

Zwischenbericht zum Verbundvorhaben

Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung von Mikroaktoren

Gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand
und Technologie des Landes Baden-Württemberg
(Aktenzeichen: IV 4332.62 - H 2835.8)

Laufzeit: 1.1.1992 - 31.12.1994

Berichtszeitraum: 1.1.1992 - 30.6.1992

Projektleitung

Hahn-Schickard-Institut
für Mikro- und Informationstechnik
U.Nothelfer

Einleitung

Der Großteil heute verfügbarer Aktoren ist durch den Einsatz konventioneller Konzepte, Bauarten und Fertigungstechnologien (z.B. Feinmechanik) gekennzeichnet. In zukünftigen und teilweise schon in heutigen modernen, industrielektronischen Anwendungen können Anforderungen bzgl. Dynamik, Miniaturisierung, Gewicht, Leistungsaufnahme und Preis mit herkömmlichen Herstellmethoden nicht mehr erfüllt werden.

Ziel dieses vom Land Baden-Württemberg geförderten Firmenverbundprojektes ist daher die Erarbeitung der Grundlagen und Möglichkeiten, miniaturisierte Aktoren mit den Technologie- und Fertigungsmethoden der Mikrotechnik zu realisieren.

Es ist geplant, die wesentlichen Grundlagenuntersuchungen an einer im Mittenbereich verstärkten Siliziummembran, einer sogenannten Bossmembran, als Aktorgrundstruktur durchzuführen. Hierbei geht es insbesondere darum, das elastomechanische Verhalten dieser Grundstruktur theoretisch zu analysieren und durch einen Vergleich mit experimentellen Daten ein FEM-Modell zu erarbeiten. Anhand dieses Modells kann dann eine den jeweiligen Bedürfnissen angepasste Layoutoptimierung durch Variation der Geometrieparameter durchgeführt werden. Insbesondere lassen sich die für die Aktorbewegung relevanten Größen, wie Stellkräfte und Stellwege simulieren. Basierend auf diesen Ergebnissen kann dann abgeschätzt werden, welche Aktorwirkprinzipien überhaupt in Frage kommen und wie sie optimal zu adaptieren sind. Des Weiteren muß anhand von Skalierungsberechnungen untersucht werden, inwieweit sich einzelne Wirkprinzipien für eine Miniaturisierung eignen. Für die relevanten Prinzipien müssen dann anhand von Teststrukturen die abgeleiteten Skalierungsgesetze meßtechnisch verifiziert werden.

Im nächsten Schritt werden dann aufbauend auf der oben beschriebenen Aktorgrundstruktur, verschiedene Mikroaktoren wie Mikroschalter, Mikropumpe und Mikroventil realisiert und anhand von Funktions- und Leistungstests charakterisiert. Die im Berichtszeitraum 01.01.92 - 30.06.92 durchgeföhrten Arbeiten sind in den schriftlichen Einzelbeiträgen ausführlich beschrieben. An dieser Stelle sollen deshalb nur die wesentlichen Punkte kurz zusammengefaßt werden.

Literatur- und Patentrecherche

Bei der durchgeföhrten Literaturrecherche wurden ca. 300 relevante Zitate erfasst, wobei der Großteil mittlerweile am Institut vorhanden ist und nach fachlichen Kriterien durchgearbeitet und sortiert wird. Im Zuge der Patentrecherche wurden bisher die Themengebiete Mikroventile und Mikropumpen bearbeitet, wobei zusammen ca. 90 relevante Patente recherchiert wurden. Speziell die Patent-

recherchen erforderten hierbei eine intensive Einarbeitung, insbesondere die Erfassung der internationalen Patentklassifikationen.

Es ist geplant die Rechercheergebnisse in ca. viermonatigem Rhythmus zu aktualisieren.

Theoretische Membranberechnungen

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden intensive analytische und Finite-Elemente-Berechnungen (FEM) zum elastomechanischen Verhalten von einfachen Membranen und Bossmembranen durchgeführt. Insbesondere wurden für punktförmige Krafteinleitung und für Druckbeaufschlagung die Membranauslenkungen und die wirkenden Rückstellkräfte berechnet und die Ergebnisse von analytischer und FEM-Rechnung gegenübergestellt. Auf der Basis des berechneten analytischen Modells wurde hierzu ein Turbo-Pascal Programm erstellt.

Um bei den Berechnungen ein gewisses Geometrieparameterfeld abdecken zu können, wurde eine Matrix vorgegeben, innerhalb derer die Parameter Membran- und Bosslänge sowie die Membrandicke variiert wurden.

Layouterstellung

Um die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen experimentell verifizieren zu können, wurde ein Maskenlayout erstellt, das dieselben Membrangeometrien beinhaltet, die auch in der Berechnungsmatrix variiert wurden. Die Herstellung von Bossmembranen durch die anisotrope Ätztechnik, bereitet aufgrund der an konvexen Bossecken auftretenden Unterätzungen erhebliche Probleme. Mit zusätzlich angehängten, präzise berechneten Strukturen können diese Unterätzungen jedoch kompensiert werden. Das Einbinden zusätzlich benötigter Kompensationsflächen gibt jedoch den minimal möglichen Abstand zwischen Boss und Membranaußenkante vor. Basierend auf bisherigen Erfahrungen wurde für das Layout eine Kompensationsstruktur berechnet, die bei akzeptablem Platzbedarf eine symmetrische Bossecke liefern sollte.

Für zukünftig anstehende Untersuchungen wurden zum Auffüllen noch freier Maskenflächen, zusätzliche Teststrukturen entworfen und eingebunden. Anhand dieser Mikrokanäle und Mikrodurchbrüche sollen dann Versuche zum fluiddynamischen Verhalten von Mikrostrukturen durchgeführt werden.

Technologietätigkeiten

Als erstes Aktortestmuster zur Überprüfung der hierfür benötigten Technologien, ist die Realisierung eines passiven Plattenvents geplant. Als wesentliche technologischen Schritte müssen dafür die anisotrope Ätztechnik sowie die Siliziumbondtechnik beherrscht werden. Die Siliziumbondtechnik muß zudem mit der spezifischen Anforderung beherrscht werden, daß lokal definierte Bereiche existieren, die nicht bonden.

Auf diesem Konzept aufbauend, wurde im Berichtszeitraum mit der Entwicklung dieser Technologien begonnen. Neben ersten experimentellen Versuchen, die im Wesentlichen die Notwendigkeit einer Ätzstoptechnik und einer ausgefeilten Eckenkompensationstechnik bestätigten, wurden hauptsächlich Literaturarbeiten, Beschaffungs- und experimentelle Aufbauarbeiten sowie die Erarbeitung weiterführender Versuchskonzepte durchgeführt.

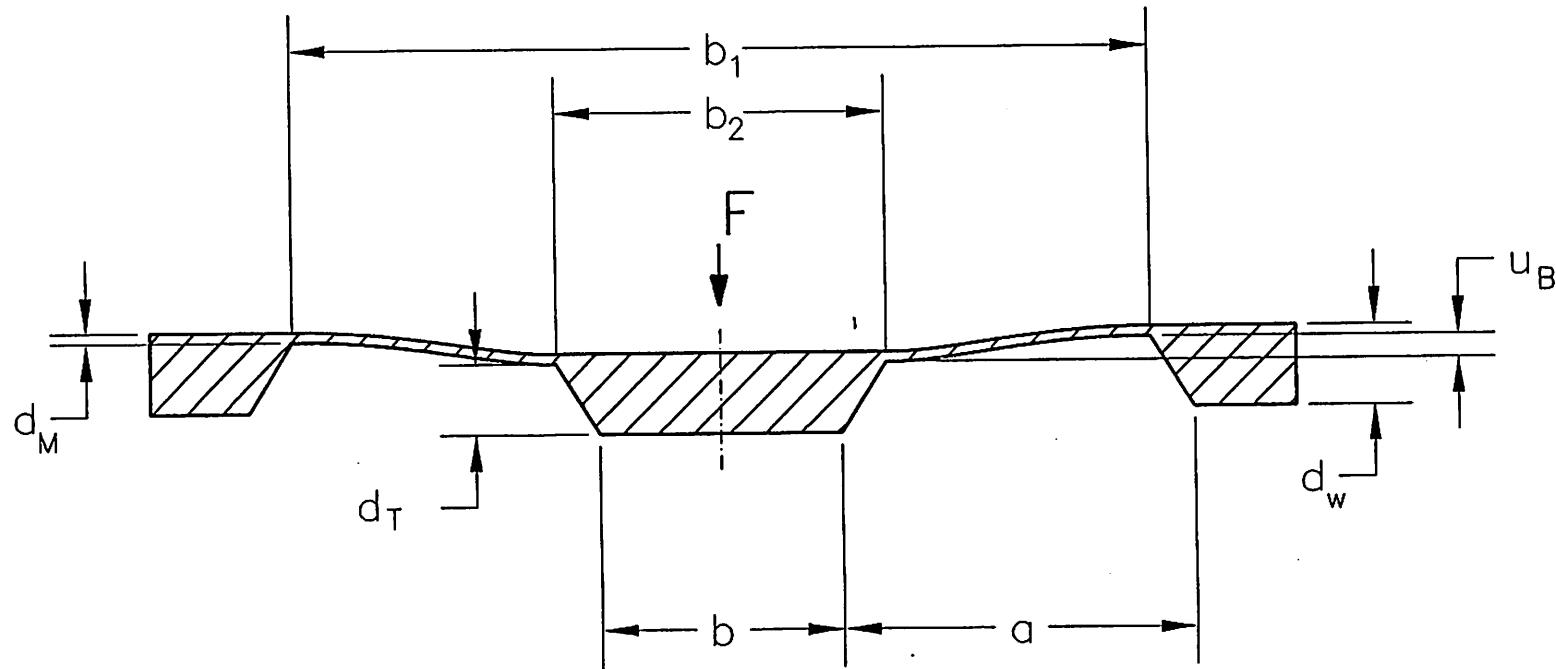
Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
I. Formelzeichen und Abkürzungen	1
II. Literatur- und Patentrecherche	3
III. Berechnungen an mikromechanischen Strukturen für die Aktorik mit Hilfe der Methode der finiten Elemente	8
1. <u>Einleitung</u>	8
2. <u>Analytische Berechnung quadratischer Membranen unter Belastung durch Druck oder Einzelkraft</u>	10
2.1 Balken variabler Breite unter Einzellast	12
2.2 Balken variabler Breite unter Flächenlast	13
2.3 Zusammenfassung: Mittenversteifte Membran unter Belastung durch Druck und Einzelkraft	15
3. <u>Das finite-Elemente-Modell</u>	16
3.1 FE-Berechnungen der Bossmembran	17
3.1.1 Die variierten Modellparameter	17
3.1.2 Die FE-Ergebnisse	18
3.2 FE-Berechnungen der Einfachmembran	20
4. <u>Weitere Vorgehensweise</u>	21
5. <u>Literatur zu III.2 und III.3</u>	33
6. <u>Entwurf Maskenlayout</u>	34
6.1 Kompensationsstrukturen und ihre Charakterisierung	34
6.2 Zusammenfassung	38
6.3 Auswahl einer geeigneten Kompensationsstruktur	39

	<u>Seite</u>
IV. Technologietätigkeiten	44
1. Anisotropes Si-Ätzen	44
2. Bonden	47
3. Drahtbonden	50

I. Formelzeichen und Abkürzungen

- a Freie Membranbreite auf der Maske
- α_{\max} Winkel zwischen der schnellstätzenden Kante und der <110>-Kante auf (100)-Wafern
- b Bossbreite auf der Maske \approx Bossbreite an der Chipoberfläche
- b(x) Balkenbreite
- b₁ Seitenlänge der Membran $b_1 = b + 2a - \sqrt{2}d_T$
- b₂ Seitenlänge der Mittenversteifung $b_2 = b + \sqrt{2}d_T$
- d freie Membranlänge zwischen Einspannung und Mittenversteifung
 $d = a - \sqrt{2}d_T$
- d_M Membrandicke
- d_T Ätztiefe
- d_w Wafer- und Chipdicke
- E E-Modul
- F Einzelkraft auf die Membranmitte
- F_R Reaktionskraft an der Einspannstelle
- J(x) axiales Flächenträgheitsmoment $J(x) = b(x) \cdot d_M^3 / 12$
- J₁ axiales Flächenträgheitsmoment $J_1 = b_1 \cdot d_M^3 / 12$
- K Federkonstante
- L Länge Einspannung-Membranmittelpunkt (bei quadratischer Membran halbe Seitenlänge)
- M Biegemoment
- M_R Reaktionsmoment an der Einspannstelle
- v Querkontraktionszahl
- p hydrostatischer Druck
- Q Querkraft
- u(x) Membranauslenkung
- u_B Auslenkung des Bosses
- u_M Auslenkung des Membranmittelpunktes
- V Ätzratenverhältnis von der Unterätzrate der schnellstätzenden Kante zur Tiefenätzrate auf (100)-Wafern
- W(x) axiales Widerstandsmoment $W = b(x) \cdot d_M^2 / 6$
- x Ortskoordinate
- Y Auslenkung



Biegelinie einer mit einem Boss
versehenen quadratischen Membran
und ihre Abmessungen

II. Literatur- und Patentrecherche

Zielsetzung

Das Gebiet der Mikroaktoren beinhaltet, ausgehend von verschiedenen physikalischen Effekten und Gesetzen, eine Vielzahl von Ansätzen zur Realisierung der technologischen Anforderungen. Anhand von dem in der Literatur veröffentlichten aktuellen Stand der Forschung, dient die recherchierte Literatur zur Einschätzung der existierenden Konzepte und zur Abschätzung der verschiedenen Wirkungsprinzipien und der Skalierung ihrer physikalischen Größen.

Die Recherche dient zum Auffinden relevanter Aufsätze in Zeitschriften und Tagungsbänden, Patenten und in geringem Umfang auch von Fachbüchern.

Suchprofil

Die Umsetzung der Zielsetzung in Suchprofile berücksichtigte die Bandbreite der einsetzbaren Wirkungsprinzipien. Neben dem eigentlichen Schwerpunkt Mikropumpen und Mikroventile wurden deshalb auch Mikromotoren, Mikrogreifer und Manipulatoren als Suchterme mit ihren entsprechenden weiteren Synonymen für die Literaturrecherche verwendet, da in den entsprechenden Arbeiten zum Teil grundlegende Berechnungen und Untersuchungen z.B. in der Elektrostatik durchgeführt sind.

Patente enthalten im Allgemeinen keine Grundlagenuntersuchungen, somit erfolgte die Patentsuche ausschließlich nach den Themen Mikropumpen und Ventile. Die für die Recherche verwendeten Synonyme und Ausdrücke wurden anhand vorhandener relevanter Literaturangaben aufgestellt, beziehungsweise ergänzt und überprüft. Im Zusammenspiel mit den Recherchenergebnissen werden diese iterativ überarbeitet. Der Zeitraum der durchgeführten Recherche umfaßt 1980 bis Anfang Mai 1992 für die Literaturrecherche, bzw. Mitte Juni 1992 für die Patentrecherche. Dabei ist zu berücksichtigen, daß Aufsätze insbesondere aus Veröffentlichungen in Tagungs-Bänden mit einer zeitlichen Verzögerung von bis zu einem dreiviertel Jahr in die Datenbanken eingelesen werden.

Verwendete Datenbanken

Die Durchführung der Recherchen erfolgte bei dem Datenbankanbieter STN International unter Benutzung der Datenbanken INSPEC, COMPENDEX und PHYS bzw. INPADOC für die Patentrecherche. Diese vier Datenbanken sind nach Angaben von STN wie folgt charakterisiert.

INSPEC: The Database for Physics, Electronics and Computing, ist eine bibliographische Datenbank, die die weltweit erscheinende Literatur auf den Gebieten Physik, Elektrotechnik und Elektronik, Rechner und Informationstechnologie behandelt. INSPEC entspricht den Physics Abstracts, Electrical & Electronics Abstracts und Computer & Control abstracts.

Quellen:

Ca. 4000 Zeitschriften (82%)

Forschungsberichte

21 % aller Zitate sind Konferenzbeiträge

Bücher, Hochschulschriften

COMPENDEX: (COMPuterized ENgineering inDEX) ist eine bibliographische Datenbank, die die weltweit erscheinende Literatur auf dem Gebiet des Ingenieurwesens behandelt. COMPENDEX entspricht der Referatezeitschrift Engineering Index.

