

*Halbleiterwaferbondverbindungen mittels  
strukturierter Glaszwischen­schichten zur  
Verkapselung oberflächenmikromechanischer  
Sensoren auf Wafer­ebene*

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte  
Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Roy Knechtel

geboren am 21. Juli 1972 in Erfurt

eingereicht am 30. August 2004

Gutachter: Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. T. Geßner (Technische Universität Chemnitz)

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel (Universität des Saarlandes)

Dr. rer. nat. Konrad Bach (X-FAB Semiconductor Foundries AG)

Tag der Verleihung: 18. März 2005

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-89963-166-8

© Verlag Dr. Hut, München 2005.  
Sternstr. 18, 80538 München  
Tel.: 089/21568805  
[www.dr.hut-verlag.de](http://www.dr.hut-verlag.de)

**Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler, insbesondere bei der Beschreibung des Gefahrenpotentials von Versuchen, nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Autoren und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.**

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf weitere Datenträger sowie Übersetzung in andere Sprachen, behält sich der Verlag vor.

1. Auflage 2005

Druck und Bindung: printy, München ([www.printy.de](http://www.printy.de))

---

## Bibliographische Beschreibung:

„Halbleiterwaferbondverbindungen mittels strukturierter Glaszwischen-schichten zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren auf Waferebene“

Roy Knechtel

Die Dissertation umfasst 253 Seiten, die 127 Abbildungen 3 Tabellen, 69 Literaturstellen und 27 Seiten Anhang enthalten. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation 2004

## Referat:

In dieser Arbeit werden Bondverfahren zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren auf Waferebene vorgestellt, die auf Glaszwischen-schichten beruhen. Ausgehend von den speziellen Anforderungen an das Verkappen oberflächenmikromechanischer Strukturen wurden das anodische Bonden gesputterter Glasschichten und von gebondeten und rückgedünnten Glaswafern sowie das Glaslotbonden untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass das Glaslotbonden sich am besten für diese Anwendung eignet. Bei diesem Verfahren wird mittels Siebdruck eine Glaspaste strukturiert auf die Deckwafer aufgetragen und durch thermische Konditionierung in ein kompaktes Glas umgewandelt. Anschließend können Deck- und Sensorwafer thermokompressiv miteinander verbunden werden. Durch eingehende Analyse des Siebdruckprozesses konnten Designregeln aufgestellt werden, die eine sichere Anwendung des Glaslotbondens ermöglichen. Weiterhin werden die Ergebnisse der Bondprozessoptimierung und der Bewertung von Bondverbindung und Glaslot vorgestellt. Mit der Verwendung von leitfähigem Glaslot wurde ein neuer Ansatz zur elektrischen Kontaktierung gebondeter Wafer verfolgt. Im letzten Teil der Arbeit werden Anwendungsbeispiele des Glaslotbondens vorgestellt.

## Stichwörter:

- Oberflächenmikromechanik
- Waferbonden
- Glasverbindungsschichten
- Glaslot
- anodisches Bonden
- gesputterte Glasschichten
- Sensoren
- Verkapselung auf Waferbasis



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>11</b>
Abkürzungen . . . . .	11
Einheiten und Formelzeichen . . . . .	13
Chemische Stoffe . . . . .	14
<b>1 Vorwort</b>	<b>17</b>
<b>2 Motivation und Themenstellung</b>	<b>19</b>
<b>3 Oberflächenmikromechanik und Waferbonden</b>	<b>21</b>
3.1 Definition Oberflächenmikromechanik . . . . .	21
3.2 Einordnung der Oberflächenmikromechanik in die Mikrosystemtechnik . . . . .	22
3.2.1 Wesen der Mikrosystemtechnik . . . . .	22
3.2.2 Realisierung von Mikrosystemen . . . . .	23
3.2.3 Siliziummikromechanik . . . . .	25
3.3 Technologievarianten der Oberflächenmikromechanik . . . . .	27
3.3.1 Systematisierung der Technologien der Oberflächenmikromechanik . . . . .	27
3.3.2 Vorstellung spezieller Oberflächenmikromechaniktechnologien . . . . .	30
3.3.2.1 SCRESOI-Technologie . . . . .	31
3.3.2.2 Verbesserte SCRESOI-Technologie unter Verwendung vorgefertigter Substrate . . . . .	33
3.3.2.3 Oberflächenmikromechaniktechnologie für piezoresistive Sensoren . . . . .	36
3.3.3 Spezielle Teilschritte in Oberflächenmikromechaniktechnologien . . . . .	40
3.3.3.1 Anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen . . . . .	40
3.3.3.2 Isotropes plasmachemisches Siliziumätzen . . . . .	42
3.3.3.3 Oxidätzen an freigelegten Strukturen . . . . .	43
3.3.3.4 Verfüllte Isolationsgräben . . . . .	44

3.4	Waferbonden . . . . .	46
3.4.1	Anwendungsmöglichkeiten Waferbonden . . . . .	46
3.4.2	Systematisierung Bondtechnologien . . . . .	48
3.4.3	Einordnung des Waferbondens in Gesamttechnologieprozesse zur Sensorherstellung . . . . .	49
3.4.4	Waferbonden zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren	50
3.4.5	Gestaltung und Präparation der Deckwafer . . . . .	52
3.4.6	Glas als Bondzwischen-schicht . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Halbleiterwaferbonden mittels Glaszwischen-schichten</b>	<b>59</b>
4.1	Grundlagen Gläser . . . . .	59
4.1.1	Glas . . . . .	59
4.1.2	Glasherstellung und -zusammensetzungen . . . . .	60
4.1.3	Glaseigenschaften . . . . .	62
4.1.3.1	quantitative Glaseigenschaften . . . . .	62
	Viskosität und Glasverarbeitung . . . . .	62
	Thermische Dehnung . . . . .	63
	Oberflächenspannung . . . . .	64
4.1.3.2	qualitative Glaseigenschaften . . . . .	65
	Relaxation . . . . .	65
	Kristallisation . . . . .	65
	Elektrischer Widerstand . . . . .	66
4.1.4	Glasverarbeitung auf Waferebene . . . . .	66
4.1.5	Gläser zum Waferbonden . . . . .	67
4.2	Anlagen zum Waferbonden . . . . .	68
4.3	Bewertungsmethoden für Waferbondverbindungen mit Glaszwischen-schichten .	69
4.3.1	Einordnung der Bewertungsmethoden . . . . .	69
4.3.2	Bewertung der Ausbildung der Bondverbindung . . . . .	70
4.3.3	Bewertung der Bondfestigkeit . . . . .	70
4.3.4	Dichtigkeitsuntersuchungen . . . . .	72
4.3.5	Beschleunigte Alterung . . . . .	73
4.4	Anodisches Bonden von Glaszwischen-schichten . . . . .	75
4.4.1	Prinzip des anodischen Bondens . . . . .	75
4.4.2	Bonden von Glaswafern . . . . .	76
4.4.2.1	Glaswafer . . . . .	77
4.4.2.2	Herausforderungen und Lösungen . . . . .	78
4.4.3	Anodisches Bonden von Zwischenglasschichten . . . . .	80
4.4.3.1	Bonden dünner gesputterter Glasschichten . . . . .	80

Sputtern anodisch bondbarer Gläser . . . . .	80
Aktivierung der Wafer vor dem Bonden . . . . .	83
Bonden gesputterter dünner Schichten . . . . .	86
Bewertung der Bondverbindung . . . . .	93
Bewertung der Bondtechnologie . . . . .	94
4.4.3.2 Bonden dickerer Glasschichten hergestellt durch Bonden und Rückdünnen von Glaswafern . . . . .	96
Herstellung der Schichten durch Bonden und Rückdünnen . . . . .	96
Strukturierung der Glasschicht . . . . .	97
Anodisches Bonden der dicken Schichten . . . . .	98
Bewertung der Bondverbindung . . . . .	100
Bewertung der Bondtechnologie . . . . .	101
4.5 Glaslotbonden . . . . .	102
4.5.1 Bondprinzip . . . . .	102
4.5.2 Technologischer Gesamt Ablauf . . . . .	104
4.5.3 Glaspasten . . . . .	105
4.5.3.1 Glaspasten der Firma FERRO . . . . .	105
Glaspaste FX11-036 . . . . .	105
Leitfähige Glaspaste CN33-246 . . . . .	107
4.5.3.2 Glaspaste der Firma Schott . . . . .	108
Glaspaste G018-173 . . . . .	108
4.5.3.3 Umweltschutzbestimmung . . . . .	109
4.5.4 Strukturiertes Auftragen der Glaspaste mittels Siebdruck . . . . .	110
4.5.4.1 Prinzip des Siebdruckes . . . . .	111
4.5.4.2 Siebaufbau und -herstellung . . . . .	112
4.5.4.3 Anlagentechnik . . . . .	113
4.5.4.4 Drucken Glaspaste . . . . .	115
4.5.5 Bewertung gedruckter Bondrahmenstrukturen . . . . .	116
4.5.5.1 Beschreibung Bondrahmen . . . . .	116
4.5.5.2 Rahmenbreiten und -abstände . . . . .	116
4.5.5.3 Druckdicke . . . . .	120
4.5.5.4 Positionierung . . . . .	122
4.5.5.5 Kantengeometrie . . . . .	124
4.5.5.6 Eckengeometrie . . . . .	125
4.5.5.7 Abgeleitete Designregeln . . . . .	127
4.5.5.8 Siebdruckverhalten an Vertiefungskanten . . . . .	129
4.5.6 Strukturierungsalternativen Glaspaste . . . . .	132
4.5.6.1 Schablonendruck . . . . .	132

4.5.6.2	Fotochemische Strukturierung . . . . .	134
4.5.6.3	Lift-Off-Prozesse . . . . .	134
4.5.7	Thermische Konditionierung der Glaspaste vor dem Bonden . . . . .	135
4.5.7.1	Notwendigkeit der thermischen Konditionierung . . . . .	135
4.5.7.2	Vorgänge während der Konditionierung . . . . .	135
4.5.7.3	Geometrische Veränderungen der Glasstrukturen . . . . .	140
4.5.7.4	Bewertung des Verschmelzungsverhalten . . . . .	141
4.5.8	Bonden . . . . .	142
4.5.8.1	Ausbildung der Bondverbindung . . . . .	142
4.5.8.2	Bondvorgang . . . . .	146
4.5.8.3	Positioniergenauigkeit gebondete Wafer . . . . .	150
4.5.8.4	Bonden im Vakuum . . . . .	152
4.5.8.5	Ablauf Bondprozess . . . . .	153
4.5.8.6	Verlaufen des Glaslotes beim Bonden . . . . .	154
4.5.9	Bewertung der Lotglasbondverbindungen . . . . .	155
4.5.9.1	Dicke Bondfuge . . . . .	155
4.5.9.2	Selektivität Glaslotbonden . . . . .	156
4.5.9.3	Bondfestigkeit . . . . .	158
4.5.9.4	Bondbare Materialien . . . . .	158
	Bondbare Schichten auf Silizium . . . . .	159
	Bonden unterschiedlicher Substratmaterialien . . . . .	160
4.5.9.5	Einschluss von Vakuum . . . . .	160
4.5.9.6	Dichtigkeit Bondrahmen . . . . .	163
4.5.9.7	Bondausbeute . . . . .	164
4.5.10	Bewertung gebondetes Glaslot . . . . .	165
4.5.10.1	elektrische Eigenschaften . . . . .	165
	Relative Dielektrizitätskonstante . . . . .	165
	Isolationsverhalten . . . . .	165
4.5.10.2	Thermomechanische Spannungen . . . . .	166
4.5.10.3	Feuchteinflüsse . . . . .	169
4.5.10.4	Bruchverhalten . . . . .	170
4.5.10.5	Zuverlässigkeitseigenschaften . . . . .	171
	Temperaturschocktest . . . . .	171
	Temperaturfeuchte Lager . . . . .	172
4.5.11	Laterale Leitbahndurchführungen in der Glaslotschicht . . . . .	173
4.5.12	Elektrisch leitfähige Waferbondverbindung . . . . .	173
4.5.13	Gesamteinschätzung Glaslotbonden . . . . .	176



<b>5 Anwendung des Bondens mit Glaszwischen-schichten in der Sensorentwick- lung und -produktion</b>	<b>179</b>
5.1 Drehratensensoren . . . . .	180
5.2 Beschleunigungssensoren . . . . .	182
5.3 Reifendruckmesssystem . . . . .	184
5.4 Verkapseln optischer Strukturen auf Wafer-ebene . . . . .	186
5.5 Elektrisch trimmbare Widerstände . . . . .	188
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>191</b>
6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	191
6.2 Schlussfolgerungen . . . . .	194
6.3 Ausblick auf weitere Entwicklungen und technologische Möglichkeiten . . . . .	195
<b>Anhang</b>	<b>197</b>
<b>A Bewertung der Bondfestigkeit</b>	<b>199</b>
<b>B Bewertung der Dichtigkeit von Bondverbindungen</b>	<b>203</b>
<b>C Ergebnisse Optimierung Bonden gesputterter Glasschichten</b>	<b>207</b>
<b>D Daten Glaspasten</b>	<b>209</b>
<b>E Ergebnisse Eckenkompensation</b>	<b>211</b>
<b>F Messung Dicke Bondglasschicht vor dem Bonden</b>	<b>213</b>
<b>G Messung Dicke gebondete Glasschicht</b>	<b>215</b>
<b>H Parameteroptimierung Glaslotbonden</b>	<b>217</b>
<b>I Optimierung Waferversatz Glaslotbonden</b>	<b>219</b>
<b>J Berechnung Ausdehnungskoeffizient Glaslot FERRO FX 11-036</b>	<b>223</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>224</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>230</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>236</b>
<b>Versicherung</b>	<b>238</b>
<b>Thesen</b>	<b>241</b>

<b>Lebenslauf</b>	<b>247</b>
<b>Summary</b>	<b>249</b>

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen

AIM	engl. Air Gap Insulated Metallisation, Oberflächenmikromechniktechnologie
ÄS	Ätzstop
ASE	engl. Advanced Silicon Etching, Verfahren zum anisotropen plasmachemischen Siliziumätzen
ASIC	engl. Application Specific Integrated Circuit, anwendungsspezifischer Schaltkreis
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BiCMOS	engl. Bipolare Complementary Metallic Oxide Semiconductor, Erweiterung der CMOS-Technologie für bipolare Anwendungen
CMOS	engl. Complementary Metallic Oxide Semiconductor, am weitesten verbreitetste Technologie zur Herstellung integrierter Schaltkreise
CVD	engl. Chemical Vapor Deposition, Schichtabscheidung aus der chemischen Dampfphase
DIL	engl. Dual In Line, Bezeichnung schaltkreisgehäuse
DI-Wasser	deionisiertes Wasser
EDX	engl. Energy Dispersive X-ray, Verfahren zur stofflichen Analyse im REM
el.	elektrisch
engl.	englisch
Epi	Epitaxie
FEM	Finite-Elemente-Methode

FS21	fotostrukturierbares Glas, entwickelt am FG Glas- und Keramiktechnologie der TU Ilmenau
GF	Grenzfläche
HF	Hochfrequenz
ICP	engl. Inductively Coupled Plasma
Impl.	Implantation
IR	infrarot
LIGA	Röntgenlithographie, Galvanoformung und Abformung, Verfahren zum Mikroformen
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches System
n+	positive Halbleiterdotierung hoher Konzentration
NTB	Niedertemperaturbonden
OS	Opferschicht
poly	polykristallin
PVD	engl. Physical Vapor Deposition, Schichtabscheidung aus der physikalischen Dampfphase, Sputtern
RCA	im engl. Sprachgebrauch für Kernsche Reinigung, nach den Radio-Corporation-of-America-Laboratories benannt
REM	Rasterelektronenmikroskop
RH	engl. relative Humidity, relative Luftfeuchte
RIE	engl. Reactive Ion Etching, Plasmaätzprozess
RS	Rückseite
SCREAM	engl. Single Crystal Reactive Etching and Metallisation, Oberflächenmikromechaniktechnologie
SCRESOI	engl. Single Crystal Etching of Silicon On Insulator, spezielle Oberflächenmikromechaniktechnologie
SMD	engl. Surface Mounted Devices, Schaltkreisumgehäuse zur Oberflächenmontage

---

SOI	engl. Silicon on Insulator, spezielle Halbleitersubstrate, bei denen eine dünne Siliziumschicht durch eine Isolationsschicht zum dicken Trägerwafer isoliert ist
TVS	engl. Triangle Voltage Sweep, Verfahren zur Bewertung von Oxidqualitäten
VS	Vorderseite

## Formelzeichen

a	Abstand; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
$a_\nu$	relativer Stoffanteil
A	Fläche; Einheit [ $\text{mm}^2$ ]
b	Breite; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
$b_\nu$	spezifische Stoffeigenschaft
cp	maximal mögliche Prozessfähigkeit
cpk	kritische Prozesssicherheit unter Beachtung der Prozessstreuung
C	elektrische Kapazität; Einheit [F]
d	Dicke; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
D	Dicke Drucksieb; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
$e^-$	freies Elektron, Elementarladung
E	E-Modul; [Pa/m]
f	Frequenz, Einheit [Hz]
F	Kraft; Einheit [N]
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	elektrischer Strom; Einheit [A]
k	Federkonstante; [N/m]
L	Länge, lateraler Abstand; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
m	Masse; Einheit [g]

p	Druck; Einheiten [Pa, bar]
P	Leistung; Einheit [W]
Q	Ladungsmenge; Einheit [As]
R	elektrischer Widerstand; [ $\Omega$ ]
s	Weg; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
T	Temperatur; Einheiten [ $^{\circ}\text{C}$ , K]
U	elektrische Spannung; Einheit [V]
w	Maschenweite Drucksieb; Einheit [ $\mu\text{m}$ ]
x,y,z	Raumkoordinaten
$\alpha$	spezifischer thermischer Ausdehnungskoeffizient; Einheit [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\beta$	Bespannungswinkel Drucksieb; Einheit [ $^{\circ}$ ]
$\eta$	Formelzeichen Viskosität (Stoffzähigkeit, innere Reibung); Einheit [P]
$\gamma$	Oberflächenenergie; Einheit [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]
$\nu$	Frequenz des Lichtes, Einheit [Hz]
$\epsilon_{\text{r}}$	relative Dielektrizitätskonstante
$\pi$	Piezokoeffizient; [ $\text{Pa}^{-1}$ ]
$\sigma$	Standardabweichung

## Chemische Stoffe

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminiumoxid
AlSi	AluminiumSiliziumlegierung
Ar	Argon
$\text{B}_2\text{O}_3$	Boroxid
BaO	Bariumoxid
$\text{C}_4\text{F}_8$	Octafluorcyclobutan

---

CaO	Calziumoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
HF	Fluorwasserstoff, Flusssäure
ITO	Indiumzinnoxid
K	Kalium
K <sub>2</sub> O	Kaliumoxid
KOH	Kaliumhydroxid, Kalilauge
Li	Lithium
Na	Natrium
Na <sub>2</sub> O	Natriumoxid
O	Sauerstoff
OH	Hydroxylgruppe
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphoroxid
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
Si	Silizium
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Siliziumnitrid
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
TEOS	Tetraethylorthosilikat
TiN	Titannitrid
TiW	Titanwolfram





# 1 Vorwort

In den letzten zehn Jahren hat die Mikrosystemtechnik aufgrund hervorragender wissenschaftlicher Vorarbeiten und ihrer vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten verstärkt Eingang in die industrielle Fertigung von Sensorsystemen gefunden. Während dieser Zeit wurden auch in der X-FAB Semiconductor Foundries AG sehr gute technische Voraussetzungen für die Produktion mikro-elektro-mechanischer Sensoren geschaffen und parallel dazu eine Reihe sensorspezifischer Technologien entwickelt. Um das von der X-FAB im Hauptgeschäftsfeld der CMOS- und BiCMOS-Technologien verfolgte Foundry-Geschäftsmodell, d.h. die Trennung von Systementwurf und Waferfertigung, auch auf MEMS-Produkte auszuweiten, wurden Oberflächenmikromechaniktechnologien entwickelt, in denen unterschiedliche Sensoren gefertigt und die somit von verschiedenen Kunden genutzt werden können. Eine wichtige Herausforderung dabei war die Entwicklung einer universellen Verkappungsmethode auf Waferebene, um die empfindlichen Strukturen zu schützen und eine Weiterverarbeitung der Wafer durch spezialisierte Unternehmen der Aufbau- und Verbindungstechnik zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit, die während meiner Tätigkeit als Technologieentwicklungsingenieur in der MEMS-Entwicklungsgruppe der X-FAB Erfurt AG entstand, werden die Entwicklungsarbeiten zu einer derartigen Waferbondtechnologie dargestellt. Im Mittelpunkt steht dabei das Glaslotbonden, welches inzwischen Eingang in die Produktion verschiedener Sensoren gefunden hat.

Mit diesen wenigen Worten möchte ich all denen danken, die mir während der Zeit meiner Promotion mit Rat und Tat zur Seite standen und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt dabei:

- der Geschäftsleitung der X-FAB Semiconductor Foundries AG für das Ermöglichen der Promotion parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit
- Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Geßner für die Betreuung dieser Arbeit und die zahlreichen wertvollen Hinweise
- Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel und Herrn Dr. rer. nat. Konrad Bach für die Übernahme der Gutachten

- den Kollegen der MEMS-Entwicklungsgruppe der X-FAB AG für viele anregende Diskussionen und ihre Hilfe bei der Umsetzung neuer Ideen in den Sensortechnologien; insbesondere gilt hier mein Dank Herrn Dipl.-Phys. Uwe Schwarz für die umfassende Unterstützung dieser Arbeit sowie Herrn Dipl.-Phys. Jens Urban und Herrn Dr. rer. nat. Gisbert Hölzer für die Durchsicht des Manuskriptes
- allen Mitarbeitern der X-FAB AG, die mir durch die Präparation der Wafer und die Durchführung von Sonderuntersuchungen geholfen haben
- Herrn Dr.-Ing. Maik Wiemer und Herrn Dipl.-Ing. Jörg Frömel vom Fraunhoferinstitut IZM Chemnitz für die Durchführung der Siebdruckarbeiten und die zahlreichen Gespräche zum Siebdruckprozess
- den Mitarbeitern des HSG-IMIT Villingen-Schwenningen für die gute Zusammenarbeit im Rahmen verschiedener Förderprojekte, deren Ergebnisse teilweise in diese Arbeit eingeflossen sind
- Herrn Dipl.-Inf. Mike Schubert für die Hilfe bei der satztechnischen Realisierung

Nicht vergessen möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Manfred Hapke, der mich zu dieser Arbeit ermutigt und mich stets unterstützt und gefördert hat, leider jedoch ihre Fertigstellung nicht mehr mit erleben durfte.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Birgit und meinem Sohn Robert für ihre Geduld, ihr Verständnis und die Aufmunterungen sowie die Hilfe im täglichen Leben, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

## 2 Motivation und Themenstellung

In den letzten Jahren hat sich die Mikrosystemtechnik als eigenes Technikfeld etabliert und über verschiedene Anwendungen wie Airbag- und Drucksensoren Eingang in die industrielle Produktion gefunden. Besonders mit der siliziumbasierten Oberflächenmikromechanik, die auf den Verfahren der Halbleiterplanartechnik aufbaut, ist es möglich, sehr komplexe miniaturisierte elektro-mechanische Systeme, wie z.B. Drehratensensoren, zu realisieren. Derartige Sensoren erlauben die Wandlung von nichtelektrischen Eingangsgrößen in elektrische Signale, die in entsprechenden Auswerteschaltungen weiter verarbeitet werden können. Um derartige Sensoren kostengünstig und in großen Stückzahlen herstellen zu können, ist es notwendig, sie mit den etablierten Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnologie zu komplexen Systemen (Sensor und ASIC in einem Umgehäuse) aufzubauen. Dies ist nur möglich, wenn die sehr feinen, mechanisch und gegen Verunreinigungen empfindlichen oberflächenmikromechanischen Strukturen bereits vor dem Vereinzeln, d.h. auf Waferebene, mit einer Schutzkappe versehen werden. Neben dem mechanischen Schutz muss diese die hermetische Abdichtung des Sensorinneren gewährleisten. Eine derartige Verkapselung kann durch Waferbonden erfolgen und soll letztlich die Weiterverarbeitung der einzelnen Sensorchips so vorbereiten, dass sie weitestgehend mit Standardprozessen der Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgen kann. Weiterhin trägt der auf Waferebene aufgebraachte Deckel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer der mikromechanischen Elemente bei.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Entwicklung einer geeigneten Waferbondverbindungstechnologie, die den speziellen Anforderungen oberflächenmikromechanischer Sensoren entspricht und für industrielle Fertigungsprozesse eingesetzt werden kann. Diese Waferbondtechnologie soll sich weiterhin durch eine hohe Prozesssicherheit und -ausbeute auszeichnen sowie sehr universell einsetzbar sein. Vorüberlegungen haben ergeben, dass diese Forderungen durch Bondverfahren, die auf Glaszwischen-schichten beruhen erfüllt werden können. Durch Betrachtungen zu glastheoretischen Zusammenhängen und der Analyse spezieller Oberflächenmikromechaniktechnologien wurden verschiedene Bondverfahren ausgewählt, untersucht und die am besten geeignete Variante, das Glaslotbonden, zur industriellen Reife geführt. An Beispielen ausgewählter Sensoren wurden die Eigenschaften der Bondver-technologie untersucht

und ihre Eignung für die industrielle Praxis nachgewiesen. Hiermit soll Beitrag zur Weiterentwicklung des Waferbondens und zur Etablierung der Oberflächenmikromechanik in der industriellen Fertigung geleistet werden, da nur auf Wafer Ebene verkapselte Sensoren für mit den kostengünstigen Standardprozessen der Aufbau- und Verbindungstechnologie zu komplexen Mikrosystemen komplettiert werden können.

# 3 Oberflächenmikromechanik und Waferbonden

## 3.1 Definition Oberflächenmikromechanik

Unter Oberflächenmikromechanik versteht man die Realisierung von elektro-mechanische Strukturen, durch einseitige Bearbeitung von Halbleiterwafern in deren oberflächennahen Bereichen. Die mechanisch aktiven Elemente sind frei beweglich und werden über entsprechende Aufhängungen an Ankern gelagert. Feststehende Strukturen erfüllen vielfältige elektrische und mechanische Funktionen, um den Betrieb der beweglichen Teile zu ermöglichen (Energiezufuhr, Signaltransport, Überlastschutz, mechanische Führung). Die Strukturgrößen der Funktionselemente sind meist deutlich kleiner als  $10\ \mu\text{m}$ . Technologien zu Herstellung von oberflächenmikromechanischen Elementen umfassen typischerweise drei Teilkomplexe:

1. Erzeugen der mechanischen Funktions- und technologischen Hilfsschichten
2. Strukturierung der Funktionselemente
3. Ablösen der beweglichen Elemente von der Waferoberfläche, um deren Beweglichkeit zu erreichen

Oberflächenmikromechaniktechnologien, als wichtige Herstellungsverfahren von Mikrosystemen, werden sehr häufig in der Sensortechnik (z.B. Inertialsensoren) und in der optischen Nachrichtentechnik (z.B optische Schalter) eingesetzt. In diesem Bereich wurden in den letzten Jahren verschiedene Technologien entwickelt, die im Vergleich zu den meist sehr bauteilspezifischen Volumentechnologien<sup>1</sup> die Realisierung sehr unterschiedlicher Sensoren und Aktuatoren ermöglichen. Unter 3.3 werden diese Technologien systematisiert und zum Teil detailliert vorgestellt.

---

<sup>1</sup>zeichnen sich durch Bearbeitung des gesamten Wafervolumens aus, siehe 3.2.3

Aufgrund ihrer sehr feinen und leicht beweglichen Funktionselemente<sup>2</sup>, bei oft nur sehr geringen Abständen<sup>3</sup>, weisen oberflächenmikromechanische Strukturen eine hohe Empfindlichkeit gegen mechanische Beschädigung, Verunreinigungen (Partikel) und Feuchte auf. Dies macht es unumgänglich derartige Strukturen bereits auf Waferebene mittels Waferbonden hermetisch zu Verkapseln. Nur so ist es möglich oberflächenmikromechanische Systeme mittels Standardprozessen zu Chips zu vereinzeln<sup>4</sup> und diese kostengünstig zu komplexen Systemen aufzubauen<sup>5</sup>.

