

# **Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6682

## **Hybride Drucksensoren aus Kunststoff und Glas nach dem AMANDA-Verfahren**

Kolja Wulff <sup>\*)</sup>, Zeno Rummler, Werner K. Schomburg

Institut für Mikrostrukturtechnik

<sup>\*)</sup> Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (T.H.) genehmigte Dissertation

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
2001**

**Impressum der Print-Ausgabe:**

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

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

**ISSN 0947-8620**

# **Hybride Drucksensoren aus Kunststoff und Glas nach dem AMANDA-Verfahren**

---

---

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Dipl.-Ing. Kolja Wulff  
aus Sanderbusch  
(Friesland)

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2001

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile  
Korreferent: Prof. Dr. D. Munz

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neuartige Drucksensoren, die sich durch einen hybriden Aufbau aus Kunststoff und Glas auszeichnen, vorgestellt.

Mit dem Ziel, Drucksensoren mit dem kostengünstigen AMANDA-Verfahren zu fertigen, wurden Konzepte erarbeitet und anhand industriell geforderter Spezifikationen bewertet. Als Ergebnis wurde ein Erzeugniskonzept erstellt, bei dem der Drucksensor im wesentlichen aus zwei abgeformten Gehäuseteilen, einer Trägermembran und einer kreisförmigen Messplatte aus Glas aufgebaut ist. Mechanische Spannungen bzw. Dehnungen, die im Gehäuse auftreten, werden nicht auf den sensitiven Teil der Messplatte übertragen, da diese über eine dünne, schlaife Trägermembran mit dem Gehäuse verbunden ist. Die Messplatte legt sich bei Anliegen einer Druckdifferenz im Gehäuse entweder auf der einen oder auf der anderen Seite an und wird dabei immer auf die gleiche Weise an ihrem Rand gelagert. Dazu ist die eine Gehäuseschale in Form einer Hohlkugel ausgeführt, in der sich eine kreisförmige Platte unabhängig von Lageabweichungen immer entlang ihres Randes anlegt. Auf der anderen Seite wird die Messplatte auf dem flachen Boden des Gehäuses über einen auf ihr angebrachten Ring aus Polyimid auch bei Positionsabweichungen auf immer die gleiche Weise gelagert.

Auf der Oberfläche der Messplatte befinden sich Dehnungsmessstreifen (DMS), die die Messplattendehnung bei Druckbeaufschlagung erfassen. Um das Layout für die DMS festzulegen, wurde der Spannungs- bzw. Dehnungsverlauf auf der berechneten frei gelagerten Messplatte durch mathematische Gleichungen beschrieben und Gleichungen für die Änderung des elektrischen Widerstandes von DMS auf der Platte hergeleitet. Die Gleichungen wurden in ein Computerprogramm eingebracht, mit dem die Kennlinien in Abhängigkeit des Layouts der DMS simuliert werden konnten.

Es wurden jeweils 12 Drucksensoren parallel gefertigt, wobei jeder Drucksensor eine aus 50 µm dicken Glassubstraten herausgeätzte Messplatte mit einem Durchmesser von 2084 µm enthält. Dieser Durchmesser wurde so berechnet, dass bei Belastung der Messplatte mit Druckdifferenzen von  $\pm 1000$  hPa ein linearer Zusammenhang zwischen zentraler Auslenkung und Druckdifferenz besteht.

Innerhalb der Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren wurde eine Möglichkeit zur beidseitigen positionierten Prozessierung dünner Glassubstrate erarbeitet. Die Prozessierung der Glassubstrate beinhaltet das Aufbringen und Strukturieren einer Trägermembran aus Polyimid, mehrfaches Aufdampfen und Strukturieren von Dünnschichten aus Chrom und Gold, sowie die Strukturierung des Glassubstrates selbst. Die Gehäusenutzen für die Ober- und Unterteile der Drucksensoren werden gleichzeitig mit einem Werkzeug abgeformt, wodurch sie den selben Schrumpf erfahren und genau zueinander passen. Integrierte Pass-Stifte vereinfachten die Montage der Gehäusenutzen, die in Polysulfon und Polyetheretherketon abgeformt wurden.

Einige Demonstratoren wurden hergestellt und ihre charakteristischen Kennlinien aufgenommen. Dabei zeigten sich Kennlinien mit einem ausgezeichnet linearen Verlauf, mit Korrelationskoeffizienten von  $R^2=0,9999$  und einer Auflösung von 10 hPa. Ein Messbereich von  $-900$  hPa bis  $+2000$  hPa konnte abgebildet werden. Die Untersuchungen zeigten, dass die Kennlinien ein „Knie“ aufweisen, wenn die Membran nicht, wie vom Konzept her vorgesehen, schlaif im Gehäuse aufgehängt ist. Eine Optimierung der Membranspannung muss deshalb das Ziel weiterführender Entwicklungen sein.

## Abstract

Novel pressure sensors characterized by a hybrid setup of both plastic and glass have been presented.

Concepts have been developed for the fabrication of pressure sensors using the low-cost AMANDA process. These concepts have then been evaluated on the basis of specifications made by industry. This has resulted in a new product concept with the pressure sensor mainly consisting of two molded housing parts, a carrier membrane, and a circular measurement plate made of glass. Mechanical stresses or strains occurring in the housing are not transferred to the sensitive part of the measurement plate, as the latter is connected to the housing via a thin, slack carrier membrane. In case of a pressure gradient prevailing in the housing, the measurement plate rests against the one or the other side, while its bearing at the edge remains the same. One housing shell is designed as a hollow sphere. Here, a circular plate always contacts along its edges irrespective of positional deviations. On the other side, the measurement plate is always borne by a polyimide ring fixed to the bottom of the housing. This even holds in case of positional deviations.

On its surface, the measurement plate is equipped with strain gauges that measure the strain of the measurement plate under a pressure load. To specify the layout of the strain gauges, the stress and strain behavior on the calculated free measurement plate was described by mathematical equations. Furthermore, equations were derived for the variation of strain gauge resistance on the plate. These equations were entered into a computer program, by means of which the characteristics could be simulated as a function of strain gauge layout.

12 pressure sensors were manufactured in parallel with each pressure sensor containing a measurement plate of 2084  $\mu\text{m}$  in diameter, which was etched from 50  $\mu\text{m}$  thick glass substrates. This diameter ensures a linear relationship between central deflection and pressure difference in case of the measurement plate being subjected to pressure differences of  $\pm 1000$  hPa.

In the course of process development, the technique of double-sided, positioned processing of thin glass substrates was established. Processing of glass substrates comprises the application and structurization of a polyimide carrier membrane, repeated evaporation and patterning of thin chromium and gold layers, and the structurization of the glass substrate itself. The housing batches for the upper and lower parts of the pressure sensors are molded simultaneously. As a result, they are subjected to the same shrinkage and, thus, fit excellently to each other. Integrated positioning pins facilitate the assembly of the housing batches molded into polysulfone and polyetheretherketone.

Several demonstrators were produced and their characteristics were measured. They exhibited a perfectly linear behavior with correlation coefficients of  $R^2 = 0.9999$  and a resolution of 10 hPa. The measurement range extended from - 900 hPa up to + 2000 hPa. Studies have demonstrated that the characteristics exhibit a "knee" when the membrane is not suspended in the housing in the slack manner envisaged by the concept. Further development work will therefore focus on an optimization of membrane stress.

|            |                                                                                           |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>EINLEITUNG</b>                                                                         | <b>1</b>  |
| <b>2</b>   | <b>ERZEUGNISKONZEPT</b>                                                                   | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>VORAUSSETZUNGEN</b>                                                                    | <b>5</b>  |
| 2.1.1      | DAS AMANDA-VERFAHREN                                                                      | 5         |
| 2.1.2      | REALISIERTE DRUCK- UND DURCHFLUSSSENSOREN<br>NACH DEM AMANDA-VERFAHREN                    | 8         |
| 2.1.3      | ANFORDERUNGEN AN DEN NEU ZU ENTWICKELNDEN DRUCKSENSOR                                     | 10        |
| <b>2.2</b> | <b>VORÜBERLEGUNGEN UND KONZEPTENTWÜRFE</b>                                                | <b>11</b> |
| 2.2.1      | GLAS IN DER MIKROTECHNIK                                                                  | 11        |
| 2.2.2      | DRUCKSENSOR MIT MEMBRANGELAGERTER GLASPLATTE                                              | 13        |
| 2.2.3      | DRUCKSENSOR MIT GLASMEMBRAN                                                               | 14        |
| 2.2.4      | DRUCKSENSOR AUS GLAS                                                                      | 15        |
| <b>2.3</b> | <b>ERARBEITETES UND VERFOLGTES KONZEPT</b>                                                | <b>16</b> |
| 2.3.1      | DRUCKSENSOR MIT RANDGELAGERTER GLASPLATTE                                                 | 16        |
| <b>3</b>   | <b>FERTIGUNGSKONZEPT</b>                                                                  | <b>19</b> |
| <b>3.1</b> | <b>VORVERSUCHE ZUR REALISIERBARKEIT</b>                                                   | <b>19</b> |
| 3.1.1      | STRUKTURIERUNGSVERSUCHE VON DÜNNEN GLASSUBSTRATEN                                         | 19        |
| 3.1.2      | STRUKTURIERUNGSVERSUCHE AUF DÜNNEN GLASSUBSTRATEN                                         | 21        |
| 3.1.3      | HERSTELLUNG UND BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER MEMBRANEN                                     | 22        |
| 3.1.4      | KOMBINATION MEMBRAN – GLASPLATTE                                                          | 24        |
| 3.1.5      | MATERIALAUSWAHL UND ABGELEITETES FERTIGUNGSKONZEPT                                        | 26        |
| <b>3.2</b> | <b>HERSTELLUNGSPROZESS</b>                                                                | <b>27</b> |
| 3.2.1      | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES HERSTELLUNGSPROZESSES                                        | 28        |
| <b>4</b>   | <b>LAYOUT UND DESIGN</b>                                                                  | <b>31</b> |
| <b>4.1</b> | <b>GRUNDLAGEN ZUR AUSLEGUNG DES DRUCKSENSORS</b>                                          | <b>31</b> |
| 4.1.1      | MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON GLAS                                                        | 31        |
| 4.1.2      | PIEZORESISTIVER EFFEKT                                                                    | 32        |
| <b>4.2</b> | <b>DIMENSIONIERUNG DES DRUCKSENSORS</b>                                                   | <b>34</b> |
| 4.2.1      | GEOMETRISCHE DIMENSIONIERUNG DER MESSPLATTE                                               | 34        |
| 4.2.2      | SPANNUNGS-DEHNUNGSVERLAUF AUF EINER AN IHREM RAND<br>FREI GELAGERTEN KREISFÖRMIGEN PLATTE | 35        |
| 4.2.3      | BERECHNUNG UND LAYOUT DER DEHNUNGSMESSSTREIFEN                                            | 38        |
| 4.2.4      | SIMULATION DER KENNLINIE                                                                  | 43        |
| 4.2.5      | OPTIMIERUNG DES LAYOUTS DER DEHNUNGSMESSSTREIFEN                                          | 46        |
| <b>4.3</b> | <b>LAYOUT DER CHROMMASKEN</b>                                                             | <b>49</b> |
| <b>4.4</b> | <b>DESIGN DES ABFORMWERKZEUGES</b>                                                        | <b>54</b> |

|            |                                                                  |           |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b>   | <b>VERFAHRENTWICKLUNG ZUR FERTIGUNG DER DRUCKSENSOREN</b>        | <b>57</b> |
| <b>5.1</b> | <b>BEIDSEITIGE PROZESSIERUNG DÜNNER GLASSUBSTRATE</b>            | <b>57</b> |
| 5.1.1      | MIKROSTRUKTURIERUNG AUF GLASSUBSTRATEN                           | 57        |
| 5.1.2      | STRUKTURIERUNG VON DEHNUNGSMESSSTREIFEN                          | 59        |
| 5.1.2.1    | Chrom-Gold-DMS durch direkte Ätzung                              | 59        |
| 5.1.2.2    | Platin-DMS durch Lift-Off-Prozess                                | 60        |
| <b>5.2</b> | <b>ABFORMUNG DER GEHÄUSETEILE DURCH HEIßPRÄGEN</b>               | <b>61</b> |
| 5.2.1      | GEHÄUSETEILE AUS POLYSULFON (PSU) UND POLYETHERETHERKETON (PEEK) | 61        |
| <b>5.3</b> | <b>MONTAGE UND VEREINZELUNG DER DRUCKSENSOREN</b>                | <b>62</b> |
| 5.3.1      | VERKLEBEN VON GEHÄUSENUTZEN UND PROZESSIERTEM GLASSUBSTRAT       | 62        |
| 5.3.2      | ÄTZEN DER MESSPLATTEN AUS GLAS                                   | 64        |
| 5.3.3      | ZWEITE GEHÄUSEVERKLEBUNG UND KONFEKTIONIERUNG DER DRUCKSENSOREN  | 65        |
| 5.3.4      | VEREINZELUNG DER DRUCKSENSOREN                                   | 66        |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>6</b>   | <b>TEST DER DRUCKSENSOREN</b>                                    | <b>67</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>6.1</b> | <b>MESSAUFBAU</b>                                                | <b>67</b> |
| 6.1.1      | ERSATZSCHALTBILD UND BRÜCKENSCHALTUNG                            | 68        |
| <b>6.2</b> | <b>KENNLINIENAUFNAHME UND DISKUSSION</b>                         | <b>69</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>7</b>   | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>                              | <b>75</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>8</b>   | <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>                                      | <b>79</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>9</b>   | <b>INTERNETADRESSEN</b>                                          | <b>82</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>10</b>  | <b>ANHANG</b>                                                    | <b>83</b> |
| <br>       |                                                                  |           |
| <br>       |                                                                  |           |
| <b>11</b>  | <b>INDEX</b>                                                     | <b>88</b> |

# 1 Einleitung

Für den Begriff "Mikrosystemtechnik" gibt es gegenwärtig noch keine allgemein verbindliche Standarddefinition [Mesc00]. Im Programm "Mikrosystemtechnik 1994–1999" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wird ein Mikrosystem folgendermaßen erklärt:

*>> Werden Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft, daß sie "empfinden", "entscheiden" und "reagieren" können, spricht man von einem Mikrosystem. Hierbei ist entscheidend, daß die Funktionen eigenständig erfolgen. Sensoren entsprechen den menschlichen Sinnesorganen, die Signalverarbeitung entspricht dem Gehirn und Aktoren den Gliedmaßen [bmb] <<.*

Diese visionäre Definition spiegelt ein sehr ehrgeiziges Programm wider, das laut Experten derartige Mikrosysteme bereits im Jahre 201X hervorbringen wird [Bier00]. Interessanter Weise wurde in obiger Definition implizit die prinzipielle Vorgehensweise zur Entwicklung von Mikrosystemen formuliert. Für das langfristige Ziel ein Gesamtsystem zu realisieren, ist es notwendig, zunächst eigenständige Komponenten zu entwickeln und sie dann später, wie Teile aus einem Baukasten, miteinander zu verknüpfen. Werden dabei die Baukastenkomponenten mit ein und derselben Technologie gefertigt, vereinfacht sich die Integration entsprechend.

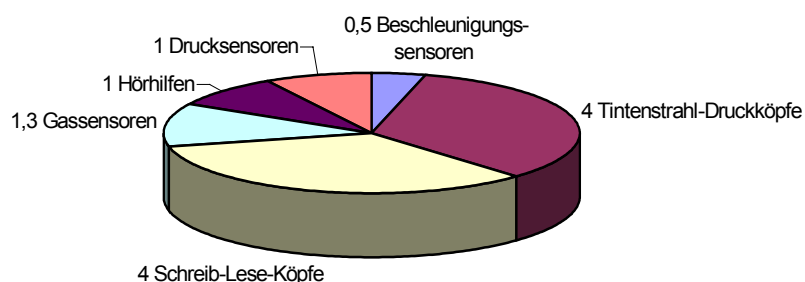
Eine solche Technologie, die es erlaubt, eine Vielzahl von Mikro-Komponenten herzustellen, wird seit Anfang der 90er Jahre am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) [imt] des Forschungszentrums Karlsruhe [fzk] entwickelt und mit dem Akronym AMANDA bezeichnet. Das AMANDA-Verfahren kombiniert die Verfahrensschritte **Abformung**, **Oberflächenmikromechanik** und **Membranübertragung** [Scho97]. Das erste mit diesem Verfahren hergestellte Produkt war eine Mikromembranpumpe mit thermopneumatischem Aktor [Büst94]. In der Folgezeit wurden Mikroventile [Fahr95, Goll96, Goll97, Kais00], Mikrosensoren [Mart98] und ein Mikroentgaser [Rumm00] entwickelt und auch andere Arbeitsgruppen begannen mikrofluidische Komponenten, basierend auf Varianten des AMANDA-Verfahrens, zu entwickeln [Döpp96, Lars97]. Neben einer breiten Produktpalette, zeichnet sich das AMANDA-Verfahren besonders durch die kostengünstige Parallelfertigung der Komponenten in Kunststoff aus.

Die wirtschaftliche Bedeutung von Mikrosystemen war in den vergangenen Jahren Thema zahlreicher Untersuchungen und Studien [Schr94, Tsch97, Wech97]. Übereinstimmend wurde festgestellt, dass neben der Zuverlässigkeit vor allem die Kosten entscheidende Faktoren für die Platzierung von Mikrosystemen am Markt darstellen [Pete95, Mare95].

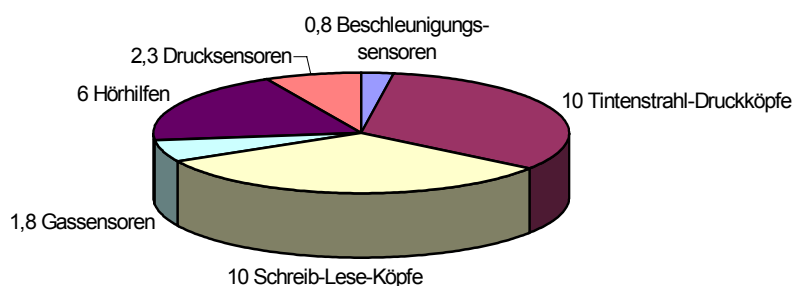
Betrachtet man die in Abbildung 1.1 prognostizierte Umsatzsteigerung von einigen Mikrosystem-Produkten, insbesondere die der Drucksensoren, so erklärt sich die Motivation der vorliegenden Arbeit.



### Umsatz 1995 [insgesamt ~ 11,8 Mrd. ECU]



### Umsatz 2002 [insgesamt ~ 30,9 Mrd. ECU]



**Abbildung 1.1** Aufteilung des MST-Weltmarktes einiger Produkte in Mrd.ECU [Wech97]

Allein bei Drucksensoren wird ein Umsatzwachstum von 130% zwischen 1995 und 2002 vorausgesagt. Unmittelbar vor der breiten Markteinführung stehen z.B. Drucksensoren im Bereich des Motormanagements bei Kraftfahrzeugen, bei der Reifendruckmessung oder für Seitenairbags. Damit für Drucksensoren auch in Zukunft weitere Anwendungen erschlossen werden können, müssen sie vor allem preiswert hergestellt werden können. Hierzu eröffnet das AMANDA-Verfahren neue Möglichkeiten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Möglichkeiten zu erkunden, wie Drucksensoren mit den spezifischen Randbedingungen, die sich aus dem AMANDA-Verfahren ergeben, gefertigt werden können. Dazu wurden typische Anforderungen, wie sie für preiswerte Drucksensoren zu erwarten sind, in einem Lastenheft zusammengefaßt. Danach wurde theoretisch untersucht, welche technischen Lösungen erforderlich sind, um Drucksensoren mit Spezifikationen herzustellen, die solche Anforderungen erreichen.

Die weiteren Schritte sind: Entwurf eines Drucksensor-Designs, Entwicklung eines Fertigungsverfahrens, sowie die Fertigung erster Demonstratoren.

Nachdem in diesem Kapitel auf den wachsenden Markt für Drucksensoren aufmerksam gemacht wurde, wird in Kapitel 2 ein Erzeugniskonzept für einen neu zu entwickelnden Drucksensor vorgestellt.

Vor dem Hintergrund, die Drucksensoren mit dem AMANDA-Verfahren zu fertigen, wird in Kapitel 3 ein Fertigungskonzept erarbeitet und ein Herstellungsprozess schematisch skizziert. Die Erarbeitung des Fertigungskonzeptes beinhaltet zahlreiche Vorversuche zur Realisierbarkeit des Herstellungsprozesses.

Nach einer abschließenden Bewertung und Materialauswahl, wird in Kapitel 4 die Gestaltung des Drucksensors festgelegt. Das Layout, der für den Herstellungsprozess notwendigen Chrommasken, sowie das Design, des zur Abformung benötigten Werkzeuges, wird ausführlich dargestellt. Von zentraler Bedeutung für die Funktionalität der Drucksensoren, ist das Layout der Dehnungsmessstreifen, die zur druckproportionalen Messsignalerfassung verwendet werden. Hierfür wird ein Simulationsprogramm benötigt, das im Vorfeld die zu erwartende Kennlinie der Drucksensoren simuliert und darüber hinaus zur Optimierung des DMS-Layouts genutzt wird.

Im folgenden Kapitel 5 wird die Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren beschrieben.

Bevor die vorliegende Arbeit zusammengefasst wird, zeigt Kapitel 6 die aufgenommenen Kennlinien der neu entwickelten Drucksensoren.



## 2 Erzeugniskonzept

Nach einleitenden Bemerkungen zu den relevanten Grundlagen zur Entwicklung eines Erzeugniskonzeptes für einen Drucksensor, wird in diesem Kapitel zunächst das AMANDA-Verfahren erläutert. Auf der Grundlage bereits realisierter Druck- und Durchflusssensoren und der dabei aufgetretenen Schwierigkeiten, werden Anforderungen an den neu zu entwickelnden Drucksensor in Anlehnung an industrielle Lastenhefte formuliert. Anschließend werden Konzeptentwürfe vorgestellt und die Möglichkeiten, sowie Schwierigkeiten ihrer Realisierung aufgezeigt. Das Kapitel schließt mit einem Erzeugniskonzept, das die Integration von Glas in einen Drucksensor vorsieht, der im übrigen aus Polymeren besteht.

### 2.1 Voraussetzungen

Seit Anfang der 90er Jahre wird am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Forschungszentrums Karlsruhe das AMANDA-Verfahren entwickelt, das die Verfahrensschritte **Abformung**, **Oberflächenmikromechanik** und **Membranübertragung** kombiniert [Scho97]. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß Mikrokomponenten aus Polymeren in größerer Stückzahl preisgünstig parallel im Nutzen gefertigt werden. Darüber hinaus kann aus einer großen Stoffklasse das für die jeweilige Anwendung günstigste Material ausgewählt werden. Das erste mit diesem Verfahren hergestellte Produkt war eine Mikromembranpumpe mit thermopneumatischem Aktor [Büst94]. In der Folgezeit wurden Mikroventile [Fahr95, Goll96, Goll97, Kais00], Mikrosensoren [Mart98] und ein Mikroentgaser [Rumm00] entwickelt.

#### 2.1.1 Das AMANDA-Verfahren

Die drei wesentlichen Verfahrensschritte, die das AMANDA-Verfahren kennzeichnen, werden in [Scho00], [Scho98] ausführlich beschrieben und hier am Beispiel der Fertigung bereits realisierter Drucksensoren schematisch dargestellt.

##### ➤ Abformung

Unter Abformung versteht man im Sinne des beschriebenen Verfahrens die Mikroformgebung von Kunststoffen durch Heißprägen oder Spritzguss. Bei beiden Verfahren, deren jeweiligen Vor- und Nachteile in den Referenzen [Rupr00, Kais00] beschrieben sind, wird einem Kunststoff die Form eines mikromechanisch gefertigten Werkzeuges aufgeprägt. Beim Spritzguss wird die Formgebung dadurch erreicht, dass der Formstoff als viskose Schmelze unter Druck möglichst laminar in das Werkzeug eingeleitet wird. Beim Heißprägen wird ein Folien- oder Plattenhalbzeug in die Heißprägemaschine eingelegt, und unter Vakuum wird das Werkzeug in das Halbzeug eingepresst [Heck00], [Heck99], [Heck98]. Nach dem Abkühlen wird das abgeformte Halbzeug entnommen (siehe Abbildung 2.1). Auf beide Arten lassen sich so mikrostrukturierte Gehäuseteile parallel im Nutzen herstellen. Der Vorteil des Heißprägens gegenüber dem Spritzgießen liegt in der größeren Strukturtreue und den geringeren inneren Spannungen der geformten Bauteile. Dafür sind längere Zykluszeiten in Kauf zu nehmen. Je nach

Anwendungszweck kommen beim Heißprägen eine Vielzahl von Polymeren, wie z.B. PMMA<sup>1</sup>, POM<sup>2</sup>, PVDF<sup>3</sup>, PEEK<sup>4</sup>, PA<sup>5</sup>, PSU<sup>6</sup>, PC<sup>7</sup> u.a. zum Einsatz.

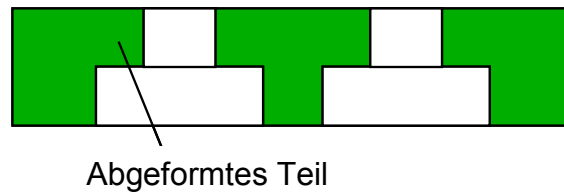


Abbildung 2.1 Durch Abformung hergestellter mikrostrukturierter Gehäusenutzen

➤ Oberflächenmikromechanik

Zum Aufbau mikromechanischer Funktionsstrukturen werden i.d.R. mit ca. 60 nm Gold bedampfte Silizium-Wafer verwendet. Aufgrund der geringen Haftung der gedampften Goldschichten zum Silizium können anschließend aufgebraute Schichten (z.B. Membranen, siehe Abbildung 2.2) leicht abgehoben werden. Auf diese sogenannten Gold-Abhebewafer werden durch Spin-On-Prozesse fotosensitive Negativ- oder Positivresists aufgeschleudert und durch optische Lithografie strukturiert. Nicht fotosensitive Schichten lassen sich durch reaktives Ionenätzen (RIE<sup>8</sup>) mit einer geeigneten Ätzmaske strukturieren. Elektrisch leitende funktionelle Schichten aus Metall (z.B. Dehnungsmessstreifen) werden durch Aufdampfen oder Sputtern aufgebracht. Diese werden ebenfalls mittels optischer Lithografie und naßchemischen Ätzprozessen strukturiert.

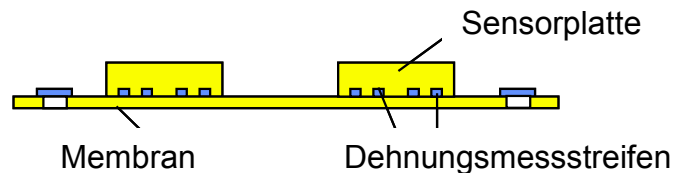
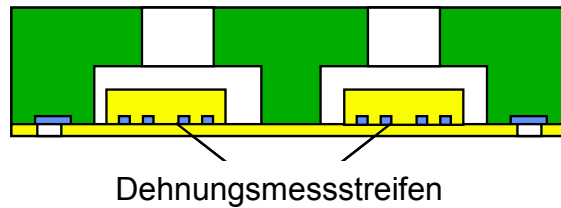


Abbildung 2.2 Durch Oberflächenmikromechanik hergestellte Membran mit Dehnungsmessstreifen, abgedeckt durch eine Sensorplatte aus Polyimid

➤ Membranübertragung

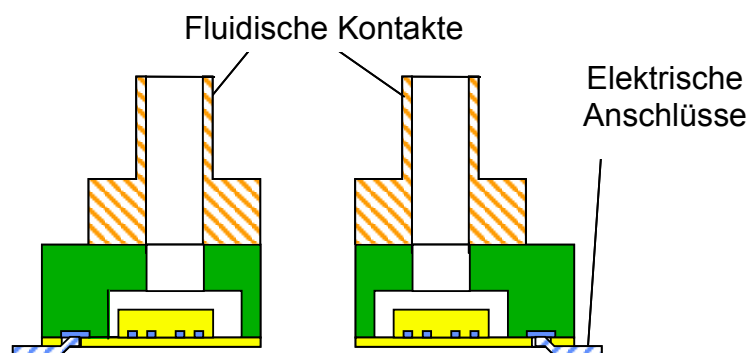
Die positionierte Übertragung der durch Oberflächenmikromechanik strukturierten Membran erfolgt mittels geeigneter Verbindungstechniken (z.B. Kleben oder Verschweißen) mit einem abgeformten Gehäusenutzen und anschließendem Abheben vom Silizium-Wafer.

<sup>1</sup> PMMA = Polymethylmethacrylat  
<sup>2</sup> POM = Polyacetal  
<sup>3</sup> PVDF = Polyvinylidenfluorid  
<sup>4</sup> PEEK = Polyetheretherketon  
<sup>5</sup> PA = Polyamid  
<sup>6</sup> PSU = Polysulfon  
<sup>7</sup> PC = Polycarbonat  
<sup>8</sup> RIE = Reactiv Ion Etching



**Abbildung 2.3** Kombination einer strukturierten Membran mit einem abgeformten Teil

Für das Verkleben von mikrostrukturierten Gehäusenutzen wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik die Kammerklebetechnik und das Kapillarkleben entwickelt [Maas96]. Bei der Kammerklebetechnik wird in den Mikrostrukturen der Fügepartner ein Hohlraumsystem vorgesehen, das mit einem Klebstoff befüllt wird. Der Klebstoff wird an einer geeigneten Stelle injiziert und durch den Hohlraum an die gewünschte Stelle transportiert. Je nach Klebstoff kann der Transport durch Wärmeinfluss und Nachdruck gezielt beeinflusst werden. Beim Kapillarkleben wird der Klebstoff ausschließlich durch Kapillarkräfte transportiert. Hierfür wird am Rande oder in dafür vorgesehene Öffnungen eine gewisse Menge Klebstoff appliziert, die dann in den Spalt zwischen den Fügepartnern wandert. Durch die Variation der Hohlraumabmessungen, z. B. durch eine Stufe, können die Kapillarkräfte und damit der Klebstofffluß gezielt geleitet werden.



**Abbildung 2.4** Vereinzelt Drucksensoren mit fluidischen und elektrischen Anschlüssen

Durch Vereinzeln der Gehäusenutzen erhält man die einzelnen Drucksensoren, siehe auch Abbildung 2.4. Diese können dann elektrisch und fluidisch kontaktiert werden.

### 2.1.2 Realisierte Druck- und Durchflusssensoren nach dem AMANDA-Verfahren

In einer früheren Arbeit wurden mikro-mechanische Druck- und Durchflusssensoren vorgestellt, die nach dem AMANDA-Verfahren gefertigt wurden [Mart98]. Sie bestehen aus einem runden Kunststoffensorelement, das elastisch auf einer Trägermembran im Sensorgehäuse gelagert ist und in das eine Dehnungsmessstreifen-Rosette eingebettet ist.

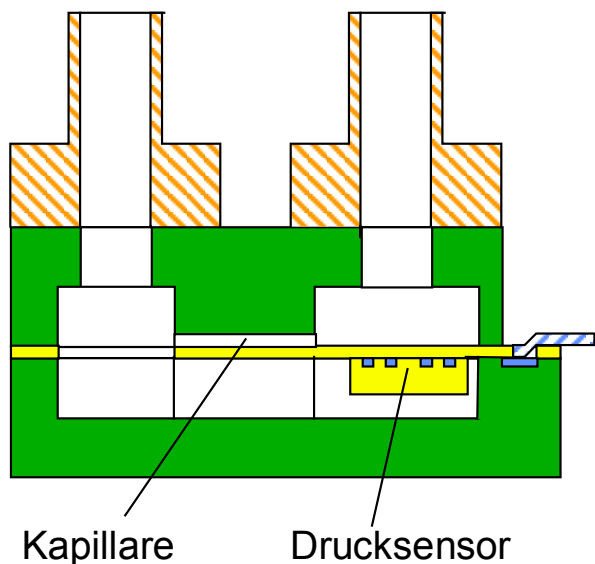


Abbildung 2.6 Durchflusssensor nach dem AMANDA-Verfahren

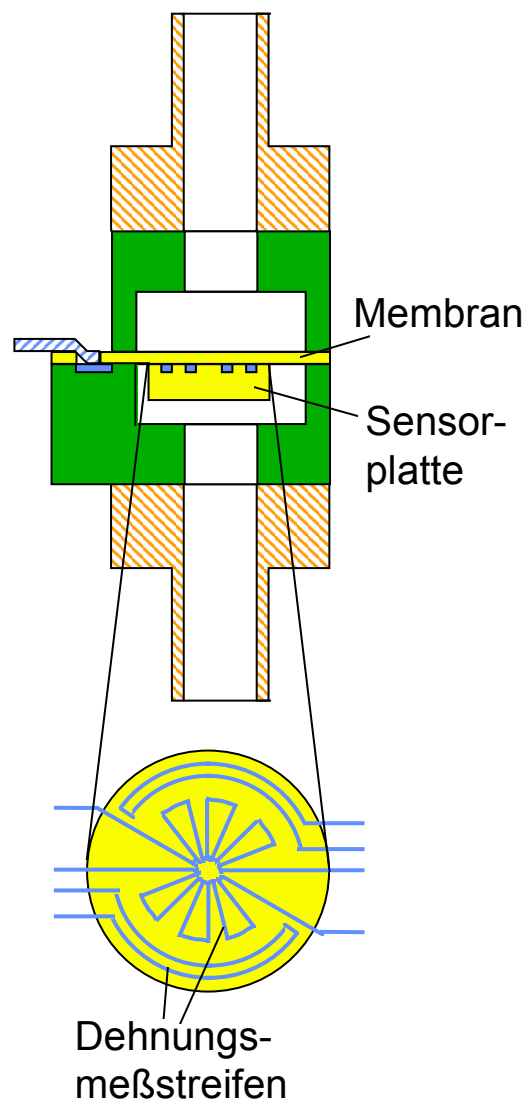
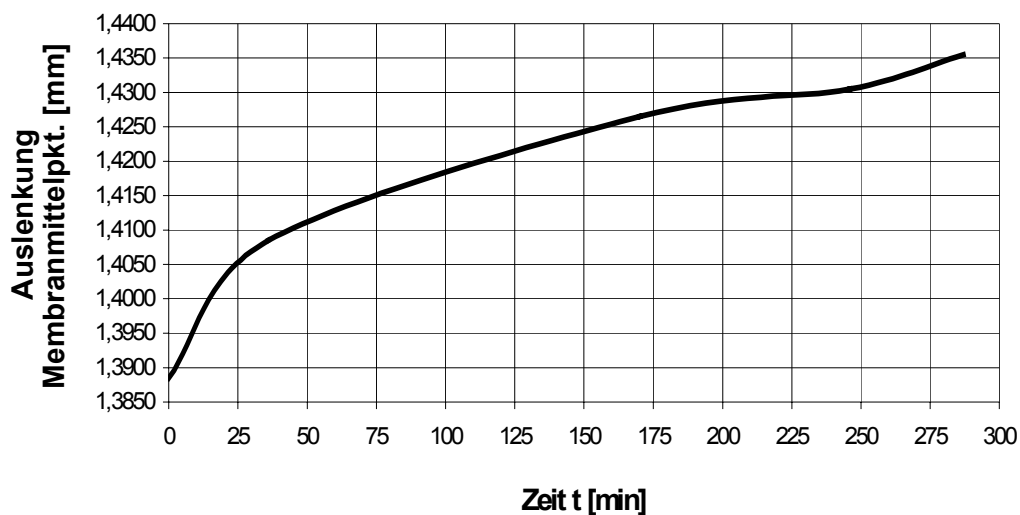


Abbildung 2.5 Drucksensor nach dem AMANDA-Verfahren

Die Rosette besteht aus vier aktiven Dehnungsmessstreifen (DMS), die zu einer Wheatstoneschen Messbrücke verschaltet sind. Die druckinduzierten Verformungen der Sensorplatte werden mit den DMS detektiert und in eine druckproportionale Messspannung gewandelt. Die Sensorplatte und die Trägermembran bestehen aus Polyimid. Die beiden Sensorgehäuseteile, zwischen denen sich die Trägermembran befindet, wurden durch Spritzgießen aus Polysulfon gefertigt. Aus dem beschriebenen Drucksensor läßt sich leicht ein Durchflusssensor herstellen, in dem er durch eine Messkapillare erweitert wird. Die Messkapillare wird derart dimensioniert, daß sich eine laminare Rohrströmung ausbildet und sich eine direkte Proportionalität zwischen dem gemessenen Druckverlust und dem Durchfluss ergibt.

Die vorgestellten Komponenten haben gezeigt, dass es möglich ist, mit dem AMANDA-Verfahren, funktionstüchtige Druck- und Durchflusssensoren zu realisieren. Die Tatsache, dass diese, abgesehen von den DMS aus Gold, komplett aus Polymerwerkstoffen gefertigt sind, bringt jedoch eine Reihe von unerwünschten Eigenschaften für den Sensor mit sich. Am störendsten erwies sich die auftretende Drift des Messsignals. Bei Dauerversuchen mit den o.g. Drucksensoren konnte keine zufriedenstellende Langzeitstabilität beobachtet werden. Dies liegt daran, dass die Kunststoffmembran des Sensors bei Dauerbelastung kriecht. Exemplarisch zeigt die folgende Abbildung 2.7 das Kriechverhalten einer 25 µm dicken PEEK-Membran mit einem Radius von 12,5 mm, bei einer konstanten Druckbeaufschlagung von ca. 1 bar. Gemessen wurde die Auslenkung des Membranmittelpunktes über einen längeren Zeitraum. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Membran durch Anlegen des Druckes um zunächst 1388,5 µm im Zentrum ausgelenkt wurde. Innerhalb von 4,8 Stunden nahm die Auslenkung um weitere 47 µm (fast das doppelte ihrer Dicke) zu.



**Abbildung 2.7** Kriechkurve einer PEEK-Membran. Dargestellt ist die Auslenkung des Zentrums der Membran bei einer Druckbelastung von ca. 1,0 bar als Funktion der Zeit.

Entsprechende Versuche wurden auch mit Membranen aus EPON SU-8 Resist durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich eine 36 µm dicke SU8-Membran ebenfalls mit einem Radius von 12,5 mm, in 17,4 h um weitere 111 µm ausgelenkt hat, nachdem sie zunächst mit einer Druckdifferenz von 485 hPa um 572 µm ausgewölbt wurde. Diese Zahlen verdeutlichen, daß die untersuchten Materialien für Membranen in Drucksensoren nicht geeignet sind, da sich das Sensorsignal bei gleichbleibender Belastung ändert.

Eine weitere unerwünschte Eigenschaft dieser Druck- und Durchflusssensoren ist die fehlende Temperaturkompensation. Die grundsätzlich richtige Idee, vier aktive DMS, die in einer Messbrücke verschaltet sind, am Ort der Messung zu applizieren, reicht bei diesem Sensortyp zur temperaturkompensierten Messung nicht aus. Der Grund hierfür, ist in der konstruktiven Gestaltung des Sensors zu finden. Die vorgespannte Membran und die darauf aufgebrachte Sensorplatte bestehen beide aus Polyimid mit einem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_{PI} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Das



Gehäuse hingegen ist aus Polysulfon mit  $\alpha_{\text{PSU}} = 56 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  gefertigt. Bei Änderung der Temperatur des Messmediums oder der Umgebung führt dies zwangsläufig zu einer veränderten Auslenkung der Sensorplatte, ohne dass sich die eigentliche Messgröße ändert.

Ein Drucksensor, der für den realen Einsatz geeignet sein soll, darf natürlich nicht die oben genannten Nachteile aufweisen. Andererseits wäre es aber wünschenswert das AMANDA-Verfahren einsetzen zu können, um kostengünstig Drucksensoren herstellen zu können. Um Drucksensoren zu entwickeln, die in der Industrie Akzeptanz finden, werden im folgenden Abschnitt Anforderungen an einen Drucksensor formuliert, die sich an Lastenheften aus der Industrie orientieren.