Quellen

Ca. 4500 Zeitschriften (63%)

25 % aller Zitate sind Konferenzbeiträge zu ca. 2000 Konferenzen pro Jahr

Forschungsberichte, Bücher

PHYS (PHYSikalische Berichte) ist eine bibliographische Datenbank über die weltweit erscheinende Literatur auf allen Gebieten der Physik, Astronomie, Astrophysik und auf verwandten Gebieten. Die Datenbank entspricht der Referatezeitschrift Physikalische Berichte/Physics Briefs.

Quellen

Ca. 2200 Zeitschriften und Serien (77%)

28 % aller Zitate sind Konferenzbeiträge

Bücher (9%)

Forschungsberichte (7%)

INPADOC (INternational PAtent DOcumentation Center) ist die weltweit umfassendste Patentdatenbank. Sie enthält die bibliographisch Daten und Patentfamiliendaten von Patent- und Gebrauchsmusterschriften von 56 Patentorganisationen einschließlich dem Europäischen Patentamt und der Weltorganisation für Geistiges Eigentum (WIPO).

Quellen

INPADOC Patent Gazette, basierend auf den Daten der Patentämter

INPADOC Patent Rechtsstandsdienst

Recherchenergebnisse

Die Literaturrecherche lieferte 334 Zitate. Einige wenige Zitate sind nicht projektrelevant. Bei der Durchführung einer Recherche ist es jedoch nicht möglich, Fehlzitate, durch das Ausschließen von Zitaten, vollständig zu vermeiden, da durch die nicht nachvollziehbare Reduzierung der Zitatsmenge die Kontrolle der Vollständigkeit der Ergebnisse verloren geht. Ein hoher Anteil der recherchierten Zitate ist zwischenzeitlich am HSG-IMIT vorhanden.

An Patentschriften sind für das Themengebiet Mikropumpen 62 Zitate und für das Gebiet Mikroventile 31 Zitate erfaßt worden. Diese Recherche diente auch zur Ermittlung der relevanten internationalen Patent Klassifikationen (ICM). In der nächsten Patentrecherche kann somit gezielter nach typischen Verklausulierungen von Patenttiteln (fiktives Beispiel: "Anordnung zum Fördern kleinster Mengen" anstatt "Mikropumpe") gesucht werden.

Benutzungsbeschränkungen

Die einzelnen Datenbankhersteller auferlegen folgende Benutzungsbeschränkungen, die für die drei häufigsten verwendeten Datenbanken etwas unterschiedlich ausfallen. Zuerst seien die allgemeinen Benutzungsbeschränkungen aufgeführt, danach die Einschränkungen für COMPENDEX und INSPEC.

Für die Datenbank PHYS und INPADOC sind die allgemeinen Benutzungsbeschränkungen gültig.

Für die erstellte Literaturecherche ist es nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand nachvollziehbar, welche Quelle einer der drei Datenbanken entstammt. Um den Benutzungsbeschränkungen in jedem Falle Rechnung zu tragen, sind jeweils die sich ergebenen maximalen Benutzungsbeschränkungen einzuhalten.

Die Projektpartner verpflichten sich durch Ihre Teilnahme an dem Projekt zur Einhaltung dieser Benutzungsbeschränkungen und seien an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen.

Benutzungsbeschränkungen

1. Alle Urheberrechte bleiben vorbehalten. Sofern in diesen Benutzungsbeschränkungen nicht anders aufgeführt, kann der Benutzer ohne Verletzung der Urheberrechte Recherchenergebnisse für folgende Zwecke verwenden:
 - (a) für urheberrechtlich geschützte wissenschaftliche Veröffentlichungen, wenn die Recherchenergebnisse zu der Veröffentlichung gehören, und
 - (b) für Berichte an Regierungsstellen, die durch Gesetz oder Regierungserlass vorgeschrieben sind.

2. Recherchenergebnisse in maschinenlesbarer Form, die der Benutzer erhält, bleiben Eigentum des Datenbankherstellers. Sofern in diesen Benutzungsbeschränkungen nicht anders aufgeführt, kann der Empfänger die Recherchenergebnisse in maschinenlesbarer Form für folgende Zwecke verwenden:

- (a) Bearbeitung oder Änderung des Formates von Recherchenergebnissen, um Suchbegriffe für die Verwendung in Dateien und Systemen zu erzeugen;
- (b) Kombination von Recherchenergebnissen mit Resultaten aus anderen Recherchen, Dateien oder Systemen zur Bildung einer einheitlichen Datei von Recherchenergebnissen;
- (c) Bearbeitung der Recherchenergebnisse zur Entfernung unzutreffender Antworten oder zur Änderung des Formats solcher Ergebnisse.
Der Empfänger ist nicht berechtigt, maschinenlesbare Recherchenergebnisse als Datenbank oder als Teil einer Datenbank zu verwenden, um daraus durch programmierte (gezielte) Suche Antworten (Daten) selektiv zu ermitteln. Der Empfänger kann eine einzige gedruckte Kopie von maschinenlesbaren Recherchenergebnissen erstellen, vorausgesetzt, er zerstört die maschinenlesbare Datei nach der Erstellung der gedruckten Version. Für andere als die hier aufgezählten Verwendungen von maschinenlesbaren Recherchenergebnissen benötigt der Empfänger die ausdrückliche, schriftliche Genehmigung des Datenbankherstellers.

COMPENDEX und Ei Engineering Meetings:

Die Nutzung oder Vervielfältigung der Gesamtheit oder von Teilen von COMPENDEX und Ei Engineering MEETINGS als Ersatz dieser Datenbanken, sowie jegliche entgeltliche Überlassung von Veröffentlichungen, die im Engineering Index Catalog verzeichnet sind, ist nicht zulässig.

Die Verwendung von Unterlagen, die auf diese Weise bereitgestellt werden, oder irgendwelche Vervielfältigung zum Zweck der Ausleihe, des Weiterverkaufs, der Vermietung oder des Geschenks an eine dritte Person, Organisation oder Körperschaft ist strikt untersagt.

Kein Teil von COMPENDEX darf in maschinenlesbarer Form zur Weitergabe an Dritte vervielfältigt oder in irgendeiner Weise für Dritte zugänglich gemacht werden.

INSPEC:

INSPEC-Daten dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung der Institution of Electrical Engineers, London in Hardcopy oder maschinenlesbarer Form dupliziert werden. Ausgenommen ist eine zeitlich begrenzte Speicherung (bis zu einem Monat) in maschinenlesbarer Form zur Umformatierung oder Bearbeitung sowie die eingeschränkte Reproduktion von ausgedruckten Informationen bis zu fünfundzwanzig (25) Exemplaren, zur ausschliesslichen Verbreitung innerhalb der Organisation des Benutzers.

Kopien, die unter diesem Vorbehalt hergestellt werden, dürfen auf keinen Fall zum Weiterverkauf angeboten werden.

III. Berechnungen an mikromechanischen Strukturen für die Aktorik mit Hilfe der Methode der finiten Elemente

1. Einleitung

Wesentliche Bestandteile der Mikroaktoren sind die durch angelegte Stellkräfte zu bewegenden Teile. Im Rahmen des Vorhabens sollen Aktor-Grundstrukturen hergestellt werden, die zum Aufbau von Mikroaktoren wie Mikroventile für Gase und Flüssigkeiten, Mikropumpen für Flüssigkeiten und mikromechanische Schalter auf Membranbasis geeignet sind. Ausgangspunkt für die Herstellung und Untersuchung der genannten mikromechanischen Aktorkomponenten bilden zunächst zwei membranartige Silizium-Grundstrukturen. Dies ist einerseits eine unstrukturierte, anisotrop geätzte Siliziummembran und zum anderen eine im Membranzentrum mechanisch verstieifte Siliziummembran, häufig auch als sogenannte Boss-Struktur bezeichnet. Beide Grundstrukturen sind bereits von Sensoranwendungen bekannt, wo sie beispielsweise zur Realisierung von Kraft- und Drucksensoren erfolgreich eingesetzt werden. Während jedoch bei Sensoren zur Erzielung eines weitgehend linearen Sensorverhaltens hauptsächlich kleine, gezielte Strukturverformungen im Vordergrund stehen, ergibt sich in der Aktuatorik mit der Intention möglichst großer Stellwege gerade hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit der Aktorstrukturen und der erforderlichen Stellkräfte ein ganz neues Anforderungsprofil. Die Berechnungen der beiden zunächst ausgewählten Aktorgrundstrukturen (Siliziummembran mit/ohne Boss) sind daher unter folgender Zielsetzung durchgeführt worden:

- a) Abschätzung der erforderlichen Stellkräfte für definiert vorgegebene Stellwege bzw. Auslenkung der beiden Membranstrukturen bei Veränderung bestimmter Geometrieparameter der Struktur. Die ermittelten Kräfte sollen für den weiteren Projektverlauf erste Aufschlüsse darüber geben, welche elektromechanischen Wandlereffekte hinsichtlich der erreichbaren Kraftwirkungen zur Erlangung bestimmter Stellwege überhaupt geeignet sind.
- b) Untersuchungen zur mechanischen Spannungsverteilung in der Aktor-Grundstruktur und erste Abschätzung der im Bauteil auftretenden mechanischen Belastungen anhand der auftretenden Spannungsmaxima in Abhängigkeit von Strukturgeometrie und Strukturverformung.

Aufgrund der häufig komplexen Strukturen und der zu berücksichtigenden physikalischen

schen Vorgänge an mikrotechnischen Bauteilen, wie z.B. piezoelektrischer Effekt oder auch Strömungs- und Konvektionsvorgänge, werden zu ihrer Berechnung vorzugsweise die numerischen Methoden der Finiten Elemente (**FEM**) oder der Randelemente (**BEM**) eingesetzt. Dennoch bestehen Anwendungsfälle, in denen analytische Berechnungsverfahren spezifische Vorteile aufweisen, siehe z.B. Tabelle 1.

Unverzichtbar sind diese vor allem für

- ▶ Anwender, denen keine entsprechende Rechner-Infrastruktur zur Verfügung steht
- ▶ Kontrolle von FEM- und BEM-Ergebnissen
- ▶ Abschätzungs- und Übersichtsberechnungen

Am Institut für Mikro- und Informationstechnik IMIT wurden daher beide Wege beschritten und die ausgewählten Strukturen sowohl analytisch als auch mit FEM berechnet.

2. Analytische Berechnung quadratischer Membranen unter Belastung durch Druck oder Einzelkraft

Gegenüber Zungen- und Brückenstrukturen, die weitgehend nach der Theorie der Balkenbiegung berechenbar sind [1], stellen technische Membranen Plattenelemente dar. Bestimmte, in der Praxis häufig auftretende Membranformen können vereinfacht behandelt werden, so z.B. lange rechteckige oder rotationssymmetrische Membranen [2-4]. Algebraische Gleichungen, in denen eine angenommene Biegefläche durch Anpassung geeigneter Funktionen angenähert wird, sind auch für quadratische Platten und solche mit kleinem Verhältnis zwischen langer und kurzer Seite bekannt [5-7]. Während solche Bauelemente in der Technik bereits seit langer Zeit eingesetzt werden, stellen die in der Mikrotechnik häufig hergestellten Platten mit Mittenversteifung (Boss) ein neues Problem dar. In einem ersten Ansatz wurden hier mittenversteifte quadratische Membranen durch einen gedachten Schnitt entlang der Diagonalen in Trapezabschnitte zerlegt und somit das Problem der Plattenberechnung auf das eines Balkens mit variabler Breite reduziert.

Analytische Verfahren	Numerische Verfahren
+ Struktur in einem Schritt berechenbar → Schnelligkeit	+ Beliebig komplexe Strukturen hinreichend genau approximierbar
+ Übersichtsberechnungen leicht durchführbar	+ Iterative Verfahren ermöglichen die Berechnung von hochgradig nichtlinearen Vorgängen sowie Wechselwirkungen verschiedener Effekte
+ geringe Datenmengen	+ Optimierungsberechnungen möglich
+ Ergebnis durch Nachrechnung verifizierbar	+ Leichte Handhabbarkeit moderner Programme
+ Analytische Gleichung nach einzelnen Parametern differenzierbar → Abschätzung des Einflusses von Parametern	+ Gute Aufbereitung der Ergebnisse in Verbindung mit leistungsfähigen Grafikprozessoren
- Analytische Zusammenhänge oftmals unbekannt oder schwer mathematisch darstellbar	- Aufwand an Rechenzeit und Speicherplatz steigt überproportional zur Modellgröße
- Analytisch berechenbare Strukturen erfordern weitgehende Vereinfachungen → geringe Übereinstimmung zwischen Modell und Realität	- Hoher Investitionsbedarf in Hardware, Software und Schulung
- Oft fundierte mathematische Kenntnisse notwendig	- Modellierungsfehler können schwer erkennbare Ergebnisabweichungen bewirken

Tabelle 1: Vergleich analytischer Berechnungsverfahren und FEM / BEM

2.1. Balken variabler Breite unter Einzellast

Eine in trapezförmig aufgeteilte quadratische Platte mit Mittenversteifung ist mit den verwendeten Maßen in Abb. 1 dargestellt. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- ▶ Einspannung der Platte an den Koordinaten $x=0$ und $x=d$ unendlich steif, d.h. die Biegelinie verläuft horizontal
- ▶ kleine Auslenkung, d.h. es treten, von der Biegebelastung abgesehen, keine Kräfte in der Plattenebene auf
- ▶ isotropes Material
- ▶ Gültigkeit der linearen Biegetheorie (anfangs ebene Querschnitte normal zur Plattenebene bleiben eben und normal)

Wird der gesamte Boss mit einer Kraft F zentrisch belastet, so gilt für den Querkraft $Q(x)$ und Momentenverlauf $M(x)$ über den nun betrachteten Balken:

$$\begin{aligned} Q(x) &= -\frac{F}{4} \\ M(x) &= \frac{1}{4} (M_R - Fx) \end{aligned} \quad (1)$$

und für die Krümmung der Biegelinie:

$$y''(x) = \frac{1}{EJ(x)} M(x) = \frac{L}{4EJ_1} \frac{M_R - Fx}{L-x} \quad (2)$$

Nach Integration folgt dann:

$$y'(x) = \int y''(x) dx = \frac{L}{4EJ_1} (-M_R \ln(L-x) + F [x + L \ln(L-x)]) + c_1 \quad (3)$$

Mit der Randbedingung $y'(x=0) = 0$ ergibt sich:

$$y'(x) = \frac{L}{4EJ_1} (-M_R \ln \frac{L-x}{L} + F [x + L \ln \frac{L-x}{L}]) \quad (4)$$

Die Randbedingung $y'(x=d) = 0$ liefert:

$$M_R = \frac{F}{\ln \frac{L-d}{L}} (d + L \ln \frac{L-d}{L}) \quad (5)$$

Nochmalige Integration liefert $y(x)$:

Die Konstante c_2 folgt schließlich aus der Randbedingung $y(x=0) = 0$, sodaß sich

$$y(x) = \frac{L}{4EJ_1} ([FL - M_R] [L-x] [1 - \ln \frac{L-x}{L}] + \frac{1}{2} Fx^2) + c_2 \quad (6)$$

die Biegelinie darstellt als

$$y(x) = \frac{L}{4EJ_1} ([M_R - FL] [x + (L-x) \ln \frac{L-x}{L}] + \frac{1}{2} Fx^2) \quad (7)$$

Abb. 2 stellt einen Vergleich zwischen der Auslenkung in Membranmitte nach Gl. (7) und FEM-Rechnungen für kleine Verformungen dar. Die Abweichungen der hergeleiteten Gleichung liegen demnach im Bereich weniger Prozentpunkte. Eine Gegenüberstellung der nichtlinearen FE-Berechnungen für die hier herzustellenden Membranen mit den analytischen Ergebnissen findet sich in Tabelle 5. Die Werte differieren zum Teil erheblich. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ab Auslenkungen von ca. der halben Membrandicke der lineare Ansatz der Analytik nicht mehr gültig ist. Statt dessen treten rückstellende Kräfte in der Membranebene auf, die zu einer auslenkungsabhängigen Versteifung des Systems ("stress stiffening") führen. Einen Ansatz, diese rückstellenden Kräfte in die $F(y)$ -Beziehung mit aufzunehmen, zeigt Abb. 3. Unter Berücksichtigung der Normalkomponente der Membranspannung ergibt sich so für die ganze Membran [8]:

$$F = \frac{16yEd^3 \ln \frac{b_2}{b_1}}{3(b_1-b_2) [(b_1+b_2) \ln \frac{b_2}{b_1} 2(b_1-b_2)]} + \frac{8yEd [(b_1-b_2) - \sqrt{(b_1-b_2)^2 + 4y^2}]}{\sqrt{(b_1-b_2)^2 + 4y^2} \ln \frac{b_2}{b_1}} \quad (7a)$$

