoff für den Betrachter unsichtbar kapillar am Rand der Fenster entlang in die benachbarten Kammern fließen (Bild 2.9-2).

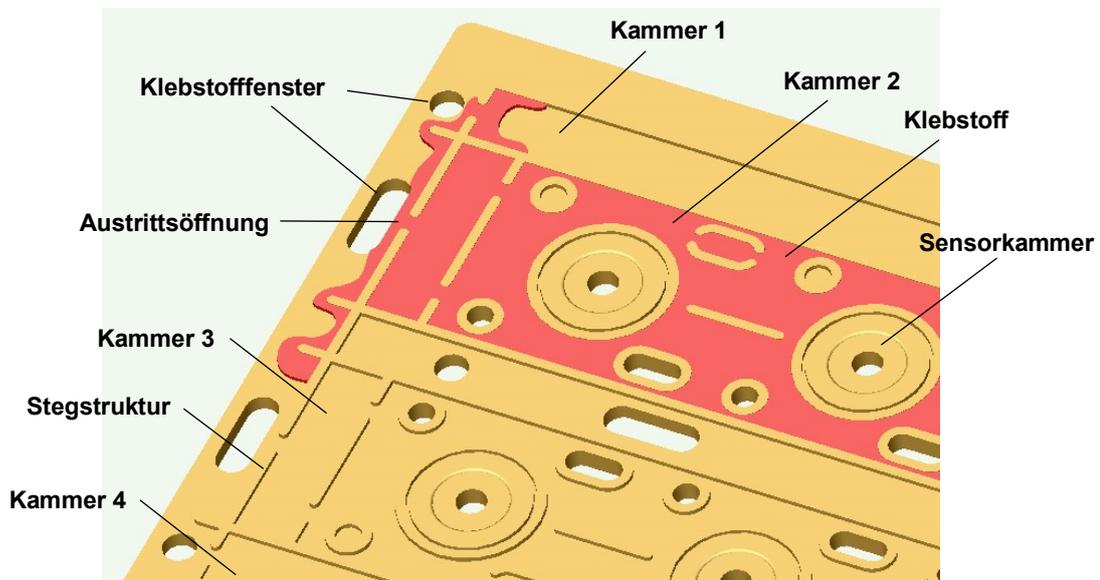


Bild 2.9-2: Klebstoff (rot) fließt aus Kammer 2 am Klebstofffenster entlang in die Nachbarkammer 1. Das nicht dargestellte Glassubstrat liegt beim Befüllen der Klebstoffkammern auf den Flächen der Stegstruktur auf. Beim Kammerkleben wird auf die Rückseite des dargestellten Nutzens geschaut.

Zunächst wurde die Idee des ‚Klebstofffensters‘ weitergeführt. Die Enden der Gehäusenutzen wurden mit einem Zylinderfräser und einem Handbohrgerät bis vor die Ausgänge der Klebstoffkammern eingefräst. Bei so vorbereiteten Gehäusen war der austretende Klebstoff leichter erkennbar und der Befüllvorgang konnte rechtzeitig beendet

werden (Bild 2.9-3). Das Nacharbeiten der Gehäuse war jedoch sehr zeitaufwändig, so dass eine weitere Möglichkeit getestet wurde.

Es wurde versucht, sowohl die großen Gehäusenutzen mit vier als auch die kleinen Gehäusenutzen mit zwei Klebstoffkammern zentral zu befüllen. Die Stegbereiche zwischen den Kammern wurden hierzu mit einem Kugelfräser, eingespannt in einem Handbohrgerät, abgetragen und auf diese Weise miteinander verbunden. Es entstand eine einzelne große Klebstoffkammer, die durch eine Bohrung in der Mitte des Nutzens befüllt werden konnte (Bild 2.9-4 und Bild 7.5-4 im Anhang). Durch die Vereinigung mehrerer Klebstoffkammern zu einer großen Kammer konnte vermieden werden, dass benachbarte Klebstoffkammern von außen zuliefen. Der Einspritzvorgang konnte relativ unkritisch abgebrochen werden, sobald Klebstoff in den Klebstofffenstern oder am Rand des Gehäusenutzens sichtbar wurde.

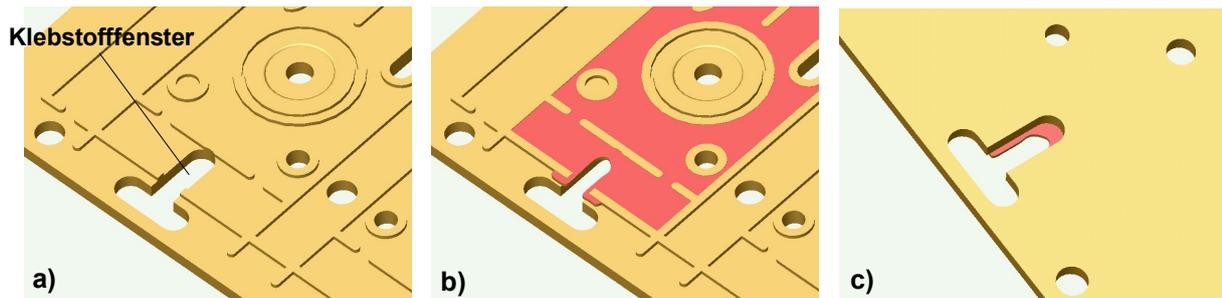


Bild 2.9-3: a) Verbessertes Klebstofffenster. b) Austretender Klebstoff fließt teilweise in das Fenster. c) Der Klebstoff ist beim Blick auf die Rückseite des Nutzens – wie in der Kammerklebeapparatur – im Klebstofffenster gut erkennbar.

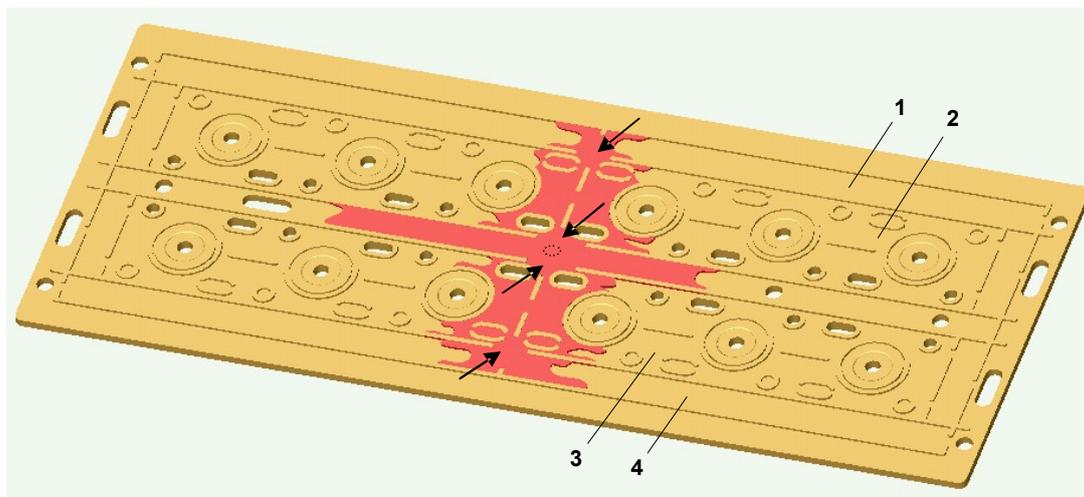


Bild 2.9-4: Klebstoff verteilt sich ausgehend von der zentralen Einspritzöffnung (gestrichelte Linie) in der Klebstoffkammer des Gehäusenutzens. Die Pfeile weisen auf die Stellen, an denen Stege entfernt wurden, um die Klebstoffkammern 1 bis 4 zu verbinden. Das die Stegstruktur abdeckende Glassubstrat ist nicht dargestellt.

Vielfach wurden am IMT Gehäusenutzen mit Epo-Tek 353 ND, einem 2K-Epoxidklebstoff der Firma Polytec, Waldbronn, bei Temperaturen von 100–120 °C auf Substrate mit Trägermembranen aus PI geklebt. Als Substrate für die Trägermembranen waren bisher, außer in [Wulf01] und in dieser Arbeit, oxidierte Wafer verwendet worden. Erste Klebeversuche auf Dünnglassubstraten wurden zunächst ebenfalls mit Epo-Tek 353 ND und den genannten Temperaturen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Glassubstrate in Kombination mit aufgeklebtem PEEK-Gehäusenutzen einem starken thermischen Zweimaterialeffekt unterlagen und sich beim Abkühlen, von z. B. 100 °C auf RT, extrem durchbogen (Anhang, Bild 7.5-2). Der Grund hierfür sind die stark unterschiedlichen WAK der Kunststoffe, PEEK und Epoxidharz, und des Glassubstrats. Da die prozessierten Dünngläser durch die Handhabung bis zum Kammerkleben unvermeidlich leicht vorgeschädigt worden waren, entstanden nach dem Aushärten und Abkühlen des Klebstoffs aufgrund der starken Biegespannungen Risse in den Gläsern, die quer durch das Glassubstrat und vielfach auch durch die Kreisplatten verliefen (Anhang, Bild 7.5-3). Beim

anschließenden Flusssäureätzen nahm die Rissbildung stark zu, da die geätzten, schwächer werdenden Glassubstrate den gespeicherten Spannungen in den durchgebogenen Gehäusenutzen nicht länger standhalten konnten. Nach dem Ätzen waren meist alle Kreisplatten des Nutzens zerbrochen. Auch die Trägermembran wurde in den unverklebten Bereichen, also über den Sensorkammern, durch Risse im Glassubstrat beschädigt.

Das Zweimaterialproblem beim Kammerkleben wurde in [Wulf01] nicht erwähnt. Das Problem trat vermutlich nicht auf, da die Gehäusenutzen mit einem UV-Kleber bei RT verklebt worden waren. Dies war möglich, weil die verwendeten Gehäusenutzen aus PSU bestanden und daher transparent waren. Die in [Wulf01] erwähnten Ablösungserscheinungen der PI-Folie von Epoxidklebstoffen beim Flusssäureätzen wurden in dieser Arbeit nicht beobachtet. Teilweise wurde allerdings festgestellt, dass der Klebstoff an der Oberfläche nach dem Flusssäureätzen weich war. Die PI-Membran ließ sich beispielsweise mit der abgerundeten Spitze einer Pinzette in den Klebstoff eindrücken. Durch Tempern, z. B. bei 150 °C für 5 min, konnte der Epoxidkleber jedoch nachträglich wieder verfestigt werden. Wurde ein Nachhärten bei höheren Temperaturen bereits vor dem Flusssäureätzen vorgenommen, d. h. direkt nach dem Kammerkleben, war der Klebstoff nach dem Flusssäureätzen hart.

Als nächstes wurde versucht, die Gehäusenutzen bei RT aufzukleben, um den Zweimaterialeffekt zu vermeiden. Der Klebstoff EPO-TEK 302 ist ebenfalls ein 2K-Klebstoff und härtet bei RT innerhalb 1 h aus. Da die Viskosität dieses Klebstoffs mit 5500 mPas hoch war und der Klebstoff deshalb mit hohem Druck in die Klebstoffkammern eingespritzt werden musste, lief Klebstoff teilweise in die Sensorkammern aus. Durch höheren Andruck der Stegstruktur des Gehäusenutzens an das Substrat hätte die Abdichtwirkung der Stege verbessert werden können. Mit der Kammerklebeapparatur ließ sich allerdings nur ein maximaler Andruck von 350 N erzeugen. Außerdem war die Belastungsgrenze für das Dünnglas bei diesem Andruck bereits überschritten, so dass sich durch den Andruck Risse im Glas gebildet hatten. Nachteilig an EPO-TEK 302 ist auch die kurze Topzeit von 5–10 min. Für das Verkleben mehrere Substrate nacheinander musste ständig neuer Klebstoff gemischt werden.

Weitere Versuche wurden mit Ethyl-Cyanoacrylat-Klebstoffen unternommen. Da es sich hierbei um so genannte Sekundenkleber handelt, bestand im Hinblick auf eine rationelle Fertigung die Hoffnung, mit diesen Klebstoffen schnell ‚handfeste‘ Verklebungen realisieren zu können. Gemeint ist, dass der Klebstoff nicht unbedingt vollständig sondern zunächst in den engen Spalten zwischen den Stegoberflächen und dem Substrat schnell aushärten sollte, um die verklebten Substrate nach möglichst kurzer Zeit wieder aus der Klebeapparatur entnehmen zu können. In den 150 µm hohen Klebstoffkammern dürfte der Cyanokleber dagegen zunächst noch flüssig bleiben. Bei einer Serienfertigung von Drucksensoren würde es kaum stören, wenn die verklebten Substrate zur vollständigen Aushärtung längere Zeit bei RT gelagert werden müssten.

Versuche wurden mit Loctite 406 unternommen, da dieser Klebstoff sehr gut auf Kunststoffen haftet. Bei RT waren die Stege nach 10 min noch nicht zuverlässig abgedichtet. Erst nach 1 h konnten die Gehäuse der Kammerklebeapparatur entnommen werden. Zur vollständigen Aushärtung benötigte der Cyanoklebstoff ca. 48 h bei RT. Bei einer höheren Klebetemperatur von 50 °C jedoch härtete der Klebstoff bereits in 45 min fast vollständig aus. Loctite 406 schrumpft bis zur vollständigen Aushärtung allerdings sehr stark. Durch den Schrumpf erhielt die Glasoberfläche eine wellige Struktur (Anhang, Bild 7.5-5). Risse waren in der welligen Glasoberfläche nicht zu entdecken. Dies kann damit begründet werden, dass der Zweimaterialeffekt bei einer Verklebetemperatur von 50 °C schwach war und kaum eine Durchbiegung von Nutzen und Glassubstrat zur Folge hatte. Mit einem sehr geringen Einspritzdruck von 30 mbar konnten die vereinigten Klebekammern in 1,5 min befüllt werden. Die Haftung von Loctite 406 auf PEEK und der PI-Folie war sehr gut. Außerdem hielt Loctite 406 der Beanspruchung durch Glasätzen mit 10 %iger Flusssäure problemlos stand. Beim Glasätzen sind ebenfalls keinerlei Risse im Glas entstanden. Leider wurden in den Klebekammern öfters große und störende Blasen eingeschlossen. Das Einschließen von

Blasen beim Befüllen wurde vermutlich durch die extrem niedrige Viskosität des Klebstoffs von 20 mPas und das damit verbundene schnelle kapillare Vorseilen des Klebstoffs entlang der Stegwände begünstigt. Ein weiterer Nachteil von Loctite 406 ist, dass dieser Klebstoff durch Feuchtigkeit an Festigkeit verliert. Wenn jedoch die Forderung erfüllt wird, die Sensorkammer zur Klebstoffkammer hin abzudichten, wäre ein direkter Kontakt des Klebstoffs mit einer Flüssigkeit in der Sensorkammer unterbunden. Klebstoffugen zwischen Stegen und der Trägermembran bleiben andererseits an der Außenseite der Drucksensorgehäuse offen. Für die mit Loctite 406 verklebten Sensorgehäuse müsste daher der Einsatz in trockener Umgebung gefordert werden. Auch der Cyanoklebstoff Loctite 480 wurde getestet. Dieser Klebstoff benötigte eine Aushärtungszeit von einigen Tagen. Durch Verkleben bei höheren Temperaturen, z. B. bei 50 °C, konnte die Aushärtung nicht entscheidend beschleunigt werden.

Bis hierher hatten die Kammerklebeversuche ergeben, dass ein geringer Andruck der Stegstruktur von 280 N an das Substrat zur Vermeidung von Glasbruch notwendig war. Die Abdichtung der Klebstoffkammern war jedoch ausreichend, da niederviskose Klebstoffe mit sehr geringem Druck in die Klebstoffkammer gespritzt werden konnten. Klebungen konnten unter diesen Bedingungen auch bei niedrigen Klebetemperaturen fehlerfrei durchgeführt werden, d. h. Klebstoff war nicht unter den Stegen hindurch in Sensorkammern der Drucksensoren gelangt. Epo-Tek 353 ND mit einer Viskosität von 3000–5000 mPas wird im Vergleich hierzu üblicherweise mit hohem Druck von z. B. 1,5 bar in die Klebekammern gespritzt. Dies führt vermutlich deshalb kaum zu Klebefehlern, weil Epo-Tek 353 ND bei den hohen, verwendeten Klebetemperaturen von 100–120 °C in den engen Spalten zwischen den Stegoberflächen und dem aufgeheizten Substrat sehr schnell aushärtet und die Klebstoffkammern auf diese Weise auch bei höheren Einspritzdrücken wirksam abgedichtet werden.

Letztlich schied Loctite 406 wegen der nicht zu vermeidenden großen Blaseneinschlüsse in den Klebstoffkammern aus. Aufgrund der guten Erfahrungen mit niederviskosen Klebstoffen wurde EPO-TEK 301 getestet, ein 2K-Klebstoff mit einer Viskosität von 100–200 mPas. Verklebt wurde bei 50 °C, damit die Durchbiegung der Substrate nach dem Verkleben gering blieb. Der Klebstoff wurde mit 30–40 mbar zentral eingespritzt. Ein großer Gehäusenutzen konnte in 4 min befüllt werden. Bei 50 °C war der Klebstoff nach 2 h ausgehärtet. Die Ausbeute mit diesem Klebstoff war unter den genannten Bedingungen gut.

2.10 Glasätzen mit Flusssäure

Nach dem Kleben der ersten Gehäusehälfte auf das Dünnglas, wurden die Kreisplatten der Drucksensoren mit 10 %iger Flusssäure aus dem Dünnglas herausgeätzt (Bild 2.10-1).

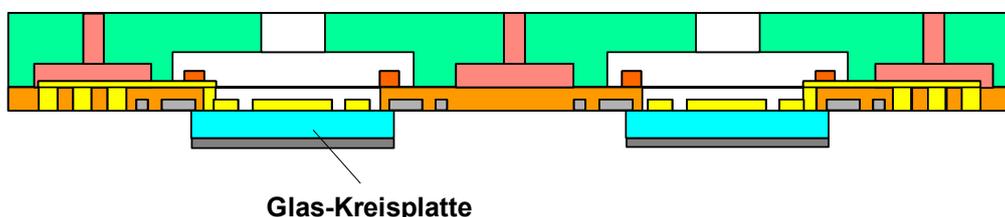


Bild 2.10-1: Maskierte Kreisplatten werden mit Flusssäure aus dem Dünnglas herausgeätzt, Schritt 9.

Auf der nicht verklebten Seite des Dünnglases befanden sich die in Schritt 7 strukturierten Chrompunkte im Solldurchmesser der späteren Kreisplatten von ca. 2 mm. Die Chrompunkte dienten als Ätzmaske und hatten zunächst eine Schichtdicke von 100 nm, wie in [Wulf01] angegeben.

Beim Flusssäureätzen fiel die genaue Bestimmung des Ätzendes schwer. In Vorversuchen wurde daher das Erkennen des Ätzendes geübt und die erzielten Ätzzeiten wurden notiert. 200 ml einer 10 %igen, ungepufferten Flusssäure wurden jeweils zum Ätzen bis zur völligen

Auflösung des Glases verwendet. Geätzt wurden unbehandelte Gläser, die mit ihrer gesamten Fläche mit Doppelklebeband auf Träger-Scheiben geklebt worden waren. Als Träger wurden 1 mm dicke PEEK-Scheiben mit 80 mm Durchmesser verwendet. Das Gefäß mit der Flusssäure wurde zur Unterstützung des Ätzvorgangs auf einem Schüttler mit 75 U/min langsam geschwenkt. Die in der Ätze dünner und zerbrechlicher werdenden Gläser wurden von dem Doppelklebeband bis zum Ätzende gut auf den Trägerscheiben gehalten. Zum Erkennen des Ätzendes stellte sich der Hintergrund des weißen Klebebands und die Verwendung von Doppelklebeband zur Befestigung des Dünnglases als absolut notwendig heraus. In Versuchen ohne Träger waren gegen Ätzende, d. h. kurz vor der völligen Auflösung des Glases, dünne und nicht zusammenhängende Glasreste in der Flusssäure nicht mehr erkennbar gewesen, so dass das Ätzende ohne Träger nicht genau bestimmbar war.

Es war erforderlich, ca. 5 min vor dem erwarteten Ätzende das sich auflösende Glas zu beobachten, um die dünne Restglasschicht noch gut erkennen und bis zur vollständigen Auflösung im Auge behalten zu können. Restglasschichten schillern im Neonlicht schwach in Streifen von Regenbogenfarben. Bei diesem Effekt handelt es sich um ein Phänomen der Interferenz an dünnen Schichten, auch Newtonsche Ringe genannt. Als abgeschlossen wurde das Ätzen erachtet, wenn die letzten Inseln von Glasresten sich aufgelöst hatten. Nacheinander wurden in den Vorversuchen mit demselben Flusssäure-Ansatz mehrere Gläser aufgelöst. Da die Flusssäure nicht gepuffert war, ergaben sich mit zunehmender Anzahl an Gläsern, die im selben Ansatz aufgelöst wurden, längere Ätzzeiten. In der Tabelle 2.10-1 sind die Ätzzeiten zur Auflösung von 50 µm starken Dünngläsern mit 10 %iger ungepuffertter Flusssäure aufgeführt.

Versuch	Ätzzeit [h] Glas 1	Ätzzeit [h] Glas 2	Ätzzeit [h] Glas 3	Ätzzeit [h] Glas 4	Ätzzeit [h] Glas 5
1	—	1:05:10	—	—	—
2	0:57:12	1:06:30	1:09:04	1:15:00	—
3	—	—	0:57:03	1:02:42	1:05:42
4	0:55:13	0:54:16	1:06:12	1:10:22	1:11:16
5	—	59:37:00	1:09:57	1:10:20	1:10:15
Minimum [h]	0:55:13	0:54:16	0:57:03	1:02:42	1:05:42
Maximum [h]	0:57:12	1:06:30	1:09:04	1:15:00	1:11:16
Differenz [min]	01:59	12:14	12:01	12:18	5:34

Tabelle 2.10-1: Ätzen von 50 µm starkem Dünnglas in 200 ml ungepuffertter, 10 %iger Flusssäure bei RT. Schüttler: 75 U/min.

Die Ätzzeiten für nacheinander mit demselben Flusssäureansatz geätzte Gläser, Glas 1 bis Glas 5, sind aufgeführt. Es wurden fünf Versuchsreihen durchgeführt und die Ätzzeiten notiert. Die Ätzzeiten schwankten bei derselben Anzahl geätzter Gläser maximal um ca. 12 min. Nachdem die Ätzzeiten bekannt waren und das Erkennen des Ätzendes geübt worden war, wurden Kreisplatten aus fertig strukturierten Dünnglassubstraten mit hinterklebten Gehäusenutzen geätzt. Wiederum wurden PEEK-Scheiben als Träger verwendet. In die Trägerscheibe wurde ein Fenster gesägt, das groß genug war, um den Gehäusenutzen darin einzulassen (Bild 2.10-2).

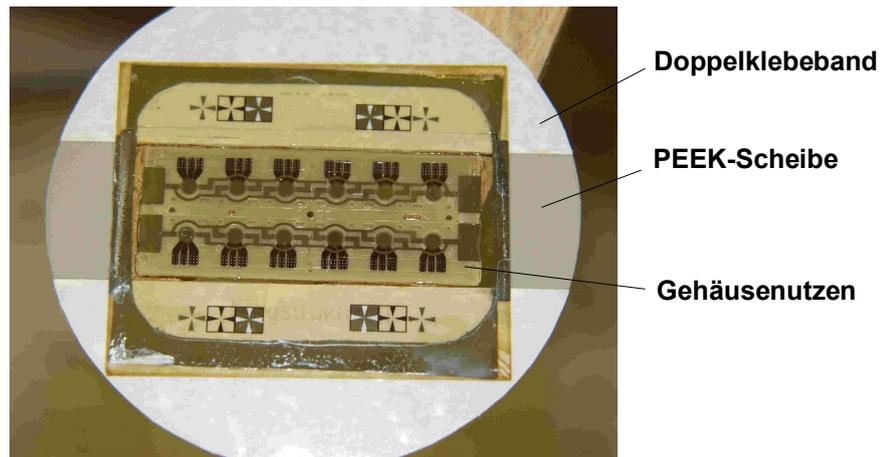


Bild 2.10-2: Ein strukturiertes Dünnglas mit hinterklebtem Gehäusenutzen wurde zum Glasätzen mit Doppelklebeband auf eine Trägerscheibe aus PEEK geklebt. Der Gehäusenutzen ist in ein rechteckiges Fenster der Trägerscheibe eingelassen.

So war es möglich, das vom Gehäusenutzen überstehende Glas vollflächig mit Doppelklebeband auf die Trägerscheibe zu kleben. Der Träger war wichtig, um die im überstehenden Glasbereich nicht hinterklebte, beim Ätzen frei werdende PI-Trägermembran festzuhalten. Die nicht hinterklebte Trägermembran hatte sich in ersten Versuchen ohne Träger über das Gehäuse und die Kreisplatten gelegt. Dadurch wurde der Ätzworgang behindert. Nach dem Ätzen ließ sich die dünne Trägermembran mit einer Pinzette nur mühsam vom Gehäusenutzen abziehen. Auch beim anschließenden Spülen und Reinigen des Gehäuses mit den fertig geätzten Kreisplatten war die Trägerscheibe sehr nützlich.

Wie bereits erwähnt waren die ersten Kreisplatten mit 100 nm Chrom maskiert. Die 100 nm dicke Chromschicht konnte das Glas beim Ätzen jedoch nur unzureichend schützen. Die Ränder der Kreisplatten wurden stark unterätzt, so dass sich die Chromschicht aufrollte (Bild 2.10-3 mit Vergrößerung in Bild 2.10-4).

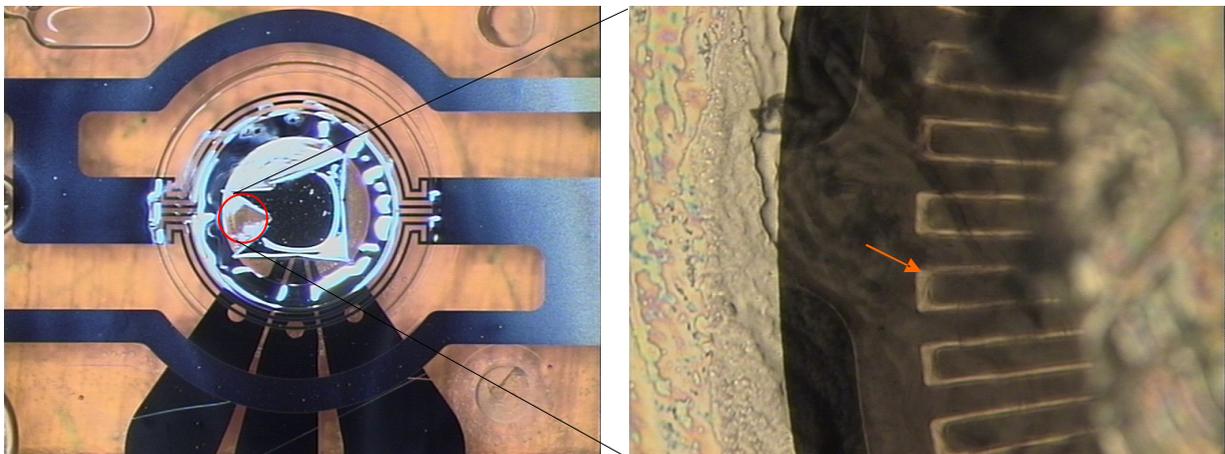


Bild 2.10-3: Starke Unterätzung an einer Kreisplatte mit 100 nm Chrom als Maskierung. Die unterätzte Chromschicht rollte sich auf.

Bild 2.10-4: Durch den unterätzten Rand der Kreisplatte ist der radiale DMS sichtbar.

Die Chromschicht war außerdem nicht vollständig deckend bzw. wies Fehlstellen auf, die sich beim Ätzen auch innerhalb der Kreisplatten als punktförmige starke Ätzangriffe bemerkbar machten. An diesen Stellen bildeten sich tiefe Ätzgruben im Glas. Daher wurden im Weiteren Versuche durchgeführt, um die Maskierung der Kreisplatten zu verbessern. Die Ergebnisse der Maskierungsversuche sind in der Tabelle 2.10-2 festgehalten.

Die Gläser wurden vor dem Ätzen mit 2K-Epoxidklebstoff auf PEEK-Scheiben geklebt. Auf Doppelklebeband hafteten die übrig bleibenden, ausgeätzten Kreisplatten nicht ausreichend gut. Es zeigte sich, dass die Positivfotolacke AZ 4533 und AZ 4562, die sich nur in ihrer Viskosität voneinander unterscheiden, nicht auf Glas haften. Auch eine Vorbehandlung der

Gläser durch Bedampfen mit HMDS konnte nicht verhindern, dass sich der Fotolack in der Flusssäure vollständig vom Glas ablöste.

Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Ergebnis
100 nm Chrom	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr starke Unterätzung der Plattenränder • Fransiger Ätzrand • Tiefe Ätzgruben in Plattenmitte
150 nm Chrom	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Unterätzung der Plattenränder • Glatter Ätzrand • Tiefe Ätzgruben in Plattenmitte
200 nm Chrom	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • Unterätzung am oberen Glasrand: 65–72 µm • Glatter Ätzrand • Vereinzelt tiefe Ätzgruben in Plattenmitte
100 nm Chrom	150 nm Chrom	3 µm AZ4533	<ul style="list-style-type: none"> • Breite des Glases über dem Chrom-Haftring 43 µm • Durchmesser der Kreisplatte am oberen Rand: Solldurchmesser -245 µm
8,3 µm AZ4533	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack löst sich vollständig ab
16,8 µm AZ4562	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack löst sich vollständig ab
HMDS	8,3 µm AZ4533	—	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack löst sich vollständig ab
15 nm Chrom	8,3 µm AZ4533	—	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack haftet gut auf Chrom • Kein Ätzangriff in Plattenmitte • Stark fransiger Ätzrand • Verchromte Glasbereiche ohne Lack werden vollständig aufgelöst • Unterätzung des Plattenrands: 28–51µm
150 nm Chrom	8,3 µm AZ4533	—	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack haftet gut auf Chrom • Kein Ätzangriff in Plattenmitte • Glatter Ätzrand • Unterätzung des Plattenrands: 82 µm • Ätzverlust am unteren Plattenrand: 20 µm
15 nm Chrom	120 nm Gold	—	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Ätzangriff in Plattenmitte • Glatter Ätzrand • Unterätzung des Plattenrands: 57 µm
15 nm Chrom	120 nm Gold	8,3 µm AZ4533	<ul style="list-style-type: none"> • Fotolack haftet gut auf Gold • Kein Ätzangriff in Plattenmitte • Glatter Ätzrand • Unterätzung des Plattenrands: 59 µm

Tabelle 2.10-2: Gläser mit unterschiedlicher Maskierung wurden mit 10 %iger Flusssäure geätzt.

In der Tabelle ist auch ein Versuch aufgeführt, bei dem auf eine vorhandene 100 nm dicke Chromschicht eine zweite Chromschicht aufgedampft wurde. Dieser Versuch wurde durchgeführt, weil Glassubstrate mit 100 nm dicken Chromschichten übrig geblieben waren und genutzt werden sollten. Zusätzlich wurde die zweite Chromschicht mit AZ 4533 maskiert. Dennoch war die Unterätzung groß. Weitere Versuche mit verstärkten Chromschichten erbrachten ähnlich schlechte Ergebnisse. Der Grund hierfür ist, dass Chrom an Luft oxidiert und neu aufgesputterte Chromschichten schlecht auf einer bereits oxidierten Chromoberfläche haften. Interessant war jedoch festzustellen, dass die Haftung abhängig vom verwendeten Beschichtungsverfahren und Targetabstand war. Aufgedampftes Chrom haftete besonders schlecht, aufgesputtertes Chrom haftete bei einem Targetabstand von 140 mm mäßig und bei 60 mm Targetabstand relativ gut auf der zuvor aufgetragenen und an der Luft oxidierten Chromschicht.

Die Versuche zur Maskierung der Gläser beim Flusssäureätzen zeigten auch, dass selbst eine 200 nm dicke Chromschicht für eine Maskierung noch ungeeignet ist. Zwar war die

Unterätzung am oberen Plattenrand mit 65–72 μm im Vergleich mit anderen Ergebnissen gering, aber die Chromschicht war noch nicht vollständig geschlossen, so dass weiterhin tiefe Ätzgruben auf der Oberfläche der Kreisplatten zu finden waren (Bild 2.10-5). Gute Ergebnisse ergaben sich mit zweischichtigen Masken aus Chrom und AZ 4533. Der AZ-Lack haftete bereits auf 15 nm dünnen Chromschichten sehr gut und schützte die Glasoberfläche in der Flusssäure so wirksam, dass Ätzgruben in Plattenmitte nicht mehr auftraten. Die Unterätzung am Rand der Kreisplatte war mit 28–51 μm relativ gering jedoch sehr unregelmäßig (Bild 2.10-6).

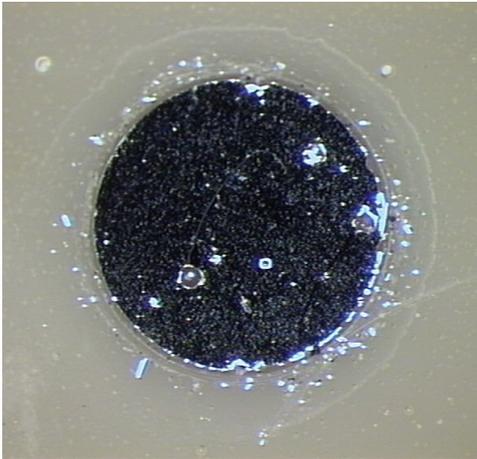


Bild 2.10-5: Ätzgruben auf einer Kreisplatte, die mit 200 nm Chrom maskiert war.

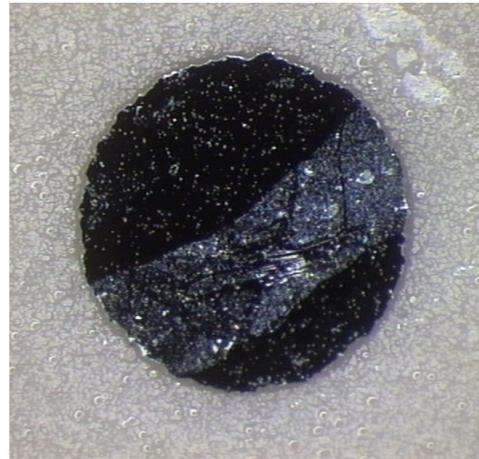


Bild 2.10-6: Fransiger Rand einer mit 15 nm Chrom und 8,3 μm AZ 4533 maskierten Kreisplatte.

Interessant an diesem Versuch war auch, dass Glasbereiche mit 15 nm Chrom aber ohne AZ-Lack innerhalb der normalen Ätzzeit fast vollständig aufgelöst werden konnten. Daran zeigte sich, dass die Chromschicht eine reine Haftvermittlungsfunktion für den AZ-Lack ausführte und dass die Glasoberfläche allein durch den AZ-Lack vor der 10 %igen Flusssäure geschützt wurde. Das Sputtern einer dickeren Chromschicht, von z. B. 150 μm , und die zusätzliche Abdeckung mit 8,3 μm AZ 4533 verbesserte die Ätzschutzwirkung am Kreisplattenrand, der im Vergleich zu dem Versuch mit 15 μm Chrom und 8,3 μm AZ 4533 wesentlich glatter wurde (Bild 2.10-7 und 2.10-8).

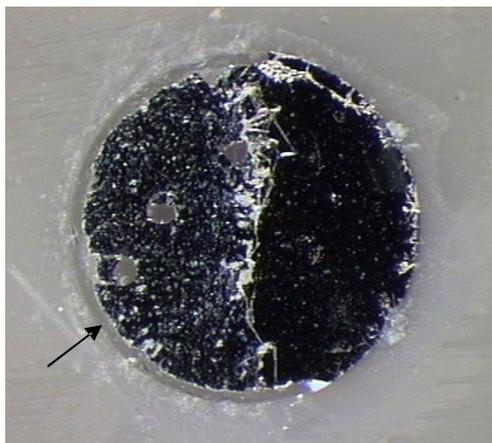


Bild 2.10-7: Kreisplatte mit 150 nm Chrom und 8,3 μm AZ4533 als Maskierung. Der Fotolack auf der linken Hälfte der Kreisplatte wurde abgekratzt, so dass die Unterätzung am Rand (Pfeil) sichtbar wurde.

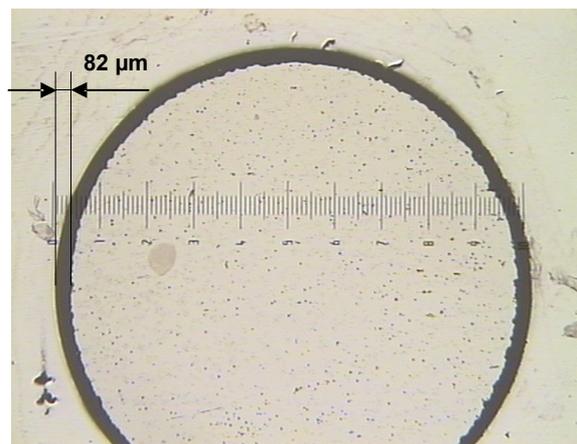


Bild 2.10-8: Dieselbe Kreisplatte wie links. Der Fotolack und die Chromschicht wurden entfernt. Es sind keine Ätzgruben auf der Kreisplatte vorhanden. Die Unterätzung ist am dunklen Rand erkennbar.

Sehr gut wurde das Glas mit Schichten aus 15 nm Chrom mit 120 nm Gold beim Ätzen geschützt. Eine 120 nm dicke Goldschicht scheint vollständig geschlossen zu sein, da keine Anzeichen von Ätzangriffen innerhalb der vergoldeten Bereiche gefunden werden konnten. Die Ränder der Kreisplatte waren außerdem sehr glatt und die Unterätzung am oberen Rand der Kreisplatte mit 57 μm gering. Eine zusätzliche Schicht aus AZ 4533 auf der Goldschicht verbessert dieses Ergebnis nicht.

Die sehr gut geeignete Maskierung aus 15 nm Chrom und 120 nm Gold konnte relativ einfach durch nasschemisches Ätzen der Goldschicht hergestellt werden. Die 15 nm dicke Chromschicht musste nicht strukturiert werden, da das Dünnglas wie oben erwähnt in den mit 15 nm Chrom beschichteten Bereichen problemlos von der Flusssäure aufgelöst werden konnte. Andererseits war das Ätzergebnis mit einer zweilagigen Schicht aus Chrom und AZ-Lack ebenfalls sehr gut, so dass bei der weiteren Fertigung von Drucksensoren Glaskreisplatten mit einer Maskierung aus 150 nm Chrom und 3 μm AZ 4533 geätzt worden sind. Eine 3 μm anstelle einer 8,3 μm dicken AZ 4533-Schicht erwies sich letztlich als ausreichend.

Angemerkt werden muss, dass nicht untersucht worden ist, ob die Fehlstellen in der Chromschicht, an welchen sich Ätzgruben im Dünnglas gebildet hatten, auf nicht entfernte, hartnäckige Verunreinigungen der Glasoberfläche hätten zurückgeführt werden können. Verunreinigungen hätten die Haftung der spröden Chromschicht auf dem Dünnglas behindert haben können, so dass die Chromschicht an solchen Stellen rissig geworden oder abgeblättert war. Eventuell war die beschriebene Reinigung der Gläser im Ultraschallbad und das Sputterätzen für 30 s vor dem Sputtern nicht ausreichend. Die Gläser könnten zur Beseitigung von organischen Resten z. B. noch mit einer stark oxidierend wirkenden Piranha-Lösung¹¹ gereinigt werden. Eventuell sind die Ätzgruben jedoch auch an rauen Stellen auf der Glasoberfläche aufgetreten. In diesem Fall hätte eine verbesserte Reinigung der Gläser keine Änderung erbracht.

Bei Kreisplatten, die auf einem Gehäusenutzen geätzt worden waren, wurde festgestellt, dass ein normales gründliches Spülen und Trocknen des Nutzens nach dem Ätzen mit Flusssäure nicht ausreichte. Auf der PI-Membran und vor allem neben und auf den Kreisplatten bildete sich eine Salzkruste (Bild 2.10-9). Hierbei handelte es sich vermutlich um Salze des aufgelösten Glases. Um das Entstehen der Salzschiicht zu verhindern, wurden die Nutzen nach dem Flusssäureätzen in 250 ml DI-Wasser mit 5 g Zitronensäurepulver 30 min in einem Rührer, also mit Wasserbewegung, gereinigt (Bild 2.10-10).

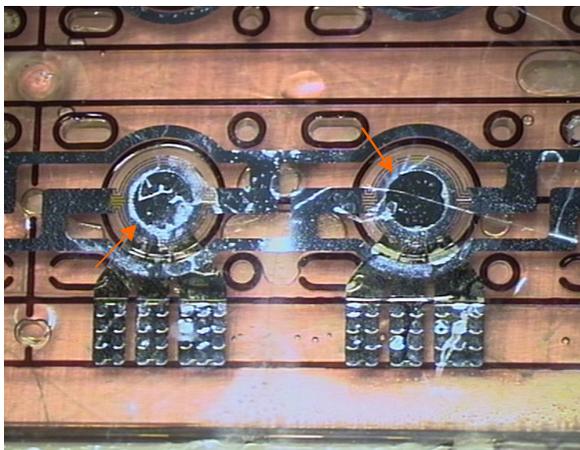


Bild 2.10-9: Salzreste auf einem Gehäusenutzen nach dem Glasätzen, Spülen und Trocknen.



Bild 2.10-10: Gehäusenutzen nach der Reinigung in Wasser mit Zitronensäure.

¹¹ Piranha-Lösung... Peroxomonoschwefelsäure, Mischung aus 30%iger Wasserstoffperoxidlösung und konzentrierter Schwefelsäure

2.11 Abdichten der Sensorkammer durch Heizelementschweißen

Zu der Forderung nach chemischer Beständigkeit des Drucksensors gehörte auch, dass Flüssigkeiten in der Drucksensorkammer nicht an den Rand der Klebekammern kriechen und dort in Berührung mit dem Klebstoff kommen dürfen. Aus diesem Grund wurde in [Wulf01] ein Verfahren konzipiert, welches die Abdichtung der Sensorkammer und eine zusätzliche Verbindung der Gehäusenutzen, trotz dazwischenliegender PI-Membran, ermöglichen sollte. Der Ansatz sah vor, auf der Trägermembran Leiterbahnen aus Chrom zu strukturieren, welche als Heizelemente zum Kunststoffschweißen dienen sollten, indem sie durch Widerstandserwärmung mit einem elektrischen Strom aufgeheizt werden. Die Heizelemente sind von Löchern in der Membran umgeben, durch die das lokal aufgeschmolzene Gehäusematerial hindurchfließen kann (Bild 2.11-1).

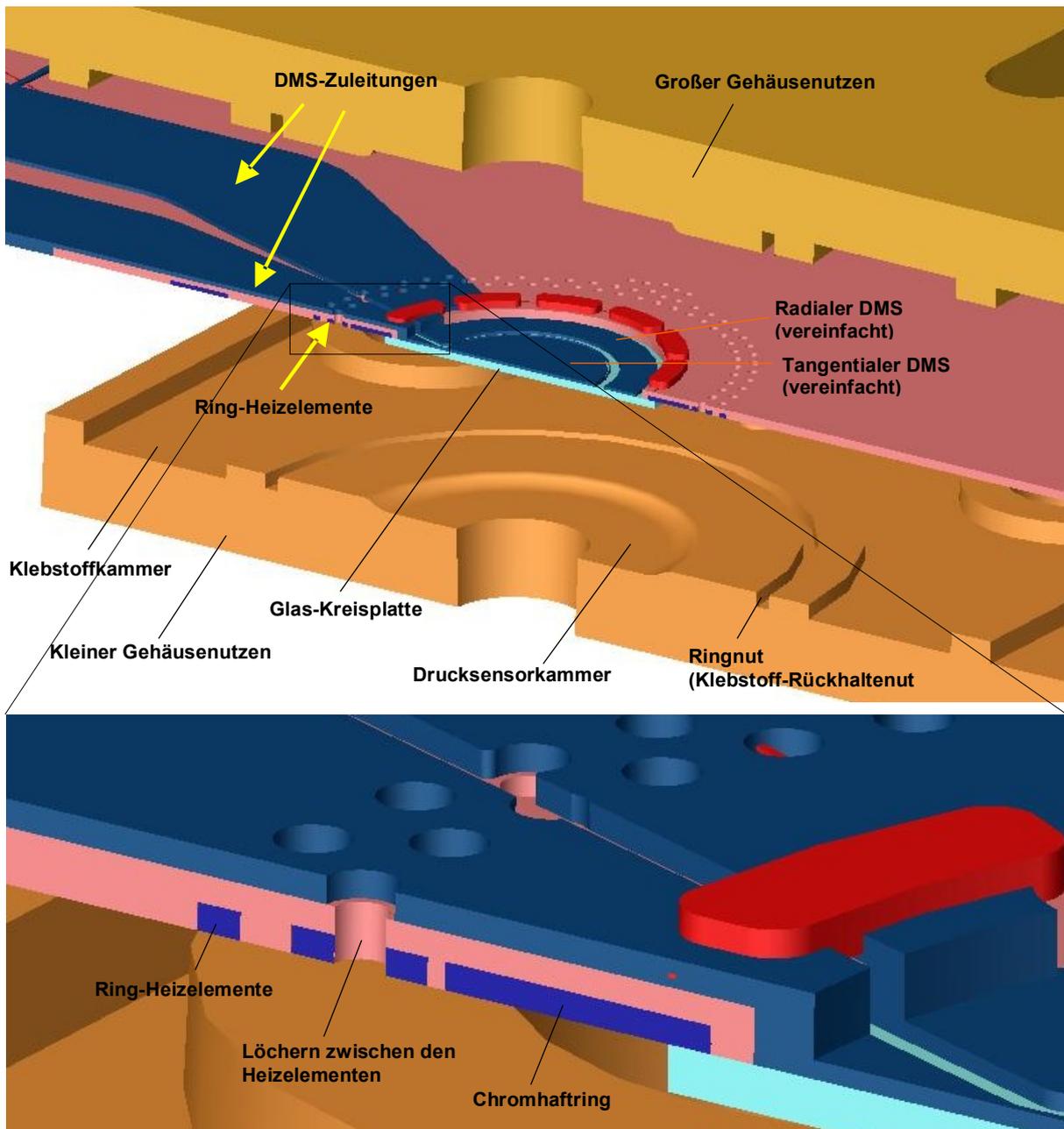


Bild 2.11-1: Schnitt durch eine Drucksensorkammer. Heizelemente zur Verschweißung der Gehäusenutzen umgeben die Sensorkammer ringförmig. Durch Löcher in der PI-Membran kann Kunststoffschmelze fließen. Die Ring-Heizelemente an der Unterseite werden auf der Rückseite der Trägermembran von DMS-Zuleitungen überquert.

Durch das Verschweißen sollte einerseits die Sensorkammer abgedichtet und gleichzeitig eine zusätzliche Verbindung des oberen und unteren Gehäusenutzens hergestellt werden.

Das hier angewendete Kunststoffschweißverfahren ist nach Übbing [Uebb98] als direktes Heizelementschweißen bekannt. Beim direkten Heizelementschweißen wird ein elektrisch leitendes Heizelement in die Fügezone zwischen zwei Bauteile gebracht. Nach dem Schweißen verbleibt das Heizelement in der Fügezone. Beim indirekten Heizelementschweißen wird dagegen ein Heizelement von außen an die Schweißstelle angelegt, z. B. an eine Fugenahnt. Durch den Kontakt mit dem Heizelement erwärmt sich von der Kontaktfläche ausgehend die Fügezone bis auf die erforderliche Schweißtemperatur. Nach dem Schweißen wird das Heizelement wieder entfernt. Heizelementschweißen wird nach Ageorges [Ageo01] bei komplizierten Verbindungsstellen in automobilen Applikationen, z. B. bei Fahrzeugstoßfängern, benutzt. Andere Applikationen beinhalten Verbinden von Kunststoffkanälen, Behältern und medizinischen Geräten.

Nur thermoplastische Kunststoffe sind schweißbar. Nur Verschweißungen mit Materialien, die bei gleicher Temperatur die gleiche Fließfähigkeit besitzen, können zu guten Schweißverbindungen führen. Andernfalls führen die unterschiedlichen Viskositäten der Werkstoffe zu unsymmetrischen Fügezonen und damit zu inhomogenen Schweißnähten. Für die Schweißzone ist eine möglichst starke Materialdurchdringung erforderlich. In den meisten Fällen richtig ist, dass polare Stoffe sich mit polaren Stoffen gut mischen lassen und unpolare mit unpolaren. So lassen sich beispielsweise die polaren Kunststoffe PVC und PMMA gut miteinander verschweißen. Zu beachten ist allerdings, dass bereits geringste Mengen von Zusätzen im Grund- oder Schweißzusatzwerkstoff (Weichmacher; Stabilisierungsmittel usw.) die Schweißseignung derart beeinflussen können, dass eine optimale Verbindung nicht mehr realisiert werden kann.

Die Verschweißung von (mikrostrukturierten) Kunststoffteilen mittels Leiterbahnen, die als Heizelemente dienen, wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Kunz01] am IMT für PMMA und PEEK untersucht. Versuche mit linearen Heizelementen (Bild 2.11-2) zeigten, dass die Öffnungen in der Trägermembran zwischen

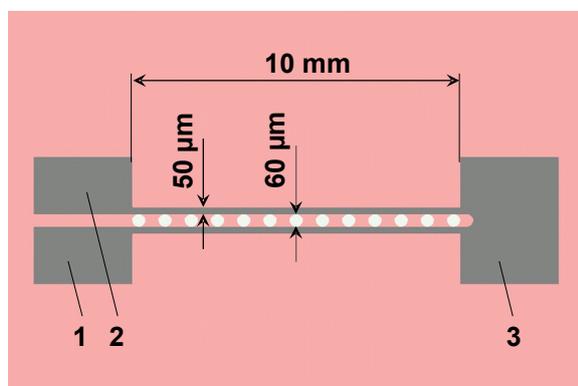


Bild 2.11-2: Lineares Heizelement auf einer PI-Trägermembran. Zwischen den Heizelementen befinden sich Schweißlöcher in der Membran. 1–3 bezeichnen Anschlussflächen.

zwei Heizelementen nicht größer als 60 µm sein sollten, damit Kunststoff zwischen den Heizelementen aufschmelzen und durch die Öffnungen in der Trägermembran fließen kann, die Heizelemente andererseits aber nicht durchbrennen. Eine Heizelementbreite von mindestens 50 µm hatte sich bewährt. Für eine erfolgreiche Verschweißung war ein hoher Anpressdruck auf die Fügezone erforderlich. Zur Kontaktierung wurden Drähte mit Hilfe von Silberleitkleber auf die Anschlussflächen geklebt. Zum Verschweißen von PEEK mit 130 nm dicken Leiterbahnen aus Gold, mussten die zu fügenden Kunststoffteile auf 120 °C vorgewärmt werden. Die Verschweißung trat

bei einem konstant eingestellten Stromfluss von $350 \text{ mA} \pm 20 \text{ mA}$ innerhalb von 2 min ein. Ebenfalls mit konstantem Strom allerdings mit 50 µm dicken Heizelementstreifen aus Edelstahl konnten in einer Studienarbeit [Hraf02] Verschweißungen von PEEK-Teilen (Kristallitschmelzpunkt 334 °C) erreicht werden.

Mit den in [Kunz01] gewonnen Erkenntnissen wurde in [Wulf01] eine Heizelementstruktur zur Verschweißung der Gehäusenutzen entworfen (Bild 2.11-1). Um die gleichzeitige Verschweißung von sechs Gehäusekammern zu ermöglichen, wurden jeweils sechs Ring-Heizelemente parallel geschaltet (Bild 2.11-3). Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt.

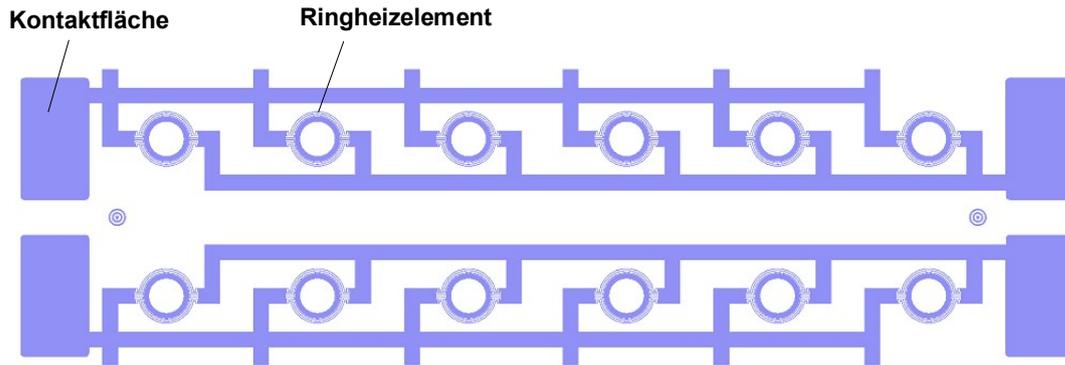


Bild 2.11-3: Entwurf der Ringheizelemente aus [Wulf01]. Jeweils 6 von 12 Ringheizelementen sind parallel geschaltet. (CAD-Bild)

2.11.1 Schweißen mit parallel geschalteten Ringheizelementen

Für Schweißversuche mit Ringheizelementen wurde die in Bild 2.11-3 dargestellte Heizelementstruktur nicht auf Dünnglassubstraten sondern auf ‚Goldabhebewafern‘ mit PI-Trägermembranen hergestellt. Eine Goldschicht haftet schlecht auf der Oxidschicht eines Siliziumwafers, was dazu ausgenutzt werden kann, eine auf der Goldschicht prozessierte Trägermembran, z. B. aus PI, vom Wafer abzulösen oder abzuheben, daher die Bezeichnung Goldabhebewafer. Zur Herstellung von Goldabhebewafern wurden am IMT 60 nm Gold mit einer Univex 450 auf oxidierte Siliziumwafer gedampft. Festgehalten werden soll an dieser Stelle die Erfahrung, dass die qualitativ besten Goldabhebewafer durch Aufdampfen mit einer Univex 450 hergestellt werden konnten. Goldschichten die auf oxidierten Siliziumwafern durch Sputtern mit einer Z400 bei einem Targetabstand von 60 mm oder mit der Sputteranlage PM VII des IFIA mit 140 mm Targetabstand aufgebracht worden waren, standen vermutlich unter Spannung. Dies zeigte sich nach dem ersten Trockenschritt von PI-Fotolack auf den Goldabhebewafern daran, dass sich eine Vielzahl von kleinen Goldblasen unter dem Fotolack gebildet hatte. Die Goldblasenbildung nahm mit jedem weiteren thermischen Prozessschritt zu und führte, z. B. bei der Herstellung von Heizelementen auf PI-Trägermembranen, zu Ausschuss. Auch nach längerer Lagerung bildeten sich Goldbläschen in gesputterten Goldschichten. Im Gegensatz dazu zeigten aufgedampfte Goldschichten auch nach Monaten keine Blasenbildung. Nicht versucht wurde das Sputtern von Goldschichten mit Biasspannung. Wie sich schon beim Sputtern von Chrom gezeigt hatte, könnten sicherlich auch Goldschichten durch Sputtern mit Bias spannungsfrei hergestellt werden.

Auf die PI-Trägermembran eines Goldabhebewafers wurden 100 nm Chrom gesputtert und nasschemisch mit Fotolack AZ 4533 als Maskierung zu Ringheizelementen geätzt. In der Kammerklebeapparatur wurde der große Gehäusenutzen aus PSU auf die Ringheizelemente positioniert, mit 280 N angedrückt und verklebt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs wurde die PI-Membran um den Gehäusenutzen mit einem Skalpell durchtrennt. Durch Einlegen des Wafers in DI-Wasser mit einem Tropfen Spülmittel löste sich das Gehäuse mit der Goldtrennschicht nach einiger Zeit vom Wafer ab. Die Goldschicht blieb auf der PI-Membranunterseite haften und wurde mit I_2/Kal -Lösung entfernt. Auf den großen Gehäusenutzen mit der aufgeklebten PI-Trägermembran und den Ringheizelementen wurde ein kleiner Gehäusenutzen aus PSU gesetzt. In der Kammerklebeapparatur wurden die Gehäuse mit 350 N aufeinander gedrückt und auf 120 °C vorgewärmt.

Zunächst wurde in den Versuchen mit konstant eingestelltem Strom wie bei Kunz [Kunz01] geschweißt. Es stellte sich heraus, dass der erste Entwurf von parallel geschalteten Heizelementen einen Fehler aufwies. Die Zuleitungen zu den Heizelementen verliefen an manchen Stellen über Bohrungen im Gehäusenutzen. An diesen Stellen war die Wärmeabfuhr im Vergleich zu Leiterbahnbereichen, die mit Klebstoff hinterfüllt waren, viel geringer. Über den Bohrungen verschmorten daher die Zuleitungen beim Verschweißen (Bild

2.11-4). In einem verbesserten Entwurf (Bild 2.11-6) wurde die Leiterbahnführung so geändert, dass die Zuleitungen zu den Heizelementen nicht mehr über größere freitragende Membranbereiche verliefen. Trotz der geänderten Leiterbahnführung konnten die Gehäusenutzen nicht erfolgreich verschweißt werden. In Bild 2.11-5 ist zu sehen, dass während der Verschweißung im Bereich der Zuleitung eine deutliche Überhitzung stattfand. Die entwickelte Wärme, bei Erhöhung des elektrischen Stromes im Heizelement, verfärbte den Klebstoff in unmittelbarer Nähe dunkelrot und ließ Leiterbahn und PI-Membran verschmoren.