## 3.2 Einordnung der Oberflächenmikromechanik in die Mikrosystemtechnik

### 3.2.1 Wesen der Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik umfasst all jene Teilgebiete der Technik, die sich mit dem Entwurf, der Herstellung und der Anwendung miniaturisierter Gesamt- oder Teilsysteme befassen. Der Hauptschwerpunkte liegen dabei in der räumlichen Integration von Sensoren bzw. Aktuatoren und intelligenter Signalverarbeitung in einem Mikrosystem, das einem biologischen Regelkreis, bestehend aus Rezeptoren, Effektoren und neuronalem Netz, in seiner Funktion gleichkommt [1]. Somit ist ein Mikrosystem letztlich ein komplexes intelligentes Sensor/Aktorsystem. Die Mikrosystemtechnik bedient sich dazu folgender Technologien:

- Mikroelektronik, zur Realisierung von komplexen integrierten elektronischen Schaltungen
- Mikromechanik, zur Herstellung miniaturisierter mechanisch beweglicher Komponenten
- Mikrooptik, zur Integration lichtempfindlicher oder emittierender Funktionselemente

Diese werden durch Einsatz der Methoden der Informationsverarbeitung und der Mikrostrukturierungstechnik miteinander kombiniert.

Mikrosysteme sind somit dadurch gekennzeichnet, dass sie unterschiedliche physikalische Größen (mechanische, optische, thermische) in elektrische Signale umwandeln, diese aufbereiten und verarbeiten. Über Aktuatoren können sie dann entsprechende Reaktionen ausgeben, d.h. sie sind insgesamt in der Lage, direkt mit ihrer Umwelt zu kommunizieren. Je nachdem wie weit die Integration der Sensor/Aktorelemente mit der Elektronik erfolgt, kann man von verschiedenen Arten bzw. Generationen von Sensoren sprechen [1]. Ziele der Miniaturisierung

---

<sup>2</sup>z.B. Federn mit einer breite von 2  $\mu\text{m}$  bei einer Länge von bis zu 100  $\mu\text{m}$

<sup>3</sup>z.B. kapazitive Antriebs- oder Auswertekämme mit Kondensatorplattenabständen von 2  $\mu\text{m}$

<sup>4</sup>wassergekühltes Trennsägen mit Diamantsägeblättern

<sup>5</sup>z.B. Plastmouldassembly von Sensor- und ASIC-Chip in DIL- oder SMD-Gehäusen

sind die Erhöhung der Integrationsdichte zur Steigerung der Funktionalität bei verminderter Größe sowie Senkung der Herstellungskosten durch parallele Verarbeitung einer großen Zahl von Einzelkomponenten (Chips im Scheibenverband).

Der Systemcharakter wird nicht nur in der Kette der Verarbeitung und Umwandlung von unterschiedlichen physikalischen Signalen deutlich. Er zeigt sich auch in der hierarchischen Gliederung ihres Aufbaus in Komponenten, Funktions- und Formelemente wie sie in [2] vorgestellt wird. Dieser Ansatz ist dahingehend interessant, dass er auf unterschiedlichen Ebenen<sup>6</sup> Möglichkeiten zur Standardisierung aufzeigt. Für die weitere Entwicklung der Mikrosystemtechnik ist eine derartige Normung wichtig, da sie zur schnelleren und effizienteren Entwicklung neuer Mikrosysteme und deren kostengünstiger Produktion beitragen kann, auch wenn dabei ein Teil der Flexibilität verloren geht.

Für Mikrosysteme sind besonders angepasste Aufbau- und Verbindungstechniken notwendig. Grundforderung dabei ist, dass das Umgehäuse die Kommunikation der Sensoren und Aktoren mit der Umwelt ohne Beeinflussung ermöglichen muss. Meist verbindet erst das Umgehäuse die einzelnen Komponenten zu einem funktionsfähigen System und schützt dieses während der Anwendung. Besonders wichtig dabei ist der sichere Schutz der empfindlichen mechanischen Funktionselemente, die auch während der Verarbeitung nicht beschädigt werden dürfen. Um weitestgehend die etablierten und preisgünstigen Methoden der AVT nutzen zu können, ist es daher notwendig die mikro-elektro-mechanischen Komponenten bereits auf Wafer Ebene zu verkapseln, aber auch gleichzeitig ihre elektrische Kontaktierbarkeit zu gewährleisten, so dass sie anschließend sicher mit Standardprozessen<sup>7</sup> weiterverarbeitet werden können. Aus diesem Grund steht im Mittelpunkt dieser Arbeit die Entwicklung einer universell einsetzbaren Waferbondtechnologie zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren, die auf Wafer Ebene zur effektiven Vorbereitung der nachfolgenden AVT dienen soll.

Abbildung 3.1 zeigt ein intelligentes Sensorsystem für Airbaganwendungen im Kfz als Beispiel für ein Mikrosystem. Seine hierarchische Gliederung, der Signalfluss und die Bedeutung der Aufbau- und Verbindungstechnik sind dargestellt.

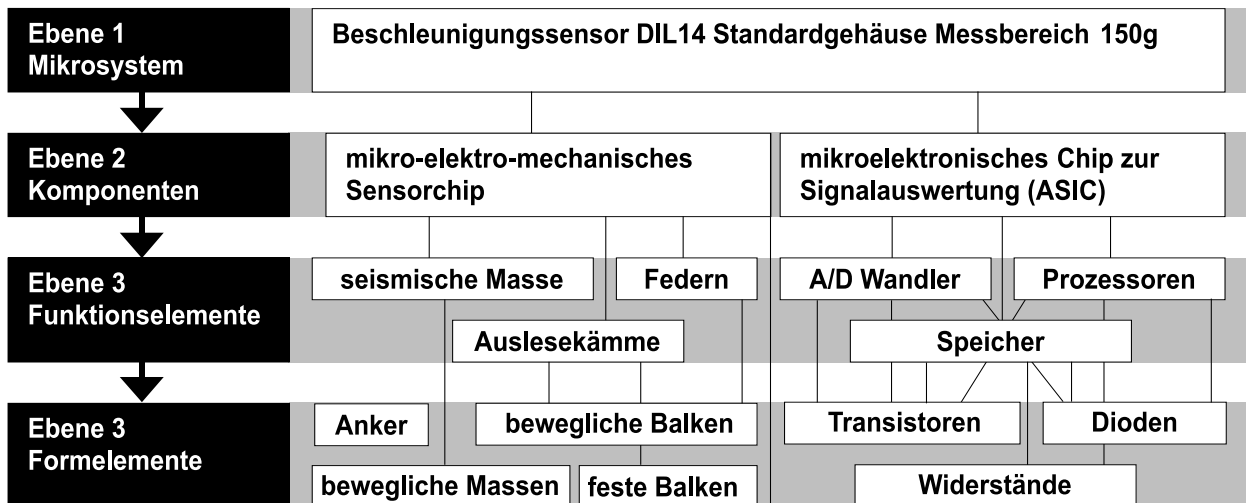
### 3.2.2 Realisierung von Mikrosystemen

Aus den obigen Betrachtungen zur Mikrosystemtechnik lässt sich ableiten, dass die Komponenten eines Mikrosystems einzeln mit unterschiedlichen Prozessen zu fertigen sind. Gegen Ende des Herstellungsprozesses sind die Einzelkomponenten zum Gesamtsystem zusammenzufügen, wenn nötig aufeinander abzugleichen und in ein handhabbares Umgehäuse mit de-

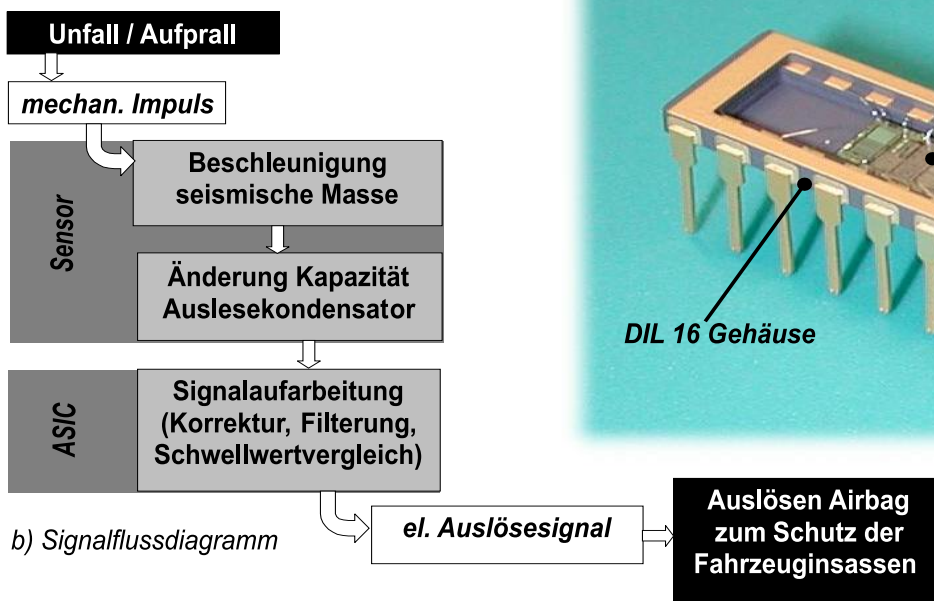
---

<sup>6</sup>standardisierte Komponenten wie z.B. Drucksensoren oder Schaltkreise zur Signalaufbereitung, einheitliche Funktionselemente wie kapazitive Ausleseköpfe und Designregeln für Formelemente (Federn, Anker)

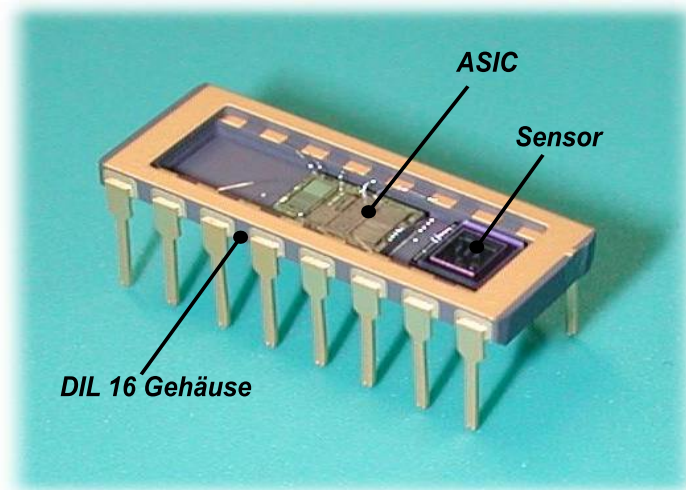
<sup>7</sup>Trennsägen, Drahtbonden, Plastverpackung



a) hierarchische Gliederung



b) Signalflussdiagramm



c) technische Realisierung

Abbildung 3.1: Mikromechanischer Beschleunigungssensors als Beispiel eines Mikrosystems

finierten Schnittstellen zu integrieren. Dabei sind die unerwünschten Wechselwirkungen der Komponenten untereinander sowie störende Einflüsse der Gehäusetechnik auf die Einzelkomponenten möglichst gering zu halten. Dies lässt sich nur garantieren, wenn alle Komponenten einschließlich des Gehäuses und der in den meisten Fällen benötigten Betriebssoftware im Systemzusammenhang geplant und entwickelt werden.

Für die Fertigung der Einzelkomponenten sind spezielle Mikrotechnologien notwendig, die es ermöglichen, Strukturen mit Mikrometerabmessungen sicher und reproduzierbar herzustellen. Zur Herstellung der elektronischen Komponenten kann auf die seit Jahrzehnten etablierte Mikroelektronik zurückgegriffen werden. Zur Herstellung von miniaturisierten Sen-



sor/Aktorelementen stehen die Methoden der Mikromechanik zur Verfügung. Sie ermöglichen die Realisierung von Bauteilen mit Abmessungen im Mikrometerbereich für mechanische, pneumatische und andere Anwendungen durch dreidimensionale Mikrostrukturierung von Festkörpern<sup>8</sup>. Für mikromechanische Sensoren ergeben sich daraus folgende Vorteile:

1. Die Kleinheit der Sensoren erschließt neue Anwendungsfelder, da sich das Einbauvolumen reduziert und Rückwirkungen des Sensors auf die zu messende Größe deutlich verringert werden, was eine höhere Genauigkeit durch geringere Messfehler zur Folge hat.
2. Mikrostrukturierungstechnologien verringern durch ihre hohe Genauigkeit Fertigungstoleranzen. Der Kalibrieraufwand für die Sensoren sinkt.
3. Die parallele Fertigung einer großen Vielzahl von Sensoren in Batchprozessen führt zu geringen Stückkosten; eine wichtige Voraussetzung für den massenhaften Einsatz in der Praxis.

#### 3.2.3 Siliziummikromechanik

In den letzten Jahren hat sich die Siliziummikromechanik im Bereich der Sensorik gegenüber anderen Fertigungsprinzipien wie Mikroabformen (LIGA), Mikroumformen (Prägen) oder Mikrozerspanen (Fräsen) durchgesetzt. Ausschlaggebend dafür waren folgende Aspekte:

1. Kristallines Silizium besitzt hervorragende mechanische Eigenschaften, lässt sich sehr rein herstellen und gilt als das am besten untersuchte Material überhaupt.
2. Basierend auf der Mikroelektronik waren umfangreiche Erfahrungen bei der Herstellung und Verarbeitung von Silizium vorhanden. Die Basisprozesse der Mikroelektronik (Schichtabscheidung, Fotolithografie, Ätzstrukturierung) konnten an die Erfordernisse der Mikromechanik angepasst und durch Spezialprozesse (tiefes Siliziumätzen, Waferbonden) ergänzt werden. Die Nutzung der Infrastruktur der Mikroelektronik (wie Reinraumkapazitäten, Analysemethoden) haben die Entwicklung der Siliziummikromechanik zusätzlich beschleunigt.
3. Die Verknüpfung von mechanischen und elektrischen Elementen bis hin zur monolithischen Integration von Sensor- und Auswerteschaltungen, ist auf Siliziumbasis unter Ausnutzung seines halbleitenden Charakters sehr gut möglich.
4. Die parallele Fertigung einer großen Anzahl von Sensoren im Waferverbund führt zu geringen Stückkosten.

---

<sup>8</sup>überwiegend Silizium, aber auch Metalle im LIGA-Verfahren

Eine Untergruppe der Siliziummikromechanik stellen oberflächenmikromechanische Fertigungstechnologien dar, die inzwischen weite Verbreitung gefunden haben. Verantwortlich dafür sind neben verbesserten Eigenschaften der Sensorelemente vor allem ökonomische Aspekte. Durch verringerten Fertigungsaufwand, fortschreitende Strukturminiaturisierung und universellen Einsatz dieser Technologien lassen sich sehr preiswert Sensoren herstellen. Auf Technologien und Anwendungen der Oberflächenmikromechanik wird unter 3.3 detailliert eingegangen.

Neben den Oberflächentechnologien zählt die Volumenmikromechanik zu der Gruppe der Siliziummikromechanik. Bei den Volumen- oder Bulk-Technologien wird quasi das gesamte Volumen des Wafers bearbeitet. Dies erfolgt, indem der Wafer von beiden Seiten aus strukturiert wird. Nachdem man zunächst auf der Vorderseite die elektrisch aktiven Elemente erzeugt hat, werden die mechanisch aktiven Strukturen, meist Membranen mit konstanter oder variierender<sup>9</sup> Dicke, von der Rückseite her freigelegt. Dies kann durch Nass-Ätzen (z.B. KOH) oder anisotropes Siliziumtrockenätzen erfolgen. Anschließend können die entstandenen Membranen durch Siliziumtrockenätzen von der Wafervorderseite aus zusätzlich zu komplexen mechanischen Strukturen<sup>10</sup> geformt werden. Inzwischen gelten Volumentechnologien als sehr ausgereift und werden daher in industriellen Produktionsprozessen z.B. zur Herstellung von Druck- und Beschleunigungssensoren eingesetzt. Besonders für die monolithische Integration von Sensor und Auswerteschaltung bietet die Volumenmikromechanik Vorteile, da die Mikromechanikprozesse an fertig prozessierten CMOS-Wafern angewendet werden können. Die Nachteile der Volumenmikromechanik liegen im hohen Flächenbedarf<sup>11</sup> und in einer aufwändigen Prozessführung<sup>12</sup>. In der Volumenmikromechanik wird das Waferbonden nicht nur zum Verkapseln der beweglichen Strukturen eingesetzt sondern auch zur Realisierung von komplexen dreidimensionalen Strukturen, wie z.B. symmetrischen seismischen Massen (Abbildung 3.2). Des Weiteren wird oft durch die Realisierung sehr schmaler Spalten<sup>13</sup> beim Deckelbonden das Funktionsprinzip des Sensors (kapazitive Ausleseelektrode auf dem Deckel) erst möglich oder dessen Messverhalten bestimmt (Frequenzgang, Überlastschutz). Daher kommen hierbei eher direkte Bondverfahren (anodisches Bonden, Fusionbonden) und nicht die in dieser Arbeit entwickelten Bondverfahren mit Glaszwischen-schichten, die keine sehr exakte Spalteinstellung zulassen, zum Einsatz. Obwohl die Oberflächenmikromechanik bedingt durch die sehr ökonomische Fertigung kleinster mechanischer Strukturen immer weiter an Bedeutung gewinnt, wird Volumenmikromechanik auch weiterhin für die Herstellung solcher Produkte unerlässlich sein, bei denen die Bearbeitung der gesamten Waferdicke notwendig für die Funktion ist.

---

<sup>9</sup>z.B. Membranen mit seismischen Massen für Beschleunigungssensoren

<sup>10</sup>z.B. Aufhängungen seismischer Massen

<sup>11</sup>resultierend aus dem Ätzwinkel des nasschemischen anisotropen Siliziumätzens

<sup>12</sup>hohe Anzahl von Masken, doppelseitiger Waferprozess

<sup>13</sup>Absenkungen von wenigen Mikrometern im Silizium außerhalb der Waferbondgebiete

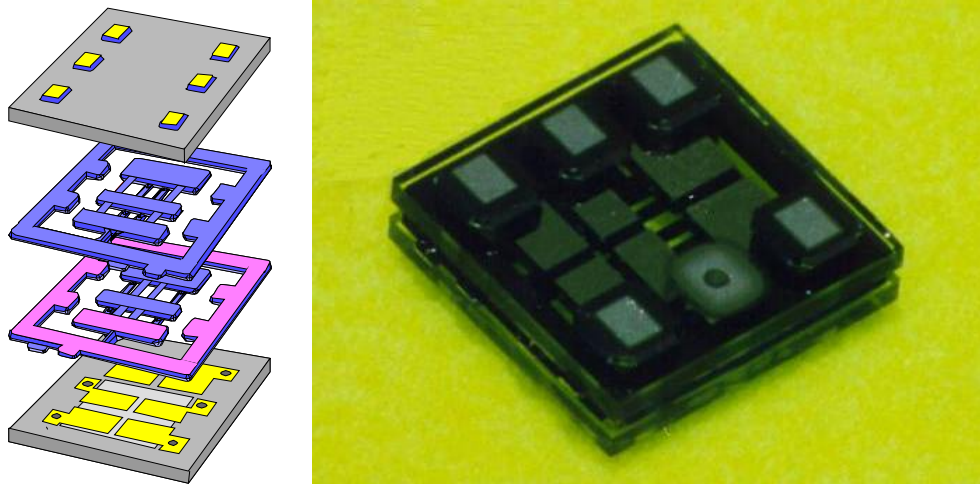


Abbildung 3.2: Volumenmikromechanischer Drehratesensor, TU-Chemnitz: Einsatz von Waferbondverfahren zur Realisierung dreidimensionaler Mikrostrukturen und deren Verkapselung

### 3.3 Technologievarianten der Oberflächenmikromechanik

#### 3.3.1 Systematisierung der Technologien der Oberflächenmikromechanik

Wie bereits in der Definition zur Oberflächenmikromechanik festgehalten, umfassen Technologien zur Herstellung oberflächenmikromechanischer Strukturen drei Hauptschritte: die Erzeugung der benötigten Schichten, die Strukturierung der mechanisch aktiven Schicht und das Ablösen der freibeweglichen Strukturen. Dabei kann die Reihenfolge, in der diese fundamentalen Arbeitsgänge erfolgen, variieren. Während das Strukturieren der mechanisch aktiven Schicht in der Regel durch anisotropes Siliziumtrockenätzen erfolgt, gibt es deutliche Unterschiede in der Art und der Erzeugung der mechanisch aktiven Siliziumschicht (ein- oder polykristallin) sowie in der Methode zum Freilegen der beweglichen Strukturen. Somit lassen sich die Oberflächenmikromechaniktechnologien anhand der aktiven Schicht und der Freilegemethode klassifizieren.

Bei nahezu allen Technologien können die mechanischen Strukturen nicht direkt aus dem oberflächennahen Silizium eines Bulkwafers herausgelöst werden<sup>14</sup>. Vielmehr ist es notwendig vor dem eigentlichen Mikromechanikprozess Schichtfolgen bestehend aus Opfer-, Ätzstopp-, oder Isolierschichten sowie der später mechanisch aktiven Siliziumschichten zu schaffen, die als

<sup>14</sup>Ausnahmen: AIM- und SCREAM-Technologie

Basis für die Strukturierung und das Freilegen der beweglichen Strukturen dienen. Dabei ist typischer Weise die Siliziumschicht für die mechanischen Elemente mit bis zu 100  $\mu\text{m}$  deutlich dicker als übliche Schichten der Mikroelektronik. Zum Erzeugen derartiger Schichtfolgen sind folgende Verfahren anwendbar:

1. Abscheiden von polykristallinem Silizium auf einem Zwischenisolatoroxid, welches später als Opferschicht dienen kann
2. ein- oder mehrfaches Stapeln einkristalliner Siliziumschichten durch Waferbonden und Rückdünnen, wobei optional oxidische Isolierschichten (SOI-Prinzip) oder Gruben (Hohlräume) vergraben werden können
3. Epitaktische Abscheidung von einkristallinen Siliziumschichten unterschiedlicher Dotierung, optional mit einer perforierten Zwischenisolatorschicht
4. selektive Sauerstoff-Tiefenimplantation mit nachfolgender Oxidation zur Erzeugung einer vergrabenen optional strukturierten Oxidschicht
5. Ionentiefenimplantation zur Erzeugung von Schichten mit veränderter Ätzrate

Das Freilegen bzw. Ablösen der Strukturen von der Waferoberfläche stellt die eigentliche technologische Herausforderung dar und bestimmt daher den technologischen Gesamtprozess im hohen Maße. Der Prozess des Freilegens der Strukturen muss auf deren Rückseite wirken, welche jedoch meist dem geschlossenen Substrat zugewandt und somit nicht direkt zugänglich ist. Zur Lösung dieses Problems sind zwei prinzipielle Ansätze bekannt:

1. Selektives Unterhöhlen der bereits strukturierten aktiven Siliziumschicht durch:
  - a) Opferschichttechnik, bei der sich unterhalb der aktiven Siliziumschicht ein anderes Material (z.B. Siliziumoxid) befindet, welches durch gezieltes seitliches selektives Unterätzen unterhalb der zu lösenden Strukturen entfernt werden kann.
  - b) Unterätzung der zu lösenden Strukturen durch isotropes Siliziumätzen, nach dem ein Schutz auf die Strukturen der aktiven Siliziumschicht aufgebracht wurde.

In beiden Fällen bleiben feststehende Strukturen erhalten, wenn ihre lateralen Ausdehnungen deutlich größer als das Doppelte der bei der Unterhöhlung auftretenden Unterätzung sind.

2. Vorfertigung von Substraten mit Hohlräumen an den Stellen, an denen später frei bewegliche Strukturen entstehen sollen. Dies kann durch Überbonden geätzter Gruben und Rückdünnen der Deckwafer erfolgen. Die beweglichen Strukturen können anschließend

aus der entstehenden Siliziummembran herausgeätzt werden, ohne dass ein weiterer Arbeitsgang zum Freilegen der Strukturen notwendig ist.

Da in den meisten Anwendungsfällen zwischen den beweglichen und fest stehenden Strukturen elektrische Spannungen angelegt werden müssen, um die Funktion des Systems zu ermöglichen (elektrostatische Anregung und Auswertung), besitzen die Technologien, die mit vergrabenen Oxiden arbeiten, den Vorteil, dass dadurch die Strukturen zum Substrat hin und durch Gräben, die bei der Strukturierung der aktiven Siliziumschicht mit geätzt werden, untereinander elektrisch isoliert sind.

An dieser Stelle sei die am Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz entwickelte AIM<sup>15</sup>-Technologie [4] erwähnt. Bei ihr werden die mechanischen Elemente direkt im oberflächennahen Bereich (ca. 20 $\mu$ m) eines Bulkwafers mittels ASE strukturiert und durch isotropes plasmachemisches Unterätzen frei gelegt. Gehalten werden die beweglichen Strukturen durch Aluminiumbrücken an der Waferoberfläche, untereinander isoliert sind sie durch offene Gräben (air gaps). Diese Technologie bietet den Vorteil, dass weder Opfer- noch mechanische Funktionsschichten aufgebracht werden müssen. Somit liegt ein sehr kostengünstiger Prozess vor, der zudem vielfältige Design-Möglichkeiten<sup>16</sup> und gute Voraussetzungen zur lateralen monolithischen Integration von Sensor und Auswerteschaltung bietet.

Die unterschiedliche Kombination der aufgeführten prinzipiellen Möglichkeiten zur Schichtfolgenerzeugung und zum Freilegen der beweglichen Strukturen führen zu einer großen Vielfalt an Oberflächentechnologien der Mikromechanik, wie sie in Abbildung 3.3 zusammengefasst<sup>17</sup> ist. Da in der Literatur (z.B. [2]) eine Vielzahl von Beschreibungen der einzelnen Technologievarianten existieren, soll an dieser Stelle nicht weiter auf alle technologischen Abläufe und Besonderheiten eingegangen werden. Die Technologien, auf denen die Entwicklung der Bondverfahren dieser Arbeit aufbauen, werden im folgenden näher beschrieben.

Im Sinne der Vollständigkeit sei hier erwähnt, dass in der siliziumbasierten Oberflächenmikromechanik zunehmend mechanische Strukturen an Bedeutung gewinnen, die nicht aus Silizium, sondern aus Metallen oder organischen Substanzen bestehen. Besonders die Metallstrukturen spielen in der Hochfrequenztechnik (Spulen) und der optischen Signalverarbeitung (Kippspiegel) eine wichtige Rolle. Metallische oberflächenmikromechanische Strukturen werden zumeist in der klassischen Opferschichttechnik hergestellt, wobei bedingt durch die relativ niedrigen Abscheidetemperaturen der Metalle organische Stoffe (Polyimide) als Opferschicht dienen können. Diese lassen sich nach der Metallstrukturierung leicht mit Lösungsmitteln oder

---

<sup>15</sup>Air gap Insulated Mikrostructures

<sup>16</sup>günstige Verdrahtungsmöglichkeiten in der Aluminiumebene, keine Ankerung der mechanischen Strukturen im Silizium notwendig

<sup>17</sup>konkrete Technologiebezeichnungen können je nach Quelle von einander abweichen

Material		einkristallines Silizium				
		Polykristallines Silizium	Waferbonden und Rückdünnen	Implantation	Bulkwafer	
Freilegen						
Unterstützen der mechanischen Strukturen	Opferschicht	 OS.: Oxid	 OS.: Oxid OS.: gebondete kristalline Si-Schicht	 OS.: schnell ätzendes Silizium durch n+ Implantation	 OS.: Oxid selektive O <sub>2</sub> -Impl. + Tempern	nicht möglich
	Isotropes Unterätzen	nicht bekannt	 SOI-Wafer basiert ÄS. Vergrabenes Oxid Unterätzung im Trägerwafer	nicht bekannt	 SCREAM AIM kein ÄS, Strukturen werden direkt aus Oberfläche herausgelöst	
Ätzen in vorgefertigte vergrabene Gruben		nicht möglich	 Vorgefertigte Substrate mit vergrabenen Gruben nötig	nicht möglich	nicht möglich	

Legende: OS-Opferschicht, ÄS-Ätzstop, Impl.-Implantation  
 einkristallines Silizium  polykristallines Silizium  Oxid  n+Dotierung

Abbildung 3.3: Systematischer Überblick Oberflächenmikromechaniktechnologien

durch Veraschen entfernen. Dadurch können derartige Verfahren als Postprozess an fertig prozessierten CMOS-Wafern (ASIC) eingesetzt werden, ohne dass beim Entfernen der Opferschicht die elektrischen Strukturen beschädigt werden.

Abbildung 3.4 zeigt Beispiele von oberflächenmikromechanischen Strukturen, gefertigt in unterschiedlichen Technologievarianten.