2.2. Balken variabler Breite unter Flächenlast

Wird der betrachtete Balken mit konstantem Druck p belastet, so gilt mit der Breite

$b(x) = b_1(L-x)/L$ für die spezifische Längenlast q , Querkraft Q und Moment

M :

$$\begin{aligned} q(x) &= pb_1 - p \frac{b_1}{L} x \\ Q(x) &= F_R + pb_1 x - \frac{pb_1}{2L} x^2 \\ M(x) &= M_R + F_R x + \frac{1}{2} pb_1 x^2 - \frac{pb_1}{6L} x^3 \end{aligned} \quad (8)$$

F_R ergibt sich aus der Randbedingung $Q(x=d) = 0$ zu

$$F_R = pb_1 d \left(\frac{d}{2L} - 1 \right) \quad (9)$$

Die Krümmung der Biegelinie stellt sich dar als

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EJ(x)} = \frac{L}{4EJ_1} \frac{M_R + F_R x + \frac{pb_1}{2} x^2 - \frac{pb_1}{6L} x^3}{L - x} \quad (10)$$

Nach Integration und Einsetzen der Randbedingung $y'(0) = 0$:

$$\begin{aligned} y'(x) &= \frac{L}{EJ_1} \left[M_R \ln \frac{L-x}{L} - F_R \left(x + L \ln \frac{L-x}{L} \right) \right. \\ &\quad \left. + pb_1 \left(-\frac{1}{3} Lx - \frac{1}{6} x^2 + \frac{1}{18L} x^3 - \frac{1}{3} L^2 \ln \frac{L-x}{L} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Wie oben ergibt sich das Reaktionsmoment M_R aus der Randbedingung

$$y'(x=d) = 0 :$$

$$M_R = -F_R \left[L + \frac{d}{\ln \frac{L-d}{L}} \right] - \frac{pb_1}{6 \ln \frac{L-d}{L}} \left[2dL + d^2 - \frac{d^3}{3L} \right] - \frac{1}{3} L^2 \quad (12)$$

Nach weiterer Integration und Einsetzen der Randbedingung $y(x=0) = 0$ folgt

wieder die Biegelinie -

$$\begin{aligned} y(x) &= \frac{L}{4EJ_1} \left[x + \ln \frac{L-x}{L} [L-x] \right] \left(M_R + F_R L + \frac{1}{3} pb_1 L^2 \right) - \frac{1}{2} F_R x^2 \\ &\quad + \frac{1}{6} pb_1 \left(-Lx^2 - \frac{1}{3} x^3 + \frac{1}{12L} x^4 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Ein Vergleich zwischen FE-Ergebnissen für kleine Verformungen einer Membran mit Gl. (13) findet sich wieder in Abbildung 3 und Tabelle 5. Im Bereich großer Bossbreiten b_2 liefert Gl. (13) etwas zu große Membransteifigkeit, befindet sich jedoch generell in guter Übereinstimmung mit der numerischen Rechnung.

Aus der Literatur [5] ist eine algebraische Beziehung für große Verformungen einer rechteckigen Platte unter Druckbelastung bekannt. Nach R. Hooke gilt im Fall quadratischer Membranen:

$$p = \frac{Ed_M^3}{12(1-\nu^2)b_1^4} \left[50,3815 \cdot u_M + 18,9792 \cdot \frac{u_M^3}{d_M^2} \right] \quad (14)$$

Diese Funktion gibt die Durchbiegung im großen Verformungsbereich sehr gut wieder, gilt jedoch nur für unstrukturierte Platten.

Tabelle 5 vergleicht auch in diesem Fall die Ergebnisse der FE- und der analytischen Berechnung. Die Funktion aus Gl. (14) stimmt gut mit den hier behandelten Geometrien und Belastungen überein, während Gl. (13) die Bauteilversteifung aufgrund ihres linearen Ansatzes nicht wiedergeben kann.

2.3. Zusammenfassung: Mittenversteifte Membran unter Belastung durch Druck und Einzelkraft

Zur näherungsweisen analytischen Berechnung einer quadratischen Membran mit Mittenversteifung wird diese durch Freischneiden entlang der Diagonalen auf einen Balken variabler Breite reduziert. Die Gleichung der Biegelinie lässt sich dann ohne Schwierigkeiten für den Fall der Belastung durch eine Einzelkraft, konstanten Druck und eine Kombination beider Lastfälle berechnen. Im üblicherweise vorliegenden Fall ganzflächiger Druckbelastung einer versteiften Membran errechnet sich die Biegelinie für kleine Auslenkungen durch Addition von Gl. (7) und Gl. (13). Als Kraft ist dann $F = p \cdot b_2^2$ in Gl. (7) einzusetzen.

Zur Berechnung großer Auslenkungen von versteiften Membranen unter Einzelkraft wurde eine Näherungsbeziehung hergeleitet, während zur Berechnung der großen Verformungen einer unstrukturierten Membran unter hydrostatischem Druck (Flächenlast) auf die Literatur verwiesen wird. Eine Formulierung der großen Auslenkungen strukturierter Membranen infolge hydrostatischen Drucks ist in Vorbereitung.

Die hier durchgeföhrten Berechnungen wurden in ein Turbo-Pascal-Programm umgesetzt.

3. Das Finite-Elemente-Modell

Am Hahn-Schickard-Institut steht mit dem kommerziellen Programmsystem ANSYS eine leistungsfähige Finite-Elemente-Software zur Verfügung, die insbesondere eine schnelle Variation geometrischer Parameter und Belastungsgrößen zuläßt.

Die statische Analyse erfolgt mit Volumenelementen (STIF45), ein achtknotiges isoparametrisches Quaderelement mit jeweils 3 translatorischen Freiheitsgraden an jedem Elementknoten. Die rechteckige Grundform der Aktorstrukturen erlaubt die Reduktion des Rechenmodells auf ein Viertel der Gesamtstruktur, indem an den beiden Schnittflächen des Viertelmodells symmetrische Verschiebungsrandbedingungen für die betreffenden Elementknoten vereinbart werden. Dies verringert die Rechenzeiten erheblich, da der Rechenaufwand mit zunehmender Gesamtzahl der Elemente, Knoten und damit auch der Modelfreiheitsgrade überproportional ansteigt. Um den Elementaufwand entsprechend den zu erwartenden mechanischen Spannungsverteilungen im Bauteil partiell variieren zu können, wurden für die Einfach-Membranstruktur und die Boss-Membran eine parametrisierte Modellgenerierung vorgenommen. Die hieraus resultierende örtlich unterschiedliche Vernetzungsdichte ist qualitativ anhand der Abbildungen 4 und 5 ersichtlich. Die Gesamtzahl der in die Rechnung eingehenden Elemente und damit die Rechenzeit wird hierdurch noch weiter reduziert.

Da bei den angestrebten Aktorprinzipien die lateralen Abmessungen der Membranstrukturen im Bereich einiger Millimeter liegen werden, eine adäquate Membrandicke jedoch in der Größenordnung von 1/100 Millimetern zu erwarten ist, ergeben sich bei weitmaschiger Strukturvernetzung sehr ungünstige Längen-Dicken-Verhältnisse für die Elementseiten. Das FE-Modell sieht daher für Strukturbereiche, in denen hohe mechanische Spannungsgradienten zu erwarten sind, eine örtlich feine Strukturvernetzung vor, die sich in Gebieten geringerer Spannungskonzentrationen entsprechend aufweitet (siehe Abb. 6 und 7).

Die erstellten FE-Modelle lassen zunächst die Richtungsabhängigkeit des Materialverhaltens von Silizium unberücksichtigt. Sie setzen ein isotropes Material voraus, da bei den zu berechnenden Strukturgeometrien und Verformungen hauptsächlich die Dehnungen und Spannungen in der Membranebene von Bedeutung sind. Ausgehend von Aktor-Grundstrukturen mit (100)-orientierter Siliziummembran wird zur Beschreibung des näherungsweise isotropen elastischen Materialverhaltens mit einem Elastizitätsmodul $E = 168.9 \text{ GPa}$ und einer Poissonzahl $\nu = 0.064$ gerechnet.

Da für Aktoranwendungen insbesondere große Strukturverformungen, d.h. Membran- bzw. Bossauslenkungen in Größenordnung der Membrandicke d_M von Interesse sind, sind bei den FE-Rechnungen die Änderung der räumlichen Anordnung der Elemente unter der Wirkung der Lasten und der Struktursteifigkeit infolge des Spannungszustandes zu berücksichtigen. Dies führt zu nichtlinearen FE-Berechnungen, die bei ANSYS durch Setzen der "large deflection"- und "stress stiffening"-Optionen in iterativer Form durchgeführt werden.

3.1. FE-Berechnungen der Bossmembran

Als erste Grundlage zur Dimensionierung der Bossmembran dienen die weiter unten dargelegten Überlegungen bezüglich möglicher Kompensationsstrukturen, die beim anisotropen Ätzen der Membran-Mittenversteifung in Silizium technologisch erforderlich sind. Ausgehend von diesen verschieden geformten Kompensationsstrukturen ergeben sich für die sogenannte freie Membranlänge d , dem Abstand zwischen Bossoberkante und Membranaußenkante, technologisch bedingte Mindestabstände.

3.1.1 Die varierten Modellparameter

- Um für die FE-Berechnungen die Vielzahl der möglichen Parametervariationen (Membrandicke d_M , freie Membranlänge d , Bossgröße b , Ätztiefe d_T und Boss- bzw. Membranmittenauslenkung u_B bzw. u_M) sinnvoll einzugrenzen, wurde für die ersten Rechnungsläufe eine freie Membranlänge $d = 600 \mu\text{m}$ angenommen. Diese Membranlänge genügt bereits dem Platzbedarf von dreien der weiter unten aufgeführten Eckenkompensationen. Obgleich nur eine der vier genannten Kompensationsgeometrien, das sogenannte "Erweiterte Zentrische Quadrat", einen nahezu ideal kegelstumpfförmigen Boss ergibt, geht das FE-Modell zunächst vereinfachend von dieser Bossform mit quadratischem Querschnitt aus.
- Da die im Bauteil auftretenden mechanischen Belastungsmaxima bei gegebener Strukturauslenkung primär vom mechanisch leicht verformbaren Membranbereich zwischen Boss und Sockel abhängen, wird im folgenden die Bossgröße b einheitlich auf $800 \mu\text{m}$ festgesetzt. Der Boss wirkt bei der gewählten Abmessung als nahezu ideale Mittenversteifung, bleibt also praktisch in seiner Ausgangsform, wie dies für Anwendungen in der Aktuatorik, z.B. Ventil-Verschlußteil, sinnvoll erscheint.

- Die Boss- und Sockelhöhe d_w der simulierten Siliziumstruktur wird auf $525 \mu\text{m}$ (Waferdicke) festgesetzt, sodaß sich die Ätztiefe d_T ausgehend von diesem Wert abzüglich der jeweiligen Membrandicke errechnet.
- Um anhand der verbleibenden Parametervariationen von Membrandicke und Bossauslenkung erste Anhaltspunkte für eine praktikable geometrische Dimensionierung zu erhalten, wurden bei Membrandicken d_M von $10, 15$ und $20 \mu\text{m}$ jeweils Bossauslenkungen u_B von $10, 15$ und $20 \mu\text{m}$ schrittweise vorgegeben (siehe Tabelle 3.1). Für die aus Abbildung 5 ersichtliche Bossmembran ($1/4$ der Gesamtstruktur) wurde hierzu am mittleren Bossknoten eine entsprechende Verschiebungsrandbedingung vereinbart.

3.1.2 Die FE-Ergebnisse

Die für bestimmte Bossauslenkungen erforderlichen Stellkräfte werden durch die am fest eingespannten Sockelfuß wirksamen Reaktionskräfte F_R größtmäßig wiedergegeben. Zum Vergleich der FE-Ergebnisse mit den beschriebenen, parallel durchgeföhrten, analytischen Strukturberechnungen wird aus den Strukturauslenkungen und den berechneten Reaktionskräften jeweils eine mittlere Federkonstante K ermittelt.

Als Abschätzung für die im Bauteil vorkommenden mechanischen Strukturbelastungen werden die mechanischen Hauptspannungsrichtungen betrachtet. Dies erscheint insofern sinnvoll, als Silizium nahezu ideal spröde ist und der Bruch spröder, homogener Materialien bei Zugbelastung senkrecht zur größten vorkommenden Spannung auftritt.

Wie auch aus Abbildung 7 qualitativ zu ersehen ist, liegen die Gebiete der Spannungsmaxima erwartungsgemäß unmittelbar an der Bossecke. Bei der vorgegebenen Bossauslenkung in y -Richtung ergeben sich Druckspannungen am Boss-Membranübergang (Membranunterseite) und Zugspannung an der Membranoberseite oberhalb der Bossecke. Weitere mechanische Spannungsmaxima ergeben sich nahe den Übergangsbereichen von Membran und Siliziumsockel, ein Druckspannungsmaximum an der Membranoberseite und ein Zugspannungsmaximum an der Membranunterseite.

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, führen die im Rahmen der FE-Rechnung angenommenen Strukturauslenkungen teilweise zu mechanischen Belastungen im Gigapascal-Bereich. In der Literatur finden sich sehr unterschiedliche Angaben über die mechanische Bruchfestigkeit von Silizium, die je nach Kristallorientierung, Materialvorbehandlung und Grad der Oberflächenbeschädigungen meist zwischen

Zugspannungen von 300 MPa und mehreren GPa streuen ([9-12]). Besonders ausgeprägte Spannungsmaxima bauen sich in direkter Umgebung von Kerben auf. Bei der modellierten Bossmembran finden sich solche Kerbbereiche entlang der Bosskanten (Membranunterseite) mit Spannungsmaximum unmittelbar an der Bossecke und entlang der Membranaußenkante im Übergangsbereich zwischen der (111)-Böschung und der Membranunterseite.

Anhand der in Tabelle 2 mit "*" ausgewiesenen Spannungen im Kerbbereich lassen sich derzeit nur qualitative Aussagen hinsichtlich der Existenz solcher Kerb-Spannungskonzentrationen treffen. Dies ist einerseits dadurch bedingt, daß die Höhe der Kerbspannungswerte sehr empfindlich durch die Kerbgeometrie beeinflußt wird, die möglichst bis in den Submikrometerbereich zu berücksichtigen ist [13]. Andererseits führt die zunächst vereinfachte FE-Elementierung der Kerben aufgrund der relativ großen Neigungswechsel aneinander angrenzender Elemente eventuell zu Inkonsistenzen bei den Oberflächen-Spannungsverteilungen benachbarter Elemente im Kerbbereich. Dies drückt sich bei den FE-Betrachtungen insbesondere dadurch aus, daß der Betrag der mechanischen Kerbspannungsmaxima von der FE-Vernetzungsdichte im Kerbspannungsbereich abhängig ist. So ergab sich beispielsweise bei einer Reduzierung der Elementkantenlänge von 10 auf 5 μm bei sonst gleichen Modellparametern eine Erhöhung der Kerspannung in einer Größenordnung von 30%. Die Spannungsmaxima an den kerbfreien Membranbereichen veränderten sich hingegen lediglich im Bereich < 5% und können daher unter Berücksichtigung der vereinfachenden Annahmen bereits als recht gute Richtwerte betrachtet werden.

Da bereits bei den bislang diskutierten geometrischen Strukturabmessungen mit freier Membranlänge $d = 600\mu\text{m}$, wie aus Tabelle 2 ersichtlich, die Spannungen kerbspannungsfreier Strukturbereiche 300 MPa teils erheblich überschreiten, wurde in Tabelle 3 die freie Membranlänge d auf 1200 μm erhöht bei gleichbleibender Bossabmessung von $b = 800\mu\text{m}$. Die aufgrund der vergrößerten freien Membranlänge berechneten mechanischen Spannungen bleiben zumindest für die kerbspannungsfreien Bereiche (Spalten ohne *-Kennung) weitgehend unterhalb 300 MPa.