### 2.1.3 Anforderungen an den neu zu entwickelnden Drucksensor

Die neuen Drucksensoren sollten folgende Bedingungen erfüllen:

#### ➤ Betriebswirtschaftliche Auslegung

Um einen kosteneffektiven Drucksensor zu entwickeln, sollte auf der Grundlage des AMANDA-Verfahrens eine Fertigung im Nutzen<sup>9</sup> erfolgen, mit:

- niedrigen Stückkosten

Daraus resultieren unmittelbar die Forderungen nach:

- geringer Sensorgröße,

damit möglichst viele Sensoren in einem Nutzen gefertigt werden können. Um eine möglichst hohe Fertigungsausbeute zu erlangen, sollte ein

- fehlertolerantes Design

erarbeitet werden. Darüber hinaus erwartet man generell von einem Drucksensor

- geringes Totvolumen,
- geringen Strömungswiderstand und Druckabfall.

#### ➤ Technische Anforderungen

- |                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ▪ Messungen im Differenzdruckbereich von   | -1000 bis +2000 hPa       |
| ▪ Lineare Kennlinie im Bereich von         | -1000 bis +1000 hPa       |
| ▪ Maximale, kurzzeitige Überlastsicherheit | bis 10 000 hPa            |
| ▪ Genauigkeit                              | 1% vom Endwert = 20 hPa   |
| ▪ Wiederholbarkeit                         | 0,5% vom Endwert = 10 hPa |
| ▪ Betriebstemperatur                       | 0 bis +65°C               |
| ▪ Lagertemperatur                          | -40 bis +70°C             |
| ▪ Langzeitstabilität                       | > 5 Jahre                 |

#### ➤ Potentielle Einsatzzwecke

Um die Drucksensoren für möglichst viele Anwendungszwecke interessant zu gestalten, wäre es wünschenswert, sie weitestgehend aus

- chemisch inerten Materialien

---

<sup>9</sup>englisch: BATCH-Verfahren

zu fertigen. Durch eine chemische Resistenz gegenüber Lösungsmitteln, Benzenen, Ölen, Säuren oder Laugen, wäre ein breites Anwendungsfeld denkbar, wie z.B. in der Medizin- und Umwelttechnik oder chemischen Analytik.

## 2.2 Vorüberlegungen und Konzeptentwürfe

Als Ergebnis aus Abschnitt 2.1.2 kann festgehalten werden, dass das Kriechen der untersuchten Kunststoffe PI, PEEK und SU-8 kein ausreichend stabiles Sensorsignal erlaubt, wenn diese Materialien als mechanisch bestimmende Elemente im Drucksensor eingesetzt werden. Für einen Drucksensor, der mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt wird, muß an dieser Stelle ein anderer Werkstoff eingesetzt werden. In Frage kämen hierfür Metalle, Keramik, Silizium oder Glas. Die Wahl fiel schließlich auf Glas, das vergleichsweise preiswert zu erhalten ist und das Anbringen von Dehnungsmessstreifen erleichtert, weil es elektrisch nicht leitend ist.

### 2.2.1 Glas in der Mikrotechnik

Die besonderen Eigenschaften von Glas, wie

- hohe chemische Resistenz
- hohe Temperaturbeständigkeit
- optische Transparenz
- elektrische Isolatorwirkung
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- hohe Härte

machen dieses Material hervorragend geeignet für viele Anwendungen im Bereich der Mikrosystemtechnik. Um es nutzbringend einsetzen zu können muß es mikrostrukturierbar sein und mit anderen Materialien kombiniert werden können, siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.4.

Bei der Integration von Glas in das Sensordesign, wurden drei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze in Betracht gezogen.

#### ➤ Herstellung dünner Glasschichten durch Sputtern

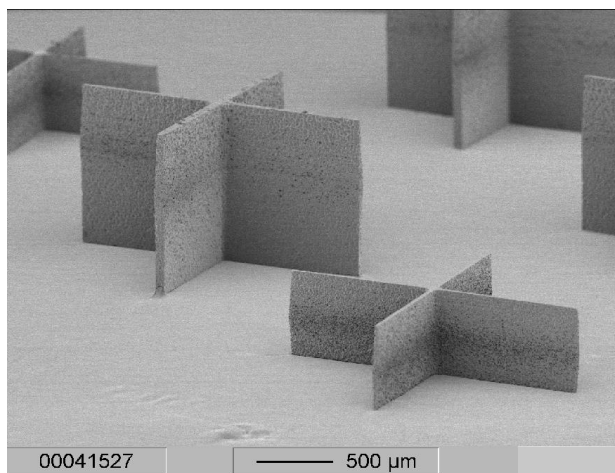
Unter Verwendung eines Glastargets wurden in einer Sputteranlage Z 400 von der Firma LEYBOLD-HERAEUS am IMT dünne Glasschichten hergestellt. Als Glastarget wurde ein gewalztes Borosilikatglas vom Typ PYREX<sup>®</sup> 7740 von der Firma SCHRÖDER SPEZIALGLASTECHNIK eingesetzt. Durch Sputtern auf die bereits beschriebenen Gold-Abhebewafer (60nm dicke Trennschicht aus Gold) ließen sich mittels anschließend aufgeklebter Metallronden, PYREX<sup>®</sup>-Glasmembranen erzeugen. Auf diese Weise konnten erfolgreich ca. 14,5 µm dicke, freitragende Glasmembranen, bei einem Durchmesser von 3 mm, hergestellt werden. Diese Membranen stehen allerdings unter einer Druckspannung und wölben sich, sodass sie für die Anwendung in einem Drucksensor nicht geeignet erscheinen. Bei weiteren experimentellen Untersuchungen zeigte sich, daß die Eigenspannungen in den gesputterten Glasmembranen mit zunehmender Dicke ansteigen und die Membranen zerstören. Aus diesem Grund wurden die Versuche abgebrochen.

➤ Integration zugekaufter Glasfolien

Glasfolien sind ab einer Dicke von 30 µm bzw. 50 µm (Bezeichnung: D 263 T oder AF45, Firma SCHOTT [Sch]) käuflich zu erwerben. Bei der Integration zugekaufter Glasfolien in das Sensordesign gilt es jedoch zu beachten, dass Glas amorph ist und somit gibt es keine geometrische Vorzugsätzrichtung und durch den Werkstoff vorgegebene Ätzstrukturen, wie es z.B. bei Silizium der Fall ist. Einzig und allein die Maskierung und die Ätztechnologie bestimmen, welche geometrische Struktur im Mikrobereich entsteht [Hüls97], siehe auch Abschnitt 3.1.1. Durch isotropes nasschemisches Ätzen mit Fluss-Säure (HF) können Mikrostrukturen hergestellt werden, mit einem Aspektverhältnis<sup>10</sup> kleiner 1:1.

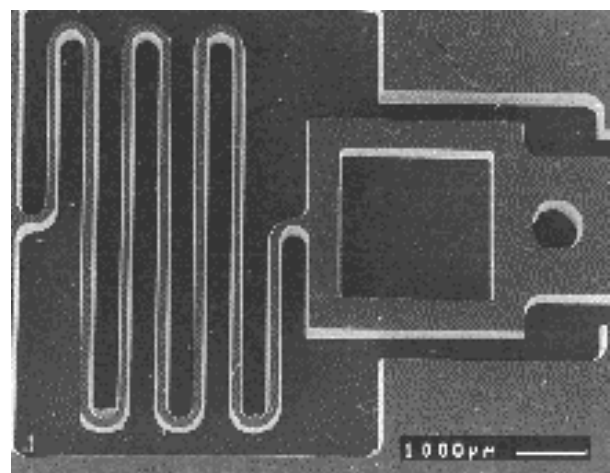
➤ Verwendung fotostrukturierbarer Gläser

Seit einigen Jahren sind fotostrukturierbare Gläser auf dem Markt, wie z.B. FOTURAN<sup>®</sup> von der Firma SCHOTT [Diet98]. Diese Lithium-Aluminium-Silikat-Gläser sind selbst fotoempfindlich, d.h. sie können durch eine Maske ähnlich wie ein Fotoresist belichtet werden. Durch den Belichtungsprozess wird im Glas eine Anisotropie induziert. Hierzu wird das Material zunächst durch UV-Licht (Wellenlänge 290-330 nm) mit einer Energiedichte von etwa 2J/cm<sup>2</sup> bestrahlt. Eine ausreichende Belichtung ist dabei in Materialdicken bis 2 mm möglich [Mgt]. Durch den Prozessschritt der UV-Belichtung werden Silberatome in den belichteten Bereichen gebildet. Während des nachfolgenden Temperprozesses werden die belichteten Substrate langsam auf etwa 500°C aufgeheizt. Nach 1 h wird die Temperatur auf 600 °C erhöht. Bei dieser Temperatur kristallisiert das Glas um die Silberkeime aus. Die kristallinen Bereiche zeigen beim Ätzen in 10%iger Flusssäure bei Raumtemperatur eine bis zu 20fach höhere Ätzrate gegenüber den amorphen Bereichen. Wird das nasschemische Ätzen mechanisch durch Ultraschall oder Sprühätzen unterstützt, zeigen die geätzten Strukturen ein großes Aspektverhältnis. Die folgenden Abbildung 2.8 [Mgt] und Abbildung 2.9 [Ilm] zeigen einige Beispiele.



**Abbildung 2.8** Abstandshalter als Beispiel für mikrostrukturierte fotosensible Gläser mit hohem Aspektverhältnis

Quelle: mgt mikrogas technik GmbH



**Abbildung 2.9** Glasfeder als Beispiel für mikrostrukturierte fotosensible Gläser.

Quelle: Technische Universität Ilmenau

<sup>10</sup> Aspektverhältnis = Strukturtiefe / Strukturbreite

Im folgenden Abschnitt werden drei Konzeptentwürfe für Drucksensoren vorgestellt. Diese werden aufgrund der Erfahrungen mit den bereits realisierten Drucksensoren und im Hinblick auf die formulierten Anforderungen beurteilt. Parallel zur Erarbeitung der Konzeptentwürfe wurden Vorversuche zur Realisierbarkeit gemacht. Diese werden in Abschnitt 3.1 ff. beschrieben.

### 2.2.2 Drucksensor mit membrangelagerter Glasplatte

Es wurde ein Konzept geprüft, bei dem eine kreisförmige Glasplatte an einer Trägermembran aufgehängt ist, siehe Abbildung 2.10.

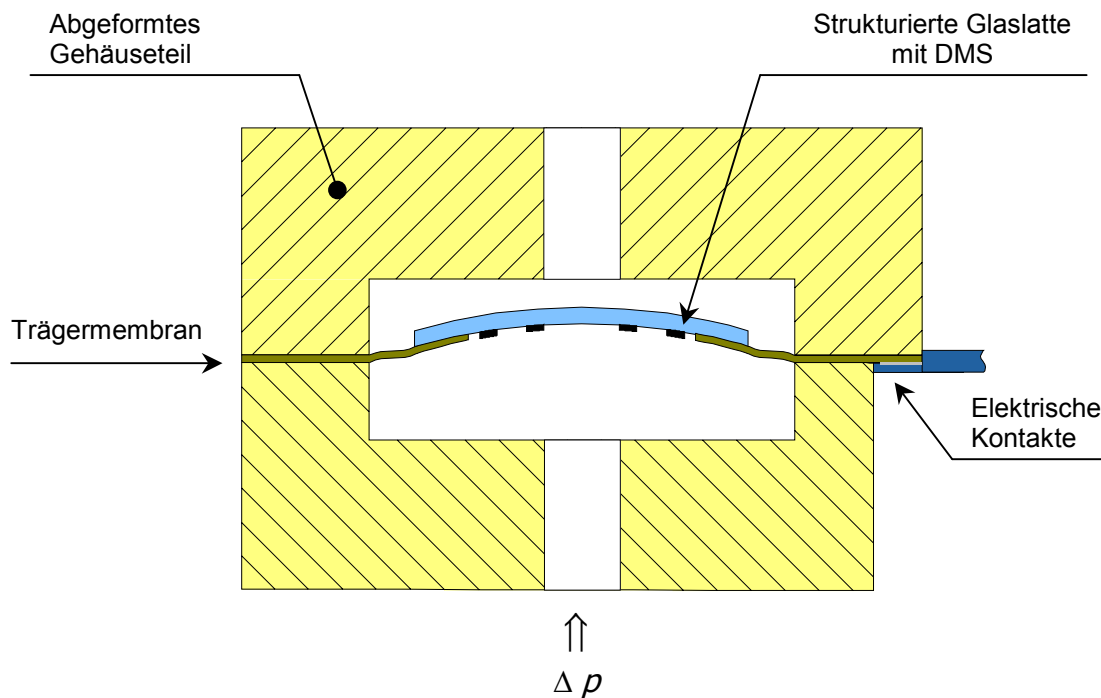


Abbildung 2.10 Drucksensor mit einer Glasplatte auf einer Polymermembran

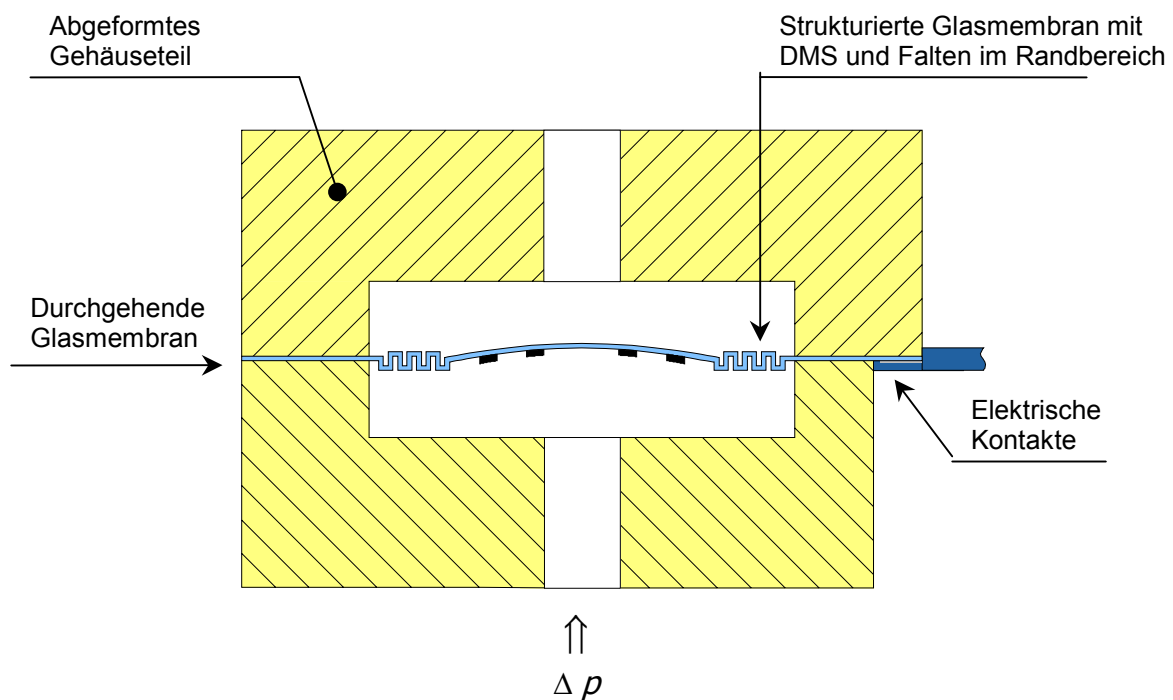
Die bei einer Temperaturänderung durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Glasplatte und Gehäusematerial entstehenden Spannungen führen bei dieser Konstruktion in erster Linie zu einer Dehnung der Membran. Wenn die Polymer-Membran dünn genug ist und nur einen geringen Elastizitätsmodul aufweist, wie z.B. PTFE, wirkt sich die Dehnung des Gehäuses nur unwesentlich auf die Glasplatte aus, und die Druckmessung wird von Temperaturänderungen unabhängig. Die Glasplatte steht nur an ihrem Rand mit der Membran in Verbindung, damit sie im Bereich der Dehnungsmessstreifen durch Bi-Materialeffekte möglichst wenig verformt wird.

Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit, die in Anlehnung an die unter Abschnitt 2.1.3 formulierten Anforderungen, haben jedoch ergeben, dass es nicht möglich ist, die oben genannte Grundidee mithilfe einer dünnen inerten PTFE-Membran umzusetzen, da die in der Trägermembran entstehenden Zugspannungen zu groß werden. Würde man die Membran in der Dicke so dimensionieren, dass sie der Druckdifferenz standhält, wäre sie schon so dick, dass die Durchbiegung der Platte temperaturabhängig wird.

Da dieses Konzept nicht geeignet ist, wurde erwogen, statt einer Kombination von Glasplatte und Polymermembran eine durchgehende Glasmembran einzusetzen.

### 2.2.3 Drucksensor mit Glasmembran

Dieser Konzeptentwurf zeigt einen Drucksensor, der zwischen zwei abgeformten Gehäuseteilen eine durchgehende Glasmembran besitzt, siehe Abbildung 2.11. Durch die beschriebenen Strukturierungsmöglichkeiten von Glas, wäre es denkbar, ähnlich wie bei Drucksensoren mit einer Edelmetallmembran, die Membran mit Falten im Randbereich zu versehen. Idealerweise sollten vom Gehäuse induzierte Spannungen in erster Linie zu einer Aufweitung der Falten führen und so mechanische Spannungen, die im Gehäuse auftreten können, vom sensitiven Teil der Membran fernhalten.



**Abbildung 2.11** Drucksensor mit durchgehender Glasmembran und Falten im Randbereich

Die Bruchdehnung von Glas (ca.  $\varepsilon_B = 1,18 \cdot 10^{-3}$  für z.B. PYREX) ist geringer als die thermische Dehnung von Kunststoffen bei einer Temperaturänderung um 65 K (ca.  $\varepsilon_{th} = 2,99 \cdot 10^{-3}$  von z.B. PEEK). Das heißt, die Glasmembran würde im Bereich ihrer Befestigung auf dem Gehäuse durch die thermische Dehnung zerstört, und es wäre nicht auszuschließen, daß sich Risse auch über die frei gespannte Membran fortsetzen. Dies würde bedeuten, daß eine Glasmembran nicht an einem Kunststoffgehäuse angebracht werden kann, auch wenn Falten am Rand der Membran thermische Spannungen vom Zentrum der Membran fernhalten.

Aus diesem Grund wurde weiter untersucht, ob die Materialien für die Membran und das Gehäuse im Hinblick auf die thermischen Ausdehnungskoeffizienten einander angeglichen werden können. Die Möglichkeit, die Sensorplatte und das Gehäuse aus ein und dem selben Kunststoff zu fertigen, kommt nicht in Frage, da wie bereits erwähnt, das Kriechen des Kunststoffes unter Druckbelastung zu keinem stabilen

Sensorsignal führen würde. Eine logische Konsequenz wäre es, alle Teile des Sensors aus Glas zu fertigen.

### 2.2.4 Drucksensor aus Glas

Bei diesem Konzeptentwurf wurde in Erwägung gezogen, den gesamten Drucksensor aus Glas zu fertigen, siehe Abbildung 2.12. Da das Gehäuse strukturiert werden müsste, würde sich hierfür das fotostrukturierbare FOTURAN anbieten. Die Membran könnte in Form einer dünnen Folie als Zukaufteil integriert werden.

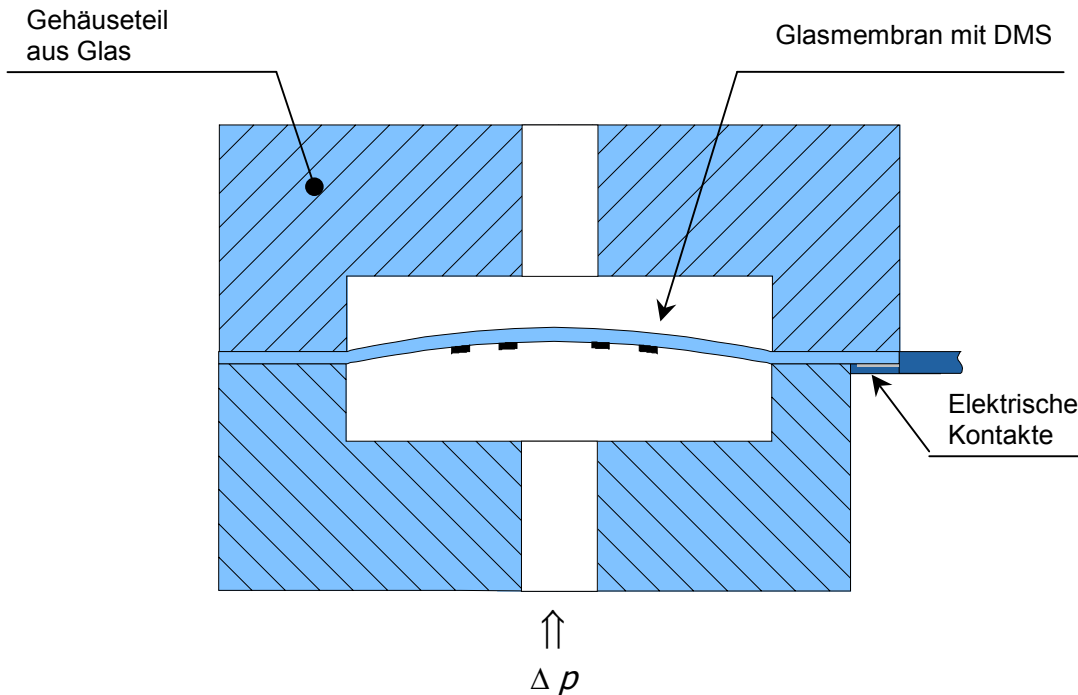


Abbildung 2.12 Drucksensor aus Glas

Im Hinblick auf eine Temperaturkompensation von ca. 65 K wurde die Realisierbarkeit dieses Konzeptes geprüft. Obwohl die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Gläser nahe beieinander liegen (7,2 ppm/K für D 263 T und 8,6 ppm/K für FOTURAN), führt die vom FOTURAN-Gehäuse in die Membran induzierte Spannung zu einer deutlichen Änderung des Signals. Die durch eine Temperaturänderung um 65 K in der Messmembran induzierte Dehnung wäre annähernd so groß (85%), wie die durch 1 bar Differenzdruck erreichte. Somit kann kaum zwischen Stör- und Nutzsignal unterschieden werden. Folglich ist es nur möglich, einen Drucksensor aus Glas zu realisieren, der komplett aus exakt dem selben Material gefertigt wird. Würde man den Drucksensor komplett aus FOTURAN fertigen, müsste man eine klebstofffreie und vakuumdichte Verbindungstechnik für Gehäuse und Membran einsetzen. Die Sensorelemente ließen sich durch Diffusionsbonden oder mittels Glaslot inert miteinander verbinden. Der Diffusionsbondprozess dauert jedoch ca. 30 Stunden und wäre somit wohl nur für große Stückzahlen rentabel.

Bei diesem zumindest prinzipiell machbaren Konzept bleibt allerdings der Nachteil, dass von außen auf das Sensorgehäuse einwirkende mechanische Einflüsse wie z.B. das Anziehen von Schrauben beim Einbau des Sensors in eine Anlage weiterhin

zu Veränderungen der Kennlinie des Sensors führen können. Deshalb wurde an dieser Stelle die Konzeptphase rückblickend überarbeitet, ob nicht doch durch einen hybriden Sensoraufbau, die kombinierte Ausnutzung der besonderen Eigenschaften von Glas und die kostengünstige Abformung von Kunststoffteilen möglich ist. So wurde ein Konzept entworfen, das es erlaubt, das Gehäuse preisgünstig durch Abformung aus Kunststoff zu fertigen, und das trotzdem eine Glasplatte im Drucksensor vorsieht. Dieses Konzept wird im folgenden Abschnitt 2.3 ausführlich vorgestellt.

## 2.3 Erarbeitetes und verfolgtes Konzept

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete und verfolgte Konzept resultiert unmittelbar aus den Vorüberlegungen aus Abschnitt 2.2. Bei allen bisher vorgestellten Konzepten musste besonders darauf geachtet werden, dass das Sensorsignal nicht von äußeren Einflüssen wie z. B. Änderungen der Temperatur oder mechanischen Spannungen des Gehäuses beeinträchtigt werden darf, siehe auch in Referenz [Ahre00]. Da Kunststoffe eine große thermische Dehnung aufweisen, scheinen sie zunächst nicht das ideale Material für Sensoranwendungen zu sein. Dennoch wurde ein Konzept erarbeitet, bei dem ein Drucksensor, durch sein Design, bei kleinem Totvolumen, die o.g. äußeren Einflüsse kompensiert und darüber hinaus kostengünstig mit dem AMANDA-Verfahren gefertigt werden kann.

### 2.3.1 Drucksensor mit randgelagerter Glasplatte

Der Drucksensor besteht im wesentlichen aus zwei abgeformten Gehäuseteilen, einer Kunststoffmembran und einer Messplatte aus Glas, siehe Abbildung 2.13.

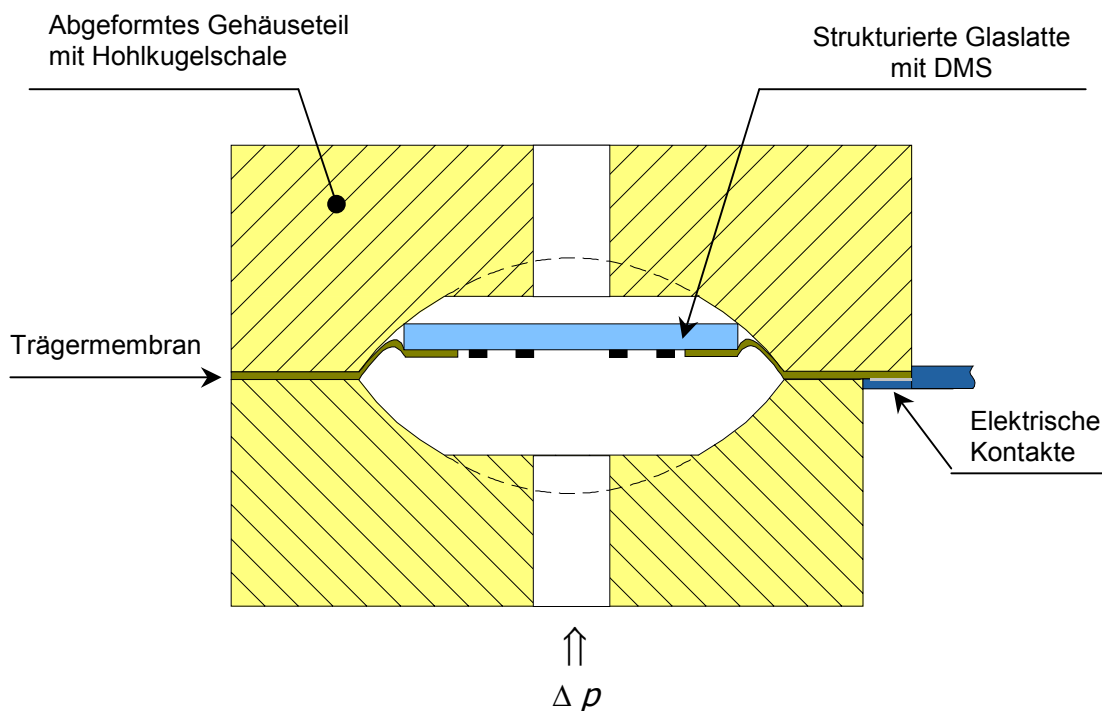
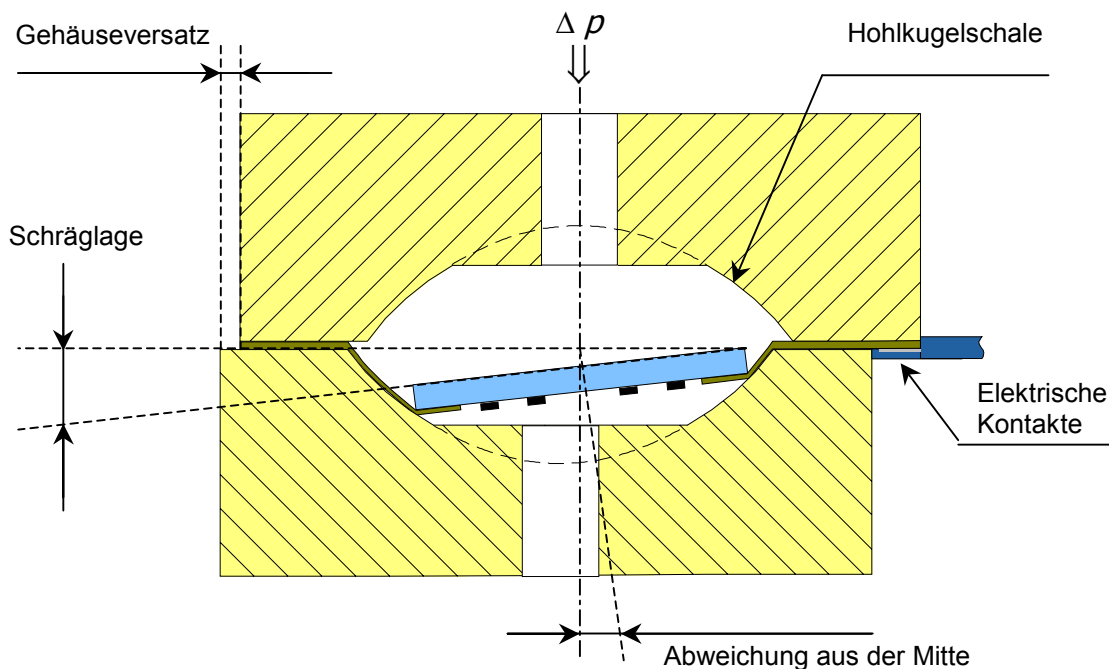


Abbildung 2.13 Drucksensor mit randgelagerter Messplatte aus Glas in einer Hohlkugelschale

Auf der Oberfläche der Messplatte befinden sich Dehnungsmessstreifen (DMS), die der Messung der Messplattendehnung bei Druckbeaufschlagung dienen. Die

Kunststoffmembran wird nach der Montage des Sensors überdehnt, so daß sie sehr schlaff ist und sich die Messplatte entlang ihres Randes, je nach Druckbeaufschlagung, an ein Gehäuseteil anlegen kann. Die innenliegenden Wände der Gehäuseteile haben in dem Bereich, in dem die Messplatte sie berühren kann, die Form einer Hohlkugelschale. Wenn eine Druckdifferenz über dem Sensor abfällt, wird die Messplatte an eine Wand gedrückt und an ihrem Rand gelagert. Dabei erfolgt die Lagerung unabhängig von der genauen Ausrichtung und der genauen Position der Messplatte relativ zu den Wänden immer auf die gleiche Weise am Rand der Messplatte. Dadurch ist insbesondere die Durchbiegung der Messplatte unabhängig von der genauen Ausrichtung und von der genauen Lage der Messplatte relativ zu den Wänden. Wenn sich die Richtung der anliegenden Druckdifferenz umkehrt, wird die Messplatte vom jeweiligen Gehäuseteil wegbewegt und legt sich am gegenüberliegenden Gehäuseteil an. Dabei führt selbst ein Versatz der Gehäuseteile gegeneinander oder eine Abweichung der Lage der Messplatte aus der Mitte, nicht zu einer veränderten Kennlinie des Sensors, denn die Durchbiegung der Messplatte ist nur durch die Druckdifferenz und die Lagerung der Messplatte bestimmt, die immer in ähnlicher Weise entlang ihres Randes erfolgt, siehe Abbildung 2.14. Dies ist auch ein wesentlicher Vorteil für die Fertigung von Sensoren aus Kunststoffen, denn sie neigen zum Schrumpfen während oder nach der Herstellung durch Abformprozesse und die Maßhaltigkeit kann deshalb nicht in dem Maße sichergestellt werden, wie bei anderen Werkstoffen.

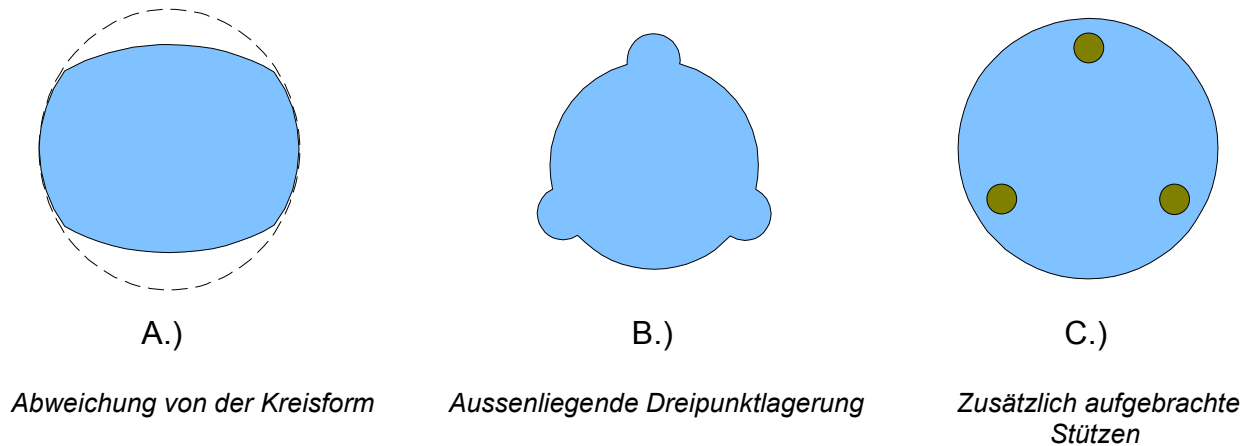


**Abbildung 2.14** Fehltolerantes Design für Drucksensor mit randgelagerter Messplatte

Die Messplatte hat idealerweise eine Kreisform und ermöglicht somit bei kleinen Auslenkungen eine lineare Kennlinie des Sensors. Die Kontur der Messplatte kann jedoch auch in bestimmten Fällen von der Kreisform abweichen, wodurch die Kennlinie gezielt verändert werden kann, siehe Abbildung 2.15 A.).



Sollten die innen liegenden Wände der Gehäuseteile nicht die Form einer Hohlkugelschale aufweisen, kann eine gleichbleibende Lagerung der Messplatte auch dadurch erreicht werden, daß diese über mindestens drei Auflagepunkte verfügt, (siehe Abbildung 2.15 B.) und Abbildung 2.15 C.).



**Abbildung 2.15** Designvarianten für Messplatte aus Glas

Die Membran ist mit der Glasplatte verbunden, bedeckt jedoch nicht den Bereich, in dem sich die DMS befinden. Dadurch wird erreicht, dass bei Temperaturänderung eine unterschiedliche thermische Dehnung von Membran und Messplatte nicht zu einer Krümmung der Messplatte führt und sonst das Messsignal stören würde.

Durch das Gehäusedesign, der Unterbrechung und der schlaffen Ausführung der Membran, können nahezu keine von außen auf das Gehäuse einwirkenden Kräfte, wie sie z. B. von der Befestigung des Sensors ausgehen, auf die Messplatte übertragen werden. Somit ist der eigentliche "Ort der Messung" von störenden äußeren Einflüssen entkoppelt. Diese Entkoppelung erlaubt es also, für die Gehäuseteile, die Membran sowie für die Messplatte unterschiedliche Materialien einzusetzen, was besonders im Hinblick auf die Langzeitstabilität des Sensors von Interesse ist.

Dieses Drucksensorkonzept wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation weiterverfolgt.

### 3 Fertigungskonzept

In diesem Kapitel wird die Ausarbeitung eines Fertigungskonzeptes zur Umsetzung des geplanten Erzeugniskonzeptes dokumentiert. Bevor ein Herstellungsprozess skizziert werden konnte, waren umfangreiche Vorversuche zur Realisierung der Drucksensoren erforderlich. Es wurden Strukturierungsversuche von dünnen Glassubstraten durchgeführt, mit dem Ziel, kreisförmige Glasplatten aus den Glassubstraten herauszuätzen. Da beim geplanten Drucksensor Dehnungsmessstreifen direkt auf der Glasplatte appliziert werden sollen, waren Strukturierungsversuche zur Herstellung elektrisch leitender Schichten auf dünnen Glassubstraten notwendig. Von zentraler Bedeutung war weiterhin die Frage nach einem geeigneten Material für die Trägermembran und deren Kombinationsmöglichkeiten mit einem Glassubstrat. Anhand der Ergebnisse der Vorversuche wurde schließlich eine Materialauswahl getroffen und ein Fertigungskonzept abgeleitet. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die schematische Darstellung des Herstellungsprozesses, der die logische Abfolge und Anzahl der benötigten Chrommasken für die optische Lithographie aufzeigt.

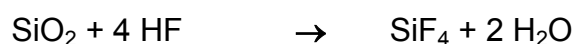
#### 3.1 Vorversuche zur Realisierbarkeit

Die Themenkomplexe und Fragestellungen im Zusammenhang mit der Realisierung des Erzeugniskonzeptes wurden sequentiell und zunächst separat voneinander untersucht.

##### 3.1.1 Strukturierungsversuche von dünnen Glassubstraten

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erwähnt, ist Glas ein amorpher Werkstoff. Im Gegensatz z. B. zum Silizium bestimmt ausschließlich die Maskierung und die Ätztechnologie, welche geometrischen Strukturen im Mikrobereich entstehen. Neben der prinzipiellen, jedoch sehr zeitintensiven Möglichkeit, Glas auch mittels gerichtetem Plasma (z.B. mit Unterstützung von SF<sub>6</sub>) trocken zu strukturieren, wurde verstärkt die nasschemische Strukturierung mittels Flusssäure untersucht.

Fluorwasserstoff ist in der Lage, Metall-Sauerstoff-Bindungen anzugreifen und zu spalten [Fluc84]. Hierauf beruht die für HF bzw. Flusssäure charakteristische Eigenschaft, Glas zu ätzen. Wird Quarz, SiO<sub>2</sub>, oder Glas, dessen Hauptbestandteil ebenfalls SiO<sub>2</sub> ist, das daneben aber noch Alkali- oder Erdalkalioxide enthält (z.B. Na<sub>2</sub>O • CaO • 6 SiO<sub>2</sub>), gasförmigem Fluorwasserstoff oder seiner Lösung ausgesetzt, so entsteht flüchtiges Siliciumtetrafluorid, SiF<sub>4</sub>, sowie im Falle der Reaktion mit Glas, Alkali- und Erdalkalifluorid, Wasser.



Der Ansatz der ersten Strukturierungsversuche von dünnen Glassubstraten wurde aus der konventionellen optischen Lithografie abgeleitet. Hier ist bekannt, dass Chrom sehr gut auf Glas haftet und dadurch in der heutigen Maskentechnologie zum

Standard gehört. Bei den sogenannten Chrommasken werden Chromschichten, je nach Anwendungszweck, mit Dicken zwischen 100 bis 200 nm verwendet. Die Chromschichten auf den Masken werden meist durch direkte Ätzung der "offenen", also nicht, durch den darüberliegenden strukturierten Fotoresist, abgedeckten Bereiche hergestellt. In diesem Zusammenhang findet man in der Literatur jedoch kaum Hinweise über die Funktion der Chromschicht als Diffusionsbarriere gegenüber flüssigen Medien. So ist z.B. fraglich, ab welcher Dicke die Chromschicht eine dauerhafte Dichtigkeit gegenüber Flusssäure darstellt. Aus diesem Grund wurden bei den Strukturierungsversuchen der dünnen Glassubstrate zunächst unterschiedlich dicke Chromschicht aufgesputtert und strukturiert. Hierbei zeigte sich bereits, dass mit zunehmender Dicke der gesputterten Chromschichten die induzierten Spannungen für die Schicht selbst und für das Glassubstrat schnell zunehmen. Bei Schichtdicken oberhalb von 200 nm blättern die Schichten aufgrund der Eigenspannungen zum Teil schon von selbst vom Glassubstrat ab. Spätestens beim Ätzen in Flusssäure zeigte sich ein zügiges Ablöseverhalten. Die Güte und die Haftung der dickeren Schichten ließe sich eventuell durch die Einbringung von Wärme während des Sputterprozesses verbessern. Diese Möglichkeit sollte aber nicht von vornherein ausgeschöpft werden, da sie den potentiellen Herstellungsprozess der Drucksensoren unnötig verlängern würde. Vielmehr wurde an dieser Stelle darüber nachgedacht welchen Einfluss die Oberflächenbeschaffenheit und Reinheit der Glassubstrate auf das Ätzresultat hat. Im Rahmen dieser Überlegungen wurde eine Reinigungsroutine für die Glassubstrate erprobt, die das Ätzresultat deutlich verbessern konnte. So wurden die Glassubstrate vor dem eigentlichen Beschichten mit Chrom in aufgelisteter Reihenfolge vorbehandelt.