### 3.3.2 Vorstellung spezieller Oberflächenmikromechaniktechnologien

Im Vorfeld dieser Arbeit und während ihrer Bearbeitung wurden drei unterschiedliche Oberflächenmikromechaniktechnologien in der X-FAB Semiconductor Foundries AG entwickelt<sup>18</sup>, die inzwischen Eingang in die Produktion gefunden haben. Dabei wurde stets die Sensortech-

<sup>18</sup>z.T. im Rahmen von BMBF-Förderprojekten in enger Zusammenarbeit mit dem Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik in Villingen-Schwenningen

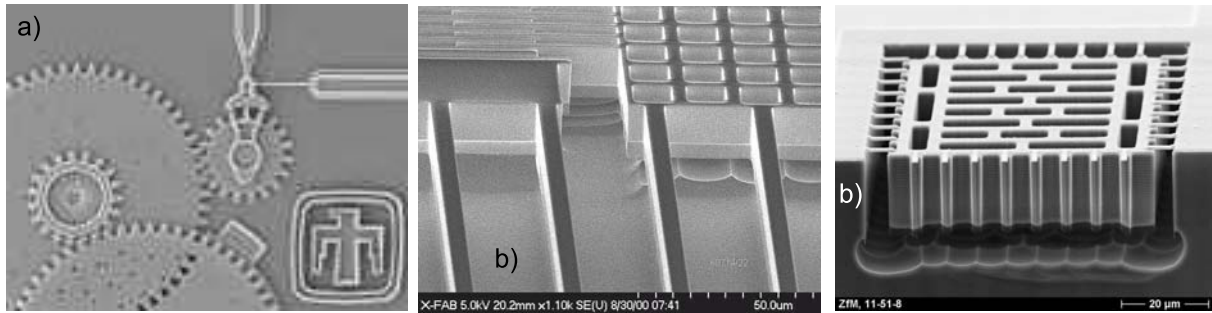


Abbildung 3.4: Beispiele oberflächenmikromechanischer Strukturen: a) Mikromotorgetriebe Sandia National Laboratories Polysilizium-Opferschichttechnik [5], b) Detail Gyroskope SOI-basierte Technologie mit isotropen Unterätzen, c) AIM-Struktur ZfM Chemnitz

nologientwicklung von Arbeiten zum Verkapselungsbonden, die Hauptteil dieser Arbeit sind, begleitet, um sicherzustellen, dass sowohl seitens des technologischen Gesamtablaufs als auch der konkreten Sensordesigns die notwendigen Voraussetzungen für das Verkapseln am Ende des Waferprozesses geschaffen wurden. Somit konnte aktiv Einfluss auf die Entwicklung und Optimierung dieser Technologien und einzelner Teilschritte genommen werden, die daher hier kurz vorgestellt werden sollen.

Die Besonderheit dieser Technologien besteht darin, dass die mechanisch aktive Schicht aus einkristallinem Silizium besteht. Durch verschiedene Substratvorfertigungen wird diese auf einen Trägerwafer mittels direkten Waferbondens aufgebracht. Nach dem Bondvorgang wird die Enddicke des aktiven Siliziums durch Rückdünnen eingestellt. In allen drei Technologien können somit die sehr guten mechanischen Eigenschaften des einkristallinen Siliziums genutzt werden. Dies ist ein bedeutender Vorteil im Vergleich zum polykristallinen Silizium, dessen Eigenschaften letztlich durch die Abscheidung bestimmt werden und somit prozessbedingt stark schwanken können.

### 3.3.2.1 SCRESOI-Technologie

Mit der SCRESOI-Technologie lassen sich kapazitive oberflächenmikromechanische Elemente herstellen. Das Sensorprinzip beruht dabei auf der Änderung der Kapazität zweier Kondensatorplatten während der Bewegung relativ zueinander. Unter Ausnutzung elektrostatischer Anziehungskräfte lassen sich gleichzeitig Aktuatorstrukturen realisieren. Der Name dieser Technologie ist die Abkürzung von Single Crystal Reactive Etching of Silicon On Insulator, womit ihr Inhalt treffend beschrieben wird. Ausgangspunkt dieser Technologie sind klassische kommerziell verfügbare SOI-Wafer. Bei diesen Substraten wird eine dünne, für diese Technologie 15 bis 30  $\mu\text{m}$  dicke, einkristalline Siliziumschicht (Device-Wafer) durch eine unstrukturierte Siliziumoxid-

schicht vom deutlich dickeren Trägerwafer isoliert. Der Device-Wafer ist hoch dotiert, da in ihm auch elektrisch leitende Strukturen erzeugt werden sollen. Die Strukturierung der mechanisch aktiven Elemente erfolgt, wie auch ihr späteres Freilegen, durch plasmachemisches reaktives Siliziumätzen. Dabei werden zunächst durch anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen<sup>19</sup> der Devicewaferschicht die mechanischen und elektrischen Elemente erzeugt. Bei diesem Ätzen dient das vergrabene Oxid des SOI-Wafers als Stoppschicht<sup>20</sup>. Das Design der entsprechenden Ätzmaske muss so ausgelegt sein, dass dabei Gräben um die später aktiven Einzelemente entstehen. Diese Gräben sind notwendig, um elektrische Strukturen voneinander zu isolieren und das Freilegen der beweglichen Elemente durch Unterätzen zu ermöglichen. Nach der Passivierung der Seitenwände der geätzten Devicewaferschichten mittels CVD-Oxid und dem Entfernen des Oxides auf dem Boden der Grabenstrukturen können die mechanisch aktiven Teile durch isotropes plasmachemisches Unterätzen<sup>21</sup> im Bereich des Trägerwafers gelöst werden. Während dieses Prozesses sind die zu unterätzenden mechanischen Strukturen rundherum mit Oxid bedeckt und somit gegen Ätzangriff geschützt. Ausschlaggebend, ob Strukturen freigelegt werden oder fest verankert bleiben, ist ihre Breite. Sind sie schmaler als das doppelte Maß der lateralen Unterätzung, werden sie komplett unterätzt und somit frei beweglich. Breitere Strukturen werden nur teilweise unterätzt und bleiben somit mit dem Trägerwafer fest verankert. Dies bedeutet, dass frei bewegliche flächenhafte Strukturen (z.B. seismische Massen) im regelmäßigen Raster Perforationslöcher aufweisen müssen um freigelegt zu werden. Dies führt zu einem erhöhten Flächenbedarf, um ausreichend große seismische Massen zu erhalten. Zum Abschluss wird das Oxid von der Waferoberfläche und den Strukturen entfernt. Abbildung 3.5 zeigt den prinzipiellen Technologieablauf und enthält weitere Detailinformationen.

Da alle elektrisch und mechanisch aktiven Elemente durch offene dreidimensionale Gräben voneinander isoliert sind, ist ein dichter Verschluss der fertigen Struktur durch Waferbonden nur möglich, wenn um jedes Drahtbondpad und um den gesamten Chip Bondrahmen zur Verfügung stehen (Bild 3.6). Dadurch vergrößert sich der Flächenbedarf enorm, was mit einem erhöhten Chippreis verbunden ist. Des Weiteren wird durch diesen Fakt die Gestaltung der Deckwafer komplizierter und deren Herstellung aufwändiger. Zudem führen die notwendigen relativ großen Waferbondflächen um die Drahtbondpads zu hohen parasitären Kapazitäten.

Abbildung 3.7 verdeutlicht anhand eines Drehratesensors die Besonderheiten der SCRESOI-Technologie und zeigt typische Strukturelemente.

---

<sup>19</sup> ASE-Advanced Silicon Etching siehe 3.12

<sup>20</sup> Siliziumoxid wird von der Chemie des ASE-Prozesses nahezu nicht geätzt.

<sup>21</sup> siehe 3.3.3.2



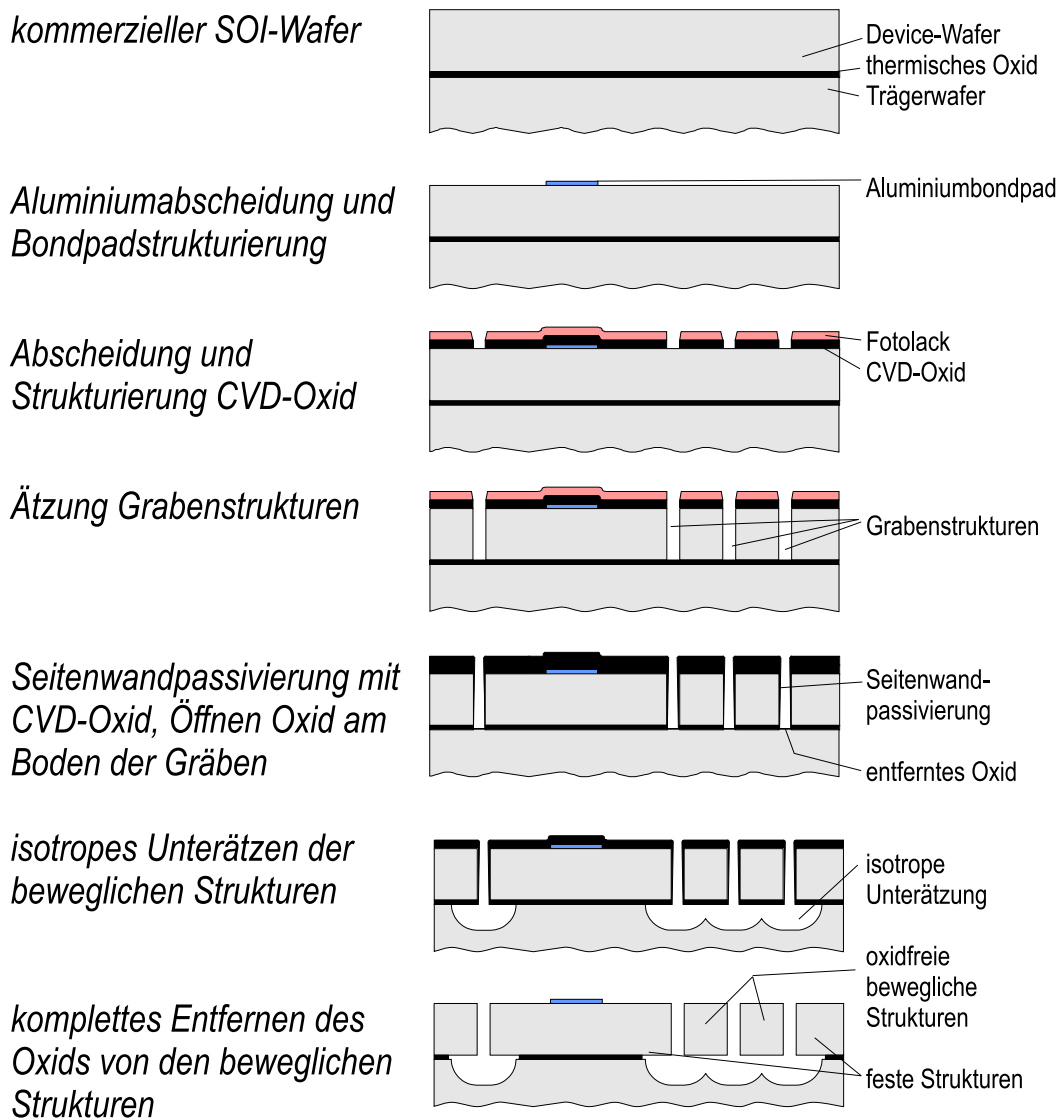


Abbildung 3.5: Prozessablauf SCRESOI-Technologie

### 3.3.2.2 Verbesserte SCRESOI-Technologie unter Verwendung vorgefertigter Substrate

Um signifikante Verbesserungen der messtechnischen Eigenschaften kapazitiver Sensoren zu erreichen, sollte die oben vorgestellte SCRESOI-Technologie umgestellt und verbessert werden. Dabei wurde zudem besonderes Augenmerk auf die Vereinfachung des gesamttechnologischen Ablaufes gelegt. Die Verbesserung der Sensoreigenschaften konnte durch eine deutlich erhöhte Dicke (ca. Faktor 3) der mechanisch aktiven einkristallinen Siliziumschicht erreicht werden. Diese bringt eine Erhöhung der Empfindlichkeit durch Vergrößerung der Flächen der Auswertekondensatoren und schwerere seismische Massen mit sich. Deutliche Vereinfachungen im technologischen Bereich konnten erreicht werden, indem man speziell vorgefertigte Substrate

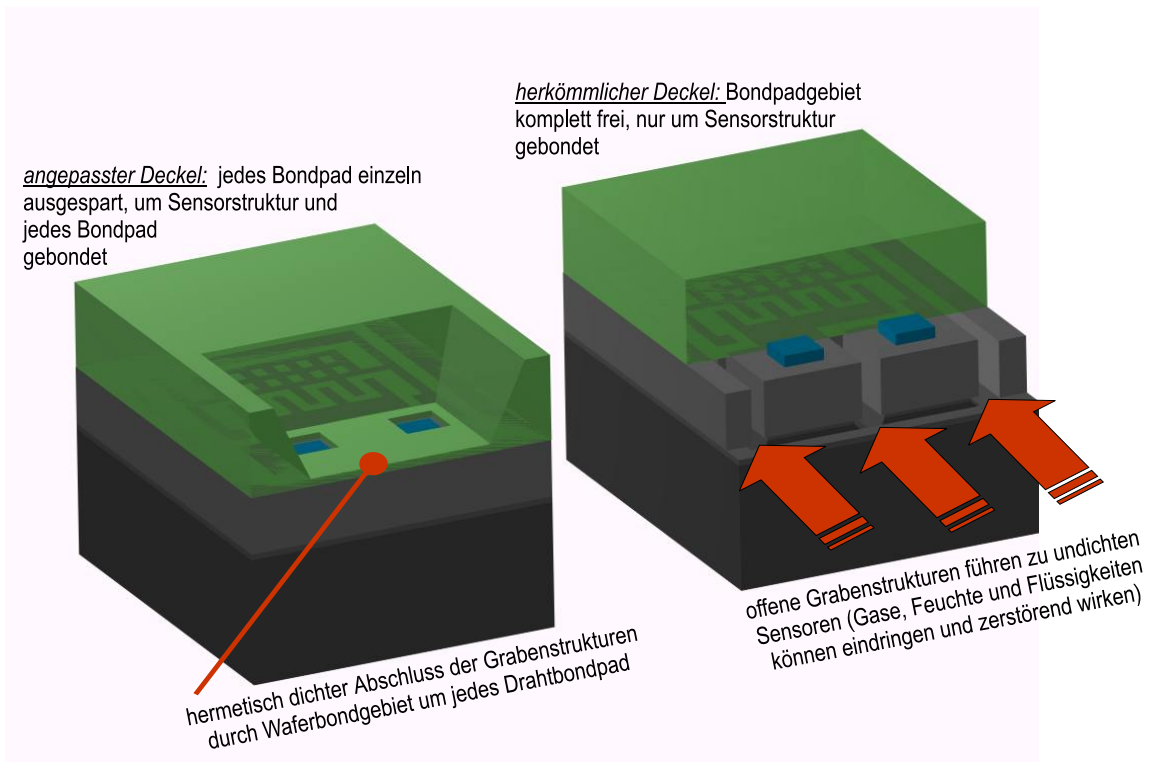


Abbildung 3.6: Gestaltung der Deckelwafer für die SCRESOI-Technologie

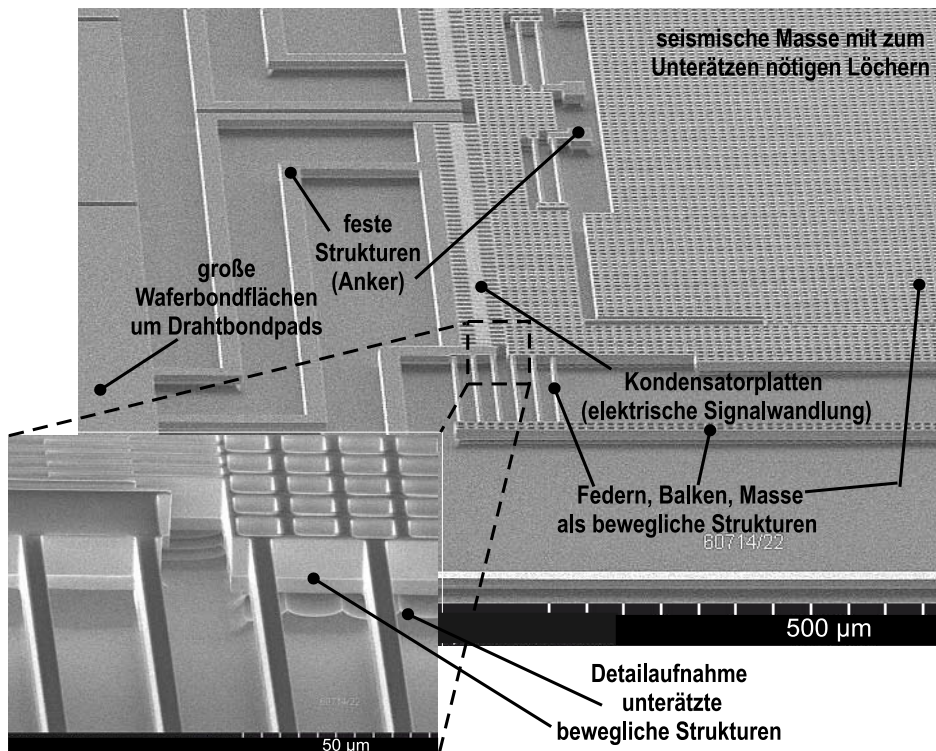


Abbildung 3.7: Beispiel SCRESOI-Technologie, Teilansicht eines Drehratesensors

mit vergrabenen Hohlräume einsetzt, die das nachträgliche Freilegen der mechanisch aktiven Elemente entfallen lassen. Die frei beweglichen Strukturen werden dabei direkt aus den Membranen über den Gruben herausgeätzt. Der neu entwickelte technologische Gesamtprozess, wie ihn Abbildung 3.8 zeigt, besteht aus zwei Komplexen:

1. Substratvorfertigung: Vergraben von Gruben unter den später mechanisch aktiven Bereichen bei gleichzeitiger elektrischer Isolation der aktiven Siliziumschicht vom Trägerwafer durch eine Oxidzwischen-schicht. Durch entsprechende Gestaltung der Gruben können zusätzliche Ankerpunkte realisiert werden. Beim Bonden des Deckwafers ist Vakuum einzuschließen, um die Strukturierung der Membran nach dem Schleifen und Polieren des Waferstapels, mittels ASE (in Vakuumkammer), zu ermöglichen. Zum Wiederauffinden der vergrabenen Gruben wird ein Rückseitenmarkensystem verwendet.
2. Die Strukturierung der mechanischen und elektrischen Elemente durch anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen (ASE) unter Verwendung einer CVD-Oxidmaske. In dem dabei durch den Ätzprozess die Membrane über den vergrabenen Gruben perforiert wird, entstehenden direkt frei bewegliche Strukturen. Ein Unterätzen zum Freilegen der beweglichen Strukturen, verbunden mit der Seitenwandpassivierung, ist somit nicht mehr notwendig. Zum Abschluss wird die Oxidmaske entfernt.

Im Vergleich zur ursprünglichen SCRESOI-Technologie wurden die aufwändigen und z.T. kritischen Prozessschritte zum Freilegen der Strukturen durch die Vorprozessierung der Substrate ersetzt. Dabei konnte der technologische Gesamtaufwand, bei gleichzeitiger Erhöhung der Prozesssicherheit, gesenkt werden. Da große bewegliche Strukturen nicht mehr nachträglich unterätzt werden müssen, können hier die Lochraster entfallen. Für die Sensoren ergeben sich verbesserte Eigenschaften. Die erhöhte Dicke des aktiven Siliziums führt zu robusteren Strukturen, die weniger quersensitiv und empfindlich gegen mechanische Belastungen<sup>22</sup> sind. Die dicke Siliziumschicht erhöht zudem die Grundkapazität und ermöglicht eine effektivere Wandlung der mechanischen Bewegung in ein kapazitives Signal, da bedingt durch größere Kondensatorplatten die Kapazitätsänderung pro Bewegungseinheit zunimmt. Des Weiteren lassen sich schwerere bzw. in ihrer lateralen Ausdehnung kleinere seismische Massen realisieren, da der Dickengewinn und der Wegfall der Unterätzungs-löcher das spezifische Gewicht je lateraler Flächeneinheit erhöhen. Bei den Federaufhängungen ist zu beachten, dass diese jedoch bedingt durch ihre größere Dicke steifer werden. Alles in allem lassen sich aber mit der verbesserten Technologie empfindliche Inertialsensoren herstellen. Das Problem der Grabenisolierung der elektrischen Strukturen, verbunden mit den durch die Waferbondrahmen sehr großen Bondpadgebiete, ließ sich in dieser Technologievariante noch nicht lösen. Durch das erhöhte Sensorsignal wurde lediglich der Einfluss der parasitären Kapazitäten verringert.

---

<sup>22</sup>z.B. Lebensdauer relevante mechanische Schocks und Störschwingungen

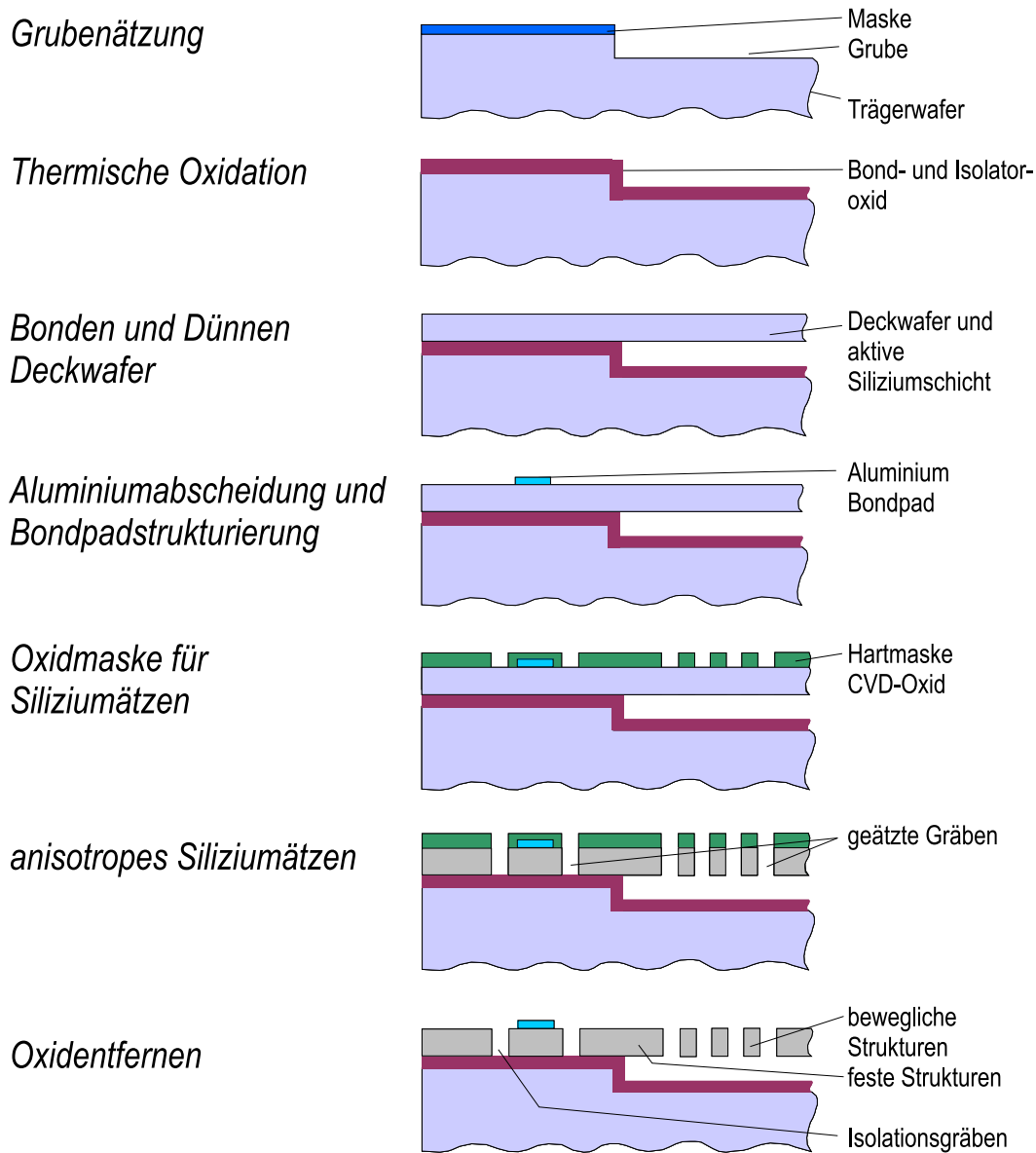


Abbildung 3.8: Prozessablauf verbesserte SCRESOI-Technologie

Die verbesserte SCRESOI-Technologie auf der Basis vorgefertigter Spezialsubstrate bietet signifikante Vorteile für den Entwurf und die Fertigung kapazitiver oberflächenmikromechanischer Inertialsensoren und stellt einen guten Ausgangspunkt für die Entwicklung verbesserter Sensoren und technologischer Varianten dar.

### 3.3.2.3 Oberflächenmikromechaniktechnologie für piezoresistive Sensoren

Die bisher vorgestellten Oberflächenmikromechaniktechnologien sind ausschließlich zur Herstellung kapazitiver Sensoren geeignet. Bei derartigen Sensoren bestehen sehr hohe Anforderungen

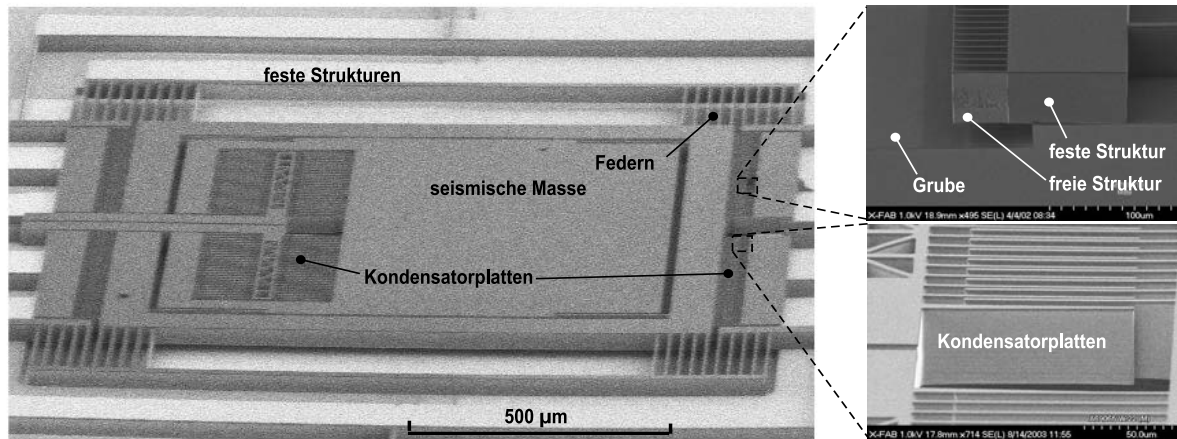


Abbildung 3.9: Drehratesensor gefertigt mit der verbesserten SCRESOI-Technologie

bezüglich der Ableitung und Verarbeitungen der elektrischen Signale. Da die kapazitiven Sensorsignale in der Regel sehr klein und von großen parasitären Kapazitäten überlagert sind, ergibt sich ein kleiner Signal-Rausch-Abstand, der nur mit aufwändigen Signalvorverstärkern aufgelöst werden kann. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit gezielt eine Technologie entwickelt, welche die Vorteile der Oberflächenmikromechanik (einseitige Waferbearbeitung, kleine Chipabmessungen) mit denen der piezoresistiven Signalwandlung, welche hohe, einfach zu verarbeitende Ausgangssignale in Form elektrischer Spannungsänderungen liefert, verbindet. Das piezoresistive Auswertprinzip beruht darauf, dass der spezifische elektrische Widerstand von Silizium bei entsprechender Dotierung von mechanischen Spannungen abhängig ist. Grad und Vorzeichen der Abhängigkeit werden unter anderem von der kristallografischen Orientierung des Widerstands zum Siliziumkristall bestimmt. Ordnet man vier Widerstände so auf einer beweglichen Struktur an, dass bei deren Auslenkung bei Zweien von ihnen der Widerstandswert steigt und bei den anderen beiden sich gleichzeitig verringert, kann man bei Verschaltung der Widerstände zu einer Vollbrücke sehr sensitiv anhand der Brückenausgangsspannung ihre Auslenkung erfassen. Dieses Prinzip wird hauptsächlich in der Volumenmikromechanik angewendet, wobei man zunächst auf der Wafervorderseite die piezoresistiven Widerstände, ihre Verschaltung und Kontaktierungen erzeugt, bevor man von der Waferrückseite durch Bearbeitung nahezu des ganzen Siliziumwafer volumens Membranen erzeugt, deren Deformation mit dem piezoresistiven Prinzip gemessen werden soll. Optional können diese Membranen seismische Massen tragen und auch nachträglich perforiert werden, um neben Drucksensoren auch andere wie z.B. inertielle Sensoren herzustellen. Da die Membranen meist durch nasschemisches anisotropes Siliziumätzen erzeugt werden, welches sich an der Kristallstruktur orientiert und somit schräge Seitenwände erzeugt, ist der Platzbedarf für die Rückseitenmaske in der Regel deutlich größer als der der vorderseitigen Sensorstruktur, wodurch teure Waferfläche

verloren geht. Der Schlüssel zu Kombination von Oberflächenmikromechanik mit der piezoresistiven Auswertung, bei gleichzeitiger Platzeinsparung, sind wieder vorgefertigte Substrate. Dabei werden die typischen Membranstrukturen am Beginn des Prozesses erzeugt, indem man Gruben in einem Trägerwafer mit einem Deckelwafer durch Hochtemperaturdirektbonden verschließt und den Deckwafer auf das Maß der gewünschten Membrandicke abdünnt. In den Gruben ist Vakuum einzuschließen, damit das abgeschlossene Volumen als Referenz für Absolutdrucksensoren dienen bzw. die Membran definiert durch Plasmaätzen<sup>23</sup> perforiert werden kann. Zum Wiederauffinden der Membranen nach dem Rückdünnen werden Marken auf die Trägerwaferrückseite gesetzt, die auf die Wafervorderseite übertragen werden können. Um Brüche der Membranen bei dem aus Schleif- und Politurschritten bestehenden Rückdünnen zu vermeiden, sollte das Verhältnis von Grubenbreite zu Membrandicke 100:1 nicht überschreiten. Auf die Güte der polierten Oberfläche ist besonderer Wert zu legen, um die Funktion der elektrischen Schaltungselemente zu gewährleisten. Dies gilt vor allem, wenn die Substrate zur Herstellung integrierter Sensoren<sup>24</sup> eingesetzt werden sollen. Nach Abschluss der Substratvorfertigung können die gebondeten und rückgedünnten Wafer den Prozess zur Herstellung der elektrischen Elemente durchlaufen, welcher für integrierte Sensoren einem vollständigen und für diskrete Sensoren einem abgerüsteten CMOS-Standardprozess entspricht. Im einfachsten Fall erhält man als Ergebnis diskrete Absolutdrucksensoren. Durch Strukturierung der Membran am Prozessende können aber auch einfache Inertialsensoren entstehen. Diese Technologie bietet zum Beispiel die Gelegenheit, einen Druck- und einen Bewegungssensor auf einem Chip zu vereinigen. Eine derartige Kombination wird für Reifendruckmonitorsysteme verwendet, um neben dem Reifeninnendruck auch die Bewegung des Rades und dessen Position am Fahrzeug zu detektieren. Abbildung 3.10 fasst den technologischen Ablauf der vorgestellten Technologie an Hand eines derartigen kombinierten Sensorchips zusammen.