3.2 FE-Berechnungen der Einfachmembran

Den Berechnungen an der Einfachmembran als zweiter Aktor-Grundstruktur werden die lateralen Abmessungen der mittenversteiften Membran mit freier Membranlänge $d = 1200 \mu\text{m}$ zugrundegelegt, allerdings ohne Boss-Struktur. Die unterschiedlichen Membranauslenkungen werden bei der FE-Berechnung indirekt durch adäquate Druckbeaufschlagung an der Membranunterseite erreicht, da eine Auslenkung des Membranmittelknotens (analog zur Boss-Struktur) aufgrund der fehlenden Mittenversteifung mechanisch gesehen zu einer nicht tolerierbaren Singularität führen würde. Um die an der Bossmembran erhaltenen Ergebnisse mit denen der Einfachmembran besser vergleichen zu können, wurden die dort als Verschiebungsrandbedingung vorgegebenen Strukturauslenkungen durch Druckrandbedingungen über analytisch abgeschätzte Druckwerte mechanisch verträglich erzeugt. Wie bereits von Sensoranwendungen her bekannt, treten die Spannungsmaxima in der Membranmitte und an den Membranaußenkanten auf (siehe auch Abb. 6). Bei vorgegebener Druckbeaufschlagung von der Membranunterseite her ergeben sich wie bei der Boss-Struktur hohe Kerbspannungen entlang der Membranaußenkanten, die wiederum nur rein qualitative Aussagen erlauben. In der Membranmitte ergibt sich ein Druckspannungsmaximum an der Membranunterseite und ein Zugspannungsm maximum an der Membranoberseite. Wie aus Tabelle 4 zu entnehmen ist, liegen die mechanischen Bauteilbelastungen infolge der fehlenden Membranmittenvorsteifung deutlich unter den in Tabelle 3.2 aufgeführten Spannungswerten.

4. Weitere Vorgehensweise

Die bisher erarbeiteten Zwischenergebnisse basieren bislang auf rein analytischen Betrachtungen und FE-Berechnungen, unter Annahme der bereits dargelegten Modellvereinfachungen. Um einerseits die erarbeiteten Ergebnisse mit ersten Messungen von entsprechenden Aktor-Teststrukturen vergleichen zu können, aber auch parallel die bestehende FE-Modellierung geeignet weiterführen zu können, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Herstellung und Test von ersten Aktor-Teststrukturen mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen. Definierte mechanische Belastung der Strukturen durch Kraft- bzw. Druckbeaufschlagung und Messung der Membran- bzw. Bossauslenkung bis Materialversagen auftritt.
- Parallel hierzu sind FE-Berechnungen mit den konkret vermessenen geometrischen Dimensionen der Aktor-Teststrukturen durchzuführen, um die Ergebnisse mit den Messungen korrelieren zu können.
- Zur genaueren Untersuchung der mechanischen Belastungsgrenze der Teststrukturen sollen die experimentell ermittelten Grenzbelastungen als Kräfterandbedingungen in die FE-Simulationen übernommen werden. Die aufgrund dieser Strukturbelastung errechneten mechanischen Spannungsmaxima sind bisher bekannten Literaturangaben gegenüberzustellen.
- Da für die Berechnung der mechanischen Kerbspannungen eine möglichst detaillierte Kenntnis der Eckengeometrie der Aktorstrukturen erforderlich ist, sind die Teststrukturen diesbezüglich möglichst genau zu vermessen. Die ermittelten Kerbgeometrien bilden die Grundlage zu weiterführenden verfeinerten FE-Modellierungen. Hierfür bietet sich insbesondere die sogenannte Submodell-Technik an, bei der ausgehend vom Grobmodell der Aktorstruktur kleinere Strukturausschnitte mit wesentlich verfeinerter Elementierung und unter Umständen modifizierter Eckengeometrie genauer berechnet werden können.
- Zur Entschärfung der mechanischen Belastungsspitzen sind weitere technologisch realisierbare Membran- bzw. Bossgeometrien zu modellieren und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften diesbezüglich zu untersuchen.

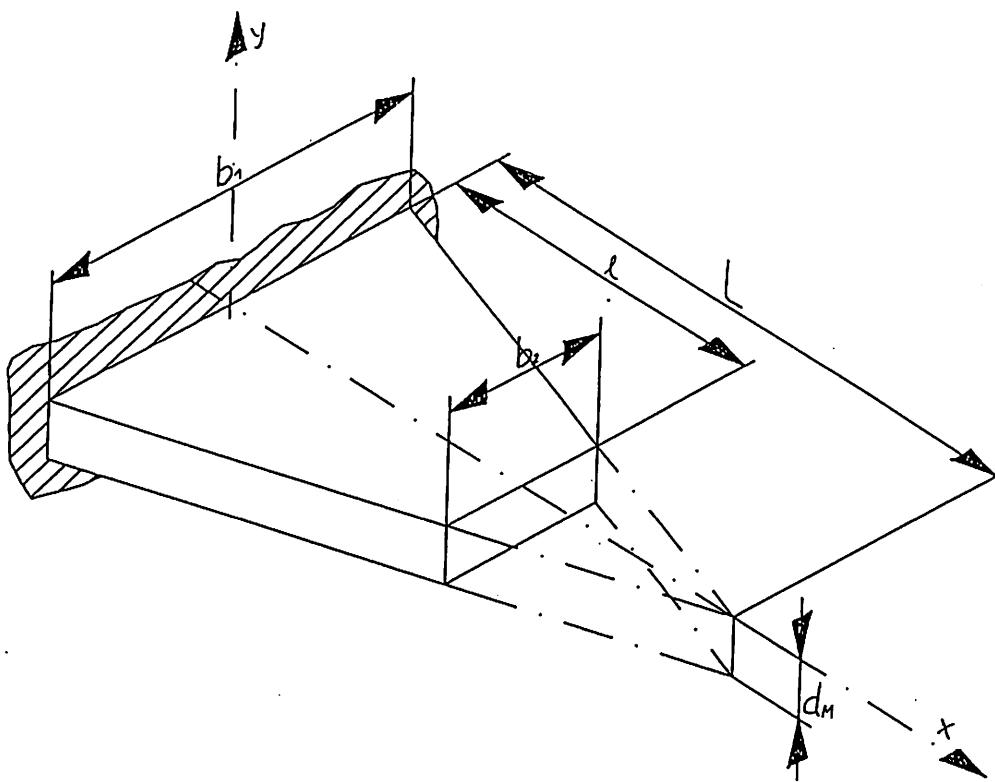


Abb. 1: Skizze des betrachteten Membranelements mit den verwendeten Maßen Membranbreite b_1 , halbe Membranlänge L und Dicke d_M

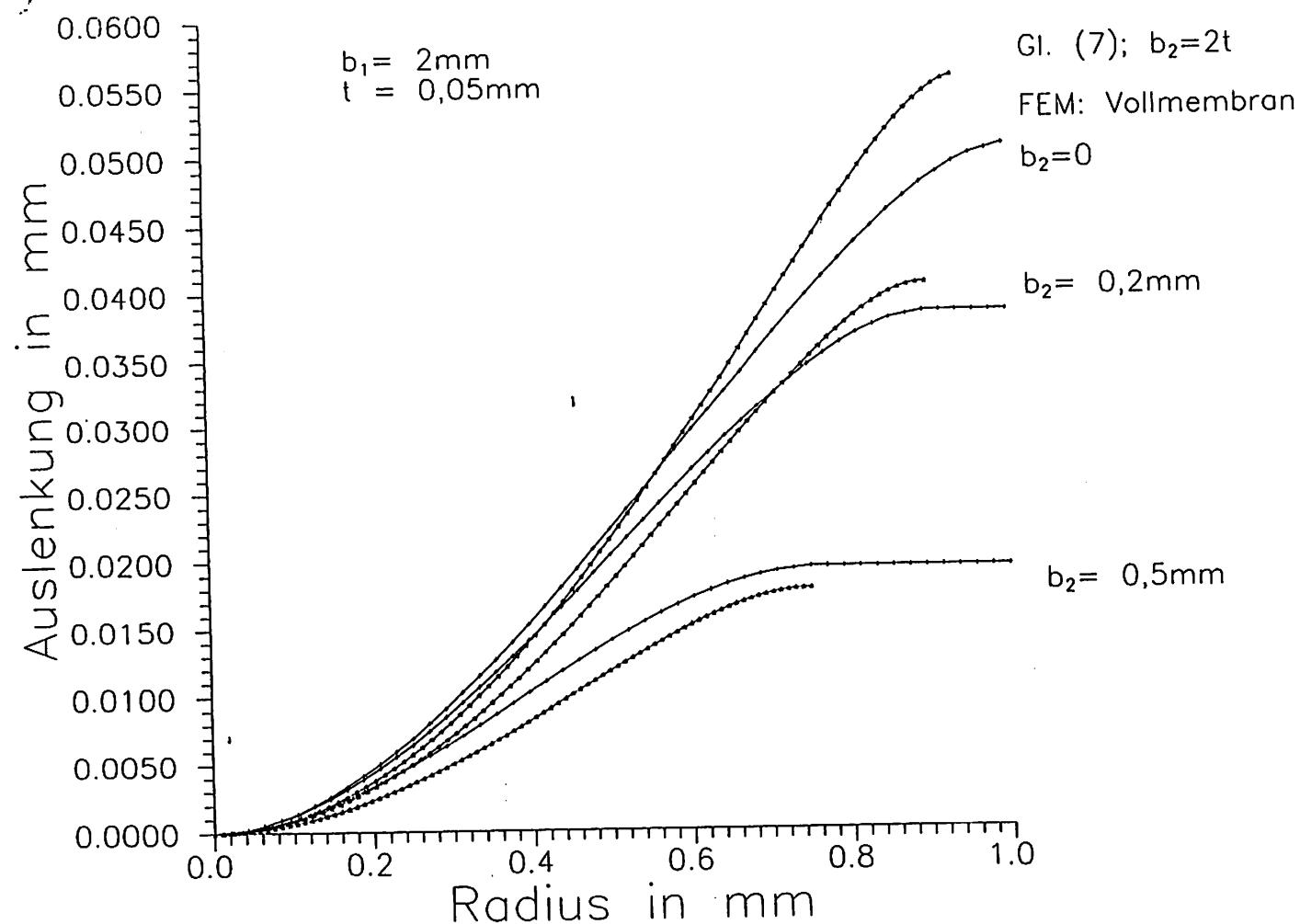


Abb. 2: Vergleich von Gl. 7 (\star) mit FE-Berechnungen einer Membran (+). Gl. (7) liefert für $b_2 \rightarrow 0$ unrealistische Werte. Für eine unstrukturierte Membran wird daher $b_{2,\min} = 2 \cdot t$ empfohlen.

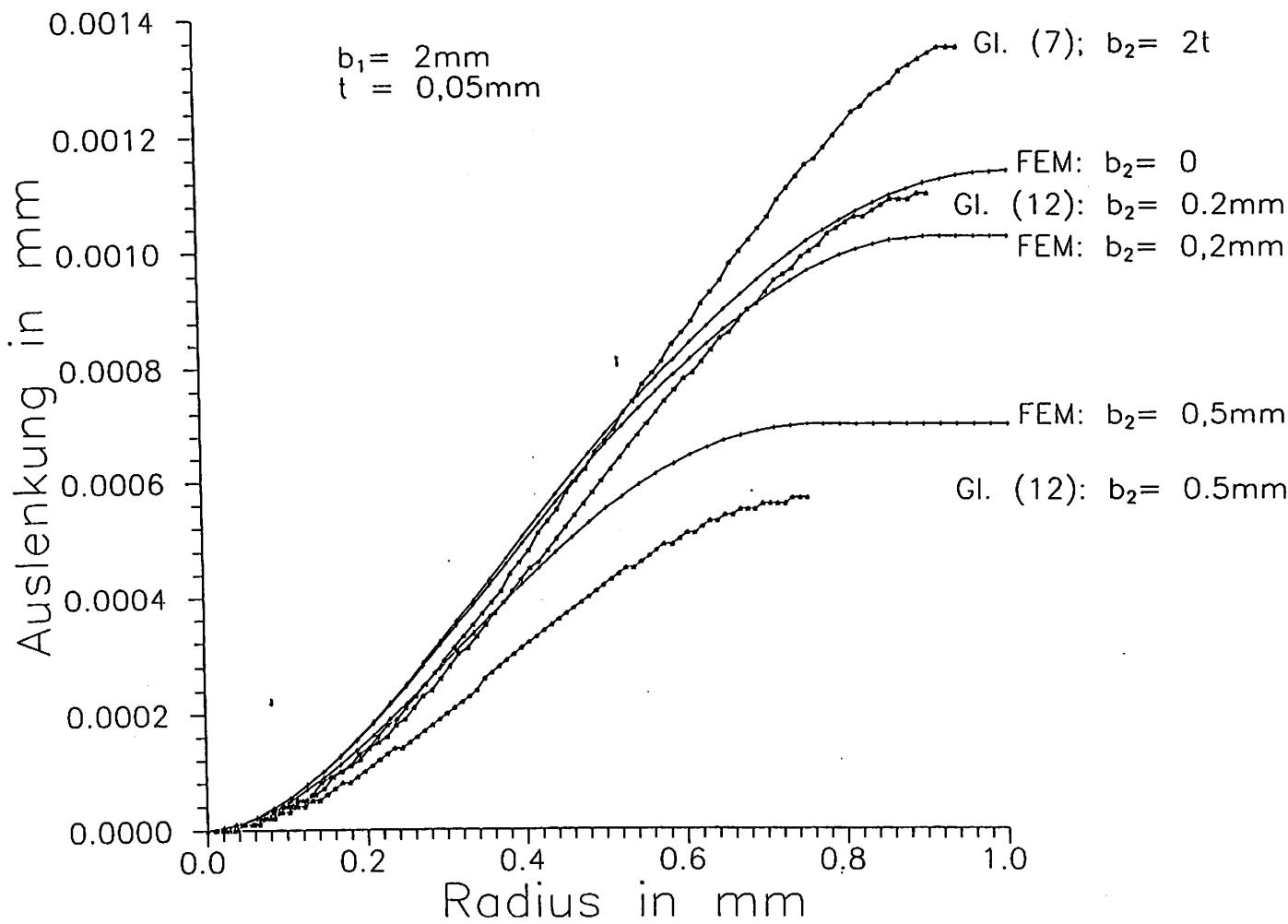


Abb. 3: Vergleich von Gl. 12 (*) mit dem FE-Modell wie oben. Das analytische Ergebnis stimmt gut mit dem Membranmodell (+) überein.

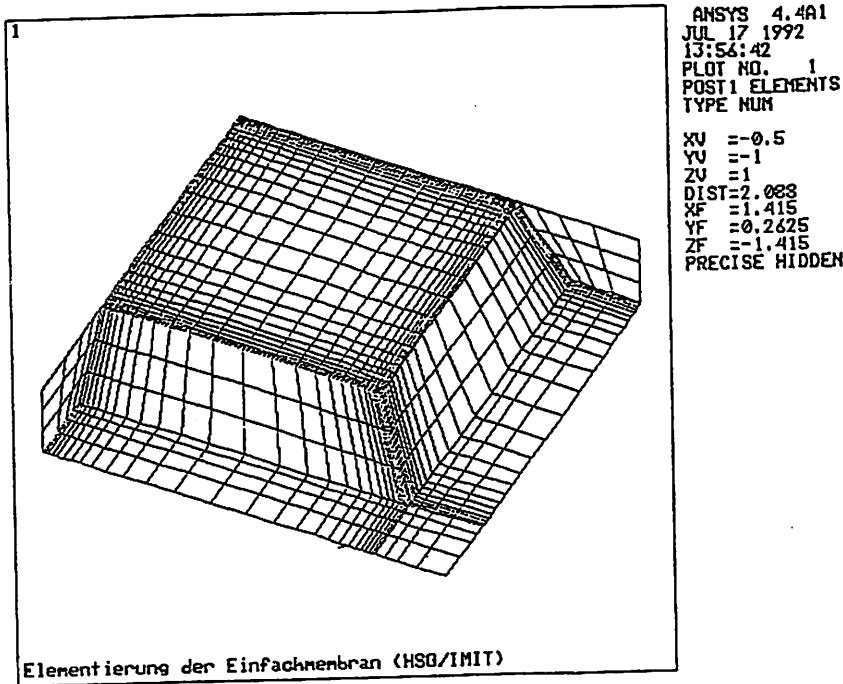


Abb.4: Die Elementierung der Membranstruktur (Viertelmodell). Erkennbar sind die Sockel- und Membranelemente (2472 STIF45-Elemente).