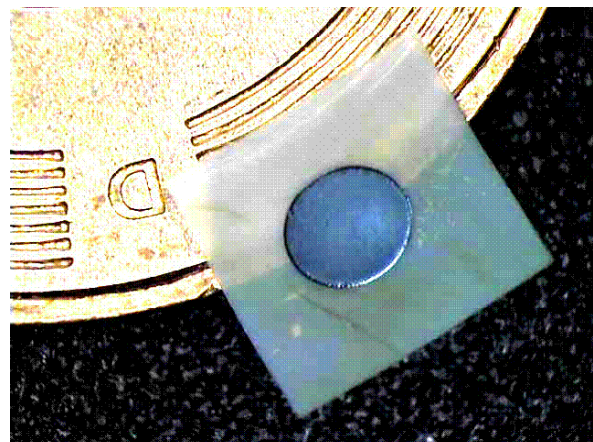
#### ➤ Reinigungsroutine der Glassubstrate

- Reinigen mit Aceton
- Reinigen mit Isopropanol
- ausgiebiges Spülen mit destilliertem Wasser
- Trocknung im Umluftofen bei mind. 40°C, mind. 30 Minuten
- Sauerstoff-Plasmabehandlung im Planarätzter bei mind. 100 W Vorwärtsleistung für mind. 7 Minuten

Bei anschließenden Strukturierungsversuchen wurden mit 100nm dicken Chromschichten sehr gute Ätzresultate erzielt, siehe Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 .



**Abbildung 3.1** REM-Aufnahme einer mittels Flusssäure aus einem 50µm dicken Glassubstrat herausgeätzte kreisförmigen Glasplatte, Ø 4mm



**Abbildung 3.2** Digitalaufnahme einer geätzten kreisförmigen Glasplatte auf einer PEEK-Folie am Rand eines 2 Pfennig Stückes, Ø 2mm

Eine weitere Verbesserung der Ätzergebnisse wurde dadurch erreicht, dass der Fotoresist, mit dem die Maskierung für die Chrom-Ätzung vorgenommen wurde, erst nach der Ätzung des Glases entfernt wurde. Die Kombination der 100 nm dicken Chromschicht und des ca. 3,7 µm dicken Fotoresists stellen offenbar eine gute Diffusionsbarriere für die Flusssäure dar.

Versuche, die Glassubstrate mittels Fotoresist direkt, d.h. ohne den Umweg über die strukturierten Chromschichten zu ätzen, waren nicht erfolgreich. Alle verwendeten Fotoresistsysteme lösten sich in Flusssäure vom Glassubstrat ab.

Um die Prozessparameter für den zu entwickelnden Herstellungsprozess einschätzen zu können, wurden die Ätzraten für die Glassubstrate in Flusssäure ermittelt.

Es wurden Ätzversuche mit 5%iger und 10%iger Flusssäure durchgeführt. Hierbei ergab sich ein linearer Zusammenhang. Bei einem einseitigen Angriff von Flusssäure auf die verwendeten Glassubstrate ergaben sich im Rahmen der Messgenauigkeiten, folgende reproduzierbare Ätzraten:

- In 5%iger HF-Lösung            Ätzrate: 0,35 µm/min
- In 10%iger HF-Lösung        Ätzrate: 0,7 µm/min

Da die schnellere Ätzung mit 10%iger HF-Lösung keinen offensichtlichen negativen Einfluss auf die Strukturgüte hat, wurde festgelegt, bei weiteren Versuchen die zeitsparende Lösung zu verwenden. Auf weitere Versuche mit höherprozentiger HF-Lösung wurde aus Sicherheitsgründen verzichtet.

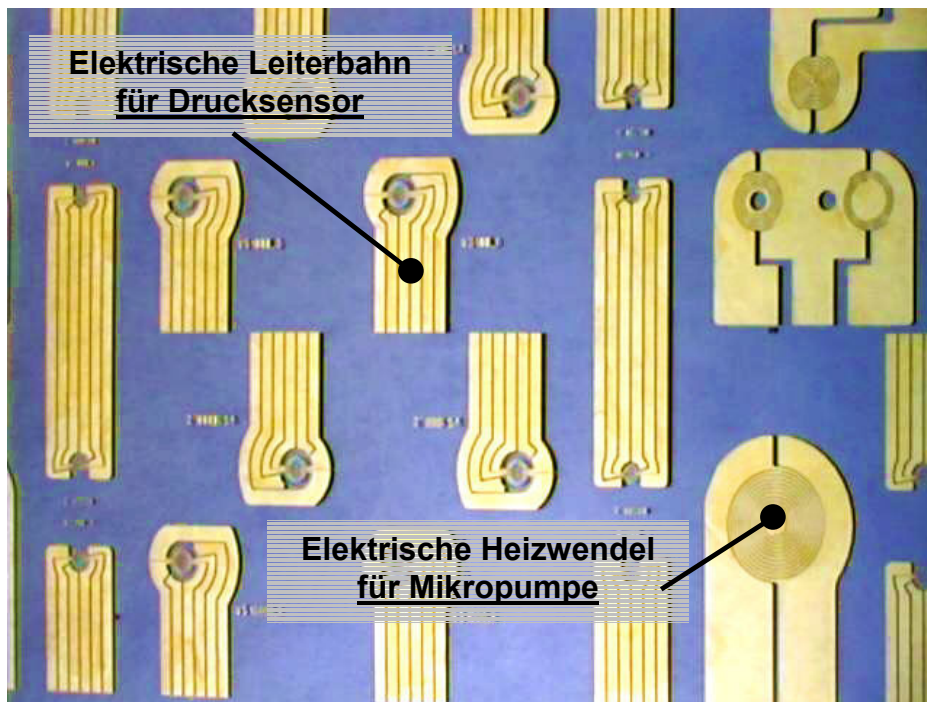
Als Ergebnis der Strukturierungsversuche bleibt festzuhalten, dass eine aufgesputterte 100 nm dicke Chromschicht, mit einem darüberliegenden 3,7 µm dicken Resist, nach der beschriebenen Substratreinigung, eine gute Ätzmaskierung darstellt. Bei Verwendung von 10%iger HF-Lösung wurde die Form der Maskierung in das Glas übertragen, ohne dass Strukturverluste festgestellt wurden.

#### **3.1.2 Strukturierungsversuche auf dünnen Glassubstraten**

In diesem Abschnitt werden die Vorversuche zur Mikrostrukturierung von Funktionsstrukturen auf dünnen Glassubstraten dokumentiert.

Das beschriebene Erzeugniskonzept für den Drucksensor sieht vor, elektrisch leitende Dehnungsmessstreifen direkt auf dem Glas zu applizieren. Bei den bereits vorgestellten Drucksensoren, siehe Abschnitt 2.1.2, wurden DMS aus Gold hergestellt. Da erste Versuche mit diesen Sensoren zeigten, dass zwischen Nutz- und Störsignal kaum unterschieden werden konnte und weil Gold nicht sehr gut auf Glas haftet, musste hier ein neuer Ansatz gefunden werden. Die Verbesserung des Verhältnisses von Nutz- zu Störsignal kann durch eine Verbesserung des DMS-Layouts und durch einen höheren elektrischen Widerstand der DMS erreicht werden. Da die Goldleiterbahnen erfahrungsgemäß nicht dünner als 60nm ausgeführt werden sollten, ist der Übergang auf ein anderes Material ratsam. Der Ansatz hierzu fand sich in den beschriebenen Erfahrungen im vorangestellten Abschnitt durch die hervorragende Haftung von Chrom auf Glas. Durch die Verwendung von Chrom als Haftvermittler zwischen Gold und Glas wird gleichzeitig ein Material eingebracht, das

sich durch einen höheren elektrischen Widerstand auszeichnet. Hierzu wurden Vorversuche mit vorhandenen Chrommasken für AMANDA-Komponenten, zur Herstellung elektrisch leitender Schichten, durchgeführt.



**Abbildung 3.3** Elektrisch leitende Funktionsstrukturen aus Gold mit einer Haftschiicht aus Chrom, auf einem 50 µm dicken Glassubstrat

Es wurden erfolgreich Funktionsstrukturen mit 30 nm Chrom und 70 nm Gold auf dünnen Glassubstraten hergestellt. Diese elektrisch leitenden Schichten bilden den ersten Ansatzpunkt für die Realisierung der neuen DMS-Strukturen. Sollten sich die Chrom-Goldschichten im Verlauf des Herstellungsprozesses durch eine nachträgliche Erwärmung noch miteinander zu einer Legierung vermischen lassen, wäre dies von Vorteil.

### 3.1.3 Herstellung und Bewertung unterschiedlicher Membranen

Bei der Suche nach einem geeigneten Membranmaterial für den Drucksensor wurde zunächst das Anforderungsprofil für die Membran formuliert.

➤ Anforderungsprofil für die Trägermembran im Drucksensor :

- Strukturierbarkeit
- Geringer Elastizitätsmodul
- Dehnbarkeit
- Geringe Dicke
- Verklebbar
- Elektrisch isolierend
- Chemisch inert<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Wünschenswert aber kein Ausschlusskriterium

Ein weiteres Auswahlkriterium war im Hinblick auf die Betriebswirtschaftlichkeit die Frage nach der Bezugsquelle der Membranen. Bei der Integration zugekaufter dünner Membranen oder Folien darf im Vorfeld deren Handhabung nicht außer Acht gelassen werden, da sich diese oftmals sehr schwierig gestaltet. Darüberhinaus ist die Größenordnung des Zeitaufwandes für die mögliche Strukturierung ebenfalls von Interesse. Zur Entscheidungsfindung für ein geeignetes Membranmaterial wird eine Materialmatrix in tabellarischer Form aufgestellt, die die Ergebnisse der untersuchten Membranen zusammenfasst.

| Membranmaterial                | FEP<br>siehe Fußnote <sup>12</sup>                     | PEEK<br>Polyetheretherketon   | PFA<br>siehe Fußnote <sup>13</sup> | PI<br>Polyimid                           | PTFE<br>Polytetrafluorethylen          | PYREX<br>Glas             | SU-8<br>Resist-system  |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Strukturierung                 | RIE                                                    | RIE                           | RIE                                | Fotolithographie                         | RIE                                    | Nasschemie                | Fotolithographie       |
| Zeitaufwand                    | 0,1µm/min                                              | 0,1µm/min                     | 0,1µm/min                          | Minuten                                  | 0,1µm/min                              | 1,4 µm/min                | Minuten                |
| Zug-E-Modul [GPa] bei 23°C     | 0,35-0,7                                               | 3,2                           | 0,65                               | 2,5-3,0                                  | 0,4-0,8                                | 61,0                      | 4,3                    |
| Dehnbarkeit [%] bei 23°C       | 250-350                                                | 170-200                       | 300                                | 50-85                                    | 200-550                                | k.A. <sup>14</sup>        | k.A.                   |
| Bezugsquelle<br>Minimale Dicke | Zukaufteil:<br>25 µm<br>intern <sup>15</sup> :<br>5 µm | Zukaufteil:<br>12,5 µm<br>--- | ---<br>intern:<br>5 µm             | Zukaufteil:<br>5 µm<br>intern:<br>0,6 µm | Zukaufteil:<br>5 µm<br>intern:<br>5 µm | ---<br>intern:<br>14,5 µm | ---<br>intern:<br>5 µm |
| Verklebbar                     | Nach O <sub>2</sub> -Plasma                            | direkt möglich                | Nach O <sub>2</sub> -Plasma        | direkt möglich                           | Nach O <sub>2</sub> -Plasma            | direkt möglich            | direkt möglich         |
| Isolator                       | Ja                                                     | Ja                            | Ja                                 | Ja                                       | Ja                                     | Ja                        | Ja                     |
| Chemisch inert                 | +++                                                    | +++                           | +++                                | +(+)                                     | +++                                    | ++                        | +(+)                   |
| <b>Bewertung</b>               | <b>B</b>                                               | <b>B</b>                      | <b>B</b>                           | <b>A</b>                                 | <b>B</b>                               | <b>C</b>                  | <b>B</b>               |

**Tabelle 3.1** Materialmatrix untersuchter Membranen

Anmerkung: +++ = sehr gute Beständigkeit, ++ = bedingt beständig, + = wenig beständig  
 +(+) = Beständigkeit kann mittels Metallbeschichtung erhöht werden.  
 Die in Tabelle 3.1 aufgeführten Daten stammen aus experimentellen Untersuchungen, sowie aus [Domi98], [@boh], [@lip].

**Bewertungsschlüssel:**      **A**            sehr gut geeignet  
                                          **B**            bedingt geeignet  
                                          **C**            ungeeignet

Die Bewertung der unterschiedlichen Membranmaterialien orientierte sich ausschließlich am Anforderungsprofil im Hinblick auf die Prozessierbarkeit im Zusammenhang mit der geplanten Applikation. Da die fluorierten Kunststoffe FEP, PFA und PTFE sowie PEEK technisch nur sehr aufwendig positioniert strukturiert werden können, sind diese nur bedingt geeignet. Im direkten Vergleich zwischen Polyimid und SU-8 wurde der geringere E-Modul von PI als Vorteil gesehen.

<sup>12</sup> FEP = Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylenocopolymer  
<sup>13</sup> PFA = Perfluoralkoxycopolymer  
<sup>14</sup> k.A. = keine Angaben  
<sup>15</sup> intern = eigene Herstellung durch spin-on-Prozesse

Darüberhinaus fehlen Angaben bezüglich der Reißdehnung. Die Möglichkeit eine durchgehende PYREX-Membran zu integrieren wurde bereits in Abschnitt 2.2.1 ausgeschlossen.

Da mit Polyimid aufgrund vorhandener Erfahrungen eine hohe Prozesssicherheit gegeben ist, scheint es als Trägermembran im Sensor sehr gut geeignet.

### 3.1.4 Kombination Membran – Glasplatte

Bei einer weitestgehend chemisch inerten Kombination einer Membran und einer Glasplatte wird ein Verbindungsverfahren benötigt, welches auf die Verwendung von Klebstoff verzichtet. Vor diesem Hintergrund wurden zwei unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten erprobt und untersucht.

- Verschweißung zugekaufter Membranen mit einer Glasplatte
- Direktes Aufschleudern und Tempern der Membran auf einer Glasplatte

Das erste Verbindungsverfahren für Membran und Glasplatte wurde anhand von Verschweißungen mit PEEK-Folien und Glassubstraten erprobt. Das Aufbringen einer Membran direkt auf einem Glassubstrat wurde mit Polyimid realisiert. Stellvertretend für die Werkstofffamilie der fluorierten Kunststoffe wurden jeweils beide Verbindungsverfahren mit FEP-Folien bzw. FEP-Dispersionen durchgeführt.

Die Verschweißung von PEEK-Folien mit Dicken von 12.5 µm, 25 µm und 50 µm mit einem 50 µm dicken Glassubstrat gelang mithilfe einer Heißprägemaschine. In diese Maschine wurden anstelle der Werkzeuge, polierte Platten eingebaut. Die planparallele Führung der Heißprägemaschine ermöglichte es, Folien bei hoher Temperatur und unter Druck miteinander zu verschweißen. Auf diese Art hergestellte Verbindungen zwischen PEEK-Folien und Glassubstraten sind im trockenen Zustand sehr fest. Um den Drucksensor nicht nur für gasförmige Medien zu entwickeln, wurden die Schweißverbindungen auch in destilliertes Wasser eingelegt. Bei diesen Einlagerungsversuchen zeigten sich unerwartete Ablösungserscheinungen. Gleiches konnte bei verschweißten FEP-Folien mit Glassubstraten beobachtet werden. Um die Haftung im verschweißten PEEK-Glas-Verbund zu verbessern, wurden einige Oberflächenmodifikationen beim Glassubstrat erprobt. Der Einfluss der Oberflächenmodifikationen der Glasplatte auf die Haftung im verschweißten PEEK-Glas-Verbund wird in nachfolgender Tabelle 3.2 anhand der Ablösezeiten in Wasser dokumentiert.

| Oberflächenmodifikation des Glases    | Ablösung in Wasser [h] |
|---------------------------------------|------------------------|
| Mechanisch aufrauen                   | < 0.75 (total)         |
| Glasperlenstrahlen                    | < 0.75 (total)         |
| Behandlung im O <sub>2</sub> -Plasma  | < 0.75 (total)         |
| Bekeimen mit HMDS <sup>16</sup>       | > 40 (beginnend)       |
| Behandlung im SF <sub>6</sub> -Plasma | > 96 (beginnend)       |

**Tabelle 3.2** Einfluss der Oberflächenmodifikation der Glassubstrate auf die Ablösezeiten verschweisster FEP-Glas- bzw. PEEK-Glas-Verbunde

Als Zwischenergebnis der Haftungsuntersuchungen von verschweißten Glassubstraten mit PEEK- oder FEP-Folien bleibt festzuhalten, dass eine

<sup>16</sup> HMDS = Hexamethyldisiloxan

Oberflächenbehandlung des Glases mit den oben aufgeführten Methoden zwar Verbesserungen, jedoch keine langzeitstabile Verbindung in einer feuchten Umgebung ermöglicht. Bei Haftungsuntersuchungen direkt aufgeschleuderter und anschließend getemperter Polyimide bzw. FEP-Dispersionen auf Glassubstraten wurden ähnliche Beobachtungen gemacht. Polyimid-Membranen, die direkt auf den Glassubstraten prozessiert wurden, zeigten zwar keine Ablösungen in Wasser, aber eine rasche flächige Ablösung in Flusssäure. Die FEP-Membranen, die mittels Aufschleudern und anschließender Sinterung hergestellt wurden, konnten wiederum mit Wasser abgelöst werden.

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle formulieren, dass in einer feuchten Umgebung eine langzeitstabile Verbindung mit Hilfe der beschriebenen Kombinationsmöglichkeiten nicht gewährleistet werden kann. Folglich wurde über die Verwendung einer Haftvermittlungsschicht nachgedacht. Ein erster Ansatz hierzu war wiederum der Einsatz gesputterter Chromschichten aufgrund ihrer bereits diskutierten guten Haftung zu Glassubstraten. Um eine möglichst starke mechanische Verzahnung zwischen den aufgetragenen Kunststoffen und der auf das Glassubstrat aufgesputterten Chromschicht zu erreichen, wurde diese zuvor noch kurz angeätzt und einem Sauerstoffplasma ausgesetzt. Die Verwendung einer Haftvermittlungsschicht aus Chrom brachte deutliche Verbesserungen.

Die Ergebnisse der Haftungsuntersuchungen sind in Tabelle 3.3 zusammenfassend aufgeführt.

|                                     | PEEK                                | PI                                  | FEP                                 |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Ohne Chromschicht in :</b>       |                                     |                                     |                                     |
| ▪ Dest. H <sub>2</sub> O            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| ▪ Flusssäure 10%                    | k.A. <sup>17</sup>                  | <input type="checkbox"/>            | k.A.                                |
| <b>Mit Chromschicht in :</b>        |                                     |                                     |                                     |
| ▪ Dest. H <sub>2</sub> O            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| ▪ Flusssäure 10%                    | k.A.                                | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| ▪ Methanol                          | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| ▪ Aceton                            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| ▪ Hexan                             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| ▪ THF <sup>18</sup>                 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| ▪ Ätzlösung für Chrom <sup>19</sup> | k.A.                                | <input checked="" type="checkbox"/> | k.A.                                |
| <b>Bewertung</b>                    | <b>B</b>                            | <b>A</b>                            | <b>B</b>                            |

**Tabelle 3.3** Übersichtstabelle über Ablöseverhalten kombinierter Membranen mit Glassubstraten in feuchten Medien mit und ohne Haftvermittlungsschicht aus Chrom

Anmerkung:  = keine Ablösung über mehrere Wochen  
 = Ablösung

**Bewertungsschlüssel:** **A** sehr gut geeignet  
**B** bedingt geeignet  
**C** ungeeignet

<sup>17</sup> k.A. = keine Angaben

<sup>18</sup> THF = Tetrahydrofuran

<sup>19</sup> verwendete Ätzlösung für Chrom = gesättigte Cerammoniumnitrat-Lsg. gepuffert mit konz. Essigsäure



Obwohl die Haftung innerhalb eines verschweißten PEEK-Glas-Verbundes im Vergleich mit aufgeschleuderten Polyimid-Membranen auf Glassubstraten unter Verwendung einer Chrom-Haftschiicht sehr gut ist, fällt die Gesamtbewertung schlechter aus. Der Grund hierfür ist, dass in der Gesamtbewertung wiederum der technische Aufwand der Realisierung mit berücksichtigt ist. Gleiches gilt für die untersuchten FEP-Membranen.

Da die Membran strukturiert werden muss, wird die Polyimidmembran am besten bewertet und scheint für die geplante Anwendung im Drucksensor sehr gut geeignet.

#### 3.1.5 Materialauswahl und abgeleitetes Fertigungskonzept

Auf der Basis der beschriebenen Vorversuche, konnte ein Fertigungskonzept für die Drucksensoren erstellt werden.

Demnach ist die Integration eines zugekauften Glassubstrates, aus der kreisförmige Glasplatten herausgeätzt werden können, in das Sensordesign möglich. Die Trägermembran aus fotostrukturierbarem Polyimid kann direkt auf dem Glassubstrat durch Aufschleudern und Tempern aufgebracht werden. Mit ihr scheint unter Verwendung einer Haftvermittlungsschiicht aus Chrom (siehe ③ in Abbildung 3.4) eine ausreichend gute Verbindung zum Glassubstrat realisierbar. Dehnungsmessstreifen aus Gold (siehe ①) lassen sich ebenfalls mithilfe einer Chromhaftschiicht direkt auf einem Glassubstrat applizieren und außerhalb kontaktieren (siehe ②).

Unter Berücksichtigung der Konzeptionsgrundlagen, die Drucksensoren im Nutzen mit dem AMANDA-Verfahren zu fertigen, wurde das Erzeugniskonzept weiter verfeinert, siehe Abbildung 3.4.

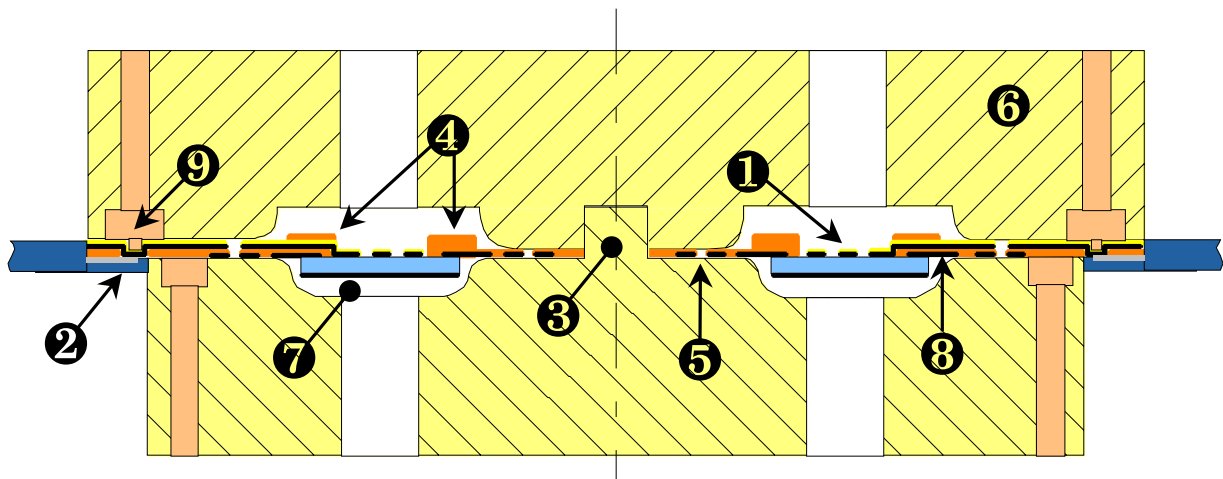


Abbildung 3.4 Querschnitt durch einen Drucksensor-Gehäusenutzen

Um noch in der Konzeptionsphase einen Drucksensor zu planen, der über einen inerten Raum (siehe ⑦) verfügt, sind einige Maßnahmen erforderlich. Die Membran muss weitestgehend chemisch inert gestaltet werden, was durch eine Metallisierung mit Chrom erreicht werden kann, (siehe ⑧).

Bei Verwendung eines chemisch inerten Materials für die abgeformten Gehäusenutzen, wie z.B. PEEK (siehe ⑥) müsste ein Verbindungsverfahren zur Trägermembran oder zum gegenüberliegenden Gehäuseteil entwickelt werden, das auf den Einsatz von Klebstoff verzichtet. Hierfür wurde bereits an dieser Stelle des Fertigungskonzepts ein Chromring vorgesehen (siehe ⑤). Der Chromring, der mit Löchern versehen ist, umgibt die Sensorkammer radialsymmetrisch. Hiermit wird beabsichtigt, die PEEK-Gehäuseteile lokal aufzuschmelzen. Ein kurzer Strompuls soll den Chromring erwärmen, sodass die zur Verschweißung benötigte Wärme entsteht. Das lokal aufgeschmolzene PEEK soll dann durch die Löcher in der Leiterbahn und in der Membran dringen, sodass die Gehäuseteile miteinander verschweißt werden. Vorversuche mit sehr dünnen elektrischen Leitern, die zwischen PEEK-Platten und -Folien eingelegt waren, haben gezeigt, dass so eine zügige Verschweißung möglich ist. Sollte sich diese Verbindungstechnik für die Gehäusenutzen realisieren lassen, darf die Tatsache, dass PEEK oberhalb einer Dicke von ca. 50 µm opak ist, nicht außer Acht gelassen werden. Die Gehäusenutzen müssen innerhalb einer gewissen Toleranz zueinander positioniert werden. Dem wird Rechnung getragen, indem Positionierungshilfen in die Gehäusenutzen integriert werden. Die Positionierungshilfen bestehen aus sich jeweils gegenüberliegenden Stiften und Löchern im abgeformten Gehäusenutzen.

Redundant zur Möglichkeit die Gehäuseteile miteinander zu verschweißen, werden in den Gehäusenutzen Kammern vorgesehen, die mit Klebstoff befüllt werden können (siehe ⑨).

Da die Trägermembran am Rand der geätzten Glasplatte, die möglicherweise scharfkantig sein kann, beschädigt werden könnte, wurde für diese Seite eine andere Lagerung der Glasplatte ausgewählt (siehe auch Abbildung 2.15 C.)). Um eine Zerstörung der Membran zu verhindern, wenn sich die Glasplatte bei entsprechender Druckbeaufschlagung membranseitig in die Hohlkugel drückt, ist hier ein Polyimid-Ring vorgesehen. Wie bereits beschrieben kann eine ähnlich fehlertolerante Lagerung der Glasplatte erreicht werden, wenn sich diese anstatt in eine Hohlkugel, mit einem Polyimid-Ring (siehe ④) versehen, in ein zylindrisches Gehäuse legt.

Nachteilig an dem Polyimid-Ring ist, dass seine Herstellung zusätzliche Fertigungsschritte erfordert. Hier wurden bewusst beide Möglichkeiten betrachtet, um ihre Vor- und Nachteile gegeneinander abwägen zu können.

## 3.2 Herstellungsprozess

Um das geplante Erzeugnis- und Fertigungskonzept umzusetzen, wurde ein Herstellungsprozess ausgearbeitet, der im folgenden Abschnitt schematisch skizziert wird. Aus Übersichtsgründen wird lediglich die logische Abfolge der aufzubringenden und zu strukturierenden Schichten dargestellt. Die Funktionen der einzelnen Chrommasken werden in Abschnitt 4.3 ausführlich beschrieben.

### 3.2.1 Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses

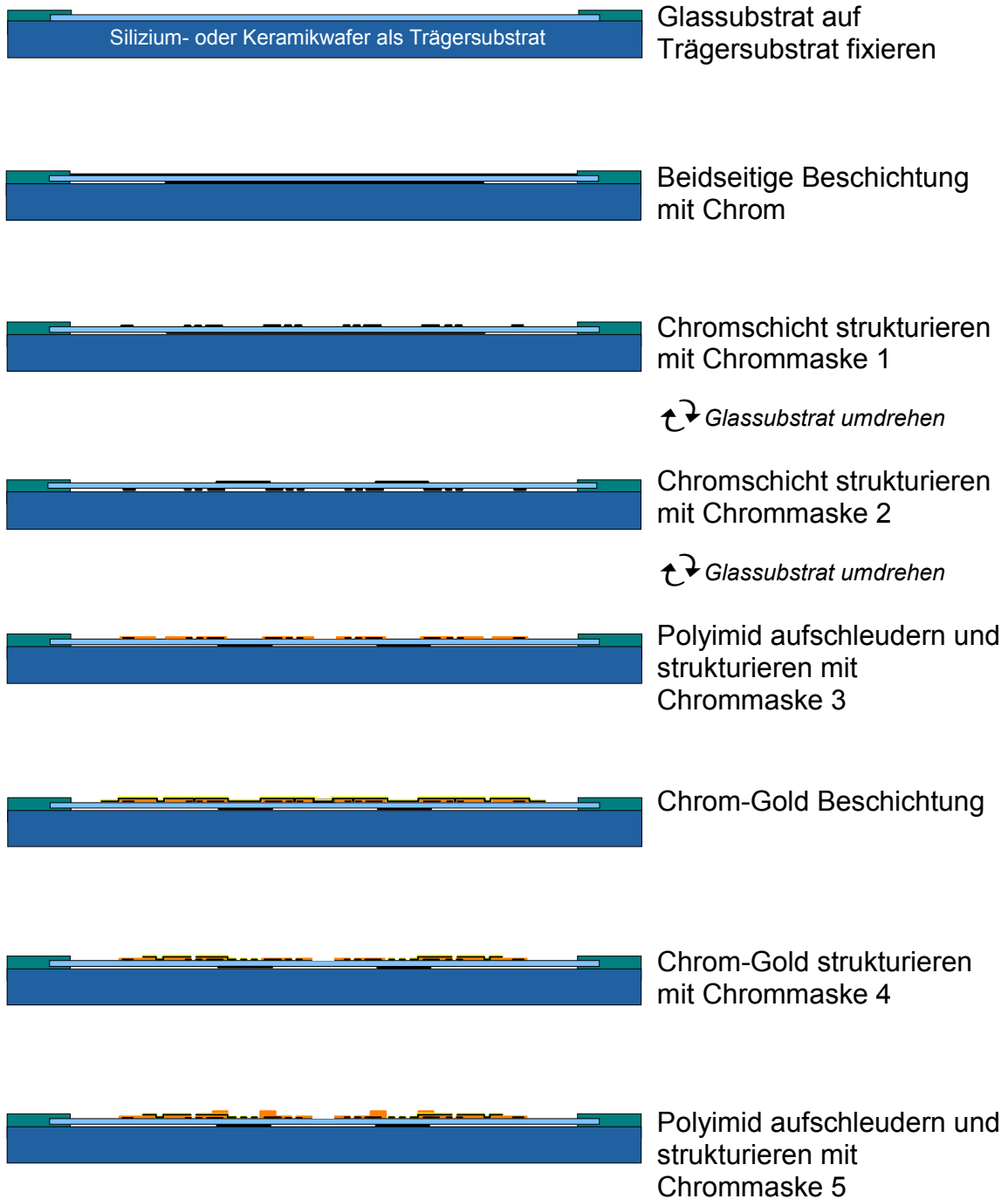
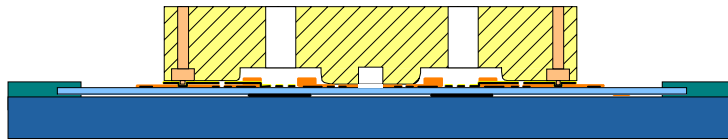
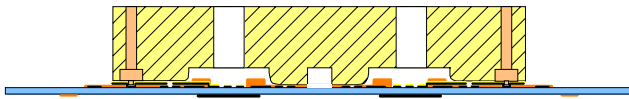


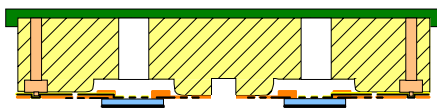
Abbildung 3.5 Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses Teil 1



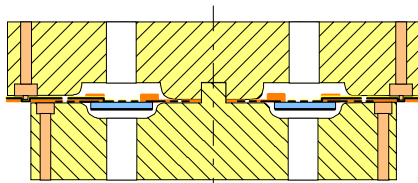
Ersten Gehäusenutzen positioniert verkleben



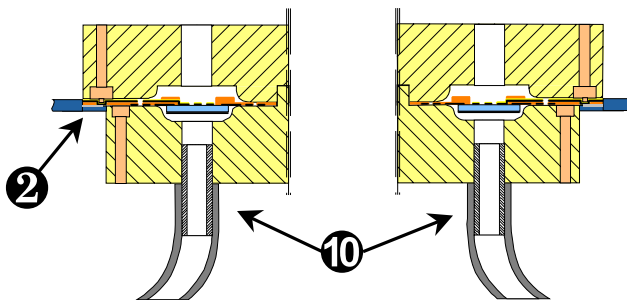
Trägersubstrat entfernen



Gehäusenutzen zukleben und Glassubstrat ätzen



Zweiten Gehäusenutzen einpassen und verkleben (oder evtl. verschweißen)



Drucksensoren vereinzeln und elektrisch (siehe ②) sowie fluidisch (siehe ⑩) kontaktieren

Abbildung 3.6 Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses Teil 2

Die schematische Darstellung des Herstellungsprozesses zeigt, dass zur Realisierung des Erzeugniskonzeptes 5 Chrommasken erforderlich sind. Besondere Aufmerksamkeit verlangt hierbei Chrommaske 4, die das Layout der Dehnungsmessstreifen vorgibt und damit die Funktion des Drucksensors maßgeblich bestimmt.

Die Berechnung des Layouts der Dehnungsmessstreifen wird im folgenden Kapitel 4 ausführlich dargestellt



## 4 Layout und Design

Im folgenden Kapitel wird nach grundlegenden Überlegungen zu den mechanischen Eigenschaften von Glas und dem piezoresistiven Effekt die Dimensionierung des Drucksensors ausführlich dargestellt. Nach einer Betrachtung des Spannungs- bzw. Dehnungsverlaufes auf der frei gelagerten Kreisplatte richtet sich der Fokus auf allgemeine Formelzusammenhänge bezüglich Dehnungsmessstreifen (DMS). Anschließend wird die rechnergestützte Gestaltung des Layouts der DMS und die Möglichkeit einer Kennliniensimulation aufgezeigt. Nach der Erläuterung der Struktur des Simulationsprogramms, wird die aktive Arbeit mit diesem Programm dokumentiert. Die Festlegung eines optimierten Layouts für den dargestellten speziellen Anwendungsfall komplettiert diesen Abschnitt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Layouts aller zur Realisierung des Herstellungsprozesses notwendigen Chrommasken und das Design des Abformwerkzeuges besprochen.

### 4.1 Grundlagen zur Auslegung des Drucksensors

Die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften von Glas ist für die mathematische Beschreibung des beanspruchten Werkstoffes unabdingbar. Einige wesentliche Merkmale von Glas bilden die Grundlage zur Auslegung des Drucksensors. Zur sinnvollen Detektion auftretender Dehnungen und zur Applikation von DMS auf Glas, ist das grundsätzliche Verständnis des piezoresistiven Effekts Voraussetzung.

#### 4.1.1 Mechanische Eigenschaften von Glas

Unter Glas versteht man allgemein Stoffe im amorphen, nichtkristallinen Festzustand [Römp95]. Der Glaszustand läßt sich physikalisch-chemisch als eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit bzw. Schmelze auffassen. Im engeren Sinne wird Glas definiert als anorganisch, meist oxidisches Schmelzprodukt, das durch einen Einfriervorgang ohne Auskristallisation der Schmelzphasenkomponenten in den festen Zustand überführt wird. Die Temperatur des Einfriervorgangs wird dabei zur Charakterisierung der Gläser herangezogen und äußert sich z.B. als Änderung der thermischen Ausdehnung bei der Abkühlung oder Erwärmung eines Glases. Die Temperatur, bei der diese Änderung auftritt, wird als Glas- oder Transformationstemperatur  $T_g$  bezeichnet. Bei  $T \leq T_g$  sind Gläser als „fest“ anzusehen, d.h. sie verhalten sich unterhalb dieser Temperatur  $T_g$  wie spröde-elastische (Hookesche) Körper. Für das verwendete Glas (Bezeichnung: D 263 T, [sch]) liegt  $T_g$  bei 557°C. Neben Glas, zeigen die meisten Werkstoffe in einem kleinen Dehnungs- bzw. Stauchungsbereich linear elastisches Verhalten [Mesc00], [Eigl00]. Dies zeigt sich zum einen in der vollständigen Rückkehr des Werkstoffs in den Ausgangszustand nach Ende der Belastung (reversibles Verhalten), zum anderen in der linearen Beziehung zwischen Werkstoffdehnung und Werkstoffspannung. Der mikroskopische Hintergrund ist im optimalen Bindungsabstand zu sehen, der bei einer Stauchung oder Dehnung verändert wird. Dadurch heben sich anziehende oder abstoßende Kräfte nicht mehr auf. Bei Belastung baut sich eine Gegenkraft auf, die den Körper wieder in den Ausgangszustand zurückzieht. Diese Gegenkraft  $F_R$  nimmt mit zunehmender Dehnung / Stauchung (Längenänderung  $\Delta x$ ) ebenfalls zu. Das für diesen Fall geltende Hookesche Gesetz lautet:

**Gleichung 4.1**  $F_R = -k_f \cdot \Delta x$  siehe Fußnote <sup>20</sup>

Die Federkonstante hängt von Materialeigenschaften und geometrischen Parametern ab. Zu einer geometrieunabhängigen Formulierung des Hookeschen Gesetzes gelangt man, indem man die relative Längenänderung  $\varepsilon_l = (l_1 - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$  und mit der Belastungsfläche  $A$  die mechanische Spannung  $\sigma = F / A$  einführt:

**Gleichung 4.2**  $\sigma = \varepsilon_l \cdot E$

Hierbei ist  $E$  der sogenannte Elastizitätsmodul, der bei den verwendeten Glassubstraten bei  $E = 72,9 \text{ kN/mm}^2$  liegt. Gleichung 4.2 beschreibt den Fall einer uniaxialen Normalbelastung. Auf der Oberfläche einer freigelagerten belasteten Kreisplatte erhält man jedoch einen biaxialen bzw. ebenen Spannungszustand. Die auftretenden Spannungen bzw. Dehnungen werden folgend mit  $\sigma_t$  bzw.  $\varepsilon_t$  als tangentielle und mit  $\sigma_r$  bzw.  $\varepsilon_r$  als radiale Spannungen bzw. Dehnungen bezeichnet. Unter Berücksichtigung des isotropen Werkstoffverhaltens kann das Hookesche Gesetz für die Hauptnormalspannungen  $\sigma_t$  und  $\sigma_r$  entsprechend formuliert werden [Keil95]:

**Gleichung 4.3** 
$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_t + \nu \cdot \varepsilon_r)$$

**Gleichung 4.4** 
$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_t)$$

Hierbei ist  $\nu$  die Poissonsche Querkontraktionszahl, die das Verhältnis von relativer Quer- zu relativer Längsdehnung bei Normalbelastung angibt. Für die verwendeten Glassubstrate ist diese Zahl  $\nu = 0,208$ . Der Verlauf dieser Spannungen bzw. Dehnungen auf der Glasplatte wird in Abschnitt 4.2.2 dargestellt.