Diese Technologie zur Fertigung piezoresistiver oberflächenmikromechanischer Sensoren zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass nach der Vorfertigung der Substrate Standard-CMOS-Prozesse eingesetzt werden können, um diskrete und integrierte Sensoren herzustellen. Durch nachfolgendes Perforieren der Membran (ASE-Prozess) lassen sich frei bewegliche Strukturen mit großen lateralen Abmessungen erzeugen, da kein Unterätzen notwendig ist. Die Technologie ist zur Fertigung eines breiten Spektrums von Sensoren, die sich durch leicht zu verarbeitende Ausgangssignale auszeichnen, geeignet. Abbildung 3.11 zeigt als Anwendungsbeispiel einen Absolutdrucksensor.

---

<sup>23</sup>Plasmaätzen erfolgt bei starkem Unterdruck, Normaldruck unter den Membranen würde diese beim Ätzen sprengen

<sup>24</sup>Sensor und Auswerteeinheit auf einem Chip

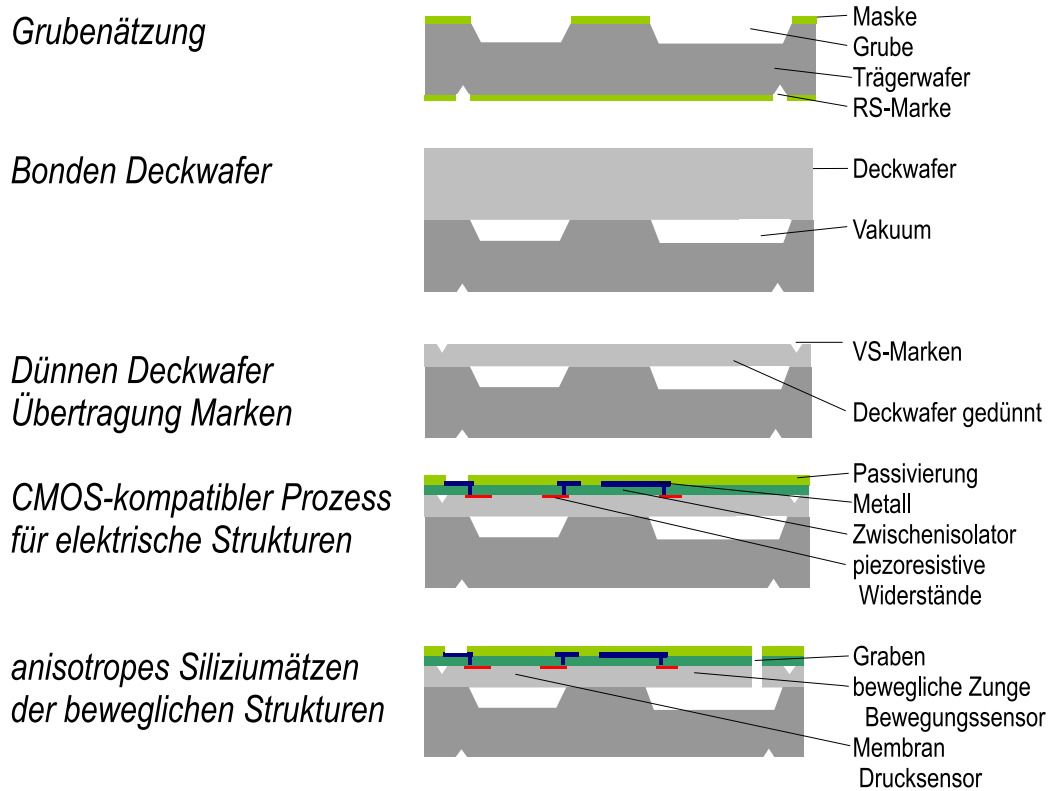


Abbildung 3.10: Prozessablauf der Oberflächenmikromechaniktechnologie für piezoresistive Sensoren

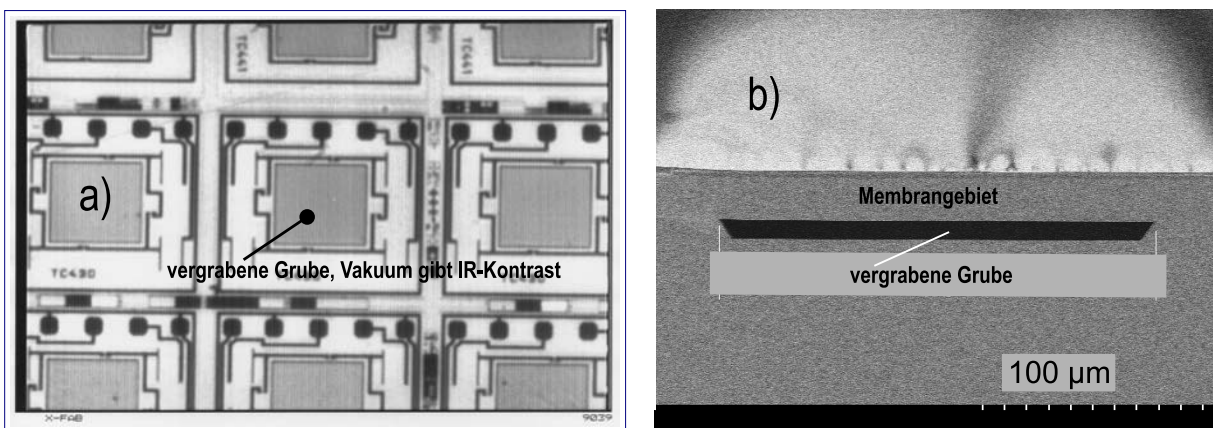


Abbildung 3.11: Absolutdrucksensor in Oberflächenmikromechanik: a) Infrarotaufnahme, b) Querschnittsbild (REM)

### 3.3.3 Spezielle Teilschritte in Oberflächenmikromechaniktechnologien

An dieser Stellen sollen einige Prozessschritte vorgestellt werden, die für die Technologien der Oberflächenmikromechanik von besonderer Bedeutung sind und zum Teil bereits bei den Technologiebeschreibungen erwähnt wurden. Neben einer kurzen technologischen Beschreibung der Prozesse sollen technologische Besonderheiten und Möglichkeiten aufgezeigt werden, die für das weitere Verständnis dieser Arbeit wichtig sind.

#### 3.3.3.1 Anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen

Wie bereits oben erwähnt, ist es in der Siliziumoberflächenmikromechanik in den meisten Fällen notwendig, eine Siliziumschicht (ein- oder polykristallin) so zu strukturieren, dass die später mechanisch aktiven Elemente entstehen. Aufgrund der meist kleinen Strukturabmessungen (wenige Mikrometer) kann diese Ätzung nur plasmachemisch erfolgen. Es wird ein stark anisotropes Ätzprofil unabhängig von der Kristallorientierung des Siliziums gefordert, um die Strukturen senkrecht unter hohen Aspektverhältnissen in die Tiefe zu ätzen. Diese Anforderungen lassen sich sicher nur durch einen zweistufig alternierenden Prozess erreichen, in dem die Seitenwände der zu ätzenden Grabenstrukturen sukzessive passiviert und somit vor einem weiteren Ätzangriff geschützt werden. Durch das Einlagern von Passivierungsschritten in den Ätzprozess wird dabei die begrenzte Anisotropie des plasmachemischen Siliziumätzens extrem erhöht. Dieses Ätzprinzip wird als ASE<sup>25</sup> - Advanced Silicon Etching bezeichnet. Abbildung 3.12 fasst in Anlehnung an [6] den Ätzprozess zusammen, der üblicher Weise in ICP-Prozesskammern durchgeführt wird. Ausschlaggebend für den ordnungsgemäßen Prozessablauf ist dabei das Entfernen der Polymerpassivierung auf dem Grund der Ätzgrube ohne Beschädigung der Seitenwanbedeckung, da nur so ein sauberes anisotropes Ätzen garantiert werden kann. Bedingt durch die Aneinanderreihung kurzer isotroper Ätzungen ergeben sich keine ideal glatten Seitenwände an den geätzten Strukturen, sondern eine geriffelte Struktur. Die umlaufenden Riffel werden als Scallops bezeichnet.

Da es sich beim anisotropen Siliziumätzen um einen sehr komplexen Prozess handelt, weist er folgende Nebeneffekte auf, die im Vorfeld dieser Arbeit untersucht, bei den Gesamtechnologieentwicklungen beachtet und z.T sogar gezielt genutzt wurden (Abbildung 3.13).

- Strukturen mit unterschiedlichen lateralen Öffnungsweiten werden unterschiedlich tief geätzt, da in schmalen Gräben der Gasaustausch gestört ist und nicht genügend Ätzradi-

---

<sup>25</sup>Geschützte Bezeichnung Surface Technology Systems Limited. Der ursprüngliche, patentierte Prozess wurde gemeinsam mit der Robert BOSCH GmbH entwickelt. Inzwischen werden sowohl Anlagen als auch Prozesslizenzen von verschiedenen Seiten angeboten.



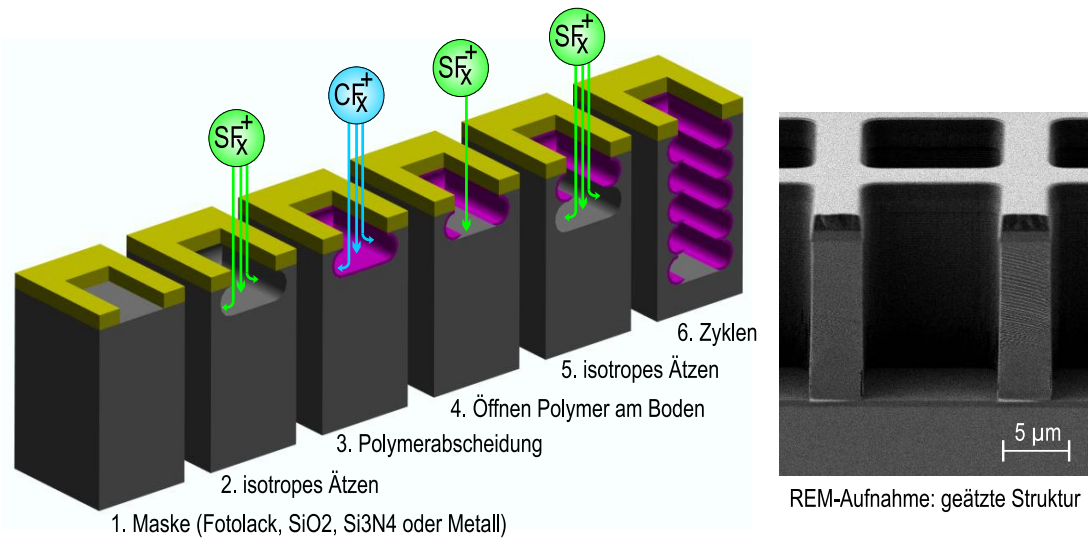


Abbildung 3.12: Prozessablauf anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen und Beispielstruktur

kale zur Verfügung stehen. Dieser Effekt wird als ASE-Lag bezeichnet. Um gleichmäßige Ätztiefen zu erreichen sind identische Grabenbreiten in der Maske vorzusehen bzw. ist mit Ätzstoppschichten zu arbeiten, wobei die Ätzzeit an die schmalsten Gräben anzupassen ist.

- Der Ätzprozess ist sehr selektiv zu Siliziumoxid, daher kann man vergrabene Oxide (z.B. von SOI-Wafer) als Ätzstoppschichten einsetzen. Dabei ist zu beachten, dass es zur Aufladung dieser dielektrischen Schichten kommen kann, wodurch die Ätzradikale zurückgestreut werden und die Strukturen oberhalb der Oxidschicht anätzen können (Notching). Durch eine hochfrequente Ansteuerung der Waferrauflage lassen sich die Aufladungen und somit dieser Effekt vermeiden.
- Durch Variation der Zykluszeiten lässt sich die Größe der Scallops und somit die Rauigkeit der Ätzflanken einstellen.
- Die Neigung der Seitenwand lässt sich variieren, in dem man das Verhältnis von Ätz- zu Passivierungszeit kontinuierlich über die Gesamtätzung verändert. Während man für Sensorstrukturen meist senkrechte Strukturen benötigt, sind geneigte Wände z.B. für das Verfüllen von Isolationsgräben von Bedeutung.
- Beim Durchätzen von geschlossenen Membranen ist zu beachten, dass das Plasmaätzen bei einem starken Unterdruck erfolgt. Um eine Beschädigung der Membranstrukturen beim Ätzen zu vermeiden, ist im Volumen unter der Membran Vakuum einzuschließen.

Mit dem anisotropen Siliziumätzen steht ein ausgereifter Prozess zur Verfügung, der die

Strukturierung mechanisch aktiver Siliziumschichten ermöglicht. Aufgrund umfangreicher Kenntnisse über diesen Prozess lassen sich seine Besonderheiten im technologischen Ablauf sowie im Maskendesign berücksichtigen und ggf. sogar gezielt ausnutzen.

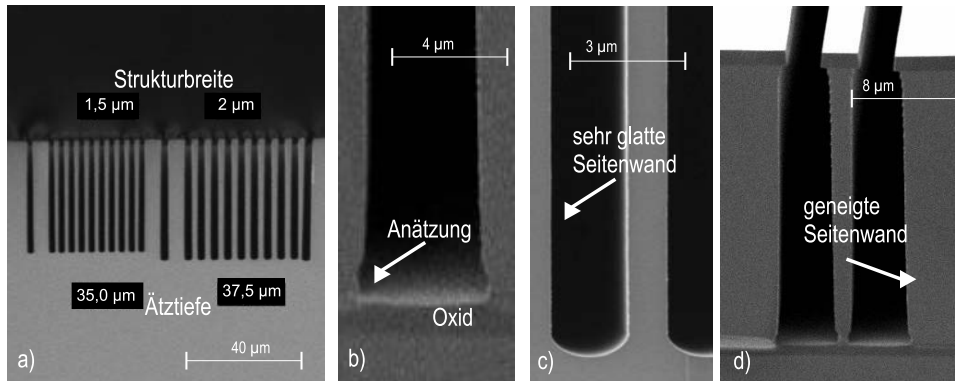


Abbildung 3.13: REM-Aufnahmen von Effekten beim ASE-Ätzen a) ASE-Lag, b) Notching, c) glatte Seitenwände, d) Grabenform

#### 3.3.3.2 Isotropes plasmachemisches Siliziumätzen

Ein weiterer wichtiger Teilschritt ist das Freilegen der oberflächenmikromechanischen Strukturen durch plasmachemisches isotropes Unterätzen im Silizium. Dafür kann der isotrope Ätzschritt des oben beschriebenen anisotropen Siliziumätzens sehr gut eingesetzt werden. Hierbei wird bewusst auf die Passivierung der Seitenwände verzichtet und es kommt es zu einer starken lateralen Unterätzung der Strukturen, so dass diese, wenn sie schmaler als eine kritische, ätzzeitabhängige Breite sind, vollständig unterhöhlt werden. Breitere Strukturen werden nur teilweise unterätzt, bleiben somit fest stehen und können als Ankerpunkte dienen (Abbildung 3.14). Da die Ätzradikale im elektrostatischen Feld der ICP-Ätzanlage gerichtet beschleunigt werden, treffen sie quasi senkrecht auf die Waferoberfläche auf und können somit in die tiefen Grabenstrukturen um die frei zu legenden mechanischen Strukturen eindringen und dort ihre isotrope chemische Ätzwirkung entfalten. Zum Schutz der freizulegenden mechanischen Strukturen vor dem Ätzangriff durch reflektierte und gestreute Ätzradikale sind diese rundherum mit Oxid zu bedecken. Bei der Maskengestaltung ist unbedingt zu beachten, dass es nicht zur ungewollten Unterätzung von Hilfsstrukturen (Marken, Nonien, Bezeichnungen) kommt. Wenn diese nicht entsprechend geankert sind, würden sie sich komplett ablösen, somit den Wafer verunreinigen, die Bewegung der mechanischen Strukturen sowie das Bondverhalten stören.

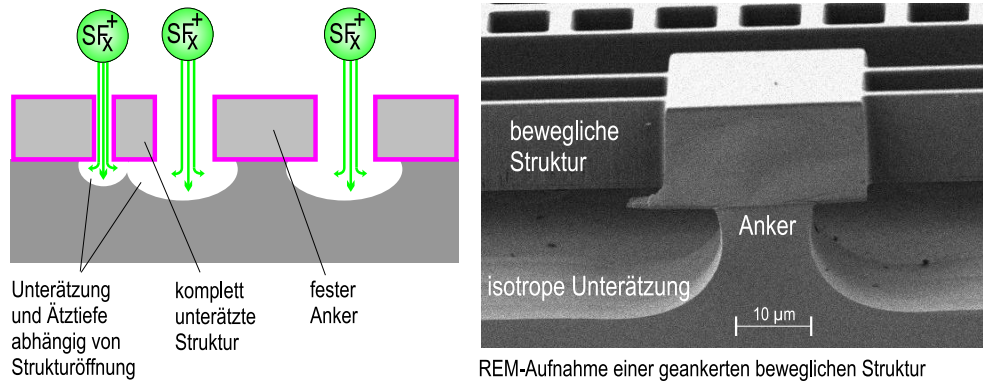


Abbildung 3.14: Isotropes Siliziumätzen

### 3.3.3.3 Oxidätzen an freigelegten Strukturen

Das Entfernen des Oxides an den freigelegten Strukturen in den SCRESOI-Technologien stellt eine besondere Herausforderung dar. Herkömmliche plasmachemische Ätzprozesse können nicht eingesetzt werden, da sie zum einen nicht isotrop genug wirken, um das Oxid an den Seitenwänden und der Rückseite der freigelegten Strukturen zu entfernen. Zum anderen besteht die Gefahr, dass es zum Einbau mechanischer Spannungen durch Amorphisieren der Siliziumoberfläche kommt. Bei Versuchen, die Oxidschicht durch nasschemisches Tauchätzen zu entfernen, wurde festgestellt, dass es zum Auslenken und dauerhaften, irreversiblen Ankleben der beweglichen Strukturen an den festen Gegenflächen der Kondensatorstrukturen kommt, wodurch die Sensoren unbrauchbar werden. Dieser Effekt, der üblicherweise als Sticking bezeichnet wird, kommt dadurch zustande, dass ein Wasserfilm die gegenüberliegenden Flächen von festen und beweglichen Strukturen benetzt. Beim Trocknen kann das Wasser nicht schlagartig entweichen, vielmehr verringert sich die Dicke des Wasserfilms zwischen den beiden Flächen sukzessive. Da die Adhäsionskräfte zwischen dem Wasser und den Siliziumflächen größer als die in der Struktur wirkenden Gegenkräfte sind, wird die bewegliche an die feste Fläche gezogen. Ist alles Wasser zwischen den Strukturen entwichen, liegt ein mechanischer Kontakt von durch Wasser aktivierten Flächen vor. Es können sich, begünstigt durch den Wärmeeintrag beim Trocknen, feste Bindungen, ähnlich denen beim Siliziumdirektbonds, zwischen den Flächen ausbilden, die ein Trennen dieser unmöglich machen (Abb. 3.15). Da spezielle Trocknungsverfahren entweder nicht in allen Fällen zum Erfolg geführt haben (Marangoni-Trockner) oder als zu aufwändig angesehen wurden (superkritisches  $\text{CO}_2$ -Trocknen), sollen hier zwei Methoden vorgestellt werden, die das Trocknen der Strukturen umgehen und somit das Sticking vermeiden:

- Indem man das Ätzmedium über eine Reihe von ineinander löslichen Flüssigkeiten durch einen Fotolack ersetzt (z.B. Ätzer-Wasser-Isopropanol-Fotolack), kann man den Abstand

zwischen den kritischen Flächen aufrecht erhalten. Nach dem Trocknen verascht man den Lack und erhält bewegliche Strukturen ohne Sticking.

- Verwendet man anstatt eines flüssigen Ätzmediums dessen Dampfphase, bleibt die Ätzwirkung erhalten, die Oberfläche wird aber nicht mit Flüssigkeit benetzt und der Sticking-Effekt kann nicht auftreten. Unter Verwendung kommerziell verfügbarer Dampfätzanlagen kann das Oxid mittels HF-Dampf vollständig ohne jegliches Sticking von den beweglichen Strukturen entfernt werden. Durch den konzentrierten HF-Dampf werden freiliegende Aluminiummetallisierungen nicht angegriffen.

Verallgemeinert kann man feststellen, dass freigelegte oberflächenmikromechanische Strukturen, um Sticking zu vermeiden, nicht nass behandelt werden dürfen. Dies gilt auch für eine eventuelle Aktivierung der Sensorwafer vor dem Bonden.

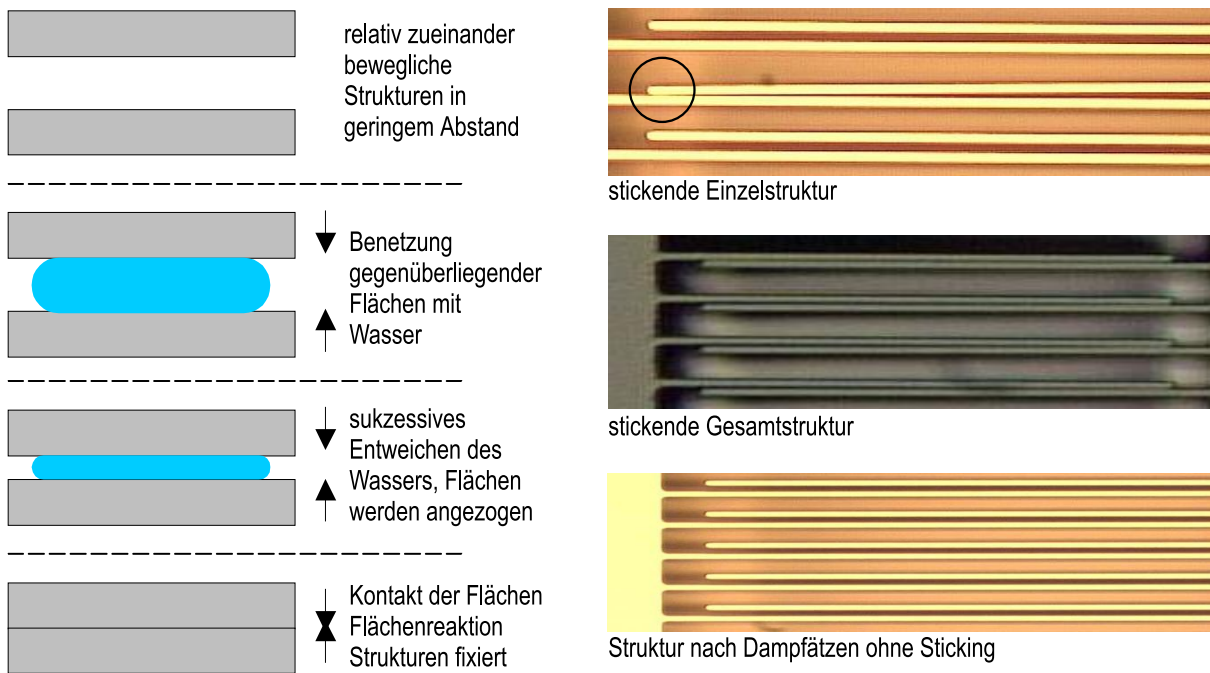


Abbildung 3.15: Sticking beweglicher Strukturen

### 3.3.3.4 Verfüllte Isolationsgräben

Ein bedeutender Nachteil der SCRESOI-Technologien ist die Tatsache, dass die elektrisch aktiven Strukturen einschließlich der Bondpads durch offene Isoliergräben voneinander getrennt werden müssen. Dies hat zur Folge, dass um jedes Drahtbondpad ein Waferbondrahmen zum dichten Verkapseln notwendig ist. Dieser Nachteil kann dadurch umgangen werden, dass man bevor die eigentlichen Grabenstrukturen für den Sensor geätzt werden, Isoliergräben ätzt,

verfüllt und planarisiert. Diese Gräben trennen den Innenbereich des Chips mit den zu verkapselnden beweglichen Sensorstrukturen vom Außenbereich, in dem sich die Drahtbondpads befinden, die nach dem Verkappen auf Waferbasis frei zugänglich sein müssen. Diese isolierend verfüllten Gräben können dann mit Aluminiumzuleitungen überbrückt werden, um die elektrisch aktiven Strukturen im Sensorinneren anzuschließen. Es werden somit nur noch kleinere und einfachere Waferbondrahmen benötigt. Die Fläche der Bondpads reduziert sich auf Standardmaße, wodurch sich die parasitären Kapazitäten sehr stark verringern. Insgesamt sind somit deutlich kleinere Sensorchips realisierbar. Des Weiteren wird eine laterale On-Chip-Integration der Auswerteschaltung möglich. Voraussetzung für die Grabenisolierung sind SOI-Substrate mit ihrer zum Trägerwafer durch ein Oxid isolierten Siliziumschicht. Zur Verfüllung der Gräben gibt es zwei Ansätze:

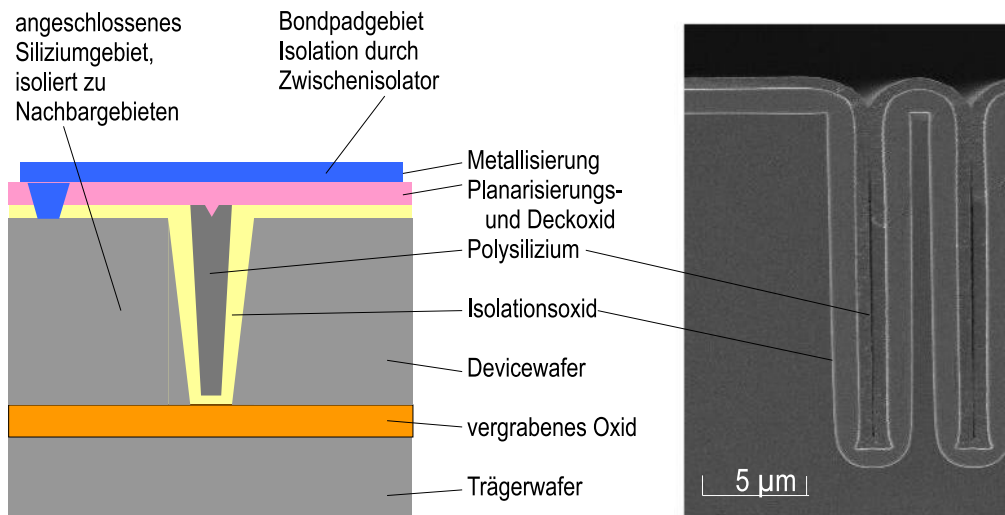
1. Die komplette Verfüllung der Gräben ist nur mit Polysilizium möglich, um mechanische Spannungen gering zu halten. Dazu ist vor der Polysiliziumabscheidung ein Isolationsoxid auf die Grabenwände aufzubringen. Der Gesamtprozess<sup>26</sup> ist jedoch technologisch sehr aufwändig.
2. Das Überbrücken der Isoliergräben stellt eine günstigere Alternative dar. Dabei wird in A-förmigen Gräben (unten breiter als oben) CVD-Oxid abgeschieden. Die Prozessparameter sind dabei so zu wählen, dass der Graben von seinen oberen Kanten aus zuwächst. Mittels Planarisierung wird überschüssiges Oxid von der Oberseite abgetragen und man erhält eine ebene Waferoberfläche mit an der Oberseite mittels Oxid verschlossenen Gräben.