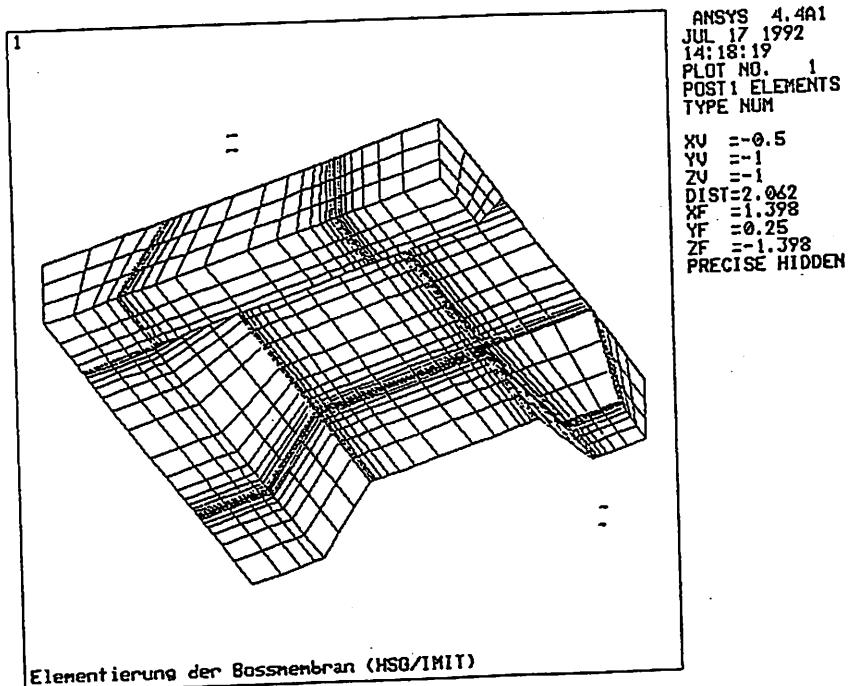


Abb. 5: Die Elementierung der Boss-Struktur (Viertelmodell). Erkennbar sind wiederum die Sockel- und Membranelemente (2715 STIF45-Elemente).

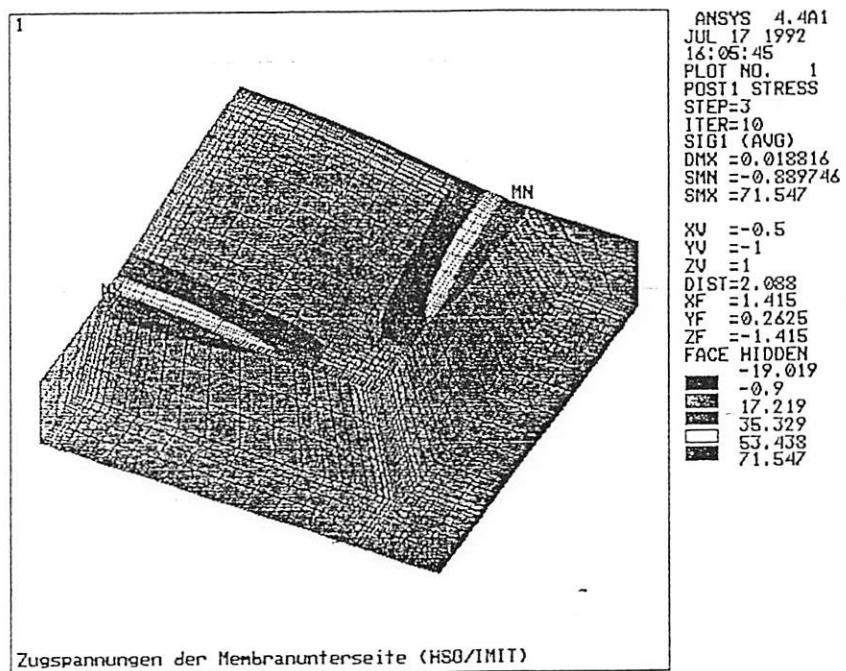
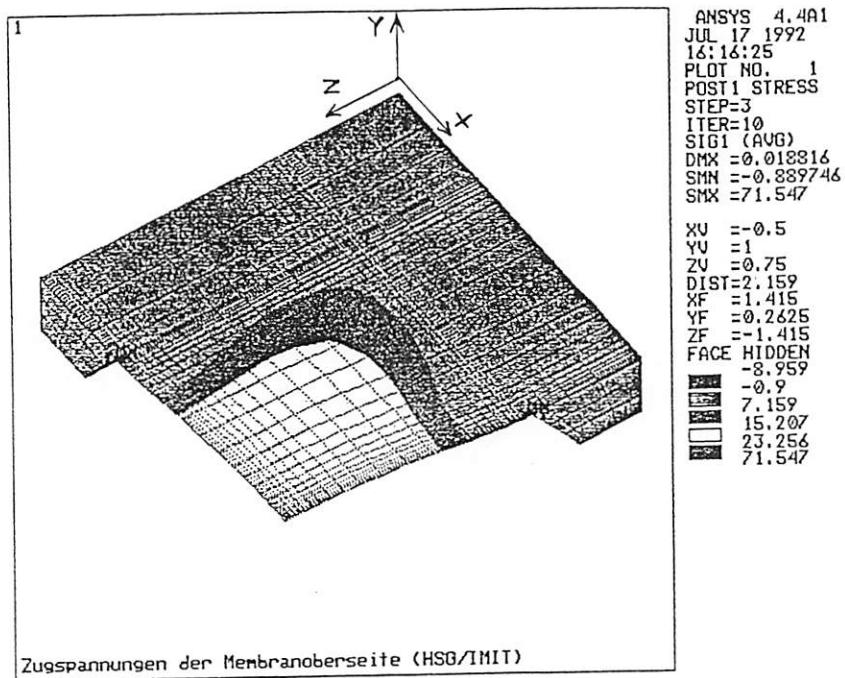


Abb. 6: Typische mechanische Spannungsverteilung in einer quadratischen Siliziummembran mit mechanisch fester Einspannung an der Sockelunterseite bei Druckbeaufschlagung an der Membranunterseite oben: Strukturoberseite mit Zug-Hauptspannungsmaxima, unten: Strukturunterseite mit Kerbspannungsmaxima, Angaben in MPa.

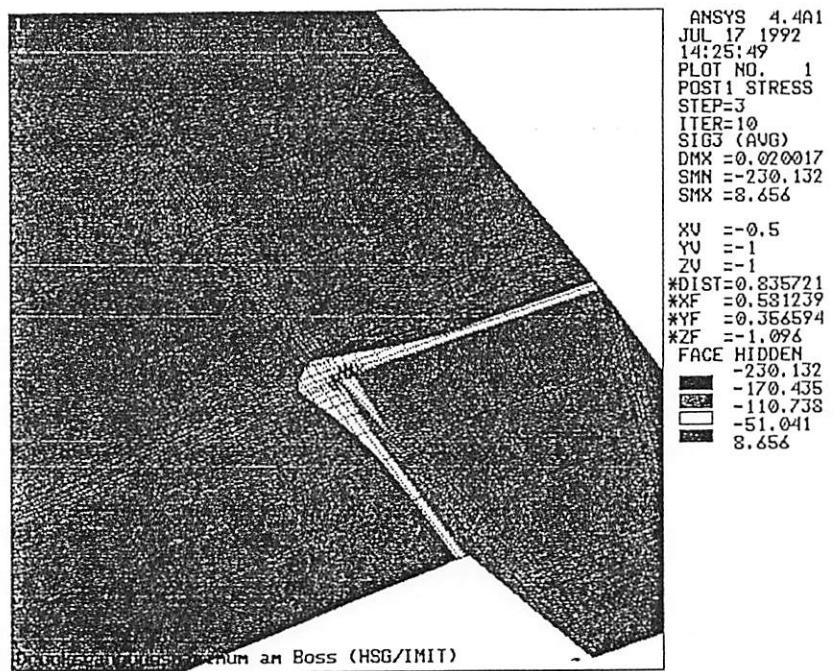
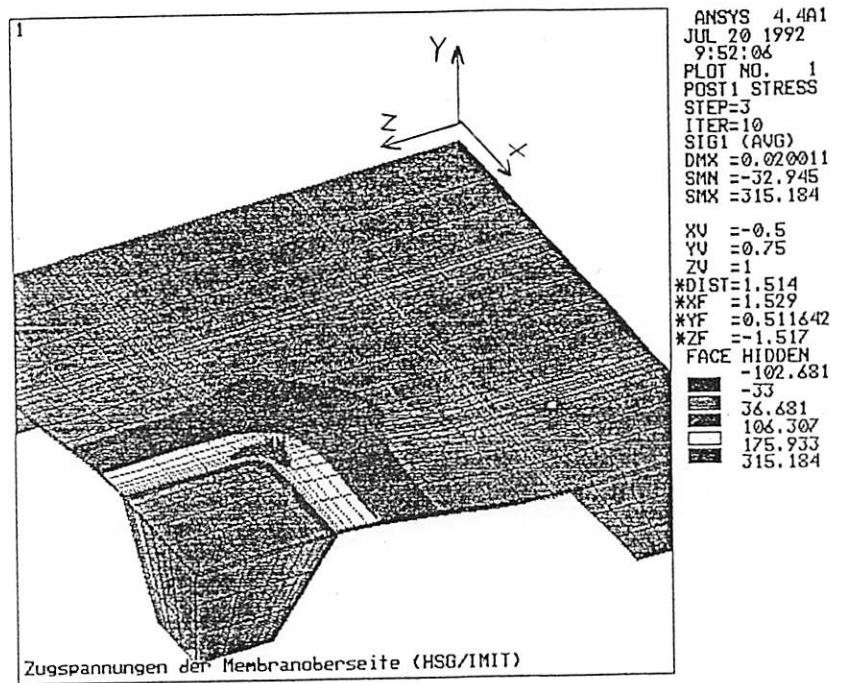


Abb. 7: Typische mechanische Spannungsverteilung einer quadratischen Boss-Membran mit mechanisch fester Einspannung an der Sockelunterseite bei vorgegebener Bossauslenkung-Mittenauslenkung.
oben: Strukturoberseite mit Zug-Hauptspannungsmaxima oberhalb des Boss, unten: Strukturunterseite mit Druck-Hauptspannungsmaxima am Boss, Angaben in MPa.

Membrandicke d_M [μm]	Boss- auslenkung u_B [μm]	Hauptspannungsmaxima an der Membranunterseite		Hauptspannungsmaxima an der Membranoberseite		Reaktionskräfte F_R [N]	Feder- konstante $K = F_R/u_B$ [N/mm]
		Bossecke (Druck *) [MPa]	Membran- außenkante (Zug *) [MPa]	Bossecke (Zug) [MPa]	Membran- außenkante (Druck) [MPa]		
10	10	556	192	336	127	0.085	8.5
	15	802	323	543	190	0.176	11.73
	20	1042	484	781	256	0.321	16.05
15	10	653	254	378	183	0.224	22.40
	15	939	406	590	268	0.399	26.60
	20	1204	580	819	353	0.648	32.38
20	10	703	309	403	232	0.472	47.20
	15	1015	483	621	340	0.780	52.00
	20	1305	674	851	444	1.174	58.70

* Spannungen im Kerbbereich

Tabelle 2: Variation der Membrandicke und der Boss-Auslenkung bei einer freien Membranlänge von $d = 600 \mu\text{m}$, Gegenüberstellung der unmittelten Hauptspannungsmaxima.

Membran-dicke d_M [μm]	Boss-auslenkung u_B [μm]	Hauptspannungsmaxima an der Membranunterseite		Hauptspannungsmaxima an der Membranoberseite		Reaktions-kräfte F_R [N]	Feder-konstante $K = F_R/u_B$ [N/mm]
		Bossecke (Druck *) [MPa]	Membran-außenkante (Zug *) [MPa]	Bossecke (Zug) [MPa]	Membran-außenkante (Druck) [MPa]		
10	10	197	35	121	51	0.014	1.41
	15	292	52	198	87	0.029	1.96
	20	391	72	288	130	0.054	2.71
15	10	225	50	136	68	0.038	3.75
	15	329	74	215	110	0.068	4.53
	20	430	98	303	158	0.112	5.60
20	10	272	67	152	87	0.080	8.01
	15	398	98	234	137	0.136	8.97
	20	518	129	324	192	0.206	10.30

* Spannungen im Kerbbereich

Tabelle 3: Variation der Membrandicke und der Boss-Auslenkung bei einer freien Membranlänge von $d = 1200 \mu\text{m}$, Gegenüberstellung der ungemittelten Hauptspannungsmaxima.

Membran-dicke d_M [μm]	Druckbeauf-schlagung [kPa]	Membranmit-tenauslenkung u_M [μm]	Hauptspannungsmaxima an der Membranunterseite		Hauptspannungsmaxima an der Membranoberseite		Reak-tions-kräfte F_R [N]	Feder-konstante $K = F_R/u_M$ [N/mm]
			Membran-mitte (Druck) [MPa]	Membran-äußenkante (Zug *) [MPa]	Membran-mitte (Zug) [MPa]	Membran-äußenkante (Druck) [MPa]		
10	0.66	9	6	30	11	23	0.010	1.1
	1.30	14	9	51	16	37	0.020	1.4
	2.39	19	13	80	23	54	0.037	1.9
15	1.89	10	10	40	15	32	0.029	2.9
	3.35	15	14	65	23	49	0.052	3.5
	5.42	19	19	96	31	69	0.083	4.4
20	4.24	10	14	51	20	41	0.065	6.5
	7.04	15	19	81	30	62	0.108	7.2
	11.00	20	26	118	42	87	0.170	8.5

* Spannungen im Kerbbereich

Tabelle 4: Variation der Membrandicke und der mittels Druckbelastung erzeugten Membran-Mittenauslenkung,
Gegenüberstellung der ungemittelten Hauptspannungsmaxima.

		FEM			p(u)nach[5]	Federkonstante F/u nach [5]	u(p) nach GL.(13)	Federkonstante F/u nach Gl.(13)
$d = 1200\mu\text{m}$ unstrukturiert	$d_M = 10 \mu\text{m}$ $b_1 = 3893 \mu\text{m}$ $b_2 = 20 \mu\text{m}$	$p = 0.66 \text{kPa}$	$u_M = 9 \mu\text{m}$	$K = 1.10 \text{N/mm}$	$p = 0.58 \text{Pa}$	$K = 0.98 \text{ N/mm}$	$u_M = 21.0 \mu\text{m}$	$K = 0.48 \text{ N/mm}$
		1.30	14	1.40	1.21	1.31	41.4	"
		2.39	19	1.90	2.22	1.77	76.2	"
	$d_M = 15 \mu\text{m}$ $b_1 = 3886 \mu\text{m}$ $b_2 = 30 \mu\text{m}$	1.89	10	2.90	1.97	2.98	17.2	1.66
		3.35	15	3.50	3.48	3.50	30.6	"
		5.42	19	4.40	5.14	4.09	49.4	"
	$d_M = 20 \mu\text{m}$ $b_1 = 3879 \mu\text{m}$ $b_2 = 40 \mu\text{m}$	4.24	10	6.50	4.40	6.62	15.8	4.03
		7.04	15	7.20	7.31	7.33	26.3	"
		11.0	20	8.50	11.07	8.33	41.1	"

Tabelle 5: Vergleich des Membranverhaltens nach nichtlinearer FEM-Berechnung, Gl.(7) sowie Gl.(7a). Während (7) im linearen Bereich, z.B. bei der Membran mit $d = 600\mu\text{m}$, $d_M = 20\mu\text{m}$, zutrifft, muß für größere Auslenkungen die Spannungsversteifung berücksichtigt werden.