#### 4.1.2 Piezoresistiver Effekt

Unter dem piezoresistiven Effekt versteht man die Änderung des elektrischen Widerstandes unter Einfluss einer mechanischen Spannung bzw. einer daraus resultierenden Dehnung. Die dehnungsabhängige Widerstandsänderung wird z. B. bei Dehnungsmessstreifen (DMS) ausgenutzt.

Betrachtet man ein Segment eines Dehnungsmessstreifens in Ruhe, so ist bei Stromfluss in Längsrichtung sein elektrischer Widerstand  $R_0$  gegeben durch [Hoff87]:

**Gleichung 4.5** 
$$R_0 = \rho_0 \cdot \frac{l_0}{A_0} = \rho_0 \cdot \frac{l_0}{b_0 \cdot d_0}$$

<sup>20</sup>  $k_f$  = Federkonstante des Systems,  $F_R$  = Rückstellkraft durch Auslenkung  $\Delta x$ .

Dabei ist  $\rho_0$  der spezifische elektrische Widerstand,  $l_0$ ,  $b_0$  und  $d_0$  sind die geometrischen Abmessungen des DMS, siehe Abbildung 4.1 oben.

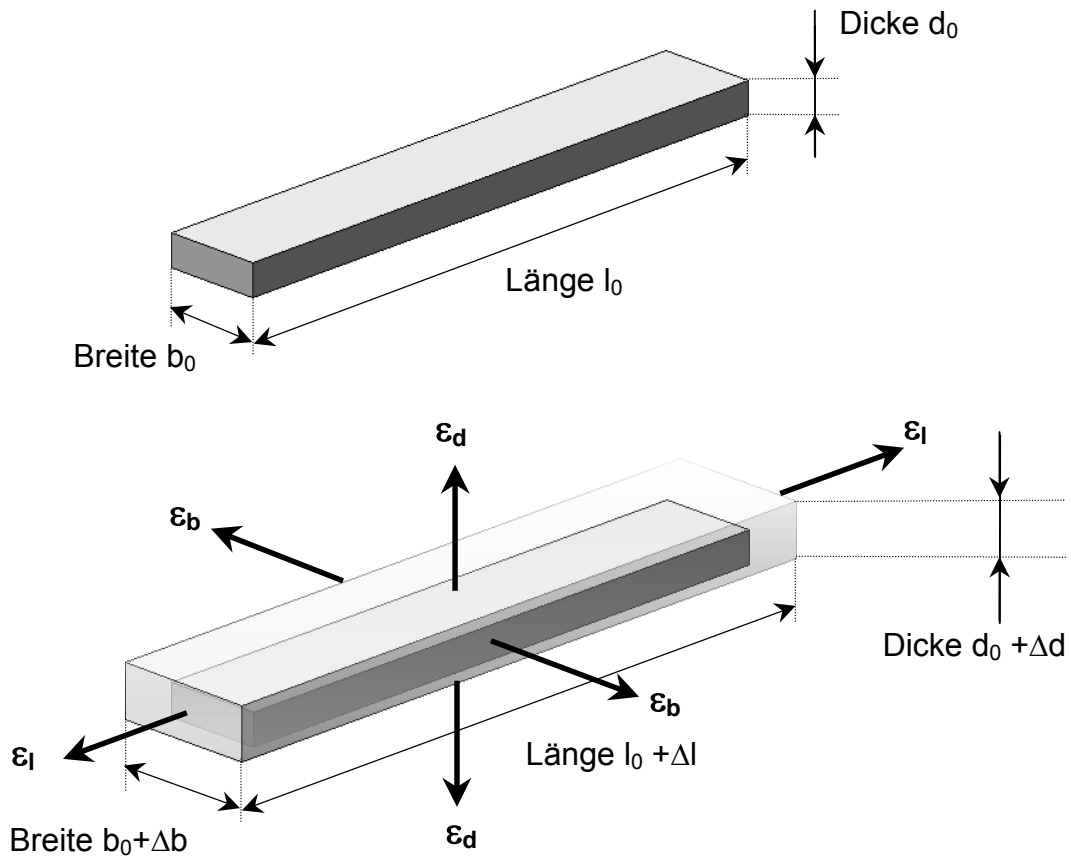


Abbildung 4.1 Deformation eines Dehnungsmessstreifens durch angreifende Dehnungen

Wird das Segment des Dehnungsmessstreifens belastet und aufgrund der in Abbildung 4.1 unten eingezeichneten Dehnungen deformiert, so ändert sich sein elektrischer Widerstand  $R_\varepsilon$  gemäß:

Gleichung 4.6 
$$R_\varepsilon = \rho_0 \cdot \frac{l_0 + \Delta l}{(b_0 + \Delta b) \cdot (d_0 + \Delta d)}$$

Im allgemeinen ändert sich, bei der eingezeichneten Belastung, der elektrische Widerstand sowohl durch die Änderung der Geometrie, als auch durch die Änderung der Materialkonstanten. Diese ist gegeben mit:

Gleichung 4.7 
$$\rho_0 = \frac{1}{n \cdot q \cdot \mu}$$



Hierbei ist  $n$  die Dichte der freien Ladungsträger,  $\mu$  deren Beweglichkeit,  $q$  die Ladung pro Ladungsträger. Da bei Metallen die Widerstandsänderung durch den Geometrieeffekt jedoch überwiegt, wird der spezifische elektrische Widerstand bei weiteren Rechnungen als konstant angesehen.

## 4.2 Dimensionierung des Drucksensors

### 4.2.1 Geometrische Dimensionierung der Messplatte

Das mechanisch bestimmende Element im beschriebenen Drucksensor ist eine kreisförmige Messplatte aus Dünnglas. Die geometrische Dimensionierung der Messplatte resultiert aus der angestrebten Spezifikation des Sensors und der vorgegebenen Messplattendicke von  $50\mu\text{m}$  des kommerziell erhältlichen Dünnglases. Die Spezifikation fordert eine lineare Kennlinie für den Sensor im Differenzdruckbereich von  $-1000\text{ hPa}$  bis  $+1000\text{ hPa}$ .

Um eine lineare Proportionalität zwischen der Auslenkung der Messplatte und dem angelegten Druck, der flächenlastig auf die Messplatte wirkt, zu erhalten, muss der entsprechende Messplattenradius berechnet werden. Zur Berechnung des Messplattenradiuses  $R_{MP}$  wird die Plattentheorie herangezogen [Girk54]. Diese beschreibt u.a. das elastische Verhalten dünner Platten im Bereich kleiner Auslenkungen unter Flächenlast. In der Literatur findet man die Gleichung zur Berechnung der Durchbiegung  $w(r)$  von frei gelagerten Kreisplatten unter gleichmäßig verteilter Flächenlast  $\Delta p$  gemäß [Dubb90]:

$$\text{Gleichung 4.8} \quad w(r) = \frac{(R_{MP}^2 - r^2) \cdot \Delta p}{64 \cdot N} \cdot \left( \frac{5 + \nu_{MP}}{1 + \nu_{MP}} \cdot R_{MP}^2 - r^2 \right) \quad \text{siehe Fußnote }^{21}$$

wobei die Plattensteifigkeit gegeben ist mit:

$$\text{Gleichung 4.9} \quad N = \frac{E_{MP} \cdot d_{MP}^3}{12 \cdot (1 - \nu_{MP}^2)} \quad \text{siehe Fußnote }^{22}$$

Zur Dimensionierung der Messplatte ist der Ort der größten Durchbiegung von besonderem Interesse. Dieser befindet in der Messplattenmitte und mit  $r = 0$  vereinfacht sich die Gleichung 4.8 zu:

$$\text{Gleichung 4.10} \quad w_{\max}(r = 0) = \frac{R_{MP}^4 \cdot \Delta p}{64 \cdot N} \cdot \frac{(5 + \nu_{MP})}{(1 + \nu_{MP})}$$

In der Literatur versteht man unter kleinen Auslenkungen, das 0,2 bis 0,3-fache der Plattendicke.

<sup>21</sup> Der Index MP steht für MESSPLATTE

<sup>22</sup>  $d_{MP}$  = Dicke der Messplatte,  $50\mu\text{m}$

An dieser Stelle wird zur Berechnung des Messplattenradiuses mit

**Gleichung 4.11**  $w_{\max}(r = 0) \equiv 0,2 \cdot d_{MP}$

eine konservative Annahme gewählt. Damit ist sichergestellt, dass die Auslenkung  $w(r)$  der Glasplatte gemäß Gleichung 4.8 eine lineare Funktion der Druckdifferenz  $\Delta p$  ist. Durch Einsetzen der Gleichung 4.9 und Gleichung 4.10 in Gleichung 4.11 erhält man nach Umformung unmittelbar die Designregel für den Messplattenradius.

**Gleichung 4.12** 
$$R_{MP} = 2 \cdot d_{MP} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{15 \cdot (5 + \nu_{MP}) \cdot (1 - \nu_{MP})} \cdot \frac{E_{MP}}{\Delta p_{\max}}}$$

Mit  $\Delta p_{\max} = 1000$  hPa und den genannten Größen der Messplatte ergibt sich hieraus ein Messplattenradius von  **$R_{MP} = 1042\mu\text{m}$** .

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass bei einer  $50\mu\text{m}$  dicken, frei gelagerten Messplatte mit einem Radius von  $1042\mu\text{m}$ , aufgrund einer Druckdifferenz von bis zu  $1000$  hPa, ein linearer Zusammenhang zwischen der Auslenkung des Messplattenmittelpunktes und der angelegten Druckdifferenz besteht.

#### 4.2.2 Spannungs-Dehnungsverlauf auf einer an ihrem Rand frei gelagerten kreisförmigen Platte

Da der berechnete Messplattenradius mithilfe der Plattentheorie unter der Annahme einer rein elastischen Verformung der Messplatte berechnet wurde und sich die Glasplatte bei kleinen Auslenkungen wie ein Hookescher Körper verhält, können die Hauptspannungen an der Messplattenoberfläche durch das Hookesche Gesetz beschrieben werden [Timo59].

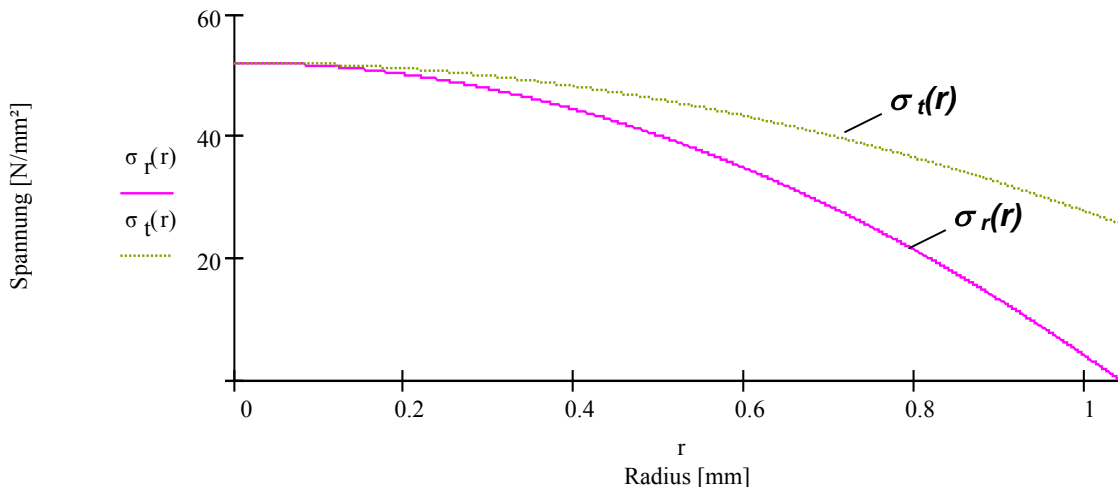
Bei Auslenkung der Messplatte entsteht auf ihrer Oberfläche ein zweiachsiger (ebener) Spannungszustand. Die auftretenden Hauptspannungen sind im Messplattenmittelpunkt gleich groß und haben dort ihren größten Wert. Die Spannungen in radialer Richtung werden beschrieben durch:

**Gleichung 4.13** 
$$\sigma_r(r) = \frac{3 \cdot \Delta p}{8 \cdot d_{MP}^2} \cdot \left[ (3 + \nu_{MP}) \cdot (R_{MP}^2 - r^2) \right]$$

und in tangentialer Richtung durch:

**Gleichung 4.14** 
$$\sigma_t(r) = \frac{3 \cdot \Delta p}{8 \cdot d_{MP}^2} \cdot \left[ R_{MP}^2 \cdot (3 + \nu_{MP}) - r^2 (1 + 3 \cdot \nu_{MP}) \right]$$

Die folgende Abbildung 4.2 zeigt den Verlauf der Hauptspannungen über dem Radius auf der Oberfläche der Messplatte bei einer Druckbelastung von  $\Delta p = 1000\text{hPa}$ .



**Abbildung 4.2** Verlauf der radialen und tangentialen Hauptspannungen über dem Radius  $r$  auf der Oberfläche einer frei gelagerten Kreisplatte bei Belastung durch  $\Delta p = 1$  bar.

Weiterhin beschreibt das Hookesche Gesetz, dass ein zweiachsiger Spannungszustand einen dreiachsigen (räumlichen) Verformungszustand bewirkt. Unter Berücksichtigung der Querdehnung ergeben sich die in Hauptrichtung auftretenden Dehnungen in radialer Richtung entsprechend zu:

**Gleichung 4.15** 
$$\varepsilon_r(r) = \frac{1}{E_{MP}} \cdot (\sigma_r(r) - \nu_{MP} \cdot \sigma_t(r))$$

und in tangentialer zu:

**Gleichung 4.16** 
$$\varepsilon_t(r) = \frac{1}{E_{MP}} \cdot (\sigma_t(r) - \nu_{MP} \cdot \sigma_r(r))$$

Da die Dehnungen in radialer und tangentialer Richtung auch Querdehnungen senkrecht (axial) zur Messplattenoberfläche, bzw. den Dehnungsmessstreifen verursachen, müssen diese ebenfalls berücksichtigt werden. Da davon ausgegangen wird, daß das mechanisch bestimmende Element im Sensor die Messplatte ist, und die tangentialen und radialen Dehnungen rückwirkungsfrei in die DMS eingeleitet werden, können die entsprechenden Dehnungen gleichgesetzt werden.

**Gleichung 4.17** 
$$\varepsilon_{r,DMS}(r) \equiv \varepsilon_r(r)$$

**Gleichung 4.18** 
$$\varepsilon_{t,DMS}(r) \equiv \varepsilon_t(r)$$

Die in axialer Richtung entstehende Dehnung in den Dehnungsmessstreifen beschreibt das Hookesche gemäß:

**Gleichung 4.19** 
$$\varepsilon_d(r) = -\nu_{DMS} \frac{1}{E_{DMS}} \cdot (\sigma_{r,DMS}(r) + \sigma_{t,DMS}(r))$$

Die in dieser Gleichung geforderten Spannungen in den Dehnungsmessstreifen zur Berechnung der axialen Dehnung resultieren aus Gleichung 4.17 und Gleichung 4.18. Setzt man hier die gegebenen Gesetzmäßigkeiten ein, so ergibt sich:

**Gleichung 4.20** 
$$\frac{1}{E_{DMS}} \cdot (\sigma_{r,DMS}(r) - \nu_{DMS} \cdot \sigma_{t,DMS}(r)) = \varepsilon_r(r)$$

und entsprechend

**Gleichung 4.21** 
$$\frac{1}{E_{DMS}} \cdot (\sigma_{t,DMS}(r) - \nu_{DMS} \cdot \sigma_{r,DMS}(r)) = \varepsilon_t(r)$$

Durch einfaches Umformen und Einsetzen der Gleichung 4.20 und Gleichung 4.21 kann man diese nach  $\sigma_{r,DMS}(r)$  und  $\sigma_{t,DMS}(r)$  auflösen.

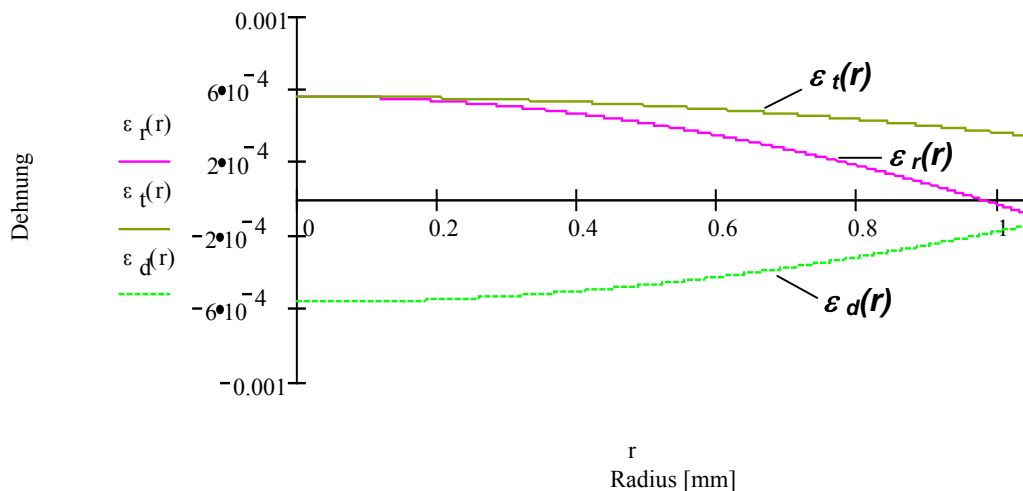
**Gleichung 4.22** 
$$\sigma_{r,DMS}(r) = \frac{E_{DMS}}{1 - \nu_{DMS}^2} \cdot (\varepsilon_r(r) + \nu_{DMS} \cdot \varepsilon_t(r))$$

**Gleichung 4.23** 
$$\sigma_{t,DMS}(r) = \frac{E_{DMS}}{1 - \nu_{DMS}^2} \cdot (\varepsilon_t(r) + \nu_{DMS} \cdot \varepsilon_r(r))$$

Durch Einsetzen der Gleichung 4.22 und Gleichung 4.23 in Gleichung 4.19 kann die in den Dehnungsmessstreifen entstehende axiale Dehnung beschrieben werden durch:

**Gleichung 4.24** 
$$\varepsilon_d(r) = -\frac{\nu_{DMS}}{1 - \nu_{DMS}} \cdot (\varepsilon_r(r) + \varepsilon_t(r))$$

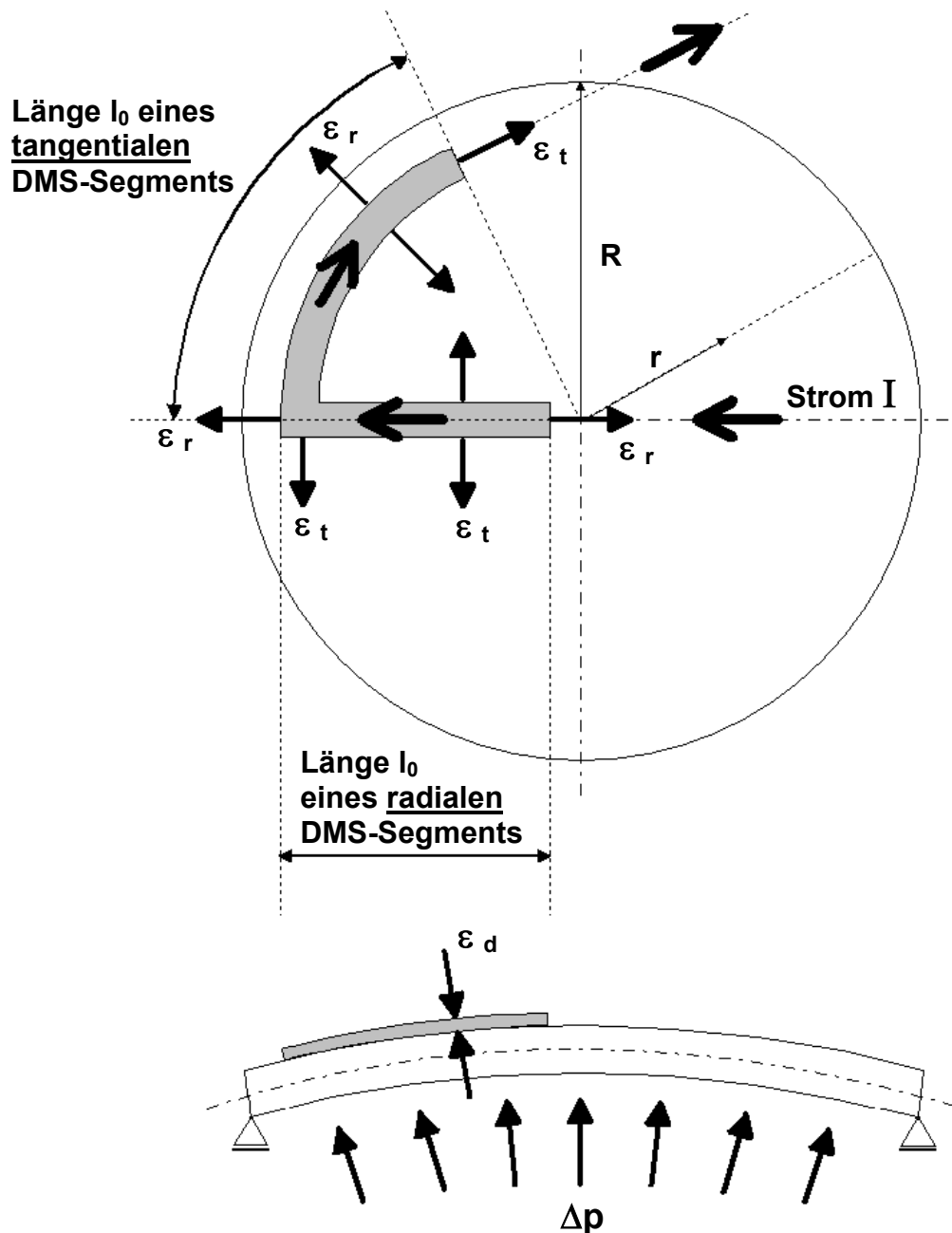
Die folgende Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der entsprechenden Hauptdehnungen über dem Radius der Messplatte.



**Abbildung 4.3** Verlauf der auftretenden Hauptdehnungen der DMS, die auf einer an ihrem Rand frei gelagerten Glasplatte angebracht sind, über dem Radius  $r$  bei Belastung durch  $\Delta p = 1$  bar.

### 4.2.3 Berechnung und Layout der Dehnungsmessstreifen

Zur Berechnung der Widerstandsänderung eines DMS aufgrund auftretender Dehnungen, muss die relative Lage des Stromflusses und der mechanischen Spannung (Dehnung) zueinander berücksichtigt werden. Zum besseren Verständnis wird folgende Terminologie eingeführt, siehe Abbildung 4.4 .



**Abbildung 4.4** Darstellung eines radialen und tangentialen DMS-Segments mit entsprechenden Dehnungen, sowie die Richtung des elektrischen Stromes

Die unterschiedlichen Widerstandsänderungen des tangentialen und radialen DMS-Segments ergeben sich unmittelbar durch Aufstellen ihrer entsprechenden Gleichungen.

Für das **tangentiale DMS-Segment** gilt:

**Gleichung 4.25**  $\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0}$  (tangente Dehnung)

**Gleichung 4.26**  $\varepsilon_r = \frac{\Delta b}{b_0}$  (radiale Dehnung)

**Gleichung 4.27**  $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$  (axiale Dehnung)

Durch Umformen dieser 3 Gleichungen und Einsetzen in Gleichung 4.6 erhält man den veränderten Widerstand:

**Gleichung 4.28** 
$$R_{\varepsilon, \text{tan}} = \rho_0 \cdot \frac{l_0 \cdot (1 + \varepsilon_t)}{b_0 \cdot (1 + \varepsilon_r) \cdot d_0 \cdot (1 + \varepsilon_d)} = R_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_t)}{(1 + \varepsilon_r) \cdot (1 + \varepsilon_d)}$$

Diese Gleichung verdeutlicht, dass eine positive Dehnung in tangentialer Richtung bei einem tangentialen DMS-Segment zur Erhöhung des Widerstandes beiträgt, da sie im Zähler steht. Bei positiven radialen und axialen Dehnungen führen diese jedoch zu einer Verringerung des elektrischen Widerstandes, da sie im Nenner auftreten. Dieser triviale Zusammenhang ist für die Auslegung der DMS von besonderer Wichtigkeit, wie die Aufstellung der entsprechenden Gleichungen für das radiale DMS-Segment verdeutlicht.

Für das **radiale DMS-Segment** gilt:

**Gleichung 4.29**  $\varepsilon_r = \frac{\Delta l}{l_0}$  (radiale Dehnung)

**Gleichung 4.30**  $\varepsilon_t = \frac{\Delta b}{b_0}$  (tangente Dehnung)

**Gleichung 4.31**  $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$  (axiale Dehnung)

In diesem Fall ist für die Längenänderung des radialen DMS-Segment nicht  $\varepsilon_t$  verantwortlich, sondern  $\varepsilon_r$ . Folglich erhält man entsprechend durch Umformen und Einsetzen:

**Gleichung 4.32** 
$$R_{\varepsilon, \text{rad}} = \rho_0 \cdot \frac{l_0 \cdot (1 + \varepsilon_r)}{b_0 \cdot (1 + \varepsilon_t) \cdot d_0 \cdot (1 + \varepsilon_d)} = R_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_r)}{(1 + \varepsilon_t) \cdot (1 + \varepsilon_d)}$$

Im Vergleich zu Gleichung 4.28 führt hier eine positive Dehnung in tangentialer Richtung beim radialen DMS-Segment zu einer Verringerung des Widerstandes. Bei herkömmlichen mäanderförmigen DMS wird diese oft als Querdehnung bezeichnet.

Unter Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit und der Vorzeichen der Dehnungen lassen sich aus Gleichung 4.28 und Gleichung 4.32 die Widerstandsänderungen von radialen und tangentialen DMS-Segmenten ermitteln.

Durch Einführung eines ortabhängigen Multiplikationsfaktors  $f(r)$  in Gleichung 4.28 und Gleichung 4.32 vereinfachen sich diese zu:

**Gleichung 4.33**  $R_{\varepsilon,\text{tan}}(r) = R_0 \cdot f_t(r)$  (für ein tangenciales DMS-Segment)

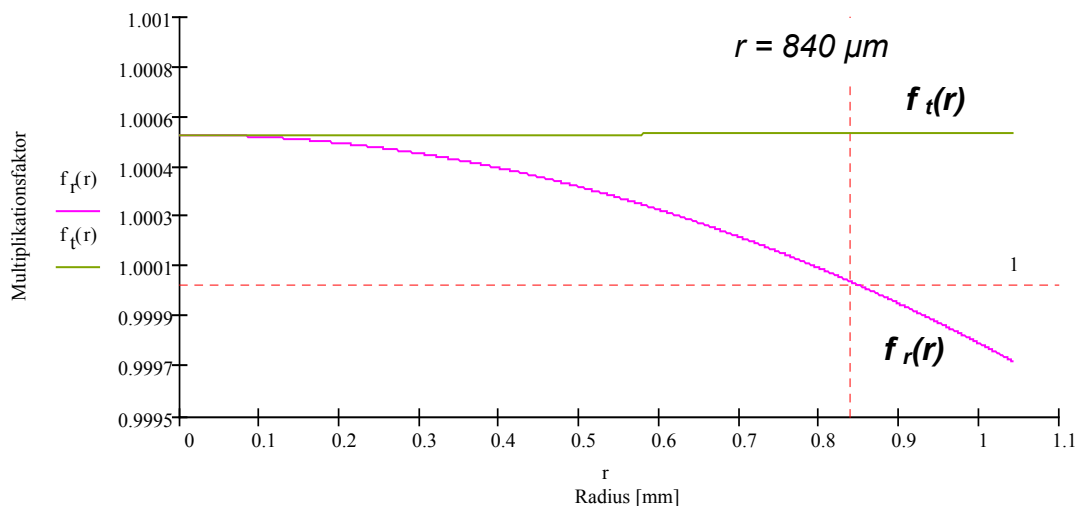
**Gleichung 4.34**  $R_{\varepsilon,\text{rad}}(r) = R_0 \cdot f_r(r)$  (für ein radiales DMS-Segment)

Betrachtet man den Multiplikationsfaktor  $f(r)$  genauer, so zeigt sich die Komplexität der Aufgabenstellung.

**Gleichung 4.35**  $f(r) = \text{Funktion}\{\varepsilon_t[\sigma_r(r, \Delta p), \sigma_t(r, \Delta p)], \varepsilon_r[\sigma_r(r, \Delta p), \sigma_t(r, \Delta p)], \varepsilon_d[r, \Delta p]\}$

Die Multiplikationsfaktoren  $f_t(r)$  und  $f_r(r)$  wurden mit den beschriebenen Gleichungen innerhalb der Simulation berechnet. Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Berechnungen für eine Druckdifferenz von  $\Delta p = 1000 \text{ hPa}$ .

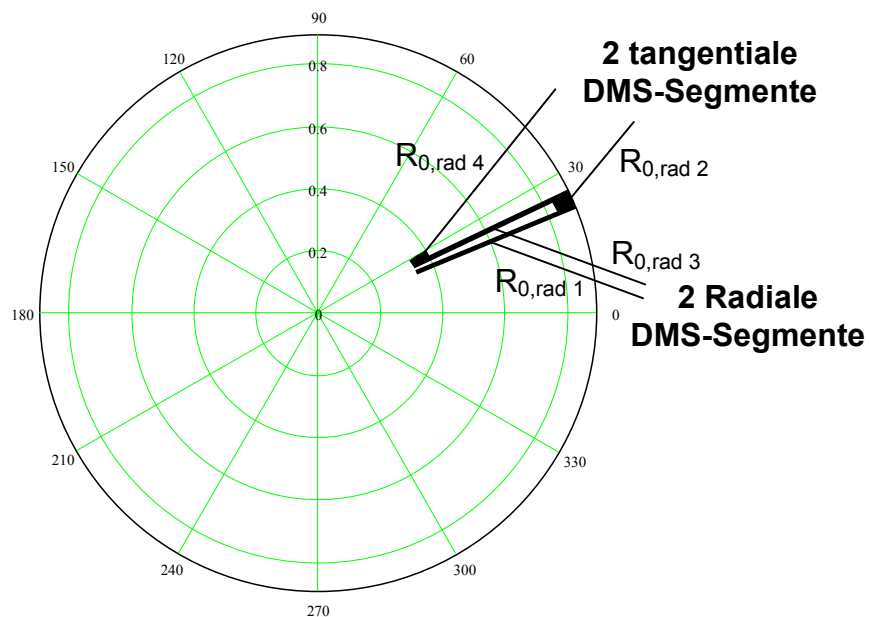
Es ist leicht ersichtlich, dass sich ein Widerstand sowohl vergrößern als auch verkleinern kann, je nachdem ob  $f(r) > 1$  oder  $f(r) < 1$  ist. Einen ersten Ansatzpunkt für die Auslegung der DMS gibt die grafische Darstellung der tangentialen und radialen Multiplikationsfaktoren,  $f_t(r)$  und  $f_r(r)$ .



**Abbildung 4.5** Multiplikationsfaktoren,  $f_t(r)$  und  $f_r(r)$  über dem Radius der Messplatte, bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p = 1000 \text{ hPa}$ .

Aus Abbildung 4.5 ist ersichtlich, daß ein tangenciales DMS-Segment, bei anliegender Druckdifferenz von  $\Delta p = 1000 \text{ hPa}$  und der gewählten Geometrie und den gewählten Werkstoffen, über dem gesamten Radius immer eine Widerstandserhöhung erfährt. Für das tangenciales DMS-Segment ist  $f_t(r)$  immer größer 1 und immer größer als  $f_r(r)$ , abgesehen vom Messplattenmittelpunkt. Für ein radiales DMS-Segment zeigt sich die Bedeutung der Ortsabhängigkeit. Das radiale DMS-Segment erfährt in diesem Fall eine Widerstandserhöhung wenn es sich innerhalb

eines Radiuses von ca. 840  $\mu\text{m}$  befindet. Liegt es außerhalb dieses Radiuses, so erfährt es eine Widerstandserniedrigung, da hier der Multiplikationsfaktor  $f_r(r)$  kleiner 1 wird. Die Tatsache, dass je nach Anordnung, DMS unterschiedliche Widerstandsänderungen erfahren, wird im allg. in Messbrücken ausgenutzt. Bei einer Halbbrücke, d.h. 2 aktive DMS werden gedehnt, versucht man diese so anzuordnen, dass sich der elektrische Widerstand des einen DMS vergrößert und der des anderen verkleinert. Dadurch ergibt sich ein maximales Ausgangssignal in der Messbrücke. Hieraus lässt sich ableiten, dass es sinnvoll ist, einen tangentialen DMS auf der Messplatte anzubringen, weil er einen vergleichsweise großen Messeffekt verspricht. Da bei dem geplanten Drucksensor die Messplatte auf einer Trägermembran befestigt werden soll, wird der Randbereich der Messplatte von der Trägermembran bedeckt. In diesem Randbereich sollten sich folglich keine DMS befinden, da die Verbindung zwischen Trägermembran und Messplatte ein Bimaterial darstellt und ein Temperatureinfluss auf die Messung nicht ausgeschlossen werden kann. Berücksichtigt man eine Überdeckung von Trägermembran und Messplatte von 100 $\mu\text{m}$  und addiert einen Sicherheitsabstand von weiteren 50 $\mu\text{m}$ , so erhält man den maximal zur Verfügung stehenden Platz auf der Messplatte. Mit dem errechneten Messplattenradius von  $R=1042 \mu\text{m}$  verringert sich der „nutzbare“ Radius auf 892 $\mu\text{m}$ . Bei zentraler Anordnung eines tangentialen DMS, muss zur temperaturkompensierten Messung also mindestens ein weiterer DMS angebracht werden, der nicht über den Radius von 892  $\mu\text{m}$  hinausgeht. Verschaltet man die DMS in einer Halbbrücke sollte der zweite DMS idealerweise so angeordnet werden, dass sein elektrischer Widerstand bei Belastung verkleinert wird oder zumindest eine möglichst geringe positive Widerstandsänderung erfährt. Aus Abbildung 4.5 wird deutlich, dass hierfür nur ein radialer DMS in Frage kommt, der möglichst weit am Rand der Platte platziert wird. Unter diesen Vorgaben wurde mithilfe des Softwarepaketes *mathcad 7.0* ein Softwaretool geschrieben, das es erlaubt, ein DMS-Layout auf einer an ihrem Rand frei gelagerten Kreisplatte zu generieren und zu berechnen. Im ersten Schritt wird ein Mäander eines radialen DMS generiert, siehe Abbildung 4.6 .



**Abbildung 4.6** Generierung eines Mäanders eines radialen DMS auf einer kreisrunden Platte

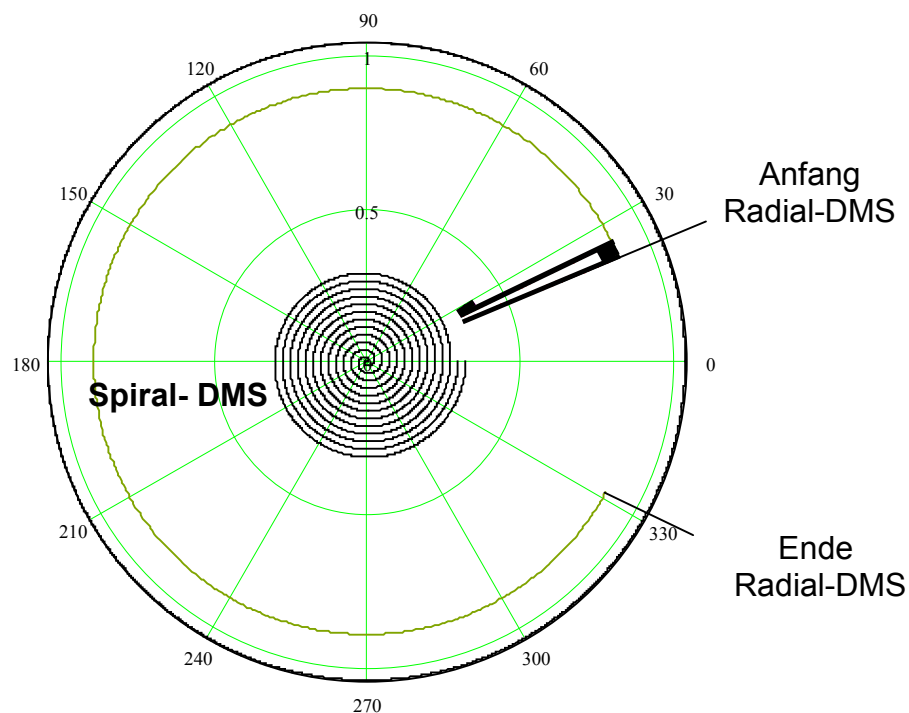


Wie die Abbildung 4.6 verdeutlicht, sind zur Verbindung zweier radiale DMS-Segmente, zwei tangentiale erforderlich. Somit ist ein Mäander eines radialen DMS eine Reihenschaltung hintereinander angeordneter DMS-Segmente, bei der sich die elektrischen Widerstände addieren. Während die zwei radialen DMS-Segmente die gleiche Widerstandsänderung bei Belastung erfahren, muss bei den tangentialen, der unterschiedliche Ort der Anbringung berücksichtigt werden. Dies geschieht durch Verwendung der ortsabhängigen Multiplikationsfaktoren. Da der Verlauf der Multiplikationsfaktoren nicht linear ist, handelt es sich genau genommen um integrale Einflussgrößen. Um den Rechenaufwand jedoch möglichst gering zu halten, werden die integralen Multiplikationsfaktoren durch arithmetische Mittelwertbildung vereinfacht. Bei Bezeichnung der einzelnen Widerstände der DMS-Segmente ohne Belastung gemäß Abbildung 4.6 kann der durch Belastung verändertes elektrische Widerstand des Mäanders vereinfacht beschrieben werden durch:

$$\text{Gleichung 4.36} \quad R_{\varepsilon,rad} = R_{0,rad1} \cdot f_r(r1) + R_{0,rad2} \cdot f_t(r2) + R_{0,rad3} \cdot f_r(r1) + R_{0,rad4} \cdot f_t(r3)$$

Zur Generierung eines kompletten radialen DMS wird nun ein ganzzahliges Vielfaches dieser Mäander aneinander gereiht und entsprechend berechnet.

Im zweiten Schritt wird ein tangentialer DMS im Zentrum der Messplatte generiert, der den gleichen elektrischen Widerstand in Ruhe besitzt, wie der radiale. Um radiale Verbindungssegmente zu vermeiden, wird hier die Form einer Spirale gewählt, siehe Abbildung 4.7. Aus software-technischen Gründen kann an dieser Stelle der komplette radiale DMS nicht dargestellt werden. Anstelle dessen, wird der äußere Radius vom Anfangs- bis zum Endpunkt dargestellt. Das komplette Layout wird in Abschnitt 4.3 gezeigt.



**Abbildung 4.7** Generierung eines spiralförmigen DMS auf einer kreisrunden Platte

Damit die DMS ohne eine gravierende Widerstandsänderung im realen Drucksensor mittels Zuleitungen mit der Umgebung kontaktiert werden können, wird in das Rechenprogramm noch eine weitere Bedingung eingeführt. Diese sieht vor den längeren Arm des Spiral-DMS an der gleichen Stelle (Winkelmaß), wie den radialen DMS enden zu lassen.