Abbildung 3.16 veranschaulicht die beiden Methoden zum Verfüllen der Isoliergräben anhand von Zeichnungen und REM-Aufnahmen.

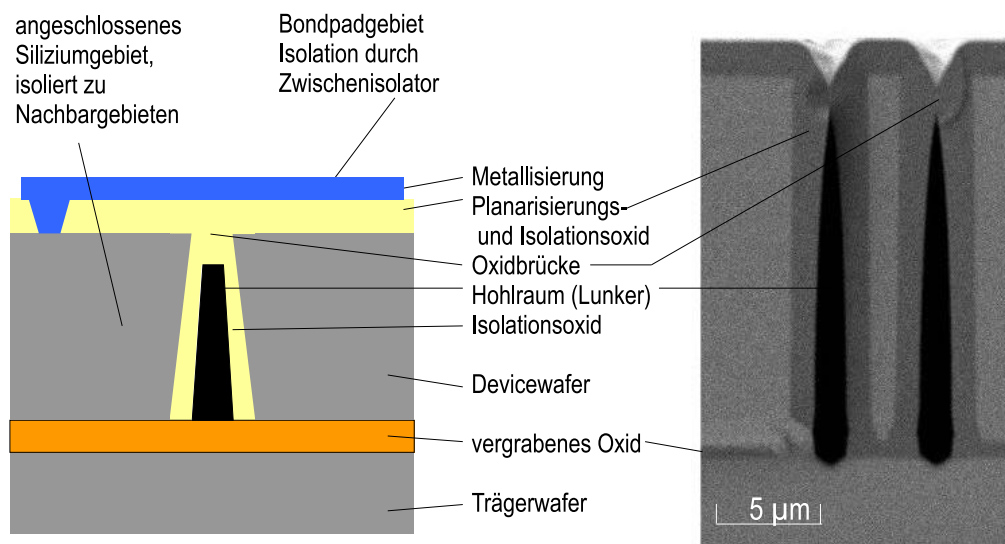
Es konnte gezeigt werden, dass das Verfüllen der Isoliergräben der SCRESOI-Technologien die messtechnischen Eigenschaften der Sensoren durch die Verringerung der parasitären Kapazitäten ihrer Anschlussgebiete verbessert. Gleichzeitig kann der Platzbedarf der Sensoren durch einfachere und kleinere Bondrahmengometrien deutlich verringert werden, wodurch die Kosten je Sensor sinken. Die verfüllten Gräben sind weiterhin Voraussetzung für eine Integration von Auswerteschaltungen auf dem Sensorchip.

---

<sup>26</sup>Polysiliziumabscheiden und auf Oberfläche zurückätzen, Planarisierung, Deckelung des verfüllten Grabens um Anätzungen des Polysiliziums im Sensorprozess zu vermeiden.



a) Grabenverfüllung mit Oxid und Polysilizium



b) Grabenüberbrückung mit planarisiertem Oxid

Abbildung 3.16: Methoden zur Verfüllung von Isolationsgräben

## 3.4 Waferbonden

### 3.4.1 Anwendungsmöglichkeiten Waferbonden

Mit dem aus dem Englischen entlehnten Begriff Bonden, der meist im Sinne von Fügen, verwendet wird, werden unterschiedliche Prozesse der Mikrosystemtechnik, besonders der AVT, bezeichnet. Dabei ist oft nicht nur das mechanische Fügen sondern gleichzeitig auch die elektrische Kontaktierung von Bauelementen gemeint. So bezeichnet man mit Chipbonden das

Montieren von Halbleiterchips auf Trägerstreifen, während das Drahtbonden ihr elektrische Kontaktierung mit feinen Drähten beschreibt. Das Flip-Chip-Bonden hingegen vereint beide Aspekte, in dem bei ihm Chips durch Lotkugeln auf Leiterkarten aufgebracht und kontaktiert werden. Unter Waferbonden versteht man das Verbinden von Halbleiterwafern untereinander oder mit Substraten aus anderen Materialien. Werden dabei die Wafer nicht vollflächig mit einander verbunden, nennt man die Bondgebiete Bondrahmen, da diese dann meist Hohlräume abschließen. Beim Waferbonden steht der Aspekt des mechanischen Fügens der Substrate im Vordergrund, das gleichzeitige selektive Kontaktieren einzelner Waferbereiche gewinnt jedoch verstärkt an Bedeutung, um Strukturen auf den gefügten Wafern miteinander elektrisch zu verbinden. Das Waferbonden hat sich inzwischen zu einem weit verbreiteten Basisprozess der Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik entwickelt. Durch das Übereinanderstapeln von Substraten ergeben sich vielfältige technologische Möglichkeiten:

1. Herstellung spezieller Substrate mit vergrabenen Ebenen (z.B. SOI-Wafer, Pseudo-Epi-Wafer) oder Strukturen (z.B. vergrabene Gruben) ermöglichen völlig neue Technologien oder führen zu Vereinfachungen im Waferprozess bzw. zu deutlich verbesserten Eigenschaften von Bauelementen.
2. Die Verkapselung von mikromechanischen, frei beweglichen Elementen auf Waferbasis ist die Voraussetzung für deren industrielle Produktion, da nur gekapselte Strukturen mit den Standardprozessen der Vereinzelungs-, Aufbau- und Verbindungstechnik weiterverarbeitet werden können. In der Weiterführung dieses Verkapselungsprinzipes werden momentan Verfahren zum Full-Wafer-Level-Packaging entwickelt, die neben dem mechanischen Verschluss der beweglichen Elemente auch eine günstige Kontaktierung der elektrischen Elemente ermöglichen. Derartige Bauelemente werden für das direkte Verlöten auf Leiterplatten geeignet sein, d.h. ein weiteres Umgehäuse ist nicht mehr zwingend notwendig.
3. Bei einer Vielzahl von Mikrosystemanwendungen ist der eigentliche aktive, meist aufwändig strukturierte Hauptwafer durch Bonden zu komplettieren, um die Funktion des Gesamtsystems erst wie folgt zu ermöglichen:
  - Ausleseelektroden kapazitiver Sensoren in Bulk-Mikromechanik auf Deckwafern
  - Abdichten mikrofluidischer Kanäle
  - Einschluss eines Referenzdruckes für Absolutdrucksensoren
  - Einstellung des Arbeitsdruckes für resonante Sensoren
  - Realisierung von Anschlägen als Überlastschutz für mechanisch bewegliche Teile

4. Die Herstellung echter dreidimensionaler Strukturen der Mikrosystemtechnik (z.B. symmetrische seismische Massen) ist nur mittels Waferbonden möglich.
5. Die vertikale Integration von Komponenten auf Waferbasis führt zu einer deutlichen Verkleinerung von Mikrosystemen, verbunden mit einer Erhöhung der Zuverlässigkeit (weniger Lötverbindungen) und Kostensenkung, da z.B. das ASIC-Substrat gleichzeitig als Deckwafer für die zugehörige Sensorstruktur dienen kann.
6. Das zeitweilige Aufspannen von mittels Spezialprozessen zu bearbeitender Wafer auf Trägerwafer kann ebenfalls mittels Waferbonden erfolgen.

In der Praxis werden oft zur Herstellung von mikromechanischen Komponenten mehrere dieser Möglichkeiten gezielt genutzt. So werden z.B. bei der Herstellung von Drehratesensoren in Oberflächenmikromechaniktechnologie gebondete SOI-Wafer eingesetzt. Die fertigen Sensorstrukturen werden am Ende des Waferprozesses mit einem Deckwafer verbondet, um den für die Schwingungen notwendigen Druck einzustellen, die fragile Struktur während der Weiterverarbeitung zu schützen und um Anschläge zu realisieren, die Ausfälle während des Einsatzes der Sensoren verhindern.

#### 3.4.2 Systematisierung Bondtechnologien

So vielfältig wie die Anwendungsmöglichkeiten von Waferbondverbindungen sind auch die technologischen Verfahren zu ihrer Realisierung. Die Existenz der verschiedenen Bondtechnologien ist darauf zurückzuführen, dass an die Bondverbindung und die Bondtechnologie eine Vielzahl von Anforderungen gestellt werden, die im Hinblick auf die Gesamtanwendung optimal erfüllt werden müssen. Dies ist meist nur im Sinne eines Kompromisses möglich, da bestimmte Anforderungen konträr sind oder gesamttechnologische Randbedingungen bestimmte Bondverfahren grundsätzlich ausschließen. Abbildung 3.17 zeigt eine Übersicht über die gängigsten Bondtechnologien, geordnet nach der Art der Verbindungsausbildung im technologischen Sinne.

Die Übersicht macht die Einordnung des Bondens mit strukturierten Glaszwischen-schichten als indirektes Bondverfahren von Halbleiterwafern deutlich. Auf die Wirkprinzipien, Vor- und Nachteile der einzelnen Bondverfahren soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da sie bereits in vielen Veröffentlichungen enthalten sind [7], [8]. Die Bondtechnologien, die auf Glaszwischen-schichten beruhen, werden im Folgenden ausgiebig untersucht. An entsprechender Stelle wird auf ihre spezifischen Unterschiede zu den übrigen Bondverfahren eingegangen.



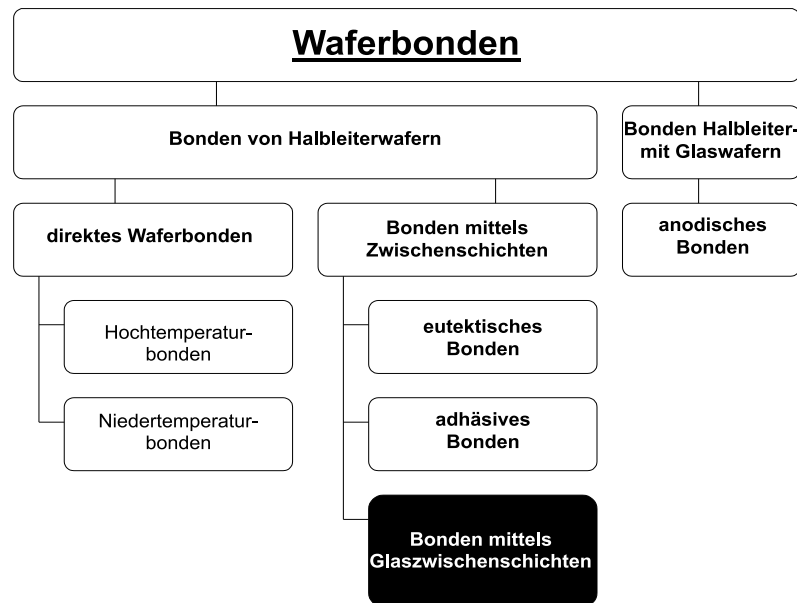


Abbildung 3.17: Einordnung der am häufigsten verwendeten Waferbondtechnologien nach der Art der technologischen Verbindungsbildung

### 3.4.3 Einordnung des Waferbondens in Gesamttechnologieprozesse zur Sensorherstellung

Betrachtet man Gesamttechnologien zur Herstellung von mikromechanischen Sensoren, so stellt man fest, dass sich diese zumeist in zwei Hauptkomplexe teilen. Im ersten Teil, der je nach dem ob, diskrete oder integrierte Sensoren gefertigt werden sollen, einem kompletten oder abgerüsteten CMOS-Prozess entspricht, werden die elektrischen Strukturen erzeugt, sowie die für die Mikromechanikschritte benötigten Maskenebenen strukturiert. Im zweiten Komplex werden die typischen Teilschritte der Mikromechanik wie Nass- und Trockenätzen von Silizium durchgeführt. Da beide Teilkomplexe sowohl zeitlich als auch räumlich voneinander getrennt ablaufen, können ionische Kontaminationen der Anlagen des CMOS-Prozesses vermieden werden. Dies bringt den Vorteil, dass die Mikromechanikschritte nur bedingt CMOS-kompatibel sein müssen und doch MEMS-Produkte in Standardwaferfabriken gefertigt werden können. In derartigen Technologien zur Realisierung von Mikrosystemen ergeben sich im wesentlichen zwei Schwerpunkte für den Einsatz von Waferbondschritten:

1. Vorfertigung von speziellen Substraten mit vergrabenen Schichten und Strukturen vor dem eigentlichen Prozess mittels Hochtemperaturdirektbonden und Rückdünnen der gebondeten Wafer (SOI-Wafer, vergrabene Hohlräume).
2. Verkapselung von mikromechanischen Strukturen bzw. die Komplettierung der Komponenten auf Waferebene durch Bonden am Prozessende.

In vielen Fällen wird das Waferbonden zu beiden Zeitpunkten eingesetzt, besonders wenn komplexe Strukturen erzeugt werden sollen. Abbildung 3.18 zeigt den Ablauf möglicher Technologievarianten. Man kann davon ausgehen, dass bei einer Vielzahl von Technologien Standard-Bulk-Wafer als Ausgangsmaterial dienen. Diese werden entweder direkt in den Prozess eingesteuert oder durchlaufen eine Substratvorfertigung, bestehend aus der Abscheidung und optionalen Strukturierung von zu vergrabenden Ebenen, sowie dem Waferbonden und Rückdünnen eines der beiden gebondeten Wafer. Diese Substratvorfertigung wird für standardisierte Spezialsubstrate (z.B. SOI-Wafer) in der Regel von Rohwaferherstellern übernommen. Sind jedoch strukturierte Ebenen zu vergraben, erfolgt die Substratvorbereitung meist im Verarbeitungsprozess der Wafer. Die Verkapselung der mikromechanischen Strukturen erfolgt in der Regel als letzter Teilschritt des MEMS-Prozesses. Obwohl immer mehr Gesamttechnologien Waferbondenschritte enthalten, ist darauf hinzuweisen, dass nach wie vor auch Mikrosysteme ohne Waferbonden gefertigt werden.

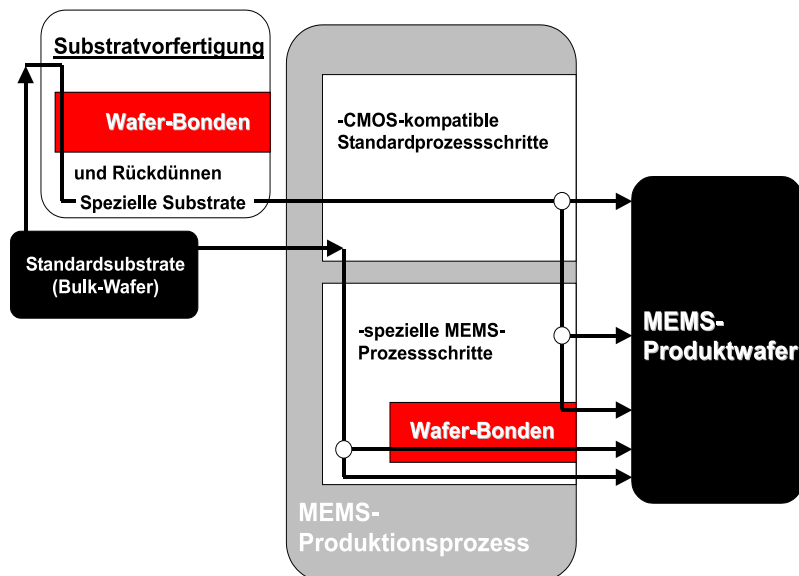


Abbildung 3.18: Einordnung von Waferbondenschritten in technologische MEMS-Gesamtprozesse

### 3.4.4 Waferbonden zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren

Oberflächenmikromechanische Technologien zur Herstellung von Sensoren haben in den letzten Jahren sowohl im Bereich der Forschung und Entwicklung als auch in der industriellen Produktion enorm an Bedeutung gewonnen und in einigen Bereichen, wie z.B. der Inertialsensorik,

Bulk-Micromachining-Prozesse verdrängt. Bedingt durch die funktions- und technologiebedingten Besonderheiten der Oberflächenmikromechanik, die bereits vorgestellt wurden, ergeben sich folgende besonderen Anforderungen an das Verkapselungsbonden:

1. Es stehen pro Chip nur sehr kleine Bondflächen zur Verfügung, da zum einen die Kantenlängen und somit die Bondrahmenlängen der Chips durch den geringen Platzbedarf der Sensorstrukturen sehr klein sind. Zum anderen können die Bondrahmen nicht beliebig verbreitert werden, da sich dabei das Verhältnis zwischen aktiv genutzter Chipfläche zu passiver Waferbondfläche sehr schnell so stark verschlechtert, dass eine kostengünstige Sensorproduktion nicht mehr möglich ist. Weiterhin erhöhen Bondflächen bei bestimmten Technologievarianten die parasitäre Grundkapazität des Sensors und verringern dadurch dessen Empfindlichkeit. In diesen Fällen wird besonders auf kleine Bondflächen Wert gelegt.
2. Die Strukturen sind sehr empfindlich bezüglich Feuchtigkeit. In den feinen Zwischenräumen führt Feuchte zu dem sogenannten Sticking-Effekt, d.h. beim Trocknen kommt es zum irreversiblen Anhaften der Strukturen, so dass die Funktionalität des Sensors verloren geht. Aus diesem Grund sind keinerlei nasschemische Aktivierungs- oder Reinigungsprozesse vor dem Bonden möglich.
3. In der Regel befinden sich Bondpads der Sensoren auf dem unteren, dem Systemwafer. Daher ist der obere Deckwafer vor dem Bonden so zu strukturieren, dass er Öffnungen aufweist, durch die die Bondpads erreicht werden können. Da besonders bei kleinen Chipgrößen ein großer Teil der Waferfläche zu öffnen ist, gestaltet sich die Handhabung dieser Wafer (Bruchgefahr) und die Krafteinleitung beim Bonden sehr schwierig.
4. Die unter 3. erwähnte komplexe Strukturierung ist praktisch nur durch anisotropes Siliziumätzen (mittels KOH oder ASE) zu erreichen. Mechanische Strukturierungen sind entweder zu ungenau oder zu teuer. Somit ist der Einsatz alternativer Materialien für den Deckelwafer (z.B. anodisch bondbares Glas) nicht möglich.
5. Die Oberflächengüte der Bondflächen ist meist nicht ausreichend für direktes Halbleiterwaferbonden bei niedrigen Temperaturen. Typisch für oberflächenmikromechanische Technologien sind sehr lange Plasmasiliziumätzschritte sowie das Dampfphasen- bzw. Plasmaoxidentfernen am Prozessende, die zu einer Aufrauung der Bondfläche führen.
6. Aufgrund der wenigen benötigten Teilschritte zur Erzeugung der elektrischen und mechanischen Strukturen ist es nicht ohne zusätzlichen Aufwand möglich, elektrische Zuleitungen im Bereich der Waferbondfläche zu vergraben. Um trotzdem ein hermetisches

Verschließen des Sensorbereiches zu erzielen, sind Bondverfahren notwendig, die auf Zwischenschichten mit planarisierender Wirkung beruhen, um die Durchführung von Metallleitbahnen im Bondinterface zu ermöglichen.

7. Die feinen, leicht beweglichen Oberflächenstrukturen dürfen während des Bondprozesses weder mit starken Kräften belastet werden (z.B. elektrostatische Anziehung beim anodischen Bonden), noch dürfen sie am Deckwafer anbonden. Strukturierte Bondzwischen-schichten ermöglichen ein selektives Bonden bestimmter Waferbereiche und verhindern somit das ungewollte Anbonden.
8. Eine wirksame Abdeckung der fragilen Strukturen auf Waferebene ist zwingend notwendig, da ohne sie beim Vereinzeln der Chips die mikromechanischen Strukturen zerstört werden würden.
9. Im Bereich des Bondinterfaces ist eine isolierende Lage notwendig, damit elektrisch aktive Strukturen nicht über den Siliziumdeckwafer miteinander elektrisch leitend verbunden werden.

Anhand dieser ganz speziellen Anforderungen an das Verkapseln von oberflächenmikromechanischen Komponenten auf Waferbasis, die in Abbildung 3.19 nochmals zusammengefasst sind, wurden die in dieser Arbeit zu behandelnden Waferbondtechnologien ausgewählt. Dabei zeichnet es sich ab, dass Glaslotbonden am besten und umfangreichsten die aufgestellten Vorderungen erfüllen kann, da es sich im Moment der Verbindungsausbildung durch eine weiche fließende Glasschicht auszeichnet, die planarisierend wirkt. Somit war zu erwarten, dass sich raue Oberflächen, metallische Leitbahndurchführungen und verschiedene Materialien sicher, hermetisch dicht und mit hoher Ausbeute Bonden lassen. Da jedoch ursprünglich die technischen Voraussetzungen für das Glaslotbonden nicht gegeben waren, wurden zunächst andere Bondverfahren mit Glaszwischen-schichten hinsichtlich ihrer Eignung untersucht.

#### 3.4.5 Gestaltung und Präparation der Deckwafer

Vor dem Bonden der Deckwafer sind diese so zu strukturieren, dass die Abdeckung der mechanischen Chipstrukturen bei gleichzeitiger Erreichbarkeit der elektrischen Anschlussgebiete ermöglicht wird. Zur Kontaktierung des gebondeten Sensorwafers sind Durchbrüche im Deckwafer notwendig. Des Weiteren sind oftmals die Bereiche, die sich später über der eigentlichen Sensorstruktur befinden, zu strukturieren, um die Funktion des Sensors zu gewährleisten. So ist es z.B. notwendig, Gruben über der Sensorstruktur in den Deckel einzubringen, um die Sensordämpfung einzustellen. In diesen Fällen werden meist jedoch auch noch mechanische Anschläge benötigt, um zur Vermeidung von Brüchen starke Bewegungen der Strukturen zu

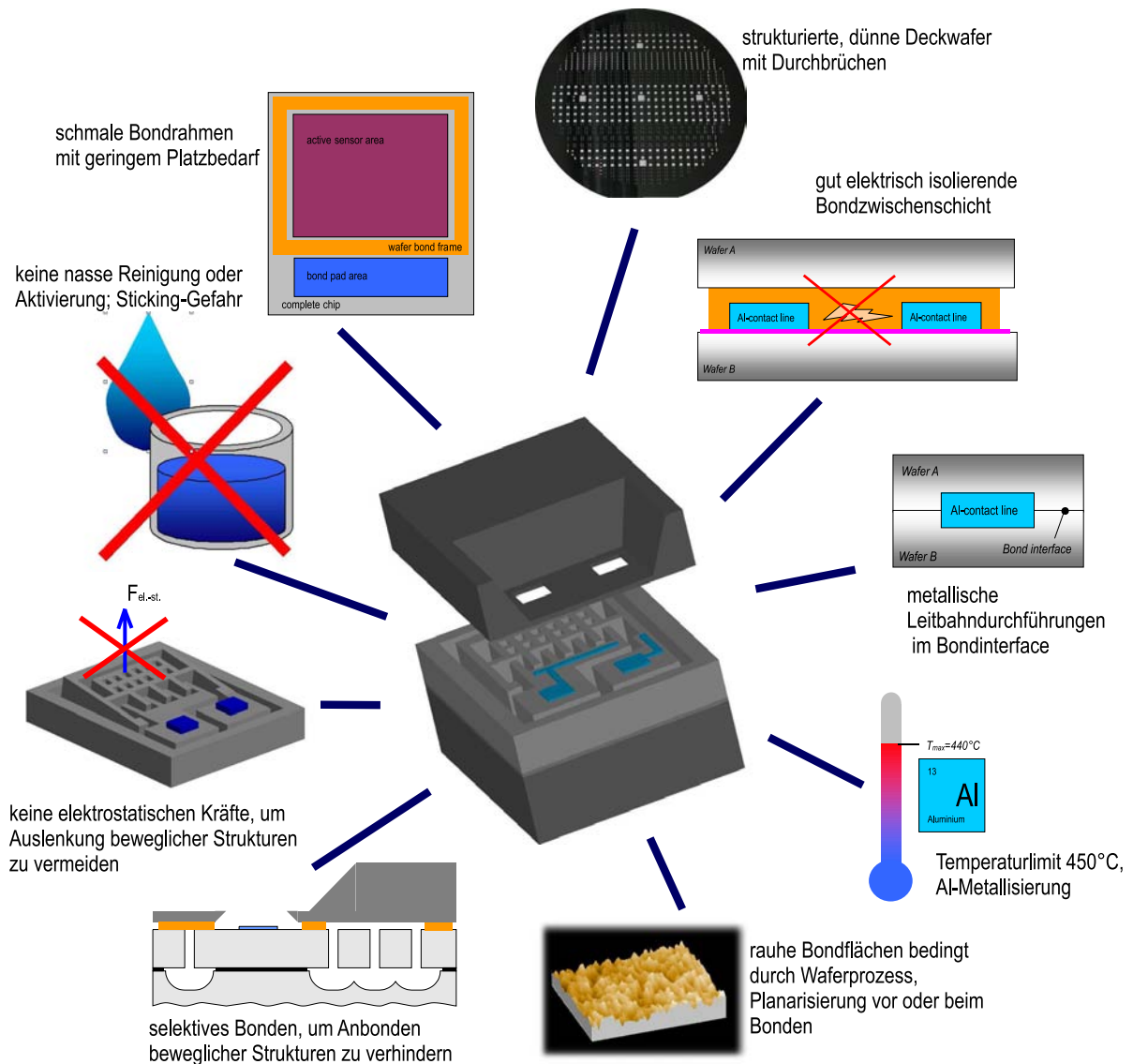


Abbildung 3.19: Anforderungen an das Verkapselungsbonden oberflächenmikromechanischer Sensoren

begrenzen. Abbildung 3.20 verdeutlicht am Deckel eines Einzelchips die beiden beschriebenen Aspekte.

Während die Herstellung der Gruben und Anschläge mit den Methoden der nass- und trockenchemischen Siliziumstrukturierung recht einfach erfolgen kann, bedarf es für die Durchbrüche besondere Konzepte. Es können dazu 2 grundsätzliche Methoden angewendet werden:

1. Die Durchbrüche können vor dem Bonden komplett in den Wafer eingebracht werden. Mittels anisotropem nasschemischem Ätzen ist es möglich, durchgehende Löcher in Siliziumwafern zu realisieren. Bei Verwendung von  $\langle 100 \rangle$ -Wafermaterial und der Ätzung von

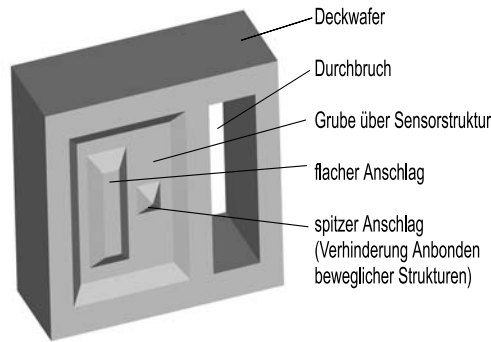


Abbildung 3.20: Sensordeckel

der nicht zu bondenden Waferseite aus erhält man geneigte Deckelwände, die günstig für das Drahtbonden sind, da das Bondwerkzeug die Drahtbondpads so leichter erreichen kann. Es ist auch möglich, durch zweiseitiges Ätzen der Deckwafer Membranen über größeren Drahtbondgebieten zu erzeugen, und die Öffnungen der Drahtbondpads von der zu bondenden Waferseite aus zu ätzen. Dies ist notwendig, wenn Chips mit trenchisolierten Bondpads gedeckelt werden sollen. Ein limitierender Faktor der kompletten Vorprozessierung der Deckwafer ist deren Dicke. Zum einem wird eine Mindestdicke von  $400\ \mu\text{m}$  bei  $150\ \text{mm}$  Waferdurchmesser benötigt, um die Stabilität der Wafer zu gewährleisten. Zum anderen sind dünne Deckel günstiger für die Aufbau- und Verbindungstechnik, da sie ein einfacheres Drahtbonden und Umspritzen der Chips mit Vergussmasse ermöglichen. Ein weiterer Fakt ist der Flächenverbrauch beim nasschemischen Siliziumätzen. Bedingt durch den Ätzwinkel ist die Maske deutlich größer als die erzielte Öffnung, so dass bei sehr kleinen Chips dieses Verfahren nicht anwendbar ist. Weiterhin können die Bondpads nicht frei angeordnet werden, besonders wenn auf konvexe Ecken, welche zusätzlichen Platz für Kompensationsstrukturen benötigen, verzichtet werden soll.