		FEM			F(u) nach Gl.(7a)	Federkonstante F/u nach Gl.(7a)	u(p) nach Gl.(7)	Federkonstante F/u nach Gl.(7)
d=1200µm b= 800µm	d _M = 10µm b ₁ =3893µm b ₂ =1493µm	F=14mN	u _B =10µm	K=1.41N/mm	F=14.9mN	K=1.49N/mm	u _B =14.0µm	K=1,00N/mm
d=1200µm b= 800µm	d _M = 10µm b ₁ =3893µm b ₂ =1493µm	29	15	1.96	31.6	2.11	29.0	"
		54	20	2.71	59.4	2.97	54.0	"
		38	10	3.75	41.0	4.10	11.3	3.36
	d _M = 15µm b ₁ =3886µm b ₂ =1486µm	68	15	4.53	75.4	5.03	20.2	"
		112	20	5.60	126	6.32	33.3	"
		80	10	8.01	89.4	8.94	10.1	7.95
	d _M = 20µm b ₁ =3879µm b ₂ =1479µm	136	15	8.97	152	10.2	17.1	"
		206	20	10.3	238	11.9	25.9	"
		176	15	11.7	205	13.6	27.3	"
d=600µm b=800µm	d _M = 10µm b ₁ =2693µm b ₂ =1493µm	321	20	16.1	385	19.2	49.9	"
		224	10	22.4	265	26.5	10.3	21.7
		399	15	26.6	468	31.2	18.4	"
	d _M = 15µm b ₁ =2686µm b ₂ =1486µm	648	20	32.4	816	40.8	29.9	"
		472	10	47.2	575	57.5	9.22	51.2
		780	15	52.0	982	65.5	15.2	"
	d _M = 20µm b ₁ =2679µm b ₂ =1479µm	1174	20	58.7	1532	76.6	22.9	"

Tabelle5(Fortsetzung): Vergleich des Membranverhaltens nach nichtlinearer FEM-Berechnung, der von Hooke[5] angegebenen algebraischen Gleichung sowie Gl.(13). Die hier hergeleitete Gleichung(13) gilt nur für kleine Auslenkungen bis ca. $d_M/3$ und gibt die darüber auftretende Versteifung nicht wieder. Die großen, hier betrachteten, Verformungen unstrukturierter Membranen werden bis zur Erweiterung von Gl.(13) von [5] besser beschrieben.

5. Literatur zu III.2 und III.3

- [1] z.B. Young, W.C.: ROARK'S FORMULAS FOR STRESS & STRAIN. New York: McGraw-Hill, 1989. ISBN 0-07-100373-8
- [2] Lenk, A.; Menzel, U.: NICHTLINEARITÄT DÜNNER KREISPLATTEN ALS WANDLER VON DRÜCKEN IN MECHANISCHE SPANNUNGEN ODER AUSSCHLÄGE. In: Feingerätetechnik 30 (1981) , Nr.2 , S.56-60.
- [3] Lenk, A.; Sager, K.: LINEARITÄTSFEHLER DER MECHANISCHEN SPANNUNG UND DES AUSSCHLAGS VON KREISRINGFÖRMIGEN DRUCKMEßPLATTEN. In: TU-Informationen der TU Dresden (1986) , Nr.09-03-86.
- [4] Pfeifer, G.; Werthschützky, R.: DRUCKSENSOREN. Berlin: Verlag Technik, 1989. ISBN 3-341-00660-5.
- [5] Hooke, R.: APPROXIMATE ANALYSIS OF THE LARGE DEFLECTION ELASTIC BEHAVIOUR OF CLAMPED, UNIFORMLY LOADED, RECTANGULAR PLATES. In: Journal of Mechanical Engineering Science 11 (1969) , Nr.3 , S.256-268.
- [6] Seide, P.: LARGE DEFLECTION OF RECTANGULAR MEMBRANES UNDER UNIFORM PRESSURE. In: International Journal of Non-Linear Mechanics 12 (1977) , S.397-406.
- [7] Menzel, U.; Winkler, W.: SPANNUNGSFELDER IN ENDLICHEN RECHTECKPLATTEN. In: Feingerätetechnik 31 (1982) , Nr.6 , S.248-249.
- [8] Roßberg, R.: BERECHNUNG DER FEDERKONSTANTEN EINER QUADRATISCHEN MEMBRAN. Villingen-Schwenningen, IMIT, noch unveröffentlicht.
- [9] Heuberger, A.: MIKROMECHANIK. Springer-Verlag, 1989, S. 49
- [10] Hu, S.M.: CRITICAL STRESS IN SILICON BRITTLE FRACTURE AND EFFECT OF ION IMPLANTATION AND OTHER SURFACE TREATMENTS. In: J. Appl. Phys. 53 (1982), S. 3576
- [11] Pearson G.L., Reed W.T., Feldman W.L.: DEFORMATION AND FRACTURE OF SMALL SILICON CRYSTALS. In: Acta Metallurgica 5 (1957), S. 181
- [12] Peterson, K. et al.: SILICON AS A MECHANICAL MATERIAL. In: Proc. IEEE 70 No. (1982), Nr. 5, S. 420
- [13] Pourahmadi F., Gee D., Peterson K.: THE EFFECT OF CORNER RADIUS OF CURVATURE ON THE MECHANICAL STRENGTH OF MICROMACHINED SINGLE-CRYSTAL SILICON STRUCTURES. Transducers '91: Proceedings of the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, June 23, San Francisco, USA, (1991), S. 197-200

6. Entwurf Maskenlayout

6.1. Kompensationsstrukturen und ihre Charakterisierung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollen Aktoren auf Membranbasis hergestellt werden. Dabei besteht das Anliegen, Membranen durch einen Boss zu verstauen oder mittels des Bosses ein Ventilsitz zu realisieren. Die anisotrope Ätzung dieses Bosses bereitet aufgrund seiner Konvexität große Probleme. Die vorhersehbaren Unterätzungen müssen deshalb durch sogenannte Eckenkompensationsstrukturen verhindert bzw. kompensiert werden. Dafür werden an die konvexen Ecken zusätzliche Maskengebiete angehängt, die zur Unterätzung freigegeben sind. Bei Erreichen der gewünschten Ätztiefe sollte das zusätzliche Maskengebiet dann vollständig unterätzt sein.

Ausgehend von reiner Kaliumhydroxid(KOH)-Lösung und dem Einsatz von (100)-Wafern muß für die exakte Dimensionierung deshalb die gewünschte Ätztiefe d_T (oder alternativ dazu die Waferdicke d_w und die Membrandicke d_M), das Ätzratenverhältnis V von Unterätzrate der schnellstätzenden Kante zur Tiefenätzrate sowie der Winkel α_{\max} zwischen der schnellstätzenden Kante und der $<110>$ -Kante bekannt sein. V und α_{\max} werden dabei von der Konzentration der KOH-Lösung bestimmt.

Im folgenden werden realisierbare Eckenkompensationsmodelle vorgestellt und charakterisiert:

(i) $<110>$ -Streifen (Abb. 1)

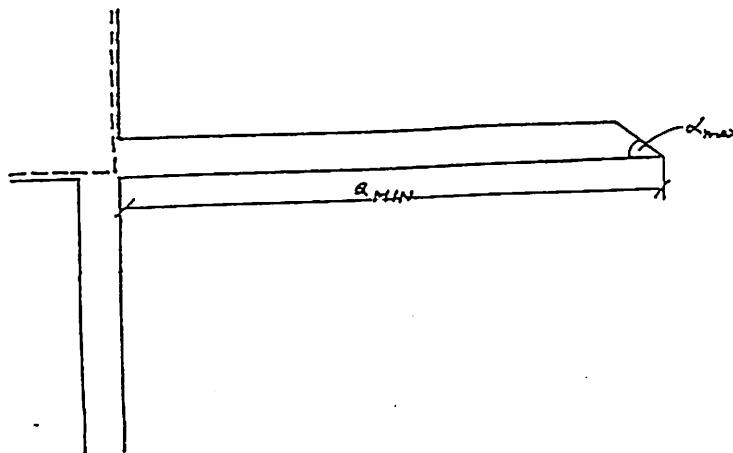


Abb. 1 Maskenlayout

Die Breite des $<110>$ -Streifens ist für die Dimensionierung unerheblich.

$$d_T = \frac{a_{MIN}}{V} \cdot \sin \alpha_{max}$$

Charakterisierung: Bossecke am Ätzgrund symmetrisch abgeflacht
großer Platzbedarf
leicht dimensionierbar

(ii) Kombination (Abb. 2)

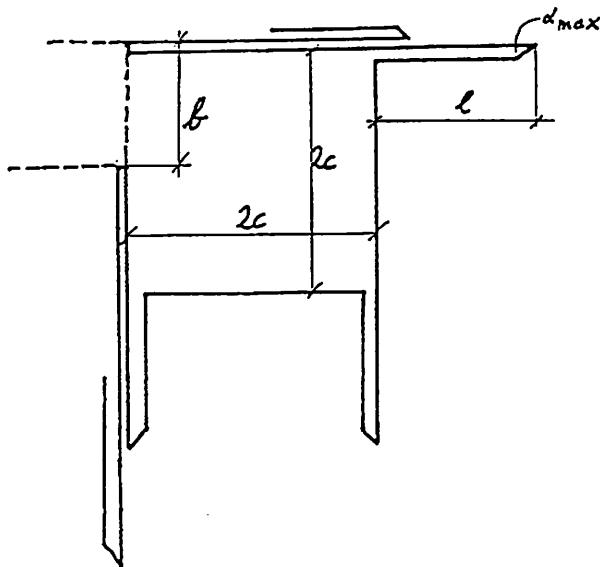


Abb. 2 Maskenlayout

$$d_T = \frac{c}{V} \cdot (2 \sin \alpha_{max} + \cos \alpha_{max}) + l \cdot \frac{\sin \alpha_{max}}{V}$$

$$c < b$$

$$a_{MIN} = 2c + l$$

Charakterisierung: Bossecke am Ätzgrund unsymmetrisch abgeflacht
minimaler Platzbedarf
schwer dimensionierbar

(iii) Verkürztes zentrisches Rechteck (Abb. 3)

Charakterisierung: Bossecke am Ätzgrund unsymmetrisch abgeflacht
mittlerer Platzbedarf
leicht dimensionierbar

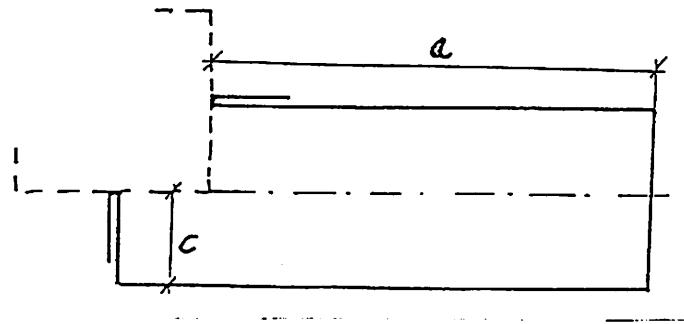


Abb. 3 Maskenlayout

$$d_T = \frac{1}{V} (a_{MIN} \cdot \sin\alpha_{max} + c \cdot \cos\alpha_{max})$$

$$c < \frac{b}{2}$$

(iv) Erweitertes zentrisches Quadrat mit <110>-Streifen (Abb. 4)

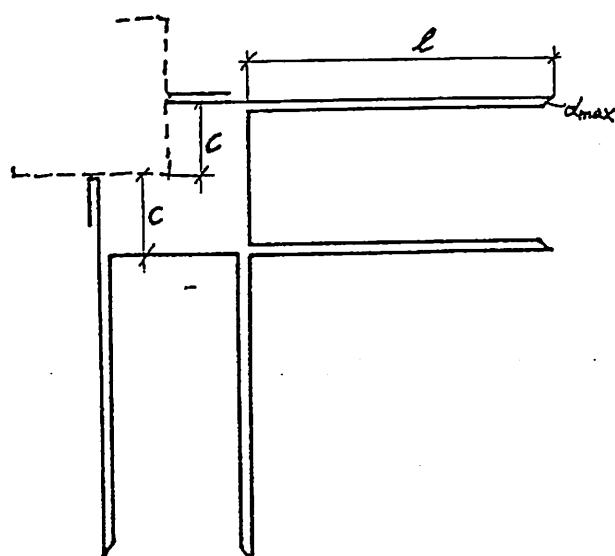


Abb. 4 Maskenlayout

$$d_T = \frac{\sqrt{2}c}{1,05 \cdot V} \cdot \sin(45^\circ + \alpha_{max}) + l \cdot \frac{\sin\alpha_{max}}{V}$$

$$c < \frac{b}{2}$$

$$a_{MIN} = c + l$$

Charakterisierung: Bossecke am Ätzgrund symmetrisch abgeflacht
mittlerer Platzbedarf
schwer dimensionierbar

(v) <100>-Streifen mit und ohne <110>-Streifen

Hier erfolgt die Kompensation aufgrund des Effektes der Gleichheit von Tiefenätzrate und der Unterätzrate der Kanten 45° zur <110>-Richtung.

Die sich aufeinanderzubewegenden nahezu senkrechten {100}-Ebenen werden durch die {111}-Ebenen der zu schützenden Ecke begrenzt und erlauben somit eine fast exakte Kompensation von der Waferoberfläche bis zum Ätzgrund (Abb. 5). Um den sehr großen Platzbedarf dieser Struktur einzuschränken, können die Längsseiten noch mit <110>-Streifen versehen werden. Die durch die geringere Breite des <100>-Streifens nicht kompensierte Ätztiefe wird damit ausgeglichen (Abb. 6).

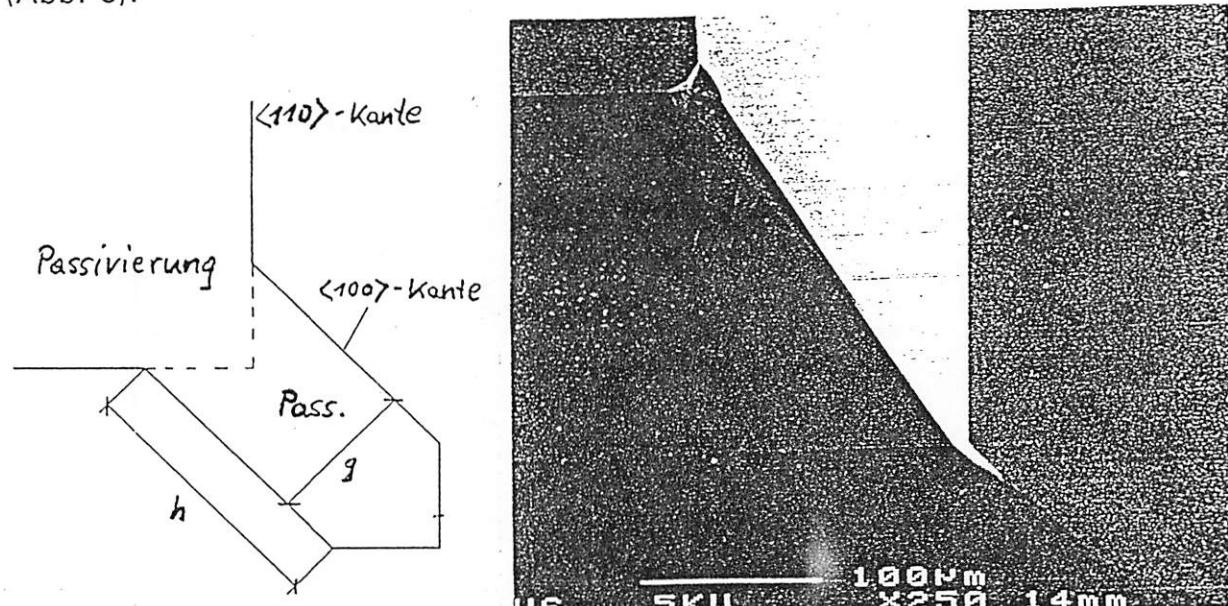


Abb. 5 Maskenlayout und geätzter <100>-Streifen ohne <110>-Streifen

$$d_T = \frac{g}{2} \quad h \geq 1,6g$$

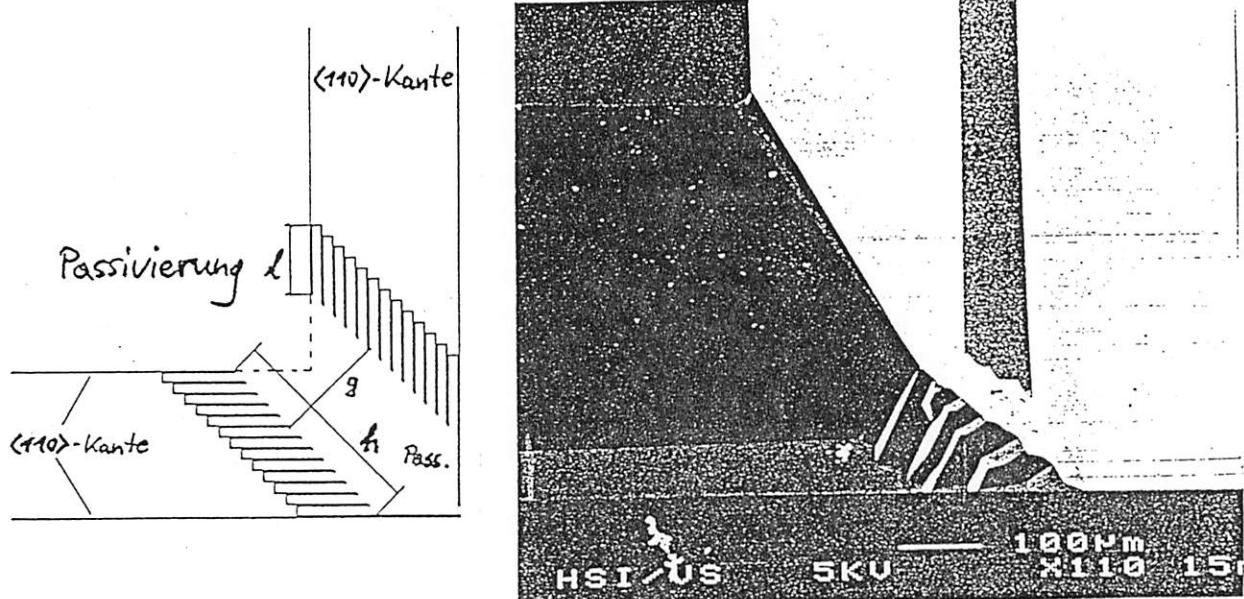


Abb. 6 Maskenlayout und geätzter $<100>$ -Streifen mit $<110>$ -Streifen

$$d_T = \frac{g}{2} + l \cdot \frac{\sin \alpha_{\max}}{V} \quad h \geq 1,6 g$$

Charakterisierung: Bossecke pyramidenstumpfförmig ausgebildet
großer Platzbedarf
leicht dimensionierbar