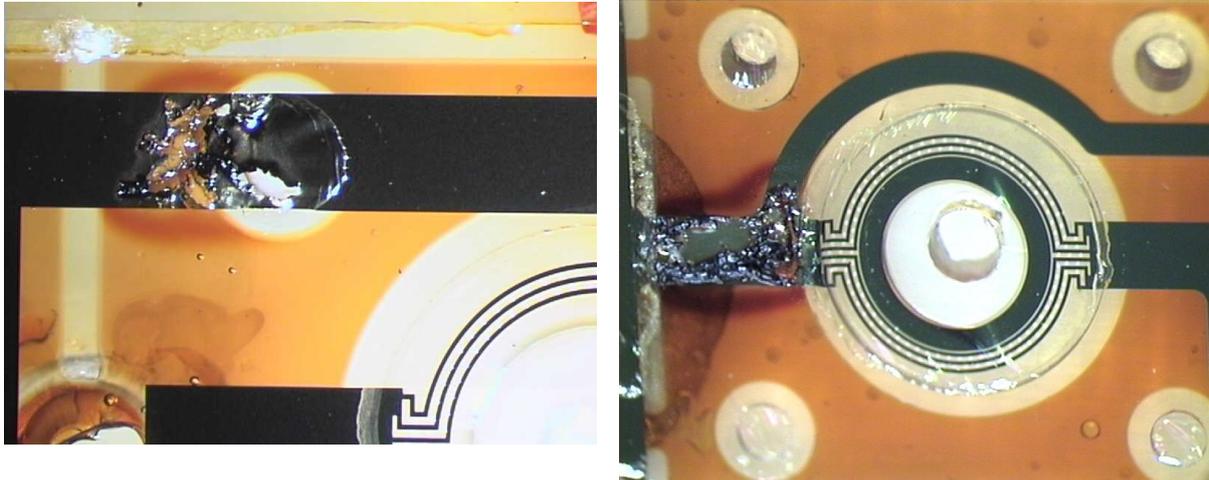


Bild 2.11-4: Über einem Bohrloch verschmorte Zuleitung zu den Ring-Heizelementen. Bild 2.11-5: Überhitzung im Bereich der Hauptzuleitung.

Bei der zerstörten Leiterbahn in Bild 2.11-5 handelt es sich um die Hauptzuleitung zu den sechs parallel geschalteten Heizelement-Widerständen (Bild 2.11-6). Während sich der Strom im nachfolgenden Widerstandsnetzwerk aus parallel geschalteten Heizelementen und Leiterbahnen aufteilt, fließt er ungeteilt durch die Hauptzuleitung. Aufgrund ihres zu großen Widerstands musste sich die Hauptzuleitung überhitzen.

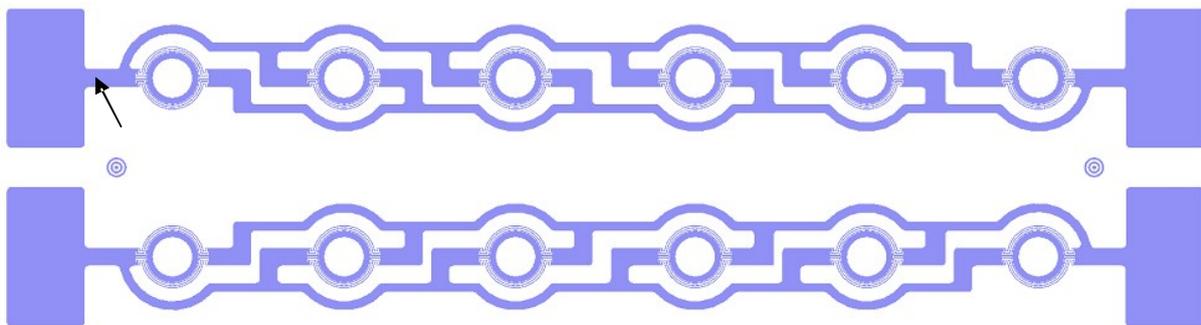


Bild 2.11-6: Geänderte Leiterbahnführung. Die Hauptzuleitung (Pfeil) zu den sechs parallel geschalteten Ringheizelementen, überhitzte sich in den Schweißversuchen. (CAD-Bild)

Mit einem Programm zum Schaltungsentwurf und zur Leiterplatten-Entflechtung, wurde das gesamte Widerstandsnetzwerk aus Ring-Heizelementen und Leiterbahnen weiter untersucht. Es konnte berechnet werden, dass sämtliche Zuleitungen zu den Heizelementen zu schmal ausgelegt waren, so dass aufgrund der elektrischen Widerstände beim Verschweißen sogar größere Leistungen in den Zuleitungen als in den Heizelementen abfallen mussten (Anhang, Bild 7.6-1). Die Leiterbahnen zu den Heizelementen hätten wesentlich breiter oder dicker ausgelegt werden müssen, damit die Widerstände der Zuleitungen gegenüber den Widerständen der Heizelemente klein gewesen wären. Auch ein anderer Werkstoff mit besserer elektrischer Leitfähigkeit könnte zu diesem Zweck für die Zuleitungen verwendet werden.

Fehler beim Kammerkleben des großen Gehäusenutzens auf die PI-Trägermembran des Goldabhebewafers hatten ebenfalls negative Folgen für die anschließende Verschweißung. In Bild 2.11-7 ist zu sehen, dass eine im Klebstoff eingeschlossene Luftblase in der über die

Luftblase verlaufenden Leiterbahn aufgrund der schlechten Wärmeableitung eine Überhitzung verursachte. In Bild 2.11-8 wird deutlich, dass selbst eine nur 100 µm breite freitragende Stelle der Membran eine potentielle Schmorstelle darstellen kann. Die Schmorstelle befand sich in diesem Fall über der Ringnut, welche beim Kammerkleben die Funktion hat, Klebstoff, der über den Ringsteg um die Drucksensorkammer fließt, zurückzuhalten (vergleiche Bild 2.11-1, Klebstoffrückhalten).

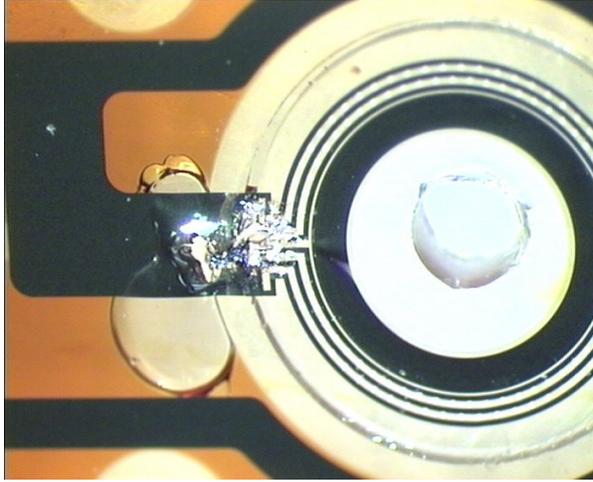


Bild 2.11-7: Überhitzung im Bereich einer Luftblase in der Klebstoffkammer.

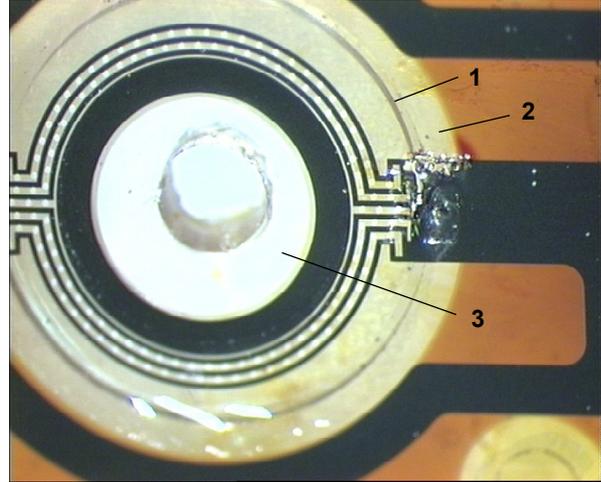


Bild 2.11-8: Überhitzung im Bereich der Ringnut (1). Ringsteg (2) um die Drucksensorkammer (3).

Weitere zu verzeichnende Schadensfälle waren Spannungsrisse. Der in Bild 2.11-9 abgebildete Spannungsriss durch die Heizelemente verläuft durch die Löcher in der PI-Trägermembran. Die Löcher in der Trägermembran begünstigen offensichtlich die Bildung von Rissen beim Auftreten von mechanischen Spannungen. Mechanische Spannungen entstehen z. B. nach dem Kammerkleben, wenn der auf 100 °C erwärmte große Gehäusenutzen auf RT abkühlt und sich hierbei stärker zusammenzieht als der Siliziumwafer, auf dem sich die PI-Trägermembran befindet. Weiterhin können durch das Anpressen des kleinen Gehäusenutzens auf den verklebten großen Gehäusenutzen während des Verschweißens Spannungen auf die PI-Trägermembran einwirken. In Bild 2.11-10 ist eine Zuleitung über der 100 µm breiten Ringnut um die Drucksensorkammer aufgrund von mechanischen Spannungen zerrissen.

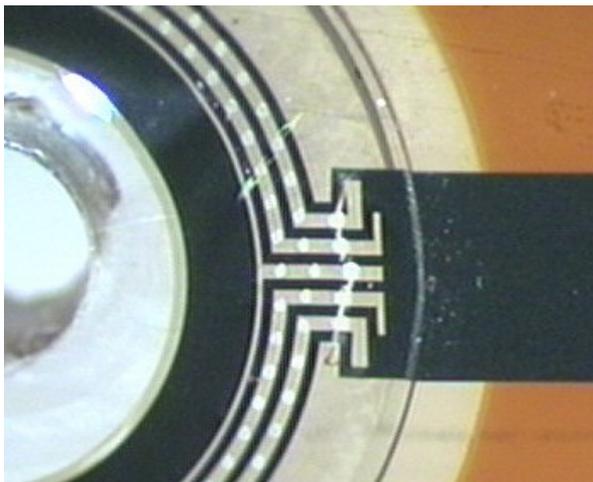


Bild 2.11-9: Riss durch Löcher der PI-Trägermembran aufgrund mechanischer Spannungen.

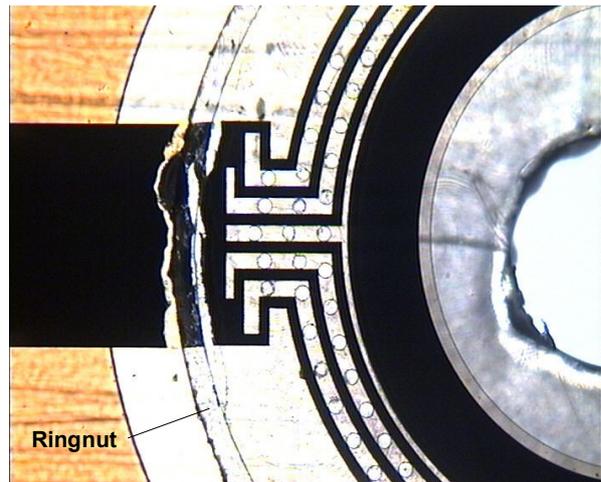


Bild 2.11-10: Risse in einer Zuleitung über der Ringnut um die Sensorkammer.

2.11.2 Schweißen mit einzelnen Ringheizelementen

2.11.2.1 Ringheizelemente aus Chrom

Als nächstes wurde versucht, die Ring-Heizelemente aus Chrom einzeln zwischen kleineren Kunststoffplatten zu schweißen. Die Ringheizelemente von Bild 2.11-6 wurden wiederum auf Goldabhebewafern mit PI-Trägermembran hergestellt. Anschließend wurden PSU-Stücke mit ca. 10 x 10 mm Kantenlänge und 0,8 mm Dicke auf einzelne Ringheizelemente der PI-Trägermembran gelegt und beschwert. UV-Klebstoff wurde mit einer Präpariernadel an den Rand der PSU-Platten gebracht und zog sich kapillar ein Stück weit unter die PSU-Platten auf die PI-Membran. Nach dem Aushärten des Klebers durch UV-Bestrahlung wurde die PI-Membran um die PSU-Platten herum mit einem Skalpell durchtrennt. Durch Einlegen in DI-Wasser mit etwas Spülmittel lösten sich die PSU-Platten mit der angeklebten PI-Trägermembran nach einiger Zeit vom Wafer ab. Die Goldschicht auf der Trägermembranrückseite wurde mit I_2 /Kal-Lösung entfernt. Eine zweite PSU-Platte wurde auf die erste PSU-Platte mit dem angeklebten Ringheizelement gelegt. Beide Platten wurden zwischen zwei massiveren Kunststoffplatten mit Hilfe einer Bügelmessschraube mit einer Kraft von ca. 400 N zusammengepresst. Durch Bohrlöcher in der zweiten PSU-Platte konnten die Ringheizelemente mit Leitkleber und Drähten zum Schweißen elektrisch kontaktiert werden.

Es wurden 150, 300 und 400 nm dicke Ringheizelemente aus Chrom hergestellt. Eine Verschweißung mit diesen Heizelementen war nicht möglich. Die Heizelemente hatten stark streuende Widerstände und waren so empfindlich, dass sie oft bereits beim Aufpressen der zweiten PSU-Platte zerstört wurden. Die Bilder 2.11-11 und 2.11-12 zeigen, dass die durch Aufdampfen auf PI hergestellten Chromschichten Spannungsrisse enthielten, die sich mit zunehmender Schichtdicke immer deutlicher ausprägten.

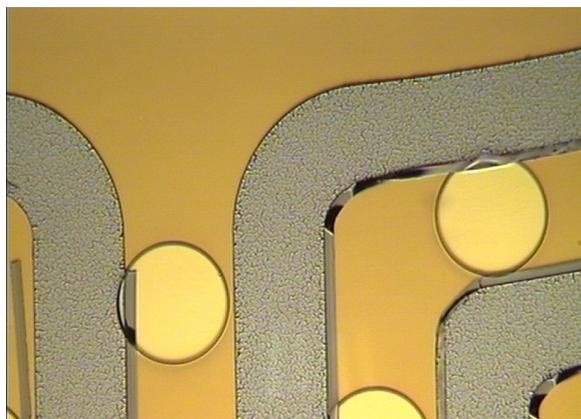


Bild 2.11-11: 150 nm starke Ringheizelemente aus Chrom auf einer PI-Trägermembran. Die Ringheizelemente aus 400 nm Chrom auf einer PI-Chromoberfläche ist von Rissen durchzogen.

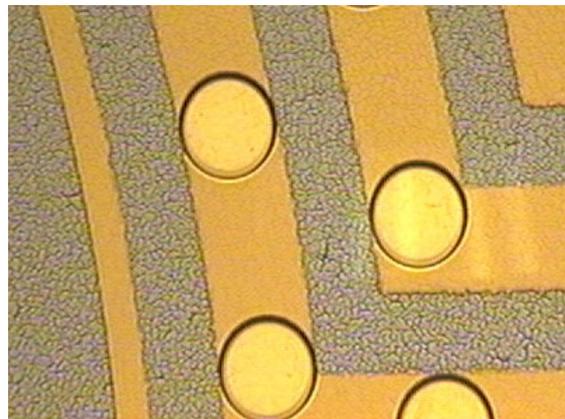


Bild 2.11-12: Rissige Oberfläche von Ringheizelementen aus 400 nm Chrom auf einer PI-Trägermembranen.

Das ist so zu erklären, dass die inneren Spannungen von aufgedampften oder -gesputterten Chromschichten mit steigender Schichtdicke zunehmen. Auf dem Untergrund der Heizelemente, der vergleichsweise weichen Polymer-Trägermembran aus PI, zerbrach die Chromschicht aufgrund der inneren Spannungen ab einem bestimmten Spannungsniveau zu Chrominseln. In den vorangegangenen Schweißversuchen war eine Rissbildung in Ringheizelementen aus Chrom nicht festgestellt worden, obwohl die Heizelemente in gleicher Weise hergestellt worden waren. Dies kann damit begründet werden, dass in diesen Versuchen die Heizelemente nur 100 nm dick waren.

In Heizelementen, die auf Dünnglassubstraten, z. B. aus einer 200 nm dicken, gesputterten Chromschicht, strukturiert und durch das Wegätzen des Dünnglases mit Flusssäure auf eine PI-Trägermembran übertragen worden waren, konnten solche Risse nicht entdeckt werden. Dies verdeutlicht, dass die direkt mit Chrom beschichtete, 2 µm dicke PI-Trägermembran Verformungen der unter Spannung stehenden Chromschicht ermöglicht hatte. Heizelemente

aus Gold, die in Schichtdicken von 400 nm auf Wafern mit PI-Trägermembran gesputtert oder gedampft worden waren, wiesen keine Rissstruktur auf. Gold ist im Vergleich zu Chrom ein duktileres Metall. Spannungen in der aufgedampften Goldschicht können somit durch Verformung der Goldschicht ohne Rissbildung abgebaut werden. In den späteren Versuchen wurden daher Heizelemente aus Gold hergestellt.

2.11.2.2 Ringheizelemente direkt auf Kunststoff

Um Heizelemente mit weniger Aufwand herstellen zu können wurde versucht, Heizelemente direkt auf PSU-Platten zu strukturieren. Hierdurch konnten zwei Prozessschritte eingespart werden, das Aufdampfen einer Goldtrennschicht auf einen oxidierten Siliziumwafer und die Herstellung einer PI-Trägermembran.

In einem Versuch wurden 400 nm Chrom auf eine PSU-Scheibe mit 100 mm Durchmesser gesputtert und mit AZ 4533 als Ätzmaske zu ringförmigen Heizelementen strukturiert. Mit diesen Heizelementen waren Schweißversuche nicht möglich. Die Chrom-Heizelemente auf der PSU-Scheibe waren, im Unterschied zu auf PI-Membranen hergestellten, gleichdicken Chrom-Heizelementen, bereits direkt nach der Herstellung ausnahmslos defekt. Dies lag wie oben beschrieben einmal an den inneren Spannungen in der aufgedampften, spröden Chromschicht, aber vor allem an der wesentlich höheren Oberflächenrauigkeit der verwendeten PSU-Platten. Eine notwendige Voraussetzung zur Herstellung von fehlerfreien Dünnschichten ist eine geringe Rauigkeit der Substratoberfläche. Aus diesem Grunde werden Federelemente von Druckaufnehmern vor der Bedampfung aufwändig geschliffen und poliert [Ort77].

In weiteren Versuchen wurde Gold als Werkstoff zur direkten Herstellung von Heizelementen auf PSU-Platten verwendet. Auf eine 1 mm dicke PMMA-Scheibe, die mit einer Poliermaschine geschliffen und poliert worden war, wurde zunächst 15 nm Chrom als Haftvermittlungsschicht und 400 nm Gold gesputtert. Die Metallschicht wurde lithografisch sowie nasschemisch zu Ring-Heizelementen strukturiert. Dann wurden die oberen und unteren Verbindungsleitungen zwischen jeweils zwei Ring-Heizelementen (Bild 2.11-13) durch Bohren unterbrochen. Eine zweite PMMA-Platte mit 2 mm großen Bohrungen wurde auf die PMMA-Platte mit den Heizelementen gepresst. Die Bohrungen in der zweiten Platte

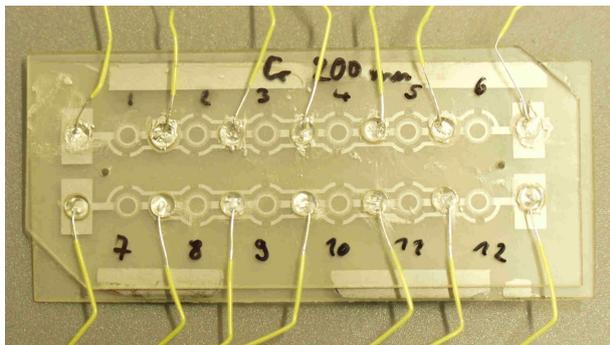


Bild 2.11-13: Einzelne Kontaktierung von Ring-Heizelementen aus 200 nm Chrom, welche direkt auf einer PSU-Platte durch Sputtern und nasschemisches Ätzen hergestellt worden waren.

machten die Leiterbahnen unmittelbar vor und hinter jeweils einem Heizelement zugänglich, so dass die Heizelemente durch die Bohrungen mit Leitkleber und Drähten einzeln kontaktiert werden konnten. In Schweißversuchen mit konstantem Strom verschmorten die Ring-Heizelemente immer wieder ausschließlich am Ansatz der Heizelemente (Bild 2.11-14). Am Heizelementansatz entwickelte sich offenbar besonders viel Wärme. Das erscheint logisch, wenn bedacht wird, dass am Heizelementansatz sechs Leiterbahnen nebeneinander liegen, während im Heizelementring lediglich drei Leiterbahnen

parallel verlaufen (Bild 2.11-15). Am Heizelementansatz wurde aufgrund der doppelten Anzahl parallel liegender Leiterbahnen mehr Wärmeenergie in eine kaum größere Schweißfläche eingebracht. Da die größere Wärmemenge nicht schnell genug von der Schweißstelle abgeleitet werden konnte, überhitzte sich der Heizelementansatz.

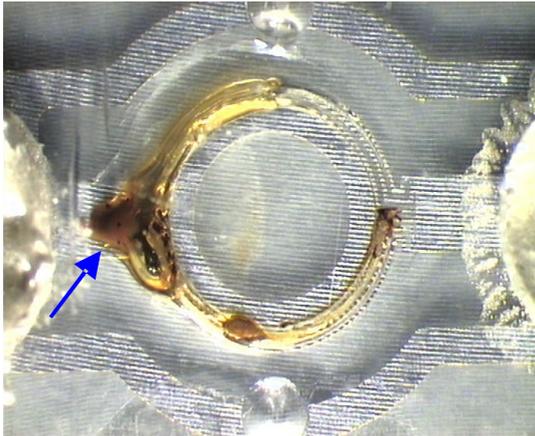


Bild 2.11-14: Ring- Heizelement aus 15 nm Chrom und 400 nm Gold durchgebrannt am Heizelementansatz

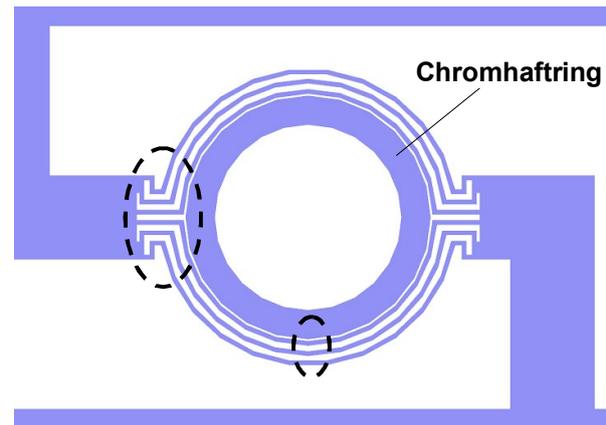


Bild 2.11-15: Sechs parallele Leiterbahnen am Heizelementansatz, drei parallele Leiterbahnen im Ringbereich.

2.11.3 Regelung zum Heizelementschweißen

In den bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Schweißversuchen mit Heizelementen wurde ein konstanter Strom eingestellt und über die Schweißzeit gehalten. Diese Art des elektrischen Schweißens berücksichtigt nur unzureichend, dass der Widerstand eines Dünnschicht-Heizelements während der Verschweißung in der Regel stark ansteigt. Die Widerstandsänderung eines Heizelements beim Schweißen kann folgende Gründe haben:

- Gefügeveränderung gesputterter oder aufgedampfter Schichten
- Legierungsbildung
- Positiver TKR des Heizelement-Werkstoffs
- Plastische Verformung des Heizelements durch starke Wärmeausdehnung und plastische Verformung des Kunststoffes an der Schweißstelle

In [Büst96] wurde festgestellt, dass sich der elektrische Widerstand sowohl von gesputterten als auch von aufgedampften, 100 nm dicken Goldheizwendeln im Betrieb verringerte (s. Tabelle 2.11-1).

Werkstoff	Form, Herstellung	Widerstand nach Sputtern [Ω]	Widerstand nach Tempern [Ω]	TKR [$1/K \cdot 10^{-3}$] bei 0–100°C	TKR [$1/K \cdot 10^{-3}$] bei 0–100°C nach Tempern
100nm Gold	Leiterbahn, gesputtert oder aufgedampft	100	75–80	—	—
10nm Chrom, 100nm Gold	Leiterbahn, gesputtert oder aufgedampft	100	450–580	—	0,067–0,182
Gold	Draht	—	—	3,67	3,67
Chrom	Draht	—	—	2,3	2,3

Tabelle 2.11-1: Änderung des Widerstands gesputterter Goldschichten sowie Änderung des Widerstands und des TKR von Chrom-Gold-Dünnschichten nach dem Tempern bei 400 °C für 1 h.

Die Widerstandsabnahme gemessen bei RT betrug ca. 25 % und wurde auf thermisch bedingte Gefügeveränderungen zurückgeführt. Durch Tempern bei 400 °C für 1 h konnte die Widerstandsänderung herbeigeführt und so verhindert werden, dass sich der Widerstand der Goldheizwendeln im Betrieb änderte. In [Ahre04] wurde an 100 nm dicken Goldleiterbahnen nach einem Tempersschritt von 1 h bei 400 °C im Vakuumofen eine Widerstandsabnahme von 20 % gemessen.

Weitere Temperversuche wurden in [Ahre04] an Leiterbahnen durchgeführt, die aus 5 nm Chrom und 100 nm Gold bestanden. Die Leiterbahnen waren auf Goldabhebewafem mit PI-Trägermembran durch Aufdampfen und nasschemisches Ätzen hergestellt worden. Nach einstündigem Tempern bei 400 °C im Vakuum erhöhte sich der Widerstand der Chrom-Gold-Leiterbahnen aufgrund einer Legierungsbildung um Faktoren von 4,5–5,8 und um die Faktoren 6–7 nach zweimaligem Tempern. Durch die Legierungsbildung ging der TKR der Chrom-Gold-Leiterbahn auf sehr geringe Werte im Vergleich zu den TKR von Gold oder Chrom zurück (s. Tabelle 2.11-1).

Werden gesputterte oder aufgedampfte Heizelemente aus Gold zum Schweißen verwendet, dann ist während des Schweißens folglich eine Gefügeänderung zu erwarten, die zu einer Widerstandsabnahme des Heizelements von 20–25 % führt. Betrachtet werden muss jedoch der Widerstand des Heizelements auf Schweißtemperatur, für PEEK z. B. 345 °C (> 334 °C, Kristallitschmelzpunkt von PEEK). Aufgrund des hohen TKR von Gold, $3,67 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$, wird sich der Widerstand des Heizelements bis zur Schweißtemperatur ca. verdoppeln. Bei Heizelementen aus Chrom-Gold steigt der Widerstand bis zur Schweißtemperatur durch den geringen TKR der Chrom-Gold-Legierung von $0,067\text{--}0,182 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ dagegen kaum an. Dafür ergibt sich durch die Legierungsbildung ein 4,5–5,8fach größerer Widerstand bei Schweißtemperatur.

Im Folgenden wird kurz dargestellt, wie die Heizleistung beim Schweißen mit konstantem Strom aufgrund der großen Widerstandszunahme von Heizelementen ansteigt. Die in den Kunststoff eingebrachte elektrische Leistung eines Heizleiters berechnet sich zu:

$$(2.4) \quad P = R \cdot I^2$$

Der Anstieg der Temperatur beim Schweißen wird berücksichtigt mit:

$$(2.5) \quad R(\vartheta) = R_{20} [1 + \alpha_{Au} (\vartheta - 20^\circ\text{C})]$$

α_{Au} Temperaturkoeffizient von Gold

R_{20} Elektrischer Widerstand bei 20°C

Damit ergibt sich durch einsetzen von (2.5) in (2.4):

$$(2.6) \quad P(\vartheta) = R_{20} [1 + \alpha_{Au} (\vartheta - 20^\circ\text{C})] \cdot I^2$$

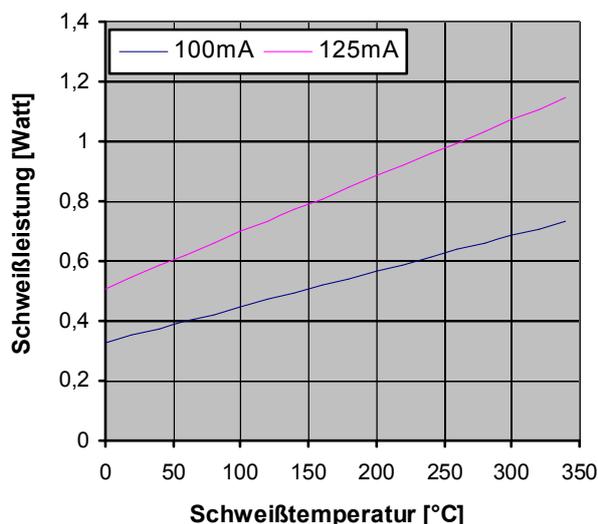


Bild 2.11-16: Zunahme der Schweißleistung über der Schweißtemperatur bei zwei verschiedenen, konstant bleibenden Schweißströmen.

Für ein 50 µm breites, 100 nm dickes und 10 mm langes Heizelement aus Gold ist der Anstieg der Schweißleistung in Bild 2.11-16 dargestellt. Bei konstant eingestelltem Schweißstrom steigt die Schweißleistung bis zum Erreichen der Schweißtemperatur, für PEEK 345 °C, linear mit der Temperatur an. Durch den TKR von Gold nimmt der Widerstand des Heizelements um 211% zu. Gleichzeitig sinkt der Widerstand des Gold-Heizleiters aufgrund einer Gefügeumbildung um 20 % (in Bild 2.11-16 nicht dargestellt). Insgesamt ergibt sich damit bei konstant bleibendem Schweißstrom eine Widerstands- und damit eine Schweißleistungszunahme von 191%. Aus dem Diagramm in Bild 2.11-16 ist auch ersichtlich, dass die Schweißleistung stark vom eingestellten Schweißstrom abhängt. So fällt am Heizelement bei einer

Schweißtemperatur von 345 °C ca. 56 % mehr Leistung ab, wenn der Schweißstrom von 100 mA auf 125 mA erhöht wird. Dies liegt daran, dass die Schweißleistung, wie Gleichung (2.6) zeigt, quadratisch vom Schweißstrom abhängt.

Für ein Heizelement aus Chrom-Gold kann die Abhängigkeit der Schweißleistung von der erreichten Schweißtemperatur nicht ohne weiteres dargestellt werden. Während der

Temperaturerhöhung beim Schweißen beginnt die Legierungsbildung, wodurch der TKR des Heizelements langsam absinkt, der spezifische Widerstand des Heizelements jedoch gleichzeitig zunimmt. Vermutlich steigt der Widerstand und damit die Schweißleistung eines ungetemperten Chrom-Gold-Heizelements mit der Temperatur exponentiell an. Die Legierungsbildung von Chrom-Gold-Heizelementen könnte man theoretisch durch Tempern vor dem Schweißen verhindern. Dann würde bei konstant eingestelltem Strom die Schweißleistung mit der Temperatur sogar kaum ansteigen, da der TKR der Chrom-Gold-Legierung sehr gering ist.

Der Widerstand eines Heizelements kann jedoch nicht nur aufgrund von Temperaturerhöhung oder durch Legierungsbildung ansteigen. Einen starken Einfluss auf die Widerstandserhöhung kann auch die plastische Verformung von Heizelementen in der Schweißzone durch den sich ausdehnenden Kunststoff haben. Dies betrifft natürlich vor allem die in dieser Arbeit verwendeten 100 nm bis 400 nm dicken Dünnschicht-Heizelemente, die keinerlei mechanische Festigkeit aufweisen. Die in [Hraf02] verwendeten 50 µm dicken Heizelemente, die aus einer Edelstahlfolie hergestellt worden waren, wurden während des Schweißens sehr wahrscheinlich nicht plastisch verformt, so dass hier beim Schweißen mit konstantem Strom definierte Schweißparameter experimentell bestimmbar waren. Eine plastische Verformung eines Dünnschicht-Heizelements, die aufgrund der Wärmeausdehnung des Kunststoffs an der Schweißstelle entsteht, lässt eine stark schwankende, undefinierte Widerstandszunahme des Heizelements während des Schweißens erwarten. Es ist daher bei Dünnschicht-Heizelementen nicht sicher, ob in Vorversuchen der Schweißstrom und die Schweißzeit so bestimmt werden können, dass für das Schweißen mit konstantem Strom einmal gefundene Parameter für weitere Heizelemente mit gleichen Abmaßen zu gleich bleibend guten Schweißergebnissen führen.

Eine ideal verlaufende Schweißung mit konstantem Strom wird im Folgenden beschrieben. Ein Teil der in die Schweißstelle durch das Heizelement eingebrachten Wärme wird über den Kunststoff und über die zum Aufeinanderpressen der Schweißteile verwendete Vorrichtung abgeleitet. Die Temperatur in der Schweißzone nähert sich asymptotisch einer Endtemperatur an, ab der die eingebrachte Wärme und die abfließende Wärme in einem Gleichgewicht stehen. Da die Temperatur an diesem Punkt nicht weiter ansteigt, nimmt auch der temperaturabhängige Widerstand der Heizelemente und damit die Heizleistung nicht mehr zu. Im stationären Zustand wird eine Endtemperatur erreicht, die im Schweißtemperaturbereich liegt.

Um den Strom zu bestimmen, bei dem die Endtemperatur im Schweißtemperaturbereich liegt, müssen jedoch Versuche durchgeführt werden. Eine analytische Berechnung des notwendigen Schweißstroms für eine gewünschte Gleichgewichtstemperatur ist kaum möglich [Hraf02]. Hierzu wären numerische Rechnungen erforderlich, um die Wärmeübertragung vom Heizelement in die Schweißstelle und von der Schweißstelle in weitere Bauteile oder in die Umgebung zu berechnen. Vorzuziehen ist daher die praktische Vorgehensweise, den optimalen Schweißstrom und die Schweißzeit experimentell zu bestimmen. Bei mechanisch stabilen Heizelementen, wie den erwähnten 50 µm dicken Heizelementen aus Edelstahl [Hraf02], mag es möglich und vom Aufwand her vertretbar sein, Schweißparameter für das Heizelementschweißen mit konstantem Strom zu bestimmen. Aus den beim Schweißen in dieser Arbeit gemachten Erfahrung sowie aus der bereits zitierten Diplomarbeit [Kunz01] geht jedoch eindeutig hervor, dass Schweißen mit konstantem Strom mit Dünnschichtheizelementen nicht sinnvoll ist, da sich mit den gefundenen Schweißparametern keine wiederholbar guten Ergebnisse erzielen lassen.

Aus den oben angeführten Gründen und um zu wiederholbaren Schweißergebnissen zu kommen, wurde vom Heizelementschweißen mit konstantem Strom abgegangen. Stattdessen wurde eine Regelung mit Hilfe der Mess- und Regelungssoftware LabView, National Instruments, München, aufgebaut, mit der es möglich war, entweder die Heizelementtemperatur oder die Schweißleistung während des Schweißvorgangs zu regeln. Eine geregelte Verschweißung hat folgende Vorteile:

- Die Regelung reagiert während des Schweißens auf die Änderung des Heizelementwiderstands.
- Die Schweißtemperatur kann konstant gehalten werden, für PEEK z. B. auf 345 °C.
- Mit einem Regelungs- und Steuerungs-Programm können auch Temperatur- oder Heizleistungsprofile gefahren werden, um gegebenenfalls mit einem ‚Profil‘ bessere Schweißergebnisse erzielen zu können.
- Die Schweißparameter einer leistungsgeregelten Verschweißung sind leichter auf Heizelemente mit anderen Geometrien übertragbar.
- Der Erfolg der Verschweißung kann anhand der mitprotokollierten Messdaten beurteilt werden.

Der Regelkreis ist schematisch in Bild 2.11-17 dargestellt.

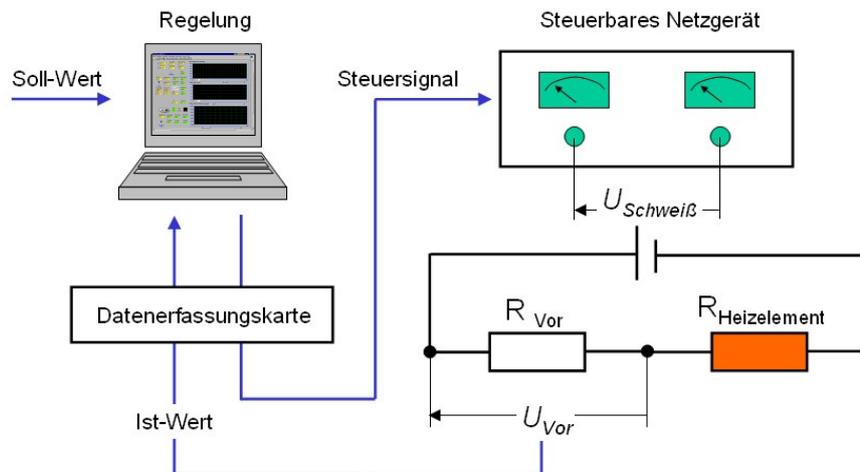


Bild 2.11-17: Aufbau des Regelkreises zum Heizelementschweißen.

Den Ist-Wert der Regelung stellt der Widerstand des Heizelements dar. Aus dem Heizelement-Widerstand $R_{\text{Heizelement}}$ kann einerseits die Temperatur an der Schweißstelle und andererseits die in die Schweißstelle eingebrachte Leistung berechnet werden. Zur Ermittlung des Heizelement-Widerstands wird das Heizelement in Reihe zu einem Vorwiderstand R_{Vor} geschaltet, dessen Widerstand bekannt ist. Die am Vorwiderstand abfallende Spannung U_{Vor} kann über den analogen Eingang der Datenerfassungskarte DAQ 6024E als digitaler Wert in die LabView-Regelung des PCs eingelesen werden. Aus dem Spannungsabfall am Vorwiderstand wird der Strom und daraus bei bekannter Schweißspannung $U_{\text{Schweiß}}$ der aktuelle Widerstand des Heizelements berechnet.

Optimale Verschweißungen sind möglich, wenn die Temperatur an der Schweißstelle geregelt werden kann. In der ersten Programmversion wurde daher eine Temperaturregelung programmiert. Die Schweißspannung wurde abhängig von der Heizelement-Temperatur nachgeregelt, wobei die am Heizelement vorliegende Temperatur aus dem aktuellen Widerstandswert des Heizelements und dem TKR des Werkstoffs vom Programm berechnet wurde. Nach demselben Prinzip wie die aufgebaute Temperaturregelung, werden so genannte ‚fühlerlose Temperaturregler‘ für Heizfolien gebaut [Minc05]. Die Heizelemente der Heizfolien bestehen aus Nickel. Während des Heizvorgangs werden die Widerstände der Heizelemente mit einer Tastrate von maximal 10 Hz gemessen. Die Tastrate der in dieser Arbeit programmierten Regelung lag bei 10–15 Hz und wurde von der Rechenleistung des PCs mit laufender LabView-Software begrenzt.

Schweißversuche mit einer Temperaturregelung waren erfolglos. Anhand des im Folgenden beschriebenen Versuchs wird gezeigt, warum die Temperaturregelung bei Dünnschicht-Heizelementen nicht funktionierte. In Bild 2.11-18 ist zu sehen, wie sich der Widerstand bei RT eines Heizelements durch mehrfaches Erwärmen und Abkühlen mehr und mehr erhöhte.

Nachdem 1,2 W im Heizelement abgefallen waren (Punkt 2) und die Schweißleistung auf 0,0 W zurückgenommen worden war, hatte sich der Widerstand des Heizelements von 2,0 Ω auf 2,8 Ω bleibend erhöht (Punkt 3). Danach wurde eine Leistung von 1,4 W eingestellt (Punkt 4), wobei ein Heizelementwiderstand von 7,0 Ω gemessen wurde. Nach Rücknahme der Soll-Schweißleistung auf 0,0 W hatte sich der Widerstand auf 5,3 Ω (Punkt 5) bleibend geändert. Diese Widerstandszunahme wurde anfänglich hauptsächlich auf eine plastische Verformung des Heizelements zurückgeführt, sie könnte jedoch auch auf einer Legierungsbildung des Heizelementwerkstoffs, das aus 10 nm Chrom und 400 nm Gold hergestellt worden war, beruhen haben.

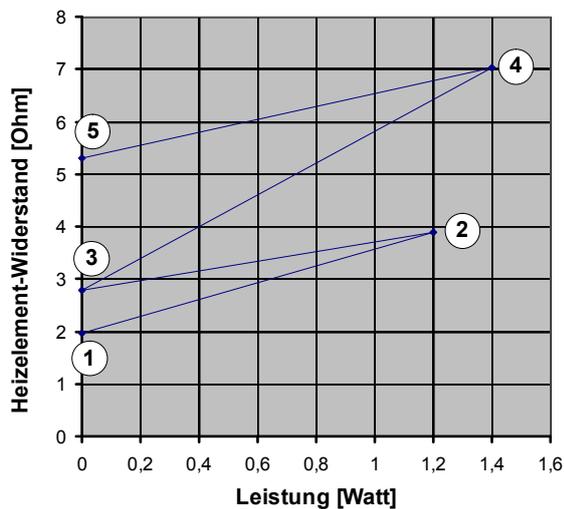


Bild 2.11-18: Widerstandsänderung eines linearen Heizelements (10 nm Chrom, 400 nm Gold) nach mehrfachem Erwärmen und Abkühlen.

Die Temperaturregelung hätte bei einem Heizelementwiderstand von 7,0 Ω (Punkt 4) eine Schweißtemperatur von 710 $^{\circ}\text{C}$ berechnet und daraufhin eine für die Verschweißung zu geringe Spannung ausgegeben. Der durchschnittliche Betrag und der zeitliche Verlauf der Widerstandsänderung von Heizelementen wurde nicht weiter untersucht, weil die Ermittlung dieser Daten zu aufwändig erschien. Diese Daten wären jedoch für die Berechnung der korrekten Heizelement-Temperatur in der Temperatur-Regelung erforderlich gewesen. Die Temperaturregelung wurde daher zum Verschweißen von Dünnschicht-Heizelementen nicht weiter verwendet und durch eine Regelung der Schweißleistung ersetzt.

2.11.3.1 Leistungsgeregeltes Schweißen mit linearen Heizelementen

Mit linearen Heizelementen, wie in Bild 2.11-2, wurden in der Folge Schweißversuche mit konstanter Leistung und später auch mit einem Leistungsprofil (Bild 2.11-19, b)) vorgenommen. Die Heizelemente bestanden aus 10 nm Chrom und 100 nm Gold und wurden wie beschrieben auf Goldabhebewafern mit PI-Trägermembranen hergestellt. Dann wurden 10x10 mm² große und 1 mm dicke Kunststoffplatten durch Anlegen von Klebstoff an die Plattenränder jeweils auf vier lineare Heizelemente geklebt. Um die Platten wurde die PI-Trägermembran mit einem Skalpell durchtrennt. Durch Einlegen in DI-Wasser mit einem Tropfen Spülmittel wurden die Platten vom Goldabhebewafer abgelöst. Die Goldschicht wurde durch Sputterätzen mit einer Plasmalab 80 Plus entfernt. Eine zweite Kunststoffplatte wurde auf die erste Platte mit den Heizelementen aufgesetzt. Durch Bohrungen in der zweiten Kunststoffplatte konnten die Anschlussflächen der Heizelemente mit Leitkleber und Drähten elektrisch kontaktiert werden.

Die PMMA-Platten wurden beim Verschweißen mit einer Bügelmessschraube mit ca. 400 N aufeinander gepresst. Mit den linearen Heizelementen ließen sich PMMA-Platten mit 0,6 W in 30 s reproduzierbar verschweißen. PMMA hat eine Schmelztemperatur um 120 $^{\circ}\text{C}$. PSU, mit einem Schmelzpunkt von ca. 200 $^{\circ}\text{C}$, konnte mit den 110 nm dünnen Chrom-Gold-Heizelementen nicht ohne weiteres verschweißt werden. Bei einer höheren Schweißleistung als 0,6 W, die für die Verschweißung von PSU erforderlich war, wurden die Heizelemente zerstört. Daher wurden die PSU-Platten zwischen die beheizbaren Kupferplatten der Kammerklebeapparatur geklemmt und auf 120 $^{\circ}\text{C}$ vorgeheizt. Der Andruck der Kupferplatten wurde auf 300 N eingestellt. In den ersten Versuchen mit PSU konnte mehrfach beobachtet werden, dass die Heizelemente teilweise 1,2 W über eingestellte 10 s ausgehalten hatten, dann aber beim Abkühlen zerstört wurden. Gleichfalls wurde festgestellt, dass die

Heizelemente des Öfteren eine höhere Heizleistung aushielten, wenn die Heizleistung langsam von Hand auf den Sollwert hochgefahren wurde.

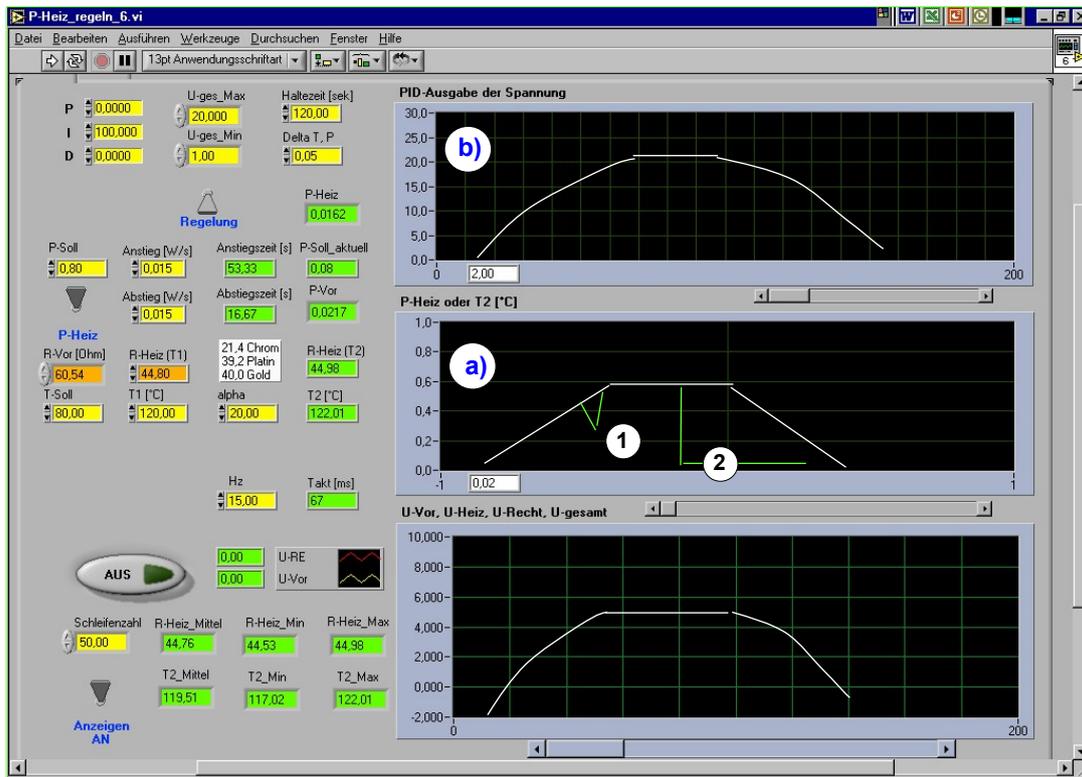


Bild 2.11-19: Oberfläche der LabView-Regelung. Typische Verläufe der vorgegebenen Leistung a) und der Schweißspannung b) sind eingezeichnet. Typische Spitze (1) im Verlauf der Schweißleistung, wenn eines der beiden Heizelemente durchgerissen war. Verlauf (2), wenn das zweite Heizelement gerissen war.

Daraus wurde gefolgert, dass beim schnellen Aufheizen und Abkühlen in der Schweißstelle mechanische Spannungen entstehen, welche die empfindlichen Dünnfilm-Heizelemente zerstören können. Um das Entstehen von starken Schweißspannungen zu verhindern, musste die Schweißstelle langsam erwärmt und langsam abgekühlt werden, was sich mit programmierten An- und Abstiegsrampen in der Regelung realisieren ließ (Bild 2.11-19, b)). Weitere PSU-Schweißungen wurden mit An- und Abstiegsrampen in der Leistungsregelung getestet. Sämtliche Heizelemente waren nach dem Schweißen noch funktionstüchtig. Ein Nachschweißen mit diesen Heizelementen war problemlos möglich.

Da diese Erkenntnis auch für das Schweißen mit Ringheizelementen wichtig sein könnte, wird an dieser Stelle noch einmal kurz auf die Ringheizelemente eingegangen. Ein großer Nachteil an dem Konzept der Ringheizelemente zum Abdichten der Sensorkammer ist, dass die DMS über Zuleitungen kontaktiert werden, die (s. Bild 2.11-1) auf der Oberseite der PI-Trägermembran die Ringheizelemente, die sich auf der Unterseite der PI-Trägermembran befinden, überqueren. Beim Schweißen dürfen diese Zuleitungen zu den DMS nicht zerstört werden. Wenn jedoch, mit Hilfe von An- und Abstiegsrampen im Schweißleistungsprofil, so geschweißt werden kann, dass die Ringheizelemente nach dem Verschweißen unversehrt vorliegen, dann würden auch die Zuleitungen zu den DMS durch das Umschweißen der Sensorkammer nicht zerstört werden. Wieder zurück zum Schweißen von PSU mit linearen Heizelementen.

Letztlich konnten auf 120 °C vorgeheizte PSU-Platten mit einem Anstieg von 0,3 W/s, für 30 s konstant gehaltenen 0,6 W und einem Abstieg von 0,15 W/s durch die PI-Löcher zwischen den Heizelementen hindurch wiederholbar optimal verschweißt werden (Bild 2.11-20 und 2.11-21). Zur besseren Kontrastierung der durch das Aufschmelzen klar und transparent werdenden Schweißzone sind die PSU-Platten angeschliffen worden. In Bild 2.11-21 können Schleifriefen auf der unteren PSU-Platte durch die PI-Löcher hindurch

erkannt werden. Dies zeigt, dass der Kunststoff zwischen den linearen Heizelementen aufgeschmolzen und in die Löcher der PI-Membran geflossen war.

Für PEEK mit einem um 134 °C höheren Schmelzpunkt als PSU war eine Erhöhung der Vortemperatur von 120 °C auf 160 °C zur Verschweißung nicht mehr ausreichend. Eine noch höhere Vortemperatur war aufgrund der Kontaktierungsart der Heizelemente mit Silberleitkleber nicht möglich. Bei höheren Temperaturen rissen die auf die Kontaktflächen der Heizelemente aufgeklebten Drähte aus dem weich gewordenen Leitkleber aus. Eine Leistungserhöhung über 0,6 W war ebenfalls nicht möglich, da die 110 nm dicken Chrom-Gold-Heizelemente trotz einstellbarer An- und Abstiegstrampen nicht mehr Stand hielten.

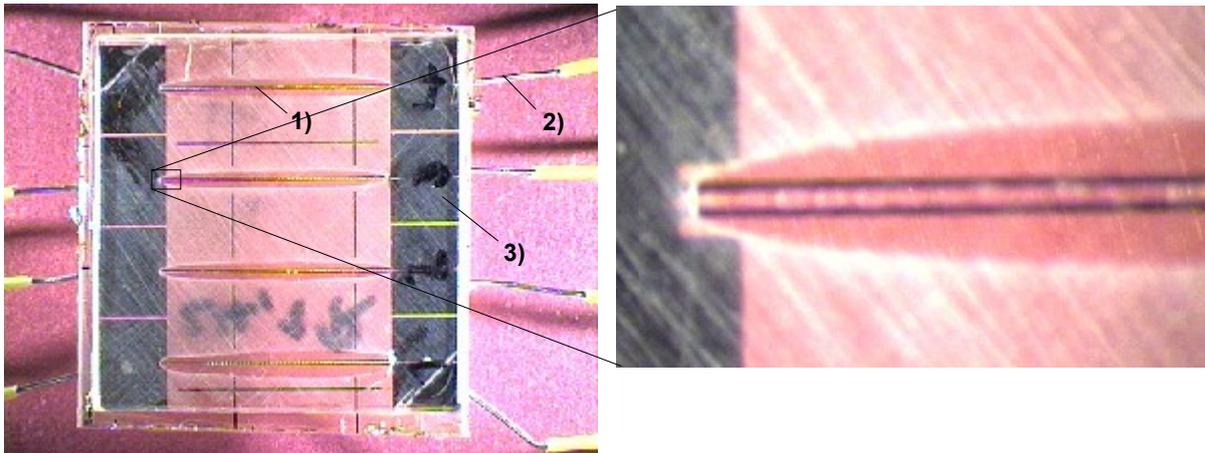


Bild 2.11-20: Verschweißungen auf PSU-Platten mit linearen Heizelementen aus 10nm Chrom und 100nm Gold. Lineares Heizelement (1), Draht zur elektrischen Kontaktierung (2), Anschlussfläche (3).
Bild 2.11-21: PSU-Verschweißung mit durchgeschweißten PI-Löcher zwischen den Heizelementen. (Vergrößerung von Bild 2.11-20)

Mit Heizelementen aus 10 nm Chrom und 300 nm Gold konnten bei einer Vortemperatur von 160 °C einige Verschweißungen mit über 30 s gehaltenen 2,0 W Schweißleistung realisiert werden. Die Leistungsrampen waren auf 0,3 W/s eingestellt. Die Verschweißungen der PEEK-Stücke waren jedoch schwach ausgeprägt. Einer höheren Schweißleistung hielten die 300 nm dicken Gold-Heizelemente nicht Stand. Zur Verschweißung von PEEK werden deutlich höhere Schweißleistungen und dickere, mechanisch belastbarere Heizelemente oder eine wesentlich höhere Vortemperatur benötigt.

Dickere Heizelemente aus Nickel konnten galvanisch auf einer PEEK-Scheibe mit 100 mm Durchmesser hergestellt werden. Mit einer Poliermaschine wurde die 0,8 mm dicke PEEK-Scheibe poliert. Der Mittenrauwert Ra betrug anschließend 50 nm. Als Startschicht für die Nickelgalvanik wurden 15 nm Chrom und 60 nm Gold auf die PEEK-Scheibe gesputtert. Dann wurde der Dickschichtlack AZ 4533 mit den Schleuderparametern 5000/15/60 ca. 3 µm dick aufgetragen und mit Hilfe einer Filmmaske so strukturiert, dass die Konturen von linearen Heizelementen im Fotolack als fehlende Lackstellen dargestellt waren. Gleichzeitig wurde am Rand der PEEK-Scheibe eine größere lackfreie Stelle erzeugt. An dieser Stelle konnte die Scheibe in einem Nickelgalvanikbad an die Kathode gelegt werden. An den lackfreien Stellen wurden ca. 1 µm dicke lineare Heizelemente auf der Startschicht der PEEK-Scheibe galvanisch abgeschieden.

Versuche wurden mit den Nickel-Heizelementen nicht mehr durchgeführt, da die Abdichtung der Sensorkammer durch Umschweißen, wie noch in [Kapitel 5.2-1](#) diskutiert wird, aus anderen Gründen nicht sinnvoll erschien. Es lässt sich daher nur vermuten, dass die Nickel-Heizelemente aufgrund ihrer größeren Schichtdicke und der höheren Zugfestigkeit von Nickel die zum Schweißen von PEEK erforderlichen höheren Schweißleistungen ausgehalten hätten. Eventuell könnten galvanisch hergestellte Nickel-Heizelemente mechanisch auch so stabil ausgelegt werden, dass sie von auftretenden Spannungen in der Schweißzone plastisch nicht verformt würden. Damit würde eine temperaturgeregelte Verschweißung wieder in Betracht kommen. Als weiterer Vorteil hierzu würde der hohe TKR

von Nickel die Berechnung der Schweißtemperatur aus dem aktuellen Widerstand der Heizelemente mit größerer Genauigkeit erlauben.

2.11.3.2 Entstehung von Schweißspannungen in Thermoplasten

Die Bildung von Schweißspannungen ist bei Kunststoffen sehr ausgeprägt, weil Kunststoffe schlechte Wärmeleiter sind und gleichzeitig eine hohe Wärmeausdehnung besitzen. In der folgenden Tabelle 2.11-1 werden die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeausdehnung von PEEK und Edelstahl gegenübergestellt.

Werkstoff	Rostfreier Edelstahl	PEEK	Verhältnis PEEK / Stahl
Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	15	0,25	1/60
Wärmeausdehnung $10^{-6} \cdot [1/K]$	17,3	47	2,72

Tabelle 2.11-1: Vergleich von Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung von PEEK und Edelstahl.

Beim Erwärmen der Schweißzone entstehen durch die starke Wärmeausdehnung der Thermoplaste zunächst Druckspannungen, die jedoch aufgrund des plastischen Verhaltens der aufgeschmolzenen Kunststoffzone aufgefangen werden. Beim Abkühlen steigt in der geschweißten Kunststoffzone der E-Modul wieder an, und das plastische Fließen des Thermoplasts wird zunehmend unterbunden. Die Außenbereiche der Schweißzone kühlen schneller ab, verfestigen sich und behindern anschließend die Schrumpfung des langsamer abkühlenden Schweißnahtzentrums. Dadurch entstehen Zugspannungen im Querschnitt der Schweißzone, die im Zentrum der Naht ihr Maximum haben. Nach Erreichen der Formfestigkeit, bei teilkristallinen Thermoplasten unterhalb des Kristallitschmelzpunkts (334 °C bei PEEK), sind daher Wärmeschrumpfspannungen in der Schweißverbindung, auch Schweiß- oder auch Schweißrestspannungen genannt, eingeschlossen. Die durch Rekristallisation und thermisches Schrumpfen eingebrachten hohen Spannungen in der Schweißnaht können zu verschlechtertem Sprödverhalten und sogar zur Rissbildung führen [Hadi05].

Durch eine gleichmäßige Wärmeverteilung in der Schweißzone und eine breite Temperaturkurve, d. h. große Wärmeeindringtiefe bei flachem Temperaturgefälle von der Schweißstelle zum Werkstoffinneren und durch langsames Abkühlen der Schweißnaht können Spannungsspitzen oder sehr steile Spannungsabfälle im Schweißquerschnitt vermieden werden. Diese Forderung nach mittleren Schweißtemperaturen und längeren Wärmeeinwirkzeiten ist allerdings mit einer Einbuße an Schweißgeschwindigkeit verbunden. Durch Tempern können die hohen, Rissbildung fördernden Spannungen in der Schweißzone, die durch Rekristallisation und das thermische Schrumpfen eingebracht wurden, auch nachträglich gezielt abgebaut werden. Je länger der Thermoplast oberhalb der Glastemperatur (bei PEEK 143 °C) gehalten wird, umso besser werden Spannungen in der Schweißzone abgebaut und umso größer ist der Kristallisationsgrad. Mit steigendem Kristallisationsgrad steigt auch die Festigkeit der Schweißnaht an.

Die oben beschriebenen Erkenntnisse legen nahe, dass die empfindlichen Dünnfilm-Heizelemente, wie vermutet, durch die Entstehung von Schweißspannungen durch zu schnelles Erhitzen und Abkühlen der Schweißstelle zerstört werden konnten. Nicht zuletzt aus diesem Grund ist zum Verschweißen von Thermoplasten mit spannungsempfindlichen Heizelementen, die aus gesputterten Metaldünnfilmen von einigen hundert Nanometern oder auch aus galvanisch aufgetragenen Metallschichten bis zu wenigen Mikrometern bestehen, eine Regelung der Schweißleistung entlang eines Profils, z. B. mit An- und Abstiegsrampen, daher anzuraten bzw. erforderlich.