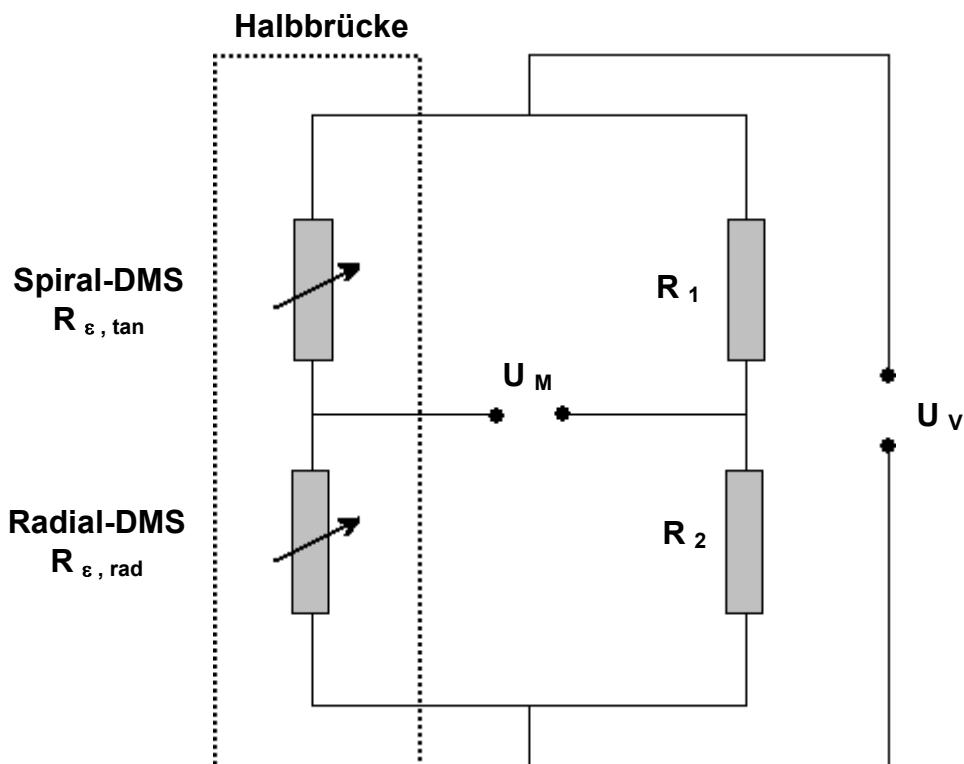
Da der Verlauf des ortsabhängigen Multiplikationsfaktors  $f_t(r)$ , der zur Berechnung des Spiral-DMS herangezogen wird, annähernd konstant ist, wird zur Berechnung ebenfalls eine vereinfachende arithmetische Mittelwertbildung verwendet. Entsprechend Gleichung 4.36 lässt sich die Widerstandsänderung eines Spiral-DMS durch Belastung formulieren.

**Gleichung 4.37** 
$$R_{\varepsilon, \tan} = R_{0, \text{Spirale}} \cdot f_t(r_M)$$

Hierbei ist  $r_M$  die Hälfte des äußeren Radiuses des Spiral-DMS. Auf der Grundlage der beschriebenen Berechnung der Widerstandsänderungen, kann nun durch Variation des Differenzdruckes die Kennlinie simuliert werden.

#### 4.2.4 Simulation der Kennlinie

Die Simulation der Kennlinie des Druckssensors basiert auf der in Abbildung 4.8 dargestellten Wheatstoneschen Messbrücke. Befinden sich in ihr, in der angeordneten Weise, zwei veränderliche Widerstände, hier zwei DMS, so wird sie als Halbbrücke betrieben.



**Abbildung 4.8** Darstellung einer elektrischen Wheatstoneschen Messbrücke mit zwei veränderlichen Widerständen

Für die dargestellte Messbrücke gilt folgender Zusammenhang [Keil95]:

**Gleichung 4.38** 
$$U_M = \left( \frac{R_{\varepsilon,\tan}}{R_{\varepsilon,\tan} + R_{\varepsilon,rad}} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot U_V$$

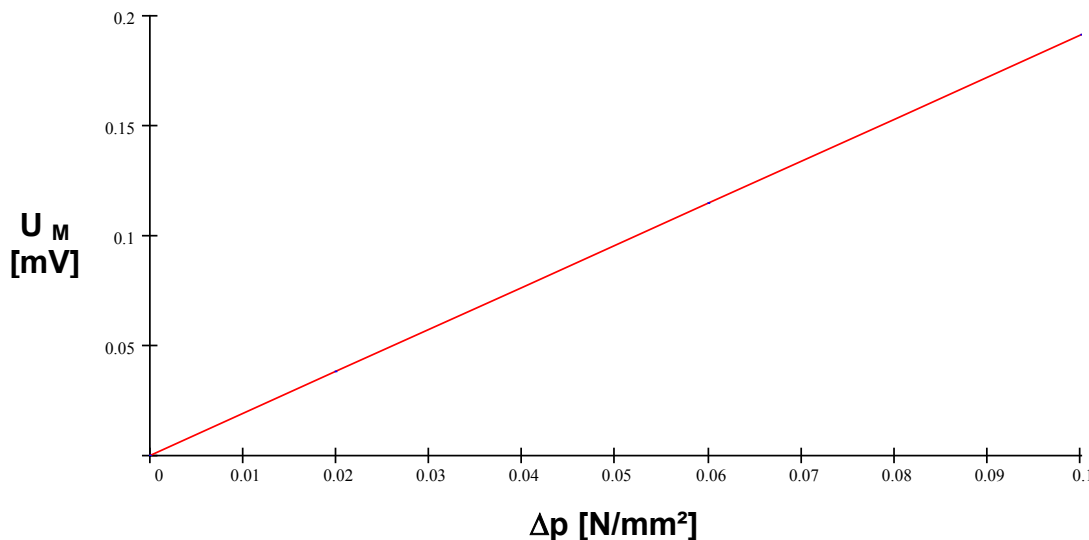
Dabei ist  $U_V$  die Versorgungsspannung und  $U_M$  die Messspannung der Messbrücke.

Zur Simulation der Kennlinie des Drucksensors werden zunächst die Gesamtwiderstände des Radial- und Spiral-DMS ohne Belastung, für ein gewähltes Layout, berechnet. Befindet sich die Messanordnung in Ruhe, d.h. auf die Messplatte wirkt keine Druckdifferenz, kann die Messbrücke abgeglichen werden. Hierfür muss folgende Bedingung erfüllt sein:

**Gleichung 4.39** 
$$\frac{R_{\varepsilon,\tan}}{R_{\varepsilon,rad}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Diese allg. Abgleichbedingung vereinfacht sich für die Simulation, da das Layout für den Radial- bzw. Spiral-DMS gleich große, elektrische Widerstände vorsieht. Somit sind alle Widerstände in Ruhe gleich groß, und die Messspannung  $U_M = 0$ .

Anschließend können die Widerstandsänderungen für unterschiedliche Differenzdrücke ermittelt werden, sowie deren Einfluss auf die Messspannung. Trägt man die Messspannung  $U_M$  über dem Differenzdruck  $\Delta p$  auf, kann die Kennlinie simuliert werden.



**Abbildung 4.9** Simulierte Kennlinie eines Drucksensors

Die simulierte Kennlinie eines Drucksensors zeigt einen linearen Verlauf. Am Ende einer Simulation erstellt das Programm automatisch ein Layout-Protokoll, das alle relevanten Größen und zur Konstruktion der DMS notwendigen Daten enthält. Exemplarisch zeigt Abbildung 4.10 das Layout-Protokoll für das im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereits optimierte und verwendete Layout. Die Bedeutung der einzelnen Parameter ist aus dem Protokoll ersichtlich.

| Layout-Protokoll für DMS :        |                                                                                  | Layout Nr.8                             |                                                 |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Geometrische Daten der Messplatte | Plattenradius [mm]:                                                              | $R = 1.042$                             |                                                 |
|                                   | Plattendicke [mm]:                                                               | $d_p = 0.05$                            | max.Druck [N/mm <sup>2</sup> ] $p_{0.1} := 0.1$ |
| Materialgrößen                    | Glasplatte :                                                                     | $\nu_p := 0.208$                        | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] $E_p := 72900$     |
|                                   | DMS :                                                                            | $\nu_{DMS} := 0.42$                     | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] $E_{DMS} := 78500$ |
| Leiterbahngeometrien              | Höhe [mm]:                                                                       | $h = 0.00013$                           |                                                 |
|                                   | Breite [mm]:                                                                     | $b = 0.005$                             |                                                 |
|                                   | Breite gilt <u>nur</u> für radiale Segmente des radialen DMS und für die Spirale |                                         |                                                 |
|                                   | Breite der tangentialen Anteile des radialen DMS                                 |                                         |                                                 |
|                                   | erstes Tangentiaalsegment $r_{\tau ta}$                                          | Breite in [mm]                          | $b_{\tau ta} = 0.01$                            |
|                                   | zweites Tangentiaalsegment $r_{\tau ti}$                                         | Breite in [mm]                          | $b_{\tau ti} = 0.01$                            |
|                                   | Abstand zwischen den Leiterbahnen                                                | Abstand [mm]:                           | $d = 0.02159706$                                |
|                                   | spezifischer Widerstand $\rho$                                                   | [ $\Omega$ mm]:                         | $\rho = 0.000039$                               |
| Radial-DMS                        | Innenradius [mm]                                                                 | $r_i = 0.65$                            |                                                 |
|                                   | Aussenradius [mm]                                                                | $r_a = 0.892$                           |                                                 |
|                                   | Innenabstand zur Spirale [mm]                                                    | $A_{rad\_spirale} = 0.039103$           |                                                 |
|                                   | Aussenabstand zum Plattenrand [mm]                                               | $A_{r\_Plattenrand} = 0.15$             |                                                 |
|                                   | incl. Positionierungssicherheit [mm]                                             | $S_{pos} = 0.05$                        |                                                 |
|                                   | Mindestabstand zur Leiterbahn von $l_{min1}$                                     | $l_{min1} - b = 0.015$                  |                                                 |
|                                   | Anzahl der Radial-Segmente:                                                      | $I = 90$                                |                                                 |
|                                   | Gesamtwiderstand Radial-DMS [ $\Omega$ ]:                                        | $R_{rad\_0} = 2524.88014$               |                                                 |
| Spiral-DMS                        | Anzahl der Winkeldrehungen um 360°                                               | $n = 11$                                |                                                 |
|                                   | Abstand zwischen den Leiterbahnen [mm]                                           | $d = 0.021597$                          | !                                               |
|                                   | Aussenradius des Spiral-DMS [mm]                                                 | $R_{a\_spirale} = 0.610897$             |                                                 |
|                                   | Gesamtwiderstand des Spiral-DMS [ $\Omega$ ]:                                    | $R_{Spirale\_0} = 2524.88014$           |                                                 |
| Winkelpositionen                  | Beginn des ersten Radial-DMS                                                     | $\omega_1 = 0.125\pi$                   |                                                 |
|                                   | Mitte des ersten Radial-DMS                                                      | $\omega_2 = 0.134794\pi$                |                                                 |
|                                   | Ende des ersten Radial-DMS                                                       | $\omega_3 = 0.14444\pi$                 |                                                 |
|                                   | Ende des Radial-und Spiral-DMS                                                   | $\omega_{Ende} = 1.874591\pi$           |                                                 |
| Brückenwerte                      | Brückenversorgungsspannung [mV]:                                                 | $U_0 = 5020$                            |                                                 |
|                                   | Maximales Brückensignal bei 1 bar [mV]                                           | $U_{MH\_0.1} = 0.554074$                |                                                 |
| Leistung der Widerstände          | Spiral-DMS [mW]                                                                  | $P_{Spirale} \cdot 1000 = 2.495208$     |                                                 |
|                                   | Radial-DMS [mW]                                                                  | $P_{Radial\_DMS} \cdot 1000 = 2.495208$ |                                                 |

**Abbildung 4.10** Layout-Protokoll generierter und berechneter Dehnungsmessstreifen auf einer an ihrem Rand frei gelagerten Kreisplatte

In den zurückliegenden Abschnitten, wurde die Vorgehensweise zur Ermittlung eines DMS-Layouts und die Struktur der rechnergestützten Simulation beschrieben. Die aktive Arbeit mit dem Simulationsprogramm und die Optimierung eines DMS-Layouts, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

#### 4.2.5 Optimierung des Layouts der Dehnungsmessstreifen

Wie in Abbildung 4.10 ersichtlich ist, hängt das DMS-Layout von einer Vielzahl von Parametern ab. Dabei verändert schon die Variation eines einzelnen Parameters, den Verlauf der Kennlinie des Drucksensors. Damit der Drucksensor ein möglichst großes Messsignal liefern kann, ist eine Optimierung des Layouts notwendig. Zur Optimierung des Layouts werden die maximalen Brückenausgangsspannungen ( d.h. bei maximaler Druckdifferenz von  $\Delta p=1000$  hPa) unterschiedlicher DMS Auslegungen miteinander verglichen. Da die Messspannung proportional zur anliegenden Versorgungsspannung der Messbrücke ist, wird als Referenzwert die in den Sensor eingebrachte elektrische Leistung betrachtet. Bei Berücksichtigung des Referenzwertes kann gleichzeitig vermieden werden, dass die eingebrachte Leistung zu einer Erwärmung des Sensors führt. Aufgrund der Erfahrungen mit den bereits in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Drucksensoren, wird festgelegt, dass die Leistungsaufnahme eines DMS nicht größer sein soll, als  $P = 2,5$  mW.

Um auch an dieser Stelle den Rechenaufwand der Optimierung zu reduzieren, werden einige Parameter nicht variiert.

- Der maximal zulässige Außenradius des Radial-DMS von  $r_a = 892\mu\text{m}$  bleibt konstant und wird voll ausgenutzt.
- Der Mindestabstand  $l_{min}$  zwischen den radialen Segmenten eines Mäanders darf aus fertigungstechnischen Gründen  $15\mu\text{m}$  nicht unterschreiten.
- Die Breite des Spiral-DMS und der radialen Segmente des Radial-DMS werden mit  $b = 5$   $\mu\text{m}$  konstant gehalten. Der Hintergrund hierfür liegt in der prozesstechnischen Realisierung der DMS. Würde man die DMS noch dünner ausführen, so bestünde die Gefahr, daß sie sich nicht mehr nasschemisch strukturieren ließen. Durch auftretende Unterätzungen des über den DMS liegenden strukturierten Fotoresists, könnten die DMS beschädigt oder gar ganz entfernt werden. Andererseits sollten diese DMS so schmal wie möglich ausgeführt werden, um einen möglichst hohen Widerstand zu erreichen.
- Die Dicke der DMS wird mit  $h = 130$  nm konstant gehalten, weil sich DMS in dieser Dicke noch relativ gut fertigen lassen. Anzustreben sind möglichst dünne DMS mit homogener Dickenverteilung, damit ihr Widerstand möglichst hoch ausfällt. Für die Optimierung des Designs ist die Dicke kein wichtiger Parameter, da aus fertigungstechnischen Gründen in jedem Fall DMS mit homogener Dicke angestrebt werden.

Die nachfolgende Tabelle 4.1 zeigt die variierten und daraus resultierenden Parameter und die berechneten maximalen Messspannungen unter Berücksichtigung des Referenzwertes.

| Layout | $b_{\tau ta}$<br>[mm] | $b_{\tau ti}$<br>[mm] | $r_i$<br>[mm] | $A_{\text{rad-spirale}}$<br>[mm] | $d$<br>[mm]  | $l$       | $n$       | $U_v$<br>[mV] | $U_M$<br>[mV] | $P$<br>[mW]  |
|--------|-----------------------|-----------------------|---------------|----------------------------------|--------------|-----------|-----------|---------------|---------------|--------------|
| 1      | 0,1                   | 0,1                   | 0,5           | 0,043                            | 0,021        | 59        | 8         | 3700          | 0,347         | 2,496        |
| 2      | 0,05                  | 0,05                  | 0,52          | 0,047                            | 0,015        | 59        | 11        | 4410          | 0,424         | 2,494        |
| 3      | 0,05                  | 0,05                  | 0,55          | 0,056                            | 0,018        | 63        | 10        | 4300          | 0,431         | 2,493        |
| 4      | 0,05                  | 0,05                  | 0,55          | 0,041                            | 0,015        | 78        | 12        | 4780          | 0,480         | 2,495        |
| 5      | 0,01                  | 0,01                  | 0,59          | 0,045                            | 0,013        | 81        | 14        | 5350          | 0,549         | 2,499        |
| 6      | 0,1                   | 0,1                   | 0,59          | 0,112                            | 0,031        | 87        | 6         | 3280          | 0,348         | 2,496        |
| 7      | 0,01                  | 0,01                  | 0,64          | 0,068                            | 0,017        | 88        | 12        | 5070          | 0,553         | 2,495        |
| 8      | <b>0,01</b>           | <b>0,01</b>           | <b>0,65</b>   | <b>0,039</b>                     | <b>0,021</b> | <b>90</b> | <b>11</b> | <b>5020</b>   | <b>0,554</b>  | <b>2,495</b> |
| 9      | 0,005                 | 0,005                 | 0,7           | 0,072                            | 0,024        | 96        | 10        | 4850          | 0,534         | 2,494        |
| 10     | 0,005                 | 0,005                 | 0,66          | 0,065                            | 0,018        | 91        | 12        | 5170          | 0,550         | 2,493        |

Tabelle 4.1 Variation der Layout-Parameter der DMS

**Bezeichnungen:**

|                          |                                                                |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $b_{\tau ta}$            | Breite des <u>ersten</u> tangentialen Segments des Radial-DMS  |
| $b_{\tau ti}$            | Breite des <u>zweiten</u> tangentialen Segments des Radial-DMS |
| $r_i$                    | Innenradius des Radial-DMS                                     |
| $A_{\text{rad-spirale}}$ | Abstand zwischen Spiral- und Radial-DMS                        |
| $d$                      | Abstand zwischen den Leiterbahnen des Spiral-DMS               |
| $l$                      | Anzahl der Mäander des Radial-DMS                              |
| $n$                      | Anzahl der Windungen des Spiral-DMS                            |
| $U_v$                    | Versorgungsspannung                                            |
| $U_M$                    | Messspannung                                                   |
| $P$                      | Leistungsaufnahme eines DMS                                    |

Die Tabelle lässt sich grafisch auswerten und interpretieren, indem man die Layoutnummer über der Messspannung aufträgt.

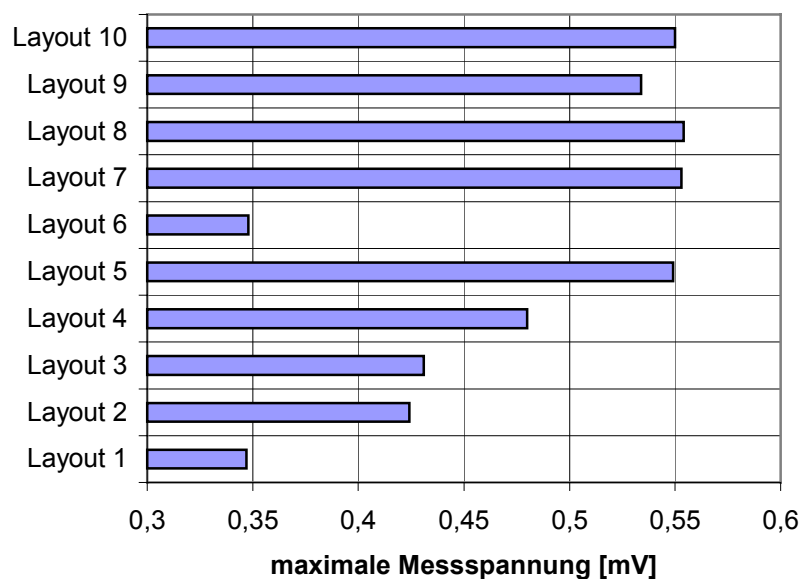


Abbildung 4.11 Darstellung der entsprechenden Layoutvariationen über der simulierten maximalen Messspannung

Die Balken in Abbildung 4.11 veranschaulichen sehr deutlich, dass die Variation der Layout-Parameter einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Messspannung haben.

Von Layout 1 bis Layout 5 wurde die Breite  $b_{\text{ta}}$  und  $b_{\text{ti}}$  der tangentialen Segmente des Radial-DMS verkleinert. Dadurch erhöht sich drastisch die Anzahl der Mäander von 59 auf 81, was zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstandes führt. Da der Spiral-DMS automatisch im Gesamtwiderstand angeglichen wird, kann unter Berücksichtigung des Referenzwertes die Versorgungsspannung der Messbrücke erhöht werden. Durch diese Maßnahme kann die Versorgungsspannung von 3700 mV auf 5350 mV erhöht werden, was zu einer Steigerung des Messsignal von 0,347 mV auf 0,549 mV führt.

Unter Beibehaltung des nach außen gewanderten Innenradiuses des Radial-DMS, zeigt Layout 6 noch einmal die drastische Verschlechterung des Messsignals aufgrund einer Verbreiterung der tangentialen Segmente an dieser Stelle der Messplatte.

Von Layout 7 bis Layout 9 wurde die Breite der tangentialen Segmente des Radial-DMS noch weiter verkleinert und der Innenradius weiter nach außen verschoben. Dadurch steigt erneut die Anzahl der Mäander von 88 auf 96. Vergleicht man Layout 7 und Layout 9, so führt diese Maßnahme jedoch zu einer Verringerung des Messsignals. Das lässt sich dadurch erklären, dass durch die Verschiebung des Innenradiuses des Radial-DMS, die radialen Segmente kürzer werden und somit der Gesamtwiderstand verkleinert wird.

Untermuert wird diese Betrachtung durch Layout 10, bei dem der Innenradius des Radial-DMS wieder in Richtung Plattenmitte verschoben wird, wodurch sich das Messsignal wieder erhöht.

Die zuletzt genannten Maßnahmen führten nicht mehr zu einer gravierenden Verbesserung des Messsignals. Deshalb wurde die Optimierung hier abgebrochen.

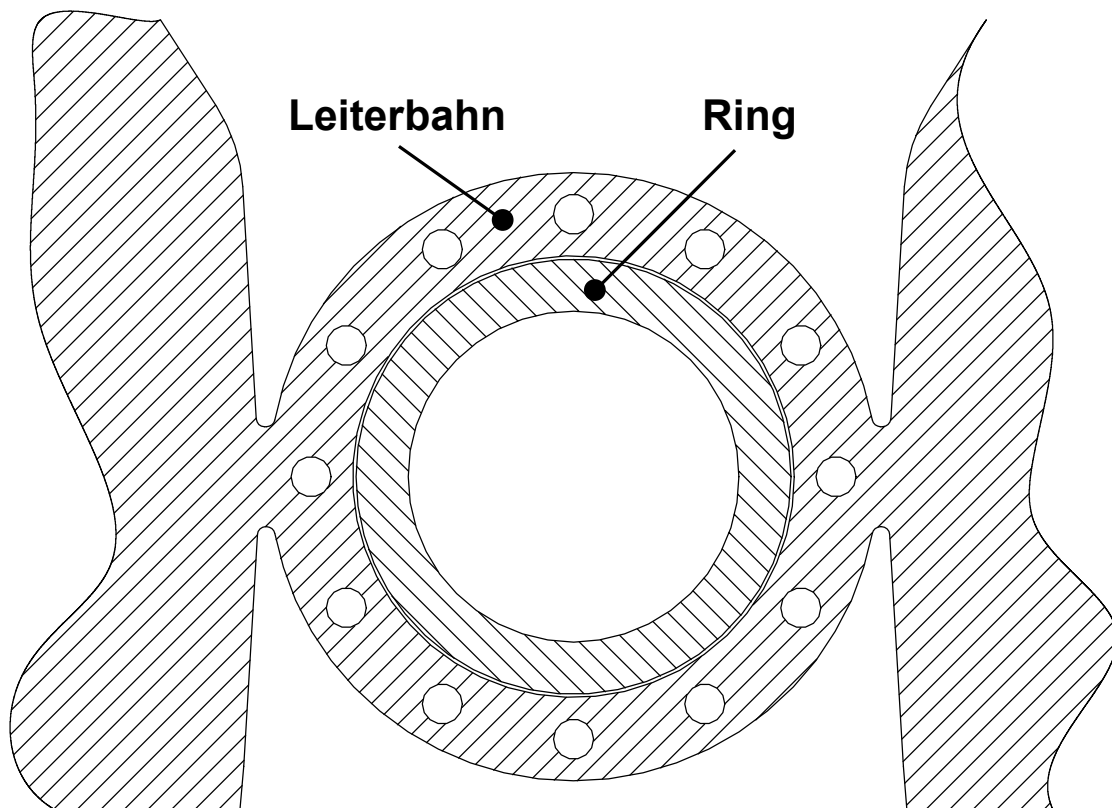
Nach Tabelle 4.1 liefert Layout 8 das größte Messsignal. Darüber hinaus wird es auch aus fertigungstechnischen Gründen bevorzugt. Die tangentialen Segmente des Radial-DMS bieten mit einer Breite von  $10\mu\text{m}$  eine zusätzliche Prozesssicherheit, was die durchgängige elektrische Leitfähigkeit des DMS betrifft. Die Gefahr einer Unterbrechung wird hier verkleinert. Der Abstand des Radial-DMS zum Spiral-DMS ist mit  $39\mu\text{m}$  am kleinsten und somit scheint ein guter Bedeckungsgrad der Leiterbahnen auf der Messplatte erreicht. Gleichzeitig ist der Abstand zwischen den Leiterbahnen des Spiral-DMS mit  $21\mu\text{m}$  ausreichend groß, so das erwartet werden kann, dass diese rückstandsfrei herausgeätzt werden können. Somit steht das Layout fest und besteht aus einem Spiral-DMS mit 11 Windungen und einem Radial-DMS mit 90 Mäandern, bzw.  $4 \times 90 = 360$  Segmenten.

### 4.3 Layout der Chrommasken

Um den in Abschnitt 3.2.1 skizzierten Herstellungsprozess zu realisieren, sind 5 Chrommasken erforderlich. Die Funktion der Strukturen der einzelnen Chrommasken und die Korrespondenz der einzelnen Prozessebenen werden in diesem Abschnitt erklärt. Aus Übersichtsgründen werden an dieser Stelle jeweils die Ausschnitte aus den Chrommasken gezeigt, die für die Gestaltung eines Drucksensors benötigt werden. Eine Gesamtübersicht der jeweiligen CAD-plots findet sich im Anhang.

Als Trägersubstrat dient ein 4“ Silizium- oder Keramikwafer, auf dem die Glassubstrate mittels Klebeband fixiert werden können. Da die 50µm dicken Glassubstrate zugekauft und nur rechteckig zugeschnitten werden können, richteten sich die äußeren Abmessungen nach der Größe des Trägersubstrats. Unter Berücksichtigung der notwendigen Fixierung wurden Glassubstrate mit einer Breite von 60 mm und einer Länge von 70 mm ausgewählt. Diese Fläche ist, nach Abzug der Überlappung des Klebebandes (ca. 5mm) der für die Strukturierung zur Verfügung stehende Platz. Das bedeutet, daß auch die zur optischen Positionierung der Chrommasken verwendeten Positionierkreuze innerhalb dieser Fläche liegen müssen. Um möglichst mehrere Drucksensoren parallel zu fertigen, wird ein Layout entworfen, das die Realisierung von 12 Drucksensoren gleichzeitig vorsieht.

➤ Chrommaske 1 - Layout und Funktion:



**Abbildung 4.12**

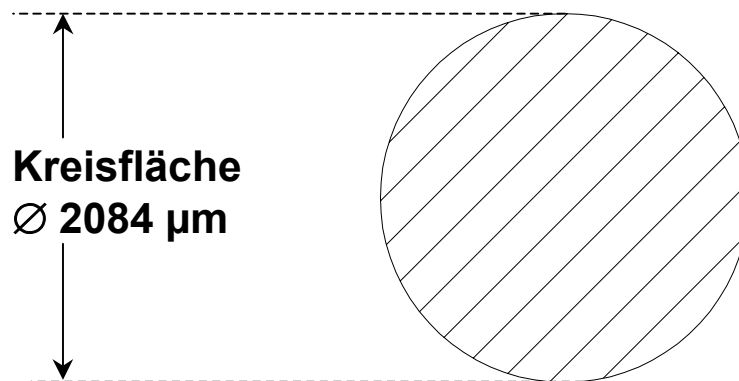
*Chrommaske 1 – Strukturierung eines Ringes und einer Leiterbahn aus Chrom*



Chrommaske 1 wird zur Strukturierung eines Ringes und einer Leiterbahn aus Chrom verwendet.

Die erste 60 nm dicke Chromschicht, die auf das Glassubstrat gesputtert wird, wird nasschemisch geätzt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Durch die fotolithografische Strukturierung eines auf der geschlossenen Chromschicht aufgeschleuderten Resists, wird die Struktur der Chrommaske übertragen. Anschließend werden die nicht durch Resist abgedeckten Bereiche durch Ätzen entfernt. Nachdem der Fotoresist entfernt wird, befindet sich eine Kopie der Chrommaske auf dem Glassubstrat. Der entstandene Ring aus Chrom dient zur Gestaltung einer chemisch inerten Sensorkammer und als Haftvermittlungsschicht zwischen Glassubstrat und Trägermembran. Die gleichzeitig strukturierte Leiterbahn aus Chrom soll eine Verschweißung der Gehäuseteile ermöglichen.

➤ Chrommaske 2 - Layout und Funktion:



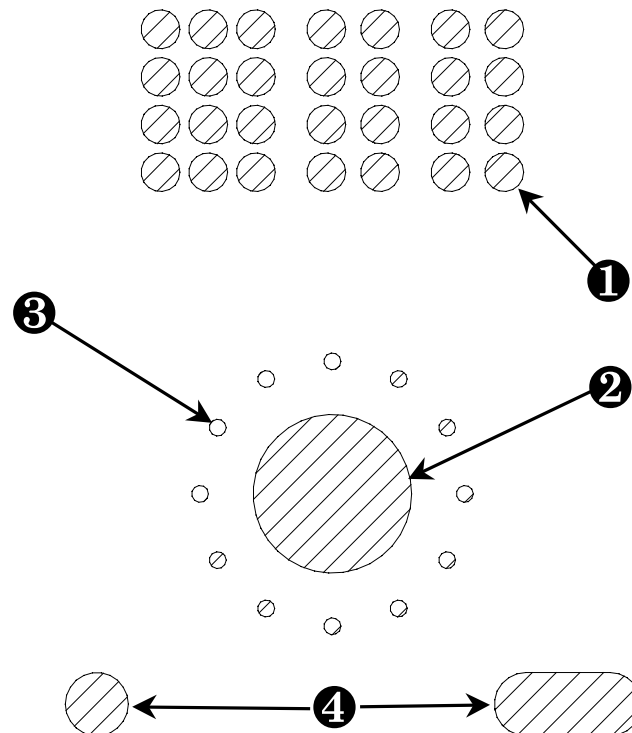
**Abbildung 4.13** Chrommaske 2 – Strukturierung einer Kreisfläche aus Chrom

Chrommaske 2 wird zur Strukturierung einer einfachen Kreisfläche aus Chrom verwendet.

Die zweite 100nm dicke Chromschicht, die auf die Rückseite des Glassubstrats aufgesputtert wird (vgl. Abschnitt 3.2.1), wird entsprechend Chrommaske 1 nasschemisch strukturiert. Sie dient als Ätzmaskierung und legt die Größe der Messplatte aus Glas im Drucksensor fest.

Der Radius der Messplatte wurde mit  $R = 1042 \mu\text{m}$  berechnet und ist bei einem Innenradius des o.g. Chromringes von  $R_i = 992 \mu\text{m}$  um  $50 \mu\text{m}$  größer. Somit entsteht für die Trägermembran ein  $50 \mu\text{m}$  breiter Haftring aus Chrom. Der äußere Radius des Chromringes wird derart dimensioniert, dass er trotz einer Dejustage der Gehäuseteile von bis zu  $50 \mu\text{m}$  zueinander, die Sensorkammer membranseitig noch inert versiegelt.

➤ Chrommaske 3 - Layout und Funktion:



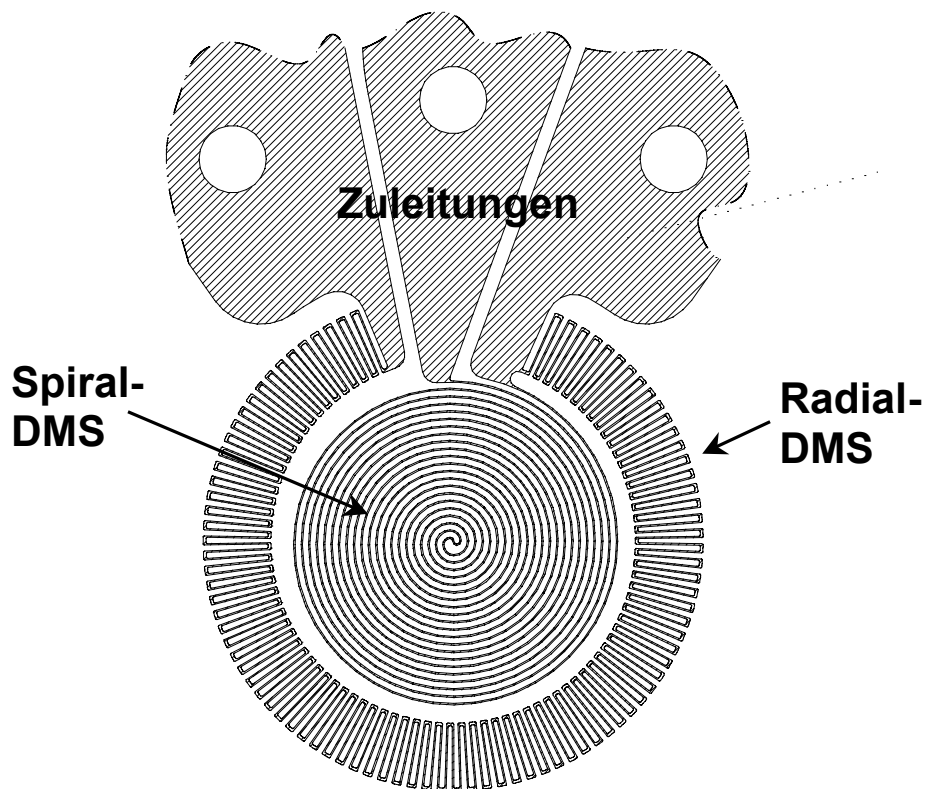
**Abbildung 4.14**

*Chrommaske 3 – Strukturierung einer Membran aus Polyimid  
An den schraffierten Bereiche entstehen Löcher in der Membran*

Chrommaske 3 wird zur Strukturierung der Trägermembran aus Polyimid, ein Negativresist, verwendet.

Die Trägermembran, die ansonsten durchgängig ist, wird unter Verwendung von Chrommaske 3 in der dargestellten Anordnung mit Löchern versehen. Die schraffierten Bereiche werden durch die Chrommaske abgedeckt und können nach der Belichtung entwickelt bzw. entfernt werden. Die belichteten Bereiche werden vernetzt und nach Tempern bei ca. 380°C verbleibt die Trägermembran aus Polyimid auf dem Glassubstrat. Die im Bereich ① dargestellten Löcher ermöglichen eine Durchführung der DMS-Zuleitungen auf die Unterseite der Membran. Das zentrisch angeordnete Loch, siehe ②, ist der Bereich, der für die Applikation der DMS vorgesehen ist. Um besonders an dieser Stelle keine Bimaterialeffekte zu erhalten, hat die Membran hier eine Unterbrechung. Der mit ③ gekennzeichnete Lochkreis soll für die Option der Gehäuseverschweißung genutzt werden können. An diesen Stellen könnte sich das aufgeschmolzene Gehäusematerial gegenseitig verbinden. Diese Löcher sind im Durchmesser 40µm kleiner, als die Löcher in der beschriebenen Leiterbahn aus Chrom, damit ein Kurzschluss der DMS-Zuleitungen vermieden wird. Im Bereich ④ sind weitere Löcher vorgesehen, durch die nach der Montage der Drucksensoren, Stifte durchgesteckt werden können. Diese Stifte könnten zur Einzeljustierung bereits vereinzelter Drucksensor-Gehäuseteile genutzt werden. Nachdem die Membran prozessiert ist, wird sie flächig mit Chrom und anschließend Gold beschichtet. Aus dieser Schicht werden die DMS herausgearbeitet.

➤ Chrommaske 4 - Layout und Funktion:



**Abbildung 4.15**

*Chrommaske 4 – Strukturierung der DMS  
aus Chrom und Gold und deren Zuleitungen*

Chrommaske 4 wird zur Strukturierung des berechneten und optimierten Layouts der DMS verwendet.

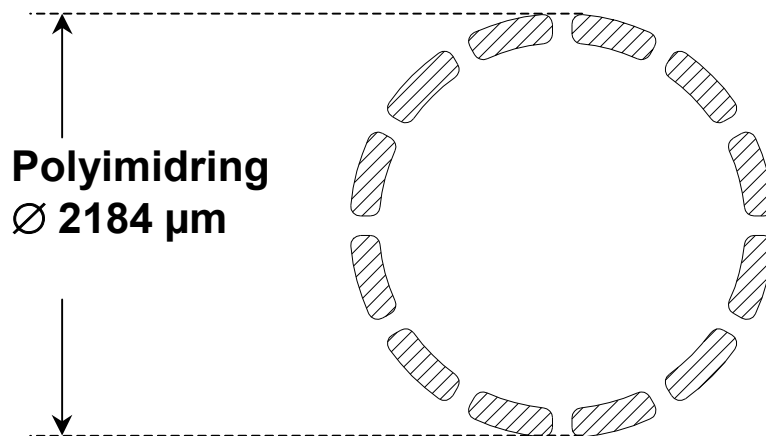
Die Zuleitungen haben jeweils ein Loch, das wiederum im Durchmesser  $40\ \mu\text{m}$  größer ist, als die darunter liegenden Löcher in der Polyimid-Membran. Die DMS entstehen durch selektives Ätzen von Gold und anschließend Chrom aus einer geschlossenen Schicht (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Der Abschluss der fotolithographischen Prozessschritte erfolgt durch Verwendung von Chrommaske 5.

➤ Chrommaske 5 - Layout und Funktion:

Chrommaske 5 wird zur Strukturierung eines Ringes aus Polyimid verwendet.

Der Ring hat mehrere Unterbrechungen, damit er weniger Spannungen in die Messplatte induziert, als es ein geschlossener verursachen würde.



**Abbildung 4.16** *Chrommaske 5 – Strukturierung eines Ringes aus Polyimid*

Der Ring aus Polyimid wird zur Lagerung der Messplatte im zweiten Gehäuseteil, das die Form eines Hohlzylinders hat, benötigt. Er wird durch Aufschleudern, optischer Lithographie und Tempern auf dem Glassubstrat aufgebaut. Dabei besteht die Möglichkeit die Höhe des Ringes, durch die Drehzahl beim Aufschleudern einzustellen. Diese Höhe kann so dimensioniert werden, daß die Durchbiegung der Messplatte bei einer gewünschten Druckdifferenz durch das Gehäuse begrenzt wird. Dadurch ließe sich ein Überlastungsschutz des Drucksensors, beispielsweise bei Druckspitzen, integrieren.