Diese Eckenkompensationsformen kommen von vornherein nicht in Betracht, da beim reinen $<100>$ -Streifen für Ätztiefe d_T von ca. $500\mu\text{m}$ Bosskantenlängen b von mindestens $1400\mu\text{m}$ notwendig sind. Außerdem hinterlässt der $<100>$ -Streifen mit angehängten $<110>$ -Streifen auf dem Ätzgrund noch zerklüftete Siliziumreste, die das Membranverhalten nicht mehr beschreibbar machen.

6.2. Zusammenfassung

Alle vorgestellten Kompensationsstrukturen ermöglichen eine exakte Kompensation an der von der Membran abgewandten Bosseite.

Allerdings ist an den Stellen der Membran, die mit einer Kompensationsstruktur versehen waren, mit einer geringeren Ätztiefe von maximal 2% zu rechnen.

Unter einer vorausgesetzten Ätztiefe von $d_T = 495\mu\text{m}$ ($d_w = 515\mu\text{m}$ und $d_M = 20\mu\text{m}$) und der kleinsten Bosskantenlänge von $b = 200\mu\text{m}$ ergeben sich folgende minimale freie Maskenabstände a_{\min} und freie Membranlängen d_{\min} .

Es wird eine 33%ige KOH-Lösung vorausgesetzt mit $V = 1,48$ und $\sigma_{\max} = 31^\circ$.

	a_{\min}	d_{\min}	Ecke
1. $<110>$ -Streifen	1422 μm	722 μm	symmetr.
2. Kombination	1090 μm	390 μm	unsymmm.
3. Verk. zentr. Rechteck	1256 μm	556 μm	unsymmm.
4. Erw. zentr. Quadrat	1269 μm	569 μm	symmetr.

6.3. Auswahl einer geeigneten Kompensationsstruktur

Ausgewählt wurde das erweiterte zentrische Quadrat, da bei einer symmetrischen Bossecke homogenere mechanische Spannungsverteilungen zu erwarten sind und eine mögliche minimale freie Membranlänge d_{\min} von ca. 600 μm als ausreichend erachtet wird. Auch sind die abgeflachten Ecken von Vorteil, da die Ecken der pyramidenstumpfförmigen Bosse wegen dort auftretender Spannungsmaxima ungünstig sind (Abb. 7).

Der ebenfalls symmetrische $<110>$ -Streifen hinterläßt am Ätzgrund keine exakt abgeschnittene Ecke, sondern Ausbuchtungen gemäß Abb. 8. Auch deshalb weil diese sich als ungünstig erweisen können (hohe Spannungen), wurde das erweiterte zentrische Quadrat gewählt. Erfahrungen zu dieser Kombination liegen nicht vor, das Aussehen sollte aber einer 45°-Abflachung ohne Ausbuchtungen entsprechen. Dies muß in Untersuchungen nachgewiesen werden.

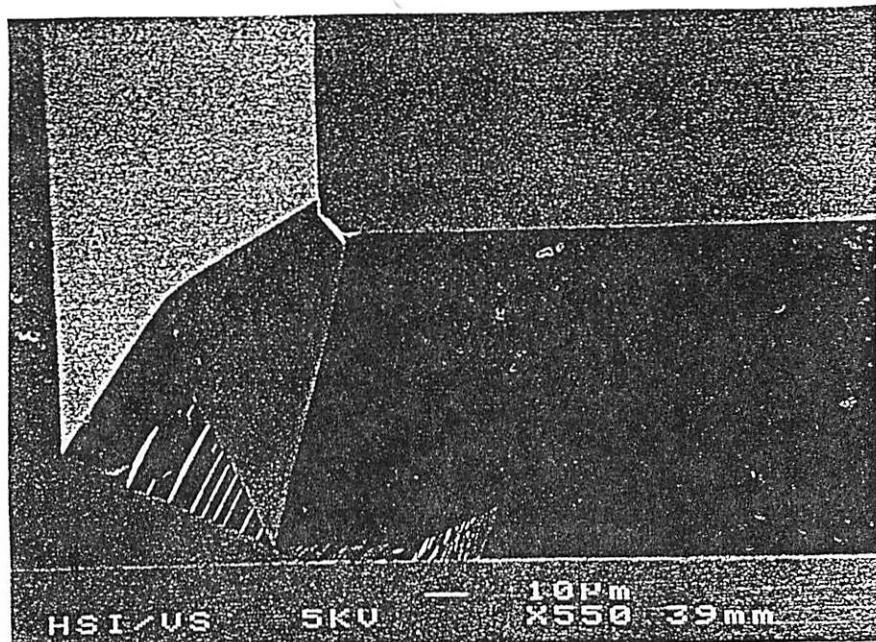
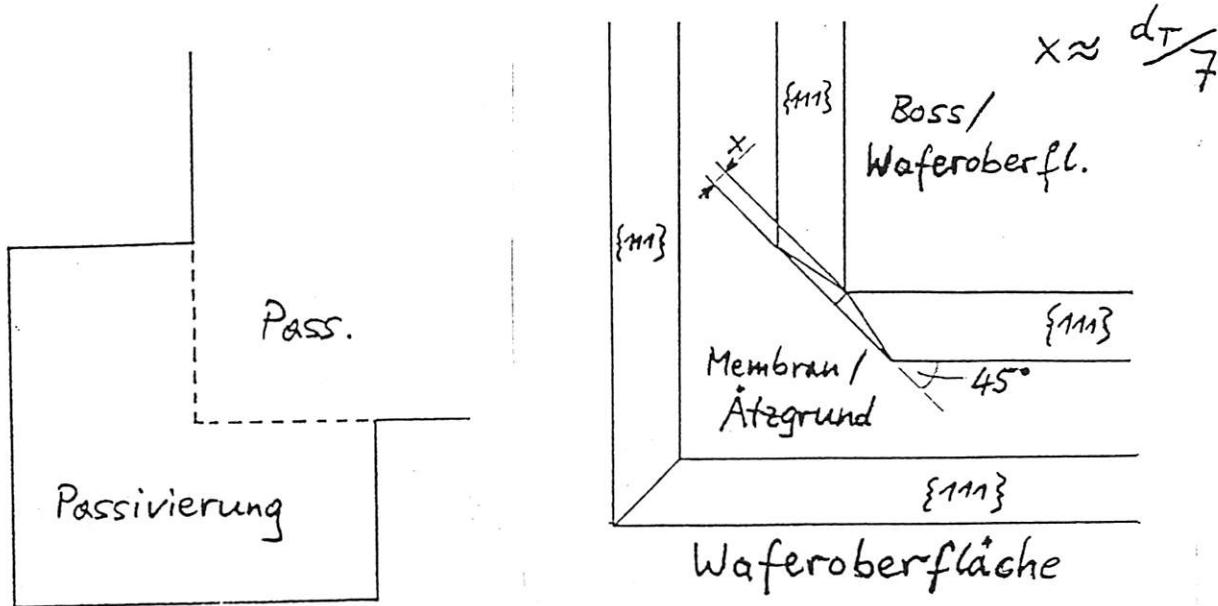


Abb. 7 Zentrisches Quadrat
Maskenlayout sowie zeichnerische Draufsicht und Schrägangsicht
unter dem Rasterelektronenmikroskop

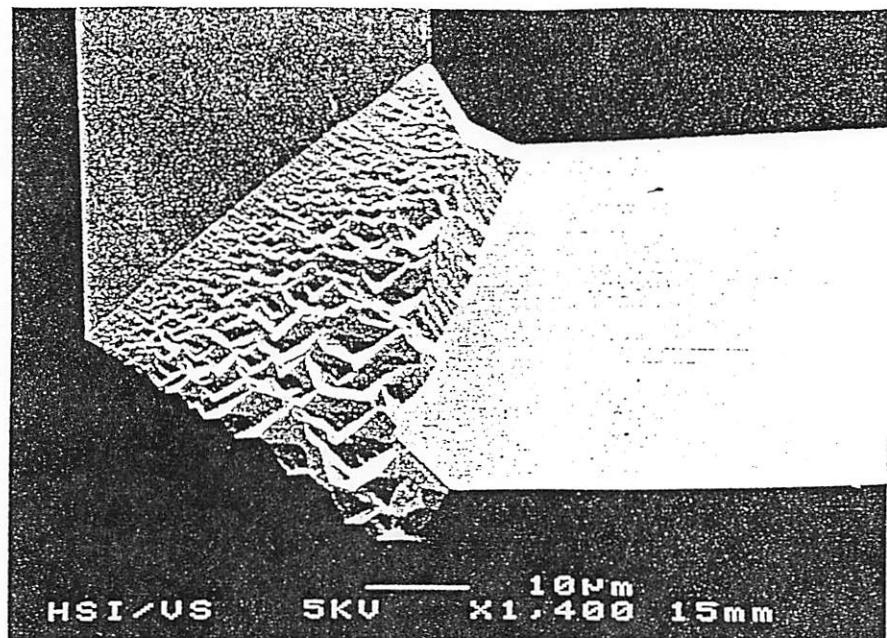
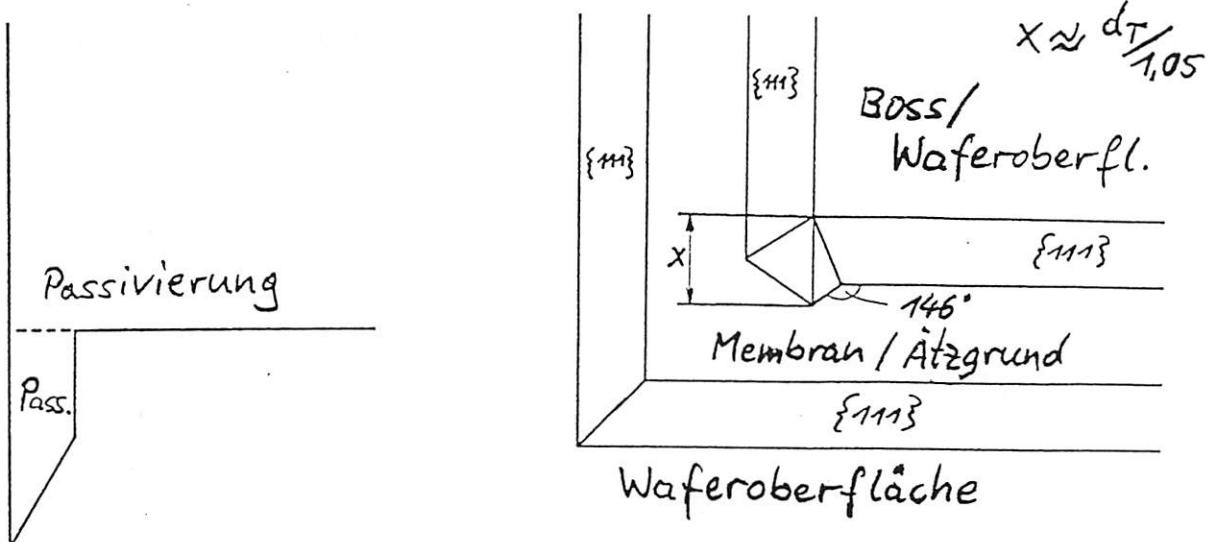


Abb. 8 $<110>$ -Streifen
Maskenlayout sowie zeichnerische Draufsicht und Schrägangsicht
unter dem Rasterelektronenmikroskop

Dimensionierung (Abb. 9)

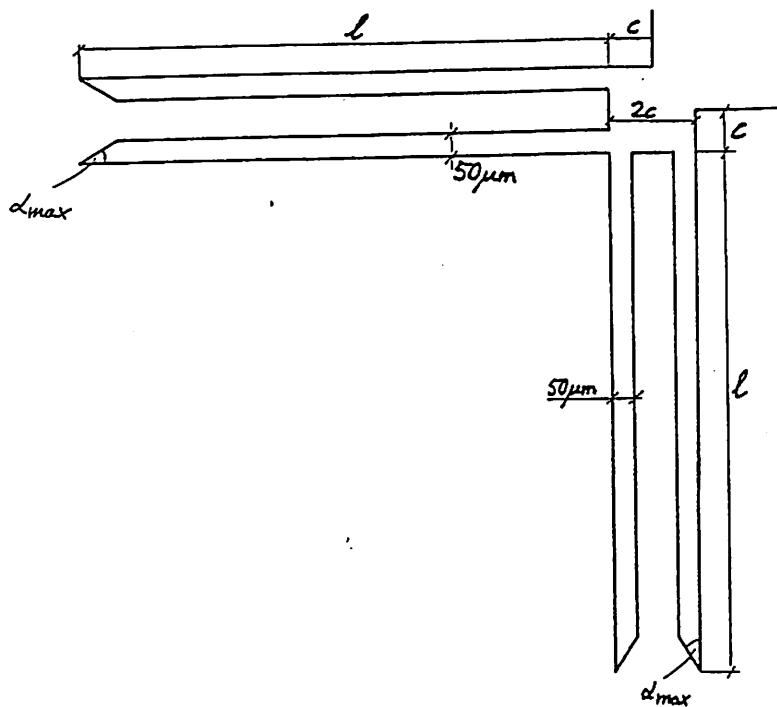


Abb. 9 Eckenkompensationsstruktur für eine Ätztiefe von $495\mu\text{m}$

Vorausgesetzt wird:

$$d_w = 515\mu\text{m}$$

$$d_M = 20\mu\text{m}$$

$$\text{damit } d_T = 495\mu\text{m}$$

$$\text{KOH} = 33 \text{ wt\%}$$

$$\text{damit } V = 1,48$$

$$\alpha_{\max} = 31^\circ$$

$$\text{und } c = 95\mu\text{m}$$

$$S_1 = 1,03$$

$$S_2 = 1,02$$

S_1 und S_2 sind Sicherheitsfaktoren. Die Kompensationsstrukturen werden um diese Faktoren (3% und 2%) verkleinert, um einen mit Sicherheit vollständigen Abtrag zu gewährleisten. Dies hat im Normalfall eine geringfügige Anätzung der geschützten konvexen Ecken zur Folge und lässt einen ebenfalls vollständigen Abtrag der Kompensationsstruktur bei hier bis zu $10\mu\text{m}$ geringeren Ätztiefen erwarten.

$$l = \frac{d_T \cdot V - \frac{\sqrt{2} \cdot c \cdot S_1}{1,05} \cdot \sin(45^\circ + \alpha_{\max})}{S_2 \cdot \sin \alpha_{\max}}$$

Mit dieser Formel ergibt $l = 1150\mu\text{m}$.