3 Drucksensoren mit galvanisch erzeugter Kreisplatte

Da lange Zeit nicht absehbar war, ob die Fertigung von Drucksensoren mit Glaskreisplatte mit akzeptabler Ausbringungsrate gelingen würde, wurde parallel über alternative Fertigungskonzepte für Drucksensoren mit Kreisplatten nachgedacht. Beim letztlich ausgewählten Konzept wurden die Kreisplatten aus Nickel galvanisch hergestellt. Die Fertigung konnte auf einem 4“-Silizium-Wafer erfolgen, was im Gegensatz zum Dünnglas-substrat die gefahrlose Handhabung des Substrats während der lithografischen Strukturierung ermöglichte. Auch beim Kontaktbelichten bestand nicht mehr die Gefahr, das Substrat vorzuschädigen.

3.1 Fertigungsablauf im Überblick

Die folgenden Skizzen in Bild 3.1-1 zeigen schematisch die Fertigungsschritte zur Herstellung von Drucksensoren mit Nickel-Kreisplatten.

Schritt 1: Wafer mit Gold bedampfen.



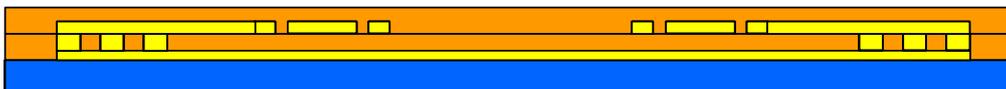
Schritt 2: Erste PI-Trägerschicht strukturieren.



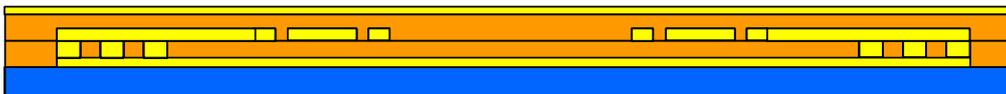
Schritt 3: DMS mit dem Abhebeverfahren herstellen.



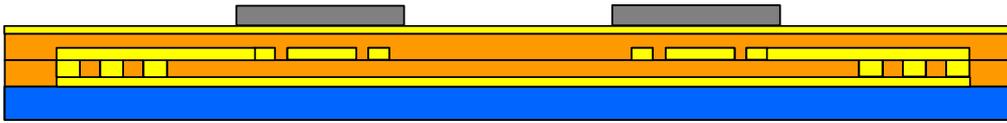
Schritt 4: Zweite PI-Trägerschicht aufbringen.



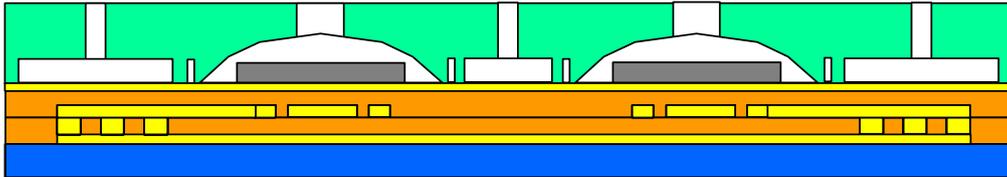
Schritt 5: Galvanik-Startschicht aufdampfen.



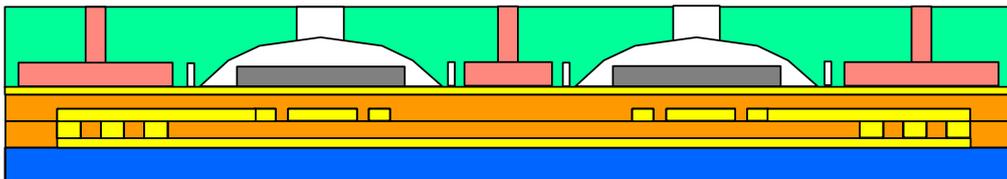
Schritt 6: Kreisplatten aus Nickel aufgalvanisieren.



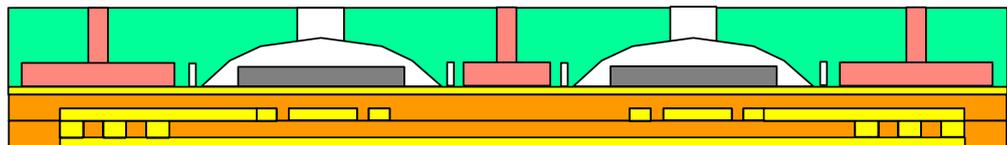
Schritt 7: Ersten Gehäusenutzen auf das Substrat positionieren.



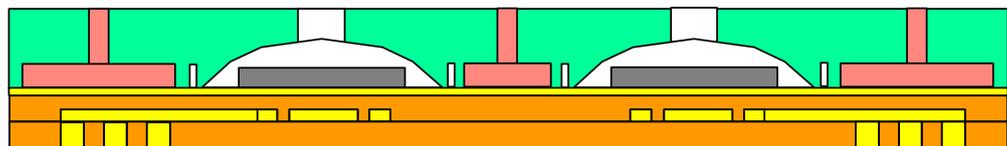
Schritt 8: Kammern des Nutzens mit Klebstoff befüllen.



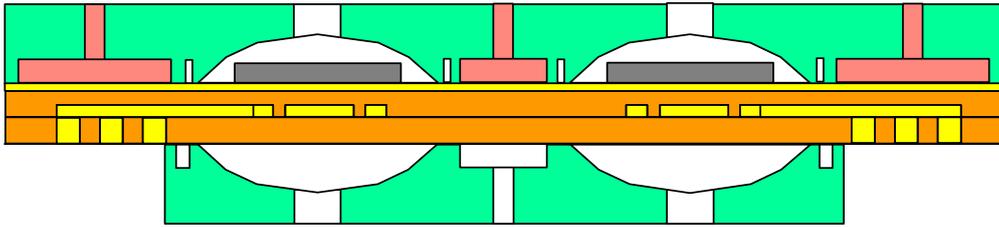
Schritt 9: Nutzen vom Wafer ablösen.



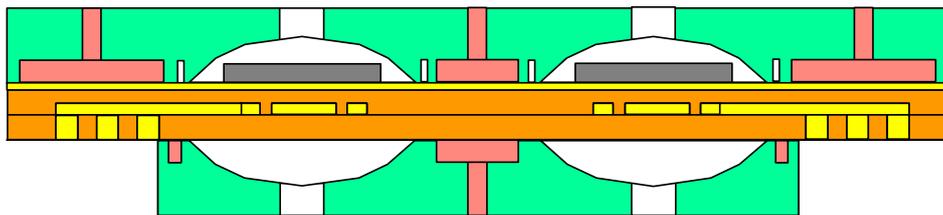
Schritt 10: Goldtrennschicht durch Trockenätzen entfernen.



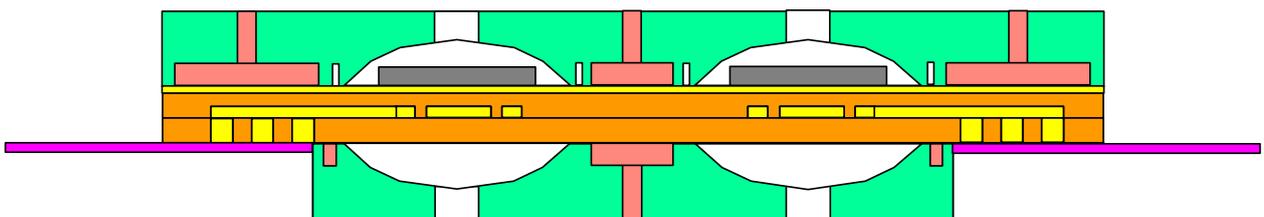
Schritt 11: Kleinen Gehäusenutzen aufsetzen.



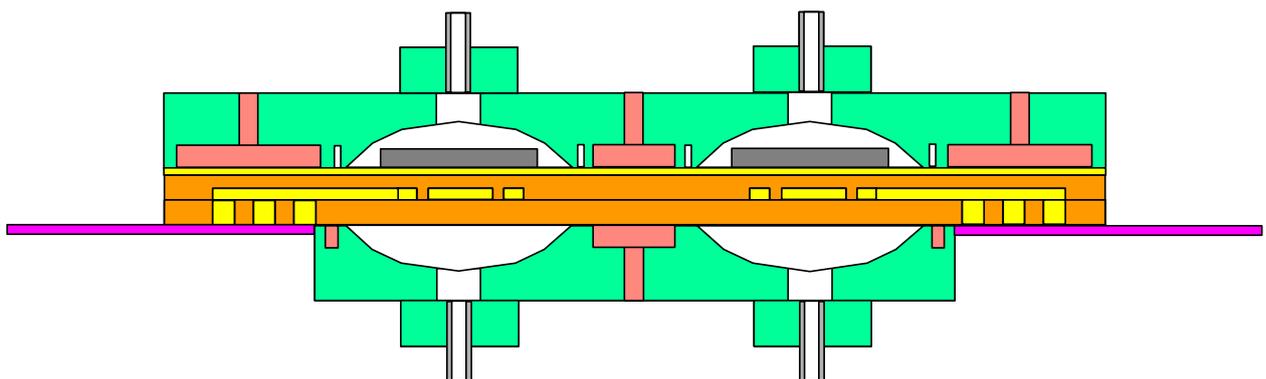
Schritt 12: Kleinen Gehäusenutzen kammerkleben.



Schritt 13: Heißsiegelbonden des Flexprintkabels.



Schritt 14: Aufkleben der fluidischen Anschlüsse.



Schritt 15: Vereinzeln der Sensoren.

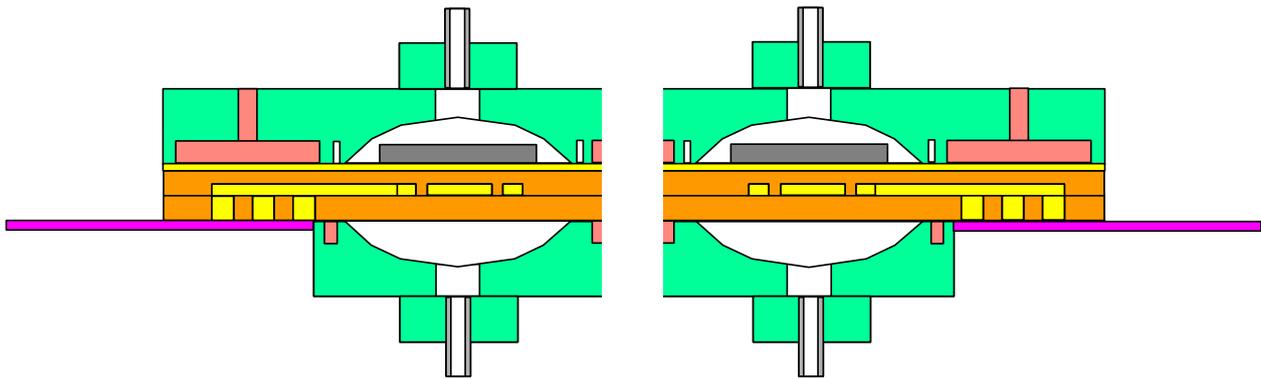


Bild 3.1-1: Fertigungsschritte von Drucksensoren mit Nickel-Kreisplatten.

3.2 Fertigung von Drucksensoren mit Nickelkreisplatten

Die Drucksensoren mit Kreisplatten aus Nickel waren wesentlich einfacher zu fertigen als Drucksensoren mit Kreisplatten aus Glas. In den folgenden Kapiteln wird auf einige Fertigungsprobleme und deren Lösungen eingegangen.

3.2.1 Herstellung der DMS

Nach dem Aufdampfen einer Goldtrennschicht auf den Wafer wurde die erste PI-Schicht der Trägermembran aufgebracht (Bild 3.2-1 a)). Dann wurden die DMS mit Zuleitungen und Anschlussflächen mit dem Abhebeverfahren strukturiert (Bild 3.2-1 b)).

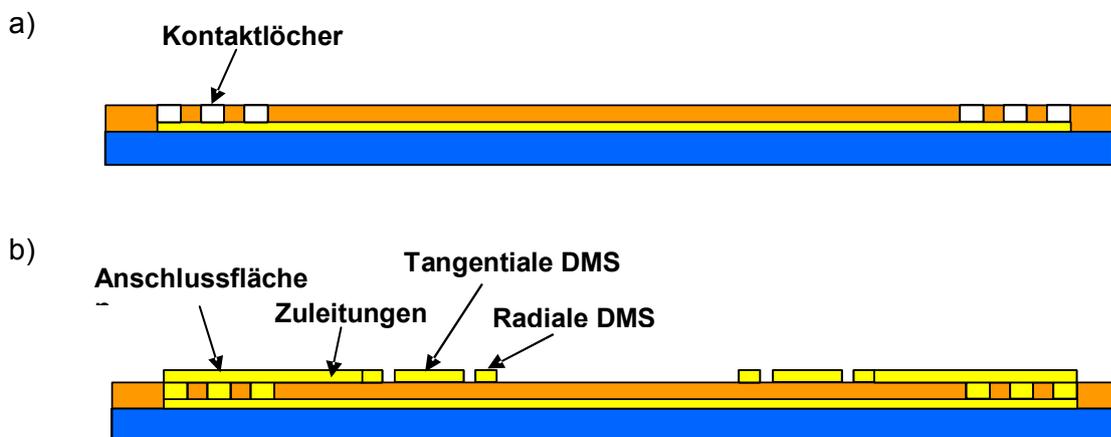


Bild 3.2-1: a) Erste PI-Trägerschicht mit Löchern im Bereich der Anschlussflächen (Schritt 2) b) Aufgesputterte DMS mit Zuleitungen und Anschlussflächen (Schritt 3).

Die Kontaktierung der Anschlussflächen mit einem Flexprintkabel ([Schritt 13](#)) kann jedoch aufgrund des Fertigungskonzepts nur auf die Unterseite der ersten PI-Schicht vorgenommen werden. Um durch die PI-Membran hindurch die auf der Oberseite der PI-Schicht liegenden Anschlussflächen kontaktieren zu können, mussten sich daher Kontaktlöcher in der Trägermembran befinden (Bild 3.2-1 a)). Beim Aufdampfen der DMS wurden die Kontaktlöcher mit Metall ausgefüllt (Bild 3.2-1 b)). Die Löcher waren so dimensioniert, dass der Metalldünnfilm in den Löchern hängen blieb, wenn die fertig prozessierte Trägermembran in Schritt 9 vom Wafer abgelöst wurde. Da die Kontaktlöcher auf der Rückseite der Trägermembran nach dem Ablösen vom Wafer zugänglich waren, konnten sie mit einem Flexprintkabel, durch Heißsiegelschweißen mit einem anisotropen Leitklebstofffilm, elektrisch kontaktiert werden ([Schritt 13](#)).

Das Vorgehen zur elektrischen Kontaktierung der DMS des Nickel- und des Glasdrucksensors war gleich. Die Kontaktierung lässt sich daher auch anhand von CAD-Bildern des Glasdrucksensors nachvollziehen. Die Kontaktpunkte auf der Rückseite der Trägermembran sind in der Explosionsansicht von [Bild 7.2-1](#) sowie in [Bild 7.2-2](#) im Anhang zu sehen. [Bild 7.2-3](#) bietet eine Sicht auf die DMS-Seite der Trägermembran.

Zur Durchführung mehrerer positionierter, lithografischer Schritte übereinander sind vier Positionierkreuze auf der ersten PI-Schicht vorgesehen. Die Flügel der Positionierkreuze wurden als fehlende PI-Bereiche ausgeführt ([Bild 3.2-2](#)). In der Mitte von Positionierkreuzen einer Fotolackschicht befinden sich normalerweise durchgehende, feine Linien. Bei einer PI-Schicht werden am IMT die feinen Linien in der Mitte eines Positionierkreuzes jedoch üblicherweise als Lochreihen mit 15 µm großen Löchern ausgeführt ([Bild 3.2-3](#)).

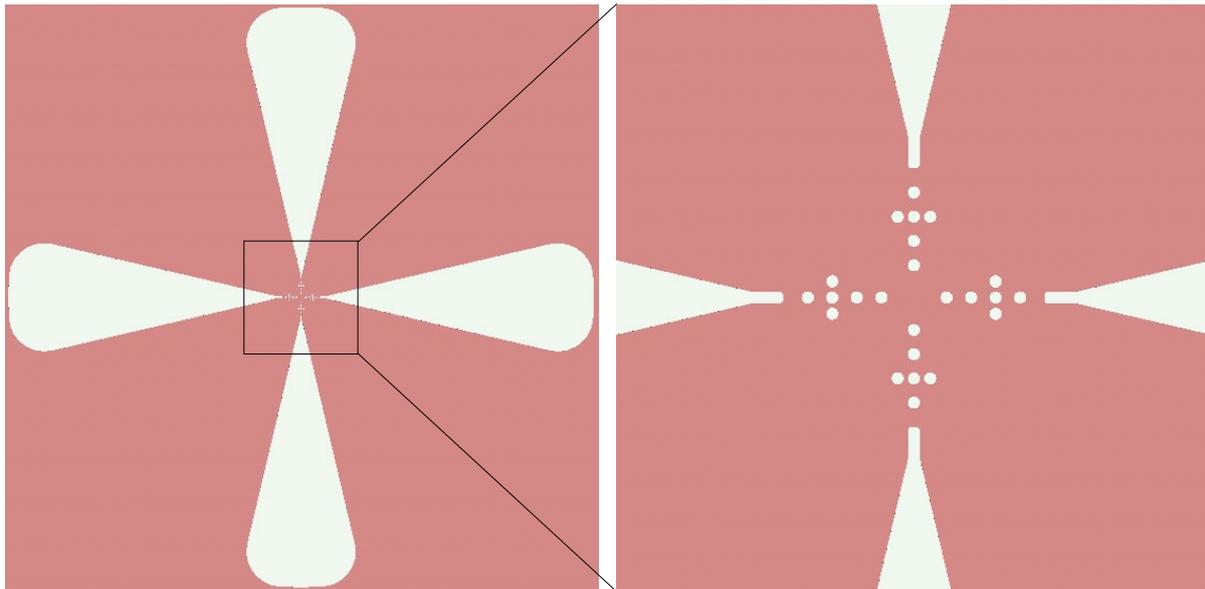


Bild 3.2-2: Positionierkreuz in der ersten PI-Schicht.

Bild 3.2-3: 15 µm große Löcher im Positionierkreuz.

Der Grund hierfür ist ein besserer mechanischer Zusammenhalt des Positionierkreuzes, der notwendig ist, da die fertige PI-Membran auf der darunter befindlichen Goldschicht nur eingeschränkt gut haftet und dazu neigt, sich an ihren Strukturkanten, bei der Prozessierung in nachfolgenden lithografischen Schritten, von der Goldschicht abzulösen.

Bei der Herstellung von DMS für Nickeldrucksensoren ([Schritt 3](#)) wurde festgestellt, dass der mechanische Zusammenhalt der wie üblich gestalteten PI-Kreuze nicht ausreichte. Die zum Strippen verwendete Lauge AZ 400 K konnte im Bereich der Positionierkreuze weiträumig unter die PI-Membran kriechen, so dass sich die PI-Schicht um die Positionierkreuze von der Goldschicht ablöste. Die Ablösung war so stark, dass nachfolgende Positionierungen von Chrommasken auf die Positionierkreuze schwierig bis nicht mehr möglich waren. Das Problem konnte gelöst werden, indem beim Aufdampfen der Goldtrennschicht eine Sputtermaske verwendet wurde, mit welcher der Wafer im Bereich der PI-Kreuze abgedeckt wurde. Dadurch hatte die PI-Membran im Bereich der Positionierkreuze direkten Kontakt zum oxidierten Siliziumwafer, auf dessen Oberfläche die PI-Schicht sehr gut haftete. Ablösungen der PI-Schicht im Bereich der Positionierkreuze traten danach nicht mehr auf.

In [Bild 3.2-4](#) ist ein Wafer direkt nach dem Aufdampfen der DMS und der Kontaktflächen, also noch vor dem Strippen, abgebildet. Die Goldtrennschicht wurde nur im Bereich des Gehäusenutzens aufgebracht. Die PI-Schicht im Bereich der Positionierkreuze haftete daher direkt auf der oxidierten Siliziumoberfläche. Noch erkennbar ist, dass die Anschlussflächen aus Gold und die DMS aus Konstantan gesputtert wurden. Die DMS und die Anschlussflächen wurden mit zwei verschiedenen Sputtermasken aufgebracht, welche in den Bildern [2.7-17](#) und [2.7-18](#) bereits vorgestellt worden sind. Es war notwendig, die Anschlussflächen aus Gold herzustellen, da nur Gold in den Kontaktlöchern der ersten PI-Schicht hielt, d. h. sich beim Strippen nicht herauslöste und auch das nachfolgende Ablösen

der Trägermembran vom Wafer schadlos überstand. Einen Wafer nach dem Strippen zeigt Bild 3.2-5.

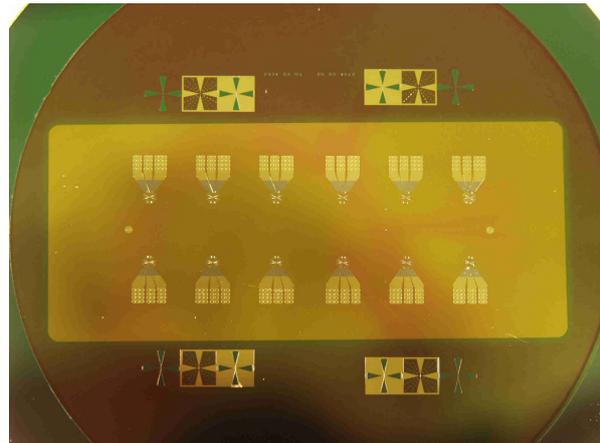
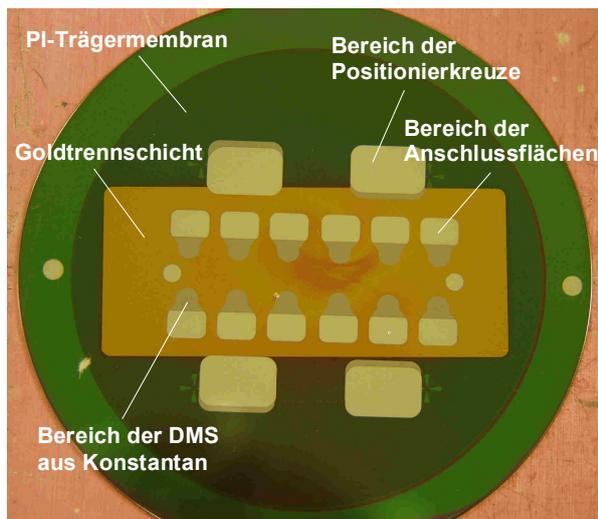


Bild 3.2-4: Wafer nach dem Sputtern von DMS aus Konstantan und Anschlussflächen aus Gold. Bild 3.2-5: Der Wafer von Bild 3.2-4 nach dem Strippen.

In ersten Versuchen wurden die DMS und Anschlussflächen vollständig aus Konstantan hergestellt. Durch Sputtern aufgebraute Konstantanschichten waren bereits nach dem Strippen aus den Kontaktlöchern herausgebrochen (Bild 3.2-6 und 3.2-7). Aluminium kann als Werkstoff für die Anschlussflächen aufgrund der Entferner-Lösung, AZ 400 K, nicht verwendet werden. AZ 400 K besteht hauptsächlich aus Kalilauge, welche Aluminiumschichten beim Strippen auflösen würde.

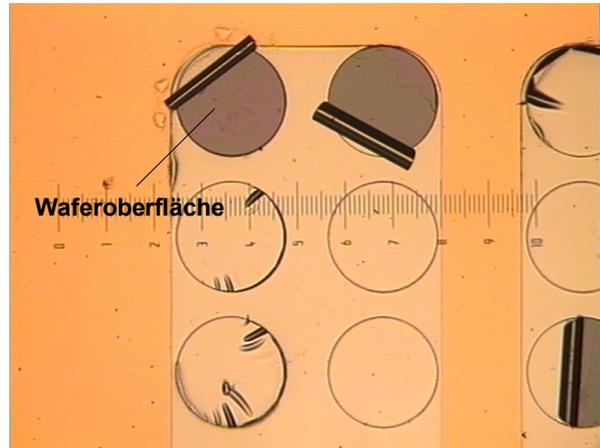
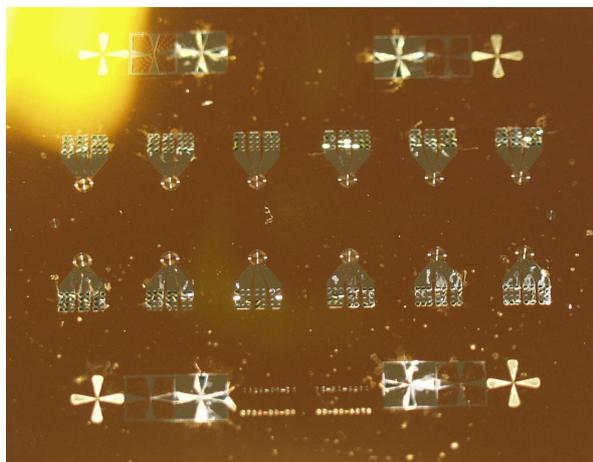


Bild 3.2-6: Wafer mit DMS und Anschlussflächen aus Konstantan nach dem Strippen des Abhebelacks. Der Konstantdünnfilm ist aus den meisten Kontaktlöchern in der PI-Schicht herausgebrochen. Bild 3.2-7: In zwei Kontaktlöchern der PI-Trägermembran hat sich der Konstantdünnfilm aufgerollt. Darunter ist die Waferoberfläche sichtbar.

Die Vorgehensweise, die Kontaktflächen gesondert aufzudampfen, ist üblich. Auch bei der Firma Hottinger Baldwin, Darmstadt [Ort84] werden zuerst Anschlussflächen und Umlenkbereiche aus Gold aufgedampft und danach die DMS, z. B. aus Chrom-Silizium. Die Reihenfolge, erst die Anschlussflächen aus Gold und danach die DMS aus Konstantan aufzubringen, war in dieser Arbeit aus den gleichen Gründen wie in [Ort84] notwendig. Das Vakuum in der Sputteranlage musste zum Auswechseln der Sputterblende unterbrochen werden. Die Konstantanschicht hätte sich an Luft mit einem Oxidfilm überzogen, durch welchen ein unnötiger Übergangswiderstand zwischen den DMS und den Anschlussflächen entstanden wäre.

3.2.2 Galvanoformen von Nickel-Kreisplatten

Auf die DMS wurde eine zweite PI-Schicht aufgebracht, die als Isolierschicht zu den Kreisplatten aus Nickel bzw. zur Galvanik-Startschicht diente. Als Startschicht wurden 15 nm Chrom und 60 nm Gold aufgedampft. Zur galvanischen Herstellung der Nickel-Kreisplatten wurde die Startschicht mit dem Dickschichtlack AZ 4562 maskiert. Der Lack wurde in zwei Belackungsschritten mit den Parametern 600/15/60 insgesamt 55 µm dick aufgebracht. Da der Lack mit relativ hoher Umdrehungszahl aufgeschleudert wurde, bildete sich am Waferrand nur ein verhältnismäßig kleiner Lackrandwulst. Dennoch hätte der Randwulst beim Kontaktbelichten einen Abstand der Chrommaske von der Fotolackoberfläche verursacht, was die seitliche Auflösung und Kantensteilheit der Lackstrukturen beeinträchtigt hätte. Der Lackrandwulst wurde deshalb nach dem Trocknen des Lackes entfernt. Dazu wurde Aceton aus einer Spritze mit feiner Nadel auf den Randwulst des rotierenden Wafers gespritzt. Nach dem Belichten und Entwickeln des AZ-Lacks wurde der entlackte Waferrand bis auf eine Stelle zur elektrischen Kontaktierung beim Galvanisieren wieder mit AZ-Lack durch Auftragen mit einem Pinsel abgedeckt. Damit wurde verhindert, dass der Waferrand im Galvanikbad mit Nickel beschichtet wurde. Nur die Kreisplatten sowie die Positionierkreuze sollten galvanisiert werden.

Die Dicke der Kreisplatten wurde so ausgelegt, dass sich die Dehnungen an der Kreisplattenoberfläche bis 1 bar proportional zur Druckbelastung verhalten. Dies ist der Fall, solange das Verhältnis V der maximalen Durchbiegung w_{\max} zur Kreisplattendicke d_{KP} ungefähr 0,2 beträgt [Birk67].

$$(3.1) \quad V = \frac{w_{\max}}{d_{KP}} = 0,2$$

Die Gleichung für die Durchbiegung $w(r)$ frei gelagerter Kreisplatten unter gleichmäßig auf die Fläche einwirkender Druckbelastung lautet [Girk54]:

$$(3.2) \quad w(r) = \frac{\Delta p}{64 \cdot N} \cdot \left(\frac{5 + \nu_{KP}}{1 + \nu_{KP}} \right) \cdot (R_{KP}^2 - r^2)^2$$

wobei N die Plattensteifigkeit bezeichnet:

$$(3.3) \quad N = \frac{E_{KP} \cdot d_{KP}^3}{12 \cdot (1 - \nu_{KP}^2)}$$

ν_{KP}	Querdehnungszahl der Kreisplatte
Δp	Druckdifferenz
R_{KP}	Radius der Kreisplatte
r	Variable für den Radius der Kreisplatte
N	Plattensteifigkeit
E_{KP}	Elastizitätsmodul der Kreisplatte

Die größte Durchbiegung befindet sich in Plattenmitte bei $r=0$. Damit folgt aus (3.3) und $r=0$ eingesetzt in (3.2):

$$(3.4) \quad w_{\max} = \frac{3}{16} \cdot \Delta p \cdot \frac{R_{KP}^4}{E_{KP} \cdot d_{KP}^3} \cdot (1 - \nu_{KP}) \cdot (5 + \nu_{KP})$$

(3.4) eingesetzt in (3.1) wird nach der Kreisplattendicke d_{KP} aufgelöst.

$$(3.5) \quad d_{KP} = \frac{R_{KP}}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{3}{V} \cdot \frac{\Delta p}{E_{KP}} \cdot (1 - \nu_{KP}) \cdot (5 + \nu_{KP})}$$

Zur Prozessierung von Sensoren mit Nickel-Kreisplatten konnten größtenteils die vorhandenen Chrommasken verwendet werden. Die Nickel-Kreisplatten besitzen daher denselben Radius wie die Glas-Kreisplatten von 1042 µm. Mit diesem Radius und den Materialwerten von Nickel eingesetzt in (3.5) ergab sich eine notwendige Dicke der Nickel-Kreisplatte von 37,7 µm.

Die galvanische Herstellung der Kreisplatten funktionierte problemlos (Bild 3.2-8). Wichtig war, dass der Dickschichtlack ca. 30 % höher war als die Solldicke der Kreisplatten, da die

Kanten des Dickschichtlacks leicht abgerundet waren. Aufgrund der großen Schichtdicke wurde der Fotolack nach dem Belackern sehr lange bei 90 °C getrocknet, wobei ein Teil des Fotoinitiators abgebaut wurde. In der Folge musste der Fotolack länger belichtet und entwickelt werden. Dies führte zu einem hohen Dunkelabtrag besonders an den Lackkanten, d. h. die Lackkanten wurden vom Entwickler angegriffen und abgerundet.

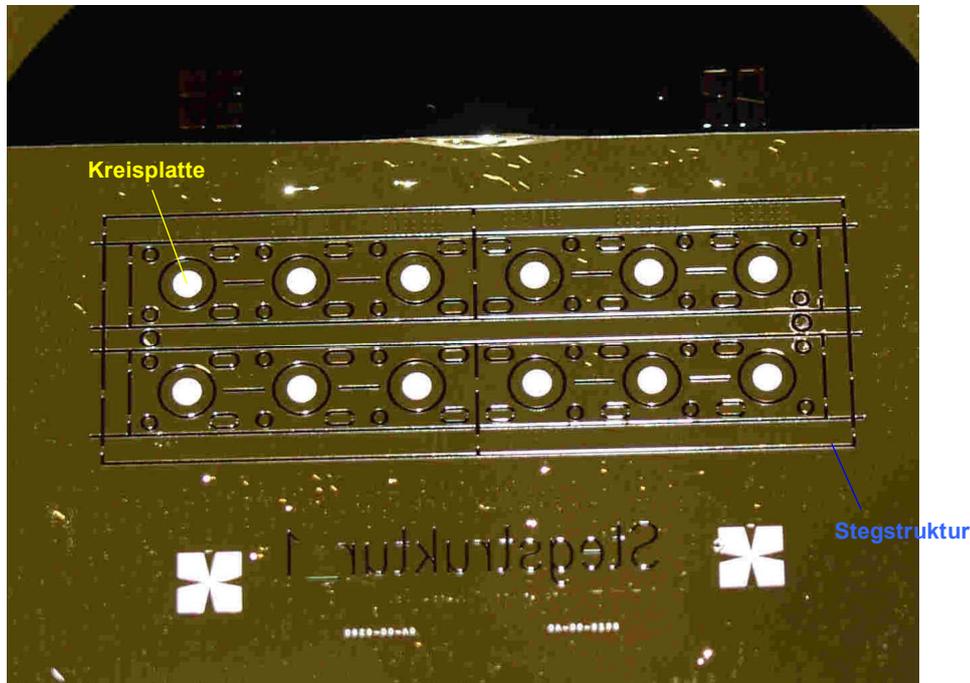


Bild 3.2-8: Wafer mit aufgalvanisierten Kreisplatten aus Nickel. (Die ebenfalls sichtbare Stegstruktur des Gehäusenutzens bestand aus Durimide 7020 und war Teil eines Versuchs zur Verbesserung der Abdichtung beim nachfolgenden Kammerkleben.)

Die Kreisplattendicke muss sehr genau eingehalten werden, da sie quadratisch in das Sensorsignal eingeht. Eine Abweichung von $\pm 1 \mu\text{m}$ bei einer Kreisplattendicke von $20 \mu\text{m}$ bedeutet bereits eine Signalstreuung von $\pm 10 \%$ [Heyw92]. Die Schichtdickenunterschiede von Kreisplatte zu Kreisplatte waren gering. Zukünftig wäre es möglich, eine Galvanikhilfsstruktur vorzusehen, um die Abscheidungsrate auf der gesamten Waferoberfläche anzugleichen. Das Galvanikbad war gepuffert, so dass die Abscheidungsrate während der Nutzungszeit konstant blieb.

3.2.3 Kugelfräsen von Sensorkammern

Wie aus dem Fertigungsablauf (Bild 3.1-1) hervorgeht, wurden Nickeldrucksensoren mit linsenförmiger Sensorkammer hergestellt, d. h. die Sensorkammer bestand aus zwei kugelschalenförmigen Kammerhälften. Zur Herstellung der schalenförmigen Kammerhälften wurden die zylindrischen Kammerhälften der vorliegenden, abgeformten Gehäusenutzen mit einem Kugelfräser, Radius 10 mm, nachgearbeitet. Im Folgenden wird diskutiert, welche Vor- oder Nachteile die linsenförmige Sensorkammer gegenüber einer zylindrischen Sensorkammer hat.

In [Wulf01] wurde der Glasdrucksensor ursprünglich mit einer linsenförmigen Sensorkammer konzipiert, wovon jedoch später – wie schon in Kapitel 1.1.2 angegeben – abgewichen wurde. Der Grund hierfür war, dass es für den Formwerkzeughersteller schwierig gewesen wäre, die für die Abformung von kugelschalenförmigen Kammerhälften im Formwerkzeug notwendigen Kalotten herzustellen. Daher wurden als Kompromisslösung zylinderförmige Kammerhälften mit abgerundeten Innenkanten bestimmt. Die Kreisplatte sollte bei Druckbeaufschlagung mit ihrem Rand auf die Verrundung der Innenkante aufsetzen und sich dann wie in einer schalenförmigen Kammerhälfte durchbiegen können. Es wurde jedoch befürchtet, dass die scharfe Kante der geätzten Glaskreisplatte die dünne PI-Trägermembran beim Aufsetzen auf den im Vergleich zum Radius einer schalenförmigen

Kammerhälfte viel kleineren Radius einer verrundeten Innenkante in einer zylinderförmigen Kammerhälfte beschädigt werden könnte. Deshalb wurde ein PI-Ring auf der PI-Trägermembran am Rand der Kreisplatte vorgesehen. Bei Druckbeaufschlagung sollte nicht der Rand der Glaskreisplatte sondern der PI-Ring auf die Kammerwand aufsetzen. Die Glaskreisplatte sollte sich innerhalb des ca. 20 μm hohen PI-Rings durchbiegen. Die Kammerhälfte im großen Gehäusenutzen, in welcher der PI-Ring aufsetzt, wurde deshalb zylindrisch mit nicht abgerundeter Innenkante ausgeführt (Bild 3.2-9). Die Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens wurde ebenfalls zylindrisch, jedoch mit verrundeter Innenkante gestaltet (Bild 3.2-10).

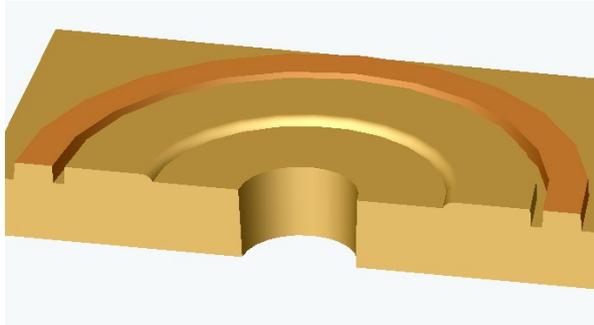


Bild 3.2-9: Schnitt durch die Sensorkammerhälfte des großen Gehäusenutzens.

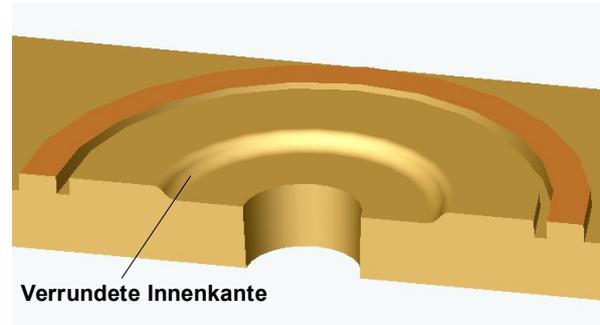


Bild 3.2-10: Schnitt durch die Sensorkammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens.

Wenn die Kreisplatte jedoch in der einen Kammerhälfte auf der Verrundung und in der anderen auf dem PI-Ring aufliegt, sind die Lagerbedingungen für beide Seiten der Kreisplatte nicht exakt gleich. Es sind daher unterschiedliche Signalverläufe in den beiden Differenzdruck-Richtungen des Sensors möglich.

Die Lagerung der Kreisplatte in der Kammerhälfte mit verrundeter Innenkante ist zudem undefiniert, weil bei einer stärkeren exzentrischen Lage der Kreisplatte in der Sensorkammer, die sich aus den Fertigungstoleranzen ergeben kann, die Kreisplatte aus geometrischen Gründen nicht mehr vollständig an ihrem Rand entlang auf der Verrundung aufliegen kann. Folglich würde sich die Kreisplatte bei Druckbelastung nicht mehr wie vorgesehen rotationssymmetrisch durchbiegen, wodurch die DMS-Brückenschaltung verstimmt würde. Wie in [Kapitel 1.1.1](#) bereits erläutert, ist ein Drucksensor mit kugelschalenförmiger Sensorkammer dagegen tolerant gegenüber einer exzentrisch liegenden Kreisplatte und die Lagerungsbedingungen bleiben immer gleich.

Weiterhin haben schalenförmige Sensorkammern den Vorteil, dass die Trägermembran bei anliegendem Druck erheblich weniger als bei zylinderförmigen Kammern gedehnt wird. Dies wird in den Bildern 3.2-11 bis 3.2-14 verdeutlicht.

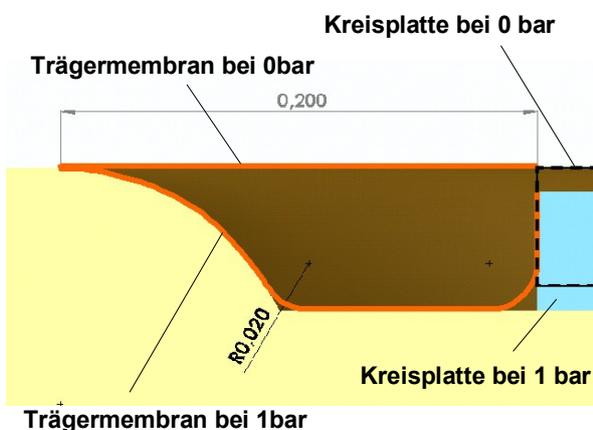


Bild 3.2-11: Schnitt durch eine zylindrische Kammerhälfte des großen Gehäusenutzens. Eingezeichnet ist die Lage der Trägermembran bei 0 bar und bei 1 bar.

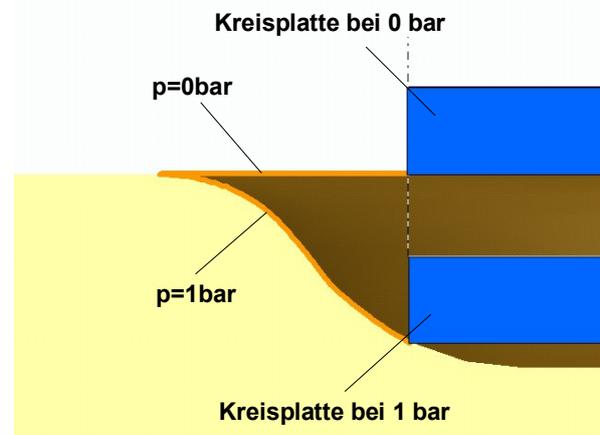


Bild 3.2-12: Schnitt durch eine zylindrische Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens. Eingezeichnet ist die Lage der Trägermembran bei 0 bar und bei 1 bar.

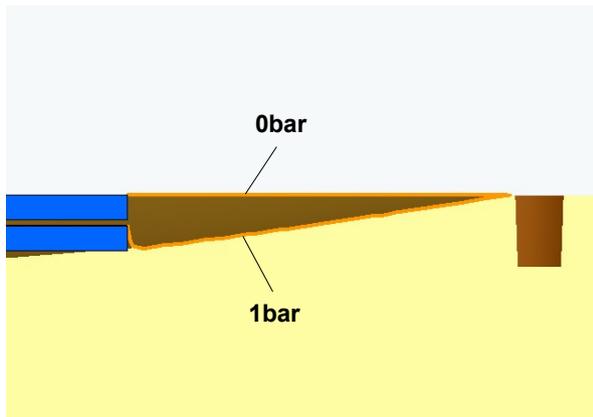


Bild 3.2-13: Schnitt durch eine kugelschalenförmige Kammerhälfte des großen Gehäusenutzens mit eingezeichneter Lage der Trägermembran bei 0 bar und bei 1 bar.

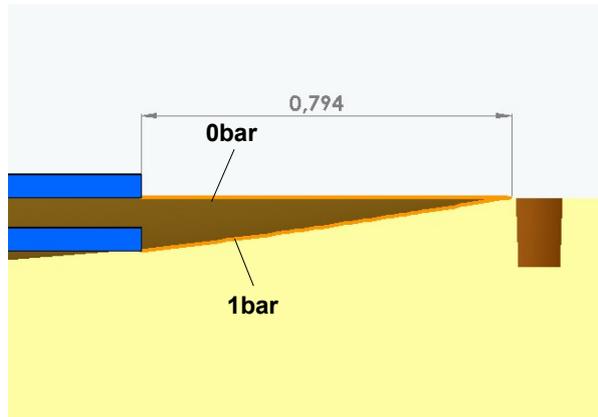


Bild 3.2-14: Schnitt durch eine kugelschalenförmige Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens mit eingezeichneter Lage der Trägermembran bei 0 bar und bei 1 bar.

Zu sehen sind Querschnitte durch zylindrische sowie kugelschalenförmige Sensorkammern. In den Querschnitten sind die Kreisplatten und die Trägermembranen einmal in Ausgangslage bei 0 bar und einmal an der Kammerwand anliegend bei 1 bar dargestellt. Da die Trägermembran nicht in der Mittelebene der Kreisplatte angebracht ist sondern auf einer ihrer Kreisflächen, ergeben sich zwei Fälle der Trägermembran-Dehnung abhängig von der Druckrichtung. Bei anliegendem Druck in Richtung des großen Gehäusenutzens wird die dünne Trägermembran an die Kammerwand und gleichzeitig an die Seitenfläche der Kreisplatte gedrückt, wie in den Bildern 3.2-11 und 3.2-12 skizziert. In diesen Bildern wurde die PI-Membran mit einem Radius in der Ecke zwischen der Zylinderfläche der Kreisplatte und der Kammerwand gezeichnet. Es ist plausibel, dass sich die PI-Membran nicht vollständig in diese Ecke einlegen kann. Der Radius in dieser Ecke wird jedoch vermutlich kaum ins Gewicht fallen. Angenommen wurde daher ein Eckenradius von 0,02 mm. Weiterhin wurde bei der Abschätzung der Dehnung der PI-Trägermembran vereinfachend angenommen, dass die Membran unmittelbar am Rand der Sensorkammer als fest eingespannt gelten kann.

In Tabelle 3.2-1 sind die Dehnungen der Trägermembran bei einwirkendem Druck für zylindrische und kugelschalenförmige Kammern gegenübergestellt. Die in den Bildern 3.2-11 bis 3.2-14 dargestellten Querschnitte der verschiedenen Sensorkammern und Drucklastfälle wurden mit einem CAD-System im Originalmaßstab modelliert. Die angegebenen Längen der Trägermembran wurden mit Hilfe des CAD-Systems gemessen. Aus der Verlängerung der Trägermembran bei Druckbelastung ergab sich die Dehnung der Membran.

Druck in Richtung		Großer Gehäusenutzen	Kleiner Gehäusenutzen	Großer Gehäusenutzen	Kleiner Gehäusenutzen
Form der Sensorkammer		Zylindrisch	Zylindrisch	Schalenförmig	Schalenförmig
Bild		2.3-11	2.3-12	2.3-13	2.3-14
Länge der Trägermembran bei Kreisplatte in Ausgangslage	[μm]	200	143	794	794
Länge der Trägermembran bei Kreisplatte ausgelenkt	[μm]	263	179	842	803
Verlängerung der Trägermembran	[μm]	63	36	48	9
Dehnung der Trägermembran	[%]	31,5 %	25,2 %	6,0 %	1,1 %

Tabelle 3.2-1: Dehnung der Trägermembran für verschiedene Formen der Sensorkammer und unterschiedliche Lastfälle.

Die Dehnung der PI-Trägermembran in den bisher verwendeten zylindrischen Sensorkammern ist deutlich größer als in kugelschalenförmigen Kammern. Durimide der 7500-Serie haben ausgehärtet jedoch eine Dehnbarkeit von maximal 85 % [Arch04]. D. h., dass die Membran bei Druckbelastung vermutlich in keinem der Fälle überdehnt oder beschädigt würde. Bedacht werden muss jedoch, dass über die Trägermembran Leiterbahnen zu den

DMS verlaufen, die mitgedehnt werden. Durch die Dehnung könnte der Widerstand der Zuleitungen erhöht werden, wodurch das Messsignal verändert würde. Die Kontaktflächen sowie die Zuleitungen zu den DMS wurden jedoch, wie erläutert, aus Gold gefertigt. Die Dehnbarkeit von Gold bis zum Bruch beträgt 45–50 % [Merk00]. Da Gold außerdem ein relativ weiches und zähes Metall ist, darf angenommen werden, dass sich der Leitungswiderstand von Zuleitungen aus Gold bei den berechneten Dehnungen nicht wesentlich ändern würde. Teilstücke der Zuleitung, die in Bereichen über die PI-Trägermembran verlaufen, die bei Druckbeaufschlagung stark gedehnt werden, dürfen jedoch nicht aus einem DMS-Werkstoff, wie z. B. Konstantan bestehen. Konstantan kann nur bis maximal 30% gedehnt werden [Edel00]. Es muss daher gefordert werden, dass die Zuleitungen aus einem Werkstoff mit hoher Dehnbarkeit, wie z. B. aus Gold, hergestellt werden und dass die Zuleitungen die DMS erst auf der Oberfläche der Kreisplatte kontaktieren (Bild 3.2-15), wo die Enden der Zuleitungen nur den geringen Oberflächendehnungen der Kreisplatte, die bei Druckbeaufschlagung entstehen, ausgesetzt sind.

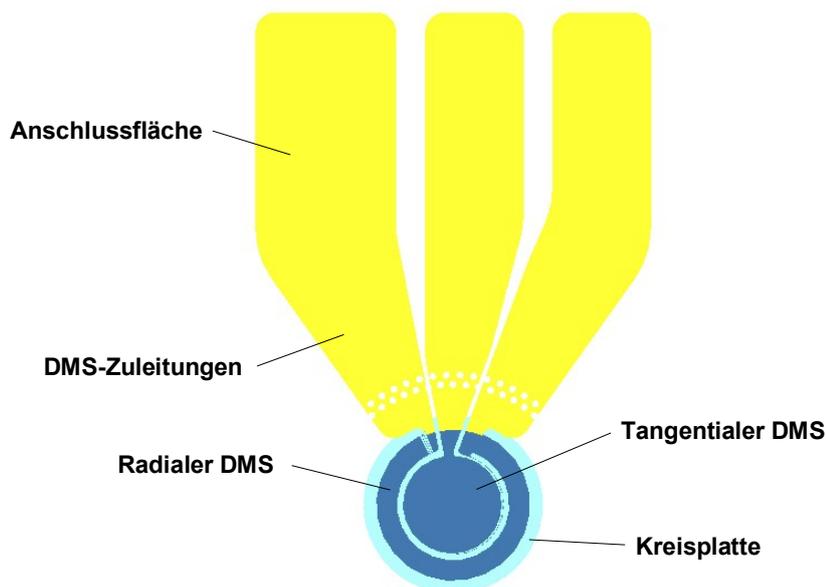


Bild 3.2-15: DMS-Zuleitungen aus Gold kontaktieren die DMS auf der Kreisplatte. Der tangentiale und der radiale DMS sind vereinfacht als Flächen dargestellt.

Um Zuleitungen aus Gold herzustellen, welche auf der Kreisplatte die DMS kontaktieren, kann entweder eine entsprechende Sputterblende verwendet werden oder a) die Anschlussflächen und Zuleitung und b) die DMS werden in getrennten lithografischen Schritten hergestellt. Die in dieser Arbeit bisher verwendete Sputterblende von Bild 2.7-18 ist für diese Aufgabe nicht ausgelegt worden. Tendenziell sollte die Dehnung der Trägermembran so gering wie möglich sein, was eher für eine linsenförmige Gestaltung der Sensorkammer spricht.

3.3 Temperaturfehler durch die PI-Trägermembran

Beim Glasdrucksensor werden die DMS direkt auf das Verformungselement des Drucksensors, d. Trägermembran des Glasdrucksensors reicht ca. 20 μm weit auf den Rand der Kreisplatte. Daher führen die unterschiedlichen WAK der PI-Trägermembran und der Glaskreisplatte bei Temperaturänderungen nicht zu einem Zweimaterialeffekt, so dass ein temperaturabhängiger Signalfehler durch die PI-Trägermembran nicht entsteht.

Beim Nickeldrucksensor befinden sich die DMS zwischen zwei PI-Schichten von jeweils ca. 2 μm Dicke. Auf diese Weise entsteht eine insgesamt 4 μm dicke PI-Trägermembran, auf der die 38 μm dicke Kreisplatte des Nickeldrucksensors aufgalvanisiert ist. Die PI-Trägermembran überzieht also die Nickelkreisplatte vollständig. Da sich z. B. bei ansteigender Temperatur die PI-Membran ($\alpha_{\text{PI}} = 55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) wesentlich stärker ausdehnt als

die Nickelkreisplatte ($\alpha_{Ni} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) könnte eine geringfügige Verbiegung der Nickelkreisplatte entstehen, wodurch sich ein temperaturabhängiger Messfehler ergeben würde. Um den Temperaturfehler einzuschätzen zu können, der sich durch den Zweimaterialeffekt durch die 4 μm dicke PI-Schicht auf der Nickelkreisplatte ergibt, wurde in Tabelle 3.3-1 die Steifigkeit der Nickelkreisplatte verglichen mit der Steifigkeit der PI-Trägermembran einschließlich der darauf befindlichen DMS.

Zeile	Parameter	Rechnung	Einheit	Nickeldrucksensor	Drucksensor mit Folien-DMS
	Durchmesser der Kreisplatte		mm	2	6
	Druckbereich des Sensors		bar	0...1	0...100
	Werkstoff der Kreisplatte			Nickel	Edelstahl 1.4548
A	Dicke der Kreisplatte		μm	38	349
B	E-Modul der Kreisplatte		N/mm^2	197.000	196.000
C	Dicke der PI-Schicht		μm	4	25
D	E-Modul von Durimide 7020		N/mm^2	2.900	2.900
	Werkstoff der DMS			Gold	Konstantan
	Dicke der DMS		μm	0,1	5
E	Fläche der Kreisplatte		mm^2	3,1	28,3
F	Oberfläche (DMS / Kreisplatte)			0,2	0,2
	Oberfläche der DMS	E·F	mm^2	0,63	5,65
	Volumen der DMS		mm^3	6,3E-05	2,8E-02
G	DMS-Schicht auf der Kreisplatte		μm	0,020	1,00
H	E-Modul der DMS		N/mm^2	79.000	161.000
I	Steifigkeit der Kreisplatte	A·B	$[\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \mu\text{m}]$	7.486.000	68.404.000
J	Steifigkeit der PI-Schicht	C·D	$[\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \mu\text{m}]$	11.600	72.500
K	Steifigkeit der DMS-Schicht	G·H	$[\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \mu\text{m}]$	1.580	161.000
L	Steifigkeit von DMS- + PI-Schicht	J+K	$[\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \mu\text{m}]$	13.180	233.500
	Steifigkeitsverhältnis	L/I	%	0,176%	0,341%

Tabelle 3.3-1: Steifigkeitsverhältnis der Kreisplatte zur PI-Trägermembran mit DMS des Nickeldrucksensors im Vergleich zum Steifigkeitsverhältnis eines Folien-DMS-Drucksensors.

Zur Abschätzung der DMS-Steifigkeit wurde vereinfachend angenommen, dass die Oberfläche der DMS ca. 20% von der Oberfläche einer Kreisplatte bedeckt (Zeile F). Wiederum vereinfachend wurde die Steifigkeit der DMS berechnet aus der Schichtdicke der DMS, die sich ergibt, wenn das Volumen der DMS gleichmäßig über die Kreisplattenoberfläche verteilt wird (Zeile G). Beim Nickeldrucksensor beträgt die Steifigkeit der PI-Trägermembran mit DMS nur ca. 0,18% im Verhältnis zur Steifigkeit der Nickelkreisplatte. Entsprechend gering ist der Temperaturfehler, der durch den Zweimaterialeffekt der PI-Trägermembran und den DMS auf der Nickelkreisplatte zu erwarten ist. DMS auf einer PI-Trägerfolie werden allgemein auch als ‚Folien-DMS‘ bezeichnet. Ähnlich wie beim Nickeldrucksensor werden, z. B. von der Firma HBM, Folien-DMS-Rosetten, d. h. DMS in einer Vollbrückenschaltung auf einer PI-Trägerfolie, zur Herstellung von Drucksensoren auf Edelstahlkreismembranen laminiert [Ort82]. In der Tabelle 3.3-1 wurde zum Vergleich mit dem Nickeldrucksensor ein Folien-DMS-Drucksensor betrachtet. Die Membrandicke des Sensors wurde so ausgelegt, dass sich im Druckbereich von 0–100 bar ein linearer Signalverlauf ergibt. Die Trägermembran von Folien-DMS ist mit 25 μm wesentlich dicker als die 4 μm dicke Trägermembran des Nickeldrucksensors. Auch die DMS eines Folien-DMS-Drucksensors sind wesentlich dicker und damit steifer als beim Nickeldrucksensor. Dies liegt daran, dass DMS von Folien-DMS nicht in Dünnschichttechnik sondern durch Ätzen aus einer 5 μm dicken, gewalzten Metallfolie hergestellt werden. Daher ist das Steifigkeitsverhältnis beim Folien-DMS-Drucksensor mit 0,34% um ca. 94% größer und damit ungünstiger als beim Nickeldrucksensor. Noch ungünstiger würde das Steifigkeitsverhältnis werden, wenn eine gleichdicke Folien-DMS-Rosette z. B. auf einen 10bar-Drucksensor geklebt würde, da die Dicke der Kreismembran geringer wäre. In [Ort82] wird jedoch angegeben, dass der Temperaturfehler von Drucksensoren mit einem auf laminierten metallischen Folienmessgitter (Folien-DMS-Rosetten) so gering ist, dass er kaum einer Kompensation bedarf.

4 Kennlinien von Drucksensoren

In den vorangegangenen Kapiteln wurde beschrieben, welche Probleme bei der Fertigung von Glasdrucksensoren zu lösen waren. Auch bei der Einführung der vom Ansatz her leichter zu fertigenden, neuen Drucksensorvariante mit Nickelkreisplatte ergaben sich anfänglich Schwierigkeiten. Zum Zeitpunkt der Aufnahme von Druckkennlinien standen daher keine vollkommen fehlerlos gefertigten Drucksensoren zur Verfügung. Die hier vorgestellten Kennlinien können dennoch einen Eindruck von den Eigenschaften der Drucksensoren vermitteln und erlauben Rückschlüsse zu deren weiteren Verbesserung.

4.1 Messaufbau

Mit dem in Bild 4.1-1 dargestellten Messaufbau wurden einige Kennlinien von Drucksensoren aufgenommen.