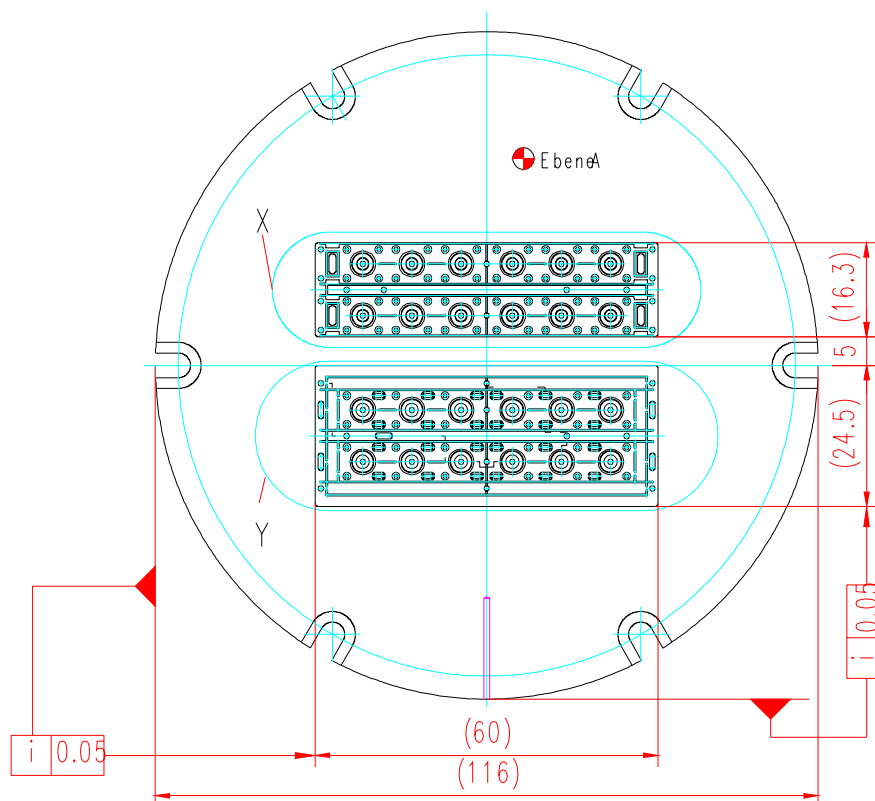
Alle gezeigten Abbildungen der Chrommasken sind untereinander nicht maßstäblich.

Die zur Prozessierung der Chrommasken notwendigen CAD-Daten wurden im IMT erstellt. Die Fertigung der Chrommasken wurde durch die Firma Photronics MZD in Dresden vorgenommen [@pho].

## 4.4 Design des Abformwerkzeuges

Parallel zur Entwicklung des Layouts der Chrommasken wurde das Design für das Abformwerkzeug erstellt.

Das Design sieht vor, mit einem Abformwerkzeug Gehäuseoberteile und -unterteile für jeweils 12 Drucksensoren gleichzeitig abzuformen. Dabei ist der in Abbildung 4.17 oben eingezeichnete Bereich X für die Gestaltung der Unterteile, bei denen die Sensorkammer die Form einer Hohlkugelschale bekommt, verantwortlich. Der Bereich Y ist für die Gestaltung der Oberteile, die eine (hohl-)zylindrische Sensorkammer erhalten, vorgesehen.



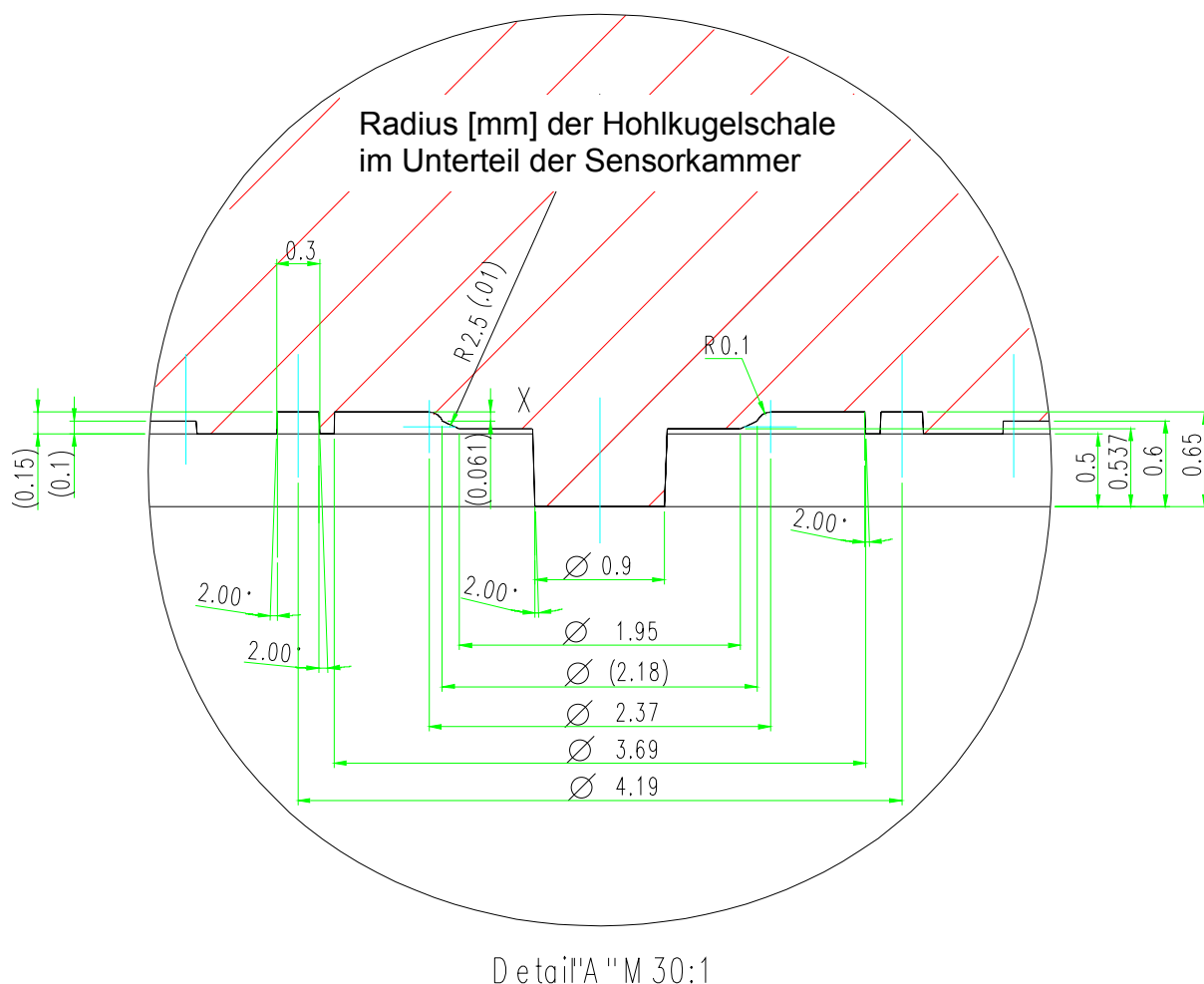
**Abbildung 4.17** CAD-Design des Abformwerkzeuges zur Herstellung der Gehäusenutzen  
- Alle Angaben in [mm] -

Durch die parallele Abformung wird erreicht, daß Ober- und Unterteil in einem Abformzyklus den selben Schrumpf erfahren und dadurch genau aufeinander passen. Die Positionierung der Gehäuseteile zueinander wird durch integrierte Pass-Stifte und entsprechende Löcher, die direkt mit abgeformt werden, erleichtert.

Bei der Erstellung des Designs wurden einige Anforderungen an die Gehäusenutzen redundant berücksichtigt. Die Gehäusenutzen erhalten sowohl ein Kammer-System, das zur Verbindung der Gehäuseteile und der Trägermembran mit Klebstoff befüllt werden kann, als auch die für eine Verschweißung notwendigen Kontaktflächen, die die Sensorkammern radialsymmetrisch umgeben. Somit können beide Verbindungsverfahren untersucht werden. Eine Positionierungshilfe besteht neben den beschriebenen Pass-Stiften für die gesamten Gehäusenutzen, zusätzlich für

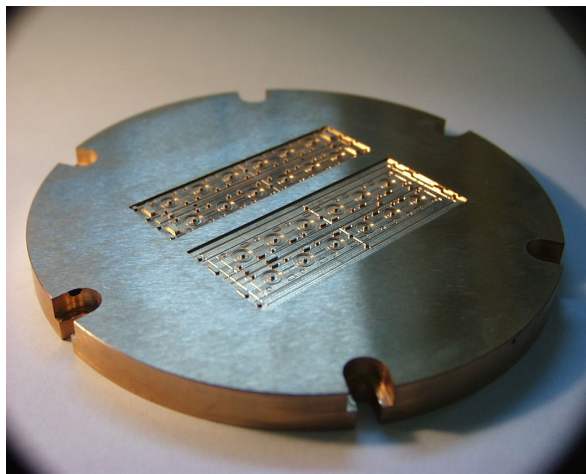
jeden Sensor einzeln. Jeder Sensor erhält im Ober- und Unterteil sich jeweils gegenüberliegende Löcher bzw. Langlöcher, durch die Stifte hindurch gesteckt werden können. Mithilfe dieser Stifte ist eine Justierung bereits vereinzelter Gehäuseteile möglich. Um langfristig auch opake Gehäusematerialien erproben zu können, werden am längeren Ende der Gehäusenutzen Durchlöcher vorgesehen, die eine optische Kontrolle des Klebstoffflusses bei undurchsichtigen Materialien, wie z.B. PEEK, ermöglichen. Ebenfalls am längeren Ende, werden durchgängige Langlöcher eingeformt durch die, die zur Verschweißung notwendige Leiterbahn aus Chrom (siehe auch Abbildung 4.12) elektrisch kontaktiert werden kann. Sollte diese Leiterbahn nicht über den gesamten Gehäusenutzen elektrisch leitend sein, so ist eine Einzelkontaktierung der Sensoren berücksichtigt. Weiterhin sieht das Design vor, jede Sensorkammer mit einer radialsymmetrischen Klebstoff-Stopfnut zu umgeben. Diese Nut befindet sich noch vor der genannten Kontaktfläche für die Verschweißung, damit in diesen Bereich kein Klebstoff eindringen kann. Im Kammersystem der Gehäusenutzen werden in die Kammerdecke Klebstoffführungen integriert, die die Kapillarwirkung und die gleichmäßige Klebstoffwanderung unterstützen sollen.

Bei der Fertigung des Abformwerkzeuges stellte sich heraus, daß eine Stelle im Werkzeug besondere technische Ansprüche an die CNC-Fräsmaschine stellt.

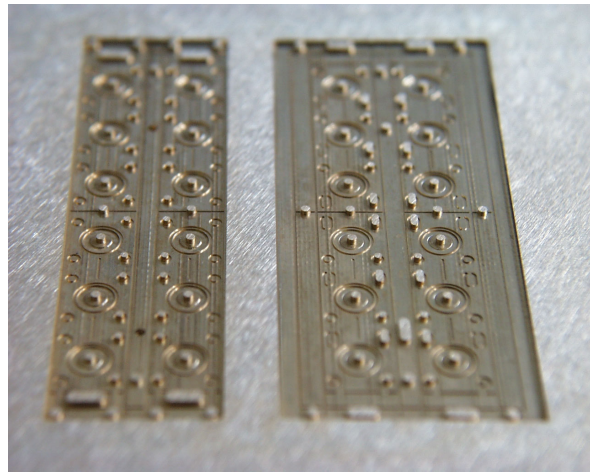


**Abbildung 4.18** Detailzeichnung aus dem Abformwerkzeug,  
Radius der Hohlkugelschale im Unterteil der Sensorkammer

Der in Abbildung 4.18 dargestellte Radius, bestimmt im abgeformten Gehäuseteil die Größe der Hohlkugelschale. Da dieser Bereich keine senkrechte Wand besitzt, musste hierfür aus den 2-dimensionalen CAD-Daten ein 3-dimensionales Modell erstellt werden. Mit einem 3-dimensionalen Modell sind entsprechend ausgerüstete CNC-Maschinen in der Lage, Freiformflächen zu fräsen. Mithilfe einer sogenannten Parameterprogrammierung stehen zur Realisierung der negativen Form der Hohlkugelschale zwei Frässtrategien zur Auswahl. Bei der ersten Strategie wird die z-Achse des Fräasers konstant gehalten und der Tisch mit dem Abformwerkzeug in x-y-Richtung bewegt. Bei der zweiten Strategie wird entweder die x- oder die y-Achse des Werkzeugtisches konstant gehalten und der Fräser entsprechend in z-y- oder z-x-Richtung verfahren. Beide Verfahren kamen bei der Realisierung des Abformwerkzeuges zu Anwendung. Nach einer anschließenden optischen Inspektion konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Obeflächengüte festgestellt werden und beide Verfahren scheinen somit tauglich.



**Abbildung 4.20** *Abformwerkzeug aus Messing für Drucksensoren*



**Abbildung 4.19** *Detailaufnahme des Abformwerkzeuges (li.: Unterteile, re.: Oberteile)*

Abbildung 4.20 zeigt das durch die Firma i-sys Automationstechnik GmbH in Karlsruhe-Hagsfeld fertigestellte Abformwerkzeug [i@isy].

## 5 Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren

Die Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren orientierte sich im wesentlichen an drei Aufgabenstellungen. Zunächst musste eine geeignete Möglichkeit zur beidseitigen Prozessierung dünner Glassubstrate erarbeitet werden. Parallel dazu stellte sich die Frage, ob sich mithilfe des konstruierten Werkzeuges die gewünschten Geometrien in Polysulfon (PSU) und Polyetheretherketon (PEEK) abformen lassen. Die Kombination der prozessierten Glassubstrate mit den abgeformten Gehäuseteilen bilden den Abschluss der Verfahrensentwicklung. Innerhalb dieses Themenkomplexes wurden die Montage und die Vereinzelung der Drucksensoren entwickelt.

### 5.1 Beidseitige Prozessierung dünner Glassubstrate

Für die von der Firma Schott Displayglas (ehem. Schott Dünnglas) zugekauften Glassubstrate musste ein Verfahren entwickelt werden, das erlaubt diese von beiden Seiten zu prozessieren. Hierbei hat sich eine sehr einfache und kostengünstige Lösung im Laborstadium durchgesetzt.

Wie in Abbildung 3.5 dargestellt, müssen die Glassubstrate auf einem Trägersubstrat (Silizium- oder Keramikwafer) fixiert werden. Die Fixierung erfolgte durch einfaches Verkleben mittels Klebeband des Glassubstratrandes mit dem Trägersubstrat. Das Einlegen eines für Reindräume (RR) geeigneten Papierses zwischen die Substrate verhinderte ein Aneinanderhaften der sehr glatten Oberflächen. Durch eine Befeuchtung des Papierses, was bei nasschemischen Prozessschritten ohnehin passiert, entsteht eine zusätzliche Adhäsionskraft, die die Fixierung unterstützt. Die Adhäsionskraft kann derart eingestellt werden, dass sie eine ausgezeichnete Planparallelität der Substrate gewährleistet, die es ermöglicht, die Glassubstrate mit einer Lackschleuder zu beschichten. Durch Trocknung bzw. einfaches Abziehen, können die Glassubstrate wieder vom Trägersubstrat gelöst werden. Nach einem Reinigungsschritt können die Glassubstrate umgedreht und entsprechend auf der Rückseite prozessiert werden.

Das Trägersubstrat kann nach einer Reinigung rezykliert werden, wodurch sich die Prozesskosten reduzieren.

#### 5.1.1 Mikrostrukturierung auf Glassubstraten

Mithilfe der beschriebenen Chrommasken wurden entsprechend Abschnitt 3.2 Glassubstrate prozessiert. Bei der Belichtung der mit Resist beschichteten Glassubstrate wird kein Trägersubstrat benötigt. Hier erwies es sich als praktikabel, die Glassubstrate, während der Belichtung mit einer Vakuumhalterung zu fixieren und darauf die Chrommaske lose aufzulegen. Bei nasschemischen Prozessschritten, wie etwa das Ätzen von Chrom, wurden die Glassubstrate wiederum zusätzlich mit Klebefolie am Rand gesichert. Durch das lange Spülen am Ende nasschemischer



Prozesse, wird die adhäsive Wirkung des feuchten RR-Papiers aufgehoben. Ohne zusätzliche Sicherung schwimmt das Glassubstrat vom Trägersubstrat.

Abbildung 5.1 zeigt prozessierte Glassubstrate in unterschiedlichen Prozessstadien.

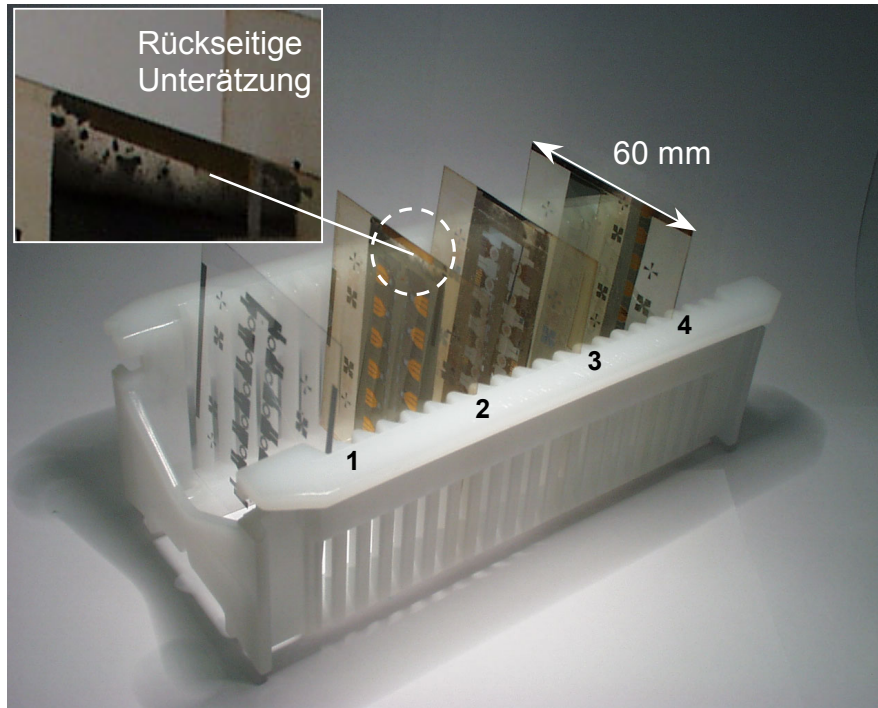


Abbildung 5.1 Prozessierte Glassubstrate in unterschiedlichen Prozessstadien

Auf Glassubstrat 1 befindet sich eine mit Chrommaske 1 strukturierte Chromschicht, (siehe auch Abbildung 4.12). Die nachfolgenden Substrate 2 bis 4 sind bereits von beiden Seiten prozessiert und haben jeweils eine Membran aus Polyimid. Auf Glassubstrat 2 sind die DMS aus Gold sichtbar.

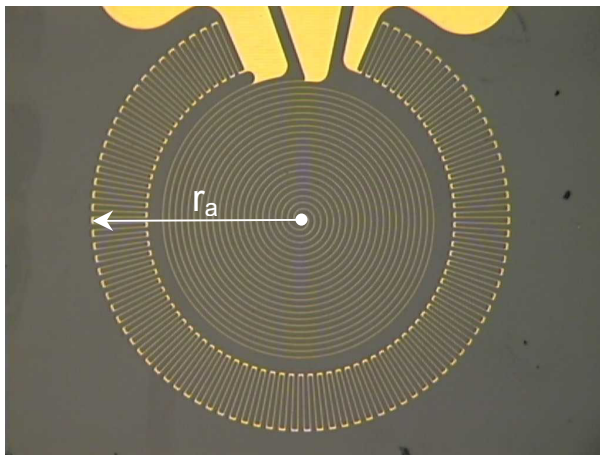
Bei der Umsetzung des in Abschnitt 3.2.1 skizzierten Herstellungsprozesses, stellte sich heraus, dass die Strukturierung der Chromschichten auf den Glassubstraten besondere Aufmerksamkeit verlangt. Da die ersten zu strukturierenden Schichten beide aus Chrom sind, kam es hierbei zu Unterätzungen auf der jeweiligen Unterseite der Glassubstrate (siehe Glassubstrat 2). Durch zügiges und ausgiebiges Spülen mit Wasser direkt nach einer Chromätzung, traten die Unterätzungen jedoch nur noch im Randbereich der Glassubstrate auf. Dieser Bereich liegt außerhalb der zu prozessierenden Fläche und somit sind die Unterätzungen unkritisch.

## 5.1.2 Strukturierung von Dehnungsmessstreifen

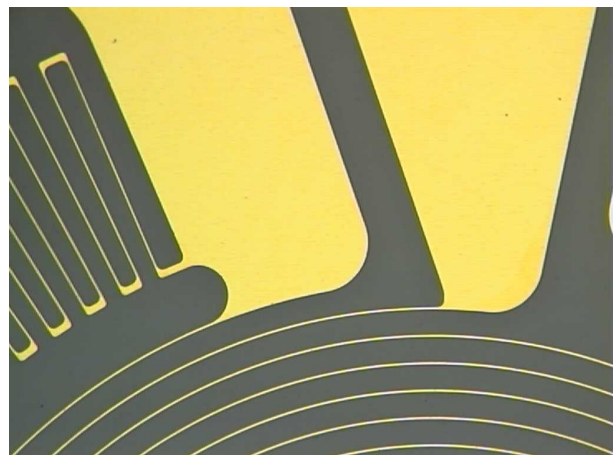
Für die Herstellung von Dehnungsmessstreifen wurden zwei unterschiedliche Strukturierungsmöglichkeiten erprobt. Zuerst wurde die fertigungstechnisch weniger aufwendige Möglichkeit der direkten Ätzung, nach erfolgter optischer Lithographie, zur Strukturierung von DMS untersucht. Anschließend wurde die Möglichkeit der Herstellung der DMS durch einen Lift-Off-Prozess ausprobiert.

### 5.1.2.1 Chrom-Gold-DMS durch direkte Ätzung

Zur Herstellung der in Abbildung 5.2 dargestellten DMS-Strukturen, wurde das



**Abbildung 5.2** *Spiral- und Radial-DMS aus Chrom und Gold auf einem Glassubstrat ( $r_a=892 \mu\text{m}$ )*



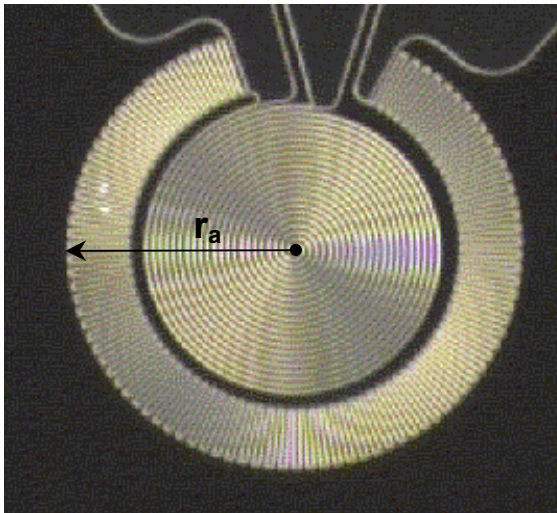
**Abbildung 5.3** *Detailaufnahme der DMS im Bereich der Zuleitungen*

Glassubstrat und die bereits strukturierte Polyimid-Membran zunächst flächig mit Chrom und Gold beschichtet. Der darauf aufgeschleuderte Fotorezist wurde derart strukturiert, dass er die geometrische Form der DMS besitzt und die gewünschte Leiterbahnstruktur abdeckt. Die nicht abgedeckten Flächen können dann durch direkte nasschemische Ätzung entfernt werden. Nachdem der Fotorezist ebenfalls weggelöst wird, verbleiben die DMS aus Chrom und Gold auf dem Glassubstrat, deren Zuleitungen auf der Membran. Bei diesem Verfahren kommt es jedoch zu Unterätzungen des Fotorezists. Dadurch werden die Leiterbahnen schmaler, als es die Chrommaske vorgibt. Die nominelle Leiterbahnbreite des Spiral-DMS und der radialen Segmente des Radial-DMS beträgt auf der Chrommaske  $5 \mu\text{m}$ . Durch die Unterätzungen wird diese Breite in den realen DMS-Strukturen auf bis zu  $3 \mu\text{m}$  reduziert. Dieser erhebliche Strukturschwund von bis zu  $2 \mu\text{m}$  hat jedoch den positiven Effekt, den elektrischen Widerstand der DMS zu erhöhen, woraus ein größeres Messsignal resultiert. Die Tatsache, dass diese Unterätzungen nicht homogen sind, führt dazu, dass die elektrischen Widerstände der DMS untereinander unterschiedlich groß sind. Die unterschiedlichen Widerstände müssen bei der Auslegung der Messelektronik berücksichtigt werden.

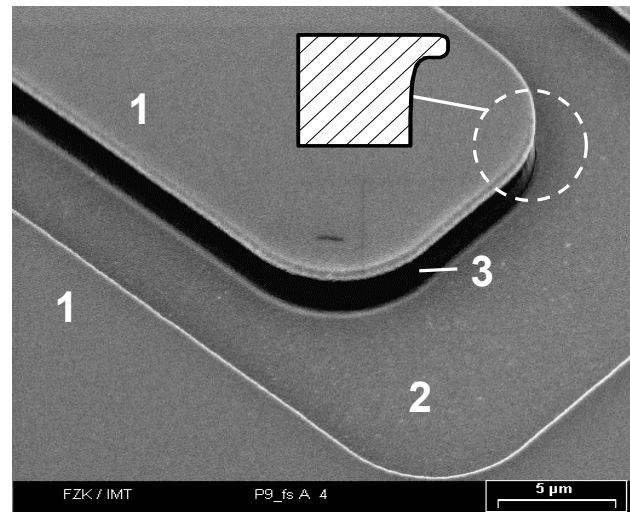
Eine Möglichkeit die Widerstandsdifferenzen zu minimieren, bietet ein Lift-Off-Prozess.

### 5.1.2.2 Platin-DMS durch Lift-Off-Prozess

Bei einem Lift-Off-Prozess wird zuerst ein Resist strukturiert und anschließend erst mit der gewünschten Beschichtung versehen.



**Abbildung 5.5** Durch Lift-Off-Prozess hergestellte DMS aus Platin ( $r_a=892 \mu\text{m}$ )



**Abbildung 5.4** „T“-förmige Resiststruktur für Lift-Off-Prozess

Bei dem in Abbildung 5.4 verwendeten Fotoresist wird eine „T“-förmige Struktur hergestellt [Clar99]. Bei einer anschließend senkrecht zum Substrat gerichteten Metallbeschichtung wird hauptsächlich die Resistoberfläche (siehe 1) und der Strukturgrund (siehe 2) metallisiert. Die senkrechte schwarze Strukturwand (siehe 3) liegt von oben gesehen im Schatten der T-Struktur und wird dadurch idealerweise nicht beschichtet. Dieser Bereich ist somit nicht durch die Metallisierung gegen ein Lösungsmittel des Resists (Remover) geschützt. Wird der Resist weggelöst, verbleibt lediglich die Metallschicht im Strukturgrund auf dem Substrat.

Die auf diese Art hergestellten DMS aus Platin, sind in Abbildung 5.5 zu sehen.

Bei einer optischen Inspektion der realen DMS aus Platin wurde ein Strukturschwund von 300 nm beobachtet [Rumm01]. Die von der Chrommaske vorgegebene Leiterbahnbreite von 5  $\mu\text{m}$  wurde in den realen DMS somit nur auf 4,7  $\mu\text{m}$  verkleinert.

Vergleicht man den Lift-Off-Prozess mit der Möglichkeit die DMS durch direkte Ätzung herzustellen, so findet man für das Lift-Off-Verfahren eine deutlich bessere Strukturtreue. Diese verbesserte Strukturtreue geschieht jedoch auf Kosten eines höheren fertigungstechnischen Aufwandes und muss im Hinblick auf eine betriebswirtschaftliche Prozessauslegung entsprechend kalkuliert werden.

## 5.2 Abformung der Gehäuseteile durch Heißprägen

Parallel zur Prozessierung der Glassubstrate, wurden die Drucksensor-Gehäusenutzen durch Heißprägen hergestellt. Bei der Abformung der Gehäuseteile kamen zwei unterschiedliche Materialien zur Anwendung. Während bereits eine Vielzahl von AMANDA-Komponenten in Polysulfon (PSU) realisiert wurden [Scho97], wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass die gleichen Funktionsstrukturen auch in Polyetheretherketon (PEEK) abgeformt werden können. Die parallele Abformung von Gehäuseober- und Gehäuseunterteilen in einem Abformwerkzeug stellte dabei sicher, dass die Teile trotz Schwankungen des Schrumpfes von Abformung zu Abformung immer gut aufeinander passten.

### 5.2.1 Gehäuseteile aus Polysulfon (PSU) und Polyetheretherketon (PEEK)

Polysulfone sind amorphe Thermoplaste und weisen im ungefüllten Zustand eine hohe Transparenz auf [Ober98]. Diese Transparenz ermöglicht während der Verklebung der Gehäuseteile eine optische Kontrolle, siehe auch Abschnitt 5.3.1. Aus der Fülle der charakteristischen Eigenschaften von PSU, werden hier einige genannt, die dieses Material besonders auszeichnen.

#### ➤ Eigenschaften von PSU

- PSU hat eine hohe Härte und Festigkeit
- Zeigt gutes Zeitstandverhalten
- Hohe Wärmeformbeständigkeit (bis 150°C)
- Geringe Wasseraufnahme
- PSU ist beständig gegen Säuren, Laugen, Benzine, Fette, Öle, Detergentien, Salzlösungen
- PSU ist nicht beständig gegen Wasser bei höheren Temperaturen, Ketone, polare organische Lösungsmittel, aromatische und chlorierte Kohlenwasserstoffe

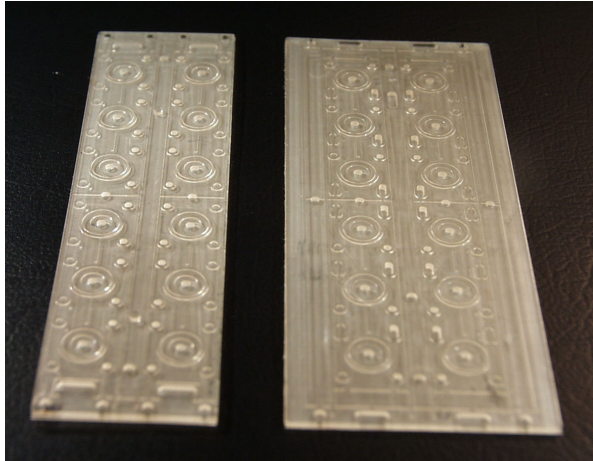
Polyetheretherketone sind hochtemperaturbeständige, teilkristalline Thermoplaste [Schw90]. Die Farbe ist uneingefärbt braun. PEEK hat ein sehr hohes Eigenschaftsniveau und wird u.a. für hochwertige und mechanisch hochbelastete Bauteile eingesetzt. Einige dieser hervorragenden Eigenschaften machen diesen Werkstoff auch besonders für die Mikrosystemtechnik interessant.

#### ➤ Eigenschaften von PEEK

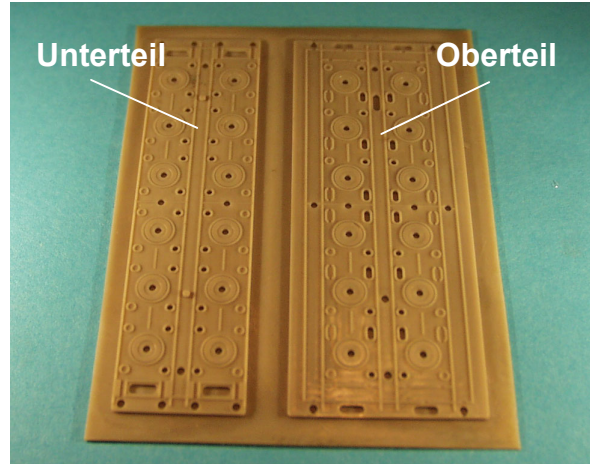
- Hohe Zug- und Biegefestigkeit
- Hohe Schlagzähigkeit
- Hohe Wechselfestigkeit
- Hohe Wärmeformbeständigkeit (bis 315°C)
- Günstiges Gleit- und Verschleißverhalten
- Sehr hohe Chemikalienbeständigkeit
- Lediglich nicht beständig gegen konz. Schwefelsäure, stark saure Medien, Abbau durch Salpetersäure und halogen. Kohlenwasserstoffe



Die folgenden Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigen die unter Verwendung des beschriebenen Abformwerkzeuges hergestellten Gehäusenutzen.



**Abbildung 5.6** *Vereinzelte Drucksensor-Gehäusenutzen aus PSU*



**Abbildung 5.7** *Durch parallele Abformung hergestellte Gehäusenutzen aus PEEK*

Das hohe Eigenschaftsniveau von PEEK spiegelt sich in der technisch aufwendigeren Abformung gegenüber PSU wider. Bei den Abformversuchen stellte sich heraus, dass das Abformwerkzeug sehr gleichmäßig und exakt temperiert werden muss, um Mikrostrukturen aus PEEK Heißprägen zu können. Da die Abformungen unter Vakuum durchgeführt werden, muss der Rezipient abgedichtet werden. Zur Zeit gibt es jedoch keine langzeitstabilen Dichtungen, die bei den Umformtemperaturen, die für PEEK notwendig sind, in der bestehenden Anlage eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wurde ein Werkzeug entwickelt, das in die Anlage innerhalb des Vakuumrezipienten platziert werden konnte. In dieses Werkzeug wurden Heizpatronen integriert, die die hohen Temperaturen lokal und schnell erreichen. Durch die örtliche Trennung des neu integrierten Werkzeuges zu den Dichtungen der Abformmaschine, entsteht ein Temperaturgefälle, so daß die Dichtungen nicht überbeansprucht werden müssen. Nachdem die Abformparameter eingestellt waren, konnten die PEEK-Gehäuseteile reproduzierbar hergestellt werden.

### **5.3 Montage und Vereinzelung der Drucksensoren**

Die Montage der Drucksensoren beginnt mit der Verklebung eines prozessierten Glassubstrates und dem ersten Gehäusenutzen. Nach erfolgter Ätzung der Messplatten aus Glas, wird der zweite Gehäusenutzen verklebt. Vor der Vereinzelung der Drucksensoren, werden sie elektrisch und fluidisch kontaktiert.

#### **5.3.1 Verkleben von Gehäusenutzen und prozessiertem Glassubstrat**

Ein fertig prozessiertes Glassubstrat wird anschließend mit dem ersten abgeformten Gehäusenutzen (Oberteil) verklebt.

Mit der am IMT entwickelten Kammerklebetechnik ist es möglich, mit der entsprechenden Verklebeapparatur, den ersten Gehäusenutzen optisch positioniert zu verkleben [Maas 96].



Abbildung 5.9 Verklebeapparatur im IMT

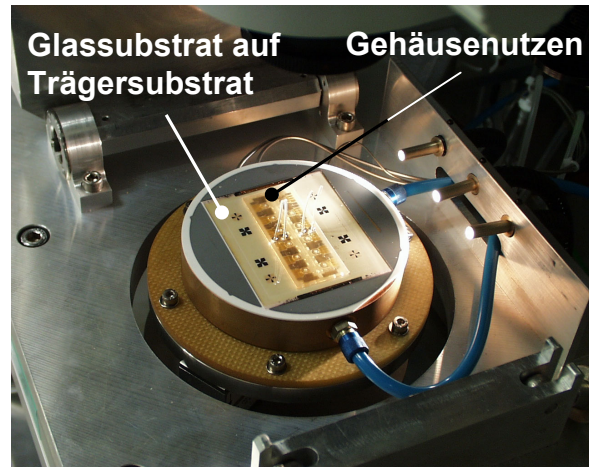


Abbildung 5.8 Detailaufnahme Verklebeapparatur

Bei der Verklebung muss darauf geachtet werden, dass sehr sauber gearbeitet wird. Zunächst wird der Gehäusenutzen optisch über dem prozessierten Glassubstrat positioniert. Anschließend wird das Substrat gegen den Gehäusenutzen gepresst. Hierbei ist zu beachten, dass bereits kleinste Verunreinigungen zwischen Trägersubstrat und Glassubstrat, das Glassubstrat beschädigen können. Ein kleiner Riss breitet sich meist muschelförmig aus. Ist der Gehäusenutzen mit der eingestellten Anpresskraft in der gewünschten Position, kann der Klebstoff in die Kammern eingespritzt werden.

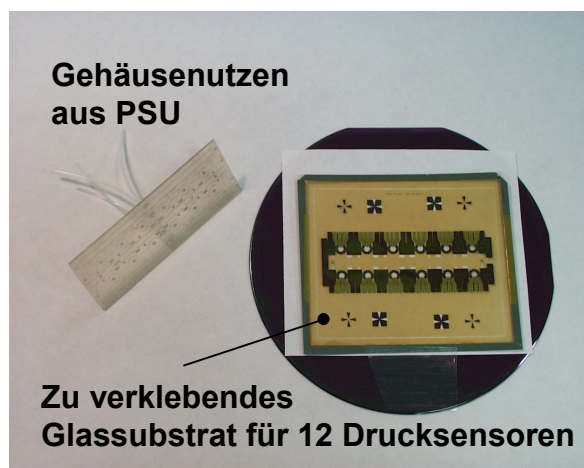


Abbildung 5.10 Erster Drucksensor-Gehäusenutzen und prozessiertes Glassubstrat



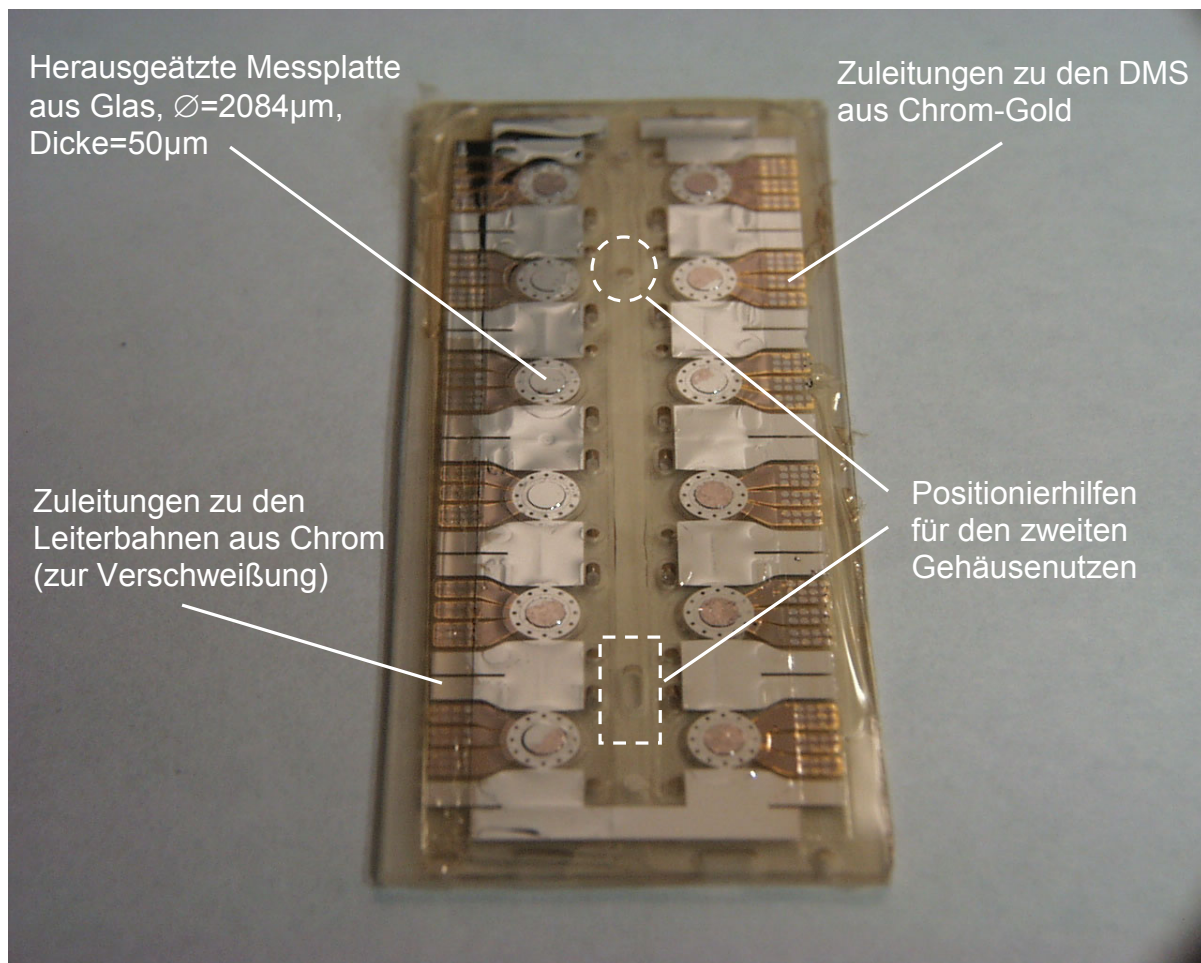
Abbildung 5.11 Verklebtes Glassubstrat mit Gehäusenutzen

Nachdem der Klebstoff ausgehärtet ist, werden die Schläuche, durch die der Klebstoff eingebracht wurde, wieder entfernt.