2. Die Durchbrüche können durch mechanische Bearbeitung nach dem Bonden in die Deckwafer eingebracht werden. Dazu sind vor dem Bonden Gruben in die später zu öffnenden Bereiche des Deckwafer einzubringen. Das eigentliche Freilegen nach dem Bonden erfolgt durch Sägen oder Schleifen. Während beim Sägen das Material über den zu öffnenden Gebieten herausgesägt wird, kommt es beim Schleifen zum Abtragen der ungebondeten Oberfläche, bis sich die vorpräparierten Gebiete öffnen. Mittels des Sägens lassen sich sehr kleine Deckel bei gleichzeitig großen frei gelegten Flächen realisieren. Das Schleifen hingegen ist sehr gut für dünne Deckel mit einer Dicke von  $80$  bis  $400\ \mu\text{m}$  geeignet. Die Vorprozessierung der Gruben kann mit Ätzverfahren oder mechanisch (Sägen) erfolgen. Die komplette mechanische Bearbeitung der Deckwafer bietet den Vorteil, dass neben Silizium auch andere Deckelmaterialien, wie z.B. Glass, verwendet werden können.

Abbildung 3.21 stellt die beiden Methoden zur Herstellung der Durchbrüche in den Deckwafern gegenüber. Die Auswahl des geeignetsten Deckelkonzepts hängt sehr stark vom Design, der Funktion und der Weiterverarbeitung des Sensors ab. Daher sei an dieser Stelle auf die Anwendungsbeispiele in Kapitel 4 verwiesen.

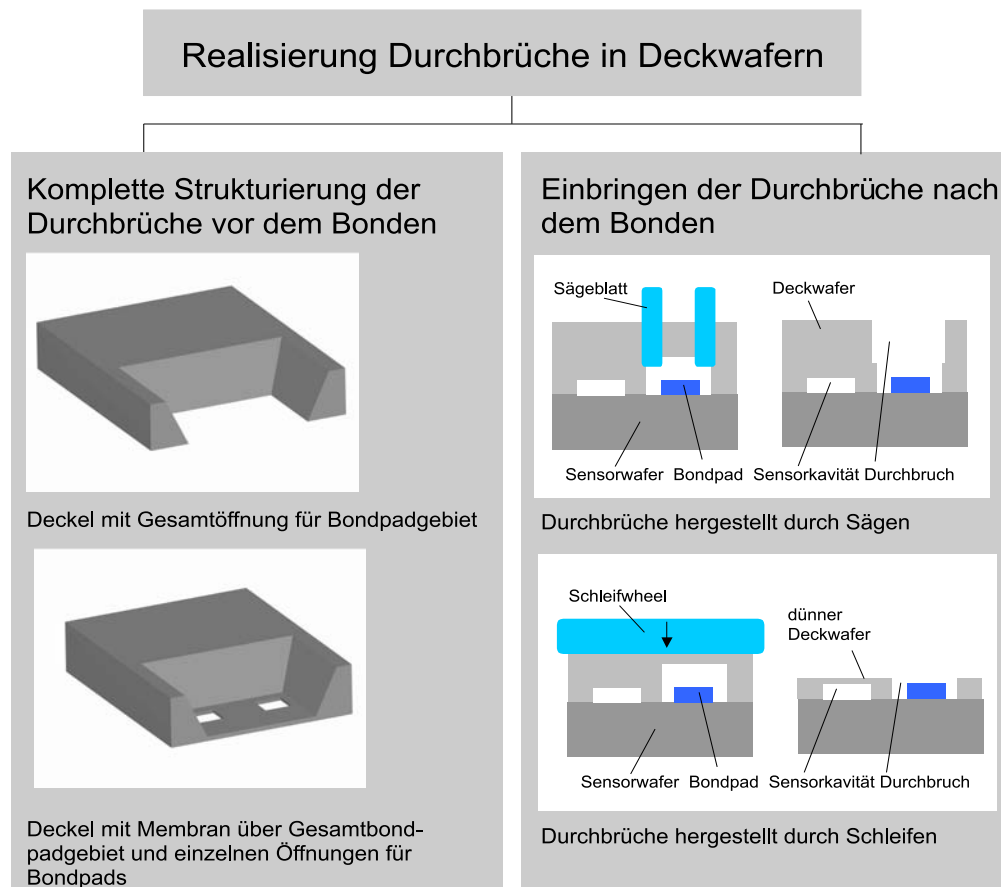


Abbildung 3.21: Möglichkeiten der Gestaltung und Strukturierung von Sensordeckeln

In den bisherigen Ausführungen wurde bereits darauf verwiesen, dass die Drahtbondpads des gedeckelten Sensorwafers nicht nur frei sondern auch durch das Drahtbondwerkzeug günstig erreichbar sein müssen. Neben einem ausreichenden Abstand des Deckels zu den Drahtbondpads (größer  $120\ \mu\text{m}$ ), erweisen sich dünne Deckel und vom Bondpad weggeneigte Deckelflanken als günstig. Abbildung 3.22 verdeutlicht diese Forderungen. Bei der Gestaltung der Chipdeckel ist weiterhin zu beachten, dass diese im Waferverband zu fertigen sind. Es muss also möglich sein, die Deckelchips so zu einem Deckwafer zusammenzuführen, der herstell- und handhabbar ist. Dies bedeutet, dass die Voraussetzungen für Strukturierung gegeben sind (ausreichend Platz für Masken, linienhafte mechanische Bearbeitung) und der Deckwafer bis zum Bonden ausreichend mechanisch stabil ist. Dazu ist nicht selten ein breiter geschlossener Waferrand notwendig. Selbstverständlich muss der Deckelwafer sowohl auf Chipniveau als auch im Gan-

zen zum Sensorwafer passen. So würden z.B. überstehende Waferränder die Weiterverarbeitung des gebondeten Waferstapels deutlich erschweren.

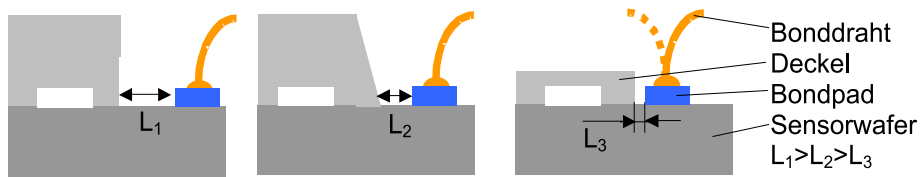


Abbildung 3.22: Zusammenhang Deckelgestaltung und Drahtbonden

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Gestaltung und Präparation des Deckwafers hinsichtlich der Sensorfunktion und des Fertigungsprozesses große Bedeutung zukommt.

### 3.4.6 Glas als Bondzwischen-schicht

Wie bereits in Abbildung 3.17 gezeigt wurde, eignen sich verschiedene Materialien als verbindende Zwischenschicht zum Bonden von Halbleiterwafern. Für diese Arbeit wurden Glasmaterialien als Bondzwischen-schicht ausgewählt, da sie eine Vielzahl von Eigenschaften aufweisen, die günstig für den Bondprozess bzw. die Eigenschaften des gebondeten Sensors sind.

Glas als amorpher Stoff entsteht durch Unterkühlen von Schmelzen unterschiedlicher Zusammensetzungen glasbildender Stoffe und vereint Eigenschaften der flüssigen und festen Phase kristalliner Stoffe. Besonders interessant für die Verwendung von Gläsern als Bondzwischen-schichten ist die Ionenbeweglichkeit bestimmter Glasbestandteile bei relativ niedrigen Temperaturen (z.B. Natrium und Litium), die das anodische Bonden der Gläser ermöglicht. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass sich die Viskosität der Gläser mit Temperaturerhöhung stetig verringert, wodurch Gläser sich sehr gut als Lötzwischen-schichten einsetzen lassen. Das viskose Fließverhalten des Glases hat zudem eine ausgleichende, planarisierende Wirkung beim Bonden, d.h. Oberflächenunebenheiten der Halbleiterwafer können ausgeglichen werden. Bei besonders niedriger Viskosität ist sogar das dichte Umschließen von Strukturen möglich, z.B. hermetisch dichte Metalldurchführungen. Weiterhin können mechanische Spannungen im gebondeten System durch die viskosen Eigenschaften des Glases gezielt abgebaut werden. Aus der Tatsache, dass Gläser aus einer Mischschmelze unterschiedlicher Stoffe (Oxide) gewonnen werden, lässt sich leicht ableiten, dass die Glaseigenschaften (besonders das Temperaturverhalten) innerhalb gewisser Grenzen beliebig eingestellt werden können. Somit können geeignete Bondzwischen-gläser gezielt ausgewählt oder hergestellt werden. Gläser gelten als chemisch langzeitstabil und weisen besonders in kleinen Strukturen gute mechanische Eigenschaften und hohe Festigkeit auf (Glasfaser). Das Aufbringen von Glasschichten auf Waferoberflächen



ist mittels verschiedener Verfahren möglich. Strukturierungsmethoden für diese Schichten sind aus Mikroelektronikprozessen bekannt, in denen Gläser als reine oder dotierte Siliziumoxide (Isolatoren) verwendet werden.

Gläserne Bondzwischen­schichten grenzen sich zu anderen geeigneten Materialien deutlich ab. Glas besitzt im Vergleich zu adhäsiven organischen Kunststoffen (Polyimide, Thermoplaste u.a.) eine bessere chemische Beständigkeit, eine höhere Festigkeit und weist keine Ausgasungen auf. Somit sind Glasverbindungen deutlich zuverlässiger und dauerhaft hermetisch dicht. Beim Vergleich zu metallischen, eutektischen Zwischen­schichten liegen die Vorteile der Gläser eher im Bereich der Prozessführung. Sowohl das Aufbringen der Metallschichten als auch der Bondvorgang selbst sind sehr kritisch, da die stoffliche Zusammensetzung der Verbindungsschicht und das homogene Erreichen der eutektischen Temperatur auf der gesamten Waferfläche von entscheidender Bedeutung für die Verbindungsbildung sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Gläser als Zwischenlagen vielfältige technologische Möglichkeiten beim Bonden von Halbleiterwafern bieten. Besonders für die Verkapselung oberflächenmikromechanischer Strukturen eignen sich derartige Verbindungen sehr gut, da sie am Ende des Produktionsprozesses eingesetzt werden können. Nachfolgend sollen verschiedene Arten des Bondens mit Zwischenglaslagen vorgestellt, die Ausbildung der Verbindung erklärt und Anwendungsmöglichkeiten gezeigt werden.



# 4 Halbleiterwaferbonden mittels Glaszwischen-schichten

## 4.1 Grundlagen Gläser

### 4.1.1 Glas

Der Begriff Glas beschreibt weniger eine Stoffgruppe spezieller chemischer Zusammensetzung, als vielmehr den physikalischen Zustand amorpher Stoffe. Diese entstehen bei der Unterkühlung, d.h. dem sehr schnellen Erkalten, von Schmelzen, bei dem sich bedingt durch eine sehr schnelle Viskositätserhöhung beim Abkühlen keine kristalline Fernordnung ausbilden kann, da die Atome nicht mehr beweglich genug sind, um Kristallgitterplätze einzunehmen. Gläser weisen somit die unregelmäßige Struktur von erkalteten Schmelzen auf, die nur im Nahordnungsbereich von einigen wenigen Atomen regelmäßig zueinander angeordnet sind. Des Weiteren besitzen Gläser im Gegensatz zu kristallinen Materialien keinen stoffspezifischen Schmelzpunkt sondern einen Erweichungsbereich, in dem sich mit steigender Temperatur ihre Viskosität kontinuierlich verringert.

Obwohl sich theoretisch alle Schmelzen durch Unterkühlung in amorphe Stoffe verwandeln lassen, gelingt dies in der technisch-praktischen Nutzung nur bei den so genannten Glasbildnern, zu deren typischen Vertretern Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ), Boroxid ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) und Phosphoroxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) bzw. Gemische aus ihnen gehören. Durch die dreidimensionale Vernetzung der Moleküle dieser Oxide wird das unregelmäßige Glasnetzwerk gebildet. Daher werden sie auch als Netzwerkbildner bezeichnet. Um die stofflichen Eigenschaften von Gläsern gezielt zu verändern, können Metalloxide (z.B.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) als Zuschlagstoffe hinzugegeben werden. Da diese nicht direkt in das Glasnetzwerk eingebaut werden können, lockern sie das Glasgefüge quasi auf und verändern somit dessen Eigenschaften (z.B. Absenkung der Erweichungstemperatur). Ausgehend von ihrer Wirkung im Glasgefüge werden sie als Netzwerk-wandler bezeichnet.

Am weitesten verbreitet sind Silikatgläser, bei denen Siliziumdioxid der Hauptglasbildner ist. Da in dieser Arbeit im Wesentlichen derartige Gläser verwendet wurden, soll kurz auf ihr Mikrogefüge eingegangen werden. Kernstruktur der Silikatgläser sind Siliziumdioxidtetraeder, in deren vier Ecken sich Sauerstoffatome befinden, die an ein Siliziumatom in der Raummitte des Tetraeders gebunden sind (Hauptvalenzbindungen). Diese sehr stabile Konstruktion stellt den Nahordnungsbereich dar. Da das vierwertige Silizium jedoch nur 2 zweiwertige Sauerstoffatome binden kann, wird die Tetraederkonstruktion nur möglich, wenn die Sauerstoffatome von 2 Siliziumatomen gleichzeitig genutzt werden, d.h. an den Ecken eines jeden Tetraeders schließen sich insgesamt vier weitere Tetraeder an. Diese weisen jedoch keine Zuordnung zu einander auf (fehlende Fernordnung). Die bisher beschriebene Struktur, bestehend aus der unregelmäßigen Anordnung von Siliziumdioxidtetraedern entspricht Quarzglas, welches sich aufgrund seiner geschlossenen Netzwerkstruktur durch eine sehr hohe Erweichungstemperatur und sehr gute mechanische Eigenschaften auszeichnet. Bringt man in dieses Glasnetzwerk Metalloxide als Netzwerkmodifizierer ein, so bilden sich zwischen den Metall- und den Sauerstoffatomen der  $\text{SiO}_2$ -Tetraeder Hauptvalenzbindungen und zwischen den dadurch polarisierten Metallionen Nebenvalenzbindungen aus. Somit wird das geschlossene Tetraedergefüge gelockert und geschwächt. Dies hat niedrigere Erweichungstemperaturen zur Folge. Weiterhin können die Netzwerkmodifizierer bereits durch geringen Energieeintrag aus dem Gefüge gelöst werden und z.B. zu einer Ionenleitung im Glas führen. Abbildung 4.1 verdeutlicht die Ausbildung der Glasstruktur. Für reale Gläser, die aus mehreren netzwerkbildenden und -modifizierenden Stoffen geschmolzen werden, ist die Struktur jedoch deutlich komplizierter, Details dazu sind in [9] aufgeführt.

### 4.1.2 Glasherstellung und -zusammensetzungen

Gläser werden aus der Mischung der Netzwerkbildner und -modifizierer geschmolzen. Dazu werden die aufbereiteten natürlichen (z.B. Siliziumdioxid) bzw. synthetisch hergestellten Rohstoffe zu Pulver zerkleinert, so dass sie entsprechend der gewünschten Glaszusammensetzung gemischt werden können. Anschließend wird das Pulvergemisch erwärmt, bis alle Bestandteile schmelzen und sich somit auf atomarer Ebene durchmischen können. Dies erfolgt bei Temperaturen größer  $1500^\circ\text{C}$ . Nach dem Aufschmelzen erfolgt das Läutern<sup>1</sup> des Glases, wobei Gasblasen aus der Schmelze entfernt werden. Liegt eine homogene Schmelze vor, kann diese abgekühlt und verarbeitet werden, z.B. in einer Floatglaslinie zu Flachglas.

Die Glaseigenschaften werden im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der Schmelze bestimmt. An dieser Stelle sollen anhand einiger Beispiele Zusammensetzungseinflüsse vorgestellt

---

<sup>1</sup>durch Zugabe von Läutermitteln, die zum Aufsteigen großer Blasen führen, die kleine Blasen aus der Schmelze mitnehmen

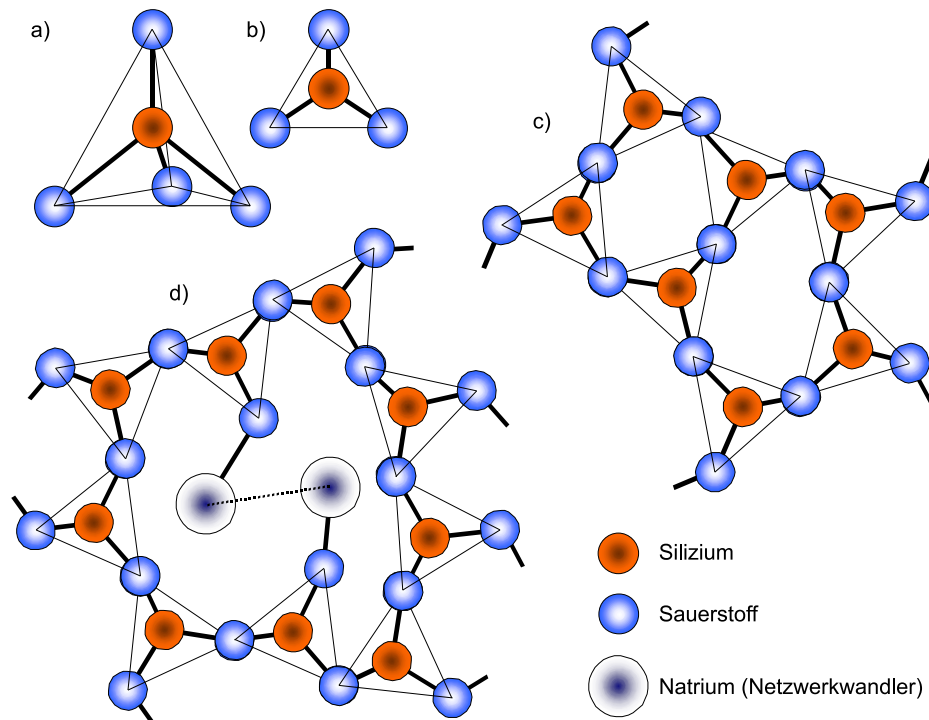


Abbildung 4.1: Darstellung Glasstruktur a) dreidimensionale Abbildung Siliziumoxiddtetraeder, b) zweidimensionale Abbildung Siliziumoxiddtetraeder (4. Sauerstoffatom ragt aus Zeichenebene heraus), c) Netzwerk Quarzglas d) Glasnetzwerk mit Netzwerkwandlern

werden, welche hinsichtlich des Bondens von Halbleiterwafern interessante Glaseigenschaften bestimmen:

- Gläser vom Pyrex-Typ<sup>2</sup> weisen eine geringe Dehnung auf, die im Bereich von Silizium liegt. Dies ermöglicht das Fügen von Pyrex-Gläsern mit Silizium z.B. durch anodisches Bonden. Der geringe Dehnungskoeffizient wird dabei durch die Zusammensetzung der Gläser aus  $\text{SiO}_2$  (80%) -  $\text{B}_2\text{O}_3$  (13%) -  $\text{Na}_2\text{O}$  (4%) -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13%)<sup>3</sup> eingestellt.
- Die für das anodische Bonden benötigte Ionenleitfähigkeit im Glas wird bei den Pyrex-Gläsern bei hohen Temperaturen durch das Herauslösen von Natrium aus dem Glasnetzwerk erreicht. Die Zugabe von Lithiumoxid führt bereits bei Raumtemperatur zu einer ausreichenden Ionenleitfähigkeit, so dass bei geringeren Temperaturen ein anodisches Bonden möglich wird. Allerdings erhöht sich durch die Lithiumzugabe der Ausdehnungskoeffizient, so dass es zu Rissen in den gefügten Materialien kommt. Es wäre

<sup>2</sup>Bezeichnung einer Familie von Gläsern mit ähnlichen Zusammensetzungen, die sich durch eine geringe thermische Dehnung und somit eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit auszeichnen. Die konkreten quantitativen Eigenschaften der Gläser können jedoch deutlich unterschiedlich sein.

<sup>3</sup>Prozentangaben in Klammern beziehen sich auf Schott Borofloat33, sind jedoch auch charakteristisch für andere anodisch bondbare Gläser wie z.B. Corning Pyrex 7740

jedoch denkbar, durch Optimierung der Glaszusammensetzung einen Kompromiss zwischen thermischer Dehnung und Bondtemperatur zu finden [59].

- Bei Glasloten kann durch einen hohen Anteil von Bleioxid die für das Lotverhalten entscheidende Benetzungstemperatur sehr stark herabgesetzt werden. Bei Bleisilikatglasloten sind Benetzungstemperaturen im Bereich von 420 bis 600°C möglich.

Neben der Glaszusammensetzung hat auch das Regime der Abkühlung und eventuellen Wiedererwärmung des Glases Einfluss, besonders auf seine mechanischen Eigenschaften und inneren Spannungen. Aufgrund seines amorphen Charakters und viskosen Fließverhaltens beim Erstarren und Langzeitlagern, besitzt Glas quasi ein Gedächtnis für seine thermische Geschichte.

### 4.1.3 Glaseigenschaften

Glas besitzt aufgrund seines amorphen Charakters einige typische Eigenschaften, die es von kristallinen Festkörpern unterscheidet. Diese lassen sich für das Waferbonden gezielt einsetzen. Um eine kurze Beschreibung dieser Eigenschaften zu ermöglichen sind sie hier in qualitative, die das prinzipielle Verhalten des Werkstoffes beschreiben und quantitative, denen konkrete Zahlenwerte zugeordnet werden können und müssen, eingeteilt.

#### 4.1.3.1 quantitative Glaseigenschaften

Alle quantitativen Glaseigenschaften lassen sich additiv aus den Kennwerten der Glasbestandteile ermitteln. Dabei gilt, bis auf wenige Anomaliegebiete in denen Abweichungen auftreten, die folgende Formel:

$$x = \sum a_v \cdot b_v \quad (1)$$

Dabei ist  $x$  die zu ermittelnde Eigenschaft des Glases,  $a_v$  der relative Stoffanteil und  $b_v$  die spezifische Eigenschaft der Stoffanteile. Diese Beziehung kann verwendet werden, wenn bekannte Glasbestandteile in neuen Verhältnissen gemischt werden, um gezielt neue Glaseigenschaften zu erzielen. Weiterhin lassen sich mit der Formel (1) Eigenschaften von Glasgemischen, wie die thermische Dehnung von Glasloten (siehe 4.5.10.2 und J), berechnen .

**Viskosität und Glasverarbeitung** Da Glas keine fixe Schmelztemperatur besitzt, muss seine Erweichung mit steigender Temperatur als Änderung der Viskosität beschrieben werden. Die Viskosität ist definiert als ein Maß für die Zähigkeit bzw. die innere Reibung von Medien.

Das Formelzeichen der Viskosität ist  $\eta$ , die Maßeinheit Poise [P] ( $1 \text{ P} = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ). Da die plastische Bearbeitung von Glas nur im weichen Zustand erfolgen kann, werden bestimmten Viskositäten Bearbeitungseigenschaften zugewiesen, die für das jeweilige Glas als charakteristische Temperaturen angegeben werden. Abbildung 4.2 zeigt den interessanten Viskositätsbereich für verschiedene Gläser in Abhängigkeit von der Temperatur, die Definition der charakteristischen Glastemperaturen und Bearbeitungsmöglichkeiten.

Aus dem Viskositätsverhalten lassen sich für die Verwendung und Verarbeitung von Gläsern folgende Viskositätsgrenzen in steigender Reihenfolge ableiten:

- maximale Temperatur für die Wiederbelastung ohne signifikante Veränderungen im Glas  $\eta=10^{15}$
- Temperatur zum Entspannungstempern  $\eta=10^{14}$
- minimale Temperatur für plastische Verformung  $\eta=10^{10}$
- minimale Temperatur zum Anschmelzen an Festkörper (Glaslot)  $\eta=10^6$

Die zugehörigen Temperaturen sind von Glas zu Glas verschieden und lassen sich aus den Datenblättern entnehmen (Beispiele Abbildung 4.2).

**Thermische Dehnung** Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) von Gläsern ist von großer Bedeutung, wenn diese mit anderen Materialien verbunden werden sollen, wie dies beim Waferbonden der Fall ist. Er liegt für Gläser im Bereich von  $0,6$  bis  $15\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  in dem auch die thermische Dehnung von Silizium ( $3,6\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) liegt. Somit lassen sich Gläser herstellen, die in ihrer thermischen Ausdehnung an Silizium angepasst sind, wie z.B. die Gläser der Pyrex-Familie mit einer thermischen Dehnung um  $3,3\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Bestehen deutliche Unterschiede in der thermischen Ausdehnung zwischen Glas und dem zu verbindenden Material (z.B. Silizium), so kommt es bei Temperaturänderungen zu starken mechanischen Spannungen, die mit dem Bruch der Verbindung oder des schwächeren Materials enden.

Bis in den Entspannungsbereich ist die thermische Dehnung von Gläsern nahezu linear und weist nur einen schwach nach oben gekrümmten Verlauf auf (siehe Abbildung 4.3). Danach kommt es zu einem plötzlichen Anstieg der Kurve, bedingt durch einsetzende Viskositätsänderung des Glases. Die entsprechende Temperatur wird Transformationstemperatur genannt. Bei weiterer Erwärmung fällt die Kurve dann wieder. Der Betrag des Anstieges und Abfalls nimmt bei höher schmelzenden Gläsern zu. Wie bereits erwähnt, hängt der thermische Ausdehnungskoeffizient wesentlich von der Glaszusammensetzung ab. Aber auch die Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze spielt eine Rolle. Nach T. Rotger [9] zieht sich dasselbe Glas bei langsamer

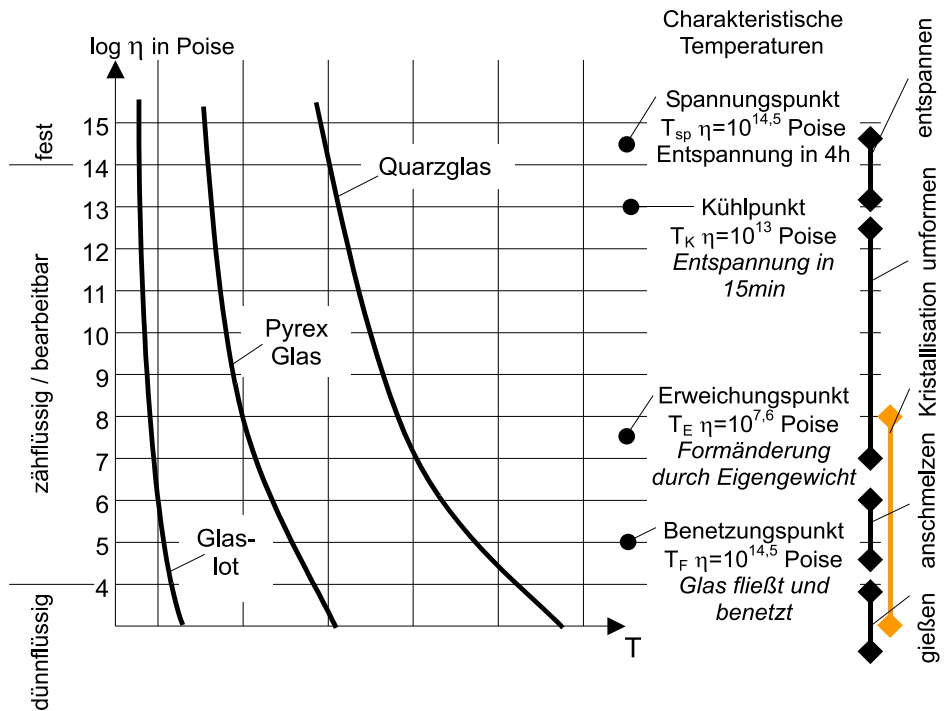


Abbildung 4.2: Abhängigkeit Viskosität-Temperatur für verschiedene Gläser, Definition charakteristischer Temperaturen und Bearbeitungsmöglichkeiten

Kühlung stärker zusammen als bei schneller Abkühlung (Abbildung 4.3). Dieser Fakt ist beim Abkühlen mit Glaslot gebondeter Wafer zu beachten.