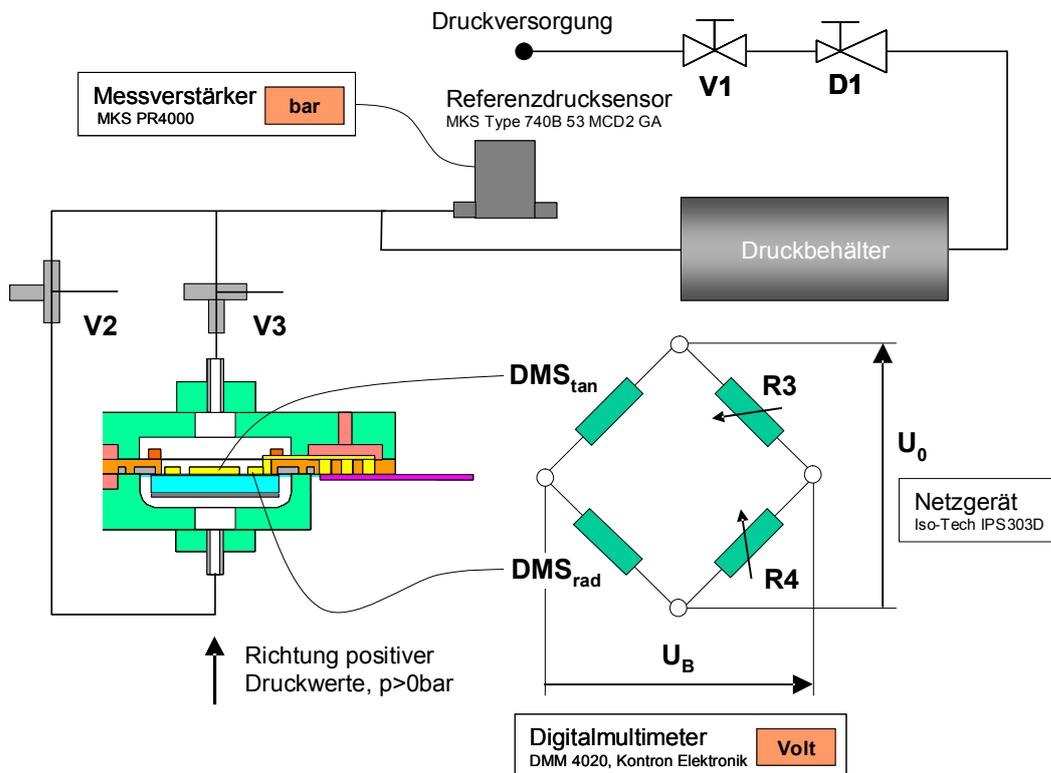


Bild 4.1-1: Messaufbau zur Aufnahme von Druckkennlinien.

Aus einer Leitung wurde durch Öffnen von Ventil V1 Druckluft entnommen. Mit Hilfe des Druckminderers D1 konnte ein Druck eingestellt werden. Ein großer Druckbehälter, mit ca. 30 Litern Inhalt, war dem Druckminderer nachgeschaltet. Mit Hilfe des Druckbehälters wurde das Luftvolumen im System vergrößert. Druckschwankungen im Messaufbau sollten dadurch minimiert werden. Der anliegende Druck wurde von einem Referenzdrucksensor mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ gemessen und an einem Messverstärker angezeigt. Mit Hilfe der 3-Wege-Ventile V2 und V3 konnte wahlweise auf der einen oder der anderen Seite des Sensors Druck angelegt werden. V3 ist in Bild 4.1-1 zur Druckleitung hin gesperrt und zur Umgebung hin geöffnet. V2 lässt Druckluft zum in der Skizze unteren Anschluss des Drucksensors durch. Die Richtung des anliegenden Drucks ist in Bild 4.1-1 mit einem Pfeil gekennzeichnet. Als positiver Druck, $p > 0$ bar, wurde beim Glasdrucksensor ein Überdruck definiert, der in der Kammerhälfte des Drucksensors anliegt, in welcher der Flüssigkeitsdruck mikrofluidischer Systeme gemessen werden soll. Dies war bei den Glasdrucksensoren ein Druck in Richtung des großen Gehäusenutzens. Letztere Druckrichtung wurde auch für Nickel-drucksensoren als positiv beibehalten. Die DMS-Halbbrücke in den Drucksensoren wurde mit Hilfe von zwei stufenlos im Bereich von 0–20 k Ω einstellbaren passiven Widerständen R3 und R4 zu einer Widerstandsbrückenschaltung ergänzt. Zu Beginn jeder

Serie von Messungen wurde bei 0 bar und einer Versorgungsspannung U_0 von 5 V mit den verstellbaren Widerständen R3 und R4 eine Brückenspannung U_B im Bereich von ± 3 mV eingestellt. Eine Abgleich auf exakt 0 mV war mit den mechanisch verstellbaren Widerständen nicht möglich. Die Kennlinien in den folgenden Diagrammen wurden mathematisch auf 0 mV verschoben.

4.2 Kennlinien von Glasdrucksensoren

Nach der Aufnahme von Kennlinien wurden die Sensoren untersucht. In diesem Kapitel wird zunächst kurz auf die hierbei festgestellten Fehler der verwendeten Glasdrucksensoren eingegangen. Ein Messer wurde in der Klebefuge eines Sensors angesetzt, um eine der Gehäusehälften von der PI-Membran abzulösen. Die Bilder 4.2-1 und 4.2-2 zeigen die Gehäusehälften des geöffneten Glasdrucksensors S6, N89.

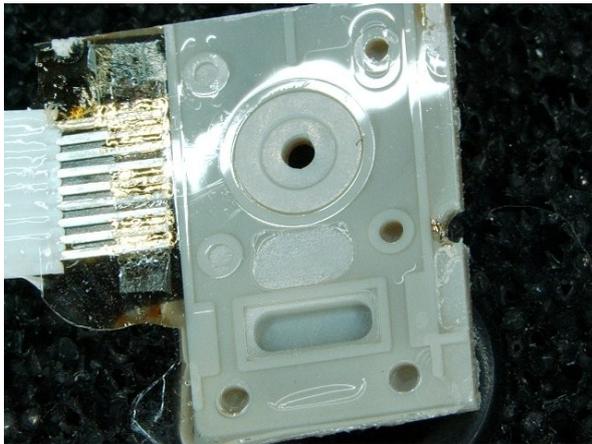


Bild 4.2-1: Zweite Gehäusehälfte des geöffneten Glasdrucksensors S6, N89.

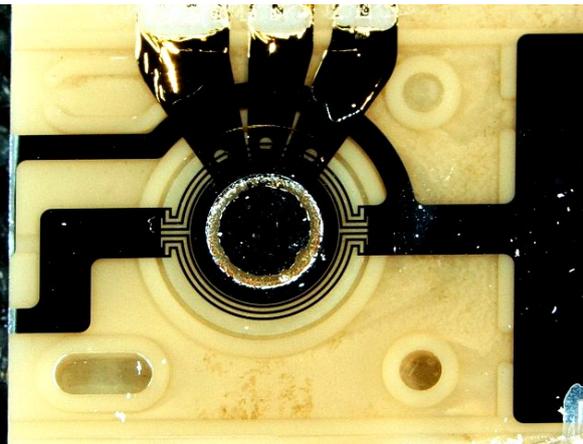


Bild 4.2-2: Erste Gehäusehälfte des geöffneten Glasdrucksensors S6, N89. Die Glaskreisplatte war stark unterätzt (transparenter Ring der Kreisplatte).

Der Klebstoff haftete sehr gut auf den Gehäusehälften aus PEEK. Sehr gering war dagegen die Haftung des Klebstoffs der zweiten Gehäusehälfte auf der PI-Trägermembran. Die PI-Membran hatte sich sauber vom Klebstoff, welcher als glänzende Fläche in Bild 4.2-1 gut erkennbar ist, abgelöst. Auf der ersten Gehäusehälfte haftete die PI-Membran dagegen wie erwartet gut (Bild 4.2-2). Beide Kammerklebungen wurden mit EPO-TEK 301 durchgeführt. Beim Flusssäureätzen, wenn das Glassubstrat bis auf die Kreisplatten aufgelöst ist, kommt die PI-Membran mit der Flusssäure in Kontakt. Eventuell wurde die Oberfläche der PI-Trägermembran von der Flusssäure chemisch so verändert, dass die Haftung nachfolgender Klebungen mit Epoxidklebstoff auf deren Oberfläche gering war. Auch möglich wäre, dass die PI-Trägermembran nach dem Spülen und Trocknen noch Feuchtigkeit enthielt, welche die Haftung verhindert haben könnte. Letztere Hypothese ist andererseits weniger wahrscheinlich, da der große Gehäusenutzen nach dem Flusssäureätzen und Spülen 1 h lang in einem Ofen bei 100 °C getrocknet worden war.

Weiterhin waren die Glaskreisplatten am Rand stark unterätzt. Die zur Maskierung der Kreisplatten aus Glas beim Flusssäureätzen anfänglich verwendete Chromschicht war, wie in Kapitel 2.10 ausführlich beschrieben wurde, nicht ausreichend. Zu erkennen ist die starke Unterätzung der Kreisplatten in Bild 4.2-2 an dem breiten, transparenten Ring am Rand der Kreisplatte. Eine gute Beweglichkeit der an der PI-Trägermembran aufgehängten Kreisplatte wurde mit einer Pinzette durch Antasten bestätigt. Aus den Bildern 4.2-1 sowie 4.2-3 geht außerdem hervor, dass die Kammerklebungen gelungen waren, d. h. Klebstoff war nicht in die Sensorkammer übergetreten.

Bild 4.2-3 zeigt die Rückseite, d. h. die DMS-Seite, der Kreisplatte. Die Position des PI-Rings auf der Kreisplatte sowie die DMS waren fehlerfrei. In Bild 4.2-4 sind die DMS auf einer Glaskreisplatte vergrößert dargestellt. Der stark unterätzte Rand der Kreisplatte, in den

Bildern 4.2-3 und 4.3-4 auf der Rückseite der Kreisplatte, ist wiederum als transparenter Ring mit weiß glänzenden Stellen innerhalb des PI-Rings gut erkennbar.

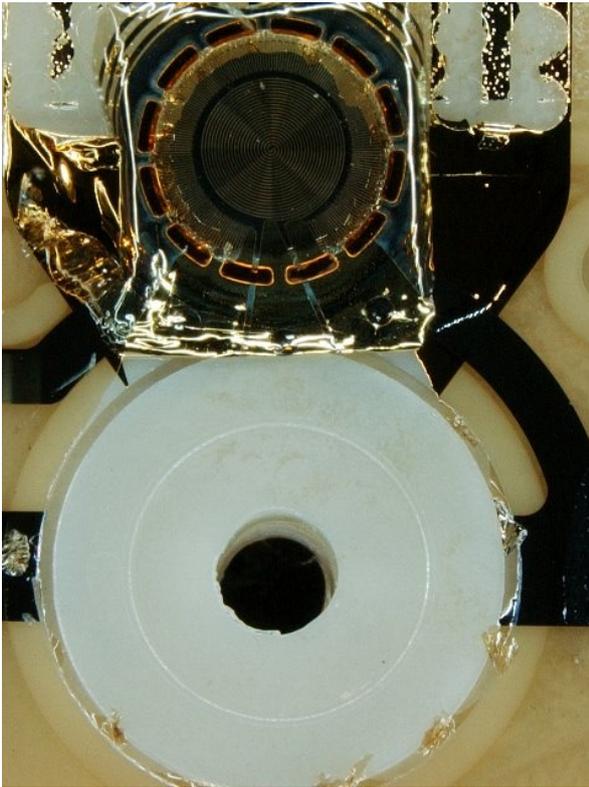


Bild 4.2-3: Erste Gehäusehälfte des geöffneten Glasdrucksensors S6, N89. Die Kreisplatte wurde umgedreht.



Bild 4.2-4: Blick auf die DMS-Seite der Kreisplatte von Sensor S10, N74.

Als weiterer Fehler kam hinzu, dass die DMS abweichend vom vorgesehenen Aufbau nicht direkt auf der Kreisplatte aufgebracht waren (Bild 4.2-5) sondern auf der PI-Trägermembran, welche die Kreisplatte vollständig überzog (Bild 4.2-6).

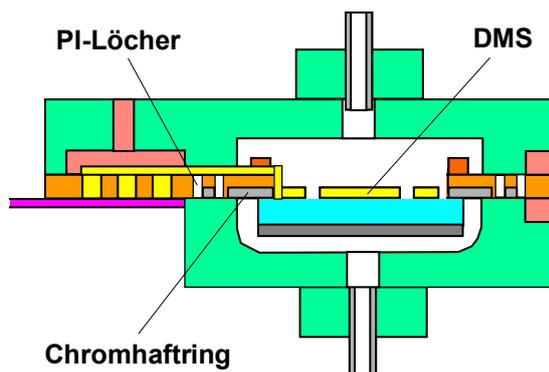


Bild 4.2-5: Vorgesehener Aufbau des Glasdrucksensors wie in [Wulf01]. Die DMS sind direkt auf der Kreisplatte aufgedampft.

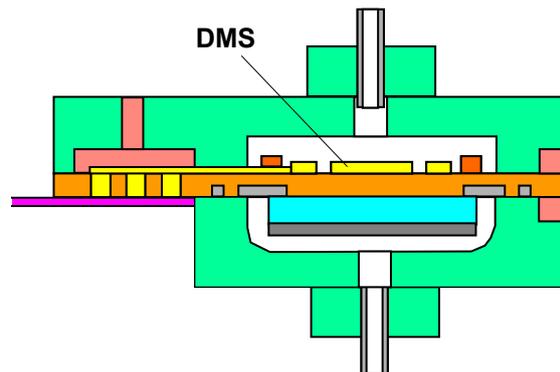


Bild 4.2-6: Aufbau des Glasdrucksensors S6, N89. Zwischen Kreisplatte und den DMS befindet sich die Trägermembran.

Die ursprüngliche Absicht des geänderten Aufbaus war, die PI-Löcher, die zum Heizelementschweißen vorgesehen waren, zu beseitigen. Da das Abdichten der Sensorkammer durch Umschweißen nicht mehr angestrebt wurde, hätten die PI-Löcher eine Undichtigkeit einer Kammerhälfte gegenüber der anderen bedeutet. Die zur Verfügung stehende Maske ohne PI-Löcher hatte den Nachteil, dass die PI-Membran in der Mitte der Kreisplatte nicht ausgespart wurde.

Mit einer ‚Kennlinie‘ sei im Folgenden eine Druck-Signal-Kurve ohne Druckwechsel gemeint, d. h. zur Aufnahme einer Kennlinie wurde der Druck ausgehend von 0 bar in eine positive

oder negative Druckrichtung schrittweise gesteigert und wieder bis auf 0 bar zurückgenommen. Bild 4.2-7 zeigt die Kennlinien des Glasdruckensors S1, N74. Weitere Kenndaten des Sensors befinden sich im Anhang, [Tabelle 7.7-1](#).

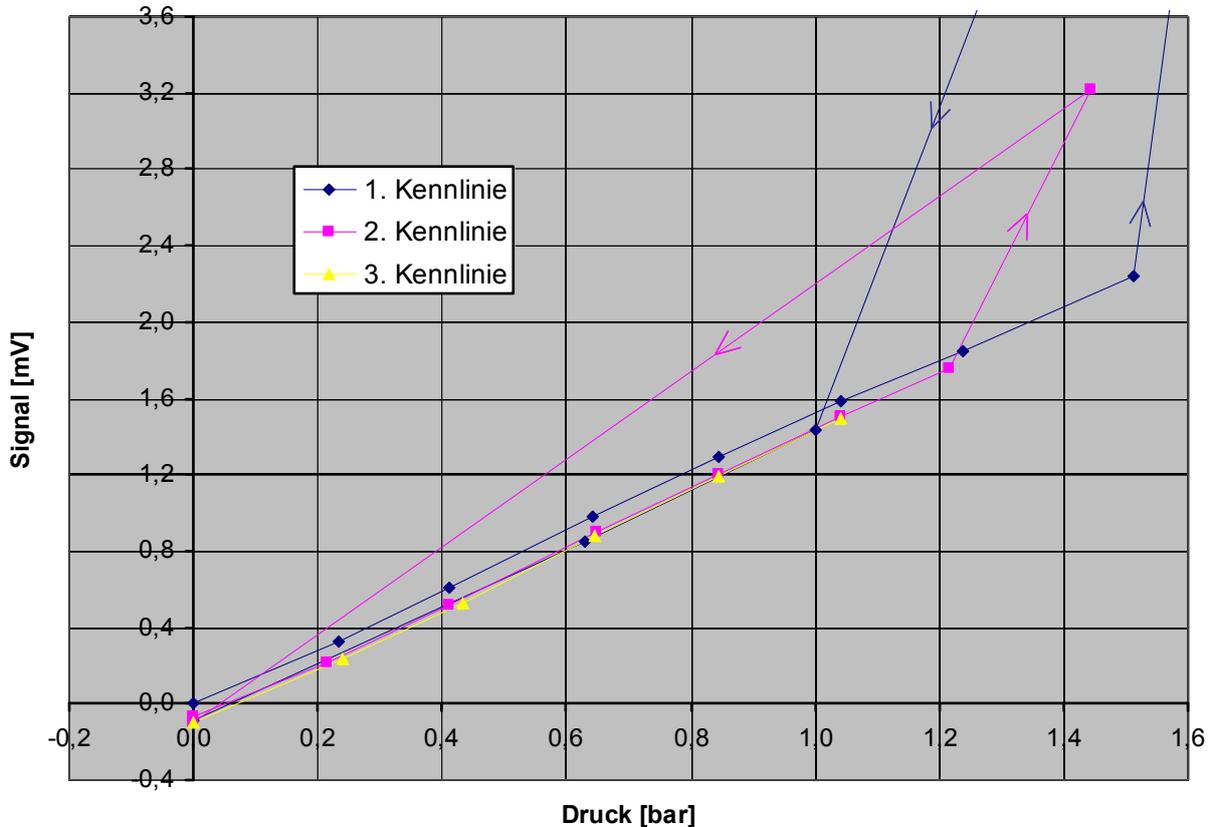


Bild 4.2-7: Drei Kennlinien des Glasdruckensors S1, N74.

Die Kennlinie 1 des Druckensors besaß anfänglich eine sehr konstante Steigung, knickte jedoch bei 1,5 bar nach oben ab. Sogar ohne weitere Druckerhöhung stieg das Sensorsignal weiter an. Dies ließ auf einen Kriecheffekt schließen. Die PI-Membran unter den DMS löste sich wahrscheinlich immer weiter von der Kreisplatte ab. Da PI zur Haftung auf Glas einen Haftvermittler wie Chrom benötigt, konnte die PI-Membran in der Mitte der Kreisplatte kaum Haftung haben. Im Aufbau nach [\[Wulf01\]](#), s. [Bild 4.2-5](#), reicht die PI-Membran nur bis über den Randbereich der Kreisplatte und ist dort über einen Chromhafring mit der Kreisplatte verbunden. Die DMS befinden sich ohne PI-Zwischenschicht unmittelbar auf der Glaskreisplatte.

Bei Rücknahme des Drucks ging das Sensorsignal bei 1 bar wieder auf die anfänglich lineare Kennlinie zurück und verlief bis 0 bar weiterhin linear. In Kennlinie 2 wurde das Kriechen bereits ab 1,2 bar beobachtet. Anlegen von negativem Druck erbrachte kein Signal, weil die Kante der Kreisplatte, die in der Verrundung der zylindrischen Kammerhälfte hätte aufsetzen sollen, durch die Unterätzung auf einen kleineren Durchmesser zurückgesetzt war. Die Kreisplatte konnte sich daher ohne Durchbiegung auf den Boden der zylindrischen Kammerhälfte legen. Da eine Unterätzung der Kreisplatte von mindestens 50 µm bei allen Glasdruckensoren vorlag, konnte mehrfach beobachtet werden, dass in der negativen Druckrichtung kein Signal zu erhalten war.

Kennlinien in positiver Druckrichtung verliefen bei anderen Glasdrucksensoren auch bereits bei kleinen Drücken nicht linear wie Bild 4.2-8 zeigt. Beide Kennlinien zeigten eine Hysterese bei 0 bar. Der Nullpunkt hatte sich nach Kennlinie 1 um $-0,36$ mV und nach Kennlinie 2 um $-0,1$ mV gegenüber dem Ausgangswert verschoben, was ebenfalls mit dem vermuteten Kriecheffekt zu tun haben könnte. Am Ende von Kennlinie 1 ging das erhöhte Nullsignal mit der Zeit auf ca. 0 mV zurück.

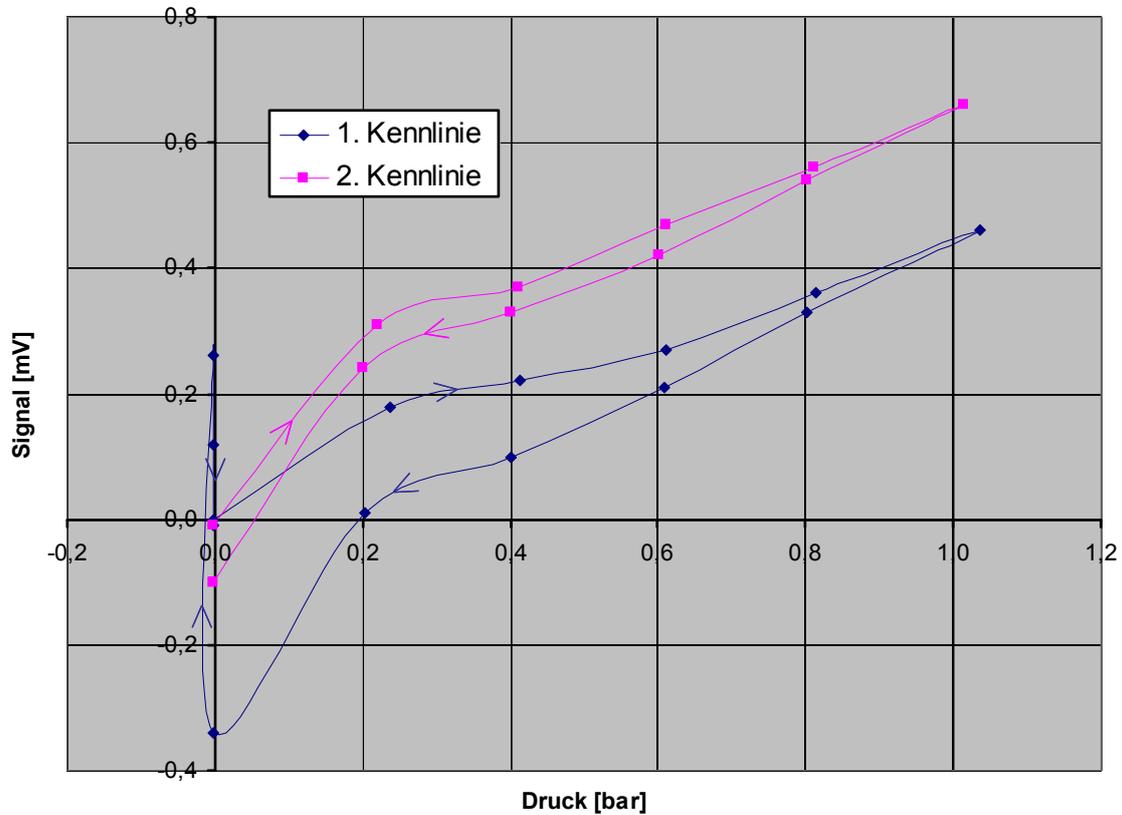


Bild 4.2-8: Zwei Kennlinien des Glasdrucksensors S9, N89. Weitere Kenndaten des Sensors enthält [Tabelle 7.7-2](#) im Anhang.

4.3 Kennlinien von Nickeldrucksensoren

Bild 4.3-1 zeigt Kennlinien des Nickeldrucksensors S4, N2790.

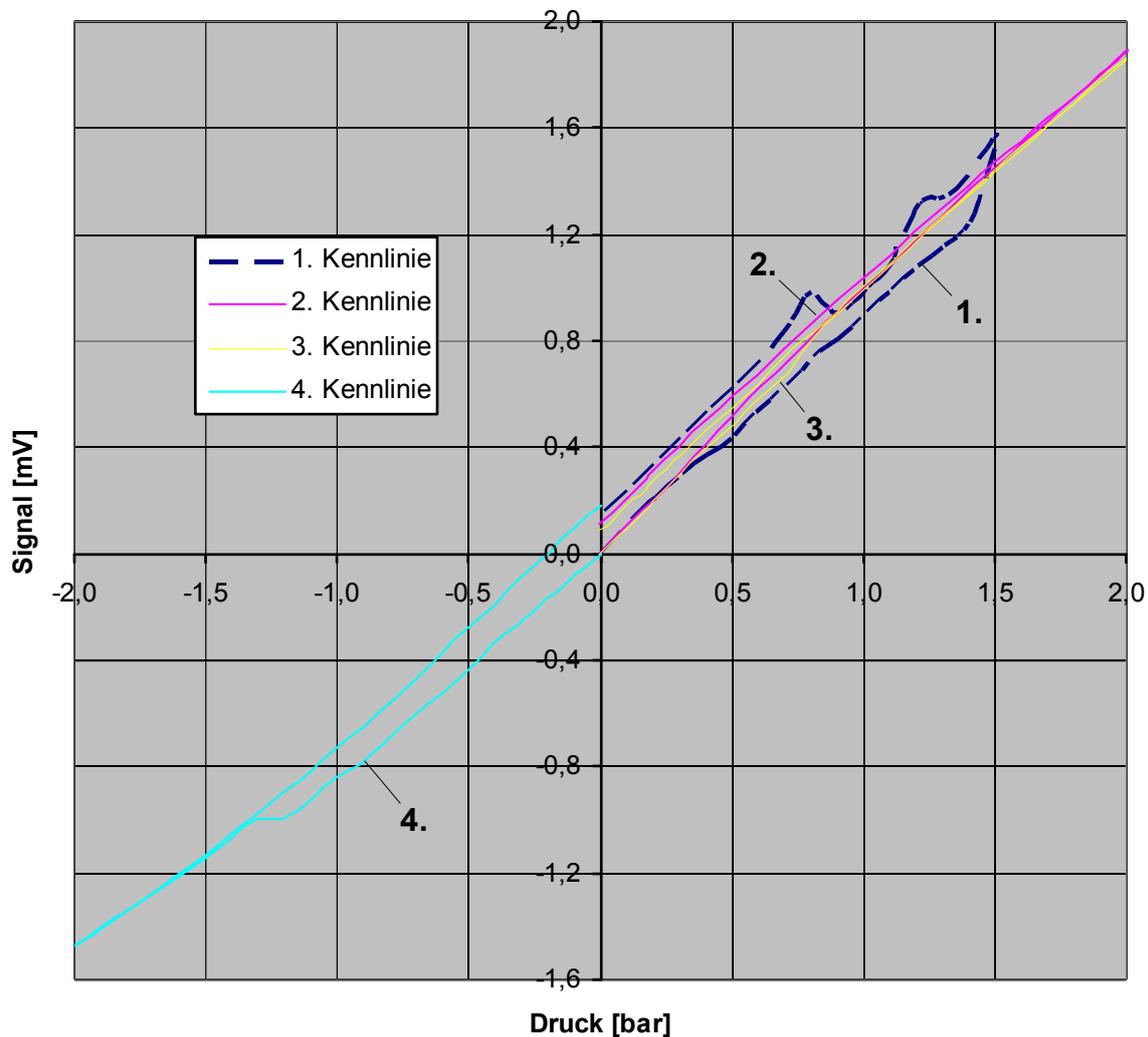


Bild 4.3-1: Mehrfache Aufnahme einer Druckkennlinie am Nickeldrucksensor S4, N2790.

Die Sensorkammer des Nickeldrucksensors war kugelschalenförmig, da die Kammerhälften der Gehäusenutzen mit einem Kugelfräser mit Radius R6 nachgefräst worden waren. Leider war die Fräsung nicht in allen Fällen tief genug erfolgt, so dass die Kammerhälften nicht vollständig ausgefräst waren und ein Rest der alten Kammerform als kreisförmige und eventuell störende Rille zurückgeblieben war. Die DMS bestanden aus 200 nm Gold. Weitere Angaben zum Nickeldrucksensor sind im Anhang, [Tabelle 7.7-3](#) enthalten.

Vor Beginn der Messungen wurde die Brückenschaltung abgeglichen. Der Abgleich wurde bis zur Aufnahme der letzten Kennlinie, d. h. Kennlinie 8, nicht mehr verändert. Bild 4.3-2 enthält die erste Kennlinie des Nickeldrucksensors S4, N2790 und die daraus abgeleiteten Kurven der Linearitäts- und Hysteresefehler.

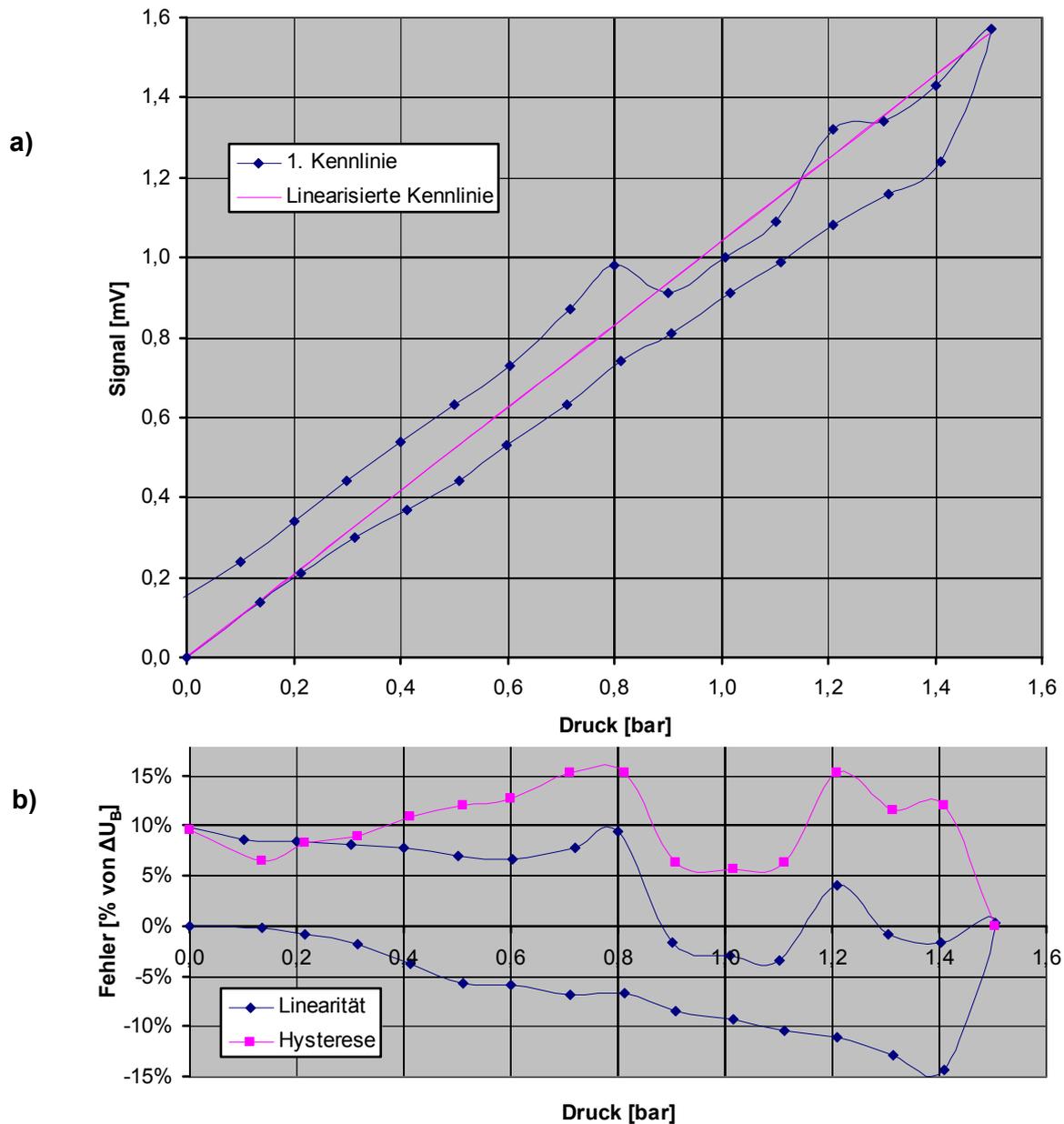


Bild 4.3-2: a) Erste Kennlinie des Nickeldrucksensor S4, N2790. b) Abgeleitete Kurven der Linearitäts- und Hysteresefehler.

Die linearisierte Kennlinie in Bild 4.3-2 a) ist mit der 2-Punkt-Methode erstellt worden, d. h. die Punkte des minimalen und maximalen Druckwerts wurden mit einer Gerade verbunden. Die Linearitäts- und Hysteresefehler sind als Abweichungen von der linearisierten Kennlinie berechnet worden (Anhang, Bild 7.7-1). Es ist erkennbar, dass der Sensor sehr große Linearitäts- und Hysteresefehler aufwies. Der maximale Linearitätsfehler lag in der ersten Messung bei -15%, der maximale Hysteresefehler bei ca. 16%.

In Kennlinie 2 verbesserten sich die Linearitätsfehler stark und ein weiteres Mal geringfügig bei der Aufnahme der dritten Kennlinie, die in Bild 4.3-3 a) abgebildet ist. Die größten Linearitäts- und Hysteresefehler der dritten Kennlinie traten bei 0 bar auf und betrugen jeweils ca. 5 % (Bild 4.3-3 b)).

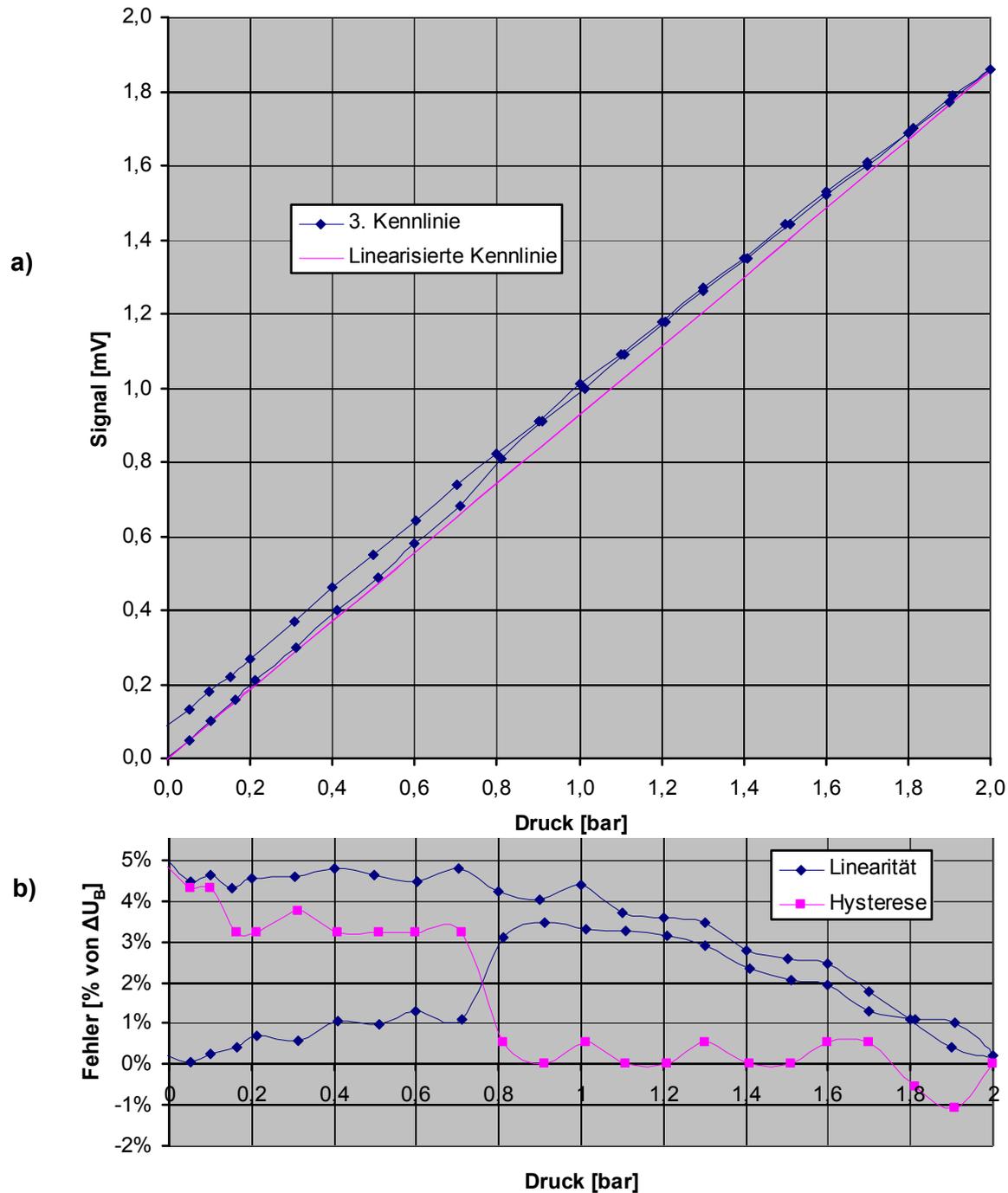


Bild 4.3-3: a) Dritte Kennlinie des Nickeldrucksensors S4, N2790. b) Abgeleitete Kurven der Linearitäts- und Hysteresefehler.

Bei der vierten Kennlinie wurde ein negativer Druck angelegt, d. h. die Druckrichtung wurde gewechselt. Die vierte Kennlinie wies maximale Linearitäts- und Hysteresefehler von ungefähr 12 % auf.

Direkt nach der vierten Messung wurde ein Dauerdruckversuch gestartet. Bei angelegter Versorgungsspannung von 5 V wurde ein Druck von 1 bar über 6:03 Tage konstant gehalten. Das Signal wurde zu Beginn und am Ende des Versuchs gemessen und hatte sich um 8,8 % in Bezug auf die Signalspanne im Druckbereich 0 bis -2 bar verringert. Der Druck hatte in diesem Zeitraum jedoch nur um -0,2% abgenommen.

Nach dem Dauerversuch wurden im Wechsel Kennlinien mit positiven und negativen Drücken aufgenommen (Bild 4.3-4).

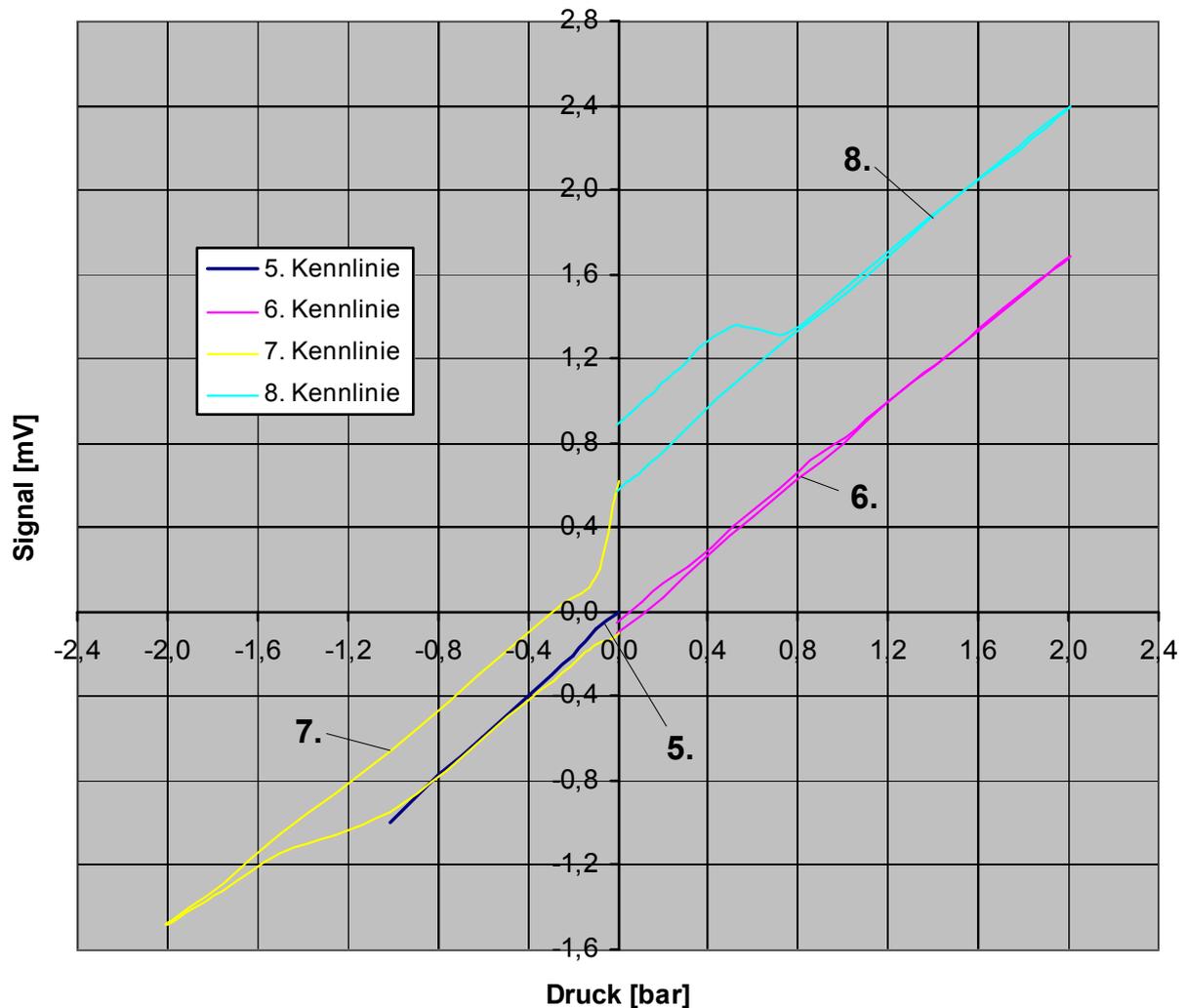


Bild 4.3-4: Kennlinien 5 bis 8 des Sensors S4, N2790 bei abwechselnd angelegten und schrittweise veränderten negativen und positiven Drücken.

Werden die Kennlinien 5 und 6 in Bild 4.3-4 als eine Kennlinie zusammengefasst und unabhängig von Kennlinie 7 und 8 betrachtet, so ergibt sich eine Kennlinie von -2 bis +2 bar mit einem Linearitätsfehler von 4 %. In den Kennlinien 7 und 8 traten dagegen große Linearitäts- und Hysteresefehler auf, die durch 'Knicke' in den Kennlinien, d. h. Bereiche mit stark abweichender Steigung, entstanden waren. Durch das mehrfache Abknicken der Kennlinien verschob sich der Nullpunkt des Drucksensors von 0 mV in Kennlinie 5 auf 0,89 mV in Kennlinie 8, was einer Drift des Nullpunkts von 28 % bezogen auf die Signalspanne im Druckbereich -2 bis +2 bar entspricht.

Weiterhin wurden die DMS-Widerstände sowie die Abgleichwiderstände vor und zwischen der Aufnahme der Kennlinien gemessen (Tabelle 4.3-1). Die DMS-Widerstände änderten sich nach den einzelnen Messungen, Messpausen und nach einem Dauerdruckversuch geringfügig und scheinbar unsystematisch. Z. B. nahm der Widerstand des Tangential-DMS zunächst von 820 Ω (Nr. 1) nach der Aufnahme von Kennlinie 1 auf 816 Ω (Nr. 7) ab. Nach Kennlinie 3 (Nr. 15) war der Widerstand des Tangential-DMS auf 823 Ω angestiegen. Um ähnliche Beträge in dieselbe Richtung änderte sich auch der Widerstand des Radial-DMS. Die DMS des Sensors bestanden aus 200 nm Gold. Eine Chromhaftschiicht ist bei der Herstellung des Sensors nicht verwendet worden, weil DMS in Nickeldrucksensoren vollständig zwischen zwei PI-Schichten eingebettet werden können. Es war daher nicht erforderlich, dass die DMS auf der ersten PI-Schicht besonders gut hafteten.

Nr.	Zeitpunkt der Messung	U_0	Druck	Signal real gemessen	R1 DMS _{tan}	R2 DMS _{rad}	R3	R4
		[V]	[bar]	[mV]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
1	Nach der Fertigung	0	0	—	820	849	—	—
2	Abgleich und Messung der Widerstände	5,000	0	2,47	819	848	966	999
3	Beginn Kennlinie 1	5,000	0	1,96	—	—	—	—
4	Kennlinie 1	5,000	positiv	—	—	—	—	—
5	Ende Kennlinie 1	5,000	-0,0058	1,81	—	—	—	—
6	Pause 18:13h	5,000	-0,0058	—	—	—	—	—
7	Messung der Widerstände	5,000	-0,0076	1,81	816	845	966	1002
8	Kennlinie 2	5,000	positiv	—	—	—	—	—
9	Ende Kennlinie 2	5,000	-0,0044	2,80	—	—	—	—
10	Anfang Pause 5:17h	5,000	-0,0044	2,78	—	—	—	—
11	Pause 5:17h	5,000	—	—	—	—	—	—
12	Beginn Kennlinie 3	5,000	-0,0042	2,79	—	—	—	—
13	Kennlinie 3	5,000	positiv	—	—	—	—	—
14	Ende Kennlinie 3	5,000	-0,0034	2,70	—	—	—	—
15	Messung der Widerstände	5,005	0	3,11	823	851	966	1006
16	Beginn der Kennlinie 4	5,005	-0,0036	3,06	—	—	—	—
17	Kennlinie 4	5,005	negativ	—	—	—	—	—
18	Ende der Kennlinie 4	5,005	-0,0026	2,88	—	—	—	—
19	Dauerversuch 6:03 Tage	5,005	-1,0124	3,79	—	—	—	—
20	Messung der Widerstände	5,001	-1,0104	3,66	819	847	966	1003
21	Beginn der Kennlinie 5	5,001	-1,014	7,15	—	—	—	—
22	Kennlinie 5	5,001	negativ	—	—	—	—	—
23	Ende Kennlinie 5	5,001	-0,0044	6,15	—	—	—	—
24	Beginn Kennlinie 6	5,001	-0,0046	6,20	—	—	—	—
25	Kennlinie 6	5,001	positiv	—	—	—	—	—
26	Ende Kennlinie 6	5,001	-0,0036	6,25	—	—	—	—
27	Beginn Kennlinie 7	5,001	-0,0038	6,25	—	—	—	—
28	Kennlinie 7	5,001	negativ	—	—	—	—	—
29	Ende Kennlinie 7	5,001	-0,0038	5,53	—	—	—	—
30	Beginn Kennlinie 8	5,001	-0,0042	5,58	—	—	—	—
31	Kennlinie 8	5,001	positiv	—	—	—	—	—
32	Ende Kennlinie 8	5,001	-0,0042	5,26	—	—	—	—
	Größte Differenz bis Nr. 15			1,30	7	6	0	7

Tabelle 4.3-1: Widerstandswerte der tangentialen und radialen DMS sowie der Abgleichwiderstände von Nickeldrucksensor S4, N2790 gemessen beim angegebenen Druck zu verschiedenen Zeitpunkten zwischen der Aufnahme von Kennlinien.

Gold hat einen relativen großen TKR von $40 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$. Mit Formel (4.1) wurde errechnet, dass die Widerstandsänderungen der DMS durch Temperaturschwankungen von ca. $\pm 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ im Messraum entstanden sein könnten.

$$(4.1) \quad R_{9,2} = R_{9,1} \cdot (1 + (92 - 91) \cdot TKR_{\text{Gold}})$$

In Halb- und Vollbrückenschaltungen werden temperaturbedingte Widerstandsänderungen vollständig kompensiert. Eine Auswirkung der Temperaturschwankungen des Messraums auf die gemessene Drift der Nullsignale in Tabelle 4.3-1 kann daher ausgeschlossen werden.

Eine DMS-Schaltung reagiert jedoch äußerst empfindlich auf die Änderung von nur einem der vier Brückenwiderstände. Demnach hätte z. B. die Änderung des Abgleichwiderstands R4 im Verlauf der Messungen eine große Wirkung auf das Nullsignal haben können, wie durch Einsetzen von Widerstandswerten der Brückenschaltung in die Formel (4.2) leicht nachvollzogen werden kann [Schr83].

$$(4.2) \quad \text{Signal} = U_0 \cdot \frac{(R_2 R_3 - R_1 R_4)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

Die maximale Differenz der Nullsignale bis Nr. 15 in Tabelle 4.3-1 beträgt 1,3 mV. Für dieses Signal wäre bereits eine Änderung eines der Brückenwiderstände um 1,1 Ω ausreichend gewesen. In zukünftigen Messungen sollten andere Abgleichwiderstände, z. B. auch feste Präzisionswiderstände, verwendet werden, die sich im Betrieb oder mit der Temperatur nicht ändern.

Wäre der Abgleichwiderstand R_4 mit 999 Ω konstant geblieben, hätte sich mit den gemessenen DMS-Widerständen eingesetzt in Formel (4.2) eine Änderung des Nullsignals von 1,83 mV ergeben. Dies deutet darauf hin, dass die Nullsignal drift während der Messungen weitere Ursachen als die Änderung des Abgleichwiderstands R_4 hatte. Es wäre z. B. möglich, dass die Nickelkreisplatte auf der Chrom-Gold-Galvanikstartschicht der PI-Trägermembran eine zu geringe Haftung hatte. In diesem Fall wären die Dehnungen der Kreisplatte nicht vollständig und damit undefiniert auf die PI-Membran und die DMS übertragen worden. Mit einem Klebefilm-Abziehtest auf Waferenebene könnte zukünftig die Haftung von galvanisch hergestellten Nickelstrukturen auf einer Chrom-Gold-Startschicht einer PI-Membran überprüft werden.

Möglich wäre auch, dass sich die PI-Trägermembran, an welcher die Kreisplatte aufgehängt war, unter Druckbelastung plastisch verformt hatte. Dadurch wären auch die Zuleitungen zu den DMS plastisch verformt worden und der Widerstand der Zuleitungen könnte sich erhöht haben. Durch Aufdampfen von dickeren Zuleitungen aus Gold, könnte eventuell eine Änderung der Zuleitungswiderstände auch bei plastischer Verformung der PI-Trägermembran verhindert werden.

Als weitere Möglichkeit für die Nullsignal drift während der Messungen wird in Betracht gezogen, dass sich die Kreisplatte unter der Druckbelastung plastisch verformt haben könnte. Die berechneten maximalen Tangential- und Radialspannungen in der 38 μm dicken Kreisplatte bei 2 bar betragen 187 N/mm². Die Dehngrenze $R_{p0,2}$ von galvanisch hergestellten Nickelstrukturen liegt abhängig von der verwendeten Stromdichte jedoch zwischen 450 bis 995 N/mm² [Frit02]. Eine plastische Verformung der Nickelkreisplatten kann daher ausgeschlossen werden.

Werden die maximalen Brückenspannungswerte der einzelnen Kennlinien von Nickeldrucksensor S4, N2790 bezogen auf die Versorgungsspannung U_0 , so ergeben sich daraus die Signalwerte der Drucksensoren in mV/V, auch Empfindlichkeit genannt, die in Tabelle 4.3-2 aufgeführt sind. Als Empfindlichkeit des Nickeldrucksensors muss die

Kennlinie	Empfindlichkeit 0 bis 2bar	Signal 0 bis -2bar
	[mV/V]	[mV/V]
1	0,415	—
2	0,375	—
3	0,371	—
4	—	-0,294
5	—	-0,394
6	0,346	—
7	—	-0,274
8	0,364	—
Mittelwert	0,374	-0,321

Tabelle 4.3-2: Empfindlichkeiten bei 2 bar abgeleitet aus den Kennlinien des Nickeldrucksensors S4, N2790.

Empfindlichkeit einer Kennlinie herangezogen werden, die eine gute Linearität aufwies. Hierfür könnte z. B. Kennlinie 6 verwendet werden. Die Empfindlichkeit lag folglich vermutlich bei ca. 0,346 mV/V für den Nenndruck 2 bar. Für Dünnsensoren ist dies ein sehr geringer Wert. Übliche Signalwerte von Dünnsensoren oder Folien-DMS-Drucksensoren liegen bei 1–4 mV/V [Trän98].

Als weiterer Drucksensor desselben Nutzens wurde S9 untersucht (Bild 4.3-5).

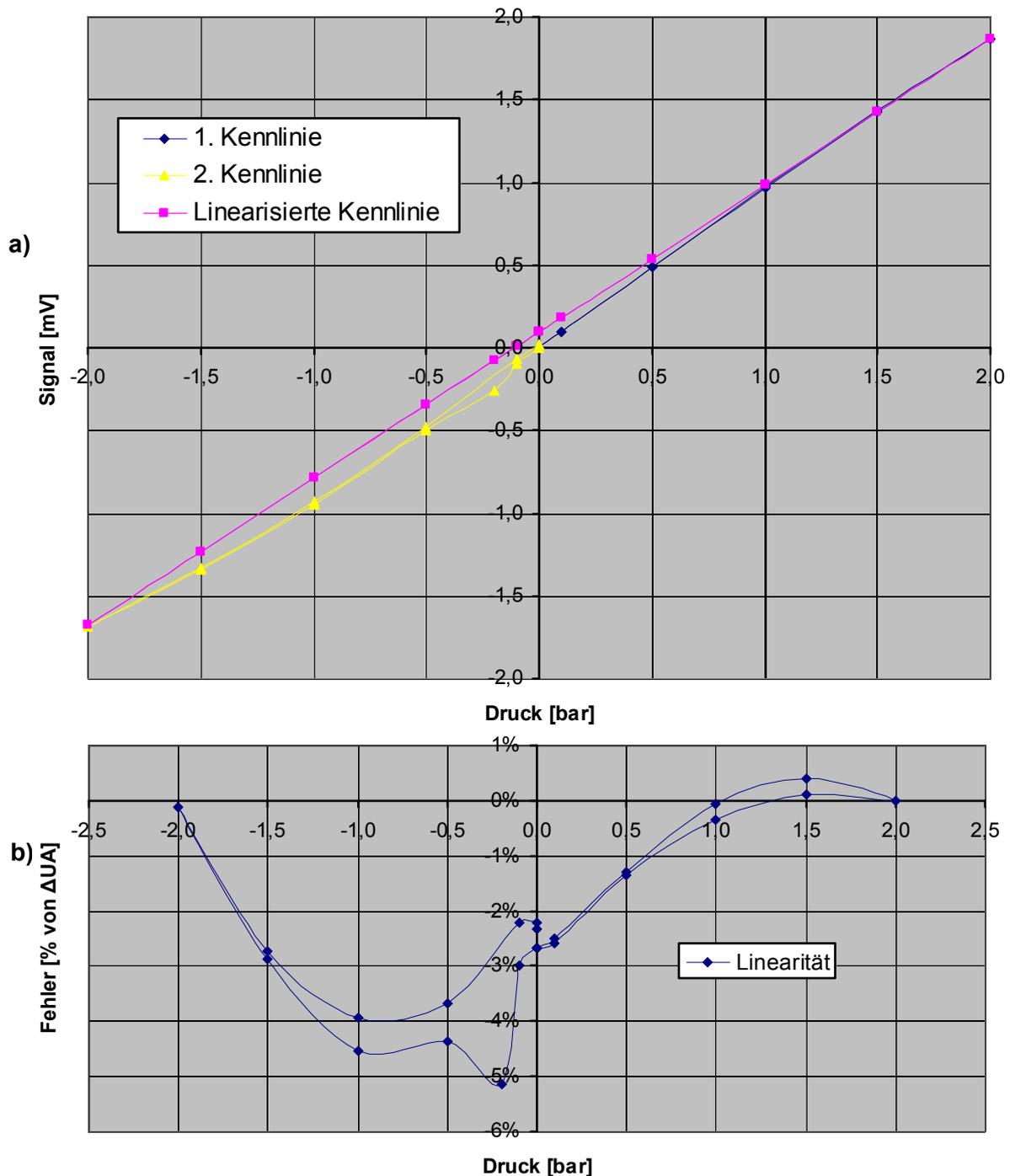


Bild 4.3-5: a) Kennlinien 1 und 2 des Nickeldrucksensors S9, N2790. b) Kurve der Linearitätsfehler.

Die Linearität dieses Sensors war wiederum um 0 bar sehr schlecht und lag bei 5 %. Als Empfindlichkeit beim Nenndruck 2 bar können 0,355 mV/V abgeleitet werden.

Bei allen untersuchten Sensoren wurde ein starkes Signalrauschen festgestellt. Das Signalrauschen war sowohl bei den Glasdrucksensoren als auch den Nickeldrucksensoren zu beobachten. Die zweite und dritte Stelle des Sensorsignals war ständig in Bewegung. Das Ablesen eines bestimmten Signals wurde durch das Signalrauschen sehr erschwert und führte sicherlich zu ungenau aufgenommenen Kennlinien.

Signalrauschen entsteht u. a. durch die elektromagnetische Störstrahlung der Umgebung, die von den elektrischen Leitungen des Messaufbaus, die wie Antennen wirken, eingefangen werden. Die Störsignale können insbesondere kleine Messsignale, wie bei den vorliegenden

Drucksensoren, deutlich überlagern. Am Sensor S9, N2790 wurde das Signalrauschen näher untersucht, indem bei einem anliegenden Druck von -1,5 bar und einer Versorgungsspannung U_0 von 5 V innerhalb von einer Minute die Extremwerte des Spannungssignals notiert wurden (Tabelle 4.3-3).

Nr.	Zeit [sek]	Druck [bar]	Signal [mV]			
1	0sek	-1,5	-1,332		Signal	
2	—	-1,5	-1,327	Minimum	-1,386	mV
3	—	-1,5	-1,324	Maximum	-1,318	mV
4	—	-1,5	-1,318	Differenz	0,068	mV
5	60sek	-1,5	-1,386	Differenz	-5,11%	

Tabelle 4.3-3: Signal-Extremwerte gemessen bei anliegenden -1,5 bar an Sensor S9, N2790 während eines Zeitraums von 1 Minute.

Innerhalb dieses Zeitraums war zu beobachten, dass die Signalwerte abwechselnd mal nach oben und mal nach unten drifteten. Wie die Tabelle zeigt, wichen die innerhalb einer Minute notierten Signalwerte um maximal 5,11 % voneinander ab.

Würde das Sensorsignal in unmittelbarer Nähe des Sensors mit Hilfe einer elektronischen Schaltung verstärkt, könnte das Signalrauschen vermindert werden. Relativ zum einem verstärkten Sensorsignal wären Störsignale, die in die Kabel zwischen Sensor und Voltmeter einkoppeln, vernachlässigbar.

Beim Öffnen von Nickeldrucksensoren war aufgefallen, dass, wie bei den Glasdrucksensoren, die zweite Kammerklebung schlecht auf der PI-Trägermembran bzw. auf der Galvanikstartschicht (15 nm Chrom, 60 nm Gold) der PI-Trägermembran haftete. Die Goldschicht löste sich rückstandsfrei von dem Klebstoff EPO-TEK 301 ab. Eventuell hat der Klebstoff generell eine schlechte Haftung auf Gold.

5 Analyse der Drucksensoren und Verbesserungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel wird mit analytischen Formeln eine Optimierung der DMS vorgenommen. In weiteren Abschnitten werden Nachteile der Drucksensoren aufgezeigt und Verbesserungsmöglichkeiten genannt.