### 5.3.2 Ätzen der Messplatten aus Glas

Der Gehäusenutzen auf dem Glassubstrat (siehe Abbildung 5.11) wird anschließend mit Klebefolie zugeklebt, um ein Eindringen von Fluss-Säure in den Nutzen zu vermeiden. Da das Glassubstrat in diesem Stadium des Prozesses bereits von der anderen Seite bearbeitet wurde, kann es direkt in Fluss-Säure eingelegt werden. Während dieses Prozessschrittes wird der Großteil des Glassubstrates weggeätzt, nur die maskierten Bereiche bleiben erhalten. Diese maskierten Bereiche bestimmen die Größe der Messplatte im Drucksensor. Die nachfolgende Abbildung 5.12 zeigt einen Gehäusenutzen nach der Ätzung.

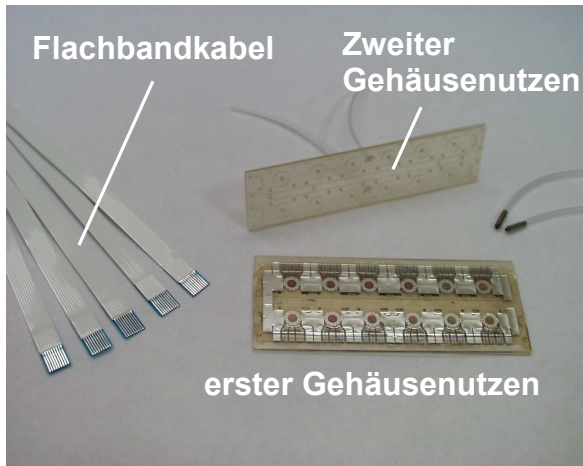


**Abbildung 5.12** Verklebter Drucksensor-Gehäusenutzen nach erfolgter Fluss-Säure-Ätzung

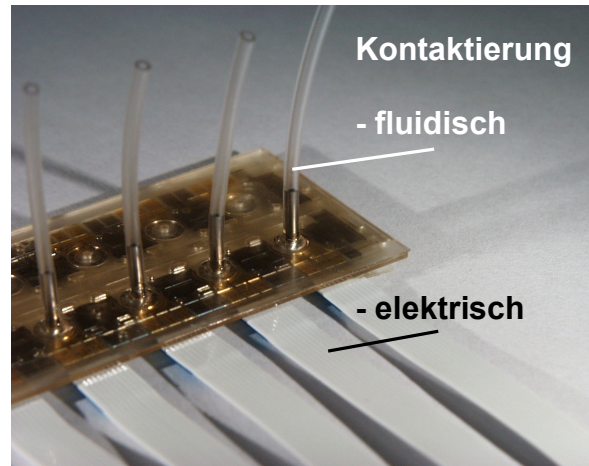
Die ersten Verklebungen wurden mit einem 2-Komponenten-Epoxydharzkleber durchgeführt. Dieser zeigte in Fluss-Säure unerwartete Ablösungserscheinungen nach ca. 30 Minuten. Die gesamte Ätzdauer beträgt jedoch, je nach Glassubstratdicke, bis zu 80 Minuten. So mussten alternative Klebstoffe ausprobiert werden. Erfolgreiche Versuche wurden mit einem UV-härtenden Klebstoff durchgeführt. Durch die UV-Aushärtung ist dies eine sehr gut zu kontrollierende und schnelle Verbindungstechnik.

### 5.3.3 Zweite Gehäuseverklebung und Konfektionierung der Drucksensoren

Nachdem die Messplatten aus Glas herausgeätzt sind, kann der zweite Gehäusenutzen verklebt werden. Dies geschieht ebenfalls in der gezeigten Verklebeapparatur (s.auch Abbildung 5.9). Bei der zweiten Verklebung kann auf eine optische Positionierung verzichtet werden, da hier nur die Positionierhilfen (Stifte) des Unterteils in die Löcher des Oberteils eingesteckt werden müssen. Die zweite Verklebung ist dadurch deutlich schneller abgeschlossen, als die erste.



**Abbildung 5.14** *Zweite Verklebung und Konfektionierung der Drucksensoren*



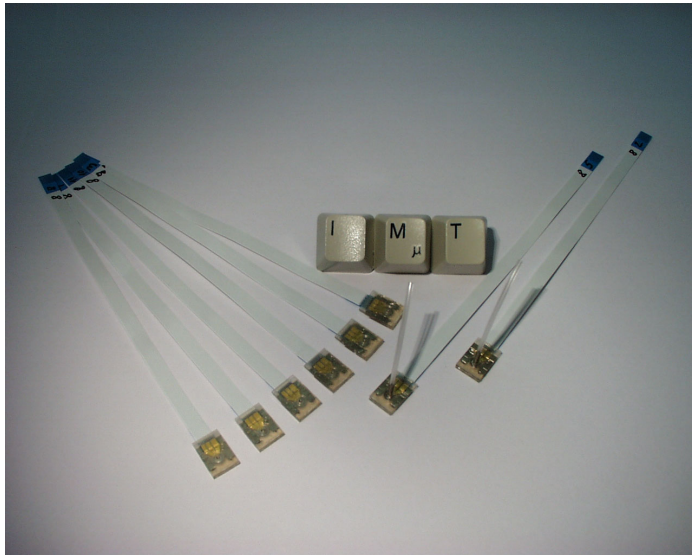
**Abbildung 5.13** *Elektrisch und fluidisch kontaktierte Drucksensoren im Nutzen*

Die Drucksensoren können mit Flachbandkabeln elektrisch kontaktiert werden. Durch Heißsiegelbonds wird eine anisotrop elektrisch leitende Verklebung zwischen den Zuleitungen der Drucksensoren und dem Flachbandkabel erreicht. In diesem Stadium können die Drucksensoren erstmalig auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht werden.

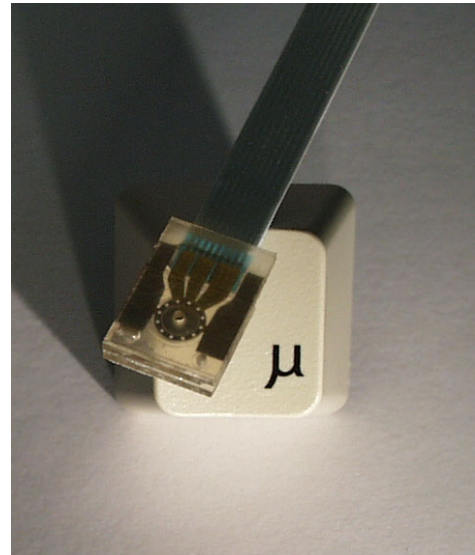


### 5.3.4 Vereinzelung der Drucksensoren

Der Abschluss der Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren ist mit der Vereinzelung der Drucksensoren erreicht. Die Drucksensoren können mithilfe einer einfachen Tischkreissäge mit einem 300 $\mu$ m dicken Sägeblatt vereinzelte werden. Sie werden zwischen den Zuleitungen der Leiterbahnen aus Chrom (s.auch Abbildung 5.12) zersägt. Dieser Bereich ist so dimensioniert, dass die Drucksensoren nicht beschädigt werden.



**Abbildung 5.16** *Durch Zersägen vereinzelte Drucksensoren*



**Abbildung 5.15** *Vereinzelter Drucksensor im Größenvergleich mit einer PC-Taste*

## 6 Test der Drucksensoren

Um die Drucksensoren zu charakterisieren wurde ein Messaufbau erstellt, der sowohl Unter- als auch Überdruckmessungen ermöglicht. Die Drucksensoren wurden mit Differenzdrücken belastet und ihre Kennlinien aufgenommen.

### 6.1 Messaufbau

Zur Aufnahme der Kennlinien der Drucksensoren wurde der in Abbildung 6.1 gezeigte Messaufbau realisiert.

Die Drucksensoren werden über einen ihrer beiden fluidischen Anschlüsse mit dem Messaufbau verbunden, sodass auf dieser Seite der Messplatte im Sensor sowohl Unter- als auch Überdrücke gegenüber dem zur Umgebung hin offenen anderen fluidischen Anschluss erzeugt werden können. Die Differenzdrücke sind einstellbar und können an einer Druckmessdose, die parallel zum zu kalibrierenden Drucksensor geschaltet ist, abgelesen werden. Unter Berücksichtigung paralaxer Messungenauigkeiten im Bereich von 1 hPa, liefert die Druckmessdose vertrauenswürdige Referenzwerte, bei Aufnahme von Kalibrierdaten, die aus technischen Gründen nur ab mindestens 10 hPa Druckdifferenz aufgenommen werden konnten.

Die Dehnungsmessstreifen der Drucksensoren sind in der gezeigten Anordnung als Halbbrücke verschaltet. Wie bereits in Abschnitt 5.1.2.1 erklärt, sind die elektrischen Widerstände der DMS untereinander nicht gleich groß. Aus diesem Grund sind die beiden „passiven“ Widerstände der Messbrücke von 1 bis 20 k $\Omega$  regelbar. Mithilfe dieser Widerstände kann die Messbrücke abgeglichen werden, so daß bei einem Differenzdruck von  $\Delta p=0$  kein Messsignal gemessen wird.

Messungen im Viertelbrückenbetrieb sind ebenfalls möglich, um den Radial- bzw. Spiral-DMS separat voneinander charakterisieren zu können. Bei diesen Messungen wurde der nicht zu charakterisierende DMS durch einen passiven, fixen Widerstand ersetzt.

Die zur Aufnahme der Kennlinien benötigte Elektronik wurde in Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) des Forschungszentrums realisiert.

### 6.1.1 Ersatzschaltbild und Brückenschaltung

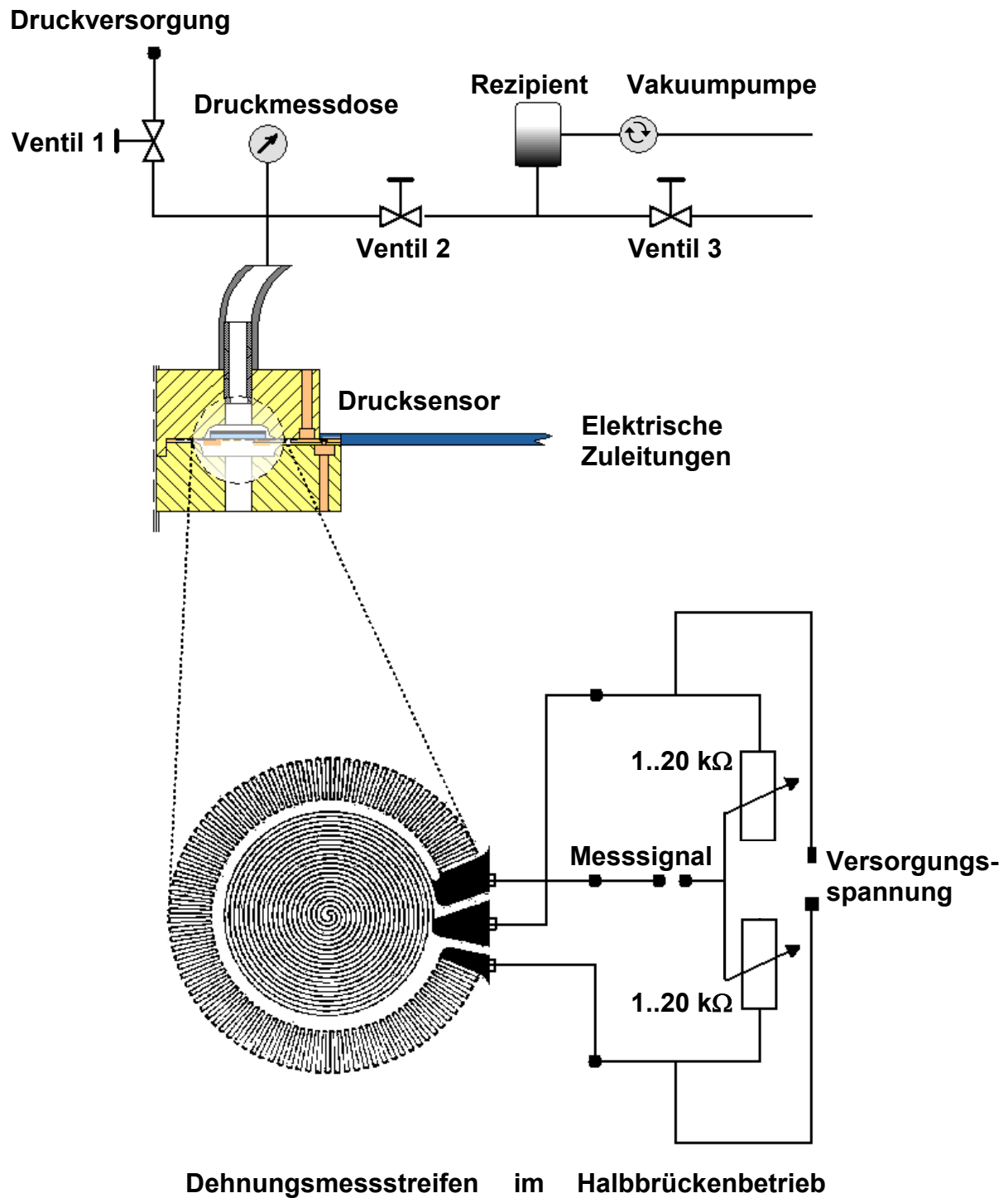
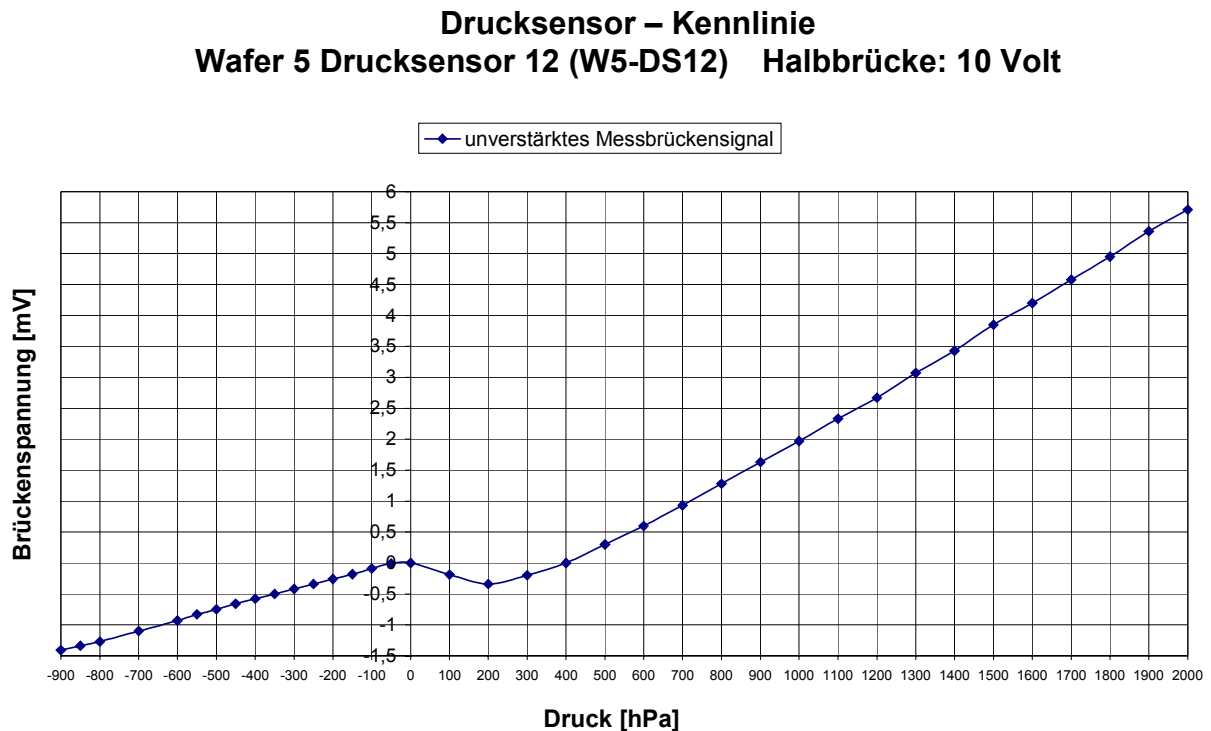


Abbildung 6.1 Ersatzschaltbild für Drucksensor-Kalibrierung

## 6.2 Kennlinienaufnahme und Diskussion

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Kennlinien unterschiedlicher Drucksensoren, die mit unterschiedlichen Messanordnungen (Halb- bzw. Viertelbrücken) und Messbereichen aufgenommen wurden. Anhand der Gesamtheit der Kennlinien, lässt sich das Potential dieses Drucksensorkonzeptes diskutieren.

Die folgende Abbildung 6.2 zeigt die Kennlinie eines Drucksensors, die bei einer Versorgungsspannung der Halbbrücke von 10 V aufgenommen wurde.

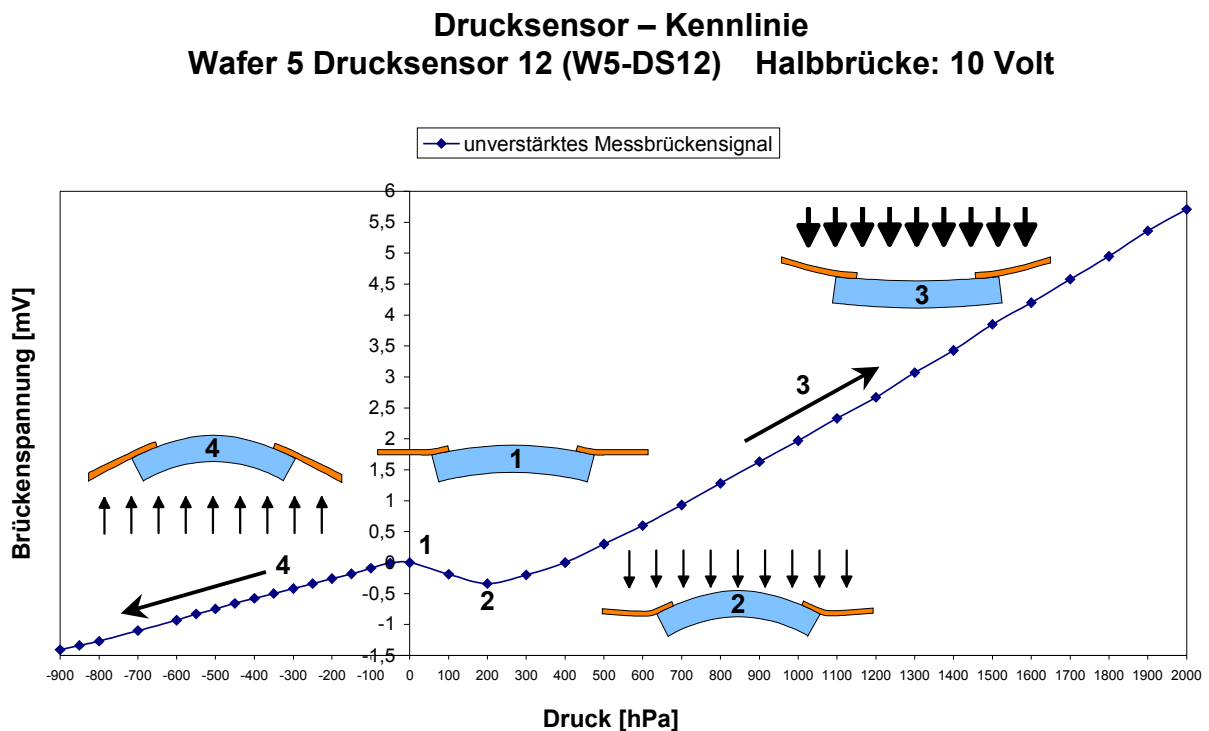


**Abbildung 6.2** Kennlinie eines Drucksensors (Bezeichnung W5-DS12)

Die Kennlinienaufnahme erfolgte kontinuierlich beginnend bei Unterdrücken bis zu einem Überdruck von  $\Delta p = 2000$  hPa. Das maximale, unverstärkte Brückenausgangssignal beträgt bei 2 bar 5,71 mV.

Der Kennlinienverlauf zeigt ein „Knie“ nach dem Nulldurchgang in Richtung positiver Differenzdrücke. Die Ursache dafür könnte der Zustand der Trägermembran im Sensor sein. Der Einfluss der Membran auf die Messung ist wahrscheinlich noch zu groß, da diese noch nicht schlaff ist.

Die nachfolgende Abbildung 6.3 zeigt noch einmal die selbe Kennlinie mit schematischen Darstellungen der Krümmungen von Trägermembran und Messplatte während der Messung, die dieses „Knie“ erklären würden.

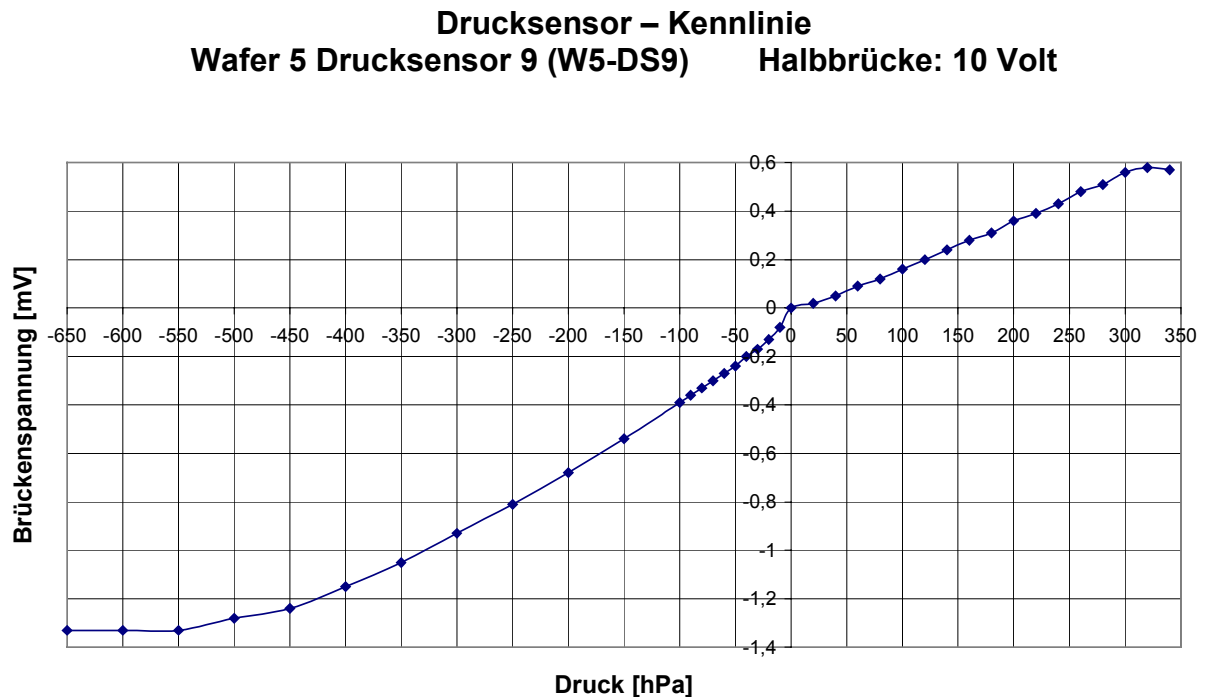


**Abbildung 6.3** Kennlinie eines Drucksensors mit möglichen Zuständen der Trägermembran und der Messplatte, während der Messung

In Abbildung 6.3 ist zu sehen, dass die Trägermembran in Position 1 unter Zugspannung steht und folglich in die Messplatte ein Drehmoment induziert. In diesem Zustand wird die Messbrückenschaltung abgeglichen. Bei Messungen bei Unterdrücken wird die Messplatte in der eingezeichneten Art, in Richtung ihrer Vorwölbung ausgelenkt. In Folge dessen erfahren die DMS auf der Messplatte ohne Vorzeichenwechsel größer werdende Dehnungen. Die Messbrücke ergibt den gezeigten Spannungsverlauf in Richtung 4. Bei einer Druckbeaufschlagung der Messplatte von 0 bis 200 hPa wird das Messsignal zunächst durch die Membran dominant bestimmt. Durch die Belastung auf die Trägermembran wird das in die Messplatte induzierte Drehmoment größer als in Position 1 und die Krümmung der Messplatte nimmt weiter zu, sodass das Messsignal abnimmt. Wird der Druck weiter gesteigert, beginnt sich die Messplatte in die andere Richtung durchzubiegen und die gedehnten DMS werden entlastet, bevor sie kontinuierlich größer werdende Stauchungen erfahren. Das erklärt den Vorzeichenwechsel der Messbrückenspannung in diesem Bereich. Der Vorzeichenwechsel war bei dieser Messung bei ca. 400 hPa zu beobachten. Die größer werdenden Stauchungen verursachen das gezeigte Brückenausgangssignal in Richtung 3. Das „Knie“ in der Kennlinie zeigt, dass bei dieser Messung die Vorspannung der Membran einen wesentlichen Einfluss auf das Messsignal hatte.

Die Kennlinie zeigt aber auch, dass der realisierte Sensor den in Anlehnung an industrielle Anforderungen spezifizierten Messbereich erfassen kann, siehe auch Abschnitt 2.1.3.

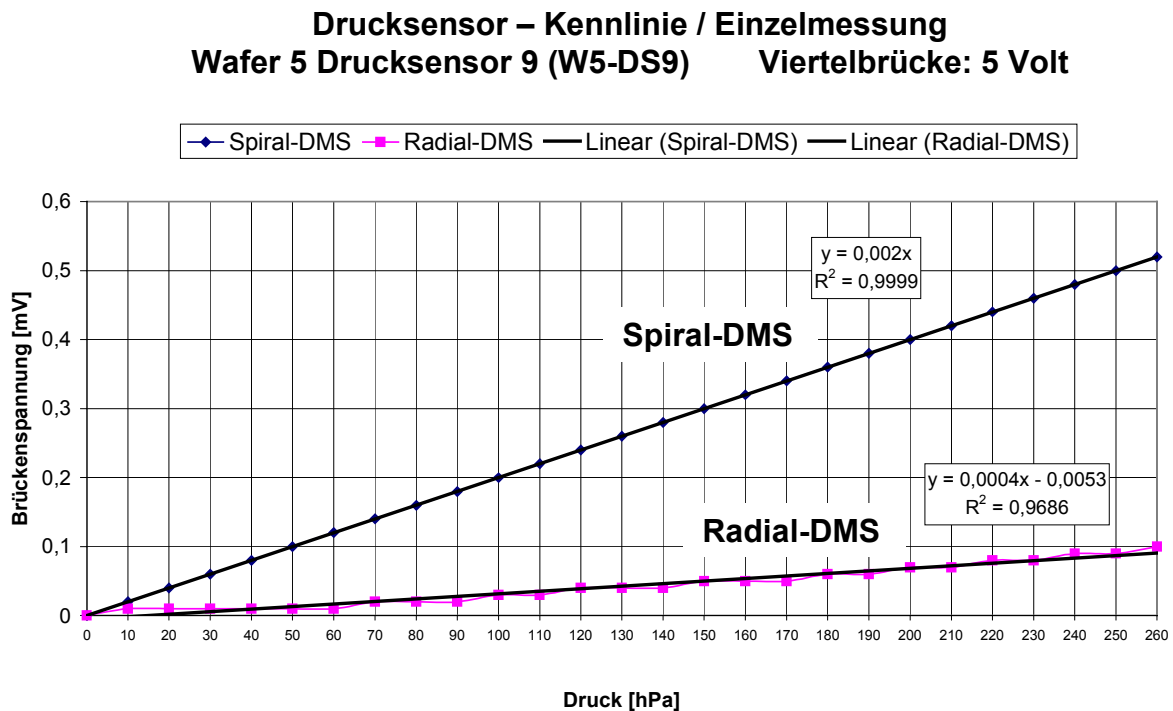
Bei anderen Drucksensoren wurde das „Knie“ in der Kennlinie nicht beobachtet, jedoch konnten diese nicht den gesamten geplanten Messbereich erfassen.



**Abbildung 6.4** Kennlinie eines Drucksensors (Bezeichnung W5-DS9)

Der Grund für den eingengten Messbereich, kann die Lage der Messplatte im Gehäuse sein. Die ursprüngliche Planung sah vor, die Drucksensoren bei Temperaturen um 65°C bis 100°C zu verkleben, siehe auch Abschnitt 5.3.2. Dadurch würde sich der Gehäusenutzen ausdehnen und die Sensorplatten erhalten im Gehäuse die berechnete zentrierte Lage. Durch die beschriebenen, unerwarteten Haftungsprobleme des verwendeten Klebstoffes während des Prozesses, wurde dann mit einem UV-härtenden Kleber kalt verklebt.

Von besonderem Interesse war auch die separate Messung des Radial- bzw. Spiral-DMS. Die folgende Abbildung 6.5 zeigt die Einzelmessungen dieses Drucksensors. Der jeweils nicht gemessene DMS wurde durch entsprechenden festen Widerstand in der Messbrücke ersetzt. Die Messungen wurden bei einer Brückenversorgungsspannung von 5 V durchgeführt.



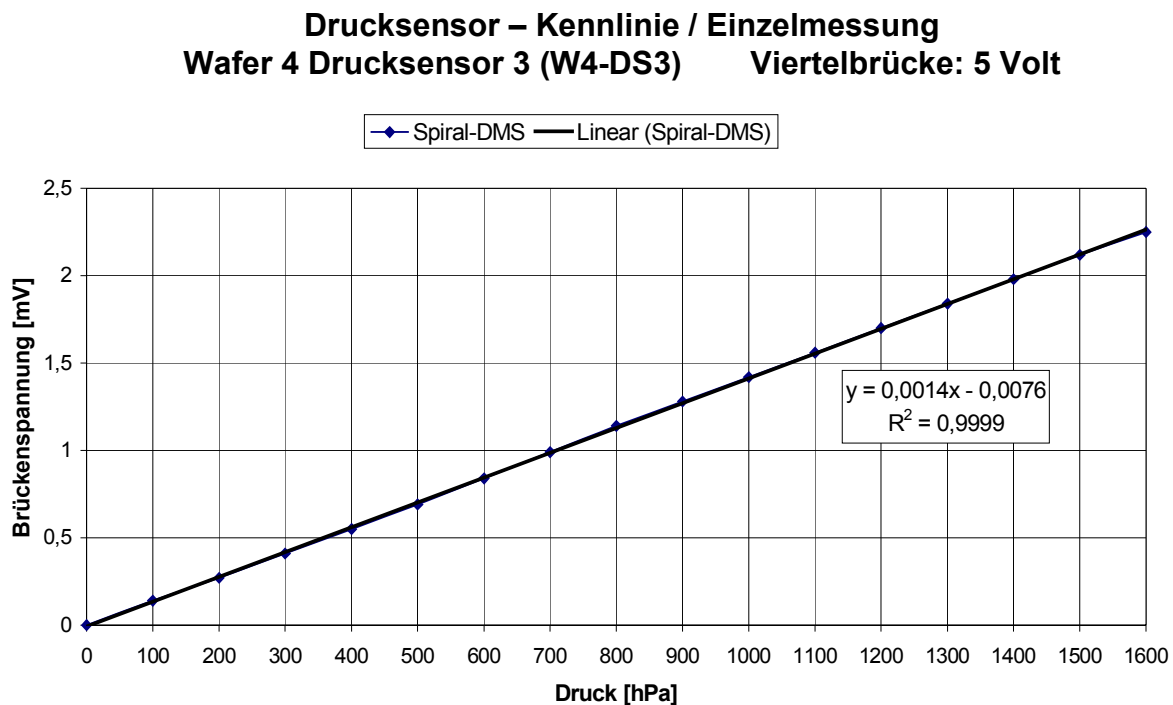
**Abbildung 6.5** Einzelmessung der Radial- und Spiral DMS (Bezeichnung W5-DS9)

Die Kennlinien der einzelnen DMS verdeutlichen sehr anschaulich, welche unterschiedlichen Widerstandsänderungen die DMS erfahren.

Dies bestätigt die Vorüberlegungen und die Berechnungen des Layouts der DMS. Die Widerstandsänderung des Radial-DMS ist wesentlich geringer, als die des Spiral-DMS. Die geringe positive Widerstandsänderung des Radial-DMS verringert das Messsignal des Drucksensors nur unwesentlich. Folglich wird das Messsignal des Drucksensors maßgeblich vom Spiral-DMS bestimmt.

Trotz der einfachen Elektronik wurde eine Druckdifferenz von 10 hPa zuverlässig registriert. Aufgrund der ersichtlichen Steigung der Kennlinie des Spiral-DMS kann davon ausgegangen werden, daß mit einer entsprechend sensiblen Elektronik die Empfindlichkeit des Drucksensors noch besser erfasst werden kann.

Abschließend zeigt Abbildung 6.6 eine Kennlinie einer Einzelmessung eines Spiral-DMS, die die erreichte Linearität des Messsignals bis 1,6 bar dokumentiert.



**Abbildung 6.6** Einzelmessung eines Spiral-DMS in einer Viertelbrücke (Bezeichnung W4-DS3)

Der errechnete Korrelationskoeffizient liegt mit  $R^2 = 0,9999$  sehr nahe bei 1 und verdeutlicht einen ausgezeichneten linearen Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Ausgangssignal des Drucksensors.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kennlinien der realisierten Drucksensoren eine ausgezeichnete Linearität erreichen können.

Druckdifferenzen von nur 10 hPa konnten noch registriert werden. Eine Steigerung der Empfindlichkeit der Drucksensoren sollte aufgrund der ausreichend großen Steigungen der Kennlinien mithilfe einer verbesserten Elektronik machbar sein.

Das in Abbildung 6.1 gezeigte „Knie“ in der Kennlinie ist die Folge der noch zu großen Vorspannung der Trägermembran, deren Optimierung den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt hätte. Die Reduktion der Vorspannung sollte sich durch eine Warmverklebung der Gehäusenutzen erreichen lassen. Eine zusätzliche Überdehnung der Trägermembran dürfte durch Anlegen einer den Messbereich überschreitenden Druckdifferenz hervorgerufen werden.

Das DMS-Layout scheint für diesen Drucksensortyp gut geeignet zu sein.





## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurden neuartige Drucksensoren, die sich durch einen hybriden Aufbau aus Kunststoff und Glas auszeichnen, vorgestellt. Mit dem Ziel, die Drucksensoren mit dem kostengünstigen AMANDA-Verfahren zu fertigen, wurden auf der Basis bereits realisierter Drucksensoren neue Konzepte erarbeitet. Schon vor dieser Arbeit waren Drucksensoren entwickelt worden, die abgesehen von den elektrischen Leitungen vollständig aus Kunststoff bestanden. Jedoch kann mit ihnen aus prinzipiellen Gründen kein langzeitstabiles Sensorsignal sichergestellt werden, was aber von der Industrie grundsätzlich gefordert wird.

Folglich wurden vor der konzeptionellen Phase dieser Arbeit, Anforderungen an die neu zu entwickelnden Drucksensoren formuliert, die sich an Lastenheften aus der Industrie orientieren. Es wurde dargestellt, warum einige der Konzepte nicht den Anforderungen gerecht werden können und welche Schwierigkeiten bei der Realisierung auftreten würden. Bei einer Fertigung von Drucksensoren aus Polymeren muss gegenüber anderen Werkstoffen mit einer wesentlich größeren thermischen Dehnung und mit Maßabweichungen gerechnet werden, die sich wegen des Schrumpfens von abgeformten thermoplastischen Teilen nicht vermeiden lassen. Als Ergebnis der konzeptionellen Phase wurde ein Erzeugniskonzept vorgestellt, das diese durch das Fertigungsverfahren gesetzten Rahmenbedingungen berücksichtigt und theoretisch die industriell geforderten Spezifikationen erfüllt.

Dieses Konzept sieht vor, den Drucksensor im wesentlichen aus zwei abgeformten Gehäuseteilen, einer Trägermembran und einer kreisförmigen Messplatte aus Glas aufzubauen. Dieser Sensoraufbau nutzt sowohl die kostengünstige Technologie der Kunststoffabformung im Batch-Verfahren, als auch die ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften von Glas. Gehäuse aus Polymer und eine Messplatte aus Glas können trotz der hohen thermischen Dehnung von Polymeren nebeneinander für den Aufbau eines Sensors genutzt werden, weil sie über eine dünne, schlaife Membran mechanisch voneinander entkoppelt werden. So können sich mechanische Dehnungen und Spannungen, die im Gehäuse auftreten nicht auf den sensitiven Teil der Messplatte aus Glas übertragen werden.

Die Glasplatte legt sich bei Anliegen einer Druckdifferenz im Gehäuse entweder auf der einen oder auf der anderen Seite an und wird dabei immer auf die gleiche Weise an ihrem Rand gelagert. Dazu ist die eine Gehäuseschale in Form einer Hohlkugel ausgeführt, in der sich eine kreisförmige Platte unabhängig von Lageabweichungen immer entlang ihres Randes anlegt. Auf der anderen Seite wird die Messplatte auf dem flachen Boden des Gehäuses über einen auf ihr angebrachten Ring aus Polyimid auch bei Positionsabweichungen auf immer gleiche Weise gelagert.

Auf der Oberfläche der Messplatte befinden sich Dehnungsmessstreifen (DMS), die die Messplattendehnungen bei Druckbeaufschlagung erfassen. Die detektierten Dehnungen werden mit den DMS innerhalb einer Wheatstone'schen Messbrücke in eine druckproportionale Widerstandsänderung umgewandelt und erzeugen so das Messsignal.

Um das erarbeitete Erzeugniskonzept umzusetzen, wurde ein Fertigungskonzept entworfen. Bei der Entwicklung eines Fertigungskonzeptes wurden die Themenkom

plexe und Fragestellungen im Zusammenhang mit der Realisierbarkeit des Erzeugniskonzeptes sequentiell und zunächst separat voneinander untersucht. Diese Untersuchungen beinhalteten sowohl Strukturierungsversuche von und auf dünnen Glassubstraten, als auch deren Kombinationsmöglichkeiten mit Membranen. Bei den Membranen wurde in Betracht gezogen, diese selber herzustellen oder als Zukaufteil in den Sensoraufbau zu integrieren. Nach einer abschließenden Bewertung der Vorversuche, Materialauswahl und erfolgreicher Erprobung einzelner Prozessschritte, wurde ein Herstellungsprozess abgeleitet und schematisch skizziert.

Nach grundlegenden Überlegungen zu den mechanischen Eigenschaften von Glas und dem piezoresistiven Effekt, wurde die Dimensionierung des Drucksensors durchgeführt. Der Spannungs- bzw. Dehnungsverlauf auf der berechneten frei gelagerten Kreisplatte wurde durch mathematische Gleichungen beschrieben und Gleichungen für die Änderung des elektrischen Widerstands von Dehnungsmessstreifen auf der Platte wurden hergeleitet. Die so erhaltenen Gleichungen wurden in ein Computerprogramm eingebracht mit dem die Kennlinien in Abhängigkeit des Layouts der DMS berechnet wurden. Mit Hilfe des Computerprogramms wurde das Layout für den dargestellten speziellen Anwendungsfall optimiert.