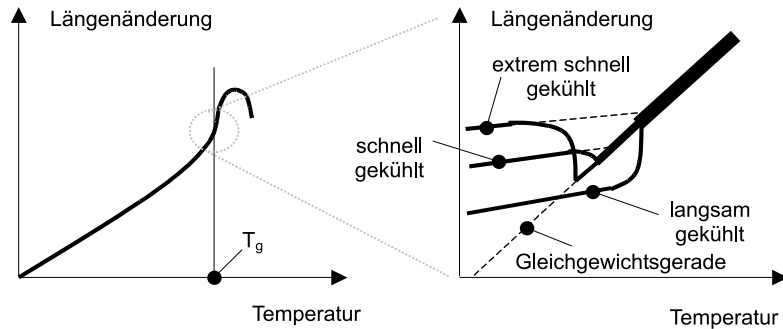


Abbildung 4.3: Dehnungsverhalten von Gläsern

**Oberflächenspannung** Die Oberflächenspannung von Gläsern spielt bei deren Formgebung eine bedeutende Rolle. So ist eine Abdichtung von Hohlräumen bei Glaslotverbindungen nur möglich, wenn die Oberflächenspannung so gering ist, dass das geschmolzene Glas alle Kanten und Flächen ausreichend benetzt. Nach der Benetzung der Oberfläche eines mit geschmolzenem Glas zu fügenden Festkörpers wandelt sich die Oberflächenspannung des Glases in eine



Adhäsionsspannung um, die letztlich Glas und Festkörper zueinander zieht. Die Oberflächenspannung wird in der Regel bei 900°C gemessen und liegt typischerweise im Bereich von 150 bis 350 dyn/cm. Weiterhin bewirkt sie die Schließung von Kapillaren sowie die Verrundung von Ecken und Kanten des Glases.

#### 4.1.3.2 qualitative Glaseigenschaften

Da die folgenden Glaseigenschaften über einen weiten Temperaturbereich wirken und sehr stark von der Glaszusammensetzung abhängen sollen sie nur kurz qualitativ beschrieben werden.

**Relaxation** Obwohl Gläser im Bereich der Zimmertemperatur als feste spröde-elastische Werkstoffe angesehen werden können, weisen sie unter mechanischer Belastung ein geringes Fließverhalten auf, welches den Charakter der unterkühlten Schmelze unterstreicht. Dabei ändert sich ihre Form unter dem Einfluss äußerer Kräfte sehr langsam, da das Glasgefüge nachgibt, um innere Spannungen zu minimieren bzw. auszugleichen. Bei erhöhten Temperaturen beschleunigt sich dieser Vorgang. Dieser Effekt ist zu beachten, da er bei mittels Glas gefügten Sensoren zu Langzeitdriften führen kann. Er kann jedoch auch dazu verwendet werden, um mechanische Spannung aus dem Fügeprozess durch Auslagerung bei mittleren Temperaturen zu verringern. Dies ist interessant, wenn aus Zeit- oder Anlagengründen nach dem Fügen nicht die idealen Kühlbedingungen eingehalten werden können.

**Kristallisation** Die Kristallisation, auch als Entglasung bezeichnet, ist ein Effekt der auftreten kann wenn das Glas einen Temperaturbereich (Viskositätsbereich) durchläuft, in dem sowohl die Keimbildung als auch die Kristallisationsgeschwindigkeit ein Maximum erreichen. Dabei kristallisieren die einzelnen Glasbestandteile aus, so dass das entstehende Kristallgemisch völlig andere Eigenschaften als das ursprüngliche Glas aufweist.

Durch die Glaskomposition kann in der Regel erreicht werden, dass diese Maxima nicht im gleichen Temperaturbereich liegen. Bei sehr langsamer Temperaturänderung kann es jedoch zur Verbreiterung des Bereiches der maximalen Kristallisationsgeschwindigkeit kommen, so dass diese das Gebiet der maximalen Keimbildung überschneidet und es dennoch zur Kristallisation kommt. Des Weiteren können zusätzliche Keime von außen (Verunreinigungen, organische Reste von Glaspasten) die Keimzahl erhöhen, so dass es im Temperaturbereich der maximalen Kristallwachstumsgeschwindigkeit zur Kristallisation kommen kann. Tritt bei Gläsern Kristallisation auf, so kann unter Umständen diese durch ein geändertes Temperaturregime oder eine saubere Verarbeitung verhindert werden. Führt dies nicht zum Erfolg, ist die Glaszusammensetzung zu ändern. Abbildung 4.4 zeigt die Darstellung von Keimzahlen und Kristallisati-

ongeschwindigkeit über die Temperatur nach Tamman [46] sowie die REM-Aufnahme einer kristallisierten Glaslotprobe.

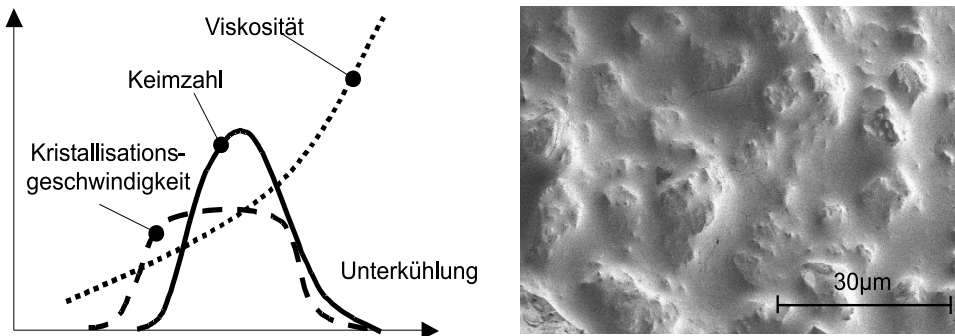


Abbildung 4.4: Kristallisationsdiagramm und REM-Aufnahme eines kristallisierten Glaslotes

**Elektrischer Widerstand** Der Elektrische Widerstand eines Glases nimmt mit steigender Temperatur ab, da aus dem Glasnetzwerk Ladungsträger (Ionen der Netzwerk-wandler) heraus gelöst werden. Dies führt zu einer Verschlechterung des Isolation<sup>4</sup> von Gläsern bei steigender Temperatur was besonders zu beachten ist, wenn Leitbahnen durch das Glas führen. Beim anodischen Bonden wird hingegen der Effekt der thermischen Ladungsträgergeneration ausgenutzt, um die Wafer im Bondfeld zusammen zu bringen und fest zu fügen.

#### 4.1.4 Glasverarbeitung auf Waferebene

Um Glas auf Waferebene verarbeiten zu können, muss es entweder in der Form eines Wafers vorliegen oder auf Halbleiterwafer als Schicht aufgebracht werden.

Für die Herstellung von Glaswafern eignen sich am besten Flachgläser<sup>5</sup>. Aus ihnen kann die Waferform herausgeschnitten werden (nach SEMI-Standard [15] kreisrund in verschiedenen Durchmessern und mit entsprechenden Fasen). Anschließend wird der Wafer beidseitig durch Schleifen sowie Polieren auf die Enddicke (300 bis 2000 µm) abgedünnt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass der Wafer aus dem spannungsarmen Kern des Flachglases gearbeitet wird. Alternativ dazu können für die Verwendung von Sondergläsern Wafer aus erstarrten Tiegelschmelzen gefertigt werden, wobei mit einer schlechteren Glashomogenität zu rechnen ist.

Für das Aufbringen von Glas auf Halbleiterwafer als Schicht mit definierter Dicke sind folgende Möglichkeiten bekannt:

---

<sup>4</sup>Leckstrom, dielektrische Verluste

<sup>5</sup>z.B. aus Floatglaslinien, in denen das Glas aus der Schmelze direkt zu Platten verarbeitet wird

- Sputtern von Glas durch Zerstäuben; Abscheidung aus einer physikalischen Dampfphase
- Aufbringen von Glaspasten, in denen Glas als Pulver durch organische Binder gebunden ist, mittels Siebdruck oder Aufspinnen
- Aufspinnen von Glassuspensionen, bei denen feine Glaspartikel in einer Flüssigkeit gebunden sind (Spin-On-Glass, Solgel)
- Aufdampfen von Glas, indem durch einen Elektronenstrahl verdampftes Glas sich auf der Waferoberfläche niederschlägt
- Abscheiden von Glas aus der chemischen Dampfphase, wobei Reaktionen in der Abscheidungskammer erst die Glasbildung ermöglichen
- Bonden von Glas gegen Halbleiterwafer und ggf. Rückdünnen des Glases

Obwohl in den Mikroelektroniktechnologien seit mehreren Jahrzehnten glasartige Isolationsschichten (thermisches Siliziumdioxid, CVD- Oxide auch mit Bor- und Phosphoranteilen) eingesetzt werden, ist die Abscheidung von dickeren Glasschichten bzw. mit unterschiedlichen Zusammensetzungen eine eher neue Aufgabenstellung, die besonders aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik kommt. Dadurch ist das Aufbringen von dicken Glasschichten auf Halbleiterwafer weniger weit verbreitet und es hat sich noch keine universell einsetzbare Methode heraus kristallisiert. Vielmehr bestimmen die Anwendung und die nutzbaren technologischen Möglichkeiten im konkreten Fall die Art der Aufbringung. Auf die in dieser Arbeit verwendeten Varianten wird später eingegangen.

#### 4.1.5 Gläser zum Waferbonden

Als Bondzwischen­schicht zwischen Halbleiterwafern eignen sich zwei Gruppen von Gläsern:

1. anodisch bondbare Gläser, die unterhalb ihres Erweichungspunktes eine ausreichend hohe Ionenleitfähigkeit besitzen (Na-, K-, oder Li-Anteile), so dass ohne ein Erweichen des Glases durch das Anlegen einer Spannung und anodische Oxidation eine Verbindung von Glas und Halbleiter zustande kommt
2. sehr niedrigschmelzende Gläser, deren Fließpunkt unterhalb der Maximaltemperatur prozessierter Wafer<sup>6</sup> liegt, so dass das Glas im Sinne einer Glaslotverbindung an den Halbleiterwafer angeschmolzen werden kann und eine feste, hermetisch dichte Verbindung entsteht

---

<sup>6</sup>z.B. 450°C bei Al-Metallisierungen

In beiden Fällen ist es notwendig, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient des Glases möglichst gut an das Silizium angepasst ist, damit beim Abkühlen nach dem Bonden oder bei weiteren Temperaturänderungen keine mechanischen Spannungen entstehen, die zu Rissen in der Verbindung oder einem der beiden Materialien führen würden. Dabei gilt, dass bei dünneren Schichten die Differenz zwischen Halbleiterwafer und Glas etwas größer sein darf als bei dickeren.

## 4.2 Anlagen zum Waferbonden

Die nachfolgend beschriebenen Versuche zur Entwicklung von Waferbondtechnologien mit Glaszwischen-schichten wurden auf Anlagen, hergestellt von der Firma Süss-Microtech AG, durchgeführt. Die zu bondenden Wafer werden in einer speziellen Transportvorrichtung (Fixture) aufgenommen, auf geringen Abstand gehalten (zwischenliegende Spacer) und können in dem Bondaligner BA6 mit einer Genauigkeit von ca.  $1\ \mu\text{m}$  zueinander ausgerichtet werden. Das Bonden erfolgt in einer Bondkammer (SB6VAC). In dieser Kammer können definierte Umgebungsbedingungen, wie z.B. Vakuum<sup>7</sup>, Unter- bzw. Überdruck oder ein definierter Durchfluss eines Prozessgases (z.B. Stickstoff), eingestellt werden. Dabei ermöglichen die Spacer einen Gasaustausch im Waferzwischenraum vor dem Bonden, so dass u.a. Vakuum in verbondeten Kavitäten eingeschlossen werden kann. In der Bondkammer werden die Wafer über ihre Auflage auf die Prozesstemperatur geheizt. Das eigentliche Bonden erfolgt durch das in den Kammerdeckel eingebaute Bondwerkzeug. Folgende 3 Bondwerkzeugarten wurden verwendet:

- **Elektrodentool:** Es ermöglicht zum anodischen Bonden das Anlagen elektrischer Spannung über Elektrodenpins an die Wafer.
- **Membrantool:** Nach dem Fixieren der Wafer durch einen Mittelpin wird eine leicht gewölbte Membran derartig aufgeblasen, dass sie die Wafer ausgehend von der Mitte so zusammendrückt, dass eine Bondfront von der Wafermitte aus zum Waferrand läuft.
- **Universaltool:** Die zu bondenden Wafer werden durch eine starre Druckplatte zusammengedrückt, um den Bondvorgang durchzuführen, dabei kann zusätzlich eine elektrische Spannung an die Druckplatten angelegt werden. Es können Druckplatten aus unterschiedlichen Materialien eingesetzt werden.

Um die Eignung der Bondverfahren für eine industrielle Produktion zu bewerten, wurden weiterhin Versuche auf einem automatischen Bondsystem (ABS150 Suss MicroTec) durchgeführt, welches einen Bondaligner sowie zwei Bondkammern durch ein Roboterhandlingsystem

---

<sup>7</sup>als Vakuum wird in dieser Arbeit ein Druck kleiner  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar bezeichnet

miteinander verbindet. Auch hier kommen die Fixtures für das Waferhandling zum Einsatz. Abbildung 4.5 veranschaulicht die Ausführungen der verwendeten Anlagen; weitere Angaben sind unter [10] zu finden.

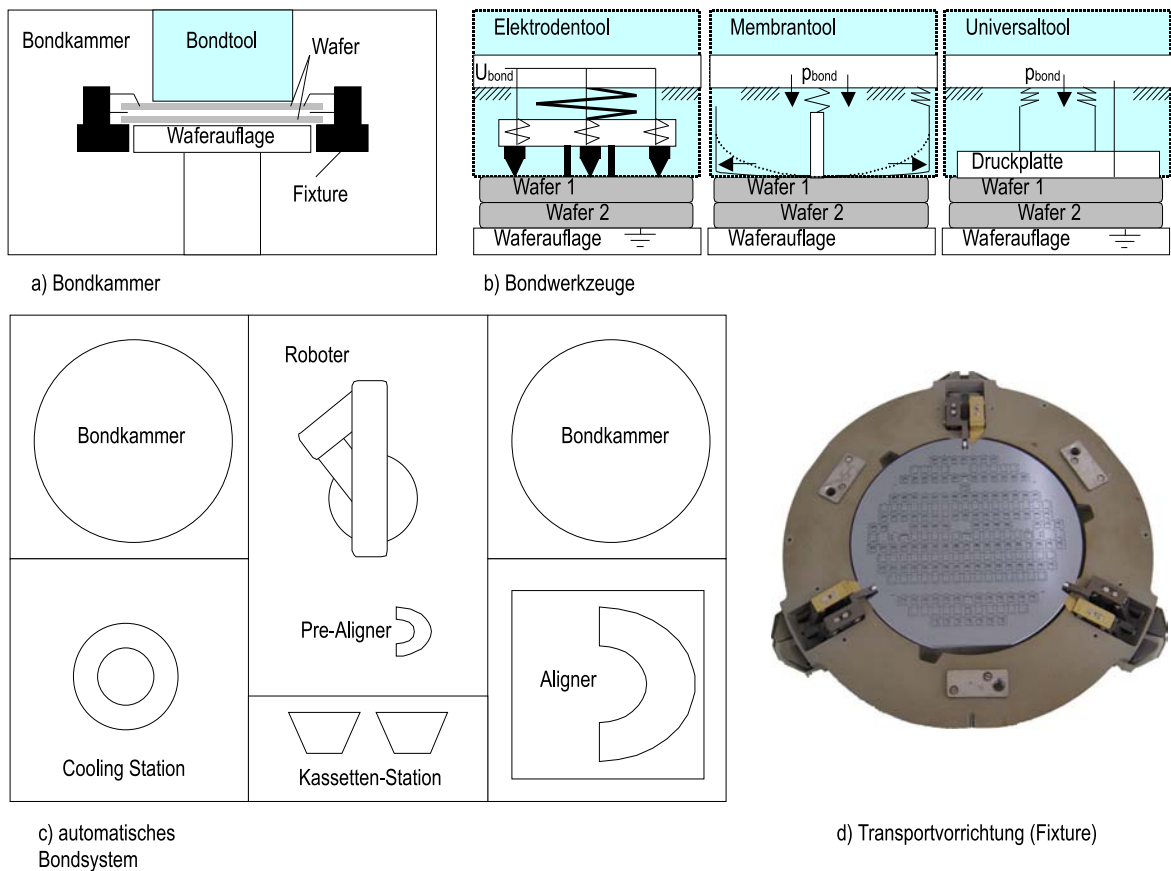


Abbildung 4.5: Bondanlagen, Bondwerkzeuge und Transportvorrichtung

## 4.3 Bewertungsmethoden für Waferbondverbindungen mit Glaszwischen­schichten

### 4.3.1 Einordnung der Bewertungsmethoden

Die Bewertung der Verbindung von Wafern mittels Glaszwischen­schichten, die im Folgenden vorgestellt werden soll, umfasst zwei Hauptaspekte. Zum einem soll die Ausbildung der Bond­verbindung bewertet werden, um zu garantieren, dass der Bondvorgang ordnungsgemäß abge­laufen ist und die Wafer ohne Fehlstellen miteinander verbunden sind. Hierbei handelt es sich stets um Inspektionen, die im Idealfall die gesamte Waferfläche, aber zumindest frei wählbare definierte Bereiche umfassen sollen. Des Weiteren muss festgestellt werden, ob beim Bonden

die Justage der Wafer zu einander aufrecht erhalten werden konnte. Der zweite Punkt der Bewertung umfasst die Charakterisierung der prinzipiellen Eigenschaften der Bondverbindung wie ihre mechanische Festigkeit und hermetische Dichtigkeit.

### 4.3.2 Bewertung der Ausbildung der Bondverbindung

Die Bewertung der Ausbildung der Bondverbindung ist das wichtigste Kriterium bei der Entwicklung und Überwachung der Bondprozesse. Ziel ist es dabei zu bewerten, in wie weit es auf den zu bondenden Flächen zur Ausbildung einer Verbindung gekommen ist. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Bestimmung der Bondausbeute, als Kriterium der Homogenität der Verbindungsausbildung
- Bewertung der Prozessparameter und Ermittlung notwendiger Korrekturen
- Bewertung des Zustandes der Bondanlagen
- Bewertung von Einflüssen aus der Vorprozessierung der zu bondenden Wafer

Um die Ausbildung der Bondverbindung bewerten zu können, muss das Bondinterface, d.h. die Verbindungstelle der beiden Wafer, sichtbar gemacht werden. Da bei den zu behandelnden Bondverfahren zwei oder mehr Siliziumwafer miteinander gefügt werden sollen, kann das Bondinterface nicht lichtoptisch inspiziert werden. Es sind somit bildgebende Verfahren gefragt, die in einem Wellenlängenbereich arbeiten, in dem das Silizium hinreichend transparent ist, um Abbildungen der Fügezone zu liefern. Im Verlauf dieser Arbeit hat sich dafür die Infrarotinspektion aufgrund ihrer einfachen Handhabbarkeit und sicher interpretierbaren Ergebnisse als am geeignetsten erwiesen (Abbildung 4.6). Ultraschall- und Röntgenverfahren, als Alternativen, sind hingegen eher für Sonderuntersuchungen geeignet. Beide sind aufwändiger und ihre Ergebnisse schwieriger zu interpretieren. Bei allen drei Methoden handelt es sich um zerstörungsfreie Prüfungen. In einigen Fällen ist es jedoch zur Interpretation von gefundenen Fehlern notwendig, durch Querschnittspräparationen (Brüche, Schliffe) diese genauer zu untersuchen.

### 4.3.3 Bewertung der Bondfestigkeit

Da es sich bei dem Waferbonden um die mechanische Verbindung von Substraten handelt, ist die Festigkeit ein entscheidendes Bewertungskriterium. Sie gibt an, welcher mechanischen

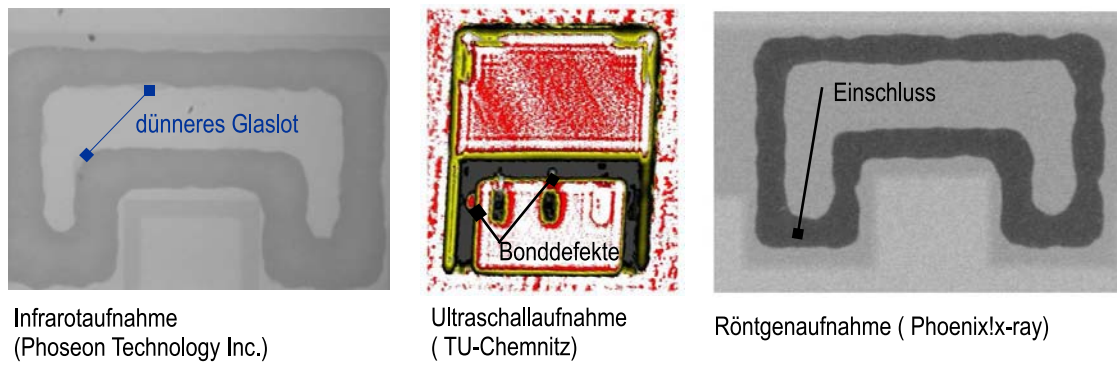


Abbildung 4.6: Vergleich der Inspektionsmethoden gebondeter Siliziumwafer anhand von Beispielbildern (X-FAB Proben)

Belastung die Bondverbindung widerstehen kann und spiegelt somit integral die Qualität der Verbindung und die Fähigkeiten des Prozesses wieder. Zur Bestimmung der Bondfestigkeit werden zerstörende Zugversuche eingesetzt. Dabei erfolgt die mechanische Belastung meist senkrecht zur Bondfläche. Je nach Wahl der Proben und die Art der Durchführung dieser Versuche lassen sich gezielt unterschiedliche Schlussfolgerungen ziehen.

- **Vereinzeln der Wafer:** Beim Vereinzeln der gebondeten Waferstapel mittels Trennsägens zu Chips wird das Waferinterface mechanisch belastet. Bei unzureichender Festigkeit der Waferverbindung kommt es zum Ablösen der Deckelchips von den Sensoren. Da man davon ausgehen kann, dass typischerweise auf die Waferbondverbindung während der Weiterverarbeitung und der Lebenszeit der Chips keine stärkeren mechanischen Belastungen einwirken, kann das Vereinzeln als Test der Bondverbindung angesehen werden. Da bei diesen Test alle Sensorchips eines Wafers belastet werden, kann durch Auszählen der Chips, bei denen sich der Deckel gelöst hat<sup>8</sup>, eine Bondausbeute ermittelt werden.
- **Zugversuche an Chipproben** können zur Bestimmung der Bondfestigkeit an realen Sensorchips eingesetzt werden. Dazu sind die vereinzelt Chipproben in einer Zugprüfmaschine bis zum Bruch zu belasten. Die Maximalkraft, die beim Bruch des Chips auftritt, ist ein Maß für dessen Festigkeit und kann auf die Bond-<sup>9</sup> bzw. Chipfläche<sup>10</sup> normiert werden, um Vergleiche zu anderen Prüflingen zu ziehen. Obwohl prinzipbedingt<sup>11</sup> große Streuungen der Messwerte auftreten, ist dieser Test von sehr großer Bedeutung, um die Minimalfestigkeit und Schwachstellen<sup>12</sup> realer Sensoren zu ermitteln. Für die Untersuchung von technologischen Einflüssen und Parametervariationen ist er jedoch, bedingt

<sup>8</sup>bei kritischen Anwendungen sind zusätzlich die Nachbarchips als Ausfälle zu werten

<sup>9</sup>zum Vergleich von Bondverfahren bzw. -parametern

<sup>10</sup>zum Vergleich von verschiedenen Chipdesigns

<sup>11</sup>Probenpräparation, exakte Krafteinleitung, Designeinflüsse

<sup>12</sup>liegen oft nicht in der Bondverbindung, so dass diese dann nicht festigkeitsbegrenzend ist

durch die starke Streuungen, zu ungenau.

- **Chevron-Notch-Test** Für diesen in [58] beschriebenen Test werden spezielle Teststrukturen mit dreieckiger Bondfläche benötigt. Nach dem Vereinzeln der Wafer werden die in das Chipraaster integrierten Chevron-Notch-Proben abgenommen und mechanisch im Zugversuch so belastet, dass von der Spitze des gebondeten Dreieckes ein Riss ausgeht, der bei Erhöhung der Testkraft mit konstanter Rissgeschwindigkeit wächst. Nach dem Erreichen einer Maximalkraft kommt es zu einem instabilen Risswachstum, bis die gesamte Probe versagt. Aus der Maximalkraft lässt sich die Bruchzähigkeit, ein normierter Festigkeitswert, ermitteln. Da dieser Wert messprinzipbedingt sehr exakt mit geringer Streuung ermittelt werden kann, eignet sich dieses Verfahren sehr gut zur Bewertung, Optimierung und zum Vergleich von Bondtechnologien.
- **Klingentest nach Maszara** Bei dem in [11] beschriebenen Test wird eine Klinge in das Bondinterface zweier Wafer eingeführt. Aus der Länge des Risses, der sich vor der Klinge ausbildet lässt sich die Oberflächenenergie der Bondverbindung errechnen.
- **Überbondete Strukturen** können zur Bewertung von Bondverbindungen verwendet werden, bei denen keine planarisierenden Bondzwischen-schichten eingesetzt werden. An Strukturkanten kommt es zu ungebondeten Bereichen, deren Größe ein Maß für Bondfestigkeit sind.

Details zu den einzelnen Verfahren zur Bewertung der Bondfestigkeit einschließlich Darstellungen der Probengeometrien und Berechnungsformeln sind im Anhang A zusammengefasst.

#### 4.3.4 Dichtigkeitsuntersuchungen

Die in dieser Arbeit untersuchten Waferbondverfahren sollen dazu dienen, oberflächenmikromechanische Sensoren so zu verkapseln, dass sie von der Umwelt abgeschlossen werden und sich im Sensorinnenvolumen definierte Bedingungen (z.B. Vakuum) einstellen und über mehr als 15 Jahre erhalten. Daher ist die Dichtigkeit der Bondverbindung hinsichtlich Flüssigkeiten, Feuchte und Gasen von großer Bedeutung. Das Eindringen von Feuchte und korrosiven Medien kann Sensorstrukturen zerstören. Bei resonanten Sensoren kann ein Druckanstieg, der mit dem langsamen Einströmen von Gas in die Sensorkavität verbunden ist deren Funktion beträchtlich stören. Zur Bewertung der Dichtigkeit von Bondverbindungen kann nicht auf bekannte Methoden zurückgegriffen werden. So versagt die im MIL-Standard [12] für Keramikgehäuse vorgeschriebene Methode, da die Volumina der wafergebondeten Sensoren zu klein sind. Somit muss auf Methoden zurückgegriffen werden, die auf Ansätzen der Siliziummikromechanik beruhen.



- **Absolutdrucksensoranordnungen:** Aus der Durchbiegung der Membran (Messung als Druckausgangssignal) lässt sich auf den eingeschlossenen Druck (Vakuum) und dessen Änderung über die Zeit schließen. Das Verfahren ist limitiert, da ein sehr genauer Referenzdruck benötigt wird und sich geringe Innendruckänderungen nicht auflösen lassen.
- **Resonante Strukturen:** Die Resonanzgüte von z.B. oberflächenmikromechanischen Strukturen ist abhängig vom Druck des Volumen in dem sie eingeschlossen sind. Durch den Vergleich der Güte mit Simulationsergebnissen und Referenzmessungen lässt sich der Innendruck und dessen zeitliche Änderung sehr genau bestimmen.
- **Wärmeleitung** zwischen frei stehenden mikromechanischen Strukturen ist an das Vorhandensein von Gasmolekülen gebunden, somit kann aus der Wärmeleitung auf den Innendruck gebundeter Kavitäten geschlossen werden. Verbessert sich mit der Lagerdauer der Wärmeübergang, so ist Gas in die Teststruktur eingedrungen.
- **Bondverbindungen als Dichtung in makroskopischen Systemen** wurden in [64] erwähnt. Man kann wafergebundene Anordnung als Trennwand in ein System so einbauen, dass sie ein Vakuum von einem Gas, das unter Druck, steht trennt. Gelangen Gasatome durch die gebondeten Bereiche der Trennwand in die Vakuumkammer, so können sie dort spektroskopisch hochauflösend detektiert und die Leckrate der Teststruktur kann bestimmt werden.

Die aufgeführten Methoden zur Bewertung der Dichtigkeit von Bondverbindungen sind im Anhang B anhand von Zeichnungen näher erläutert.

#### 4.3.5 Beschleunigte Alterung

Die bisher vorgestellten Bewertungsmethoden beschreiben den Zustand der Waferbondverbindung zum Zeitpunkt des Testes, in der Regel direkt nach ihrer Herstellung. Um aber die Langzeiteigenschaften der Bondverbindung zu untersuchen, muss sie einer gezielten beschleunigten Alterung unterzogen werden. Entsprechende Test für integrierte Schaltkreise sind standardisiert [12, 14]. Da derartige Standardisierungen für mikromechanische Systeme und Waferbondverbindungen noch nicht existieren, wurden gezielte praktikable Alterungsbelastungen aus den IC-Standards abgeleitet, um zu ersten Erkenntnissen zu gelangen.

- **Langzeitbewertung Bondfestigkeit:** Ziel ist es hierbei, das Bondinterface gezielt zu belasten, um aus dem Grad einer möglichen Schwächung Aussagen über die Lebensdauer der Bondverbindung abzuleiten.