5.1 Optimierung der DMS

Kommerziell erhältliche Dünnschichtdrucksensoren mit DMS in Vollbrückenschaltung liefern ein Nennsignal von z. B. 2,0–6,0 mV/V [STW05]. Im Vergleich dazu erscheinen die an den Drucksensoren dieser Arbeit gemessenen 0,37 mV/V sehr gering. Die in [Wulf01] ausgelegte DMS-Halbbrücke der Drucksensoren kann jedoch weiter verbessert werden. Für zukünftige Drucksensoren wurde deshalb eine neue DMS-Auslegung vorgenommen. Zunächst werden theoretische Grundlagen aufgeführt.

5.1.1 Theoretische Grundlagen zur DMS-Auslegung

5.1.1.1 Empfindlichkeit

Als Empfindlichkeit oder Signal eines DMS wird das Verhältnis aus der Widerstandsänderung dR/R des DMS zur einwirkenden Dehnung ε bezeichnet, welche die Widerstandsänderung hervorruft. Die Empfindlichkeit eines DMS wird auch als k-Faktor bezeichnet.

$$(5.1) \quad k = \frac{dR/R}{\varepsilon}$$

Herleiten lässt sich der k-Faktor aus der Definition des Widerstands eines elektrischen Leiters.

$$(5.2) \quad R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

ρ Spezifischer Widerstand

l Länge

A Querschnitt

Die Widerstandsänderung erhält man durch partielle Ableitung von Gleichung (5.2).

$$(5.3) \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Wird ein rechteckiger Querschnitt des elektrischen Leiters angenommen mit der Breite b und der Höhe h , dann kann $\Delta A/A$ geschrieben werden als:

$$(5.4) \quad \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h}$$

k-Faktoren von DMS-Werkstoffen wurden experimentell durch Zugversuche an dünnen Drähten ermittelt. Eine Vielzahl solcher Versuche wurde beispielsweise von Czerlinsky [Czer38] und Kammer [Kamm49] durchgeführt. Für die weitere Herleitung des k-Faktors ist es deshalb richtig, von einer einachsigen Zugbelastung des elektrischen Leiters in Längsrichtung auszugehen. Durch diese Belastung nimmt die Länge l des elektrischen Leiters um Δl zu. Gleichzeitig zieht sich der Querschnitt des Leiters zusammen. Der Zusammenhang zwischen der Längs- und der Querdehnung wird mit der Querdehnungszahl μ ausgedrückt.

$$(5.5) \quad \frac{\Delta l}{l} \cdot \mu = -\frac{\Delta b}{b} = -\frac{\Delta h}{h}$$

Mit (5.5) und (5.4) eingesetzt in (5.3) ergibt sich:

$$(5.6) \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2\mu \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Setzt man nun für die Längsdehnung $\varepsilon = \Delta l / l$ ein und formt (5.6) weiter um, so folgt:

$$(5.7) \quad \frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot \left(\frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon} + 1 + 2\mu \right)$$

Der Ausdruck in Klammern in (5.7) wird als der k-Faktor bezeichnet.

$$(5.8) \quad \frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad \text{mit} \quad k = \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon} + 1 + 2\mu$$

Nachfolgend werden einige interessante Zusammenhänge in Bezug auf den k-Faktor von DMS-Werkstoffen genannt. Vorab sei darauf hingewiesen, dass Kreisplatten und DMS in Drucksensoren im Betrieb nur elastisch verformt werden dürfen. Für die Auslegung von DMS für Drucksensoren werden daher nur die k-Faktoren des elastischen Verformungsbereichs benötigt.

Der DMS-Werkstoff Konstantan weist sowohl im Bereich elastischer als auch plastischer Verformung einen k-Faktor von 2 auf. Das liegt daran, dass die Querdehnung im elastischen Bereich bei $\mu = 0,3$ und die Änderung des spezifischen Widerstands $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ zur Dehnung ε

ungefähr bei 0,4 liegt [Schi92]. Die Änderung des spezifischen Widerstands im elastischen Bereich ergibt sich dadurch, dass die Gitterstruktur kristalliner Werkstoffe bei elastischer Verformung verzerrt wird. Dagegen entstehen plastische Verformungen durch Gleitbewegungen, welche die Kristallstruktur weitgehend unverändert lassen, so dass im plastischen Verformungsbereich die Änderung des spezifischen Widerstands der meisten Metalle zu null wird. Das Volumen bleibt im plastischen Bereich konstant, was gleichbedeutend ist mit einem Querdehnungsfaktor $\mu = 0,5$. Insgesamt ergibt sich daher für Konstantan auch im plastischen Bereich ein k-Faktor von 2 [Hero92]. Aus demselben Grund wie bei Konstantan ergibt sich für die meisten Metalle und Legierungen im plastischen Verformungsbereich ein k-Faktor von 2 [Bert59]. Jedoch besitzen die meisten DMS-Werkstoffe im elastischen Verformungsbereich, anders als Konstantan, einen von 2 abweichenden k-Faktor.

5.1.1.2 Einfluss der Querdehnung

k-Faktoren für DMS-Werkstoffe wurden wie beschrieben durch einachsige Zugversuche an Drähten ermittelt. Auf Oberflächen von druckbeaufschlagten Kreisplatten, auf denen DMS aufgebracht sind, bildet sich jedoch kein einachsiger sondern ein zweiachsiger Spannungszustand aus. Ein Messgittersteg¹² (Anhang, Bilder 7.8-1 und 7.8-2) auf einer Kreisplatte wird also nicht nur in Längsrichtung sondern auch quer dazu gedehnt, was eine andere Widerstandsänderung des Gitterstegs zur Folge hat als die im einachsigen Zugversuch gemessene. Eine Widerstandsänderung aufgrund eines zweiachsigen Spannungszustands kann also mit einem k-Faktor nicht exakt vorhergesagt werden, da der k-Faktor in einem einachsigen Zugversuch ermittelt worden ist. Wie groß der Einfluss der Querdehnung wirklich ist und ob die Querdehnung bei der Auslegung von DMS berücksichtigt werden muss, wird an zwei Beispielen erläutert.

Der k-Faktor von Folien-DMS wird durch einen international genormten Versuch ermittelt [Keil95]. Der Folien-DMS wird hierzu auf einen Biegebalken aufgebracht, auf dessen Oberfläche ein einachsiger Spannungszustand erzeugt wird. Die Querdehnungszahl des Biegebalken-Werkstoffs beträgt $\mu = 0,285$. Der Folien-DMS nimmt im Versuch die Dehnung

¹² Messgitter = DMS, Messgittersteg = Einzelne Leiterbahn eines DMS

der Balkenoberfläche auf und wird dabei in Messrichtung um ε_l gedehnt. Gleichzeitig erfährt der Folien-DMS eine Querdehnung von $\varepsilon_q = -0,285 * \varepsilon_l$. Wenn der Folien-DMS eine Querdehnungsempfindlichkeit besitzt, dann gilt der so ermittelte k-Faktor für diesen Folien-DMS nur unter den im Versuch gegebenen Bedingungen. Wird der Folien-DMS auf eine Bauteiloberfläche aufgebracht, in welcher der Spannungszustand zweiachsig ist, oder wenn die Querdehnung des Bauteilwerkstoffs von $-0,285 * \varepsilon_l$ abweicht, dann stimmt der k-Faktor für diesen Anwendungsfall nicht, so dass die Dehnungsmessung mit dem Folien-DMS nicht exakt sein kann. Um den Einfluss der Querdehnung auf das Ausgangssignal von Folien-DMS zu berücksichtigen, wurde in der VDI/VDE-Richtlinie 2635 [VDI74] die Querempfindlichkeit q des Streifens definiert:

$$(5.9) \quad q = \frac{k_q}{k_l}$$

Dabei bedeutet k_q die Dehnungsempfindlichkeit des DMS in Querrichtung und k_l in Längsrichtung. Umlenkstellen von DMS-Gittern (Bild 7.8-2) können so gestaltet werden, dass die Querempfindlichkeit des Messgitters verschwindet. Die Enden der einzelnen Stege des Messgitters werden hierzu in Form breiter Querverbindungen gestaltet, die bei positiver Querdehnung eine Widerstandszunahme bewirken. Diese positive Widerstandsänderung kompensiert ganz oder teilweise die negative Widerstandsänderung, die durch eine Querdehnung an den einzelnen Strängen des Messgitters bewirkt wird (Anhang, Bild 7.8-3). Da die Umlenkstellen und die Stege des Messgitters gegensätzliche Widerstandsänderungen hervorbringen, ergibt sich abhängig von der Gitterlänge eine geringe Querempfindlichkeit. In Messgittern mit langen Gitterstegen überwiegt der Einfluss der Gitterstege und die Querempfindlichkeit wird negativ. Bei kurzen Gitterstegen überwiegt der Einfluss der Umlenkstellen und man erhält positive Querempfindlichkeiten [Keil95]. Da die Querempfindlichkeit von DMS gering ist und durch geeignete Umlenkstellen minimiert werden kann, wird im Sensorenbau die Querempfindlichkeit nicht beachtet [BLH05].

An einem weiteren Beispiel kann gezeigt werden, dass die Querdehnung bei der Auslegung von DMS vernachlässigt werden kann und die Auslegung mit Hilfe des k-Faktors sinnvoll ist. In einem von Stockmann [Stoc00] durchgeführten Versuch wurden mehrere einzelne, tangentiale Leiterbahnen aus Konstantan auf einer Kreisplatte, die am Rand fest eingespannt wurde, aufgebracht. Der Verlauf der tangentialen und radialen Dehnungen für die eingespannte Kreisplatte bei Druckbelastung sowie die Lage der tangentialen Leiterbahnen ist in Bild 5.1-1 dargestellt.

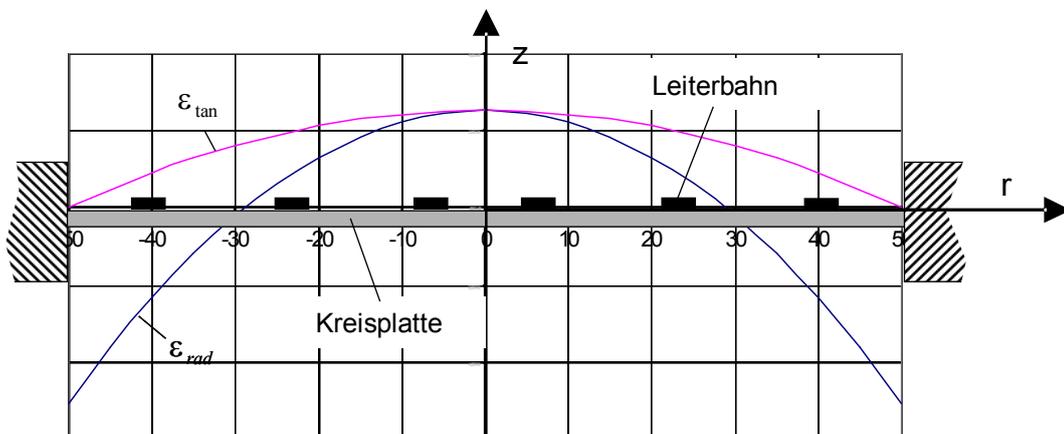


Bild 5.1-1: Verlauf von Tangentialdehnungen ε_{tan} und Radialdehnungen ε_{rad} auf der Oberfläche einer eingespannten Kreisplatte mit 100 mm Radius bei Druckbelastung. Im Querschnitt dargestellt sind einzelne, tangentiale, d. h. ringförmig, verlaufende Leiterbahnen auf der Kreisplattenoberfläche.

Der Biegeverlauf der Kreisplatte unter Druckbelastung wurde genau vermessen, um daraus die tangentialen und radialen Dehnungen abzuleiten. Ebenfalls gemessen wurde die

Widerstandsänderung der einzelnen tangentialen Leiterbahnen bei Durchbiegung der Kreisplatte. Aus der Widerstandsänderung und den bekannten tangentialen Dehnungen konnte auf den k-Faktor zurückgerechnet werden. Radiale Dehnungen stellen für die tangential verlaufenden Leiterbahnen Querdehnungen dar. Der berechnete k-Faktor für die einzelnen Leiterbahnen änderte sich linear von $k = 2,0$ für eine Leiterbahn in Plattenmitte, wo gleich große Dehnungen in Leiterbahn- und Querrichtung vorliegen, auf $k = 2,38$ am Plattenrand, wo eine Leiterbahn nur noch Querdehnungen, d. h. radialen Dehnungen, ausgesetzt ist. $K = 2,0$ beträgt der in Draht-Zugversuchen ermittelte k-Faktor von Konstantan. Der k-Faktor änderte sich also unter dem Einfluss fast reiner Querdehnung um bis zu 19 %. Aus dem Versuch geht hervor, dass sich der k-Faktor bei reiner Querdehnung deutlich änderte. Im Aufnehmerbau werden tangentiale DMS-Gitter jedoch nur im Bereich der höchsten tangentialen Dehnungen auf das Verformungselement angebracht, was im Fall der eingespannten Kreisplatte die Plattenmitte bedeutet. In der Mitte der Kreisplatte stimmte der in [Stoc00] ermittelte k-Faktor sehr gut mit dem in Zugversuchen ermittelten k-Faktor, $k = 2,0$, überein.

5.1.1.3 Auslegung von DMS-Rosetten

DMS-Halbbrücken oder DMS-Vollbrücken für Kreisplatten werden auch DMS-Rosetten genannt. In [Keil95] wird die Auslegung einer DMS-Rosette für eine am Rand eingespannte Kreisplatte vorgenommen. Grundlage der Auslegung sind die analytischen Lösungen für die Spannungs- und Dehnungsverhältnisse in einer eingespannten Kreisplatte. Nach der Berechnung der radialen und tangentialen Dehnungsverläufe werden die DMS in Zonen auf der Kreisplatte gelegt, in denen die radialen bzw. tangentialen Dehnungen möglichst groß sind. Für eine DMS-Vollbrücke bedeutet dies, dass zwei DMS in die Zone der größten tangentialen und zwei DMS in die Zone der größten radialen Dehnungen gelegt werden. Als Sensorsignal ergibt sich:

$$(5.10) \quad \frac{U_B}{U_0} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot (2 \cdot \varepsilon_{t_DMS} - 2 \cdot \varepsilon_{r_DMS}) \quad \begin{array}{l} U_B \text{ Brückenspannung, Signal} \\ U_0 \text{ Speisespannung} \end{array}$$

ε_{t_DMS} und ε_{r_DMS} sind die Effektivwerte der Dehnungen, die von den tangentialen bzw. radialen Messgittern erfasst werden. Die effektiven Dehnungen können auch als Anteile der Maximalwerte der tangentialen und radialen Dehnungen ausgedrückt werden.

$$(5.11) \quad \varepsilon_{t_DMS} = C_1 \cdot \varepsilon_{t_max}$$

$$(5.12) \quad \varepsilon_{r_DMS} = C_2 \cdot \varepsilon_{r_max}$$

So dass man für das Sensorsignal auch schreiben kann:

$$(5.13) \quad \frac{U_B}{U_0} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (C_1 \cdot \varepsilon_{t_max} - C_2 \cdot \varepsilon_{r_max})$$

In (5.13) wird das Messsignal maximal, wenn die Anteile C_1 und C_2 gegen eins gehen. In [Keil95] wurde für den einfachen Entwurf von DMS-Rosetten als Richtwerte für die Dehnungsanteile $C_1 = 0,95$ und für $C_2 = 0,6$ gewählt. Dies bedeutet z. B. für die tangentialen DMS, dass diese so groß dimensioniert und so auf der Kreisplatte platziert werden müssen, dass sie einen effektiven Dehnungswert aufnehmen können, der 95 % vom Maximalwert der tangentialen Dehnungen beträgt. Für Radial-DMS wird die Erfassung von 60 % des Maximalwerts der radialen Dehnungen angestrebt.

5.1.1.4 Linearitätsbedingung

Nach [Birk67] ist der lineare Zusammenhang zwischen den Dehnungen auf der Kreisplattenoberfläche und der Durchbiegung einer am Rand eingespannten Kreisplatte

gegeben, wenn $\frac{w_{\max}}{d_{KP}} \leq 0,2$ ist, wobei mit w_{\max} die maximale Durchbiegung der Kreisplatte

und mit d_{KP} die Dicke der Kreisplatte gemeint ist. Diese Linearitätsbedingung wurde auch schon in Kapitel 3.2.2 bei der Berechnung der Dicke der Nickelkreisplatte verwendet. Das Verhältnis von maximaler Durchbiegung zur Dicke einer am Rand fest eingespannten Kreisplatte wird im Folgenden als V_{fest} bezeichnet. Die Kreisplatte wird bei $V_{fest} \leq 0,2$ allein auf Biegung beansprucht. Bei großen Drücken tritt noch ein Aufbläh-Effekt („Ballon-Effekt“) hinzu. Der Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Dehnung wird dadurch zunehmend nichtlinear. In einem Artikel desselben Autors ein Jahr später [Birk68] wird angegeben, dass $V_{fest} \leq 0,25$ sein sollte. Als Richtwert für die Einhaltung einer Linearitätsabweichung von kleiner als 0,3 % gibt Firma Vishay [Vish05] eine Belastung an, bei der die Durchbiegung der Kreisplattenmitte kleiner als ein Viertel der Plattendicke betragen soll, also ebenfalls $V_{fest} \leq 0,25$. Auch in [Keil95] wird $V_{fest} \leq 0,25$ für einen Linearitätsfehler kleiner als 0,3 % angegeben.

5.1.2 Gelenkig gelagerte Kreisplatten

Die Kreisplatte der Drucksensoren in dieser Arbeit ist an einer PI-Trägermembran befestigt und daher am Rand gelenkig und gleichzeitig in einer Ebene verschiebbar gelagert. In den folgenden Berechnungen wurden für diese Kreisplatte die Formeln einer zwar gelenkig am Rand gelagerten Kreisplatte verwendet, die jedoch nicht in einer Ebene verschiebbar ist. In Kapitel 5.1-5 wird durch Vergleich mit einer FEM-Simulation gezeigt, dass die Verwendung dieser analytischen Formeln für die an einer PI-Membran befestigten Kreisplatte zulässig war.

Zur Auslegung der DMS wird die Linearitätsbedingung V_{gel} eingeführt, womit das Verhältnis der maximalen Durchbiegung zur Kreisplattendicke einer am Rand gelenkig gelagerten Kreisplatte gemeint ist. In der Literatur, wie schon in Kapitel 5.1.1.4 erwähnt, wird die Linearitätsbedingung jedoch nur für am Rand fest eingespannte Kreisplatten angegeben, also z. B. $V_{fest} \leq 0,2$. Dass diese Linearitätsbedingung auch für gelenkig gelagerte Kreisplatten übernommen werden kann, wurde in den Rechnungen dieses Kapitels vereinfachend angenommen. In der FEM-Simulation des Kapitels 5.1-5 wurde diese Annahme nicht überprüft.

Tabelle 5.1-2 enthält verschiedene Berechnungen zur DMS-Optimierung, die mit dem Programm Mathcad durchgeführt wurden. Um die verschiedenen Rechnungen dieses und der nächsten zwei Kapitel miteinander vergleichbar zu halten, wurden die in der Tabelle 5.1-1 angeführten geometrischen Randbedingungen in den Rechnungen eingehalten. Die Geometrie ‚DMS-Gitter nach [Wulf01]‘ wurde in den Rechnungen Nr. 1.1–1.5 der Tabelle 5.1-2 und die Geometrie ‚DMS-Gitter optimiert‘ in allen weiteren Rechnungen verwendet. Beide DMS-Geometrien der Tabelle sind mit Hilfe von Mathcad-Berechnungen so ausgelegt worden, dass sich gleich große Widerstände für die radialen und tangentialen DMS ergeben.

Bezeichnung	Einheit	DMS-Gitter nach [Wulf01]	DMS-Gitter optimiert
Außenradius der Kreisplatte	µm	1042	1042
Steglänge der radialen DMS	µm	222	50
Breite eines Gitterstegs	µm	5	5
Breite der Umlenkstelle	µm	10	20
Abstand zwischen Gitterstegen	µm	20	10
Durchmesser der Tangential-DMS	µm	1144	420

Tabelle 5.1-1: Geometrische Randbedingungen bei der DMS-Auslegung

Aus der Tabelle 5.1-1 geht hervor, dass in der optimierten DMS-Geometrie 50 µm kurze radiale Gitterstege gewählt worden sind.

Nr.	Verformungs- element	d_{KP}	C_{tan}	C_{rad}	Signal bei 1 bar	$Sp_{g,max}$	Notiz
		[μm]	[%]	[%]	[mV/V]	[N/mm ²]	
1.1	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	—	—	0,111	52	Rechnung nach [Wulf01] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Gold DMS-Gitter: [Wulf01]
1.2	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	—	—	0,279	—	Messergebnis W4-DS3 aus [Wulf01] Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Gold, $k=2,79$ DMS-Gitter: [Wulf01]
1.3	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	—	—	0,187	—	Messergebnis W5-DS9 aus [Wulf01] Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Gold, $k=1,87$ DMS-Gitter: [Wulf01]
1.4	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	95,7%	-194,9%	0,200	52	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: [Wulf01]
1.5	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	99,5%	34,6%	0,295	52	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
1.6	Kreisplatte gelenkig gelagert	50	99,5%	34,6%	0,590	52	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Vollbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
1.7	Kreisplatte gelenkig gelagert	37,9	99,5%	52,4%	0,360	94	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Nickel Vollbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
1.8	Kreisplatte gelenkig gelagert	42,9	99,4%	58,3%	0,478	74	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Messing Vollbrücke, $V_{gel}=0,2$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
1.9	Kreisplatte gelenkig gelagert	41,6	99,5%	54,6%	0,550	78	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Titan Vollbrücke, $V_{gel}=0,25$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
1.10	Kreisplatte gelenkig gelagert	40,6	99,4%	58,3%	1,071 (2 bar)	167	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Messing, 2 bar Vollbrücke, $V_{gel}=0,501$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert

d_{KP}	Dicke der Kreisplatte
C_{tan}	Effektivwertfaktor der erfassten Tangentialdehnungen
C_{rad}	Effektivwertfaktor der erfassten Radialdehnungen
V_{gel}	Maximale Auslenkung zu Kreisplattendicke bei gelenkig gelagerter Kreisplatte

Tabelle 5.1-2: Ergebnisse von Mathcad-Rechnungen zur DMS-Optimierung einer gelenkig gelagerten Kreisplatte.

Vorteil kurzer radialer Gitterstege ist, dass ein hoher Effektivwert der radialen Dehnungen, deren Maximum am Rand der Kreisplatte auftritt, aufgenommen werden kann. Da die DMS-Gitterstege nur 5 µm breit waren und als Dünnschichten, nach [Pfei89], typischer Weise 0,3 µm dick aufgebracht werden, lassen sich trotz der kurzen Stege noch DMS mit hohen Widerständen herstellen. Typische DMS-Widerstandswerte liegen bei 350, 1000, 2000, 2500 Ω. Größere DMS-Widerstände in DMS-Rosetten bieten den Vorteil, sich im Betrieb weniger stark zu erwärmen.

Damit ein linearer Zusammenhang zwischen dem anliegenden Druck und den Dehnungen auf der Kreisplattenoberfläche, und damit dem Sensorsignal, bestehen bleibt, wurde $V_{\text{gel}} \leq 0,2$ gewählt. In Rechnung Nr. 1.1 der Tabelle 5.1-2 wurde die DMS-Auslegung nach [Wulf01] nachvollzogen und für einen anliegenden Druck von 1 bar ein Sensorsignal von 0,111 mV/V errechnet. Aus den beiden Messkurven in [Wulf01], die von ersten Mustern von Drucksensoren stammten, wurde in Nr. 1.2 und 1.3 auf ein Signal von 0,279 mV/V und 0,187 mV/V zurückgeschlossen. Die Messsignale liegen deutlich höher als das nach [Wulf01] berechnete Signal. Als Erklärung hierfür kann angeführt werden, dass in [Wulf01] die DMS-Auslegung nicht mit k-Faktoren wie bei [Keil95] durchgeführt wurde. Stattdessen wurde versucht, den zweiachsigen Spannungszustand und dreiachsigen Verformungszustand in der Kreisplatte des Drucksensors möglichst genau zu erfassen. Dabei wurde ebenfalls von (5.2) ausgegangen.

$$(5.2) \quad R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Um den geänderten Widerstand der DMS zu berechnen, wurden in (5.2) die aus dem zweiachsigen Spannungszustand resultierenden Dehnungen, d. h. tangentiale, radiale und axiale Dehnungen, eingesetzt. Für den Widerstand des tangentialen Messgitters folgte damit:

$$(5.13) \quad R_{\varepsilon, \text{tan}} = \rho_0 \cdot \frac{l_0 \cdot (1 + \varepsilon_t)}{b_0 \cdot (1 + \varepsilon_r) \cdot d_0 \cdot (1 + \varepsilon_d)} = R_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_t)}{(1 + \varepsilon_r) \cdot (1 + \varepsilon_d)}$$

Im Gegensatz zu (5.13) wird im Geometrieteil von (5.14) zwar ebenfalls der dreiachsige Verformungszustand im DMS berücksichtigt, der jedoch resultierte, wie schon erläutert, aus einem einachsigen Spannungszustand.

$$(5.14) \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2\mu \cdot \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + 1 + 2\mu \right) = \varepsilon \cdot k$$

Während der zweiachsige Spannungszustand auf der Kreisplattenoberfläche mit (5.13) also möglicherweise besser erfasst wird, findet die Änderung des spezifischen Widerstands $\Delta \rho / \rho$ keine Berücksichtigung. Aus diesem Grunde wurden die DMS im Folgenden nach [Keil95] ausgelegt.

In den Rechnungen Nr. 1.2 und 1.3 wurde weiterhin von den in [Wulf01] ermittelten Messwerten des Drucksensors auf den möglichen k-Faktor von Gold geschlossen. Der k-Faktor von Gold könnte demnach zwischen 1,9–2,8 liegen. Gold wird nach dem Kenntnisstand des Autors als DMS-Werkstoff im Aufnehmerbau nicht eingesetzt. In den weiteren Rechnungen wurde auf den DMS-Werkstoff Konstantan übergegangen, ein Werkstoff, dessen TKR nahe bei Null liegt und der deshalb zur Herstellung von Folien-DMS-Drucksensoren häufig verwendet wird. DMS-Rosetten aus Konstantan besitzen kaum einen Temperaturgang des Nullpunktes. Zwar kompensieren sich in DMS-Halbbrücken- oder Vollbrückenschaltungen temperaturbedingte Widerstandszunahmen der DMS gegenseitig, so dass theoretisch auch Werkstoffe mit ausgeprägten TKR verwendet werden könnten. Die kompensierende Wirkung einer Vollbrücke funktioniert jedoch nur dann, wenn die Widerstände der DMS und auch ihr TKR exakt gleich groß sind, was laut Ort [Ort83] fertigungsbedingt nicht erreicht werden kann.

In Nr. 1.4 wurde mit dem DMS-Entwurf aus [Wulf01] nach der Methode von [Keil95] ein zu erwartendes Sensorsignal von 0,200 mV/V berechnet. Optimiert man die Messgitter, d. h. verwendet man die optimierte Geometrie von Tabelle 5.1-1, so erhält man mit einer DMS-Halbbrücke in Nr. 1.5 ein Signal von 0,295 mV/V.

In Bild 5.1-2 ist der Verlauf der Dehnungen über der Kreisplatte mit dem alten DMS-Entwurf aus [Wulf01] dargestellt. Der Dehnmessstreifen in der Mitte der Kreisplatte nimmt die mit a) gekennzeichneten tangentialen Dehnungen auf. Der DMS am Rand der Kreisplatte erfasst die radialen Dehnungen, die im Diagramm mit b) gekennzeichnet sind. Die Effektivwerte der von den DMS erfassten radialen und tangentialen Dehnungen ε_{t_DMS} und ε_{r_DMS} sind als gestrichelte, waagerechte Linien eingezeichnet. Das Messsignal ergibt sich aus der Differenz $\Delta\varepsilon$ der tangentialen und radialen Effektivwerte der Dehnungen multipliziert mit dem k-Faktor. Diese Differenz ist beim neuen Entwurf in Bild 5.1-3 ca. 30 % größer als beim alten Entwurf, was gleichbedeutend ist mit einem 30 % größeren Messsignal.

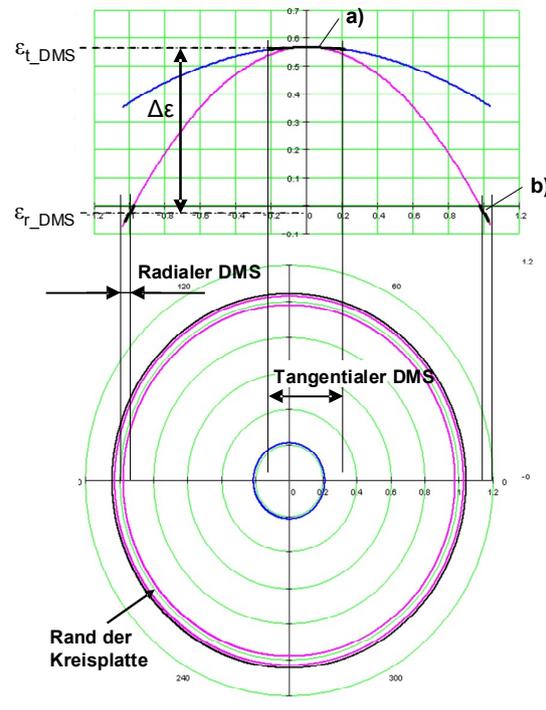
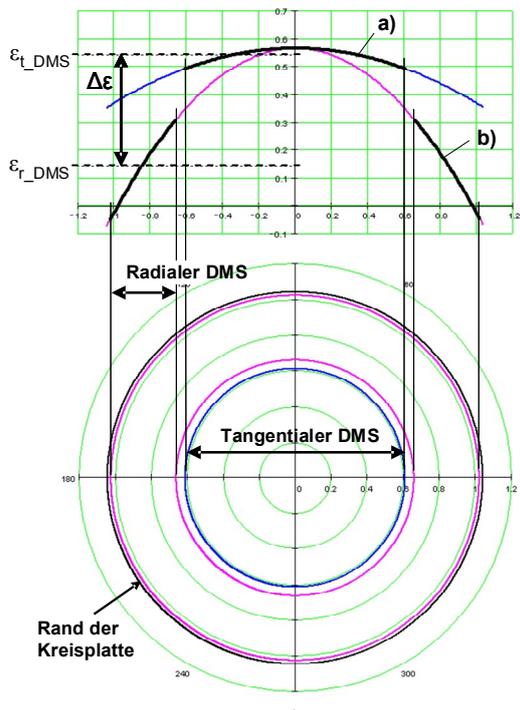


Bild 5.1-2: Alter Entwurf der DMS-Halbbrücke aus [Wulf01]. a) Erfasste Tangentialdehnungen. b) Erfasste Radialdehnungen.
Bild 5.1-3: Neuer DMS-Entwurf. a) Erfasste Tangentialdehnungen. b) Erfasste Radialdehnungen.

Das Messsignal des vorliegenden Drucksensors mit Dünnschicht-DMS ist sehr klein. Um ein größeres Nutzsignal zu erhalten, könnte anstelle einer Halbbrückenschaltung eine Vollbrückenschaltung verwendet werden, wodurch sich das Sensorsignal verdoppeln würde.

$$(5.15) \quad \text{Halbbrücke:} \quad \frac{U_B}{U_0} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \varepsilon$$

$$(5.16) \quad \text{Vollbrücke:} \quad \frac{U_B}{U_0} = k \cdot \varepsilon$$

In Nr. 1.6 ergibt sich mit einer DMS-Vollbrücke ein Signalwert von 0,59 mV/V. Dieser Signalwert reduziert sich allerdings auf 0,36 mV/V in Nr. 1.7, wenn anstelle einer Kreisplatte aus Glas eine Kreisplatte aus Nickel verwendet wird. Der Grund hierfür ist der mit 72.900 N/mm² viel geringere E-Modul von Dünnglas (D 263 T) gegenüber Nickel mit 179.000 N/mm². Aufgrund der höheren Steifigkeit muss eine Kreisplatte aus Nickel bei gleichem Außendurchmesser dünner ausgelegt werden als aus Glas, z. B. 38 µm gegenüber 50 µm. Gleichzeitig darf die dünnere Kreisplatte, wenn die Linearitätsbedingung eingehalten

werden soll, weniger stark ausgelenkt werden. Die unkomplizierte galvanische Herstellung von Kreisplatten aus Nickel gegenüber der Herstellung von Kreisplatten aus Glas muss also erkauft werden mit einem reduzierten Sensorsignal. Es existieren jedoch eine Anzahl weiterer Federwerkstoffe, die sich wie Nickel ebenfalls galvanisch abscheiden ließen (Anhang, [Tabelle 7.8-1](#)). Durch galvanische Herstellung einer Kreisplatte aus Messing würde sich ein Kennwert von 0,478 mV/V ergeben (Nr. 1.8). Titan lässt sich ebenfalls galvanisch abscheiden und besitzt ein kleineres E-Modul als Nickel. In Nr. 1.9 wurde mit einer Linearitätsbedingung $V_{\text{gel}} \leq 0,25$ und mit einer Kreisplatte aus Titan ein Signal von 0,550 mV/V berechnet.

Da sich Linearitätsfehler mit den gängigen Methoden der Elektronik und Rechnerauswertung leicht kompensieren lassen ([[Trän98](#)], [[Kell98](#)]), könnte man eine bis zum Nenndruck zunehmende Nichtlinearität der Kennlinie zugunsten eines größeren Sensorsignals akzeptieren. Aus dem Lastenheft für den hier entwickelten Sensor ging außerdem hervor, dass eine lineare Kennlinie nur bis 1 bar angestrebt und die Kennlinie bis 2 bar nichtlinear sein durfte. In Rechnung Nr. 1.10 wurde deshalb eine Kreisplatte aus Messing CuZn37 so dick dimensioniert, dass die größte in der Kreisplatte entstehende Spannung bei 2 bar mit einem gewählten Sicherheitsfaktor von 1,5 unter der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ von Messing bleibt. Messing wurde als Werkstoff gewählt, da die Dehngrenze von Messing mit 250 N/mm² deutlich höher liegt als von Titan mit 180 N/mm². Es wurde ein Signal von 1,071 mV/V berechnet. Bei 1 bar ergibt sich ein Signal von 0,757 mV/V. Die Linearitätsbedingung ist mit 0,25 bei 1 bar noch erfüllt. Bei Drücken zwischen 1 bar und 2 bar nimmt das Signal dagegen degressiv zu. Als nicht inerter Werkstoff kann Messing allerdings nicht im Drucksensor eingesetzt werden. Die Messingkreisplatte müsste daher abschließend mit Cr/Au inert beschichtet werden.

5.1.3 Alternative Kreisplatten-Formen

In [Kapitel 5.1.2](#) wurde eine DMS-Rosette für die in den Drucksensoren dieser Arbeit verwendete Kreisplatte ausgelegt. Mit dem für die Herstellung von Kreisplatten aus Nickel in Kapitel 3 angewendeten Fertigungsverfahren der Mikrogalvanik bietet sich jedoch die Möglichkeit, auch andere im Drucksensorbau übliche Verformungselemente herzustellen. In diesem Kapitel wird unter den geometrischen Randbedingungen von [Tabelle 5.1-1](#) rechnerisch eine DMS-Rosette auf zwei weitere kreisförmige Verformungselemente, die man galvanisch z. B. aus Nickel herstellen könnte, appliziert und das zu erwartende Sensorsignal berechnet. Zur Herstellung der hier vorgestellten kreisförmigen Verformungselemente müsste ein weiteres Mal Dickschichtlack strukturiert werden und ein zweiter Galvanikschritt erfolgen. Der höhere Aufwand zur Herstellung der alternativen Verformungselemente könnte sich lohnen, falls sich erheblich größere Sensorsignale bzw. Kennlinien mit besserer Linearität ergeben würden.

In den hier betrachteten Drucksensoren wurden Kreisplatten verwendet, die an einer PI-Trägermembran aufgehängt waren und bei Druckbeaufschlagung mit ihrem Rand auf einer der beiden Kammerschalen aufliegen. Die Lagerungsart dieser Kreisplatten ist in Bild 5.1-4 dargestellt. Sie entspricht einer Kreisplatte, die am Rand als gelenkig und in einer Ebene verschiebbar angesehen werden darf. Als Verformungselemente sind so gelagerte Kreisplatten im Drucksensorbau bisher unbekannt. Häufig eingesetzt werden dagegen am Rand eingespannte Kreisplatten oder Kreisringmembranen. Eine am Rand fest eingespannte Kreisplatte kann, wie in Bild 5.1-5 unten, mikrogalvanisch hergestellt werden. Dabei wird die dünne Kreisplatte außen von einem Ring umgeben. Der Außenring kann so dick ausgelegt werden, dass er sich bei anliegendem Druck nicht oder nur wenig verformt und die dünne Kreisplatte gleichsam wie in einer festen Einspannung hält. Analog wird in Bild 5.1-6 unten die Kreisringmembran von einem Außenring wie eingespannt gehalten. Eine ‚Kreisringmembran‘ besteht aus einer Kreisplatte mit verstärktem Mittelteil. Die Begriffe Kreisringmembran, Kreisringplatte und Kreisplatte mit verstärktem Mittelteil werden in der Literatur synonym verwendet

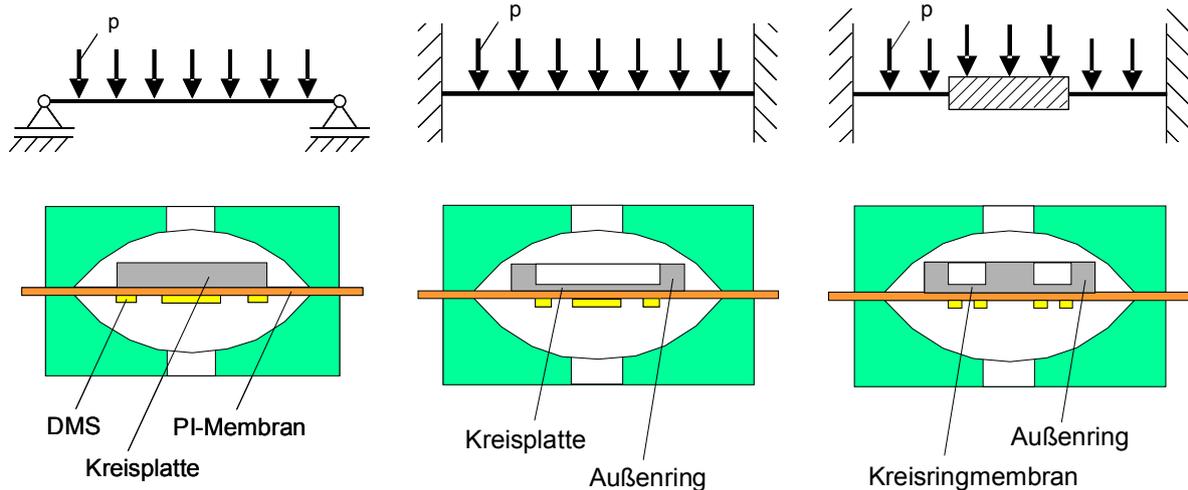


Bild 5.1-4: Oben: Kreisplatte am Rand gelenkig und in einer Ebene verschiebbar gelagert. Unten: Ausführung im Drucksensor.

Bild 5.1-5: Oben: Kreisplatte am Rand fest eingespannt. Unten: Ausführung im Drucksensor.

Bild 5.1-6: Oben: Kreisringmembran am Rand fest eingespannt. Unten: Ausführung im Drucksensor.

Bei kleinen Druckunterschieden weisen nach Schaumburg [Scha63] Kreisringmembranen eine bessere Linearität als Kreisplatten auf. Auch bei Ort [Ort83] kann nachgelesen werden, dass sich für Druckbereiche unter 20 bar besonders Kreisplatten mit verstärktem Zentralteil, also Kreisringmembranen, eignen. Kreisringmembranen können sehr dünn ausgeführt werden und daher leicht verformt werden. Dennoch verfügen Kreisringmembranen über einen sehr guten linearen Zusammenhang zwischen dem anliegenden Druck und den Dehnungen auf der Ringoberfläche.

In [Sand86] wurden die Gesamtspannungen in Abhängigkeit vom Druck mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) für Kreisplatten und Kreisringmembranen untersucht, wobei das Verhältnis V von Durchbiegung zu Membrandicke 0,5 betrug. Es zeigte sich, dass Kreisplatten bei $V = 0,5$ deutliche Abweichungen von der Linearität aufwiesen, während die Gesamtspannungen bei Kreisringmembranen mit demselben V linear mit dem Druck anstiegen. In [Engl63] wird die Kreisplatte als gerade für Präzisions-Druckmessgeräte nicht geeignet bezeichnet, da die Kreisplatte eine große Linearitätsabweichung aufweise. In [Pfei89] wird angegeben, dass Kreisringplatten besonders für geringe Nenndrücke von größer oder gleich 1 bar produziert werden.

Linearitätsfehler bei größeren Durchbiegungen entstehen dadurch, dass die Mittelebene von Kreisplatten immer weniger als ungedehnt betrachtet werden kann [Heyw92]. Die Dehnung der Mittelebene nimmt im Gegenteil zu. Die sich dabei ändernde Durchbiegungsform ähnelt mehr und mehr einer Ballonhaut unter derselben Belastung. Der Balloneffekt kann deutlich reduziert werden, wenn eine Platte mit verdicktem Mittelteil, d. h. eine Kreisringplatte, verwendet wird. Kreisringplatten eignen sich daher für niedrige Druckbereiche.

Die Bedingung der festen Randeinspannung einer Kreisplatte kann nach [Engl63] am besten eingehalten werden, wenn die Platte aus einem vollen Stück gedreht wird. Einspannen eines Bleches zwischen zwei ringförmige Backen erfüllt die Randbedingung demgegenüber nur unvollkommen und führt zu Abweichungen zwischen Theorie und Experiment. Die Forderung der Herstellung aus einem Stück erfüllen galvanisch hergestellte Kreisplatten oder Kreisringmembranen mit Außenring sehr gut.

5.1.3.1 Überlagerung von Lastfällen

Die Dehnungen auf der Oberfläche der oben beschriebenen alternativen kreisförmigen Verformungselemente können durch Überlagern von analytischen Lösungen verschiedener Last- und Lagerungsfälle berechnet werden. Die verwendeten und miteinander kombinierten Formeln stammen aus einer im Internet zugänglichen Formelsammlung für Kreisplatten und Kreisringmembranen [Aman05].

Die Kreisplatte mit Außenring (Bild 5.1-5) kann nach den Regeln der Technischen Mechanik in eine Ringplatte und eine Kreisplatte zerschnitten werden. Die Ringplatte und die Kreisplatte können dann zur Berechnung getrennt betrachtet werden. An der Schnittstelle müssen Schnittstellenkräfte und -momente berücksichtigt werden. In Bild 5.1-7 ist dargestellt, welche Last-/Lagerungsfälle für den Außenring kombiniert werden müssen. In Bild 5.1-8 sind die Last-/Lagerungsfälle für die freigeschnittene Kreisplatte dargestellt.

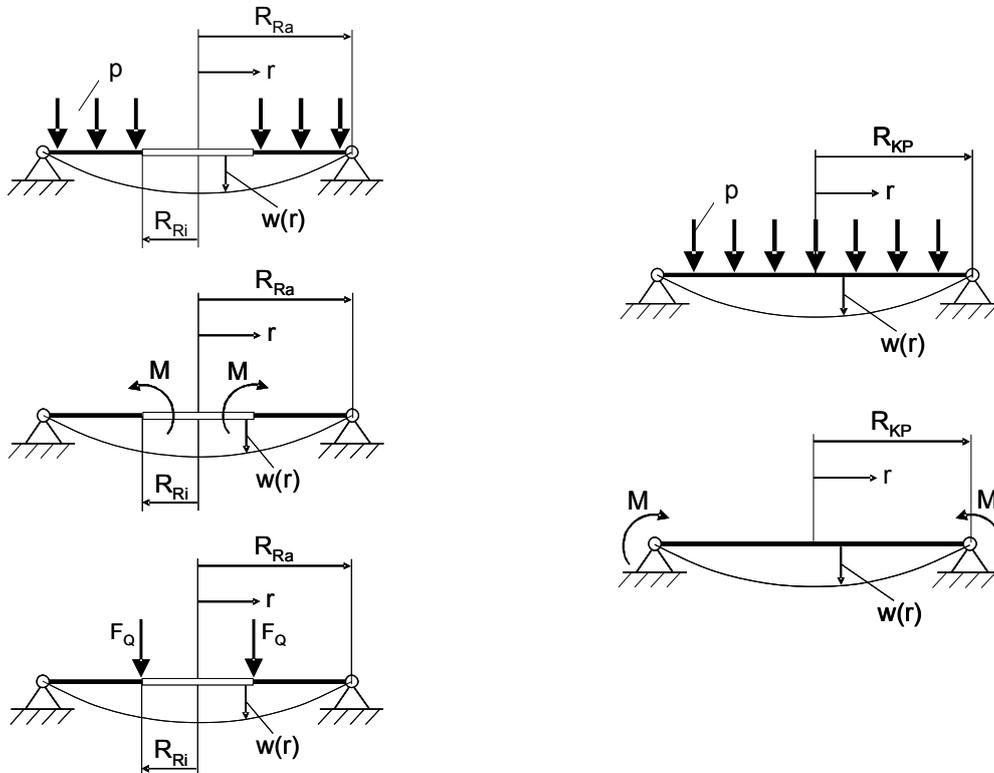


Bild 5.1-7: Lagerung, Kräfte und Momente am freigeschnittenen Außenring sind als getrennte Lastfälle dargestellt.

Bild 5.1-8: Lagerung, Kräfte und Momente an der freigeschnittenen Kreisplatte sind als getrennte Lastfälle dargestellt.

Durch das Freischneiden von Außenring und Kreisplatte müssen an der Schnittstelle des Außenrings eine Querkraft und ein Drehmoment angetragen werden. Der Außenring wird weiterhin durch den anliegenden Druck p belastet und kann als am Rand gelenkig gelagert angesehen werden, da er am Rand an der Trägermembran befestigt ist. An der Kreisplatte wirkt ebenfalls ein Moment, das von der Einspannung im starren Außenring herrührt. Weiterhin ist die Kreisplatte druckbelastet, wobei die Druckbelastung die auf den Innenrand des Außenrings wirkende Querkraft erzeugt. Die Lagerung der Kreisplatte kann ebenfalls als gelenkig angesehen werden. Wenn der Außenring im Vergleich zur Kreisplatte so massiv dimensioniert wird, dass er sich bei Druckbelastung kaum verformt, wird das Moment an der Schnittstelle zur Kreisplatte so groß werden wie bei einer Kreisplatte mit fester Einspannung am Rand.

Mit Mathcad wurden Rechenprogramme erstellt, in denen zunächst die Formeln für die Neigung des Außenrings für die in Bild 5.1-7 dargestellten Lastfälle addiert wurden. So ergab sich die Gesamtneigung des Außenrings. Anschließend wurden für die Kreisplatte die Formeln für die Neigung bei Flächenbelastung und für die Neigung bei Momentenbelastung addiert, um die Gesamtneigung der Kreisplatte zu bestimmen. Die Gesamtneigung der Kreisplatte und des Außenrings müssen an der Schnittstelle gleich sein. Durch Gleichsetzen der Neigungen konnte das bis dahin unbekannte Moment an der Schnittstelle bestimmt werden. Mit dem so bestimmten Moment am Übergang vom Außenring zur Kreisplatte konnten wiederum durch Zusammenziehen von Formeln für die jeweiligen Lastfälle die Durchbiegung sowie die Spannungen und Dehnungen in der Kreisplatte mit Außenring berechnet werden.

In allen Rechnungen wurden die geometrischen Randbedingungen von [Tabelle 5.1-1](#) eingehalten. D. h. der Außenring hatte einen Außendurchmesser von 2084 μm , die Breite der DMS betrug 5 μm und die Gitterstege ohne Umlenkstellen waren 50 μm lang. Die Einhaltung der geometrischen Randbedingungen macht die Optimierungs-Rechnungen miteinander vergleichbar.

5.1.3.2 Kreisplatte mit Außenring

Tabelle 5.1-3 enthält Ergebnisse von Berechnungen für Kreisplatten mit Außenring.

Nr.	Verformungs- element	R_{Ra}	b_R	d_R	R_{KP}	d_{KP}	C_{tan}	C_{rad}	Signal bei 1 bar	Linabw SpG innen	Linabw SpG außen	SpG_{max}	Notiz
		[μm]	[%]	[%]	[mV/V]	[%]	[%]	[N/mm ²]					
2.1	Kreisplatte im Außenring	1042	1	37,9	1041	37,9	99,5%	52,4%	0,358	—	—	94	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Nickel, $V_{fest}=0,2$ Vollbrücke DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
2.2	Kreisplatte im Außenring	1042	200	1000	842	21,6	97,9%	86,1%	0,709	4,00%	-3,30%	114	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Nickel, $V_{fest}=0,2$ Vollbrücke, $F_{mittel}=0,32\%$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
2.3	Kreisplatte fest eingespannt	—	—	—	842	21,6	98,0%	85,8%	0,709	4,00%	-3,30%	111	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Nickel, $V_{fest}=0,218$ Vollbrücke, $F_{mittel}=0,32\%$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
2.4	Kreisplatte im Außenring	1042	500	200	542	13,9	95,1%	78,6%	0,663	4,00%	-3,30%	113	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Nickel, $V_{fest}=0,206$ Vollbrücke, $F_{mittel}=0,32\%$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
2.5	Kreisplatte im Außenring	1042	200	200	842	35	98,2%	84,8%	0,269	0,93%	-0,34%	38	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Nickel, $V_{fest}=0,249$ Vollbrücke, $F_{mittel}=0,3\%$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert
2.6	Kreisplatte im Außenring	1042	200	200	842	24,3	98,1%	85,3%	1,119 (2 bar)	4,10%	-4,50%	167	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Messing , $V_{fest}=0,249$ Druck: 2 bar Vollbrücke, $F_{mittel}=0,21\%$ DMS: Konstantan, $k=2$ DMS-Gitter: Optimiert

R_{Ra}	Ringradius außen
b_R	Ringbreite
d_R	Ringdicke
R_{KP}	Außenradius der Kreisplatte
d_{KP}	Dicke der Kreisplatte
C_{rad}	Effektivwertfaktor der erfassten Radialdehnungen
C_{tan}	Effektivwertfaktor der erfassten Tangentialdehnungen
Linab SpG innen	Linearitätsabweichung der Spannungen in Plattenmitte
Linab SpG außen	Linearitätsabweichung der Spannungen am Plattenrand
SpG_{max}	Maximal aufgetretene Spannung
V_{fest}	Verhältnis Auslenkung zu Kreisplattendicke einer am Rand fest eingespannten Kreisplatte
F_{mittel}	Mittelwert der Linearitätsfehler der Spannungen am Kreisplattenrand und in Plattenmitte

Tabelle 5.1-3: Ergebnisse von Mathcad-Berechnungen des Sensorsignals für Kreisplatten mit Außenring.

Zunächst wurde versucht zu zeigen, dass die für eine Kreisplatte mit Außenring kombinierten Formeln zutreffen. Dazu wurde in Rechnung Nr. 2.1 die Dicke d_{Ra} des Außenrings gleich dick gewählt wie die Dicke der Kreisplatte d_{KP} . Für den Außenring wurde eine Breite b_R von 1 μm gewählt. Dieser Extremfall entspricht im Grunde einer Kreisplatte ohne Außenring und damit der Kreisplatte von Rechnung Nr. 1.7. Es ergibt sich ein Signal von 0,358 mV/V. Dieses Ergebnis stimmt sehr genau mit dem Ergebnis aus Nr. 1.7 überein, wo das Sensorsignal für eine gelenkig gelagerte Kreisplatte – ohne Außenring – berechnet wurde zu 0,360 mV/V.

In Rechnung Nr. 2.2 wurde für eine Kreisplatte mit 842 μm Durchmesser mit einem 1 mm dicken Außenring ein Signal von 0,709 mV/V errechnet. Der massive Außenring wirkt für die 21,6 μm dicke Kreisplatte wie eine feste Einspannung. Dies bewahrheitete sich mit Rechnung Nr. 2.3, in der mit der Formel für eine eingespannte Kreisplatte dasselbe Signal wie in Nr. 2.2, d. h. von 0,709 mV/V, berechnet werden konnte.

In Rechnung Nr. 2.4 konnte gezeigt werden, dass das Signal kleiner wird, wenn der Außenring breiter und damit der Durchmesser der Kreisplatte verkleinert wird. Bei einer Verringerung des Kreisdurchmessers von 842 μm auf 542 μm fällt das Signal von 0,709 auf 0,663 mV/V. Die Kreisplattendicke nimmt unter Einhaltung der Linearitätsbedingung hierbei von 21,6 μm auf 13,9 μm ab.

In Rechnung Nr. 2.5 wurde die Kreisplattendicke nicht unter Einhaltung der Linearitätsbedingung $V_{\text{fest}} = 0,2$ berechnet. Stattdessen wurden Formeln aus [Pfei89] zur Berechnung der Linearitätsabweichung herangezogen. Die Plattendicke wurde so gewählt, dass der Mittelwert F_{mittel} aus dem Linearitätsfehler der Spannungen in Plattenmitte, Linab Spg innen, und dem Linearitätsfehler der Spannungen am Plattenrand, Linab Spg außen, kleiner oder gleich 0,3 % war. Das Signal fällt bei Einhaltung von $F_{\text{mittel}} \leq 0,3 \%$ auf 0,269 mV/V.

Wenn aus denselben Gründen wie in Kapitel 5.1-2 ein höherer Linearitätsfehler oberhalb von 1 bar akzeptiert wird, kann die Kreisplatte so ausgelegt werden, dass die maximalen Spannungen in der Kreisplatte bei 2 bar mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 unter der 0,2 %-Dehngrenze liegen. In Rechnung Nr. 2.6 wurde zudem Messing als Plattenwerkstoff gewählt. Das erzielbare Signal erhöhte sich dadurch auf 1,119 mV/V bei 2 bar und 0,791 mV/V bei 1 bar.

5.1.3.3 Kreisringmembran mit Außenring

Tabelle 5.1-4 enthält die Berechnungsergebnisse für Kreisringmembranen mit Außenring. Allerdings wurde in der ersten Rechnung eine Kreisringmembran zum Vergleich am Rand fest eingespannt. In den Rechnungen dieses Kapitels gelten wiederum die geometrischen Randbedingungen von Tabelle 5.1-1. Außerdem wurde als Randbedingung zur Berechnung der Kreisringmembrandicke ein Mittelwert der Linearitätsfehler von $F_{\text{mittel}} = 0,3 \%$ festgelegt. Für eine am Rand fest eingespannte Kreisringmembran wurde in Rechnung Nr. 3.1 ein Signal von 0,728 mV/V berechnet. Für eine Kreisringmembran mit demselben Außendurchmesser wie in Nr. 3.1 ließ sich in Nr. 3.2 mit den kombinierten Formeln für eine Kreisringmembran mit einem massiven Außenring dasselbe Signal berechnen. Dies zeigte, dass die kombinierten Formeln richtig sind.

In Nr. 3.3 wurde der Außenring auf realistische Abmessungen verkleinert. Der Außenring ist 300 x 300 μm breit und dick. Dass ungefähr das gleiche Signal von 0,744 mV/V wie in Nr. 3.2 berechnet werden konnte zeigt, dass der Ring wie eine Einspannung wirkt. Durch Verkleinern des Innenradius der Kreisringmembran von 492 μm auf 292 μm stieg in Rechnung Nr. 3.4 das Signal auf 1,314 mV/V an.

In Nr. 3.5 wurde der Außenradius der Kreisringmembran vergrößert und die Kreisringbreite auf 200 μm verringert. Mit der kleineren Ringbreite fiel das Signal auf 0,593 mV/V. Dagegen ergab sich mit einer Ringbreite von 450 μm in Nr. 3.6 ein Signal von 1,49 mV/V. Allerdings liegen die maximalen Spannungen in diesem Falle bei 200 N/mm², d. h. der Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung würde nur 1,25 betragen.

In Nr. 3.7 wurde eine Kreisringmembran aus Messing so ausgelegt, dass bei einem maximalen Druck von 2 bar die maximal auftretenden Spannungen mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 von der 0,2 %-Dehngrenze von Messing entfernt liegen. Das Signal beträgt bei 2 bar 1,133 mV/V und bei 1 bar 0,842 mV/V.

Nr.	Verformungs- element	R _{Ra}	b _R	d _R	R _{KRM} außen	d _{KRM}	C _{rad} innen	C _{rad} außen	Signal bei 1 bar	Linabw Spg innen	Linabw Spg außen	Sp _g _{max}	Notiz
		[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[%]	[%]	[mV/V]	[%]	[%]	[N/mm ²]	
3.1	KRM fest eingespannt	**	**	**	742	14	67,2%	67,4%	0,728	1,10%	-1,70%	118	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,29 Vollbrücke, V _{KRM} =0,019 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.2	KRM mit Außenring	1042	300	5000	742	14	67,2%	67,4%	0,728	1,10%	-1,70%	118	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,29 Vollbrücke, V _{KRM} =0,019 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.3	KRM mit Außenring	1042	300	300	742	14	67,6%	67,0%	0,744	1,10%	-1,70%	119	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,29 Vollbrücke, V _{KRM} =0,019 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.4	KRM mit Außenring	1042	300	300	742	13,9	78,8%	80,3%	1,314	1,10%	-1,70%	181	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,3 Vollbrücke, V _{KRM} =0,09 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.5	KRM mit Außenring	1042	200	300	842	14,4	60,6%	58,7%	0,593	1,10%	-1,70%	111	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,3 Vollbrücke, V _{KRM} =0,0099 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.6	KRM mit Außenring	1042	200	300	842	14,4	80,1%	80,7%	1,490	1,10%	-1,70%	200	KRM: Nickel, F _{mittel} =-0,3 Vollbrücke, V _{KRM} =0,095 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert
3.7	KRM mit Außenring	1042	200	300	842	23,5	81,1%	79,4%	1,133 (2 bar)	0,37%	-0,42%	166	KRM: Messing , F _{mittel} =0,12% Vollbrücke, V _{KRM} =0,058 DMS: Konstantan, k=2 DMS-Gitter: Optimiert

K _{RM}	Kreisringmembran
R _{Ra}	Ringradius außen
b _R	Ringbreite
d _R	Ringdicke
R _{KRM} außen	Außenradius der Kreisringmembran
R _{KRM} innen	Innenradius der Kreisringmembran
d _{KRM}	Dicke der Kreisringmembran
C _{rad} innen	Mittelwertfaktor der von den Radial-DMS am Innenradius der Kreisringmembran erfassten radialen Dehnungen
C _{rad} außen	Mittelwertfaktor der von den Radial-DMS am Außenradius der Kreisringmembran erfassten radialen Dehnungen
Linab Spg innen	Linearitätsabweichung der Spannungen in Plattenmitte
Linab Spg außen	Linearitätsabweichung der Spannungen am Plattenrand
Sp _g _{max}	Maximal aufgetretene Spannung
V _{KRM}	Verhältnis Auslenkung zu Kreisplattendicke von am Rand eingespannten Kreisringmembranen
F _{mittel}	Mittelwert gebildet aus den Maximalwerten der Linearitätsfehler der Spannungen am Außen- und Innenradius der Kreisringmembran

Tabelle 5.1-4: Mit Mathcad berechnete Ergebnisse zur Auslegung einer Kreisringmembran mit Außenring.