Die geometrische Dimensionierung des Drucksensors wurde durch die konstruktive Gestaltung des Abformwerkzeuges und der für die optische Lithographie notwendigen Chrommasken abgeschlossen. Es wurde festgelegt, dass jeweils 12 Drucksensoren parallel gefertigt werden. Jeder Drucksensor enthält eine aus 50  $\mu\text{m}$  dicken Glassubstraten herausgeätzte Messplatte, mit einem Durchmesser von 2084  $\mu\text{m}$ . Dieser Durchmesser wurde so berechnet, dass bei Belastung der Messplatte mit Druckdifferenzen von bis zu  $\pm 1000$  hPa ein linearer Zusammenhang zwischen zentraler Auslenkung und Druckdifferenz besteht.

Die anschließend erfolgte Verfahrensentwicklung zur Fertigung der Drucksensoren orientierte sich im wesentlichen an drei Aufgabenstellungen. Zunächst musste eine geeignete Möglichkeit zur beidseitigen Prozessierung dünner Glassubstrate erarbeitet werden. Gleichzeitig stellte sich die Frage, ob sich mithilfe des konstruierten Werkzeuges die gewünschten Geometrien in Polysulfon und Polyetheretherketon abformen lassen. Die Kombination der prozessierten Glassubstrate mit den abgeformten Gehäuseteilen bildeten den Abschluss der Verfahrensentwicklung. Innerhalb dieses Themenkomplexes wurden die Herstellung, die Montage und die Vereinzelung der Drucksensoren entwickelt.

Die Fertigung der Drucksensoren nach dem entwickelten Herstellungsverfahren wurde ausführlich dargestellt. Bevor die neuen Drucksensoren getestet werden konnten, wurde ein Teststand aufgebaut. Der Teststand zur Aufnahme der Kennlinien der Drucksensoren ermöglicht es, diese kontinuierlich mit Druckdifferenzen von -1000 hPa bis zu +2000 hPa zu belasten. Die Differenzdrücke sind einstellbar und können an einer Druckmessdose, die parallel zum zu kalibrierenden Drucksensor geschaltet ist, abgelesen werden. Charakteristische Kennlinien der Drucksensoren wurden aufgenommen. Hierbei konnte die Richtigkeit der Vorüberlegungen und die Berechnungen des Layouts der DMS experimentell bestätigt werden.

Einige Kennlinien erreichen einen ausgezeichneten linearen Verlauf, mit Korrelationskoeffizienten von  $R^2=0,9999$ .

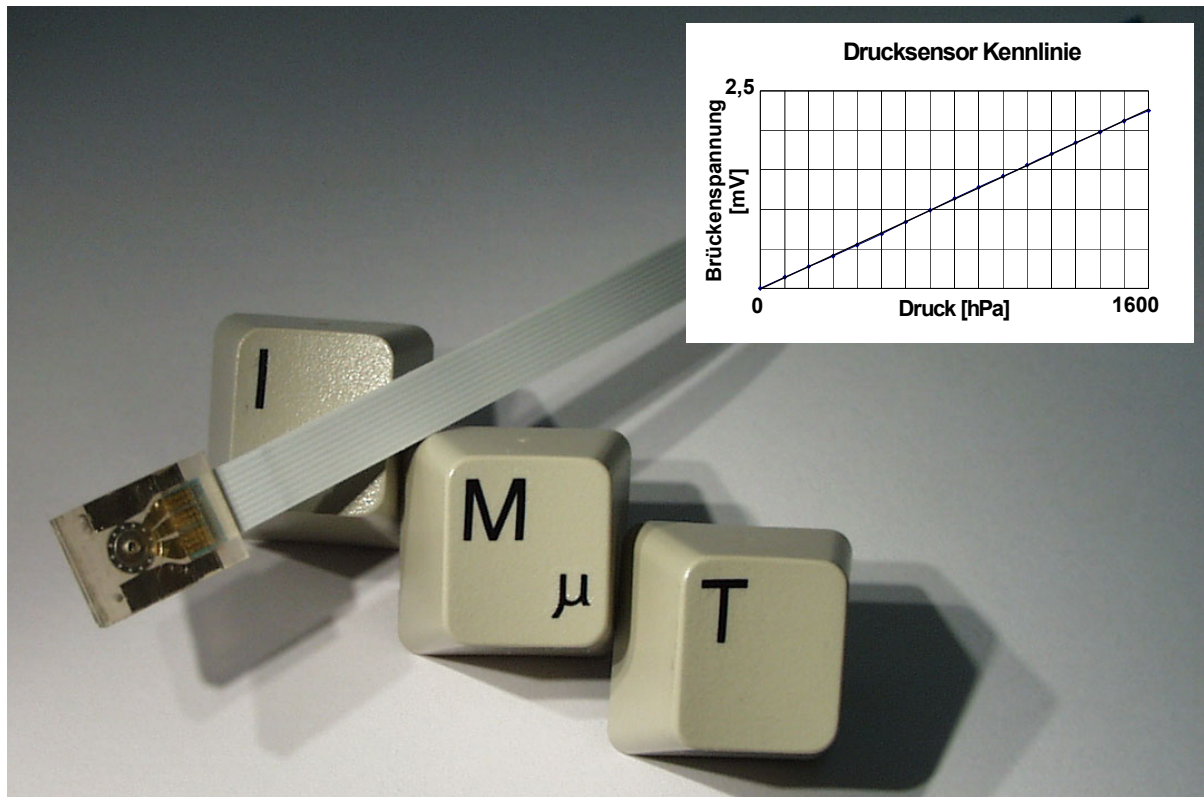


Abbildung 7.1 Neu entwickelter hybrider Drucksensor mit Kennlinie

Kennlinien einiger Drucksensoren zeigten jedoch ein „Knie“ in der Kennlinie, was darauf zurückgeführt wird, dass die Membran noch nicht, wie vom Konzept her vorgesehen, schlaff im Gehäuse aufgehängt ist. Eine Optimierung der Membranspannung hätte den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt. Hier liegt der wohl wichtigste Ansatzpunkt bei der Weiterentwicklung der Drucksensoren.

Für die „nächste Generation“ von Drucksensoren stehen PEEK-Gehäuse bereits zu Verfügung, bei deren Einsatz eine wesentliche Reduzierung der Membranspannung zu erwarten ist. Dazu sollte ein Verschweißverfahren entwickelt werden, das dann auch die Fertigung von Drucksensoren aus vollständig chemisch inerten Materialien ohne Verklebung ermöglicht. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass durch die Realisierung der letztgenannten Weiterentwicklungen bzw. Prozessvariationen ein preiswerter, chemische inerte Drucksensor aufgebaut werden könnte, für den ein sehr breites Anwendungsfeld zu erwarten ist.



## 8 Literaturverzeichnis

- [Ahre00] R.Ahrens, Z.Rummler, W.K.Schomburg, C.Stingl, K.Wulff: *Einfluss der Luftfeuchtigkeit und anderer Umgebungsparameter auf AMANDA-Komponenten für die Mikrofluidik*. 4.Statuskolloquium PMT, FZKA 6423, Forschungszentrum Karlsruhe (2000) S.227-230
- [Bier00] R.Bierhals: *Mikrosystemtechnik – Wann kommt der Marktdurchbruch?* Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Physica-Verlag (2000) S.189-192
- [Büst94] B. Büstgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg, L. Keydel: *Micromembrane Pump Manufactured by Molding*. Poster und Proceedings der 4<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, Actuator'94, Bremen, June 15 – 17 (1994) S. 86-90
- [Clar99] Clariant: *Product Data Sheet AZ 5214 E - Image Reversal Photoresist*. (1999) S. 1-3
- [Diet98] R.Dietrich: *Einsatz von Glas in der Mikrotechnik*. Symposium „Fertigung miniaturisierter Teile“, MicroEngineering Kongreß 98, Stuttgart (1998)
- [Domi98] H.Domininghaus: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 5.Auflage, Springer Verlag (1998) S. 549, S. 906, S. 584, S. 945, S. 526
- [Döpp96] J.Döpper, M.Clemens, W.Ehrfeld, K.-P.Kämper, H.Lehr: *Development of Low-Cost Injection Molded Micropumps*. Proceedings, 5<sup>th</sup> Int. Conf. on New Actuators (Actuator'96), Bremen, Germany, 26. –28. Juni (1996) S.37-40
- [Dubb90] W.Beitz, K.H.Küttner: *Dubbel –Taschenbuch für den Maschinenbau*. 17.,neubearbeitete Auflage, Springer-Verlag (1990) S. C 38
- [Eigl00] H.Eigler: *Mikrosensorik und Mikroelektronik*, Sensorik Band 10, expert-verlag (2000) S.710 ff.
- [Fahr95] J.Fahrenberg , W. Bier, D.Maas , W.Menz, R.Ruprecht, W.K.Schomburg: *Microvalve System Fabricated by Thermoplastic Molding*, J. Micromech. Microeng. 5 (1995) S. 169-171
- [Fluc84] E.Fluck, R.C.Brasted: *Allgemeine und Anorganische Chemie*. UTB für Wissenschaft, Uni-Taschenbücher 53, 4.Auflage, Quelle und Meyer Heidelberg (1984)
- [Girk54] K.Girkmann: *Flächentragwerke*, Springer-Verlag (1954)
- [Goll96] C.Goll, W.Bacher, B.Büstgens, D.Maas, W.Menz, W.K.Schomburg: *"Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms"*, J. Micromech. Microeng. 6 (1996) S. 77-79

- [Goll97] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, R. Ruprecht, W.K.Schomburg: *"Electrostatically Actuated Polymer Microvalve Equipped with a Movable Membrane Electrode"*, J. Micromech. Microeng. 7 (1997) S. 224-226
- [Heck00] M.Heckele, H.Dittrich: *Prägen von Mikrobauteilen ohne Restschicht*. 4.Statuskolloquium PMT, FZKA 6423, Forschungszentrum Karlsruhe (2000) S. 195
- [Heck98] M.Heckele, W.Bacher, K.D.Müller: *Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures*. Microsystem Technologies 4 (1998) S.122-124
- [Heck99] M.Heckele, K.D.Müller, W.Bacher: *Microstructured Plastic Foils Produced by Hot Embossing*. HARMST, Kisarazu (1999) S. 84-85
- [Hoff87] K.Hoffmann: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Firmenschrift: Hottinger-Baldwin Messtechnik GmbH (1987)
- [Hüls97] D.Hülsenberg: *Glas in der Mikrotechnik*. Sitzungsberichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Band 123, Heft 6, Akademie-Verlag Berlin (1992)
- [Kais00] S.C.Kaiser: *Entwicklung eines magnetisch-induktiven Mikroventils nach dem AMANDA-Verfahren*. Dissertation, Universität Karlsruhe (2000)
- [Keil95] S.Keil: *Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen*. Cuneus Verlag (1995) S. 315 ff.
- [Lars97] O. Larsson, O. Öhman, Å. Billman, L. Lundbladh, C.Lindell, G. Palmskog: *Silicon Based Replication Technology of 3D-Microstructures by Conventional CD-Injection Molding Techniques*. Proc. der Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), Chicago, USA, 16. – 19. Sept., (1997) S. 1415-1418
- [Maas96] D.Maas, B.Büstgens, J.Fahrenberg, W.Keller, P.Ruther, W.K.Schomburg, D.Seidel: *Fabrication of Microcomponents using Adhesive Bonding Techniques*. Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems MEMS'96, San Diego, USA (1996) S. 331-336
- [Mare95] J.Marek, M.Möllendorf: *Mikrotechnik im Automobil*, me, Heft 3 (1995)
- [Mart98] J. Martin, W. Bacher, O.F. Hagena, W.K. Schomburg: *Strain Gauge Pressure and Volume-Flow Transducers Made by Thermoplastic Molding and Membrane Transfer*. Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, Heidelberg (1998) S. 361-366
- [Mesc00] U.Mescheder: *Mikrosystemtechnik*. B.G.Teubner Stuttgart, Leipzig (2000) S.8, S 66 ff.

- [Ober98] K.Oberbach: *Kunststoff-Taschenbuch*. 27.Ausgabe, Carl Hanser Verlag München Wien (1998)
- [Pete95] K.Petersen: *MEMS: What lies ahead?* Tagungsband, Transducers95, Stockholm (1995)
- [Römp95] CD Römpf: *Chemie Lexikon*. Version 1.0, Stuttgart/New York, Georg Thieme Verlag (1995), CD-Version
- [Rumm00] Z. Rummler, M. Berndt, H.-G. Härtl, M. Hempel, R. Peters, W.K. Schomburg: *Micro Degasser Made of Inert Polymers for HPLC Devices*. ASME Winter Annual Meeting, 5. – 10. 11.2000 in Orlando, Florida, USA (2000)
- [Rumm01] R.Rummler, P.Shao: *Persönliche Mitteilung*. (2001)
- [Rupr00] R.Ruprecht, T.Gietzelt, M.Guttman, T.Hanemann, M.Heckele, K.Müller, V.Piotter: *Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall*. 4.Statuskolloquium PMT, FZKA 6423, Forschungszentrum Karlsruhe (2000) S.31
- [Scho00] W.K.Schomburg, S.Kaiser: *Fertigung marktgerechter mikrofluidischer Systeme mit dem AMANDA-Verfahren*. 4.Statuskolloquium PMT, FZKA 6423, Forschungszentrum Karlsruhe (2000) S.159-164
- [Scho98] W.K.Schomburg, R.Ahrens, W.Bacher, C.Goll, S.Meinzer, and A.Quinte: *AMANDA – Low Cost Production of Microfluidic Devices*. Transducers `97 Special Volume of Sensors and Actuators, A 70 (1998) S.153-158
- [Scho97] W.K.Schomburg, R.Ahrens, W.Bacher, C.Goll, S.Meinzer, and A.Quinte: *AMANDA – Low Cost Production of Microfluidic Devices*. Transducers `97 Special Volume of Sensors and Actuators, Elsevier (1997)
- [Schr94] N.Schröder: *Sensormärkte und Mikrosystemtechnik*. Tagungsband Technologiekongress-Vorträge IHK Schwarzwald-Baar-Heuberg, Band 9 (1994)
- [Schw90] O.Schwarz: *Kunststoffkunde*. 3.Auflage, Vogel Buch Verlag Würzburg (1990)
- [Timo59] S.P.Timoshenko: *Theory of Plates and Shells*. 2<sup>nd</sup> edition, Mc-Graw Hill, Inc. (1959)
- [Tsch97] G.Tschulena, H.Preis: *Mikromechanik – eine neue Technik kündigt sich an*. Tagungsband - 2.Symposium Mikrosystemtechnik (1992)
- [Wech97] W.Wechsung: *Market Analysis of Mircostructure Products*. Proc. Euroensors XI Warschau (1997)



## 9 Internetadressen<sup>23</sup>

|        |                                                                                                                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [@bmb] | <a href="http://www.mst.izet.de/mst-definition.html">http://www.mst.izet.de/mst-definition.html</a>                                                   |
| [@boh] | <a href="http://www.bohlender.de">http://www.bohlender.de</a>                                                                                         |
| [@fzk] | <a href="http://www.fzk.de">http://www.fzk.de</a>                                                                                                     |
| [@ilm] | <a href="http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwgk/gk.htm">http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwgk/gk.htm</a>                             |
| [@imt] | <a href="http://www.fzk.de/imt/">http://www.fzk.de/imt/</a>                                                                                           |
| [@isy] | <a href="http://www.i-sys.de/">http://www.i-sys.de/</a>                                                                                               |
| [@lip] | <a href="http://www.lipp-terler.com">http://www.lipp-terler.com</a>                                                                                   |
| [@mgt] | <a href="http://www.mikroglas.de">http://www.mikroglas.de</a>                                                                                         |
| [@pho] | <a href="http://www.photonics.com/internet/careers/europe/europe.htm#dresden">http://www.photonics.com/internet/careers/europe/europe.htm#dresden</a> |
| [@sch] | <a href="http://www.schott.com/displayglas/german/">http://www.schott.com/displayglas/german/</a>                                                     |

---

<sup>23</sup> Die angegebenen **Internetadressen** sind der digitalen Version der vorliegenden Dissertation als Hyperlink verfügbar.

# 10 Anhang

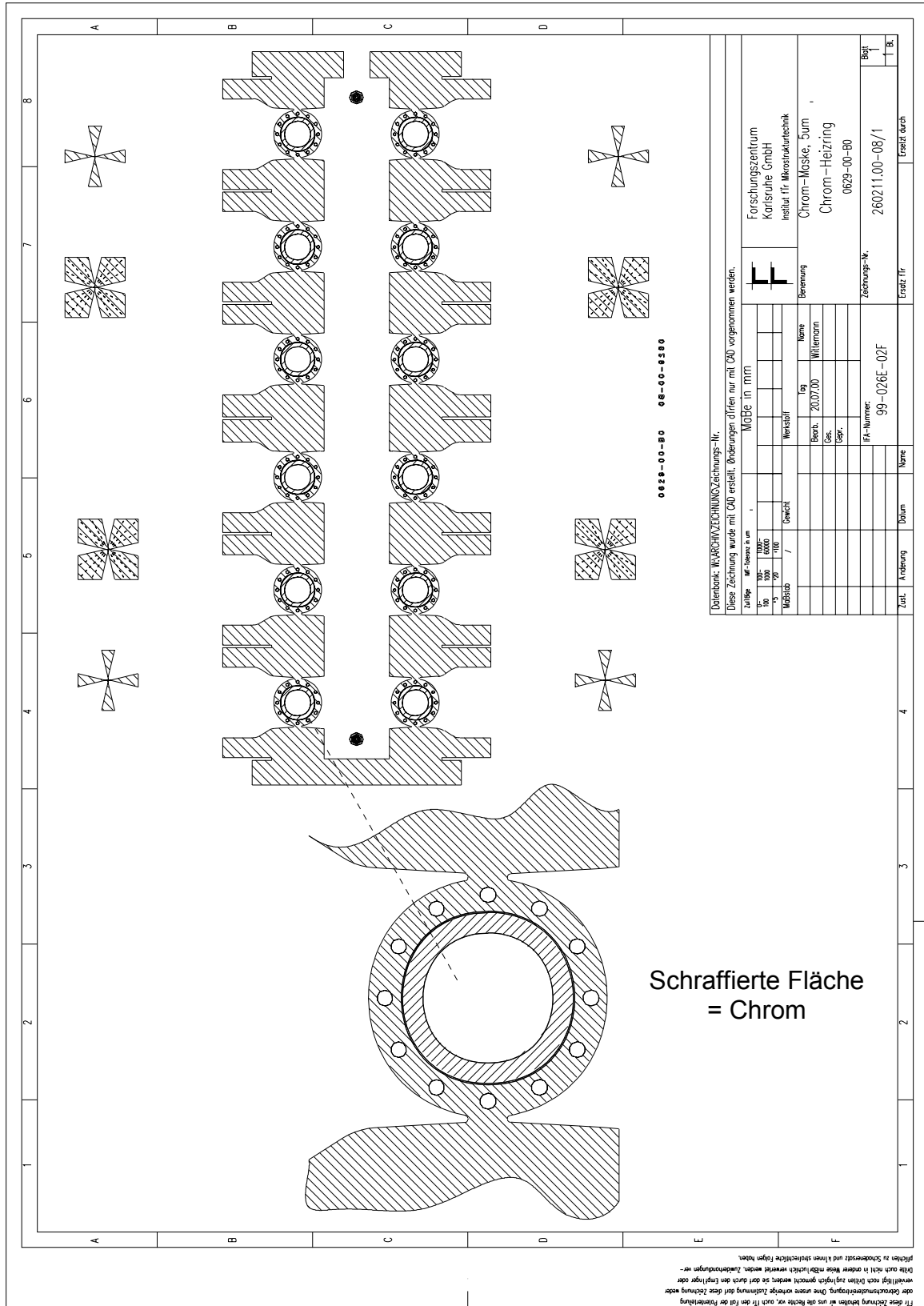


Abbildung 10.1

Layout der Chrommaske 1 zur Strukturierung eines Ringes und einer Leiterbahn aus Chrom

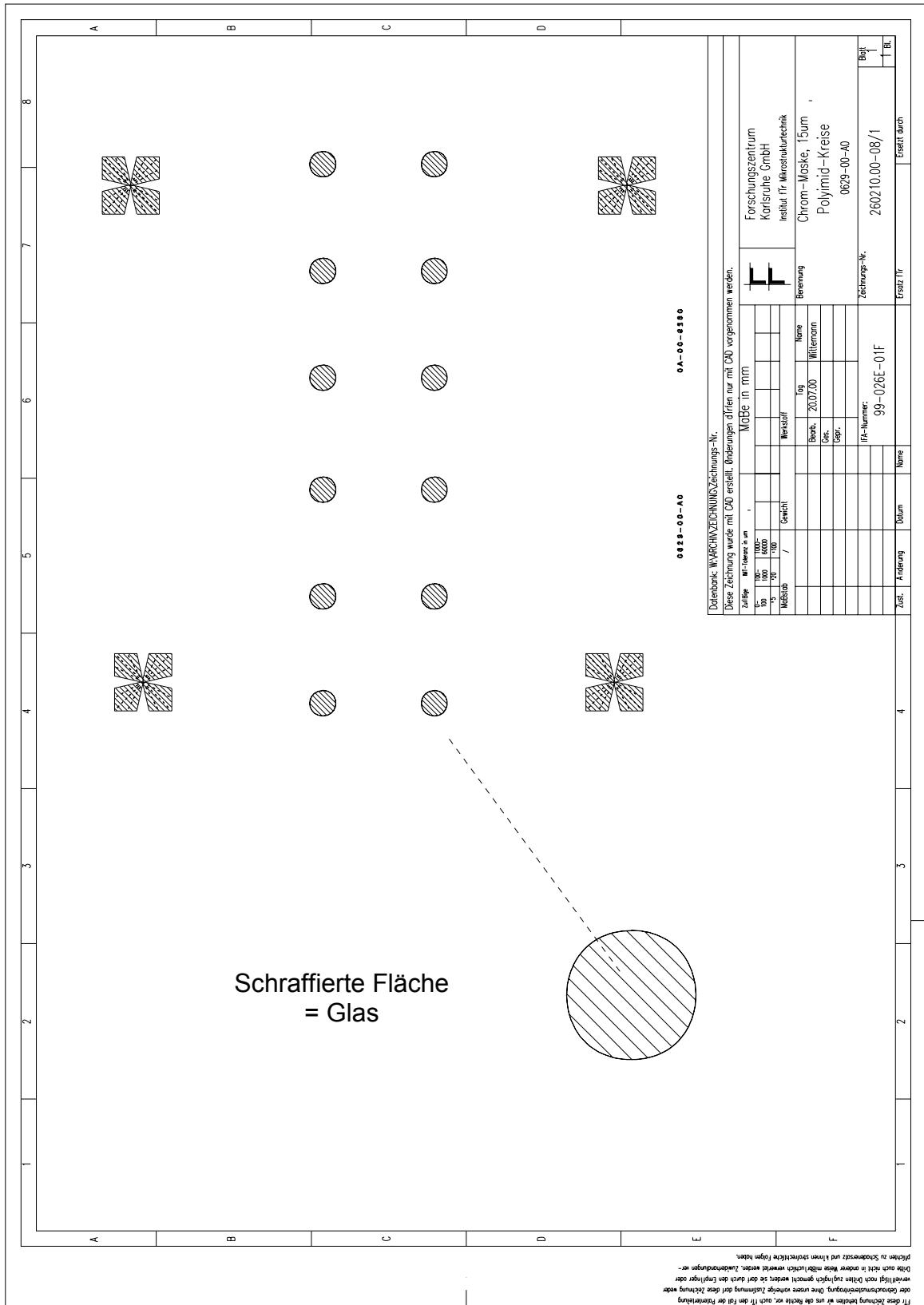


Abbildung 10.2

Layout der Chrommaske 2 zur Strukturierung von Kreisflächen

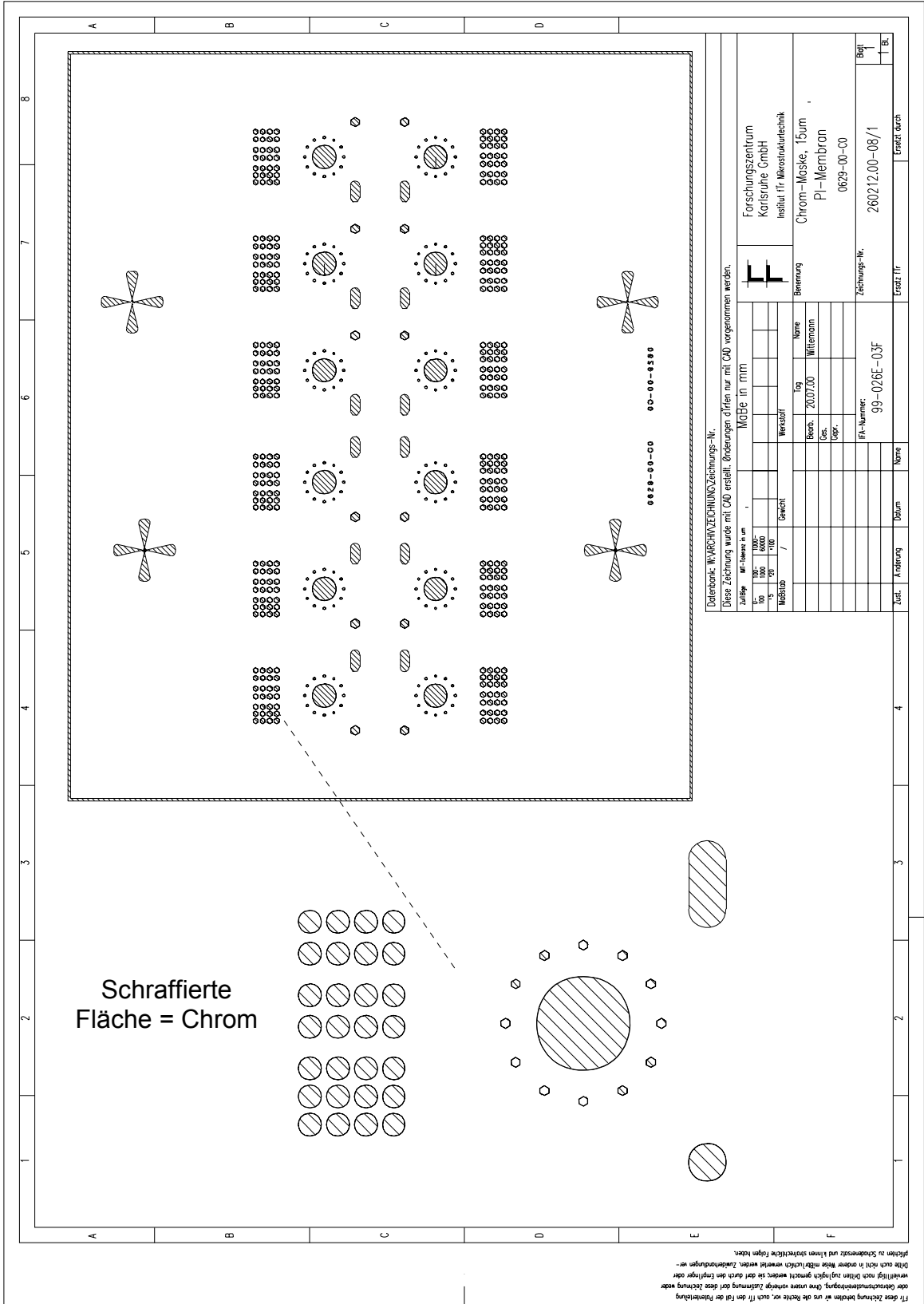


Abbildung 10.3

Layout der Chrommaske 3 zur Strukturierung einer Membran aus Polyimid

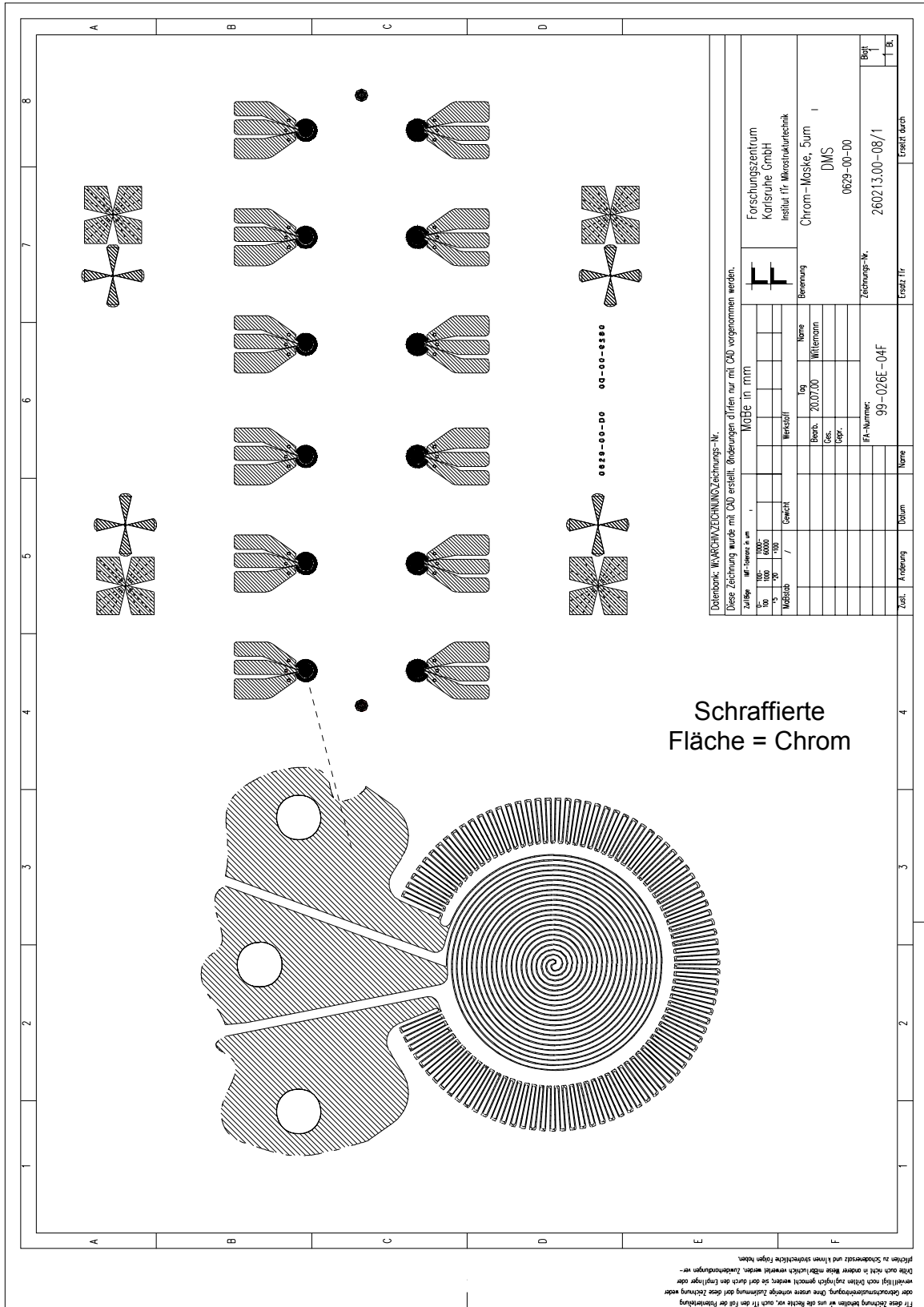


Abbildung 10.4

Layout der Chrommaske 4 zur Strukturierung der Dehnungsmessstreifen und deren Zuleitungen

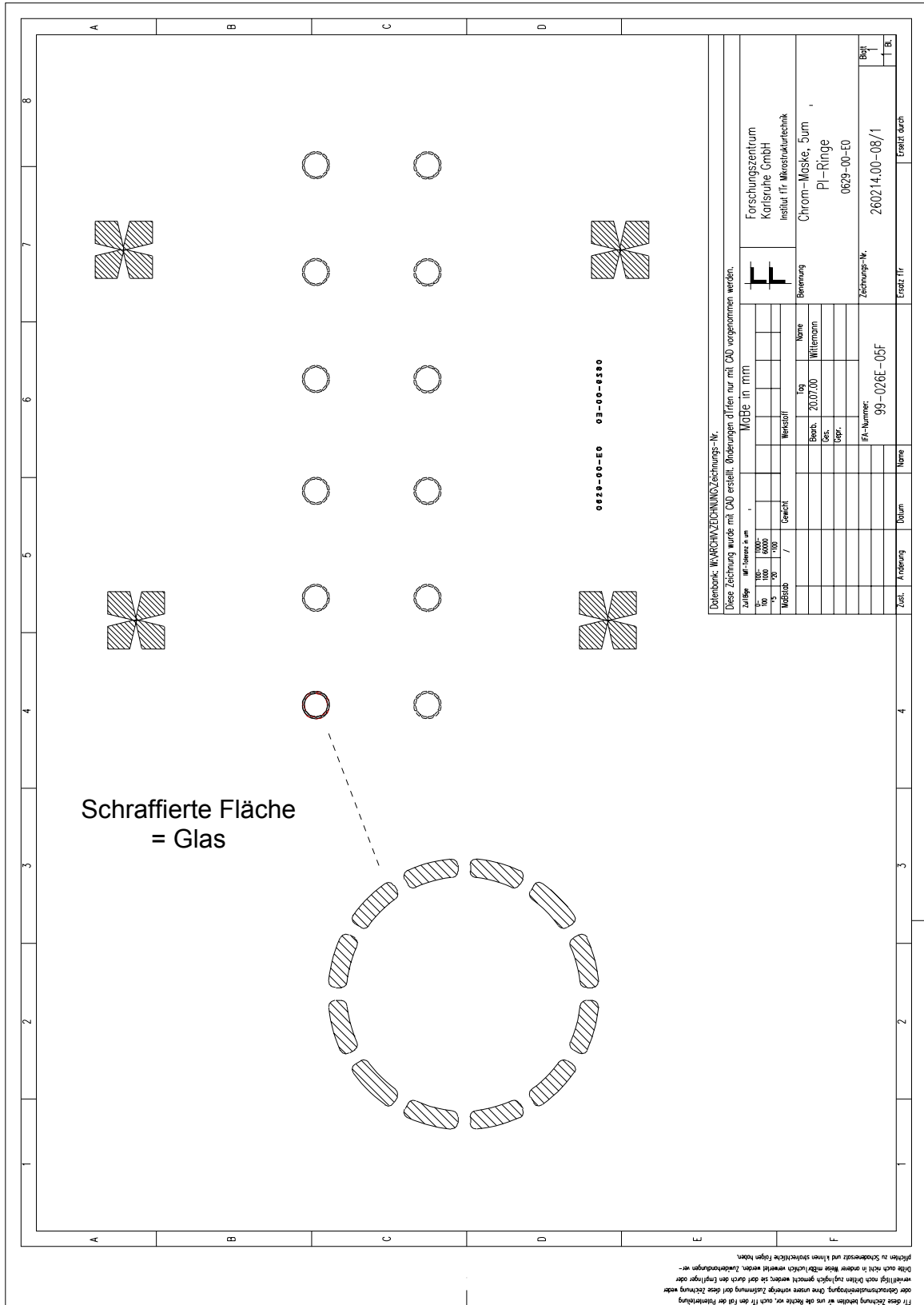


Abbildung 10.5

Layout der Chrommaske 5 zur Strukturierung eines Ringes aus Polyimid

## 11 Index

### A

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Abformung.....        | 5  |
| Aceton.....           | 25 |
| AMANDA-VERFAHREN..... | 5  |
| Amorph.....           | 12 |
| Aspektverhältnis..... | 12 |

### B

|                      |    |
|----------------------|----|
| Baukasten.....       | 1  |
| Borosilikatglas..... | 11 |

### C

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| Chemikalienbeständigkeit..... | 61 |
| Chrommasken.....              | 49 |
| Chromschicht.....             | 19 |

### D

|                           |    |
|---------------------------|----|
| Dehnungen.....            | 32 |
| Dehnungsmessstreifen..... | 32 |
| Diffusionsbonden.....     | 15 |
| Drehmoment.....           | 70 |
| Drucksensoren.....        | 1  |

### E

|                        |    |
|------------------------|----|
| Elastizitätsmodul..... | 32 |
| Erzeugniskonzept.....  | 5  |

### F

|                          |    |
|--------------------------|----|
| FEP.....                 | 23 |
| Fertigungskonzept.....   | 19 |
| Fluss-Säure.....         | 12 |
| Fotoresist.....          | 12 |
| Foturan.....             | 12 |
| Funktionsstrukturen..... | 22 |

### G

|                  |    |
|------------------|----|
| Glas.....        | 11 |
| Glasfeder.....   | 12 |
| Glasfolie.....   | 12 |
| Glasmembran..... | 11 |
| Glasplatte.....  | 13 |

### H

|                              |    |
|------------------------------|----|
| Haftvermittlungsschicht..... | 25 |
| Hauptnormalspannung.....     | 32 |
| Heißprägen.....              | 5  |
| Heißsiegelbonden.....        | 65 |
| Herstellungsprozess.....     | 27 |
| Hexan.....                   | 25 |
| HMDS.....                    | 24 |
| Hohlkugelschale.....         | 17 |
| Hookesches Gesetz.....       | 31 |
| Hybrid.....                  | 75 |

### I

|              |    |
|--------------|----|
| Isotrop..... | 32 |
|--------------|----|

### K

|                         |    |
|-------------------------|----|
| Kammerklebetechnik..... | 7  |
| Kennlinie.....          | 67 |
| Konfektionierung.....   | 65 |

### L

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Lift-Off-Prozess..... | 59 |
| Lithographie.....     | 59 |

### M

|                         |    |
|-------------------------|----|
| Mäander.....            | 41 |
| Membranübertragung..... | 6  |
| Messplatte.....         | 17 |
| Methanol.....           | 25 |
| Mikrosystemtechnik..... | 1  |

### N

|             |   |
|-------------|---|
| Nutzen..... | 5 |
|-------------|---|

### O

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Oberflächenmikromechanik..... | 6 |
|-------------------------------|---|

### P

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| PEEK.....                   | 23 |
| PFA.....                    | 23 |
| PI.....                     | 23 |
| Piezoresistiver Effekt..... | 32 |
| Plattentheorie.....         | 34 |
| Positionierungshilfe.....   | 27 |
| PSU.....                    | 61 |
| PTFE.....                   | 23 |
| PYREX.....                  | 23 |

### Q

|                           |    |
|---------------------------|----|
| Querdehnung.....          | 36 |
| Querkontraktionszahl..... | 32 |

### R

|                 |    |
|-----------------|----|
| Radial-DMS..... | 48 |
| RIE.....        | 6  |

### S

|                              |    |
|------------------------------|----|
| SF <sub>6</sub> -Plasma..... | 24 |
| Spannungszustand.....        | 32 |
| Spiral-DMS.....              | 41 |
| Spritzguss.....              | 5  |
| SU-8.....                    | 23 |

### T

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Temperaturkompensation..... | 15 |
| Temperprozess.....          | 12 |
| Thermoplast.....            | 61 |
| THF.....                    | 25 |

### U

|                    |    |
|--------------------|----|
| UV-Belichtung..... | 12 |
|--------------------|----|

### V

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Vereinzelung.....          | 66 |
| Verfahrensentwicklung..... | 57 |
| Verformungszustand.....    | 36 |
| Verschweißung.....         | 50 |
| Vorspannung.....           | 70 |
| Vorzugsätzrichtung.....    | 12 |

### W

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Wheatstonesche Messbrücke..... | 43 |
| Widerstandsänderung.....       | 38 |