Alle $\langle 110 \rangle$ -Kanten der Maske führen durch die Ausbildung der $54,74^\circ$ geneigten $\{111\}$ -Ebenen bis in eine Tiefe von $495\mu\text{m}$ zu Kantenverschiebungen in der Draufsicht von $350\mu\text{m}$. Die freie Membranlänge ist somit zum Kantenabstand der Maske um $700\mu\text{m}$ verringert.

Alle anderen Beziehungen können der Abb. 10 entnommen werden. Die Kantenlängen der quadratischen Gruben sind durch ein Quadrat vor dem Maß gekennzeichnet.

IV. Technologietätigkeiten

Zur Realisierung erster hybrider Testmuster auf der Basis der vorgeschlagenen Aktorgrundstruktur werden verschiedene spezifische Basistechnologien benötigt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wurde im Berichtszeitraum mit der Entwicklung folgender Technologien begonnen:

- Anisotropes Si-Ätzen
- Siliziumbonden
- Drahtbonden

1. Anisotropes Si-Ätzen

Im Hinblick auf die zu realisierende Bossmembran als Aktorgrundstruktur, wurden unter Verwendung vorhandener Testmasken verschiedene Membranätzungen durchgeführt. Als anisotropes Ätzmedium wurde 33%-ige KOH bei einer Ätzttemperatur von 100°C verwendet.

Die bisherigen Ergebnisse zeigten sehr deutlich auf, daß mit dem praktizierten Ätzstopverfahren auf Zeit nur recht unbefriedigende Resultate zu erzielen sind. Aufgrund der vorhandenen Waferdickenschwankungen weisen die Membrandicken einerseits zu große Streuungen auf und andererseits ermöglicht das Verfahren keine reproduzierbaren Membranätzungen. Zudem weisen die Membranunterseiten bei den bisher untersuchten Ätzbedingungen einen, von den Membrandimensionen abhängigen Krümmungsradius auf (vgl. Abb.1).

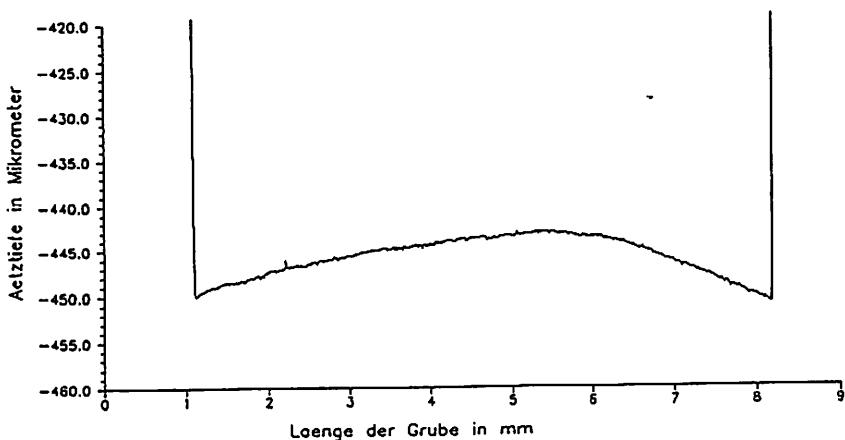


Abb1.: Profilometermessung (optisch) auf der Membranunterseite

Da die Membrändicke als Parameter wesentlich in die Simulationsergebnisse eingeht, werden für die experimentelle Verifikation der Simulationsergebnisse Membranen höchster Güte benötigt. Um plane Membranen, bzw. Bossmembranen mit definiert vorgegebener Dicke herstellen zu können ist im Rahmen des Projektes geplant, folgende Ätzstopverfahren zu entwickeln:

- anodisches Ätzen in HF
- elektrochemischer Ätzstop in KOH

Aufgrund der vorhandenen Ausstattung und der Einfachheit des Aufbaus erscheint es günstiger mit dem anodischen Ätzen in HF zu beginnen. Das Ätzstopverfahren beruht hierbei auf einem dotierungsselektiven, elektrochemischen Ätzverhalten von Silizium in Flußsäure. Definiert wird die gewünschte Membran durch die Dicke einer hochohmigen n-Si Epi-Schicht ($n < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) auf niederohmigem p-Substrat ($p > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).

Vorarbeiten

Zum Arbeitspaket *anodisches Ätzen von Silizium in Flussäure* wurden im Berichtszeitraum Vorarbeiten in Form von Beschaffung und Auswertung von Literaturstellen geleistet. Eine Grundkonzeption für einen einfachen Ätzplatz wurde erarbeitet; benötigte Bauteile wurden bestellt und teilweise geliefert. Benötigte Messgeräte, Schreiber und Strom / Spannungsquellen werden für die Erprobungsphase im Messgerätelabor der Fa. Siemens geliehen; nach ersten Erfahrungen müssen derartige Geräte noch beschafft werden. Ein vorläufiges Konzept für durchzuführende Versuchsreihen wurde erarbeitet.

Weiteres Vorgehen

Nach Lieferung aller Bauteile wird ein erster einfacher Ätzplatz aufgebaut und in Betrieb genommen. Sodann sollen orientierende Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt werden:

- Bestimmung von Ätzraten und Unterätzraten an p-Si (Monitorwafer,
 $1 \Omega \text{cm} \leq \rho \leq 10 \Omega \text{cm}$)
Maskierung: Photolack, PECVD-Siliziumnitrid, LPCVD-Siliziumnitrid
(dabei Bestimmung der Maskierschichtätzraten)

Kontaktierung: ganzflächig gesputtertes Aluminium, mit Photolack gegen die Flusssäure isoliert (evtl. auch PECVD-Siliziumnitrid)
varierter Parameter: Stromdichte / angelegte Spannung

- Bestimmung der Selektivität n-Si (10 Ωcm - POCl_3 -Diffusionsprozess) zu p-Si-Substrat; dabei Herstellung einfacher oberflächenmikromechanischer Grundstrukturen sowie erster dünner Membranen
- Variation der Dotierung von Substrat und Diffusionsschicht und Wiederholung der o.g. Versuche
- auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse Beschaffung von n-Si-Epitaxieschichten verschiedener Dicken auf p-Si-Substraten zur Realisierung von definierten Membranen
- Versuche zur Kombination von anisotropem Vorätzen (KOH) und isotropem anodischen HF-Ätzen

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen werden weitere Versuchsreihen zur Parameteroptimierung durchgeführt. Daneben ist aufbauend auf den erarbeiteten Erfahrungen die Konstruktion und der Bau einer speziellen Ätzapparatur vorgesehen.

Zeitrahmen

Nach gegenwärtiger Projektlage und momentanem Kenntnisstand ist mit folgendem Zeitrahmen zu rechnen:

- Juni '92: Abschluss der Beschaffungsphase für Ätzstopp-Verfahren
- Juli '92: Aufbau und Inbetriebnahme eines einfachen Ätzplatzes, Durchführung erster orientierender Versuche, Vertiefung des Literaturstudiums
- August '92: Beschaffung erster Epitaxiewafer
- September '92: Realisierung erster Membranen mit Epitaxieschichten

2. Bonden

Wie in der technischen Einleitung beschrieben, erfordert die Herstellung erster passiver Mikroventilprototypen eine Verbindungstechnologie, die es ermöglicht den Mikroaktor aus separat prozessierten Einzelchips zusammenzufügen. Dieses Zusammenfügen von prozessierten Siliziumchips bzw. anderen Substraten im Waferverbund wird als Waferbonden bezeichnet. Der Begriff Bonden steht hierbei für Verbindungen zwischen verschiedensten Substraten, die ohne eine adhäsive organische Zwischenschicht realisiert werden.

Zum Aufbau eines Mikroventiles bzw. einer Mikropumpe müssen zum einen in Silizium geätzte Gruben fluidtechnisch dicht abgeschlossen werden, andererseits muß aber sichergestellt werden, daß gewisse Teilbereiche (Dichtflächen) nicht durch den Bondprozeß zusammenhaften.

Die hierfür zu entwickelnde Technologie muß zunächst folgende Anforderungen erfüllen:

- Verträglichkeit mit den anderen Herstellungsschritten
- Bonden von lokalen Teilbereichen

Vorarbeiten

Im Berichtszeitraum wurde die vorhandene Literatur über Bondverfahren und Bondmechanismen ausgewertet. Im folgenden sollen kurz die Möglichkeiten des Bondens dargestellt werden.

Bonds lassen sich auf verschiedenste Arten realisieren. Es sind sowohl Bonds über Zwischenschichten als auch direkte Verbindungen möglich. Die ältesten Verfahren bauen auf der Technik des anodischen Bondens auf. Darunter ist das feldunterstützte Bonden von Glas auf Metall oder auf Silizium zu verstehen. Nachteil dieses Verfahrens ist vor allem, daß die Bondpartner bei Temperaturen von einigen hundert Grad Celsius elektrisch kontaktiert werden müssen. Das verhindert die Einbindung dieses Verfahrens in einen Batchprozeß.

Eine Alternative bietet das Silizium-Direkt-Bonden (SDB), das ohne Feldunterstützung auskommt. Für direkte Silizium-Silizium-Verbindungen sind Temperaturen $> 1000^{\circ}\text{C}$ erforderlich. Metallisierungen sind dann nicht mehr einsetzbar. Für die angestrebte Abdeckung der Grundstrukturen eines passiven Mikroventils ist eine Metallisierung aber nicht erforderlich. Bonds unterhalb von 500°C sollen bei Verwendung geeigneter Zwischenschichten (Borgläser) möglich sein. Das Direktbonden

bietet gegenüber dem Anodischen Bonden noch einen Vorteil: die Siliziumstrukturierung ist wesentlich einfacher als die von Pyrex.

Das justierte Direktbonden ist zudem mit den am IMIT vorhandenen Geräten möglich. Bonds von Siliziumwafern ohne Oxidzwischenschicht (Prozeßablauf im Anhang) wurden schon durchgeführt. Aus der Tatsache, daß bei dem Versuch, die Wafer zu trennen, diese zerstört wurden bzw. Material aus den Wafers herausgerissen wurde, ist abzuleiten, daß tatsächlich Silizium-Silizium-Verbindungen entstanden sein müssen. TEM Untersuchungen hierzu stehen jedoch noch aus, ebenso müssen noch Messungen zur Bondstärke durchgeführt werden.

Drei verschiedene Verfahren werden eingesetzt: das aus der Werkstoffprüfung bekannte Zugprüfverfahren, das Separationsverfahren mit einer Klinge zur Bestimmung der Oberflächenenergie und die Messung des Berstdruckes bei durch aufgebondetes Material abgeschlossenen Hohlräumen. Auf die Problematik des lokalen Nichtbondens ist bisher nicht eingegangen worden. Es ist bekannt, daß bestimmte Schichten wie Siliziumnitrid oder CVD-Oxide nicht bonden. Zur Lösung dieser Aufgabe müssen Versuche durchgeführt werden.

Weiteres Vorgehen

Mehrere Fragen müssen zunächst durch experimentelle Ergebnisse beantwortet werden.

- Welche Materialien verhindern ein Bonden an bestimmten Stellen?
Zur Beantwortung der Frage sollen dünne Schichten bis 50 nm Dicke Silizium mittels einer Schachbrettmaske (0,5 cm x 0,5 cm) strukturiert werden. Nach dem Tempern sollen dann Schnitte durch die Wafer gemacht werden. Im REM kann dann beispielsweise das unterschiedliche Interfaceverhalten der Schichten untersucht werden.
- Wie gut ist die Qualität der Siliziumbonds?
Dazu wird zur Zeit ein Meßplatz aufgebaut, mit dem der Berstdruck bestimmt werden kann. Die Durchführung von Zugprüfversuchen ist ebenfalls geplant.
- Welche Bondtemperaturen sind wirklich erforderlich?
Bei den bisher genannten hohen Temperaturen ist die Verwendung von Metallschichten nicht mehr möglich. Es ist zu klären, ob tiefere Temperaturtemperaturen nicht auch ausreichen.

- Ergeben sich Verbesserungen aus anderen Vorbehandlungsmethoden der Bondflächen?
Neben dem Einsatz verschiedener Chemikalien sollte die Plasmaaktivierung untersucht werden.

Zeitrahmen

Nach gegenwärtiger Projektlage und momentanem Kenntnisstand ist mit folgendem Zeitrahmen zu rechnen:

- Oktober '92: Versuche zum lokalen Bonden, evtl. erste Zugversuche
- Dezember '92: Untersuchungen zur Bondstärke in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, Bonden von Testdevices, Versuche und Untersuchungen zum anodischen Bonden

Anhang

Prozeßablauf Direktbonden:

- Reinigung in Gemisch aus Wasserstoffperoxid (1 Volumenteil H_2O_2 (30%)) und Schwefelsäure-(2 Volumenteile konz. H_2SO_4 (96%))
- Di-Wasserspülung auf Leitwert im Becken
- Trocknen der Scheiben im Rinser-Dryer
- Zusammenbringen der Scheiben, die aufgrund der Hydrophilie der Oberflächen sofort aufeinander haften
- 1h Tempern der Scheiben in Inertgasatmosphäre bei 1000°C

3. Drahtbonden

Um Funktionstests an vereinzelten Aktor chips durchführen zu können, müssen diese in Gehäuse bzw. zu Testzwecken auf Substrate geklebt und mittels Drahtbondverfahren kontaktiert werden.

Des Weiteren haben verschiedene Vorversuche ergeben, daß vorhandene Teststrukturen zur Entwicklung und Optimierung verschiedener, für das Projekt relevanter Dünnfilme für die durchzuführenden Messungen an bis zu zehn verschiedenen Punkten kontaktiert werden müssen, was außerhalb des Waferprobers nahezu unmöglich ist.

Im Rahmen der im Projekt zu entwickelnden Aufbau- und Verbindungstätigkeiten wurde deshalb begonnen, die Drahtbondtechnik zur elektrischen Kontaktierung einzusetzen. Die hierfür notwendigen Untersuchungen und Versuche werden an dem am Institut verfügbaren Thermosonicbonder durchgeführt. Zunächst ist geplant, für die am Institut häufig verwendeten Metallisierungen AlSi(1%) und Au einen zuverlässigen Bondprozeß zu entwickeln.



Vorarbeiten

Im Berichtszeitraum erfolgte eine intensive Literaturarbeit zum Thema Drahtbonden, sowie die technische Einarbeitung in das Bondgerät. Des Weiteren wurden die benötigten Kleinteile, Reinigungsmittel und sonstige Werkzeuge besorgt.

Anhand verschiedener massiver Proben wurden erste, orientierende Versuche durchgeführt um die spezifischen Eigenschaften des Gerätes kennenzulernen. Für weitere Tests fertigte die Technologiegruppe erste metallisierte Testwafer, die mit dem Metallisierungslayer eines vorhandenen Maskensatzes strukturiert wurden.

Weiteres Vorgehen

Anhand dieser Testchips und weiterer noch zu prozessierender Strukturen sollen die verschiedenen Bondparameter variiert werden und Güte, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der gebondeten Kontakte geprüft und untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde ein ausführliches Versuchsprogramm ausgearbeitet, anhand dessen sowohl mechanische als auch elektrische Eigenschaften charakterisiert werden können.

Um für Tests nicht auf teure Gehäuseaufbauten zurückgreifen zu müssen, wurde ein Layout erstellt, mit dessen Hilfe Platinensegmente bzw. beliebige metallisierte Substrate strukturiert werden können (*Abb2*). Auf den so strukturierten Trägersubstraten können die zu testenden Si-Chips relativ einfach aufgeklebt und verdrahtet werden.

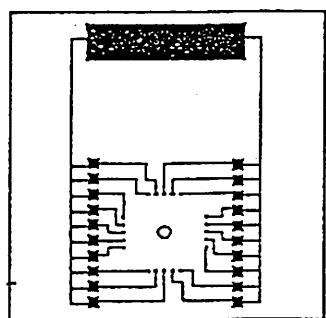


Abb2: Layout eines metallisierten Trägersubstrates