5.1.4 Fazit aus den Berechnungen

Übliche Nennsignale von Drucksensoren liegen zwischen 1–4 mV/V [Trän98], wobei sich 2 mV/V als ein Standard durchgesetzt haben. Das Drucksensorsignal kommt in keinem hier betrachteten Berechnungsfall im Bereich des linearen Signalverlaufs bis 1 bar an das Standardsignal von handelsüblichen Dünnschichtdrucksensoren heran. Dies liegt jedoch an der für Dünnschichtdrucksensoren ungewöhnlich kleinen Baugröße des Sensors.

Das Signal beträgt im aktuellen Entwurf mit Halbbrücke aus Konstantan und einem anliegenden Druck von 1 bar 0,2 mV/V (Tabelle 5.1-5, Nr. 1.4). Durch einen nach [Keil95] optimierten DMS-Entwurf und die Verwendung einer Vollbrücke lässt sich ein 3,8fach größeres Signal bei 1 bar erzielen (Nr. 1.10). Der Einsatz des DMS-Werkstoffs Konstantan bedeutet gegenüber Gold als DMS-Werkstoff einen geringfügigen Signalverlust, der jedoch durch den besseren TKR-Wert von Konstantan aufgewogen wird.

Nr.	Verformungs- element	Notizen	bei 1 bar			bei 2 bar		
			Signal	Sp _g _{max}	F _{mittel}	Signal	Sp _g _{max}	F _{mittel}
			[mV/V]	[N/mm ²]	[%]	[mV/V]	[N/mm ²]	[%]
1.4	Kreisplatte gelenkig gelagert	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Glas Halbbrücke, V_{gel}=0,2 DMS: Konstantan DMS-Gitter: [Wulf01]	0,2	52	—	—	—	—
1.10	Kreisplatte gelenkig gelagert	Rechnung nach [Keil95] Kreisplatte: Messing Vollbrücke, V _{gel} =0,501 DMS: Konstantan DMS-Gitter: Optimiert	0,757	118	—	1,071	167	—
2.6	Kreisplatte im Außenring	Rechnung nach: Keil [34] Kreisplatte: Messing Vollbrücke, V _{fest} =0,249 DMS: Konstantan DMS-Gitter: Optimiert	0,791	122	-0,21%	1,119	167	-0,21%
3.7	Kreisring- membran mit Außenring	KRM: Messing Vollbrücke, V _{KRM} =0,058 DMS: Konstantan DMS-Gitter: Optimiert	0,762	109	-0,02%	1,133	166	0,12%

Tabelle 5.1-5: Ergebnisvergleich der drei verschiedenen Verformungselemente

Als sinnvoll hat sich erwiesen, die Kreisplattendicke aus der bei Maximaldruck im Verformungselement auftretenden maximalen Spannung abzuleiten. Als Spannungsgrenze mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 diente die 0,2 %-Dehngrenze. Vergleicht man die Rechnungen Nr. 1.10, 2.6 und 3.7, in denen die maximale Spannung mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 auf 167 N/mm² bei 2 bar begrenzt war, so zeigt sich, dass sich bei allen drei untersuchten Verformungselementen ein ungefähr gleich großes Sensorsignal ergibt. Ein erhöhter Fertigungsaufwand zur Herstellung der alternativen Verformungselemente würde sich also hinsichtlich der Höhe des Sensorsignals nicht lohnen.

Betrachtet man jedoch den Linearitätsfehler zeigt sich ein Vorteil der alternativen Verformungselemente. Der effektive lineare Fehler F_{mittel} ist bei der Kreisringmembran mit Außenring bei begrenzter maximaler Spannung mit 0,12 % sehr gering (Nr. 3.7). Nicht viel schlechter ist mit -0,21 % der Linearitätsfehler der Kreisplatte im Außenring (Nr. 2.6). Für eine gelenkig gelagerte Kreisplatte ist eine Formel zur Berechnung des Linearitätsfehlers nicht verfügbar. Bekannt ist aber, dass sich bei V_{gel} = 0,25 ein Linearitätsfehler von ca. 0,3 % ergibt. Aus der mit V_{gel} = 0,501 in Nr 1.10 sehr schlecht eingehaltenen Linearitätsbedingung kann daher auf einen erheblich größeren Linearitätsfehler der gelenkig gelagerten Kreisplatte geschlossen werden.

5.1.5 Überprüfung der Lagerungsbedingungen

Mit einer FEM-Simulation wurde untersucht, ob es zulässig war, die analytischen Formeln zur Auslegung der DMS für die Kreisplatte des betrachteten Drucksensors anzuwenden. Die verwendeten analytischen Formeln gelten für am Rand gelenkig gelagerte, d. h. gelenkig und ortsfest gehaltene, Kreisplatten (Bild 5.1-9). Die Kreisplatte der Drucksensoren war jedoch

am Rand an einer Membran befestigt, welche sehr dünn war und daher keine nennenswerte Festigkeit aufwies. Bei anliegendem Druck setzt der Rand der Kreisplatte auf der kugelschalenförmige Kammerwand auf und die Kreisplatte wölbt sich. Hierbei bewegt sich der Rand der Kreisplatte entlang der Kammerwand in Richtung der Mittelachse der Kreisplatte. Die Kreisplatte war also in Wirklichkeit am Rand gelenkig und in einer Ebene, d. h. auf der Kammerwand, verschiebbar gelagert (Bild 5.1-10).

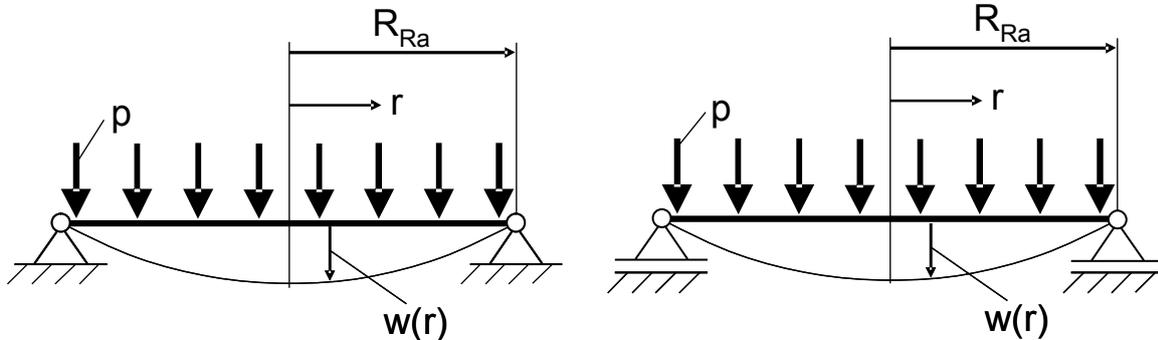


Bild 5.1-9: Kreisplatte gelenkig und ortsfest gelagert.

Bild 5.1-10: Kreisplatte gelenkig und in der Ebene verschiebbar gelagert.

Die FEM-Simulation wurde mit Pro/Mechanica durchgeführt. Für die Simulation wurden die Geometrie und die Kennwerte einer Kreisplatte aus Dünnglas verwendet (Anhang, [Tabelle 7.8-2](#)). Der Vergleich von mit der FEM-Simulation und mit analytischen Formeln ermittelten Ergebnissen ergab, dass die Werte der Durchbiegung (Anhang, [Bild 7.8-4](#)) und der Radialdehnungen (Anhang, [Bild 7.8-5](#)) nahezu exakt gleich waren. Ein Unterschied, der jedoch vernachlässigbar gering war, zeigte sich im Verlauf der Tangentialdehnungen ([Bild 7.8-6](#)). Die Verwendung der analytischen Formeln zur Optimierung der DMS für die Kreisplatten von Drucksensoren dieser Arbeit ist daher zulässig.

5.2 Möglichkeiten zum Abdichten der Sensorkammer

Ein ungelöstes Problem dieser Arbeit ist das Abdichten der Sensorkammerhälfte, in welcher die Flüssigkeit aus einem mikrofluidischen Gerät, in das der Drucksensor eingebaut werden soll, ansteht. Damit der Drucksensor die Anforderungen an die chemische Beständigkeit erfüllen kann, darf die Flüssigkeit nicht durch den Spalt zwischen dem Gehäusenutzen und der PI-Trägermembran kriechen und in Berührung mit dem Klebstoff gelangen. Ob das Umschweißen mit Heizelementen wie in [Kapitel 2.11](#) beschrieben zukünftig eine Möglichkeit zur Abdichtung darstellen kann, soll hier noch einmal diskutiert werden. Weitere Ideen zur Abdichtung werden aufgezeigt.

5.2.1 Heizelementschweißen

Wie in [Kapitel 2.11](#) dargelegt, wäre es mit dickeren Heizelementen und Schweißen mit geregelter Leistung möglich, PEEK zu verschweißen. Beim Umschweißen der Sensorkammer müssen jedoch weitere Gesichtspunkte bedacht werden.

Auf die Zuleitungen zu den DMS, welche die Heizelement-Ringe auf der anderen Seite der PI-Trägermembran kreuzen ([Bild 5.2-1 a](#)), wurde schon in Kapitel 2.11 eingegangen. Die Zuleitungen zu den DMS könnten durch die thermische Ausdehnung des Kunststoffes in der Schweißzone stark gedehnt werden und dadurch reißen oder ihren Widerstand erhöhen. Höhere Widerstände der Zuleitungen würden zu einem Signalverlust führen [[Paet88](#)]. Es hat sich allerdings gezeigt, dass durch Schweißen mit einem Leistungsprofil Heizelemente nach dem Schweißen unzerstört vorliegen. Es besteht daher Grund zu der Annahme, dass breite Zuleitungen aus dem duktilen Werkstoff Gold die Schweißung mit Heizelementen unbeschadet und ohne Widerstandsänderung überstehen würden, wenn ein geeignetes Leistungsprofil beim Schweißen verwendet würde.

Weiterhin befindet sich zwischen dem inneren Heizelement-Ring und dem Chromhaftring eine 20 µm breite, nicht mit Chrom abgedeckte PI-Trägermembran-Ringzone (Bild 5.2-1 b)). Für eine vollständige Abdichtung wäre es erforderlich, diese PI-Ringzone ebenfalls abzudichten. Anderenfalls würde die PI-Ringzone mit der Flüssigkeit in Kontakt kommen, könnte Flüssigkeit aufnehmen und im Inneren der PI-Membran weiterleiten.

Handelt es sich bei der Flüssigkeit um einen Elektrolyt, würde dadurch in den Bereichen, in denen die Zuleitungen zu den DMS auf der anderen Seite der PI-Trägermembran die PI-Ringzone kreuzen, der Isolationswiderstand zwischen den Zuleitungen abnehmen. Andererseits könnte Flüssigkeit durch die PI-Trägermembran bis auf die Glasplatte kriechen, an den Rändern der PI-Membran verdampfen und sich als Kondensatfilm über die DMS legen. Dadurch würde der Isolationswiderstand zwischen den Gitterstegen der DMS sinken und die Messbrücke verstimmt. Ganz allgemein gilt, dass DMS vor Umwelteinflüssen, wie Feuchtigkeit oder anderen in Verbindung mit Ionen leitfähigen Stoffen, gut geschützt werden müssen. Folien-DMS werden daher abhängig vom Einsatzfall mit speziellen Kunstharzen abgedeckt. Silizium-Druckmesszellen werden zum Schutz gegen Feuchtigkeit und anderen Umwelteinflüssen häufig mit einer Passivierungsschicht beschichtet. Bondflächen auf Silizium-Druckmesszellen werden nach dem Drahtbonds z. B. mit einem Gel abgedeckt.

Durch geeignete Schweißparameter, wie einer langen Schweißzeit, könnte die Zone des aufgeschmolzenen Kunststoffes die 20 µm breite Lücke bis zum Chromhaftring überdecken. Kunststoffschmelze könnte auf dem Chromhaftring aufschmelzen (Bild 5.2-1 b)). Der Chromhaftring hat sich in [Wulf01] als Haftvermittlungsschicht zwischen der Glaskreisplatte und der PI-Trägermembran bewährt. Fraglich ist dagegen, wie dicht und wie medienbeständig eine erstarrte thermoplastische Kunststoffschmelze auf dem Chromhaftring und auf den Heizelementen haften würde.

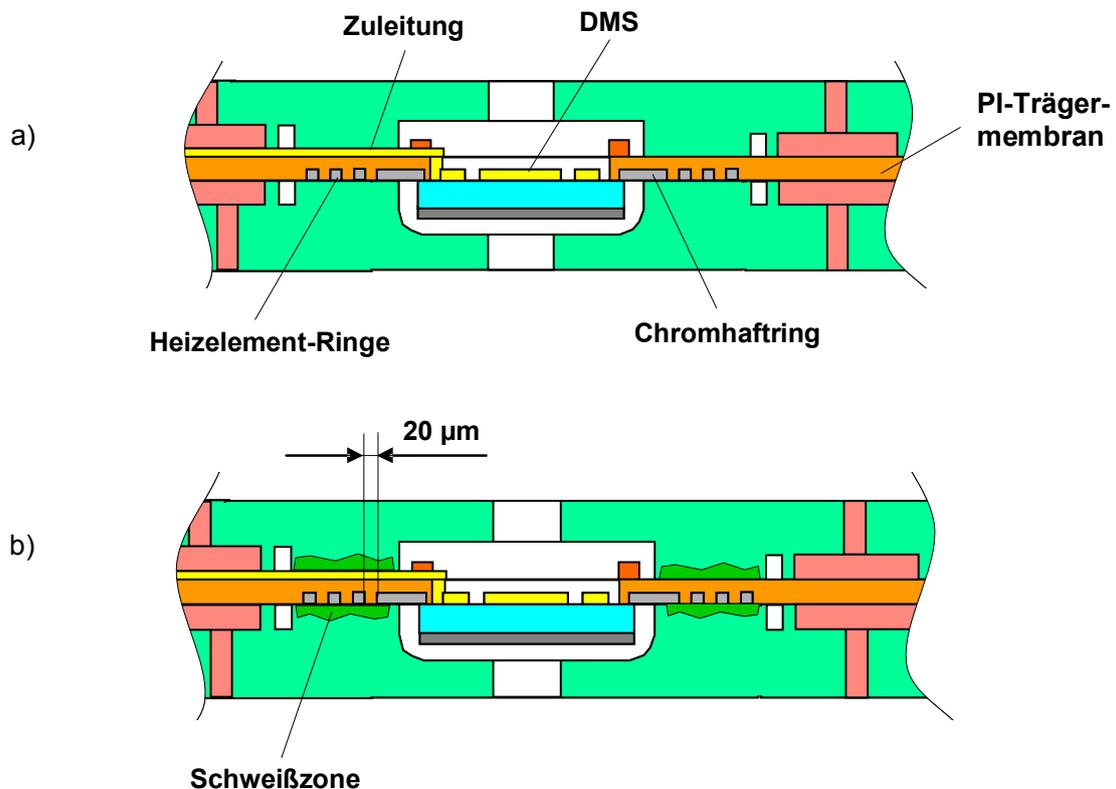


Bild 5.2-1: Dargestellt ist ein Schema des Drucksensors mit Glas-Kreisplatte a) vor dem Heizelementschweißen, b) nach dem Schweißen mit eingezeichnete Schweißzone.

Ein weiterer problematischer Punkt ist der Chromhaftring selbst. In dieser Arbeit wurde in Kapitel 2.10 schon erwähnt, dass Chromschichten auf Dünnglas bis zu 200 nm, und wahrscheinlich auch dickere Schichten, nicht vollständig deckend sind. Vergleichbare

Erfahrungen wurden am IMT an Siliziumwafern gemacht, die zum anisotropen Ätzen in Kalilauge mit Chrom maskiert worden waren [Mand05]. Die Chromschicht war nicht vollständig geschlossen, so dass die Wafer an vielen Stellen punktförmig von der Kalilauge angeätzt worden waren. Es ist daher damit zu rechnen, dass die PI-Trägermembran durch einen Chromhafring nicht zuverlässig gegen eine Flüssigkeit abgedichtet werden kann.

Gegen eine Abdichtung der Sensorkammer durch Umschweißen mit einem Heizelement sprechen die oben aufgeführten Argumente auch bei einem Nickeldrucksensor. Dennoch soll hier noch erwähnt werden, dass Heizelemente beim Nickeldrucksensor besonders vorteilhaft hergestellt werden könnten. In Kapitel 2.11.3-1 wurde gezeigt, dass dickere Heizelemente notwendig sind, um auch PEEK bei Temperaturen von mehr als 334 °C zu verschweißen. Da auf der Trägermembran des Nickeldrucksensors für die galvanische Herstellung der Kreisplatte aus Nickel eine elektrisch gut leitfähige Startschicht aus Chrom-Gold aufgebracht wird, könnten auf dieser in einem weiteren Galvanikschritt Ringheizelemente in der zum Schweißen von PEEK benötigten Schichtdicke, z. B. aus Nickel, entstehen. Nach der Herstellung der Kreisplatten müsste die Startschicht durch Nass- oder Trockenätzen wieder entfernt werden, da die Heizelemente anderenfalls kurzgeschlossen wären. Gleichzeitig mit den Heizelementen könnte um die Kreisplatte herum ein dem Chromhafring äquivalenter Ring aus Nickel aufgalvanisiert werden. Dieser könnte im Gegensatz zum Chromhafring aufgrund seiner größeren Schichtdicke und dem Werkstoff Nickel flüssigkeitsdicht sein.

Aufgrund von Erfahrungen aus dem Ultraschallschweißen, über die im folgenden Kapitel berichtet wird, muss allerdings bezweifelt werden, dass eine thermoplastische Kunststoffschmelze auf einem metallischen Heizelement, z. B. aus Chrom- oder aus Nickel, flüssigkeitsdicht haften würde.

5.2.2 Ultraschallschweißen

Beim Drucksensor mit galvanisch hergestellter Kreisplatte könnten, anstelle von Heizelementen, Ringe um die Sensorkammer aufgebracht werden, die als Energierichtungsgeber (ERG) zum Ultraschallschweißen dienen könnten (s. Bild 5.2-2).

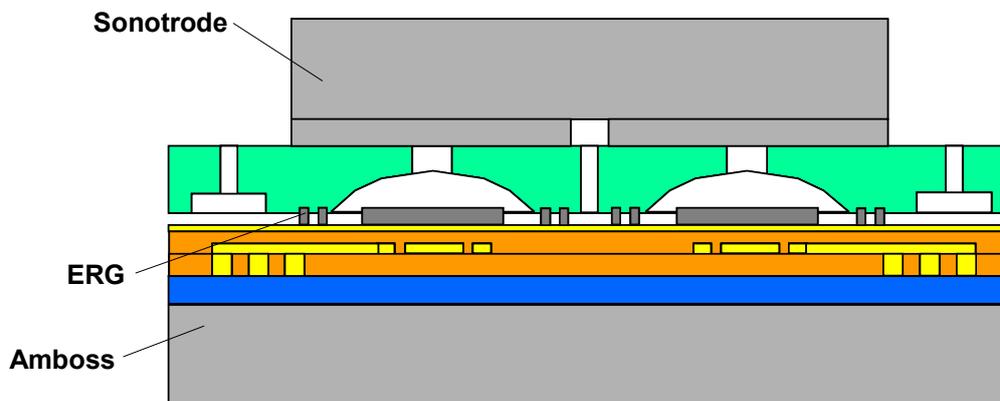


Bild 5.2-2: Ultraschallschweißen des ersten Gehäusenutzens. Die Trägermembran befindet sich noch auf dem Wafer.

Wenn die Ringe gleichzeitig mit der Nickelkreisplatte galvanisch hergestellt würden, könnte der Querschnitt der Ringe z. B. $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ betragen. Der Gehäusenutzen müsste wie beim Kammerkleben vor dem Verschweißen auf den Wafer mit der fertig strukturierten Trägermembran positioniert werden. Nach dem Positionieren könnte die Ultraschallschweißung erfolgen.

Fraglich ist auch hier, wie gut der Kunststoff auf den ERG, z. B. aus Nickel, haften würde. Gewindeeinsätze, die mit Ultraschall in Bohrungen von Kunststoffplatten eingebracht werden, sind nach Aussage von Firma Sonotronic [Sono05] nicht flüssigkeitsdicht. Der beim Ultraschallschweißen aufgeschmolzene Kunststoff verkrallt sich lediglich in der Rillenstruktur

auf der Außenseite der Gewindeeinsätze. Der Kunststoff hat jedoch kaum Haftung auf dem Metall. Weiterhin bestünde die Gefahr, dass die Trägermembran und damit die Zuleitungen zu den DMS durch die Ultraschallschwingungen beschädigt würden.

5.2.3 Abdichten mit Indiumlot

Indium kann als niedrigschmelzendes, ohne Flussmittel fließendes Lot eingesetzt werden. Besonders für Drucksensoren mit galvanisch hergestellter Nickelkreisplatte bietet es sich an, auf der Chrom-Gold-Startschicht der PI-Trägermembran noch vor der Herstellung der Nickelkreisplatten Indiumringe zu galvanisieren (Bild 5.2-3). Eine Indiumschichtdicke von $5\ \mu\text{m}$ ist nach [Rau86] als Dichtung ausreichend. An den Stellen des großen Gehäusenutzens, die den Indiumringen gegenüberliegen, müsste der Gehäusenutzen metallisiert werden, damit das aufgeschmolzene Lot auf dem großen Gehäusenutzen haften kann. Möglich wäre z. B., mit einer Sputtermaske eine Chrom-Goldschicht auf die Flächen um die Sensorkammern zu sputtern.

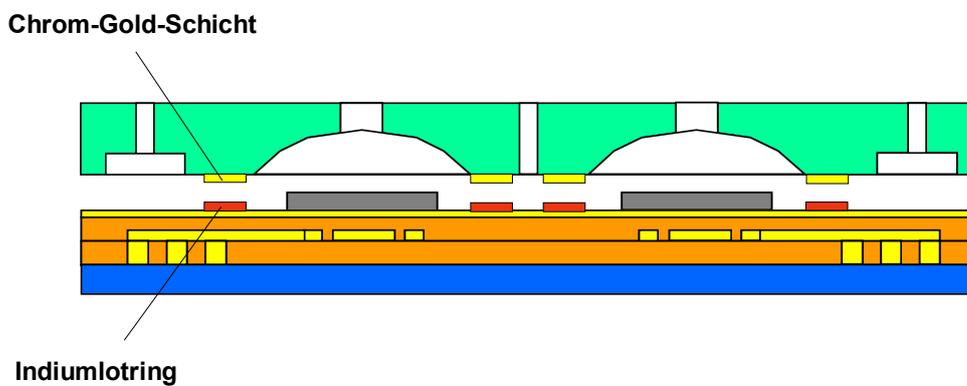


Bild 5.2-3: Hermetische Abdichtung mit Indiumlotringen.

In der Kammerklebeapparatur könnte der große Gehäusenutzen auf den Wafer mit den Nickelkreisplatten und den Indiumlotringen ausgerichtet und angepresst werden. Durch Erwärmen auf z. B. $170\ ^\circ\text{C}$ würde das Lot aufschmelzen und die metallisierte Fläche des großen Gehäusenutzens benetzen. Ein Sensorgehäuse aus PEEK würde die verhältnismäßig geringe Löttemperatur von $170\ ^\circ\text{C}$ leicht aushalten.

5.2.4 Abdichten durch Kaltschweißen

Beim Kaltschweißen werden zwei metallbeschichtete Teile unter Druck bei niedrigen Temperaturen unlösbar miteinander verbunden. Auch Kaltschweißen ist mit Indium möglich. In [Sing99] ist es gelungen, Silizium-Mikromechanik-Teile mit $15\ \mu\text{m}$ dicken Indium-Höckern auf Kupferflächen von CMOS-Schaltungen kaltzuschweißen. Sowohl die Indium-Höcker als auch die Kupferflächen wurden galvanisch hergestellt. Vor dem Kaltschweißen wurden die Schweißflächen mit 10:1 verdünnter Salzsäure gereinigt. Ausreichender Andruck von $20\text{--}350\ \text{N/mm}^2$ auf die Schweißflächen erbrachte gute Schweißergebnisse ohne Aufschmelzen des Indiums. Alternativ wurde Aufschmelzen des Indiums bei $170\ ^\circ\text{C}$ für 30 s angewendet, wenn die Mikrostrukturen einem hohen Andruck nicht standhalten konnten.

Der erforderliche Andruck beim Kaltschweißen fiel in [Poll89] mit abnehmender Schichtdicke und steigender Temperatur. Bei RT und Schichtdicken von einigen hundert Nanometern musste ein Andruck von $280\text{--}350\ \text{bar}$ aufgebracht werden. Bei Schichtdicken von $0,5\text{--}55\ \text{nm}$ wurde praktisch kein Andruck benötigt.

An Goldfedern aufgehängte Polysiliziumdeckel, die an galvanisch hergestellten Federn eines Geber-Wafers befestigt waren, wurden in [Maha99] auf $4\ \mu\text{m}$ dicke Dünnschicht-Goldhöcker eines Nehmer-Wafers durch Kaltschweißen bei Raumtemperatur übertragen. Die Verbindungstechnik war unempfindlich gegenüber Partikeln und Rauigkeiten bis $500\ \text{nm}$.

Um eine Sensorkammer des Drucksensors abzudichten, könnten Ringe aus Indium oder Gold auf der PI-Trägermembran um die Sensorkammern und gegenüberliegend auf den Gehäusenutzen galvanisch, eventuell stromlos, abgeschieden werden.

5.3 Fluidischer Anschluss

Als fluidischer Anschluss wurde bisher [Wulf01] ein Edelstahlröhrchen verwendet, welches in eine Hülse aus PEEK eingepresst wurde. Das kurz aus der Hülse herausstehende Ende des Röhrchens wurde in die Bohrung der Sensorkammer gedrückt (Bild 5.3-1).

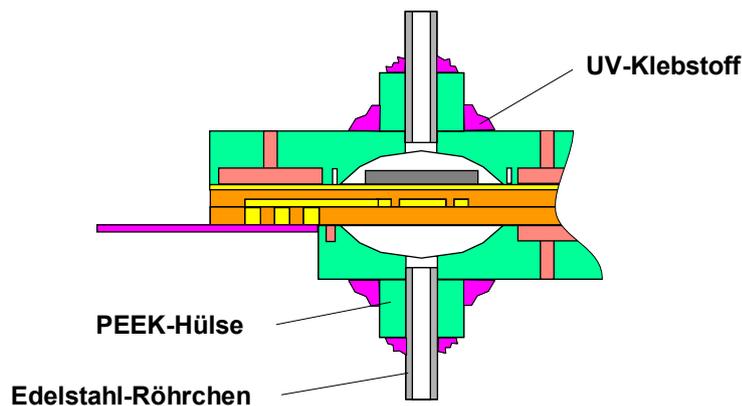


Bild 5.3-1: Drucksensor mit angeklebten fluidischen Anschlüssen.

Mit UV-Kleber wurde die Hülse am Gehäuse befestigt. Gleichzeitig wurde das Röhrchen zur Hülse hin mit UV-Klebstoff abgedichtet. Durch Stülpen eines Schlauches über das Röhrchen konnte der Drucksensor fluidisch kontaktiert werden. Nachteil der so ausgeführten fluidischen Anschlüsse ist, dass wiederum Flüssigkeit durch Spalten bis zum Klebstoff kriechen kann. Dies sollte nach Lastenheft verhindert werden, da die Flüssigkeit im Drucksensor nicht durch Herauslösen von Stoffen aus dem Klebstoff verunreinigt und die mechanische Festigkeit der Klebeverbindung nicht beeinträchtigt werden durfte.

Ein weiterer Nachteil des fluidischen Anschlusses von Bild 5.3-1 ist das große eingeschlossene Totvolumen. Das Totvolumen setzt sich zusammen aus dem Volumen der Drucksensorkammerhälfte, des Röhrchens und des daran anschließenden Verbindungsschlauchs bis zur Einmündung in die Leitung, deren Flüssigkeitsdruck gemessen werden soll. Eingebaut in ein mikrofluidisches Gerät könnte die im Totvolumen des Drucksensor stehende Flüssigkeit nur schlecht herausgespült, geschweige denn vollständig ausgetauscht werden. Ein chemisch beständiger fluidischer Anschluss mit geringem Totvolumen könnte z. B. wie in Bild 5.3-2 dargestellt aussehen.

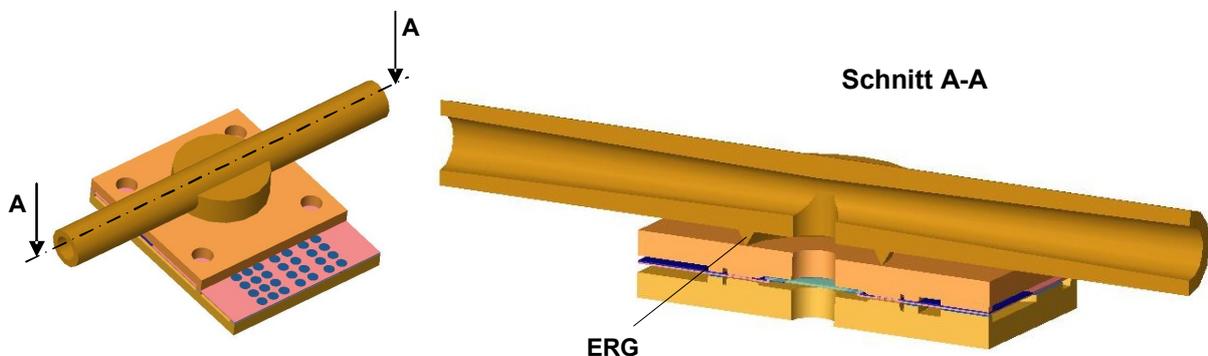


Bild 5.3-2: Kappe mit Rohrenden aus PEEK wird mit Ultraschall auf den Drucksensor geschweißt.

Auf den Drucksensor wird eine durch Spritzguss hergestellte PEEK-Kappe mit Rohrenden ultraschallgeschweißt, wobei der ringförmige ERG beim Schweißen schmilzt.

5.4 Schrumpfung heißgeprägter Gehäuse

In [Wulf01] wurde versucht, die Sensorkammer so zu gestalten, dass der Sensor hinsichtlich einer exzentrischen Lage der Kreisplatte in der Sensorkammer tolerant ist. Von den hierzu notwendigen kugelschalenförmigen Kammerhälften wurde später aus fertigungstechnischen Gründen abgewichen. Als Kompromisslösung wurde die Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens zylindrisch mit verrundeter Innenkante ausgeführt (s. Verrundung in Bild 5.4-1). Wird die Exzentrizitätstoleranz dieser Kammerform näher untersucht, so kann für die zylindrische Sensorkammer festgestellt werden, dass eine Exzentrizität von höchstens 60 μm mit Einschränkung tolerierbar ist (Bild 5.4-1).

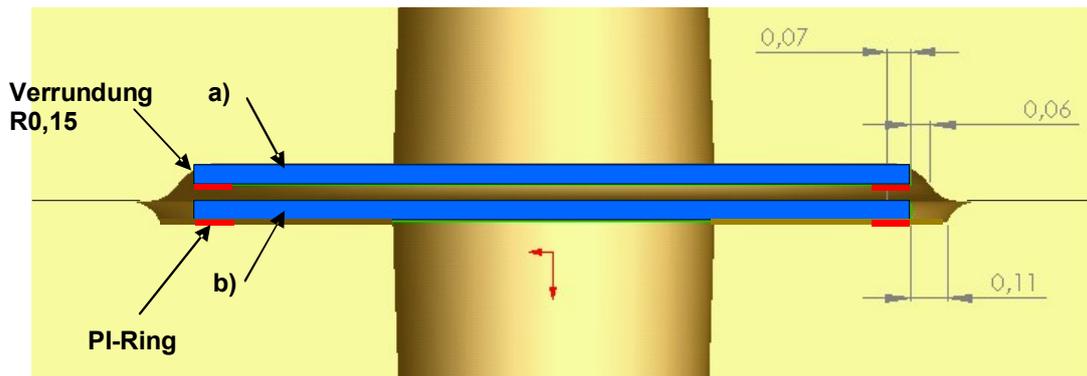


Bild 5.4-1: Tolerierbare Exzentrizität in der zylinderförmigen Sensorkammer. Dargestellt ist die Kreisplatte in den Lagerungsfällen: a) Druck liegt unten an und b) Druck liegt oben an.

Nur bei einer Exzentrizität von kleiner als 60 μm befindet sich der Rand der Kreisplatte im Lagerungsfall a) noch im Bereich der Verrundung. In Kapitel 3.2.3 wurde schon erläutert, dass die Verrundung kein gleichwertiger Ersatz für die ursprünglich geplanten, kugelschalenförmigen Kammerhälften darstellt, da die Kreisplatte nur bei exakt zentrischer Lage überall mit ihrem Rand auf der Verrundung aufliegt. Bei einer Exzentrizität von z. B. 30 μm setzt die Kreisplatte bei Druckbeaufschlagung nur mit drei zufälligen Punkten ihres Randes in der Verrundung auf und verformt sich bei weiterer Druckerhöhung unsymmetrisch zur ihrer Mittelachse. Dies hat negative Auswirkungen auf die Steigung und Linearität der Kennlinie in dieser Druckrichtung. Eine von ihrer Exzentrizität in der Sensorkammer unabhängige, immer gleichartige, vollständige Randlagerung der Kreisplatte ist nur in einer kugelschalenförmigen Kammerhälfte möglich.

Mit einer linsenförmigen Sensorkammer, die sich aus zwei kugelschalenförmigen Kammerhälften zusammensetzt, ist zudem eine wesentlich größere Exzentrizitätstoleranz erzielbar, wie aus Bild 5.4-2 hervorgeht. \emptyset

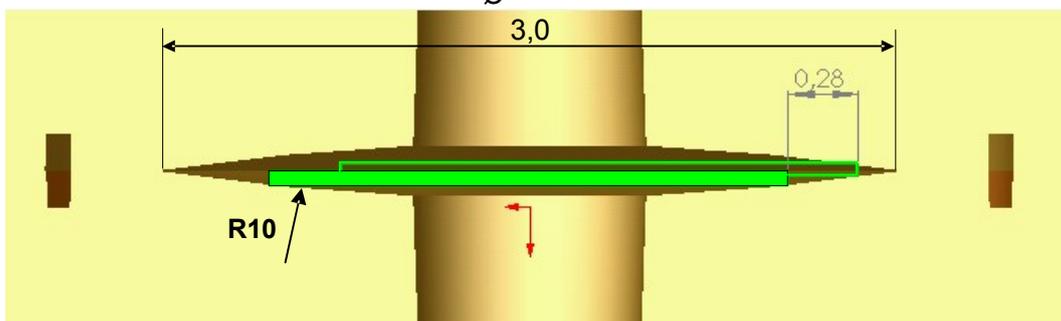


Bild 5.4-2: Tolerierbare Exzentrizität einer Kreisplatte in der linsenförmigen Sensorkammer eines Nickel-drucksensors. a) Kreisplatte in zentrierter Lage, b) Kreisplatte maximal exzentrisch gelagert.

Bei einem Schalenradius von 10 mm und einem Kammerdurchmesser von 3 mm ergibt sich eine Exzentrizitäts-Toleranz von 280 μm . Dass eine große Exzentrizitätstoleranz benötigt

wird, zeigte sich nach dem Kleben von Gehäusenutzen auf fertig prozessierte Substrate. Im Bild 5.4-3 sind Positionierbohrungen eines PSU-Gehäuses zu sehen, welche vor dem Kammerkleben auf die Positioniermarken, im Folgenden auch ‚Kreismarken‘ genannt, des Substrats ausgerichtet wurden. Aufgrund eines Unterschieds zwischen dem Abstand der Positionierbohrungen im Gehäusenutzen und dem Abstand der Kreismarken auf dem Substrat, konnten die Positionierbohrungen nicht gleichzeitig genau auf die Mitte der Kreismarken ausgerichtet werden. Daher wurde vermittelnd positioniert, d. h. so, dass beide Positionierbohrungen ungefähr die gleiche Exzentrizität zum Mittelpunkt der Kreismarken haben (Bild 5.4-3). Die Positionierung des Gehäusenutzens gelang im dokumentierten Fall sehr gut. Das PSU-Gehäuse wurde ca. 10 μm zu weit nach rechts positioniert. Jedoch muss beim Kammerkleben mit Positionsabweichungen von etwa der Hälfte einer Linie einer Kreismarke, d. h. von ca. 50 μm gerechnet werden.

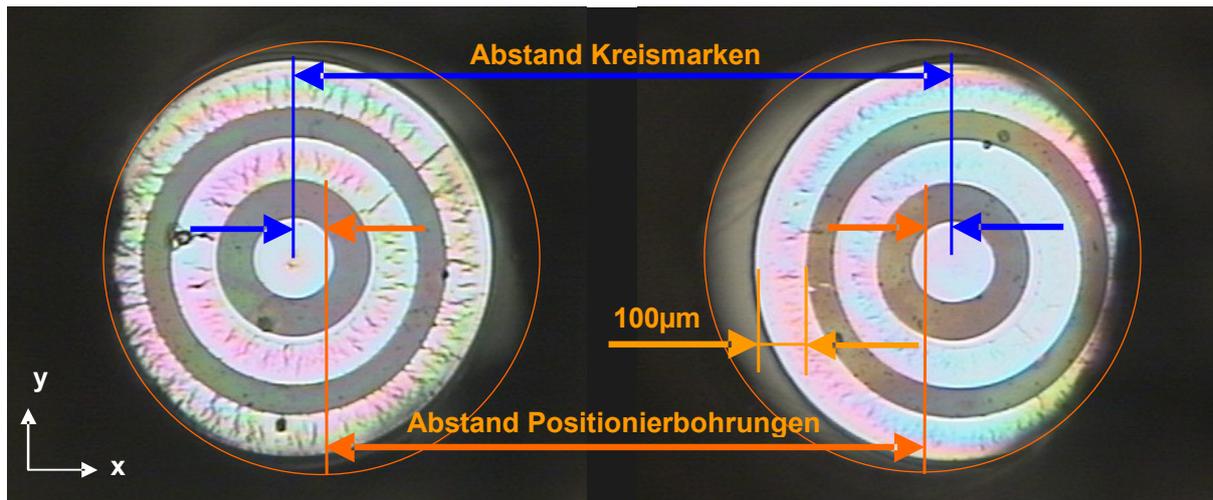


Bild 5.4-3: Linke und rechte Kreismarke des Substrats sichtbar durch die Positionierbohrung eines PSU-Gehäusenutzens. Die Positionierbohrungen wurden vermittelnd auf die Kreismarken ausgerichtet.

Der in den Bildern 5.4-4 und 5.4-5 dargestellte Nutzen wurde bei RT verklebt. Für die Sensorstellen in den Gehäusenutzen wurden die Bezeichnungen S1 bis S12 festgelegt (s. Bild 5.4-6). Die maximale Kreisplatten-Exzentrizität in x-Richtung betrug für den Sensor S7 ca. -128 μm und für den Sensor S12 ungefähr +148 μm . Da ein transparentes Gehäuse aus PSU verwendet worden war, ist die Exzentrizität der Kreisplatten in den Sensorkammern S7 und S12 der Bilder 5.4-4 und 5.4-5 gut erkennbar.

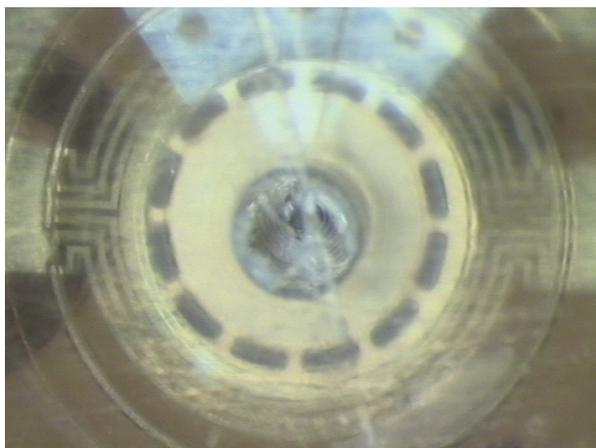


Bild 5.4-4: 128 μm nach links versetzte Kreisplatte in der Sensorkammer S7. Blick durch Tesafilm und das PSU-Gehäuse in die Sensorkammer.

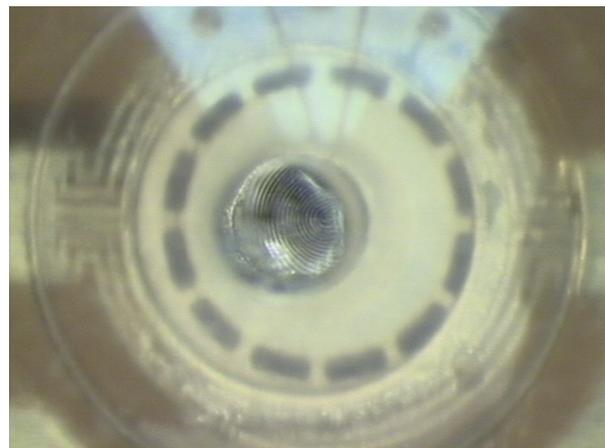


Bild 5.4-5: 148 μm nach rechts versetzte Kreisplatte in der Sensorkammer S12. Blick durch Tesafilm und das PSU-Gehäuse in die Sensorkammer.

Addiert man die Beträge der Exzentrizitäten von S7 und S12, so ergibt sich daraus die Überlänge des Abstands der Kreisplatten auf dem Substrat gegenüber dem Abstand der zugehörigen Sensorkammern im Gehäusenutzen. Die Abstandsdifferenz betrug 276 μm oder

anders formuliert: Die betrachteten Kreisplatten standen $276\ \mu\text{m}$ weiter auseinander als die Sensorkammern. Bei vermittelnder Positionierung wie oben beschrieben ergibt sich daher eine nicht ausgleichbare Exzentrizität der Kreisplatten in den Sensorkammern S7 und S12 von der Hälfte der Abstandsdifferenz, also von $138\ \mu\text{m}$. Rechnet man zu dieser unvermeidbaren Exzentrizität noch die maximale Positioniergenauigkeit beim Kammerkleben von $50\ \mu\text{m}$ hinzu, so ergibt sich daraus eine maximal mögliche Exzentrizität von $188\ \mu\text{m}$ für die Sensoren S7 und S12. Dieser Wert liegt immer noch weit innerhalb der Exzentrizitätstoleranz von $280\ \mu\text{m}$ der linsenförmigen Sensorkammer von Bild 5.4-2. Dagegen ist die maximal erlaubte Exzentrizität der zylinderförmigen Sensorkammer von Bild 5.4-1 von $60\ \mu\text{m}$ längst überschritten.

Für die Maßunterschiede zwischen den fluidischen Strukturen des Gehäusenutzens und den lithografischen Strukturen auf der PI-Trägermembran gibt es mehrere Ursachen. Eine Ursache war der Schrumpf der Kunststoffgehäuse nach dem Heißprägen. Die bei hohen Temperaturen heißgeprägten Kunststoffteile schrumpfen beim Abkühlen, was auch vom Kunststoffspritzguss her bekannt ist. Am IMT werden Abformwerkzeuge ohne Einbeziehung des zu erwartenden Kunststoffschumpfs hergestellt, d. h. die Werkzeuge werden nicht, wie im Kunststoffspritzguss sonst üblich, um den Schrumpf größer skaliert. Mit einem CAD-System modellierte und gezeichnete Gehäusenutzen besitzen daher nach dem Heißprägen nicht die Zeichnungsmaße sondern um den Schrumpf reduzierte Maße. Diese Vorgehensweise stellt jedoch kein Problem dar, da der Schrumpf bei der Herstellung der lithografischen Komponenten, von z. B. einem fluidischen Sensor, in Form eines Skalierungsfaktors für die Strukturen auf den Chrommasken berücksichtigt wird. Der Faktor betrug bei den verwendeten Chrommasken $0,9984$, was bedeutet, dass die lithografischen Strukturen auf der Chrommaske und später auf dem Substrat um $0,16\ \%$ gegenüber den gezeichneten Maßen des Gehäusenutzens verkleinert wurden. Die $0,16\ \%$ entsprechen jedoch nicht direkt dem Schrumpf des abgeformten Kunststoffes. Vielmehr sind im Skalierungsfaktor außer dem Schrumpf noch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der verschiedenen Werkstoffe bei Kammerklebetemperatur (KT) mit einbezogen worden. In den meisten Fällen wird bei einer Temperatur von $100\text{--}120\ \text{°C}$ verklebt. Der Skalierungsfaktor wurde so gewählt, dass die fluidischen und lithografischen Strukturen beim Kammerkleben genau zusammenpassen.

Folgende Randbedingungen werden also im Skalierungsfaktor berücksichtigt:

- Schrumpf des Kunststoffgehäuses nach dem Heißprägen
- Wärmeausdehnung des Kunststoffgehäuses von RT auf KT
- Wärmeausdehnung des Substrates von RT auf KT

In der Tabelle 5.4-1 wurden für ein PSU-Gehäuse und ein Glassubstrat die Abstandsdifferenzen für die Sensoren S7 und S12 bei verschiedenen Kammerklebetemperaturen nachgerechnet. Es wurden typische Spritzguss-Schrumpfwerte der Kunststoffe verwendet [Heil96]. Die WAK beruhten auf Herstellerangaben der Firma Lipp-Terler, Gaflenz, Österreich [Lipp05] bzw. der Firma Schott AG [Scho05]. Nach dieser Rechnung ergibt sich beim Kleben eines PSU-Gehäuses auf ein Glassubstrat bei $KT = 20\ \text{°C}$ und einem gezeichneten Abstand der Sensoren S7–S12 von $43,4\ \text{mm}$ eine Maßdifferenz von $234\ \mu\text{m}$ (Nr.1), was der beim PSU-Gehäusenutzen gemessenen Abstandsdifferenz von $276\ \mu\text{m}$ nahe kommt. Bei der Paarung Silizium-PSU und einer KT von $130\ \text{°C}$ (Nr.3) beträgt die Maßdifferenz nur noch $-6\ \mu\text{m}$. Das Abformwerkzeug für die Gehäusenutzen ist in [Wulf01] also für die Abformung von PSU und Kammerkleben auf ein Siliziumsubstrat bei einer KT von $130\ \text{°C}$ ausgelegt worden.

Nr	Werkstoff	gezeichneter Abstand S7-S12	Skalierfaktor oder Schrumpf	Abstand S7-S12 auf dem Substrat bei RT	KT	WAK	Abstand S7-S12 im Gehäusenutzen bei KT	Differenz der Abstände bei KT	Erforderliche Exzentrizitätstoleranz
		[mm]	[1]	[mm]	[°C]	[1/K]	[mm]	[µm]	[µm]
1	Glas D 263 T	43,40	0,9984	43,3306	20	7,20E-06	43,3306	234	117
	PSU	43,40	0,0070	43,0962	20	5,40E-05	43,0962		
2	Glas D 263 T	43,40	0,9984	43,3306	120	7,20E-06	43,3618	33	16
	PSU	43,40	0,0070	43,0962	120	5,40E-05	43,3289		
3	Silizium	43,40	0,9984	43,3306	130	3,30E-06	43,3463	-6	-3
	PSU	43,40	0,0070	43,0962	130	5,40E-05	43,3522		

Tabelle 5.4-1: Mögliche Differenzen des Abstandes S7-S12 der Kreisplatten auf dem Substrat und der Sensorkammern in Gehäusenutzen aus PSU bei unterschiedlichen Substrat-Werkstoffen und verschiedenen KT.

Aus der Differenz der Abstände S7-S12 auf dem Substrat und im Gehäusenutzen bei KT kann die erforderliche Exzentrizitätstoleranz der Sensorkammer berechnet werden. Die Exzentrizitätstoleranz entspricht der halben Differenz der Abstände bei KT. Bei KT = 20 °C ist z. B. eine Exzentrizitätstoleranz von 117 µm (Nr. 1) erforderlich, damit an allen zwölf Sensorstellen eines Gehäusenutzens aus PSU nach dem Kammerkleben auf das Glassubstrat funktionierende Drucksensoren entstehen können. Da die Exzentrizitätstoleranz von zylinderförmigen Sensorkammern jedoch nur 60 µm beträgt, können im Fall Nr. 1 nur vier von zwölf funktionierende Drucksensoren entstehen.

In dieser Arbeit sollten jedoch PEEK-Gehäusenutzen verwendet werden. Diese mussten zudem bei niedrigen Temperaturen auf die Glassubstrate geklebt werden, damit diese durch den Zweimaterialeffekt nicht zerstört wurden. Daher ergeben sich für PEEK-Gehäuse wesentlich größere Abstandsdifferenzen und damit eine höhere erforderliche Exzentrizitätstoleranz wie Tabelle 5.4-2 zeigt.

Nr	Werkstoff	gezeichneter Abstand S7-S12	Skalierfaktor oder Schrumpf	Abstand S7-S12 auf dem Substrat bei RT	KT	WAK	Abstand S7-S12 im Gehäusenutzen bei KT	Differenz der Abstände bei KT	Erforderliche Exzentrizitätstoleranz
		[mm]	[1]	[mm]	[°C]	[1/K]	[mm]	[µm]	[µm]
4	Glas D 263 T	43,40	0,9984	43,3306	20	7,20E-06	43,3306	365	182
	PEEK	43,40	1,00%	42,9660	20	4,60E-05	42,9660		
5	Glas D 263 T	43,40	0,9984	43,3306	50	7,20E-06	43,3399	315	157
	PEEK	43,40	1,00%	42,9660	50	4,60E-05	43,0253		
6	Glas D 263 T	43,40	0,9984	43,3306	120	7,20E-06	43,3618	198	99
	PEEK	43,40	1,00%	42,9660	120	4,60E-05	43,1636		

Tabelle 5.4-2: Mögliche Differenzen des Abstandes S7-S12 auf dem Substrat und im Gehäusenutzen aus PEEK bei Dünnglassubstraten und verschiedenen KT.

Bei PEEK ist im gesamten, betrachteten KT-Bereich, d. h. von 20 °C bis 120 °C, die erforderliche Exzentrizitätstoleranz größer als die Exzentrizitätstoleranz von zylinderförmigen Sensorkammern. Bei Verwendung von zylinderförmigen Sensorkammern wären daher bei einer KT von 20 °C acht und im ungünstigsten Fall sogar zehn von zwölf Sensoren nach dem Kammerkleben nicht funktionsfähig. Bei einer KT von 120 °C wäre, abhängig von der erzielten Positioniergenauigkeit, mit einem Ausschuss von vier oder sechs Sensoren zu rechnen. Die Exzentrizitätstoleranz von linsenförmigen Sensorkammern ist dagegen auch bei PEEK als Gehäusewerkstoff ausreichend.

Generell könnte bei membranbasierten, mikrofluidischen Komponenten in Zukunft ein kleinerer Maßunterschied zwischen den fluidischen Strukturen im Gehäusenutzen und den lithografischen Strukturen auf der Trägermembran gefordert werden. Zudem müsste in einer kommerziellen Serienproduktion membranbasierter Komponenten die volle Fläche der relativ teuren Substrate, wie z. B. eines 4"-Wafers aus Dünnglas oder Silizium, ausgenutzt werden. Durch eine bessere Flächenausnutzung der Substrate könnten mehr Komponenten parallel hergestellt werden, wodurch die Bauteile preisgünstiger würden. Bei den Drucksensoren dieser Arbeit wurde bisher nur ein Bereich von 21 x 58 mm² des Glassubstrats bzw. eines 4"-Wafers ausgenutzt, wobei zwölf Sensoren parallel hergestellt werden konnten. Bei voller Ausnutzung eines 4"-Wafers könnten, bei gleichen Außenabmessungen eines einzelnen

Sensoren von $7,5 \times 9,5 \text{ mm}^2$, ca. 76 Sensoren parallel hergestellt werden. Der weiteste Abstand zweier Sensoren wäre dann ungefähr doppelt so groß wie der Abstand von S7–S12 und würde 84 mm betragen. Auch über diese Distanz hinweg dürfte die Exzentrizität der Kreisplatten bei Drucksensoren mit linsenförmigen Drucksensorkammern nicht größer als $280 \text{ }\mu\text{m}$ werden.

Um geringere Maßunterschiede zwischen lithografischen und mikrofluidischen Strukturen zu erzielen, könnte der Skalierungsfaktor eventuell genauer bestimmt werden. Das wäre möglich, wenn der Schrumpf eines Gehäusenutzens erst nach dem Heißprägen durch Ausmessen ermittelt würde. Aus dem ermittelten Schrumpf, den WAK der beteiligten Werkstoffe und der festgelegten KT könnte dann der Skalierungsfaktor für die Chrommasken genau abgeleitet werden. Für diese Vorgehensweise spricht auch, dass der Schrumpf von Kunststoffbauteilen nicht nur vom verwendeten Kunststoff abhängt, sondern auch von den Prozessparametern beim Abformen wie Temperatur- und Druckverlauf sowie von der Geometrie des Bauteils. Von Herstellern erhältliche Schrumpfwerte gelten außerdem in erster Linie für den Kunststoff-Spritzguss und nicht für das Heißprägen. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass die erhältlichen Schrumpfwerte nicht genau genug sind, um daraus den Skalierungsfaktor für die lithografischen Strukturen membranbasierter, mikrofluidischer Komponenten zu berechnen. Im Folgenden wird gezeigt, wie der Heißprägeschrumpf eines Gehäusenutzens auf einfache Weise vermessen werden kann.

5.4.1.1 Ermittlung von Schrumpfwerten und eines Skalierungsfaktors für PEEK

Zunächst wurden Bezeichnungen und ein Koordinatensystem für die Gehäusenutzen festgelegt (Bild 5.4-6).

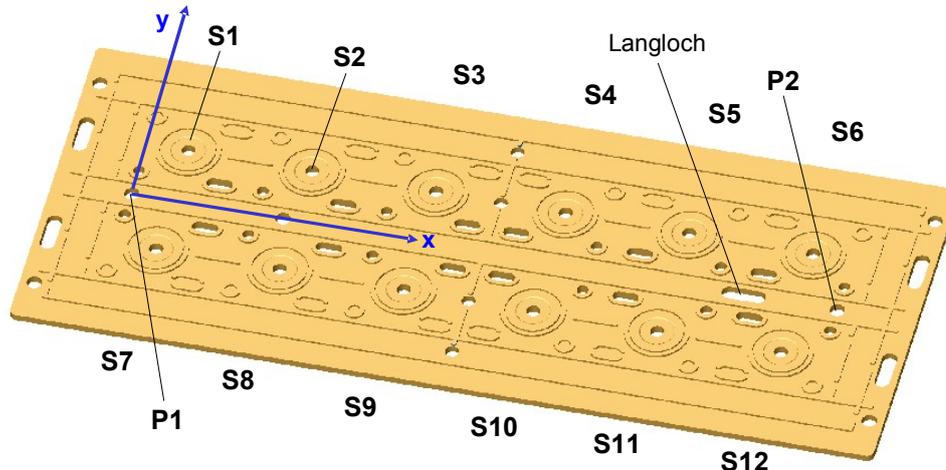


Bild 5.4-6: Festlegung von Bezeichnungen und eines Koordinatensystems für einen großen Gehäusenutzen.

Die Sensorstellen wurden mit S1 bis S12, die Positionierbohrungen mit P1 und P2 bezeichnet. Der Nullpunkt des Koordinatensystems wurde in die Bohrung P1 gelegt. Das Langloch des großen Gehäusenutzens lag bei allen Messungen in der Aufsicht rechts.

Für die Messungen wurde ein Messmikroskop Aristomet der Firma Leitz, Wetzlar verwendet. Das Mikroskop verfügte über einen elektrisch angetriebenen Tisch dessen Fahrweg μm -genau angezeigt wurde. Zunächst wurde die Messgenauigkeit des Mikroskops überprüft. Dazu wurden 20 Messungen an einer Chrommaske vorgenommen, auf welcher ein 100 mm langes Linealkreuz abgebildet war. Gemessen wurde 20-mal der Abstand 80 mm . Die Messungen ergaben einen Mittelwert von $79,9962 \text{ mm}$ mit einer Standardabweichung von $0,8 \text{ }\mu\text{m}$.

Zu Beginn von Messungen an einem Gehäusenutzen wurde die x-Achse des Nutzens parallel zur x-Achse des Messmikroskops ausgerichtet. Hierzu wurde der Gehäusenutzen auf eine quadratische ca. $100 \times 100 \text{ mm}^2$ und 2 mm dicke Messingplatte gelegt. Dann wurde einer der großen Längsstege des Gehäusenutzens ausgewählt und die Spitzen des Fadenlineals des Mikroskops wurden an einem Ende des Stegs auf eine Kante gefahren.

Durch Fahren des Tisches in x-Richtung wurde anschließend die x-Ausrichtung des Stegs überprüft. Wenn die Spitzen des Fadenlineals sich während der Fahrt von der Kante entfernten, wurde die Metallplatte, auf welcher der Gehäusenutzen lag, von Hand gedreht. Das Gewicht der Metallplatte war bei dieser Vorgehensweise sehr von Vorteil und ermöglichte kleinste Drehungen zur Ausrichtung des Gehäuses. Durch mehrfaches Wiederholen dieser Vorgehensweise ließ sich der Gehäusenutzen exakt auf das Koordinatensystem des Fahrtischs ausrichten.

Da vermutet wurde, dass der Schrumpf in Längs- und in Querrichtung des Nutzens unterschiedlich groß sein würde, wurden jeweils zwei möglichst weit auseinander stehende Stege an den Längs- und Querseiten des Nutzens als Messpunkte verwendet. Es wurde darauf geachtet, an Stegen zu messen, die durch das Entformen des Gehäusenutzens nach dem Heißprägen nicht verbogen und deren Kanten beim Entformen nicht abgerundet worden waren. In Bild 5.4-7 sind die Messstellen am Gehäusenutzen mit Pfeilen markiert worden.

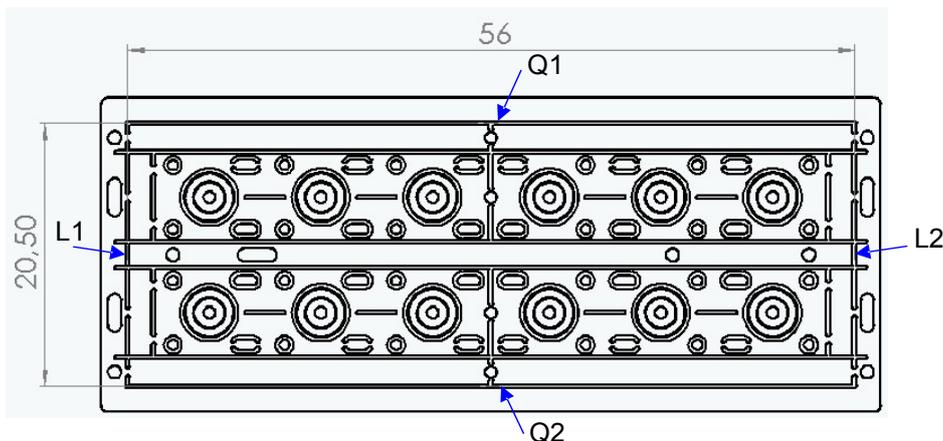


Bild 5.4-7: Stege der Gehäusenutzen, an welchen der Schrumpf der Gehäuse gemessen wurde. L1-L2: Stegabstand in Längsrichtung, Q1-Q2: Stegabstand in Querrichtung

Gemessen wurde von Mitte Steg zu Mitte Steg. Dazu wurde das Fadenlineal des Messmikroskops verwendet. Die Stegabstände wurden jeweils 10-mal gemessen. Die gleichen Messungen wurden an jeweils drei Gehäusen eines Werkstoffs durchgeführt. An den gleichen Messstellen, wie in Bild 5.4-7 angegeben, wurde auch der Stegabstand im Formwerkzeug, in diesem Fall der Abstand der Stegnuten, ermittelt. Aus den Unterschieden der Stegabstände gemessen an den Gehäusen und am Formwerkzeug resultierten die Schrumpfwerte von Tabelle 5.4-3.

Werkstoff	Heißpräge-Schrumpf			Spritzguss-Schrumpf
	Richtung	Mittelwert	Stdabw	
PEEK	längs	0,72%	0,011%	1,00%
	quer	1,09%	0,097%	
PSU	längs	0,53%	0,006%	0,7 - 0,8%
	quer	0,49%	0,010%	
PMMA	längs	0,60%	0,005%	0,3 - 0,8%
	quer	0,46%	0,005%	

Tabelle 5.4-3: Schrumpfwerte der heißgeprägten Drucksensor-Gehäusenutzen.

Bei PEEK ist der Schrumpf des Nutzens in Querrichtung (y-Richtung) deutlich größer als in Längsrichtung (x-Richtung). Bei Nutzen aus PSU sind der Längs- und der Querschrumpf ungefähr gleich groß. Nutzen aus PMMA besitzen in Längsrichtung einen größeren Schrumpf. Um eine genaue Anpassung der fluidischen Strukturen von Gehäusenutzen aus PEEK auf die lithografischen Strukturen eines Substrats zu erreichen, wäre es wünschenswert, aber vermutlich mit einem CAD-System nicht machbar, zwei verschiedene Skalierfaktoren für die x- und y-Richtung beim Zeichnen von Chrommaskenstrukturalen zu haben. In Tabelle 5.4-4 wurden aus den ermittelten Schrumpfwerten für PEEK unter Berücksichtigung der Kammerklebetemperatur (KT) die Skalierfaktoren für die Längs- und Querrichtung berechnet.

Nr	Werkstoff	gezeichnetes Maß	Richtung	Schrumpf	Maß bei RT	KT	WAK	Maß bei KT	Skalierfaktor
		[mm]			[mm]	[°C]	[1/K·10 ⁻⁶]	[mm]	
1	Silizium	43,40	längs	—	43,400	50	3,30	43,4043	0,9941
	PEEK	43,40	längs	0,72%	43,088	50	46,00	43,1470	
2	Glas D 263 T	43,40	längs	—	43,400	50	7,20	43,4094	0,9940
	PEEK	43,40	längs	0,72%	43,088	50	46,00	43,1470	
3	Silizium	9,00	quer	—	9,000	50	3,30	9,0009	0,9904
	PEEK	9,00	quer	1,09%	8,902	50	46,00	8,9142	
2	Glas D 263 T	9,00	quer	—	9,000	50	7,20	9,0019	0,9903
	PEEK	9,00	quer	1,09%	8,902	50	46,00	8,9142	

Tabelle 5.4-4: Aus den Schrumpfwerten von PEEK abgeleitete Skalierfaktoren.

Da die Ausdehnung des Gehäusenutzens in y-Richtung gering ist, kann für Gehäusenutzen aus PEEK zukünftig der Skalierfaktor der Längsrichtung 0,9941 verwendet werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Glasdrucksensoren

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines Drucksensors weitergeführt, der abgesehen von Leiterbahnen und einer als Verformungselement dienenden Kreisplatte aus Kunststoff bestand. Die zur Fertigung von Glasdrucksensoren verwendeten 50 µm starken Dünnglasssubstrate erwiesen sich als äußerst zerbrechlich. Nach wenigen Fertigungsschritten waren anfänglich sämtliche Dünngläser beschädigt oder zerbrochen. Zunächst wurde daran gearbeitet, die Ausbringungsrate an fertig prozessierten Dünnglasssubstraten wesentlich zu erhöhen.

Es konnte festgestellt werden, dass die Dünngläser durch die Handhabung während der Fertigung zunehmend vorgeschädigt wurden. Als belastend für die Gläser und als für eine rationelle Fertigung ungeeignet wurde das bislang verwendete Trägersystem Wafer und Klebeband ausgemacht. Zur schonenden Handhabung beim Belacken und Entwickeln von Fotolacken auf Geräten, die mit Vakuum ausgestattet waren, wurde ein Vakuumträger entwickelt. Auf einen erhöhten Sockel des Vakuumträgers wurde das Dünnglas angesaugt, wobei das Glas den Sockelrand allseitig ca. 2 mm überragte. Durch den Überstand konnte verhindert werden, dass beim Lackschleudern an und unter die Glasränder gelangender Fotolack das Glas am Sockel anklebte. Durch kleine Bohrungen im Vakuumträger wurde das Dünnglas schwach angesaugt.

Zum Strippen und Entwickeln von Fotolacken auf dem Dünnglasssubstrat wurde ein Magnethalter entwickelt, der aus einer teflonbeschichteten Stahlscheibe und einer Magnetfolie bestand. Ein weiteres Trägersystem, das zum Chromätzen in einem Sprühentwickler verwendet wurde, bestand aus einem Wafer und einer Elastomerfolie aus Silikonkautschuk. Mit der Elastomerfolie konnte das Dünnglas beim Chromätzen am Rand abgedichtet werden, so dass die rückseitige Chromschicht des Dünnglasssubstrats vor einem unerwünschten Ätzangriff geschützt wurde.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Dünnglasssubstrate besonders stark beim Kontaktbelichten vorgeschädigt wurden. An den besonders rissempfindlichen Glasrändern befanden sich Fotolackrandwülste. Durch den Andruck der Chrommaske auf die Lackrandwülste bei der Kontaktbelichtung wurde besonders der empfindliche Rand des Dünnglases stark belastet. Zur Lösung des Problems wurde ein Maskenausrichter konstruiert, der die µmgenaue Ausrichtung einer Chrommaske auf einem vakuumfixierten Dünnglasssubstrat (oder einem 4"-Wafer) unter einem Lichtmikroskop ermöglichte. Kernstück des Maskenausrichters war eine Vakuumplatte, die so dimensioniert war, dass die Ränder des Dünnglases, wie schon beim Vakuumträger zum Belacken, allseitig überstanden. Beim Andruck der Chrommaske wurden die Glasränder um die Dicke der Lackrandwülste leicht über den Rand der Vakuumplatte gebogen. Eine schädigende Druckbelastung der Glasränder konnte so unterbleiben. Durch die verbesserte Handhabung der Dünngläser mit Hilfe der neuen Trägersysteme und die Verwendung eines speziellen Maskenausrichters zur schonenden Kontaktbelichtung trat Glasbruch während der lithografischen Fertigung nicht mehr auf.

Ein weiteres Fertigungsproblem entstand durch eine starke Wölbung der Dünngläser nach dem Sputtern oder Bedampfen mit Chrom. Durch die Wölbung hafteten die Gläser beim Belacken schlecht auf dem Vakuumträger. Fotolack auf den Dünnglasssubstraten wurde ungleichmäßig getrocknet, da die Gläser auf der Heizplatte nicht flach auflagen. Weiterhin bedeutete die Wölbung eine zu vermeidende mechanische Belastung der Dünngläser. Durch Sputtern mit einer Biasspannung konnten Chromschichten hergestellt, die bei Raumtemperatur auf dem Glassubstrat spannungsfrei waren, wodurch die Wölbung der Dünngläser entfiel.

Bei der nasschemischen Herstellung von DMS wurde eine starke und unregelmäßige Unterätzung des Fotolacks festgestellt. Um DMS-Leiterbahnen mit definierter Breite herzustellen, wurde daher das Abhebeverfahren angewendet. Mit dem zunächst verwendeten Abhebelack AZ 5214 E konnten keine wiederholbaren Ergebnisse erzielt

werden, was u. a. mit dem engen Prozessfenster dieses Fotolacks erklärt werden konnte. Gute Ergebnisse ließen sich mit dem Abhebelack AR-P 5350 erzielen, dessen Prozessparameter systematisch ermittelt wurden. Für die Strukturierung des Fotolacks war eine relativ geringe Belichtungs-dosis erforderlich. Es stellte sich bei der verwendeten Belichtungseinrichtung jedoch als notwendig heraus, die Belichtungsintensität des Kontaktbelichters unmittelbar vor jeder Belichtungsserie zu messen.

Nach der Entwicklung des Abhebelacks wurde eine Metallschicht aufgedampft. In manchen Fällen war anschließend eine fein angeraute, weißliche Oberfläche des Fotolacks erkennbar. Dies deutete auf eine zu starke Erwärmung bei der Beschichtung hin, welche die Hinterschnittstruktur des Abhebelacks beschädigt hatte. Als Folge waren nach dem Strippen entlang der Ränder der DMS-Leiterbahnen schmale Metallfilmreste zu finden. Bei noch größerer Beschädigung der Hinterschnittstruktur ließ sich in Teilbereichen der DMS die Metallschicht zwischen den Leiterbahnen nicht mehr entfernen. Im Vergleich zu Dünnglassubstraten wurden aufgrund der guten Wärmeableitung dagegen wesentlich bessere Abhebeergebnisse auf Siliziumwafern erzielt. Mit einer besonderen Sputteranlage konnten letztlich durch Einstellen eines großen Targetabstands, einer geringen Sputterrate, Verbesserung der Wärmeableitung und dem Einsatz einer Sputtermaske fehlerfreie DMS auf Dünngläsern mit dem Abhebeverfahren hergestellt werden.

Um eine geringe Streuung der DMS-Widerstände aller Sensoren, die gleichzeitig auf einem Substrat hergestellt wurden, zu erzielen, wurde versucht, die beim Bedampfen oder Sputtern normalerweise entstehende, große Schichtdickenverteilung auf einem Substrat zu minimieren. Hierzu wurde eine Vorrichtung konstruiert, in der ein Siliziumwafer in geringem Abstand hinter einer feststehenden, genau auf den Wafer ausgerichteten Sputterblende gedreht werden kann. Die Form der Sputterblende wurde so berechnet, dass die Schichtdickenverteilung der Sputteranlage ausgeglichen wurde. Auf einen 4“-Siliziumwafer konnten Goldschichten mit einer Schichtdickentoleranz von $\pm 1\%$ gesputtert werden.

Wie im Lastenheft gefordert sollten die Gehäuse der Drucksensoren aus PEEK bestehen, einem chemisch sehr beständigen Werkstoff. Die Gehäusenutzen wurden durch Kammerkleben mit der Membran des Glassubstrats verbunden. Am IMT wurden bisher ausschließlich transparente Kunststoffnutzen, z. B. aus PMMA oder PSU, verwendet. Transparente Nutzen sind für das Kammerkleben vorteilhaft, da beim Einspritzen von Klebstoff in eine Klebstoffkammer des Nutzens der Klebstofffluss gut sichtbar ist und daher der Einspritzvorgang rechtzeitig beendet werden kann. Da PEEK nicht transparent ist, wurde zunächst versucht, den Befüllvorgang einer Klebstoffkammer zu beenden, wenn austretender Klebstoff an den Enden der Gehäusenutzen erkennbar wurde. Der aus der Klebstoffkammer austretende Klebstoff floss jedoch in die Ausgänge der benachbarten Klebstoffkammern, welche verstopften, da der Klebstoff schnell aushärtete. Es konnte gezeigt werden, dass geeignete Klebstoffenster an den Enden der Nutzen angebracht werden können, in denen einfließender Klebstoff rechtzeitig erkannt werden kann. Weiterhin war es möglich, mehrere Klebstoffkammern durch Unterbrechen von Kammerstegen zu verbinden und den Klebstoff zentral in den Gehäusenutzen einzuspritzen. Durch die zentrale Befüllung konnten benachbarte Klebstoffkammern von außen nicht zulaufen.

Ein weiteres Problem beim Kammerkleben war der Zweimaterialeffekt, der sich einstellte, wenn ein PEEK-Gehäusenutzen, bei z. B. 100 °C, auf ein Glassubstrat geklebt wurde und nach Aushärten des Klebers auf RT abkühlte. Da Polymere einen größeren WAK besitzen als Glas, hatte sich der Verbund aus Dünnglas und Gehäusenutzen bei RT stark gewölbt. Durch die Biegespannungen hatten sich Risse in den Dünngläser gebildet. Beim nachfolgenden Flußsäureätzen zerriss das in der Ätze dünner werdende Glas durch die im Verbund gespeicherten Spannungen noch wesentlich stärker. Auch die zu ätzenden Kreisplatten waren nach dem Flußsäureätzen von Rissen durchzogen und die PI-Trägermembran war im Bereich der Glasrisse häufig beschädigt. Um den Zweimaterialeffekt zu verringern, wurde nachfolgend bei niedrigen Temperaturen geklebt. Verschiedene Kleber wurden getestet, die dennoch eine zügige Aushärtung des Klebstoffs ermöglichen sollten. Als Klebstoff wurde letztlich ein dünnflüssiger 2K-Epoxidharzkleber verwendet.

Beim Ätzen der Dünngläser mit Flusssäure stellte sich die in [Wulf01] angegebene Chrommaskierung als ungeeignet heraus. Die Chromschicht wies punktförmige Fehlstellen auf, an denen das Glas ungeschützt war. Auch mit einer 200 nm dicken Chrommaskierung bildeten sich in der Flusssäure an Fehlstellen tiefe Ätzgruben auf der Oberfläche der Kreisplatten. Als Maskierung geeignet war dagegen eine Chromschicht in Kombination mit einer nach der Strukturierung der Chromschicht nicht entfernten Fotolackschicht. Eine vollständig deckende Maskierung für die Dünngläser konnte auch mit einer 60 nm dicken Goldschicht auf einer Chromhaftschrift erzielt werden. Mit der verbesserten Maskierung ließen sich Unterätzungen an den Rändern der Kreisplatte von ca. 50 µm erzielen. Dies entspricht einem Aspektverhältnis von 1, einem für isotropes nasschemisches Ätzen optimalen Wert.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit war die Abdichtung der Sensorkammer. Eine Flüssigkeit in der Sensorkammer darf nicht durch den Spalt zwischen Gehäusenutzen und PI-Trägermembran kriechen und den Klebstoff erreichen. Ein mikrofluidisches System könnte durch aus dem Klebstoff in die Flüssigkeit übergehende Stoffe verunreinigt werden. Mit ringförmigen Heizelementen um die Sensorkammer wurde versucht, die Sensorkammer durch Umschweißen abzudichten. Ein vorhandener Entwurf von Ringheizelementen sowie das Schweißen mit konstantem Strom erwiesen sich als ungeeignet. Mit einer leistungsgeregelten Verschweißung dagegen, die an 100 nm dicken, linearen Heizelementen aus Gold auf einer Chromhaftschrift erprobt wurde, konnten PMMA- und PSU-Kunststoffplatten problemlos verschweißt werden. In die Regelung wurden An- und Abstiegsrampen für die Schweißleistung programmiert, weil festgestellt worden war, dass sich durch langsames Aufwärmen und Abkühlen die Bildung von Schweißspannungen vermindern ließ. PEEK konnte auch mit 300 nm dicken, linearen Heizelementen nicht verschweißt werden. Daher wurden 1 µm dicke Nickel-Heizelemente galvanisch hergestellt aber nicht mehr getestet. Das Abdichten durch Umschweißen der Sensorkammer wurde aufgegeben, weil der aufgeschmolzene Kunststoff auf den Heizelementen bzw. dem Chromhaftring nicht flüssigkeitsdicht haftet.

Nickeldrucksensoren

Alternativ zum aufwändig und schwierig zu fertigenden Glasdrucksensor wurde eine Drucksensorvariante mit galvanisch hergestellter Kreisplatte aus Nickel entwickelt. Der Nickeldrucksensor konnte auf einem Wafer als Substrat hergestellt werden, was eine einfache lithografische Prozessierung ermöglichte. Auf eine extrem vorsichtige Handhabung des Substrats, die Verwendung besonderer Trägersysteme oder eines speziellen Ausrichters zur Belichtung konnte verzichtet werden. Der Zweimaterialeffekt aus dem Verbund von Gehäusenutzen und Substrat fiel geringer aus, da der Siliziumwafer wesentlich dicker war als das Glassubstrat. Ferner musste der Wafer zur Herstellung der Kreisplatten nicht durch Ätzen geschwächt werden, so dass der Zweimaterialeffekt hier nicht störte. Die Kreisplatten des Drucksensors wurden auf der PI-Trägermembran in strukturiertem Dickschichtlack galvanisch aus Nickel hergestellt.

Um die PI-Trägermembran und die über die PI-Membran verlaufenden Leiterbahnen, welche die DMS kontaktieren, nicht mehr als notwendig mechanisch zu beanspruchen, wurde eine möglichst geringe Dehnung der PI-Trägermembran angestrebt. Die Sensorkammerhälften der Nickeldrucksensoren wurden daher konsequent kugelschalenförmig ausgeführt, was durch Nachfräsen von zylindrischen Kammerhälften mit einem Kugelfräser erreicht wurde. Es wurde gezeigt, dass die Trägermembran, an der die Kreisplatte des Drucksensors aufgehängt ist, in kugelschalenförmigen Kammerhälften maximal nur ca. 6 % gegenüber 30 % in zylinderförmigen Kammerhälften bei Druckbeaufschlagung gedehnt wird.

Die Kreisplatte des Nickeldrucksensors wurde galvanisch auf einer 4 µm dicken PI-Trägermembran hergestellt. Der Temperaturfehler, der bei Temperaturänderung durch die unterschiedlichen WAK der miteinander verbundenen Werkstoffe PI und Nickel entsteht, wurde mit dem Steifigkeitsverhältnis von Kreisplatte zu PI-Trägermembran abgeschätzt. Danach ist vom Nickeldrucksensor ein halb so großer Temperaturfehler wie von einem

Folien-DMS-Drucksensor zu erwarten, dessen Temperaturfehler bekanntermaßen so gering sind, dass eine Temperaturkompensation kaum benötigt wird.

Nickeldrucksensoren mit erfolgreich aus Konstantan hergestellten DMS konnten aufgrund von Problemen beim Kammerkleben nicht mehr getestet werden. Konstantan wäre als DMS-Werkstoff mit geringem TKR interessant gewesen.

Kennlinien von Glasdrucksensoren

Aufgrund der vielen, beschriebenen und zu lösenden Fertigungsprobleme standen zur Aufnahme von Kennlinien keine fehlerlos gefertigten Glasdrucksensoren zur Verfügung. Die Kreisplatten waren stark und unregelmäßig unterätzt, da das Problem einer geeigneten Maskierung beim Flusssäureätzen bis dahin ungelöst war. Ein Drucksignal in Richtung des kleinen Gehäusenutzens war nicht vorhanden, da die Kante der Kreisplatte, die hierzu in der Verrundung der zylindrischen Kammerhälfte hätte aufsetzen müssen, durch die starke Unterätzung auf einen zu geringen Durchmesser zurückgesetzt war. Andererseits ist beim nasschemischen Ätzen eine geringere Unterätzung als im Aspektverhältnis von 1 nicht zu erreichen. Daraus folgt, dass die Kreisplatte unter keinen Umständen in der Verrundung der zylinderförmigen Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens wie vorgesehen hätte aufsetzen können. Die Unterätzung am Rand von Glaskreisplatten muss bei der Konstruktion einer Sensorkammer berücksichtigt werden.

Ein weiterer Fehler war die mangelhafte Haftung des Klebstoffs der zweiten Kammerklebung auf der PI-Trägermembran. Eventuell hatte der Kontakt der PI-Membran mit Flusssäure die Oberfläche der PI-Membran chemisch verändert und die schlechte Haftung des Epoxidharzklebers verursacht. Durch die mangelhafte Haftung der zweiten Klebung war die Kammerhälfte des kleinen Gehäusenutzens, in welcher während der Aufnahme von Kennlinien in positiver Druckrichtung Druckluft anstand, häufig undicht. Dies konnte u. a. an aufsteigenden Luftblasen von unter Wasser getauchten Sensoren erkannt werden.

Ein weiterer Fehler im Aufbau der getesteten Glasdrucksensoren wurde bei der Aufnahme von Kennlinien festgestellt. Drei Kennlinien eines Glasdrucksensors in positiver Druckrichtung verliefen anfänglich sehr linear, stiegen aber bei höheren Drücken steil und nichtlinear an. Dies ließ auf einen Krieeffekt schließen. Die PI-Membran löste sich wahrscheinlich in der Mitte der Kreisplatte von der Glasfläche ab, so dass die Dehnungen der Kreisplattenoberfläche nicht mehr 1:1 auf die PI-Membran und die darauf befindlichen DMS übertragen werden konnten. Der Fehler entstand, weil ein abweichender Aufbau des Sensors gewählt worden war. Im ursprünglichen vorgesehenen Aufbau reicht die PI-Trägermembran nur bis über den Rand der Kreisplatte. Die DMS werden weiter innen direkt auf die Glasoberfläche aufgebracht. Eine Chromschicht zur Haftvermittlung von PI auf Glas war im realisierten Aufbau daher nur am Rand der Kreisplatte vorhanden, so dass sich die PI-Membran in der Mitte der Kreisplatte ablösen konnte.

Kennlinien von Nickeldrucksensoren

Kennlinien von Nickeldrucksensoren verliefen stark nichtlinear. Bei der Aufnahme einer ersten Kennlinie war die Linearitätsabweichung besonders groß und lag bei 15 %. Bei der Aufnahme weiterer Kennlinien in dieselbe Druckrichtung wurde die Linearität tendenziell besser und betrug zuletzt 5 %.

Die Verbesserung der Linearität nach mehrfacher Aufnahme von Kennlinien in dieselbe Druckrichtung könnte wie folgt erklärt werden. Die PI-Trägermembran ist nach der Fertigung normalerweise straff gespannt und wird bei erstmaliger Druckbeaufschlagung besonders stark gedehnt. Leiterbahnen zu den DMS auf der Trägermembran werden mitgedehnt, verändern dadurch ihren Widerstand und verstimmen die Brückenschaltung. Dies äußert sich als starke Linearitätsabweichung der ersten Kennlinie. Die PI-Trägermembran ist nach der ersten Druckbelastung bleibend gedehnt. Bei der nächsten Messung dehnt sich die Membran nur noch um einen reversiblen Anteil. Hiervon sind wiederum die Zuleitungen zu den DMS betroffen, deren Widerstand sich ändert. Weitere Kennlinien bleiben daher nichtlinear jedoch mit geringeren Linearitätsfehlern. Weiterhin könnte auch eine nicht

ausreichende Haftung der Nickelkreisplatte auf der Galvanikstartschicht aus Chrom-Gold vorgelegen haben, so dass die Dehnungen der Kreisplattenoberfläche nicht vollständig auf die PI-Membran und die darauf befindlichen DMS übertragen wurden.

Bei Kennlinien, die abwechselnd in positive und negative Druckrichtung aufgenommen wurden, driftete das Nullsignal in Richtung positiver Signalwerte. Die Nullsignaldrift entstand durch plötzliche Änderungen der Steigung in den Kennlinien. Dies kann nicht mehr mit einem reversiblen Dehnungsanteil der PI-Trägermembran erklärt werden. Messungen der Widerstandswerte, auch der Abgleichwiderstände, der Brückenschaltung deuteten darauf hin, dass möglicherweise die Abgleichwiderstände sich bei längerem Einsatz verändert hatten. Temperaturschwankungen im Messraum konnten für die Nullsignaldrift nicht verantwortlich sein, da temperaturbedingte Widerstandsänderungen sehr gut von einer DMS-Halbbrückenschaltung kompensiert werden können. Als Empfindlichkeit der Nickeldrucksensoren, deren DMS aus Gold gefertigt waren, konnte ca. 0,350 mV/V für einen Nenndruck von 2 bar abgeleitet werden. Dieser Wert ist sehr gering. Übliche Werte von Dünnfilmdrucksensoren liegen zwischen 1–4 mV/V, wobei 2 mV/V als Standardwert gelten.

Verbesserungsmöglichkeiten

Es wurde berechnet, dass sich bei einem Nenndruck von 1 bar mit der aktuellen DMS-Gestalt und DMS aus Konstantan nur 0,2 mV/V Empfindlichkeit erzielen lassen. Mit dem vorgestellten, neuen DMS-Entwurf, einer DMS-Vollbrücke und einer Kreisplatte aus Messing ließe sich die Empfindlichkeit ca. 3,8fach steigern. Der Einsatz von Konstantan gegenüber Gold als DMS-Werkstoff würde einen geringfügigen Signalverlust bedeuten, der jedoch durch den besseren TKR-Wert von Konstantan und damit einem geringeren Temperaturfehler der DMS-Brückenschaltung ausgeglichen würde. Andererseits wurde festgestellt, dass eine Chrom-Gold-Legierung, die sich bei Gold-DMS mit Chromhaftschiicht automatisch bildet, ebenfalls einen sehr geringen TKR besitzt.

Die galvanische Herstellung des Verformungselements, d. h. der Kreisplatte, im Nickeldrucksensor bot auch die Möglichkeit, über alternative Verformungselemente nachzudenken, die ebenfalls galvanisch herstellbar wären. Die Berechnungen ergaben, dass die Signale von DMS auf einer fest eingespannten Kreisplatte oder einer Kreisringmembran kaum höher liegen würden als bei einer Kreisplatte, die an einer PI-Trägermembran aufgehängt ist. Mit einer Kreisringmembran ließe sich allerdings ein geringer Linearitätsfehler von nur 0,12 % erzielen.

Heizelementschweißen wurde als Lösung zur Abdichtung der Sensorkammer ausgeschlossen, weil der geschmolzene Thermoplast auf den Heizelementen nicht flüssigkeitsdicht haftet. Alternativ wäre es gerade beim Nickeldrucksensor vorstellbar, die Sensorkammer mit galvanisch hergestellten Dichtringen, z. B. aus Indiumlot oder einer Indiumlotlegierung, abzudichten. Das Indium könnte auf eine gegenüberliegende, metallisierte Stelle des Gehäusenutzens entweder kaltgeschweißt oder durch Erwärmen des gesamten Sensors gelötet werden [Sing99]. Kaltschweißen von gleichfalls galvanisch hergestellten Golddichtringen auf eine metallisierte Gegenseite im Gehäusenutzen unter hohem Druck bei Raumtemperatur könnte ebenfalls eine zuverlässige und gleichzeitig sehr beständige Abdichtung ergeben [Maha99].

Auch an einen inerten fluidischen Anschluss der Drucksensoren muss gedacht werden. Er besteht bisher aus einem Metallröhrchen in einer PEEK-Hülse, die auf das Gehäuse geklebt wird. Die Anwendung von Klebstoff ist zu vermeiden, da auch hier wiederum die Flüssigkeit eines fluidischen Systems mit dem Klebstoff in Kontakt kommen könnte. Es wurde vorgeschlagen, einen spritzgegossenen fluidischen Anschluss mit angespritztem Ein- und Auslassröhrchen durch Ultraschallschweißen auf der Seite des Drucksensors anzubringen, auf welcher der Flüssigkeitsdruck eines fluidischen Systems gemessen werden soll. Der vorgestellte fluidische Anschluss würde zudem, wie im Pflichtenheft gefordert, ein geringeres Totvolumen besitzen.

Eine große Schwierigkeit in membranbasierten mikrofluidischen Komponenten ist die maßliche Abstimmung der fluidischen Strukturen des Gehäusenutzens aus Kunststoff auf die

lithografisch auf einem Siliziumwafer erzeugten Strukturen der Trägermembran. Die fluidischen und lithografischen Strukturen müssen bei Kammerklebetemperatur zusammenpassen. Während sich die WAK der beteiligten Werkstoffe leicht in die Überlegungen einbeziehen lassen, ist der Schrumpf der Gehäusenutzen nach der Abformung sehr von den Heißprägeparametern und der individuellen Geometrie der Gehäusenutzen abhängig. Es wurde daher vorgeschlagen, den Schrumpf, z. B. mit einem Lichtmikroskop mit Messeinrichtung, an abgeformten Gehäusenutzen zu messen und daraus sowie aus den WAK des Werkstoffs des Gehäusenutzens und des Substrats bei festgelegter Kammerklebetemperatur einen genaueren Skalierfaktor für die lithografischen Strukturen abzuleiten.

Ferner wurde gezeigt, dass zylinderförmige Sensorkammern eine Exzentrizitätstoleranz von $60\ \mu\text{m}$ besitzen. Die Toleranz gegenüber einer aufgrund von Fertigungstoleranzen exzentrisch aufgehängten Kreisplatte bietet eine linsenförmige Sensorkammer, die aus zwei kugelschalenförmigen Kammerhälften zusammengesetzt ist. Beim Nickeldrucksensor wurde eine linsenförmige Sensorkammer verwendet, die einen Durchmesser von $3\ \text{mm}$ besaß. Die schalenförmigen Kammerhälften hatten einen Innenradius von $10\ \text{mm}$. Die Exzentrizitätstoleranz einer linsenförmigen Sensorkammer in diesen Abmessungen beträgt ca. $280\ \mu\text{m}$. Da Glasdrucksensoren bei niedrigen Temperaturen verklebt werden müssen, können aufgrund der geringen Exzentrizitätstoleranz die Exzentrizitätstoleranz linsenförmiger Sensorkammern ist dagegen so groß, dass Ausschuss durch Exzentrizitätsfehler nicht entstehen kann.

Fazit

In dieser Arbeit ist es gelungen, die beidseitige lithografische Prozessierung von extrem bruchempfindlichen Dünnglassubstraten zur Herstellung von Glasdrucksensoren zu bewältigen und die Ausbeute soweit zu steigern, dass eine Serienfertigung von Glasdrucksensoren denkbar erscheint. Weitere Teilziele, wie die DMS mit dem Abhebeverfahren herzustellen und Gehäusenutzen aus dem chemisch beständigen Werkstoff PEEK zu verwenden, wurden ebenfalls erreicht. Mit Heizelementschweißen war es nicht möglich, die Drucksensorkammern der vorgestellten Drucksensoren abzudichten. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass Schweißen von PMMA und PSU mit Dünnschichtheizelementen mit Hilfe einer Regelung der Schweißleistung wiederholbar möglich ist. Über die ursprünglichen Zielsetzungen dieser Arbeit hinausgehend wurde ein Nickeldrucksensor entwickelt, dessen Kreisplatte galvanisch auf der PI-Trägermembran hergestellt wurde. Anhand einiger untersuchter, aber noch mit Fehlern behafteter Drucksensoren konnte ein erster Eindruck von der Funktionsweise der vorgestellten Drucksensoren erhalten werden. Vorschläge zur weiteren Verbesserung, wie z. B. zur Steigerung der Empfindlichkeit der Drucksensoren, zur inerteren Abdichtung der Sensorkammer, zur Gestaltung des fluidischen Anschlusses und der Sensorkammer sowie zur optimalen Anpassung der fluidischen auf die lithografischen Strukturen liegen vor.

Glasdrucksensoren sind grundsätzlich schwieriger herstellbar als Nickeldrucksensoren, da die Dünnglassubstrate aufgrund ihrer Bruchempfindlichkeit wesentlich vorsichtiger gehandhabt werden müssen, als dies bei vergleichsweise robusten Siliziumwafern der Fall ist. Voraussetzung für eine Serienfertigung des Glasdrucksensors wäre, mit Vakuumsokkeln ausgestattete Geräte in der Reinraumfertigung einzusetzen. In diesem Fall wäre es möglich, durchgängig die vorgestellte Vakuumhalterung für das Dünnglas zu verwenden. Dieselbe Vakuumhalterung wäre auch zum Kontaktbelichten des Dünnglassubstrats geeignet.

Eine Serienfertigung von Nickeldrucksensoren hätte den Vorteil, dass die lithografische Prozessierung auf robusten Siliziumwafern stattfinden würde. Darüber hinaus ist eine aufwändige beidseitige Prozessierung des Substrats beim Nickeldrucksensor nicht erforderlich. Auch der relativ gefährliche Prozessschritt des Ätzens mit Flußsäure entfällt bei der Herstellung von Nickeldrucksensoren. Weiterhin vorteilhaft an Nickeldrucksensoren ist die Galvanikstartschicht, die sowohl eine chemisch beständige Beschichtung für die als chemisch nicht ausreichend beständig angesehene PI-Trägermembran darstellt, als auch die Voraussetzung für die vorgeschlagenen, neuen Abdichtungsmöglichkeiten schafft. D. h. auf

der Galvanikstartschicht könnten neben der Nickelkreisplatte auch Indium- oder Goldschichten galvanisch abgeschieden werden.

Das Kammerklebverfahren, wie es in dieser Arbeit angewandt wurde, wird als umständlich und nur schwer zu beherrschen angesehen. Das Verfahren könnte durch Dispensen von Klebstoffraupen mit einer CNC-gesteuerten Dosieranlage, Siebdrucken, Rakeln durch eine Metallschablone, Stempeln mit Metallformen oder Tampondrucken von Klebstoff ersetzt werden.

7 Anhang

7.1 Vorgaben zur Materialauswahl und Beständigkeit

Chemisch beständige Kunststoffe:	PEEK, PFA, PTFE, FEP, PVDF
Chemisch unbeständige Kunststoffe:	PMMA, PSU, Viton, PEI, PI
Bevorzugte metallische Werkstoffe:	Gold, Platin, Chrom-Nickel-Edelstahl

Chemische Beständigkeit wird gefordert gegen: Aceton, THF, Methanol, Hexan, ACN, Chloroform, ACN + Methanol, DMF, Natronlauge, Schwefelsäure

PEEK	Polyetheretherketon
PFA	Perfluoryalkoxy-Copolymerisat
FEP	Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylen-Copolymerisat
PVDF	Perfluorylkoxy-Copolymerisat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PEI	Polyetherimid
PI	Polyimid
THF	Tetrahydrofuran
ACN	Acetonitril
DMF	Dimethylformamid

7.2 Aufbau des Glasdrucksensors

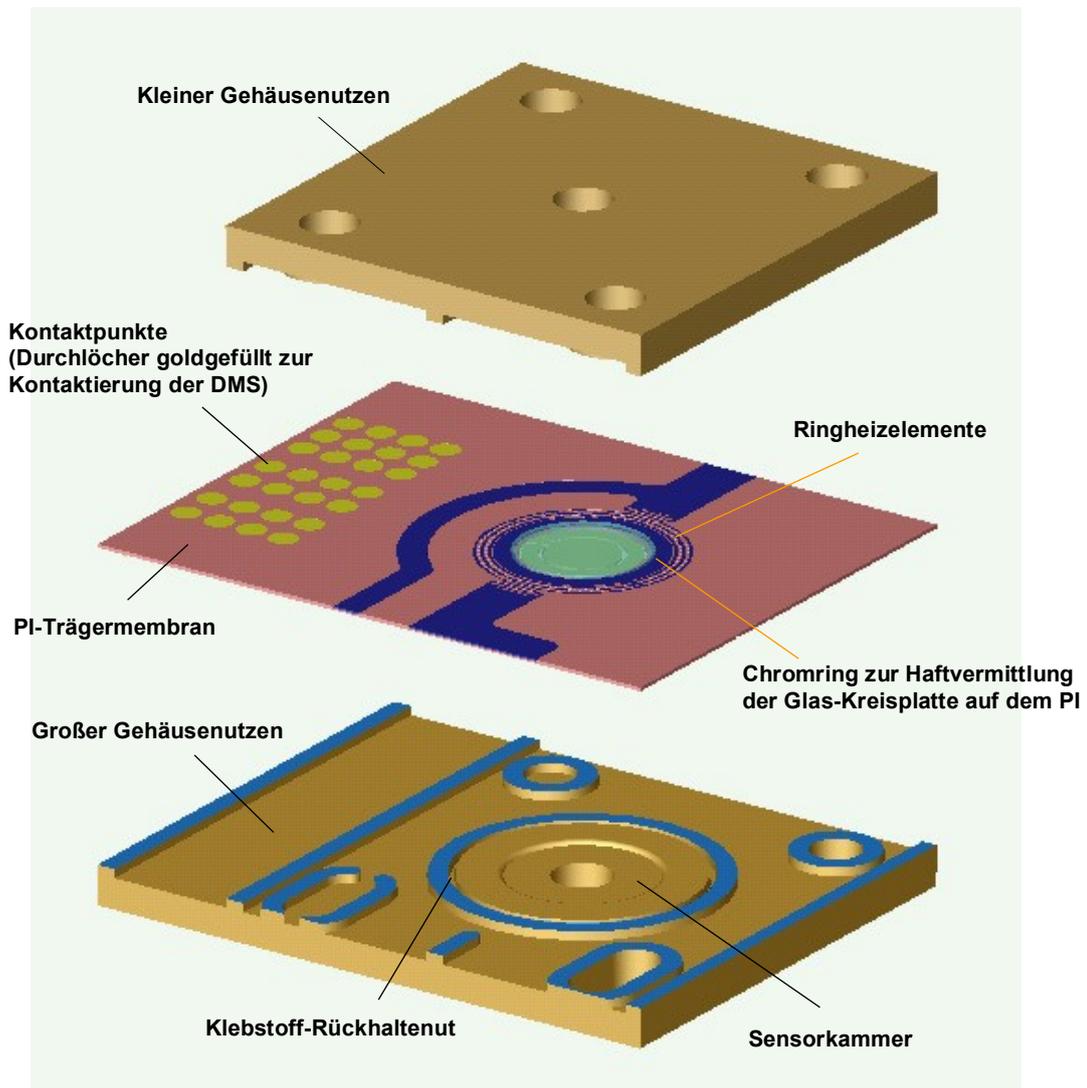


Bild 7.2-1: Explosionsansicht eines Drucksensors mit Glas-Kreisplatte. Sicht auf die Kreisplatten-Seite der PI-Trägermembran.

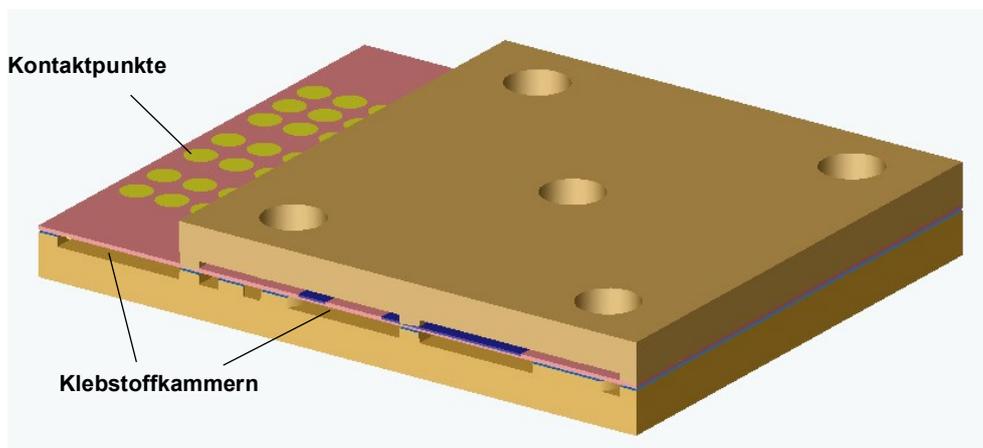


Bild 7.2-2: Kompletter Glasdrucksensor. Zusammenbau der Explosionsansicht von Bild 7.2-1.

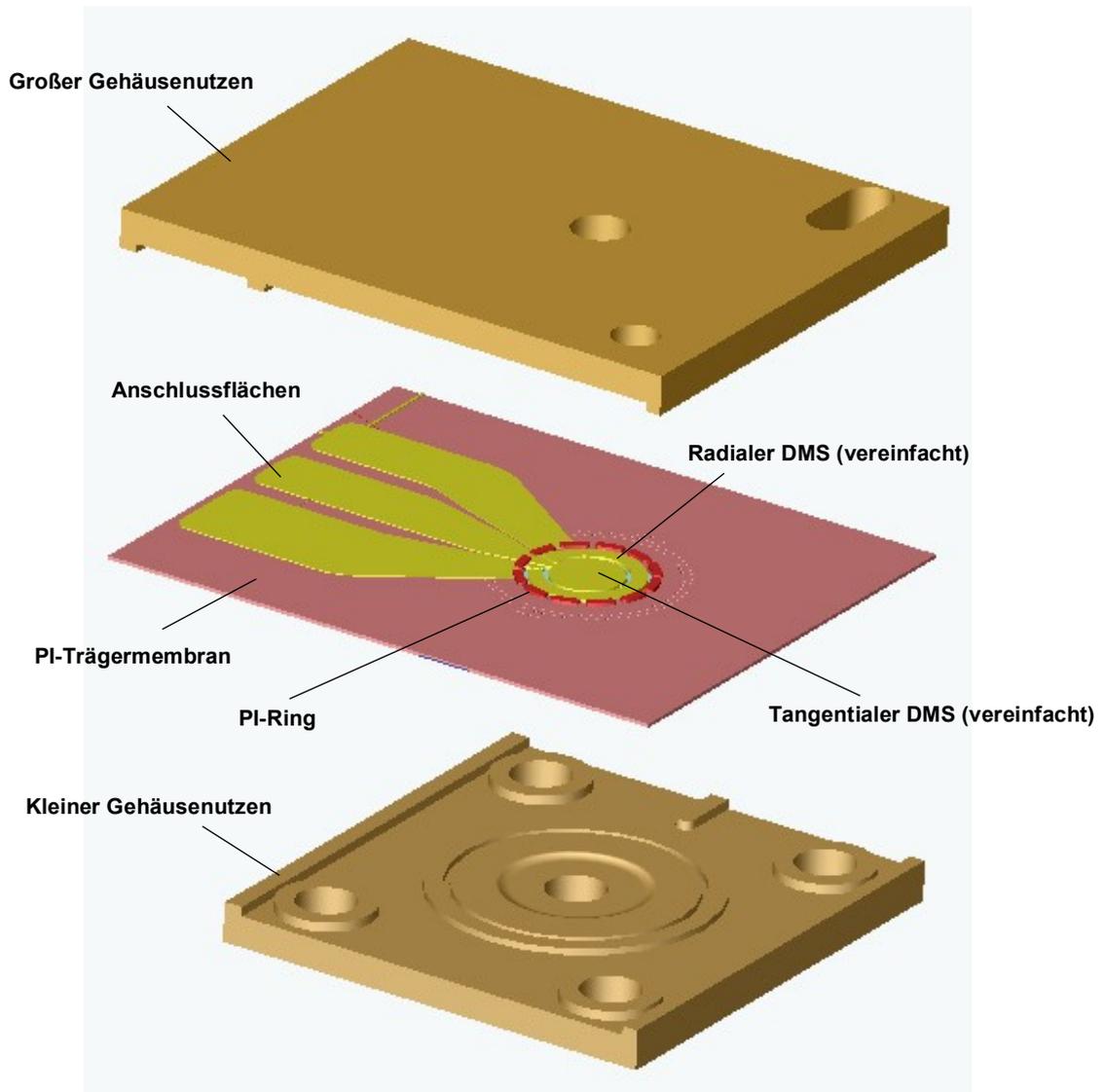


Bild 7.2-3: Explosionsansicht eines Drucksensors mit Glas-Kreisplatte. Sicht auf die DMS-Seite der PI-Trägermembran. Die DMS sind nicht als Gitter sondern vereinfacht als Flächen dargestellt.

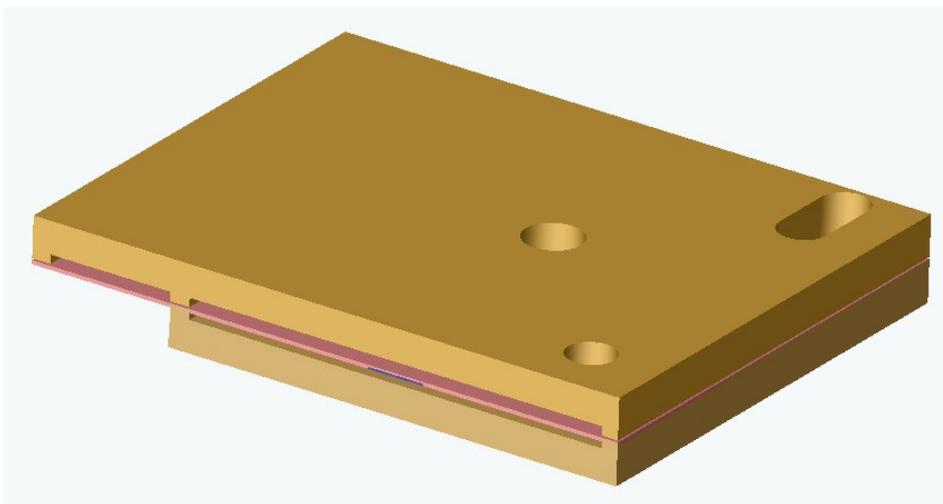


Bild 7.2-4: Kompletter Drucksensor. Zusammenbau der Explosionsansicht von Bild 7.2-3.

7.3 Messung der Schichtdickenverteilung

7.3.1 Strukturierung von Schichten zur Schichtdickenmessung

Die Schichtdickenverteilung von Targets, die mit der Sputteranlage PM VII, eine Eigenkonstruktion des IFIA, gesputtert worden sind, wurden für mehrere Werkstoffe und verschiedene Targetabstände wie folgt bestimmt.

Da die Schichtdickenverteilung abhängig vom Abstand des Substrats zum Target ist, wurde zunächst ein Targetabstand festgelegt. Für die Ermittlung der Schichtverdünnenverteilung von Gold wurde eine 10 nm dicke Chromschicht auf einen 4"-Siliziumwafer gesputtert. Chrom haftet im Gegensatz zu Gold sehr gut auf Silizium. Die Chromschicht auf dem Siliziumwafer diente daher als Haftvermittlungsschicht für die Goldschicht. Gesputtert wurde das Goldtarget zunächst auf ein Schließblech vor dem Substrat. Die Sputterrate wurde mit einem XTC/2-Schichtdickenmessgerät der Firma Inficon GmbH, Köln ermittelt. Dazu wurde der

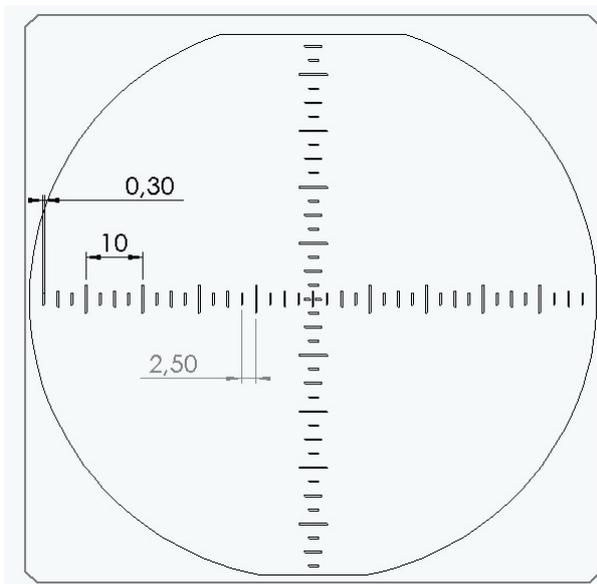


Bild 7.3-1: Zeichnung der Filmmaske, die zur Strukturierung von Sputterschichten für Schichtdickenmessungen verwendet wurde.

Schwingquarz-Sensor des XTC/2 unter das ‚brennende‘ Target gefahren. Mehrmals wurde nach jeweils 2 min die angezeigte erreichte Schichtdicke durch die Sputterzeit von z. B. 120 s geteilt und so die Sputterrate berechnet. Sobald die Sputterrate von Messung zu Messung konstant blieb, wurden 400 nm Gold auf den Wafer gesputtert. Die Goldschicht wurde mit AZ 4533 belackt und mit der Filmmaske in Bild 7.3-1 belichtet. Die freientwickelten Goldbereiche wurden mit I_2/Kal -Lösung geätzt. Übrig blieben 0,3 mm breite Gold-Teilstriche zweier aus der Goldschicht strukturierten sich kreuzenden ‚Lineale‘. Die Schichtdicke der Teilstriche wurde nach dem Strippen mit dem Tastschnittgerät Tencor P-2 gemessen. Es wurde die mittlere Höhe der Teilstrichoberfläche am Tastschnittgerät abgelesen. Die Kanten der Teilstriche wiesen teilweise unrealistische Spitzenwerte auf, was auf eine Ablösung der

Goldschichten von der Chromschicht an den Kanten hindeutete. Ein kleiner Bereich an den Teilstrichkanten wurde daher nicht in die Mittelwertbildung aus dem Höhenprofil der Teilstrichoberflächen einbezogen.

Für die Messung der Schichtdickenverteilung von Konstantan wurde Titan als Haftvermittler verwendet, da Konstantan mit Chromätze geätzt werden konnte und sich die Chromhaftschrift in der Chromätze ebenfalls auflöst hätte. Dies sollte nicht geschehen, weil anderenfalls mit dem Tastschnittgerät die Dicke der Haftschrift plus der Dicke der Konstantanschicht gemessen worden wäre. Ohne Haftvermittler konnte Konstantan auf Siliziumoxid nicht strukturiert werden, da Konstantan auf Siliziumoxid so schlecht haftete, dass sich der strukturierte Fotolack AZ 4533 zusammen mit den Konstantanstrukturen in der Chromätze sehr schnell vom Wafer ablöste.

Titanschichten konnten für Schichtdickenmessungen direkt auf einem nicht oxidierten Wafer mit 5 %iger Flußsäure strukturiert werden. Silizium wird von 5 %iger Flußsäure, bis auf die dünne SiO_2 -Schicht, die sich von selbst auf einem Siliziumwafer bildet, nicht angegriffen. Oxidierte Wafer dürfen nicht verwendet werden, da die Flußsäure die Silizium-Oxidschicht sehr schnell wegätzen würde. Bei der Höhenmessung von flußsäuregeätzten Titan-Teilstrichen auf einem oxidierten Wafer würde sich ein Messfehler ergeben, da die Höhe der aufgelösten Oxidschicht mit gemessen würde.

Am IMT wird anders als in dieser Arbeit im Allgemeinen ein Kreuz mit ca. 5 mm breiten Balken ähnlich dem Linealkreuz in Bild 7.3-1 auf Wafer gesputtert, um daran die Schichtdickenverteilung zu messen. Das Kreuz wird mit einer Sputtermaske hergestellt. Mit dem Tastschnittgerät kann quer über die Kreuzbalken gefahren werden. Die Kanten der Kreuzbalken weisen eine ansteigende Schichtdicke auf, da die Sputterblende an ihren Kanten untersputtert wird. Die vom Tastschnittgerät angegebenen Positionswerte müssen bei Schichtdickenmessungen mit notiert werden und abschließend in Entfernungen vom Wafermittelpunkt umgerechnet werden. Diese Arbeit entfiel bei Schichten, die zu Linealkreuzen strukturiert wurden, da die Teilstriche einen bekannten Abstand voneinander hatten und das Linealkreuz mit Hilfe einer auf der Filmmaske eingezeichneten Waferumrisslinie mittig auf dem Wafer positioniert werden konnte.

7.3.2 Berechnung einer Sputterblende

In der Tabelle 7.3-1 ist in einer Tabelle ein Schema zur Berechnung der Sputterblende dargestellt, mit der es möglich war, an der Anlage PM VII des IFIA Gold mit konstanter Schichtdicke auf allen Radien eines 4"-Wafers zu sputtern. In den Spalten A und B sind die Waferradien und die auf den Radien gemessene Goldschichtdicke aufgelistet. Für den Radius 45 mm (R45) ist in der Tabelle ein erster Öffnungswinkel der Sputterblende von 15° festgelegt worden. Für alle weiteren Radien des Wafers muss der Öffnungswinkel der Blende bezogen auf die Schichtdicke von Radius R45 korrigiert werden. Diese Korrektur wird in den nächsten Spalten vorgenommen. Zunächst wird in Spalte D der offene Winkel aus 360° minus dem festgelegten Winkel der Sputterblende berechnet. In Spalte E wird aus dem Verhältnis der Schichtdicken zur Schichtdicke auf dem Radius R45 ein Korrekturfaktor berechnet. Dieser Faktor multipliziert mit dem offenen Winkel ergibt den korrigierten offenen Winkel, d. h. den Winkel den bei einer 360° -Umdrehung des Wafers der Wafer beim Sputtern nicht von der Blende abgedeckt wird. Aus der Differenz von 360° und dem korrigierten offenen Winkel ergibt sich dann der korrigierte Blendenwinkel. Mit den Radien und den zugehörigen Blendenwinkeln kann die Blende geometrisch dargestellt werden. Radius und Winkel entsprechen Polarkoordinaten, die in den Spalten H und I in kartesische Koordinaten umgerechnet werden. Aus den Koordinaten H und I wird im Diagramm in Bild 7.3-2 die Sputterblende in nicht symmetrischer Form dargestellt (schraffierter Bereich). In den Spalten J bis M werden die Polarkoordinaten der Blende so umgerechnet, dass die Blende symmetrisch zur x-Achse liegt (Linien mit quadratischen Punkten in Bild 7.3-2). Durch die Festlegung des ersten Winkels der Blende auf Radius 45 ergibt sich bei Radius 45 eine Breite der Blende von 6,64 mm (Bild 7.3-2). Mit der Wahl des ersten Blendenwinkels kann also die Breite der Blende am Außenradius des Wafers festgelegt werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Radius	Schichtdicke	Blende	Offener Winkel	Faktor bezogen auf gemessene Dicke	Korrigierter offener Winkel	Winkel der Sputterblende	x1	y1	Halber Blendenwinkel	x2	y2	y2 x (-1)
2	mm	nm	Grad	Grad		Grad	Grad	mm	mm	Grad	mm	mm	mm
3	45,00	352,87	15,00	345,00	1,00	345,00	15,00	43,47	11,65	7,50	44,62	5,87	-5,87
4	42,50	357,47	15,00	345,00	0,99	340,56	19,44	40,08	14,14	9,72	41,89	7,18	-7,18
5	40,00	362,43	15,00	345,00	0,97	335,90	24,10	36,51	16,34	12,05	39,12	8,35	-8,35
6	37,50	367,60	15,00	345,00	0,96	331,18	28,82	32,85	18,08	14,41	36,32	9,33	-9,33
7	35,00	372,84	15,00	345,00	0,95	326,52	33,48	29,19	19,31	16,74	33,52	10,08	-10,08
8	32,50	378,05	15,00	345,00	0,93	322,02	37,98	25,62	20,00	18,99	30,73	10,57	-10,57
9	30,00	383,14	15,00	345,00	0,92	317,75	42,25	22,21	20,17	21,13	27,98	10,81	-10,81
10	27,50	388,03	15,00	345,00	0,91	313,74	46,26	19,01	19,87	23,13	25,29	10,80	-10,80
11	25,00	392,66	15,00	345,00	0,90	310,04	49,96	16,08	19,14	24,98	22,66	10,56	-10,56
12	22,50	396,99	15,00	345,00	0,89	306,66	53,34	13,43	18,05	26,67	20,11	10,10	-10,10
13	20,00	400,98	15,00	345,00	0,88	303,61	56,39	11,07	16,66	28,20	17,63	9,45	-9,45
14	17,50	404,59	15,00	345,00	0,87	300,90	59,10	8,99	15,02	29,55	15,22	8,63	-8,63
15	15,00	407,80	15,00	345,00	0,87	298,53	61,47	7,16	13,18	30,74	12,89	7,67	-7,67
16	12,50	410,60	15,00	345,00	0,86	296,50	63,50	5,58	11,19	31,75	10,63	6,58	-6,58
17	10,00	412,96	15,00	345,00	0,85	294,80	65,20	4,19	9,08	32,60	8,42	5,39	-5,39
18	7,50	414,89	15,00	345,00	0,85	293,43	66,57	2,98	6,88	33,29	6,27	4,12	-4,12
19	5,00	416,37	15,00	345,00	0,85	292,39	67,61	1,90	4,62	33,81	4,15	2,78	-2,78
20	2,50	417,39	15,00	345,00	0,85	291,67	68,33	0,92	2,32	34,17	2,07	1,40	-1,40
21	0,00	417,96	15,00	345,00	0,84	291,27	68,73	0,00	0,00	34,36	0,00	0,00	0,00

Tabelle 7.3-1: Umrechnung einer Schichtdickenverteilung, hier von Gold, gesputtert mit der Anlage PM VII am IFIA, in eine Blendenform zum Sputtern gleichdicker Schichten auf einen 4"-Wafer.

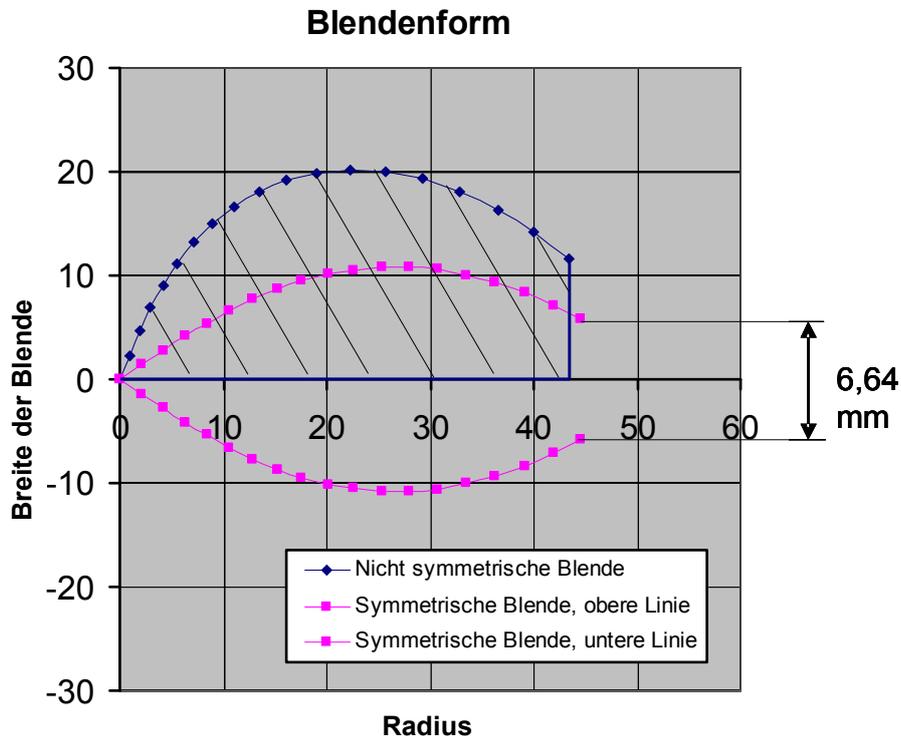


Bild 7.3-2: Schichtdickenverteilung von Gold auf einem 4"-Wafer. Sputteranlage PM VII, IFIA. Targetabstand 138 mm, Sputterrate 12 nm/min, Toolfaktor 100, HF-Leistung 55 W.

7.4 Ausrichter zum Belichten

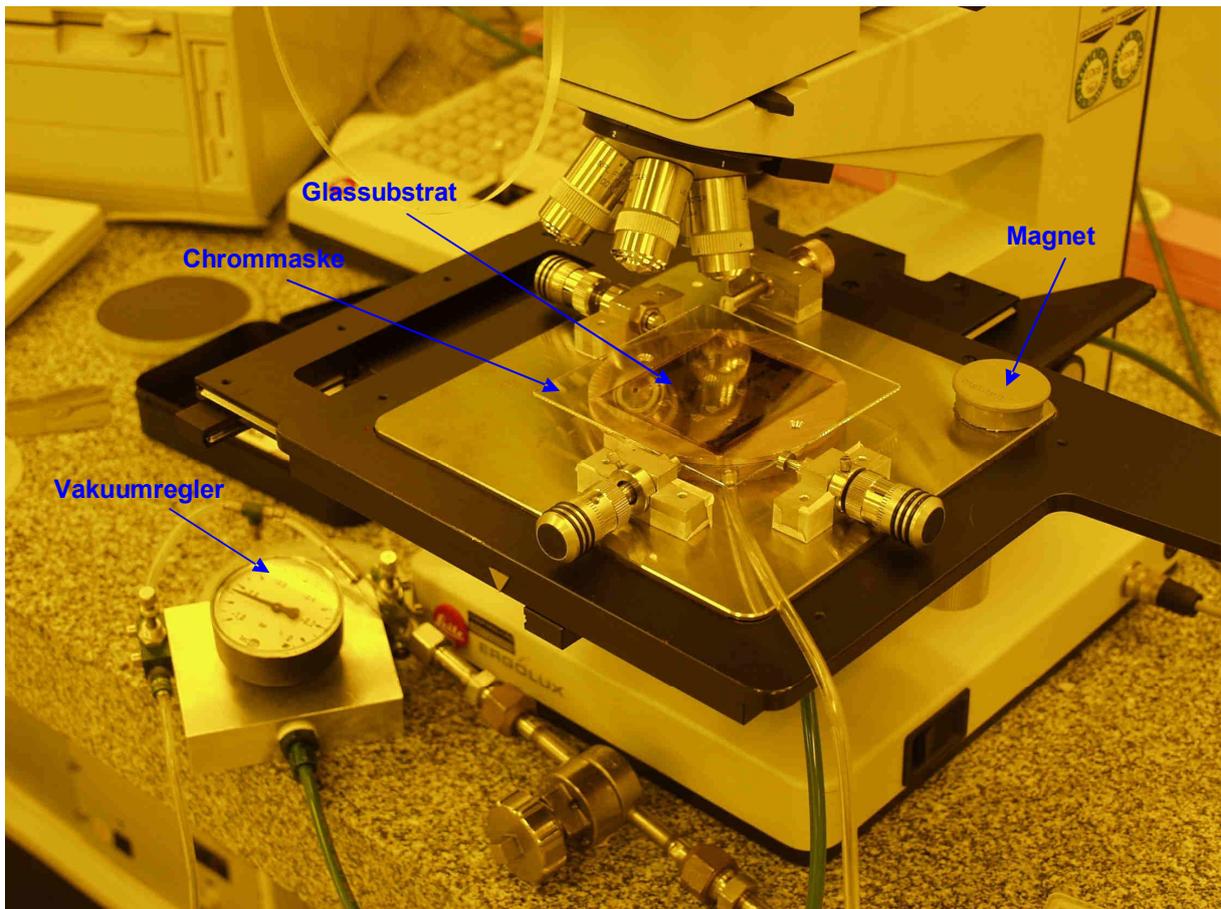


Bild 7.4-1: Einfacher Maskenausrichter eingesetzt in einem Leitz-Ergolux-Mikroskop.



Bild 7.4-2: Ausgerichtete Chrommaske mit Glassubstrat zwischen Vakuumplatte und Magnet

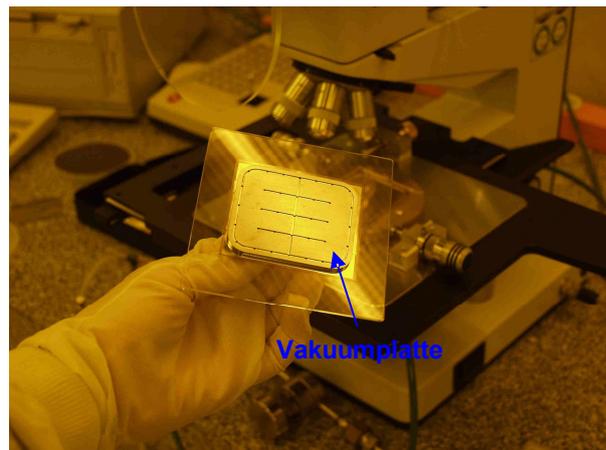


Bild 7.4-3: Ausgerichtete Chrommaske mit Glassubstrat zwischen Vakuumplatte und Magnet

7.5 Kammerkleben

7.5.1 Kammerklebeapparatur

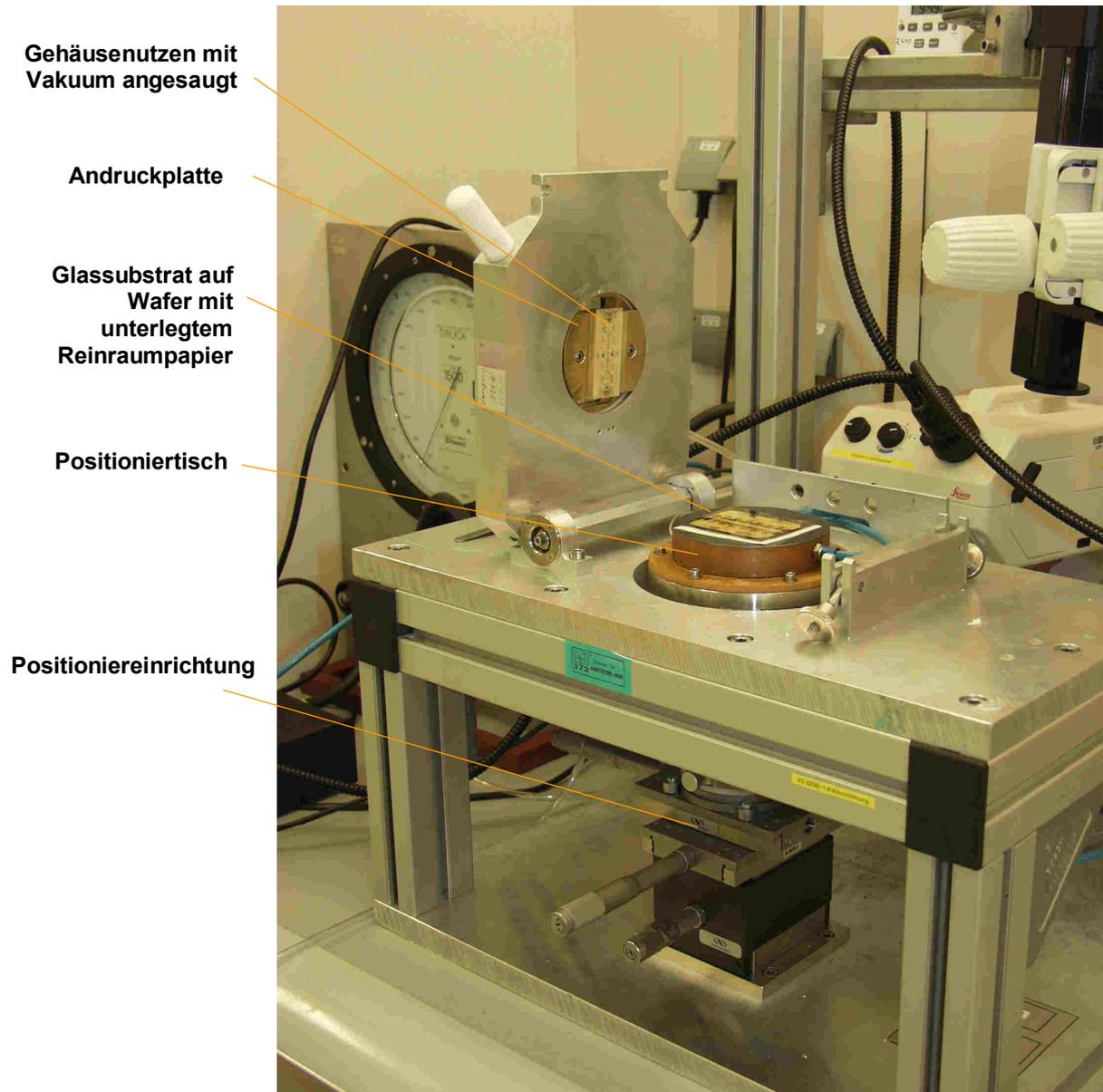


Bild 7.5-1: Kammerklebeapparatur zum Kleben von Gehäusenutzen auf Glassubstrate oder Wafer.

7.5.2 Dünnglassubstrate auf Gehäusenutzen kammergeklebt



Bild 7.5-2: Durchgebogenes Glassubstrat mit EPO-TEK 301 auf einen PSU-Nutzen geklebt.

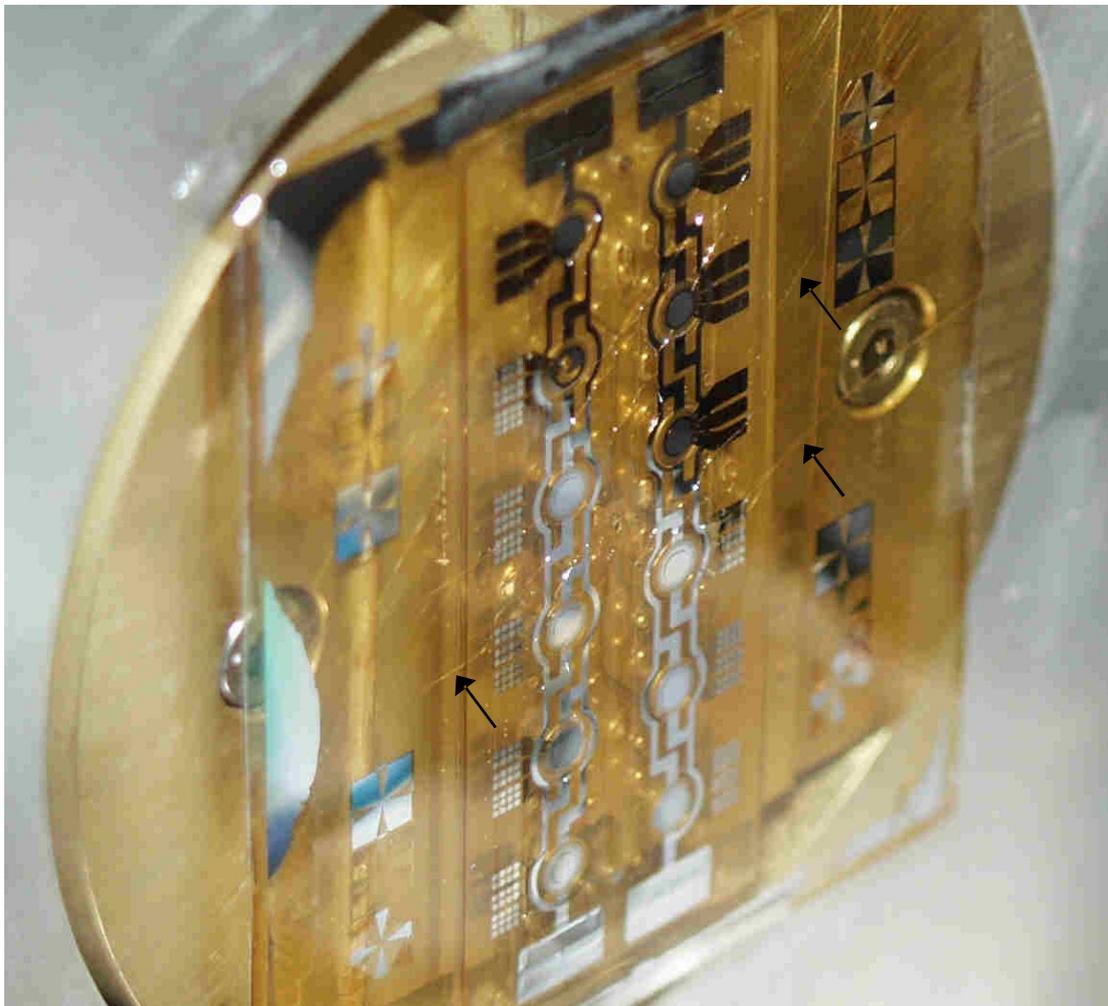


Bild 7.5-3: Gehäusenutzen aus PSU verklebt mit einem Glassubstrat und angesaugt an die Andruckplatte der Kammerklebeapparatur. Nach dem Kammerkleben des Gehäusenutzens bildeten sich aufgrund der großen Spannungen durch den Zweimaterialeffekt viele, quer durch das Glassubstrat verlaufende Risse.



Bild 7.5-4: Klebstoff wird zentral in die miteinander verbundenen Klebstoffkammern gespritzt.

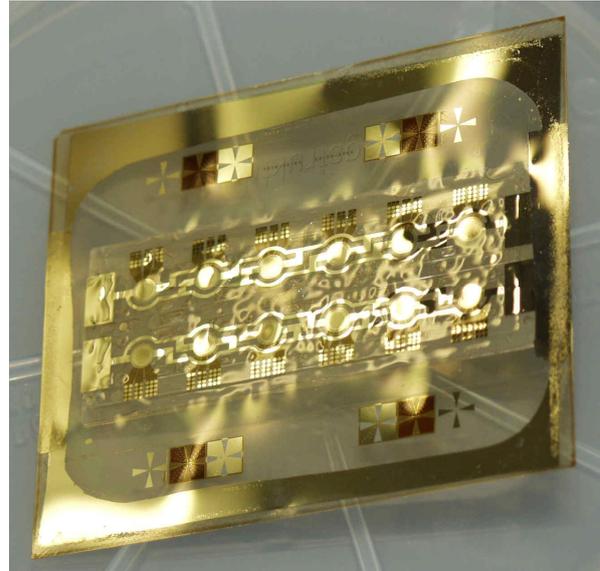


Bild 7.5-5: Wellige Glasoberfläche durch den Schrumpfung von Loctite 406 beim Aushärten.

7.5.3 Zum Kammerkleben getestete Klebstoffe

Handelsname	Klebstoff	Aushärtung	Viskosität [cPs]	Notiz
EPO-TEK UVO-114	1K-Epoxydharz	UV-Licht 100 mW/cm ² : 1–2 min	300–700	Einsatz bis 125 °C, Shore D 80
EPO-TEK 353ND	2K-Epoxydharz	80 °C: 15–30 min 20 °C: 24 h Topfzeit: 4 h	3000–5000	Einsatz bis 200 °C, Shore D 87
EPO-TEK 302	2K-Epoxydharz	20 °C: 1 h Topfzeit: 5–10 min	5500	Einsatz bis 125 °C, Shore D 70
Loctite 406	Ethyl- Cyanoacrylat	20 °C: 15–50 s handfest 20 °C: 24 h 50 °C: 2 h	20	Einsatz bis 80 °C, für Kunststoffe, benötigt Feuchtigkeit zum Aushärten, großer Schrumpfung, altert durch hohe Luftfeuchtigkeit
Loctite 480	Ethyl- Cyanoacrylat	20 °C: <120 s handfest 20 °C: 24 h 50 °C: 2 h, noch flüssig	300	Einsatz bis 100 °C, für Metall und Kunststoffe, benötigt Feuchtigkeit zum Aushärten altert durch hohe Luftfeuchtigkeit
EPO-TEK 301	2K-Epoxydharz	20 °C: <24 h 65 °C: 1 h Topfzeit: 50 min	100–200	Einsatz bis 125 °C, Shore D 81

Tabelle 7.5-1: Zum Kammerkleben getestete Klebstoffe

7.5.4 Schnitt durch zwei Gehäusenutzen

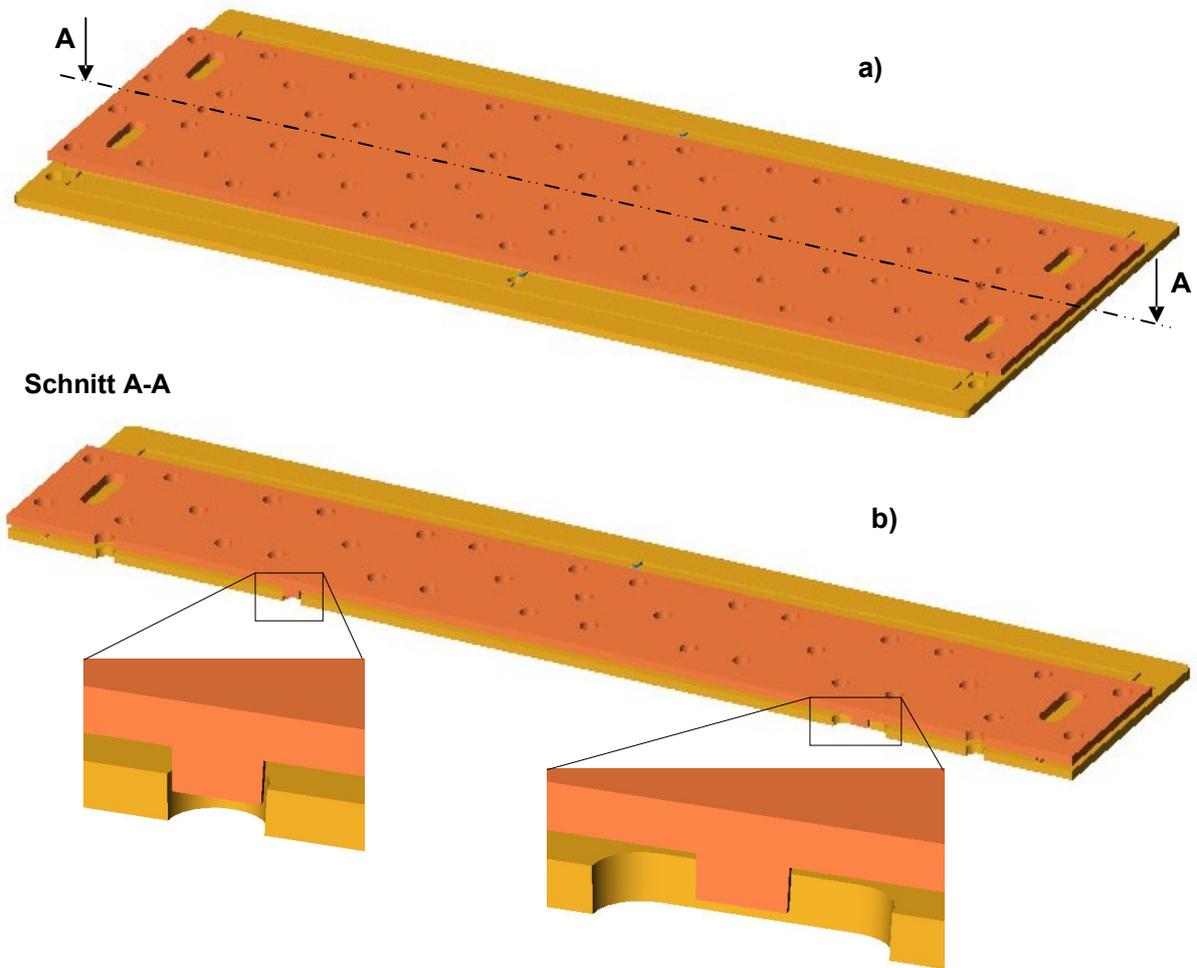
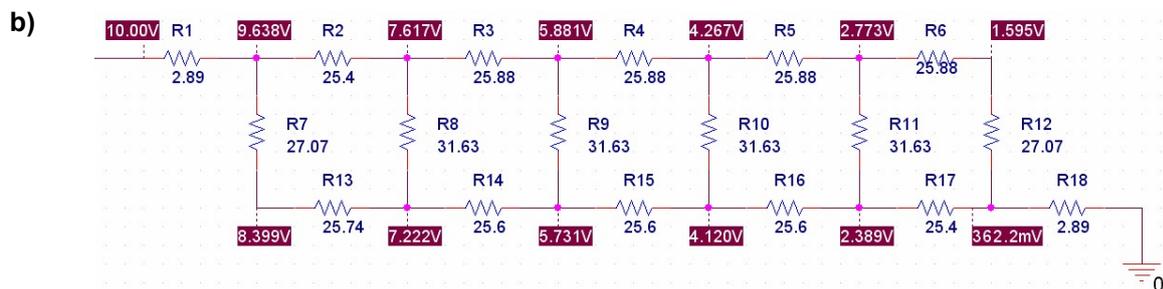
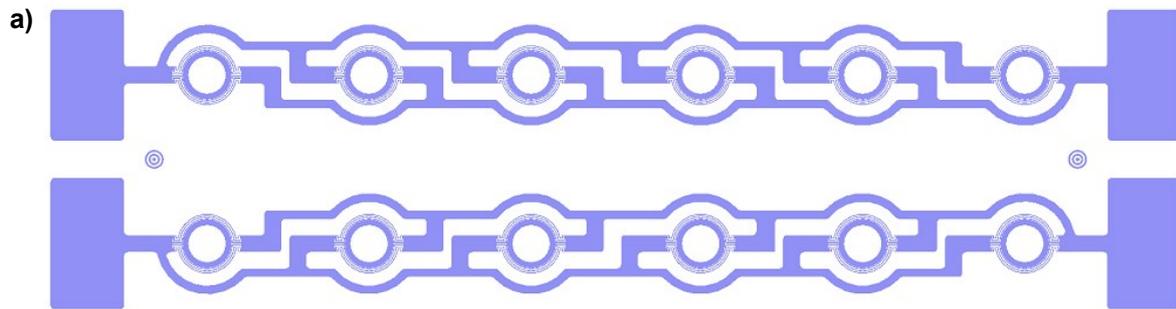


Bild 7.5-6: a) Großer und kleiner Gehäusenutzen. b) Schnitt A-A durch die Positionierstifte und Bohrungen der beiden Gehäusenutzen.

7.6 Heizelementschweißen

7.6.1 Parallel geschaltete Ringheizelemente



c)

**Leistungsabfall im Widerstandsnetzwerk
der parallelgeschalteten Heizelemente**

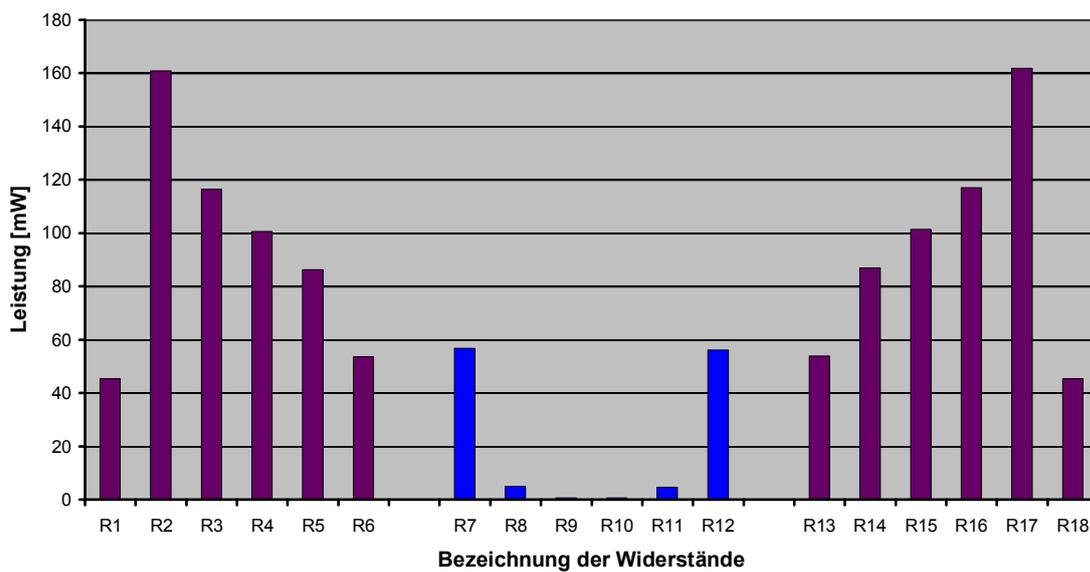


Bild 7.6-1:

a) Zwei Reihen mit jeweils sechs parallel geschalteten Ringheizelementen.

b) Umsetzung einer Reihe mit Heizelementen in ein Widerstandsnetzwerk. Die Widerstände R7 bis R12 stellen die Ringheizelemente dar. Die an den Widerständen anliegenden Spannungspotentiale wurden mit dem Programm Eagle berechnet.

c) Bei einer Spannung von 10 V an den Widerständen des Netzwerks abfallende Leistungen. An den Heizelementen R7–R12 fallen weit geringere Leistungen ab, als an den Zuleitungen zu den Heizelementen.

7.7 Kennlinien von Drucksensoren

Nutzen	N74		
Sensor	S1		Nummerierung gemäß Festlegung in Bild 5.4-6
Werkstoff der Kreisplatte	Glas		
Werkstoff der DMS	15 nm Cr 140 nm Au		
Werkstoff der Nutzen	PEEK		
Sensorkammerform	zylindrisch		
DMS_{tan}	1233	Ω	Widerstand des Tangential-DMS
DMS_{rad}	1280	Ω	Widerstand des Radial-DMS
DMS_{tan} bis DMS_{rad}	2510	Ω	Gesamtwiderstand der DMS-Halbbrücke
R3	1232	Ω	Abgleichwiderstand
R4	1192	Ω	Abgleichwiderstand
U_0	5	V	Versorgungsspannung
Messpause	1	min	Der Signalwert wurde 1min nach dem Einstellen des Drucks abgelesen, um einen stabilen Druckwert zu erhalten.

Tabelle 7.7-1: Kenndaten des Nickeldrucksensors S1, N74

Nutzen	N89		
Sensor	S9		Nummerierung gemäß Festlegung in Bild 5.4-6
Werkstoff der Kreisplatte	Glas		
Werkstoff der DMS	15 nm Cr, 120 nm Au		
Werkstoff der Nutzen	PEEK		
Sensorkammerform	zylindrisch		
DMS_{tan}	1227	Ω	Widerstand des Tangential-DMS
DMS_{rad}	1253	Ω	Widerstand des Radial-DMS
DMS_{tan} bis DMS_{rad}	2478	Ω	Gesamtwiderstand der DMS-Halbbrücke
R3	—	Ω	Abgleichwiderstand
R4	—	Ω	Abgleichwiderstand
U_0	5	V	Versorgungsspannung
Messpause	1	min	Der Signalwert wurde 1min nach dem Einstellen des Drucks abgelesen, um einen stabilen Druckwert zu erhalten.

Tabelle 7.7-2: Kenndaten des Nickeldrucksensors S9, N89

Nutzen	N2790		
Sensor	S4		Nummerierung gemäß Festlegung in Bild 5.4-6
Werkstoff der Kreisplatte	Nickel		
Werkstoff der DMS	200nm Gold		
Werkstoff der Nutzen	PEEK		
Sensorkammerform	linsenförmig		Nachgefräst mit Kugelfräser R6
DMS _{tan}	819	Ω	Widerstand des Tangential-DMS
DMS _{rad}	848	Ω	Widerstand des Radial-DMS
DMS _{tan} bis DMS _{rad}	1667	Ω	Gesamtwiderstand der DMS-Halbbrücke
R3	966	Ω	Abgleichwiderstand
R4	999	Ω	Abgleichwiderstand
U ₀	5	V	Versorgungsspannung
Messpause	1	min	Der Signalwert wurde 1min nach dem Einstellen des Drucks abgelesen, um einen stabilen Druckwert zu erhalten.

Tabelle 7.7-3: Kenndaten des Nickeldrucksensors S4, N2790

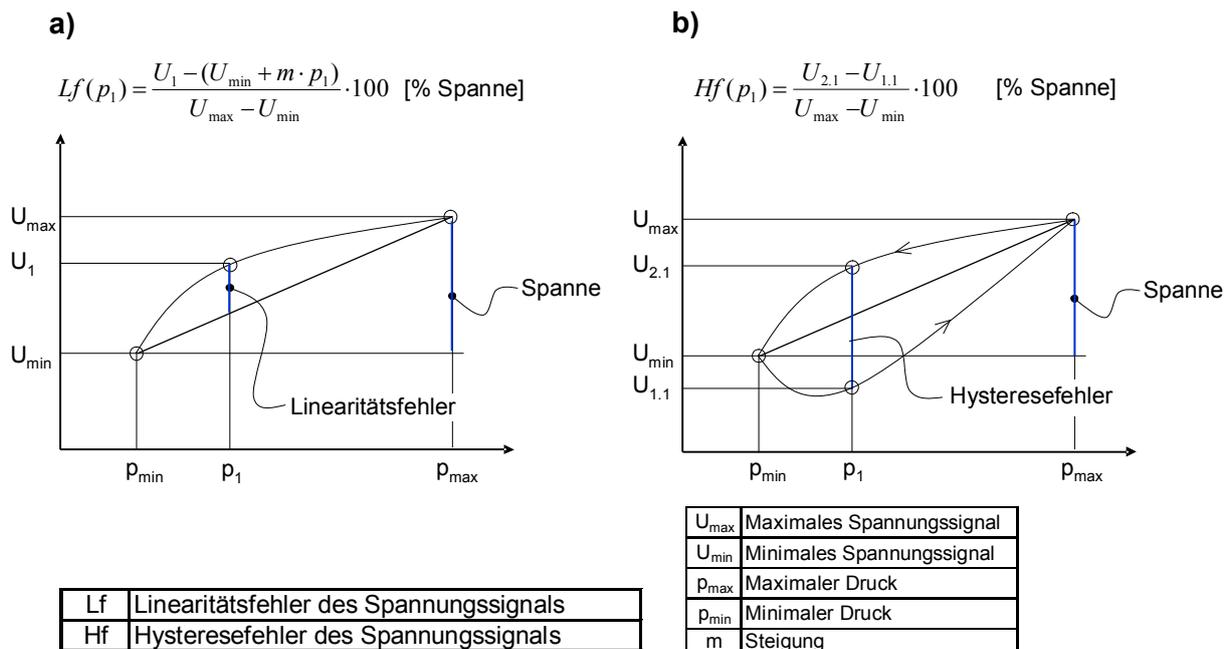


Bild 7.7-1: a) Berechnung der Linearitäts- und b) der Hysteresefehler einer Druckkennlinie nach der 2-Punkt-Methode.

7.8 DMS-Optimierung

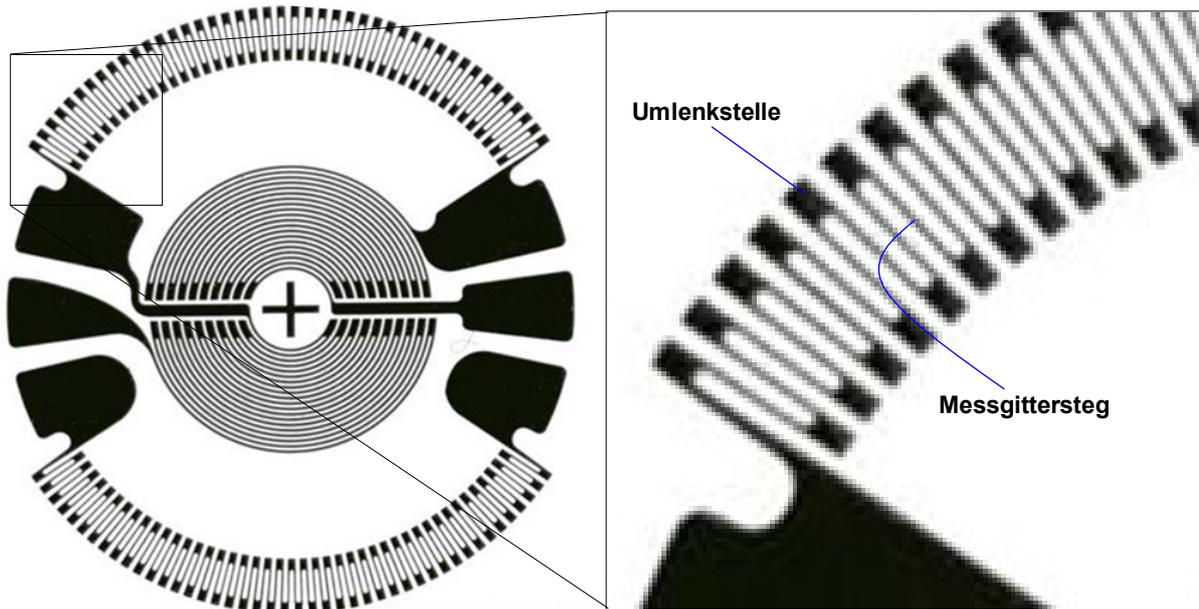


Bild 7.8-1: Typische Gestalt einer DMS-Vollbrücke, auch Messgitter genannt. Abbildung aus [BLH04].

Bild 7.8-2: Vergrößert dargestellt ist ein Messgitterabschnitt gebildet aus radial ausgerichteten Messgitterstegen, die über Umlenkstellen miteinander verbunden sind.

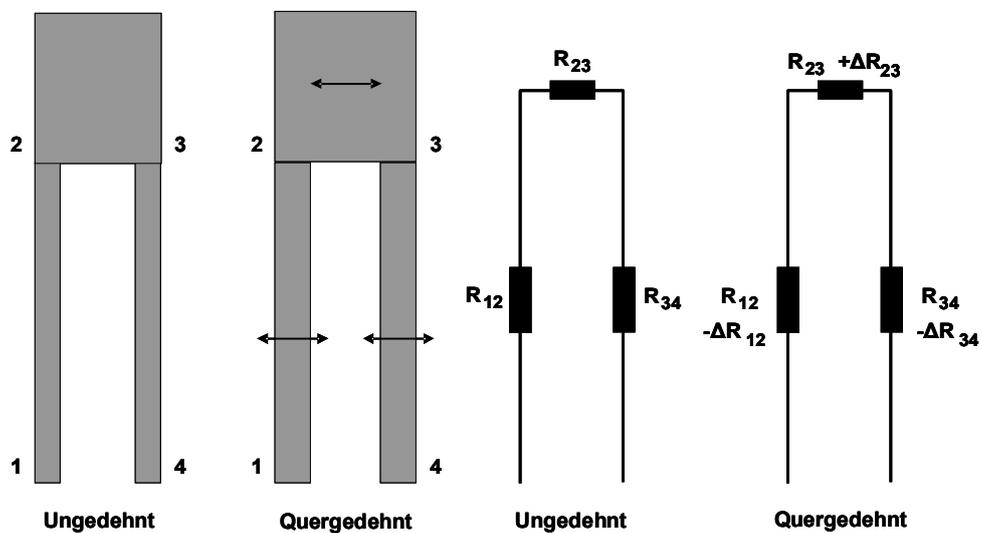


Bild 7.8-3: Zwei Gitterstege mit Umlenkstelle vor und nach der Querdehnung. Die Widerstandsänderungen ΔR_{ij} der Gitterstege und der Umlenkstelle verlaufen gegensinnig.

Werkstoffart	Kurzzeichen	Werkstoffnummer	E-Modul bei 20 °C [N/mm ²]	Querdehnungszahl μ
Glas (D 263 T)	—	—	72.900	0,208
Nickel	Ni	—	197.000	0,31
Neusilber	CuNi 18 Zn 20	2.0740.39	135.000	—
**	CuBe 2	2.1247	135.000	0,33
Bronze	CuSn 6	2.1020.30	115.000	0,35
Messing	CuZn 37	2.0321.30	110.000	0,37
Titan	Ti	—	105.200	0,33

Tabelle 7.8-1: Eine Auswahl an Federwerkstoffen [BLH05], [Scha63], [Dubb90].

7.8.1 Vergleich analytischer und mit FEM berechneten Ergebnisse

Material	D 263 T	—
Radius der Kreisplatte	1042	μm
Dicke der Kreisplatte	50	μm
Querkontraktionszahl	0,208	—
E-Modul	72.900	N/mm ²
Druck	2	bar

Tabelle 7.8-2: Verwendete Parameter der Kreisplatte aus Dünnglas.

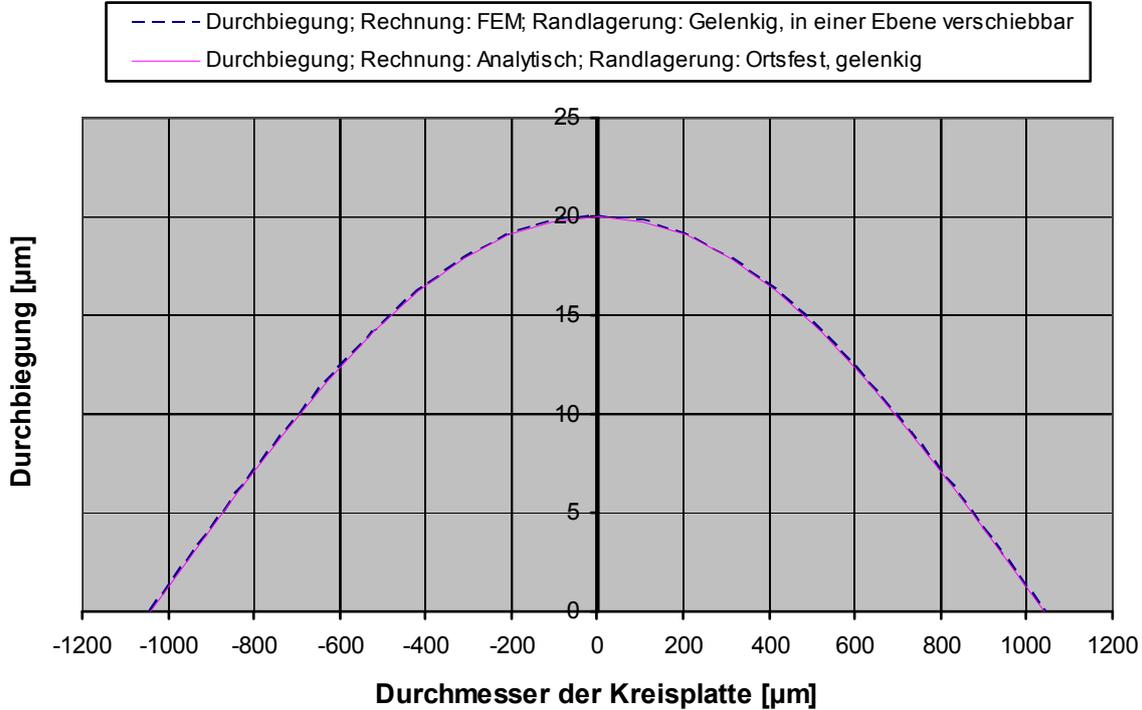


Bild 7.8-4: Durchbiegung einer Kreisplatte (Parameter s. Tabelle 7.7-1) berechnet mit analytischen Kreisplattenformeln und mit dem FEM-Programm Pro/Mechanica.

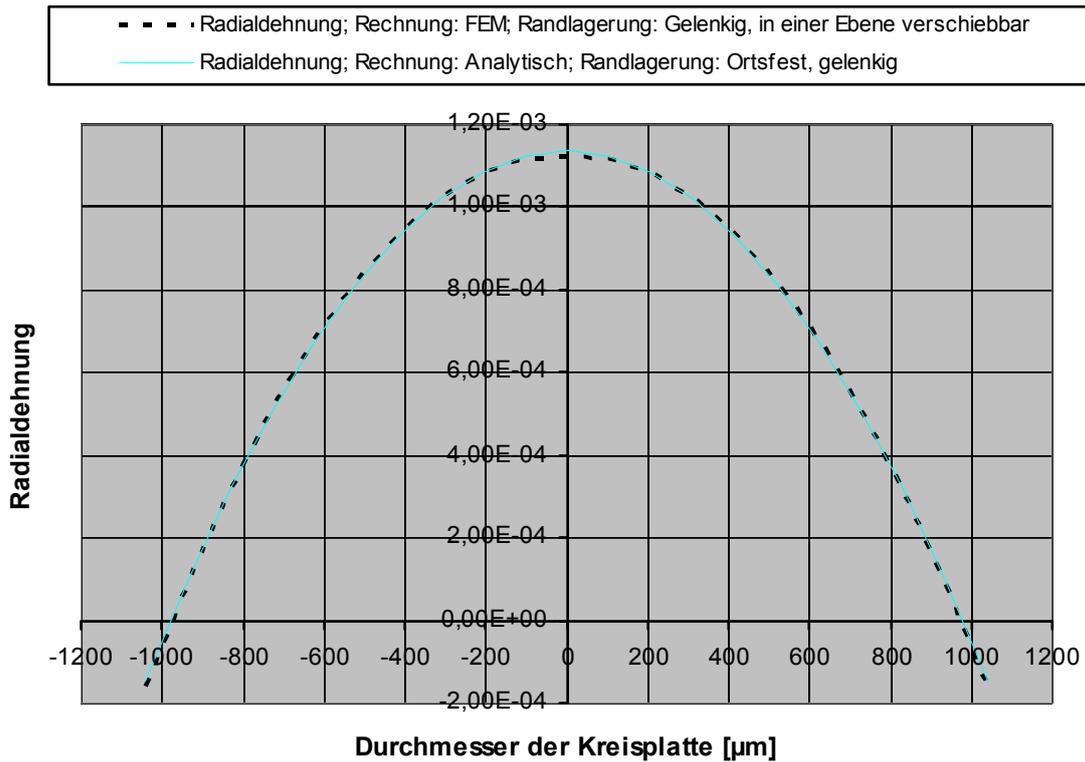


Bild 7.8-5: Radialdehnungen auf einer Kreisplatte (Parameter s. Tabelle 7.7-1) berechnet mit analytischen Kreisplattenformeln und mit dem FEM-Programm Pro/Mechanica.

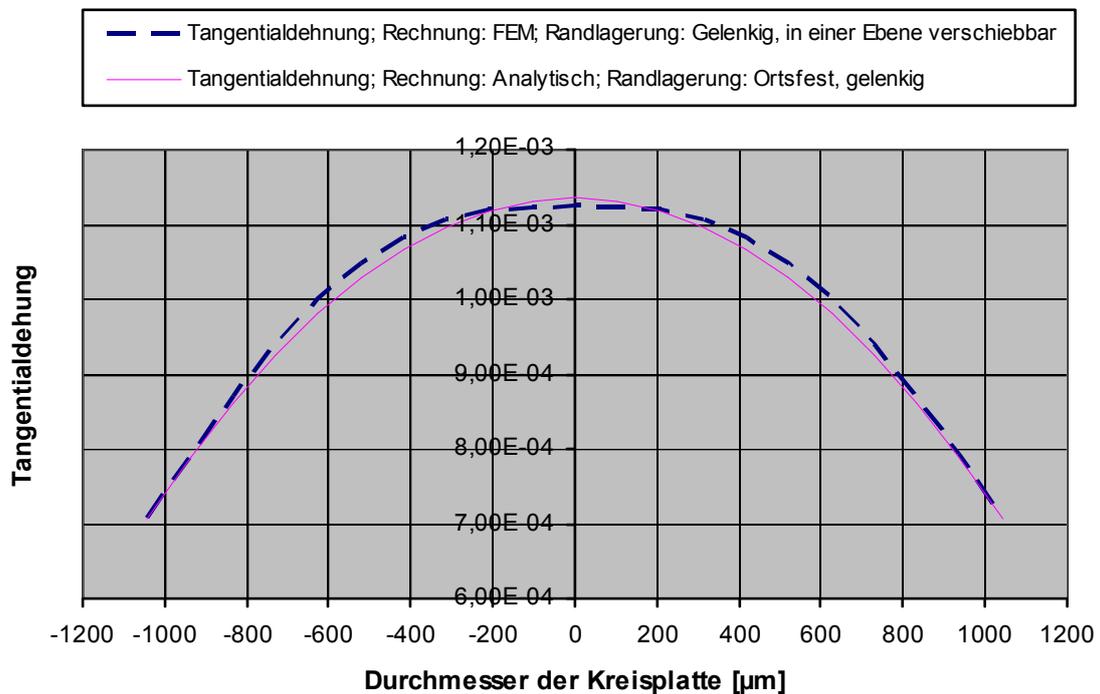


Bild 7.8-6: Tangentialdehnungen auf einer Kreisplatte (Parameter s. Tabelle 7.7-1) berechnet mit analytischen Kreisplattenformeln und mit dem FEM-Programm Pro/Mechanica.

8 Schrifttum

- [Ageo01] Ageorges, C., Ye, L., Hou, M.
Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review.
Elsevier Science Ltd., S. 839–846, 2001
- [Ahre04] Ahrens, R.
Thermischer Flusssensor: Chrom-Gold-Schichten.
Vortrag am Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 27. Juli 2004
- [Aman05] Ingenieur-Büro Amann
Kreisplatten- und Kreisringplatten Berechnungsblätter.
Kamp-Lintfort, 2005
- [Arch01] Arch Chemicals, Inc.
Durimide – Polyimides for the Microelectronic Industry.
Norwalk, Connecticut, USA, 2001
- [Arch04] Arch Chemicals, Inc.
Durimide 7500 series.
Produktdatenblätter, Norwalk, Connecticut, USA, 2004
- [Band03] Bandelin electronic GmbH & Co. KG
Mündliche Mitteilung.
Berlin, 2003
- [Band04] Bandelin electronic GmbH & Co. KG
Zur Verwendung von destilliertem, deionisiertem, demineralisiertem, hochreinem Wasser, kurz VE-Wasser (vollentsalztes Wasser) genannt.
Berlin, 2004
- [Bert59] Bertodo, R
Development of high-temperature strain gages.
Proc. Inst. Mec. Engrs. 173, 605–616, 1959
- [Birk67] Birkenfeld, W.
Die praktische Anwendung von Membranrosetten.
Messtechnische Briefe, Heft 2, 1967
- [Birk68] Birkenfeld, W.
Bau von Druckaufnehmern mit Membranrosetten.
GIT, Fachz. Lab., 12.Jg., Heft 9, Sept 1968
- [BLH04] Vishay Measurements Group GmbH
Produktkatalog.
Heilbronn, www.blh.de, 2004
- [BLH05] Vishay Measurements Group GmbH
DMS-Handbuch.
Heilbronn, www.blh.de, 2005
- [Büst94] Büstgens, B.; Bacher, W.; Bier, W.; Ehnes, R., Maas, D., Ruprecht, R.; Schomburg, W.K., Keydel, L.
Micromembrane pump manufactured by molding.
Actuator 94, Bremen, June 15–17, S. 86–90, 1994
- [Büst96] Büstgens, B.
Entwicklung von Mikromembranpumpen von der seriengerechten Konzeption bis zur Anwendung.
Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 1996.

- [Czer38] Czerlinsky, E.
Untersuchungen über die Widerstandsänderungen von Drähten durch Zug.
Jb. Der deutschen Luftfahrt-Forschung, Abt. II, 377–380, 1938
- [Ditt01] Dittmann, D.; Rummeler, Z.; Schlote-Holubek, K.; Schomburg, W.K.
Durchflusssensoren aus Kunststoff für sehr kleine Volumenströme auf der Basis des AMANDA-Verfahrens.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6710 (Februar 2002) Dissertation, Universität Karlsruhe, 2001
- [Domi05] Domininghaus, H.
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften.
Springer-Verlag, 2005
- [Dubb90] ***Dubbel.***
Springer-Verlag 1990
- [Edel00] Edelhoff GmbH
Produktbeschreibung: Kupfer-Nickel-Legierungen.
Iserlohn, www.edelhoff-wire.de/produkte/nielsen.htm, 2000
- [Engl63] Engl, W; Mlynski, Mlynski, D.
Das Linearitätsverhalten elastischer Platten.
Zeitschrift für Instrumentenkunde 71, S. 10 f, 1963
- [FHR04] FHR Anlagenbau GmbH
Mündliche Mitteilung auf telefonische Anfrage.
Ottendorf-Okrilla, Sept. 2004
- [Frit02] Fritz, Th.
Charakterisierung galvanisch abgeschiedener Nickel- und Nickelwolframschichten für mikrotechnische Anwendungen.
Dissertation RWTH Aachen, 2002
- [Fu04] Fu, Chien-Chung
Magnetically driven micro ball valve fabricated by multilayer adhesive film bonding.
Dissertation, Universität Karlsruhe, 2004
- [Girk54] Girkmann, K.
Flächentragwerke.
Springer-Verlag, 1954
- [Goll97] Goll, C.; Bacher, W.; Menz, W.; Schomburg, W.K.
Entwicklung, Herstellung und Test von aktiven Mikroventilen für pneumatische Anwendungen.
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997
- [Hadi05] Hadick, T.
Schweißen von Kunststoffen für Praktiker und Konstrukteur.
Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, 98 S., 1970
- [Heck98] Hecke, M.; Bacher, W.; Müller, K.D.
Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures.
Microsystem Technologies 4, S. 122–124, 1998
- [Hell96] Hellerich, Harsch, Haenle
Werkstoff-Führer Kunststoff.
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1996

- [Hero92] Herold, H.
Sensortechnik. Sensorwirkprinzipien und Sensorsysteme.
Hüthig-Verlag, 1992
- [Heyw92] Heywang, W.
Sensorik.
Springer-Verlag, 1993
- [Hoff86] Hoffmann, K.
Zur Herstellung moderner Folien-Dehnungsmessstreifen und den dabei gegebenen Korrekturmöglichkeiten für Kriechen und Querempfindlichkeit.
Hottinger Baldwin Messtech., Messtech. Briefe 22, S. 41–46, 1986
- [Hraf02] Hrafnadóttir, J.R.
PEEK-Edelstahl-Schweißen.
Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Studienarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [Kamm49] Kammer, E.W.; Pardue, T.E.
Electrical resistance changes of fine wires during elastic and plastic strains.
Proc. Soc. Exp. Stress Analysis 7, 7–20, 1949
- [Keil95] Keil, Stefan
Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen.
CUNEUS Verlag, 1995
- [Kell98] Keller AG für Druckmesstechnik
Firmeninformationen vom Internet.
Winterthur, Schweiz, www.keller.de, 1998
- [Koll01] Koller, T.
Optimierung der Kammerklebetechnik.
Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Diplomarbeit am IMT, Universität Karlsruhe, 2001
- [Kunz01] Kunz, M.
Verschweißen von Mikrokomponenten aus Kunststoff.
Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Diplomarbeit am IMT, Universität Karlsruhe, 2001
- [Leyb89] Leybold AG
Technische Dokumentation Katoden-Zerstäubungsanlage.
Hanau, 1989
- [Lipp05] Lipp-Terler GmbH
Firmeninformationen vom Internet.
Gaflenz, Österreich, www.lipp-terler.com, 2005
- [Maha99] Mahabiz, M.M.; Cohn, M.B.; Howe, R.T.; Horowitz, R.; Pisano, A.P.
Batch micropackaging by compression-bonded wafer-wafer transfer.
Technical Digest of 12th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'99, 17.–21.1.1999 in Orlando, Florida, USA, 482–489, 1999
- [Mand05] Mandisloh, K.
Mündliche Mitteilung zum Maskieren von Silizium mit Chrom.
Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2005

- [Mart98] Martin, J.
Entwicklung, Herstellung und Erprobung mikromechanischer Druck- und Durchflusssensoren für pneumatische Anwendungen.
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998
- [Menz97] Menz, W.; Mohr, J.
Mikrosystemtechnik für Ingenieure.
VCH Verlag, Weinheim, 1997
- [Merk00] Merkel, M., Thomas, K.-H.
Taschenbuch der Werkstoffe.
Fachbuchverlag Leipzig, Carl Hanser Verlag, 2000
- [Minc05] Minco EC AG
Hersteller von fühlereisen Temperaturreglern und Heizfolien.
CH-9244 Niederuzwil, www.minco.com, 2005
- [Nexu02] Nexus Task Force
Market analysis for Mikrosystems.
2002
- [Optr03] Optrex Europe
Telefonische Auskunft hinsichtlich der Zerbrechlichkeit und Handhabung von Dünnglas.
www.optrex.com, 2003
- [Ort77] Ort, W.; Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
Eine neue Technologie zur Herstellung von Dünngilm-Dehnungsmessstreifen für den Aufnehmerbau.
Messtechnische Briefe 13, Heft 1, 1977
- [Ort82] Ort, W.
Sensoren mit Metallfolien-Dehnungsmessstreifen.
Messtechnische Briefe 18, Heft 1, 1982
- [Ort83] Ort, W.
Sensoren mit Metallfolien-Dehnungsmessstreifen.
Wägen + dosieren, Heft 2, S. 39 ff., 1983
- [Ort84] Ort, W.
Sensoren mit aufgedampften Dehnungsmessstreifen.
VDI-Berichte Nr. 509, S. 205 ff., 1984
- [Paet88] Paetow, J.
Die 6-Leiterschaltung für DMS-Aufnehmer.
Wägen + dosieren, 1/1988
- [Pfei89] Pfeifer, G; Werthschützky, R.
Drucksensoren.
VEB Verlag, 1989
- [Poll89] Pollack-Diener, G.
Montagetechniken für Silizium-Sensoren.
Technisches Messen tm 56, Heft 11, Oldenbourg Verlag, 1989
- [Rau86] Rau, L.
Ein piezoresistiver Absolutdrucksensor in Dünngschichttechnik.
NTG-Fachberichte 93, 148, 1986
- [Rogg01] Rogge, T.; Rummeler, Z.; Schomburg, W.K.
Entwicklung eines piezoeetriebenen Mikroventils – von der Idee bis zur Vorserienfertigung.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6671 (November 2001) Dissertation

(T.Rogge), Universität Karlsruhe, 2001

- [Rumm98] Rummeler, Z.M.; Schomburg, W.K.
Entwicklung und Optimierung eines Mikroentgasers für die HPLC unter dem Aspekt der industriellen Herstellbarkeit.
Dissertation (Z.M.Rummeler), Universität Karlsruhe, 1998
- [Saec86] Saechtling, H.
Kunststoff Taschenbuch.
München; Wien: Hanser, 1986
- [Sand86] H. Sandmaier, E. Obermeier
Reduzierung der Nichtlinearität von Siliziumdrucksensoren für kleine Drücke.
NTG Fachberichte 93, 148, 1986
- [Scha63] Schaumburg, Hanno; Althen, D. H. (Bearb.)
Sensoranwendungen. Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik.
Teubner, 1995
- [Schi92] Schiessle, E.
Sensortechnik und Messwertaufnahme.
Vogel Buchverlag, 1992
- [Scho03] Schott Displayglas GmbH
Mündliche Mitteilung.
Mainz, 2004
- [Scho05] Schott AG
Informationen vom Internet.
www.schott.com, 2005
- [Scho97] Schomburg, W.K.; Ahrens, R.; Bacher, W.; Goll, C.; Meinzer, S.; Quinte, A.
AMANDA – Low Cost Production of Microfluidic Devices.
Transducers '97, Special Volume of Sensors and Actuators, Elsevier, 1997
- [Schrü83] Schrüfer, E.
Elektrische Messtechnik.
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1983
- [Sing99] Singh, A.; Horsley, D.A.; Cohn, M.B.; Pisano, A.P.; Howe, R.T.
Batch transfer of microstructures using flip-chip solder bonding.
IEEE Journal of microelectromechanical systems, vol. 8, no. 1, march 1999
- [Sono05] Sonotronic Nagel GmbH
Mündliche Mitteilung zum Ultraschallschweißen.
Karlsbad-Ittersbach, 2005
- [Stoc00] Stockmann, M.
Mikromechanische Analyse der Wirkungsmechanismen elektrischer Dehnungsmessstreifen.
Habilitation, Technische Universität Chemnitz, 2000
- [STW05] Sensor-Technik Wiedemann GmbH
Produktinformationen vom Internet..
Kaufbeuren, www.sensor-technik.de, 2005
- [Tamp04] Tampoprint AG
Produktkatalog.
Korntal-Münchingen, www.tampoprint.de, 2004
- [Trän98] Tränkler, H.R.; Obermaier, E.

Sensortechnik.

Springer, 1998

- [Truc04] Truckenmüller, R.; Henzi, P.; Herrmann, D.; Saile, V., Schomburg, W. K.
Process for Polymer Micro- and Nanostructures Based on Near-Surface Degradation.
Proc. 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Maastricht, pp. 761–764, The Netherlands, 2004
- [Uebb98] Uebbing, M.
Fügen von Kunststoffen: Leitfaden für Fertigung und Konstruktion.
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Düsseldorf : DVS-Verlag, 150 S., 1998
- [VDI04] ***Mikro-System mit Makro-Hebel.***
VDI Nachrichten, Nr. 13, 26. März 2004
- [VDI74] VDI/VDE-Richtlinie 2635
Dehnungsmessstreifen mit metallischen Messgitter, Kenngrößen und Prüfbedingungen.
Beuth-Vertrieb GmbH Berlin und Köln, 1974
- [Vish05] Vishay Electronic GmbH
Design considerations for diaphragm pressure transducers.
TN-510, 2005
- [Webe02] Weber, Andreas; Plichta, Armin
Dünnstglas-Polymer-Verbundsysteme als innovative flexible Substrate für die Displaytechnologie.
Schlußbericht / ZE: Schott Glas. Mainz, Umfang: 40, 6 Bilder, graph. Darst., Förderkennzeichen BMBF 01 BD 050, 2002
- [Wolk04] Wolke, D.
Integriertes Mikrodosiersystem aus Kunststoff.
Dissertation, Universität Karlsruhe, 2004
- [Wulf01] Wulff, K.; Rummler, Z.; Schomburg, W.K.
Hybride Drucksensoren aus Kunststoff und Glas nach dem AMANDA-Verfahren.
Wissenschaftlicher Bericht, FZKA 6682, Forschungszentrum Karlsruhe, 2001