- Langzeitzugversuche zur Ermittlung des zeitlichen Auftretens des Versagens von Waferbondverbindungen unter definierter Belastung.
  - Zyklische Belastung der Bondverbindung oder mechanische Schockbelastungen, wobei die Versagensgrenzen bzw. die Reduzierung der Bondfestigkeit (Zugversuch) , ermittelt werden können.
  - Temperaturwechselfests sind besonders für Bondzwischen-schichten aus Glas interessant, da sich bei den Temperaturwechseln aufgrund thermomechanischer Spannungen Mikrorisse ausbilden können, die die Bondfestigkeit<sup>13</sup> herabsetzen.
- **Langzeitbewertung Dichtigkeit:** umfasst die Bestimmung von Leckraten für die Bondverbindung und die Untersuchungen von Mechanismen der Leckentwicklung (Ermittlung von Aktivierungsenergien)
    - Leckratenbestimmung: Da sehr niedrige Leckraten der Bondverbindungen angestrebt werden, sind beschleunigte Test für ihre Bestimmung notwendig. Ziel dabei ist es, die Gasdiffusionsrate über das Bondinterface zu erhöhen. Dies kann durch erhöhte Drücke und Temperaturen sowie die Verwendung von Gasen mit kleinen Molekülen erreicht werden. Dabei haben kleine Gasmoleküle die stärkste beschleunigende Wirkung; so bringt an oxidischen Bondflächen die Verwendung von Helium einen Beschleunigungsfaktor von  $2 \cdot 10^{18}$  im Vergleich zu Luft (Stickstoff)[13].
    - Die oben bei der Langzeitbewertung der Bondfestigkeit aufgeführten Belastungen können auch potenziell die Dichtigkeit beeinflussen und zur Untersuchung der Leckentwicklung verwendet werden.
  - **Chemisch physikalische Belastungen** wie z.B. Feuchteinflüsse bei erhöhtem Druck<sup>14</sup> können das Bondinterface schwächen (Festigkeit/Dichtigkeit), bzw. bei dicken Verbindungsschichten diese anlösen, wobei zudem chemische Reaktionen Funktionselemente (z.B. Aluminiumbondpads) in der Nähe der Bondverbindung schädigen können.

Die hier aufgeführten Aspekte der Alterungsuntersuchungen an Bondverbindungen sind als Denkansätze zu verstehen, ohne jeden Anspruch auf Vollständigkeit. Da die entsprechende Untersuchungen sehr aufwändig und langwierig sind, wurde nur ein Teil davon für die nachfolgend aufgeführten Bondtechnologien durchgeführt.

---

<sup>13</sup>Veränderungen der Bondfestigkeit lassen sich nur durch vergleichende Zugversuche mit hohem Stichprobenumfang ermitteln

<sup>14</sup>Pressure Cooker Test, 121°C, Dampfdruck 2 bar, 100% RH [16]

## 4.4 Anodisches Bonden von Glaszwischen-schichten

Das anodische Bonden zum Verbinden von Glas mit Halbleitern oder Metallen geht auf ein Patent von G. I. Pomerantz [17] aus dem Jahr 1968 zurück. Die Ausbildung der Verbindung erfolgt bei erhöhten Temperaturen unter Ausnutzung der Driftbewegung von Ionen des Glases im elektrischen Feld. Aufgrund ihrer sehr hohen Zuverlässigkeit und einfachen Anwendung hat sich diese Bondtechnologie in der Mikrosystemtechnik zum Abdecken von Strukturen auf Siliziumwafern mittels Glaswafern weit verbreitet. Da sich jedoch die Glasdeckelwafer als schwer strukturierbar erwiesen haben sowie thermomechanische Spannungen in den Waferstapel einbringen und die benötigten hohen elektrischen Spannungen zur Zerstörung von elektrischen Elementen führen können, sollen hier Möglichkeiten vorgestellt werden, Siliziumwafer über Glaszwischen-schichten anodisch miteinander zu verbinden. Ein Hauptziel dabei ist es, die Bondspannung möglichst gering zu halten, um die elektrischen Elemente der Sensorwafer wenig zu belasten.

### 4.4.1 Prinzip des anodischen Bondens

Der Prozess des anodischen Bondens beruht auf Driftbewegungen von Ionen im Netzwerk von Gläsern unter dem Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein von frei bewegliche Ionen. Diese entstehen, wenn Netzwerkwandler (positive Metallionen), die nur durch schwache Bindungen mit dem Glasnetzwerk verbunden sind, durch Wärmeenergie aus dem Netzwerk gelöst werden. Bei den zum anodischen Bonden verwendeten Gläsern handelt es sich meist um Natrium-Ionen. Bringt man ein zu bondendes Glas mit einem Siliziumwafer in Kontakt und erwärmt beide, kommt es beim Anlegen einer negativen Spannung am Glas zu einer Verschiebung der Natrium-Ionen. Dieser Verschiebungsstrom der Ionen ist von der Kontaktstelle Glas-Silizium weg gerichtet, so dass sich an ihr eine Verarmungszone im Glas ausbildet. Aufgrund des Fehlens von Ladungsträgern, kommt es zu einem hohen elektrischer Spannungsabfall in diesem Bereich verbunden mit starken elektrostatischen Kräften, welche die Wafer zusammen ziehen. Der so entstehende Kontakt im atomaren Bereich ist notwendige Voraussetzung für die Verbindungsbildung. Da das Glas in der Bondtemperatur bereits geringe viskose Fließeigenschaften besitzt, wird dieser Effekt noch verstärkt. Die eigentliche Verbindungsbildung erfolgt, indem Sauerstoff-Ionen im elektrischen Bondfeld vom Glas zur Siliziumoberfläche driften und dort zu einer anodischen Oxidation führen. Die dabei entstehenden Sauerstoffbrückenbindungen bewirken letztlich die Verbindung der Wafer. Abbildung 4.7 verdeutlicht den Prozess des anodischen Bondens anhand einer entsprechenden Anordnung.

Typische Bondtemperaturen liegen im Bereich von 250 bis 500 °C, die Bondspannungen

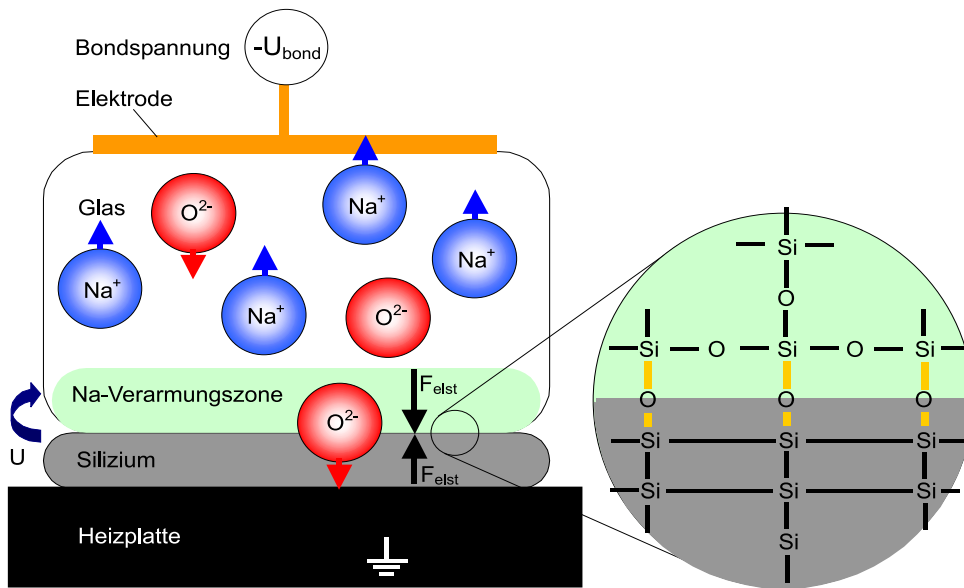


Abbildung 4.7: Darstellung des Prinzips des anodischen Bondens

bei 300 bis 2000 V. Bondtemperatur und -spannung verhalten sich gegenläufig, d.h. bei hohen Temperaturen reichen geringere Spannungen für die Ausbildung einer festen Verbindung aus. Der Effekt der Ausbildung der Verarmungszone kann zur Prozesssteuerung genutzt werden. Nach Erreichen der Bondspannung kommt es zum Abfallen des Bondstroms aufgrund des begrenzten Vorrats an Ladungsträgern. Unterschreitet der Bondstrom eine empirisch zu bestimmende anwendungsabhängige Schwelle, kann die Verbindungsbildung als abgeschlossen angesehen und der Prozess beendet werden. Alternativ kann zur Bewertung der Verbindungsbildung die absolut bewegte Ladungsmenge herangezogen werden. Abbildung 4.8 zeigt einen typischen Bondstromverlauf. Da das Bonden bei erhöhten Temperaturen stattfindet, muss das Glas in seiner thermischen Dehnung an das Silizium angepasst sein, um thermomechanische Spannungen oder gar Risse in den verbundenen Materialien beim Abkühlen zu vermeiden.

#### 4.4.2 Bonden von Glaswafern

Bevor auf das Bonden von dünnen Glasschichten eingegangen wird, sollen hier die Besonderheiten des anodischen Bondens anhand massiver Glaswafer vorgestellt werden. Hauptanwendung des Glaswaferbondens ist die Verkappung von Sensoren auf Waferebene und das Deckeln von mikrofluidischen Systemen. Dabei erweist sich die optische Transparenz des Glases in zweierlei Hinsicht als vorteilhaft. Zum einen können optische Systeme ohne Beeinträchtigung der Funktion verkapselt werden. Zum anderen lassen sich Bondfehler leicht detektieren, da sich an ihnen optisch sehr gut zu erkennende Weißlichtinterferenzen ausbilden.

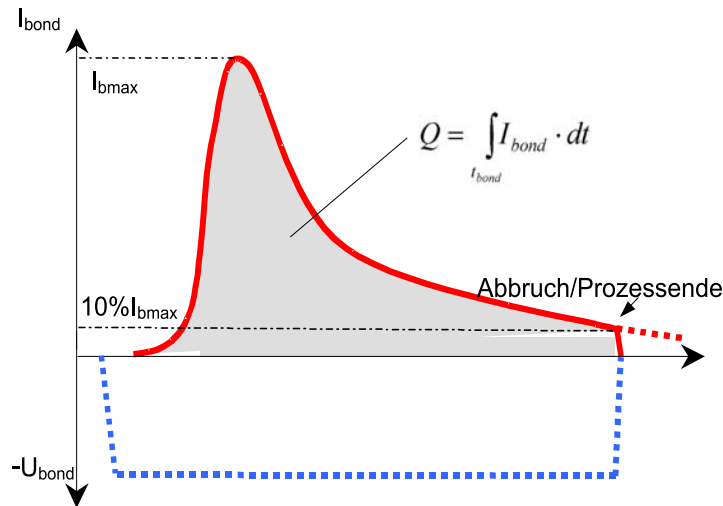


Abbildung 4.8: Typischer Bondstromverlauf und Ermittlung von Endpunktkriterien

#### 4.4.2.1 Glaswafer

Da die meisten technischen Glassorten kationische Netzwerkwandler besitzen, ist für die Auswahl bondbarer Gläser weniger deren stoffliche Zusammensetzung, als ihre thermische Dehnung ausschlaggebend. Da das Glas als Bondpartner von Silizium ( $\alpha_{\text{Si}}=3,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) eingesetzt werden soll, muss seine thermische Dehnung entsprechend sein. Gläser der Pyrex-Familie erfüllen diese Bedingung. Ihr Ausdehnungskoeffizient liegt im Bereich von  $3,0$  bis  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Die am häufigsten zum anodischen Bonden verwendeten Gläser sind Borofloat 33<sup>15</sup> und Pyrex No.7740<sup>16</sup>. Als Alternative kann auch das Glas Hoya SD2<sup>17</sup> eingesetzt werden. Dieses Glas wurde speziell hinsichtlich des anodischen Bondens entwickelt, gehört jedoch aufgrund seines hohen Aluminiumoxidanteils nicht zur Pyrex-Familie. Wafer hergestellt aus diesen Gläsern, sind in verschiedenen Größen und Dicken kommerziell verfügbar. Die Oberflächen der Glaswafer sind optisch poliert, um ein gutes Bondergebnis zu erhalten. Es ist zu beachten, dass sich auf derartigen Oberflächen ein Politurfilm, bestehend aus Glasabtrag und Politurmittel, befindet, der das Oberflächenprofil ausfüllt und somit glättet. Dieser Oberflächenfilm ist für das anodische Bonden nicht störend. Durch Überätzen in Flusssäure kann er jedoch entfernt werden, wodurch sich die Oberflächengüte verschlechtert. Im Extremfall können Politurkratzer zum Vorschein kommen, die zu Undichtigkeiten im Bondinterface führen. Die Strukturierung der Glaswafer, d.h. das Einbringen von Durchbrüchen und Gruben, ist nur sehr aufwändigen jedoch mit relativ ungenauen Verfahren (Ultraschallbearbeitung, Sandstrahlen) möglich, wodurch die Einsatzmöglichkeiten von Glaswafern stark eingeschränkt sind. Durch die Nut-

<sup>15</sup>geschützte Bezeichnung SCHOTT Glaswerke

<sup>16</sup>geschützte Bezeichnung Corning Glass Works

<sup>17</sup>geschützte Bezeichnung HOYA Japan

zung von Glaszwischen-schichten zum Waferbonden soll auch erreicht werden, dass die Glaswafer durch Siliziumscheiben, die einfacher zu strukturieren sind (KOH-Ätzen), abgelöst werden können.

#### 4.4.2.2 Herausforderungen und Lösungen

Um das anodische Bonden von Glaswafern zur Verkapselung von Sensoren in der industriellen Praxis einsetzen zu können müssten im Vorfeld dieser Arbeit einige Herausforderungen gemeistert werden, die zum einen vom Bondprinzip und zum anderen vom Glas herrühren. Da diese Effekte auch relevant für das anodische Bonden von Glaszwischen-schichten sind, sollen sie hier kurz vorgestellt werden.

- Mobile alkalische Kationen (Natrium) aus dem Glas können in die elektrischen Schaltungsstrukturen eindringen und diese beeinträchtigen (Isolationsverhalten von Oxiden und pn-Übergängen). Um diese Ionen von den Schaltungen fern zu halten, wurde eine inzwischen patentierte dreilagige Passivierung entwickelt. Ihre oberste TEOS-Schicht gewährleistet ein sehr gutes anodisches Bondverhalten. Eine sich darunter befindende Nitridschicht dient als Barriere für die mobilen Ionen. Zur Sicherheit besteht die unterste Lage, die sich direkt über den elektrischen Elementen befindet, aus einer Phosphorsilikatglasschicht, die mobile Ionen gettern, also binden kann [18].
- Um die elektrischen Strukturen vor Zerstörung durch die elektrische Bondspannung zu schützen, müssen diese so kontaktiert werden, dass die Bondspannung nicht über ihnen abfällt. Dies ist im Waferdesign zu beachten und durch Zusatzkontakte in der Bondanlage sicher zu stellen.
- Da die thermischen Dehnungen von Glas und Silizium im Bond- und Anwendungstemperaturbereich nicht exakt gleich sind, kommt es zur Ausbildung thermomechanischer Spannungen, die das Sensorverhalten negativ beeinflussen. Durch entsprechende Wahl der Bondtemperaturen lassen sich diese Spannungen minimieren. Bei zweiseitigen anodischen Bondungen können die Spannungen in dem entstehenden Dreifachstapel weitgehend kompensiert werden [19].
- Beim Bondprozess werden die bewegten Natrium-Ionen aus der nicht zu bondenden Oberfläche herausgelöst und bilden durch Reaktionen mit der Umgebung (Oberflächenfeuchte, Bondatmosphäre) hartnäckige Ablagerungen. Durch die Verwendung von einseitig metallisierten Glaselektrodenwafern können diese Ablagerungen vermieden werden. Dabei liegt die nicht metallisierte Seite der Elektrode auf dem zu bondenden Glaswafer auf und

die Natrium-Ionen können direkt in das Elektrodenglas übergehen und bilden somit keine Ablagerungen. Die Metallisierung dient zur Kontaktierung der Glaselektrode und zur flächigen Verteilung des Bondfeldes. Abbildung 4.9 zeigt die Wirkung der Glaselektrode [20].

- Zur Vermeidung von elektrischen Überschlügen an Durchbrüchen von zu bondenden Glaswafern lassen sich ebenfalls die oben erwähnten Glaselektroden einsetzen [21]. Da sich bei dieser Anordnung über dem Glasdurchbruch anstatt einer leitfähigen Potentialfläche eine Verarmungszone im Glas befindet, kann sich kein Potentialunterschied ausbilden. Somit sind keine Überschlüge möglich.
- Beim anodischen Verkapselungsbonden beweglicher Sensorstrukturen ist darauf zu achten, dass diese nicht anbonden und somit unbrauchbar werden. Indem man die Glasflächen über den Strukturen unbondbar macht, kann man das ungewollte Anbonds verhindern. Dies kann erfolgen, indem man eine Diffusionsperre (z.B. Metall) auf das Glas aufbringt, welche die Sauerstoffdiffusion und somit die anodische Oxidation zur Ausbildung der Verbindung verhindert. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Bondfläche des Glases quasi aufzulösen, so dass praktisch keine ebene Bondfläche mehr zur Verfügung steht. Dies ist möglich durch die Realisierung spitzer Glasstrukturen, hergestellt mittels isotropem nasschemischem Glasätzen.

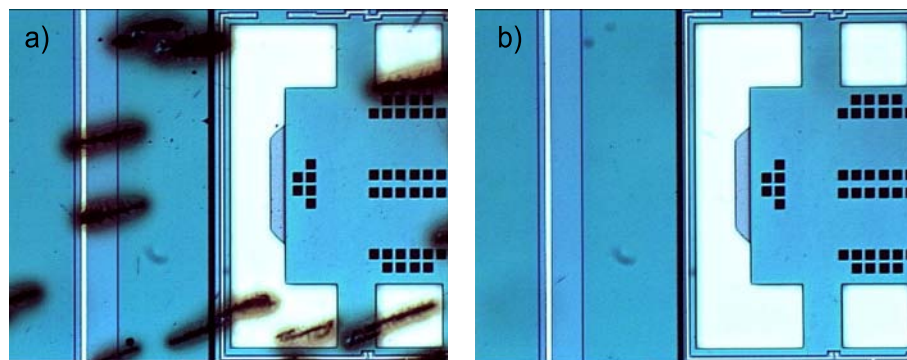


Abbildung 4.9: Natriumablagerung auf anodisch gebondetem Glas: a) Ablagerungen, b) saubere Oberfläche nach Verwendung einer Glaselektrode

Die beschriebenen Lösungen der Herausforderungen beim anodischen Glaswaferbonden wurden im Rahmen der Entwicklung einer Volumenmikromechaniktechnologie zur Realisierung eines Beschleunigungssensors erbracht. Inzwischen wird dieser Sensor (Abbildung 4.10) in hohen Stückzahlen durch die X-FAB für die Firma Melexis N.V. produziert.

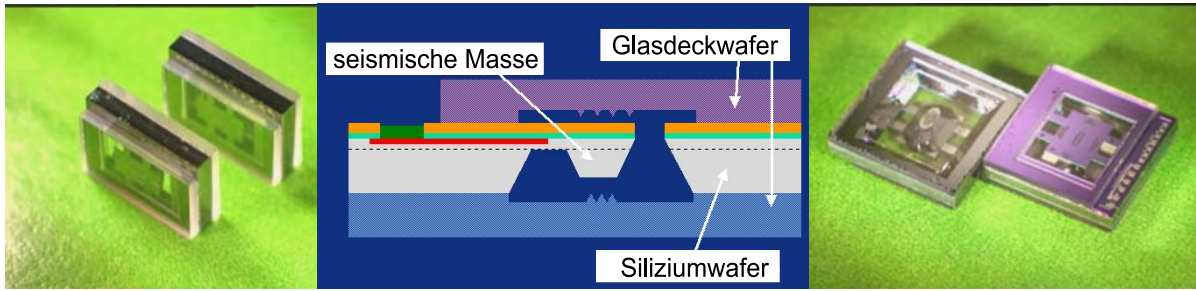


Abbildung 4.10: Beschleunigungssensor hergestellt mittels Bulk­mikromechanik und anodischen Waferbondens (schematischer Querschnitt und fotografische Aufnahmen)

### 4.4.3 Anodisches Bonden von Zwischenglasschichten

#### 4.4.3.1 Bonden dünner gesputterter Glasschichten

Die drei Haupt­nachteile des anodischen Bondens von Silizium- und Glaswafern, thermomechanische Spannungen im Waferstapel, begrenzte Strukturierungsmöglichkeiten anodisch bondbarer Gläser und die benötigten hohen Bondspannungen, haben bereits vor einigen Jahren zu der Idee geführt, dünne Glasschichten durch Sputter- [24, 25] oder Aufdampfprozesse [22] auf einem Siliziumwafer abzuschneiden, um diesen Wafer mittels des anodischen Bondprozesses mit einem zweiten Siliziumwafer zu verbinden. Da dünne Schichten anodisch bondbarer Borosilikatgläser (Corning Pyrex 7740, Schott Borofloat 33) nahezu die gleichen Bundeigenschaften wie massive Glaswafer aufweisen, jedoch aufgrund der geringen Schichtdicke deutlich geringere Bondspannungen benötigt werden und niedrigere thermomechanische Spannungen entstehen, eignen sie sich sehr gut als verbindende Zwischenschicht zwischen zwei Siliziumwafern. Aus diesem Grund sollte dieses Verfahren hinsichtlich seiner Eignung zur Verkapselung von oberflächenmikromechanischen Strukturen auf Waferebene untersucht werden. Im Rahmen eines geförderten Verbundprojektes<sup>18</sup> konnte auf einen optimierten Prozess zum Aufbringen gesputterter Pyrex-Glasschichten bei einem Projektpartner<sup>19</sup> zurückgegriffen werden. Ziel war es dabei auf strukturierte Deckwafer, eine Glasschicht abzuschneiden, so dass anodisch bondbare Rahmen um das Chip und seine Drahtbondpads entstanden, die einen hermetisch dichten Verschluss der Sensorstruktur durch den aufgebondeten Deckel ermöglichen.

**Sputtern anodisch bondbarer Gläser** Zum Aufbringen der gesputterten Glasschichten wurde ein am HSG-IMIT etablierter Prozess verwendet, der in [23] beschrieben ist. Daher soll hier weniger auf das eigentliche Sputtern, sondern vielmehr auf die Vorbereitung der Deckwafer vor dem Bonden und die für das Bonden relevanten Ergebnisse eingegangen werden.

<sup>18</sup>Verbundprojekt „ARaD “-Angular Rate Detection, gefördert vom BMBF

<sup>19</sup>HSG-IMIT Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft





beeinträchtigen:

1. Aufbringen der Maskierungsschichten (Hartmasken) zur Strukturierung der Deckwafer entsprechend der Sensorfunktion.
2. Strukturierung der Deckwafer durch anisotropes Siliziumätzen, nasschemisches (KOH-Ätzen) oder plasmachemisches (ASE) Ätzen von Gruben und Durchbrüchen.
3. Entfernen der Maskierungsschichten.
4. Reinigung der Wafer.
5. Thermische Oxidation der Deckwafer: Dieses Grundoxid von ca. 500 nm Dicke, auf das später die Bondglasschicht aufgebracht wird, erfüllt folgende zwei Funktionen:
  - durchgehende defektfreie Isolationsschicht zur Vermeidung von Durchschlägen und parasitären Strömen an Defektstellen der gesputterten Glasschicht
  - Haftvermittler zur Erhöhung der Haftfestigkeit der gesputterten Schicht auf dem Wafer
6. Entfernen der Oxidschicht auf der nicht zu bondenden Waferseite, um beim anodischen Bonden die elektrische Kontaktierung des Deckwafers zu ermöglichen.

Das Sputtern der Glasschicht erfolgte als Kooperationsleistung durch HSG-IMIT. Als Targetmaterial kam Corning Pyrex 7740 zum Einsatz. Bedingt durch die oben bereits erwähnten geringen Abscheidungs-raten beim HF-Sputtern von Glas war nur eine geringe Schichtdicke von 3-4  $\mu\text{m}$  möglich. Doch selbst für diese relativ dünnen Schichten waren Sputterzeiten von mehreren Stunden pro Wafer (Einzelscheibenprozess) notwendig. Dies hatte hohe Kosten pro Wafer und eine begrenzte Verfügbarkeit von Testwafern zur Folge. Eine höhere Schichtdicke wäre in zweierlei Hinsicht wünschenswert gewesen: zum einen könnte mit einer etwas höheren Bondspannungen gearbeitet werden, da dann eine höhere Durchschlagfestigkeit vorliegt, wodurch ein sicherer Bondprozess mit höherer Bondausbeute möglich wäre. Zum anderen steigt mit der Schichtdicke die Anzahl der bei erhöhten Temperaturen beweglichen Ladungsträger (Na-Ionen), die für den Bondprozess notwendig sind. Eine Erhöhung dieser Ladungsträgermenge führt zu einem erhöhten Bondstrom, wodurch sich der Prozess besser monitoren und optimieren lassen kann. Dies käme der Prozesssicherheit zugute. Bedingt durch den Einsatz des Magnetron-Sputterverfahrens und der Tatsache, dass die einzige zur Verfügung stehende Sputteranlage für kleine Substrate (4 Zoll) ausgelegt war, kam es bei der Beschichtung der verwendeten 6-Zoll-Wafer zu deutlichen Schwankungen in der Dicke der Bondglasschicht. Zum Waferrand hin nahm die Dicke ab, wie in Abbildung 4.12 dokumentiert.

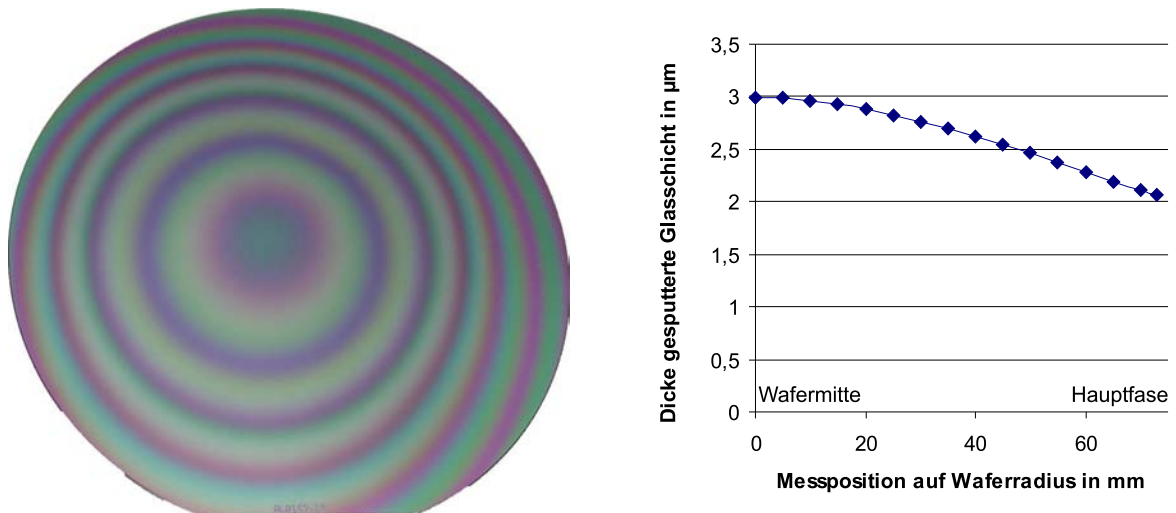


Abbildung 4.12: Schichtdickeninhomogenität gesputterter Glasschichten

Nach dem Sputtern hat ein Tempern der Wafer bei 500°C Grad zu erfolgen, um die Glasschicht zu verdichten. Des Weiteren kann durch Ionendiffusion das durch den Sputtervorgang veränderte Glasgefüge wieder ausgeglichen werden. Durch Relaxation bauen sich dabei innere mechanische Spannungen des Glases ab. Abbildung 4.13 fasst die Präparation der mit anodisch bondbarem Glas besputterten Siliziumdeckwafern zusammen.

Bei dem vorgestellten Gesamtprozess wird die Struktur der Bondflächen durch die Strukturierung der Deckwafer vorgegeben, d.h. es werden nur die nicht abgesenkten Bereiche der Bondseite der Deckwafer gebondet. Eine zusätzliche Strukturierung der Glasschicht ist nicht notwendig. Eine solche könnte aufgrund der geringen Dicke der Glasschicht sowohl nass- als auch trockenchemisch erfolgen. Da jedoch der Einfluss notwendigen Maskierungsebenen auf die Bundeigenschaften der gesputterten Glasschichten nicht bekannt ist, beinhaltet die nachträgliche Strukturierung ein Risiko und wurde daher nicht weiter verfolgt.

**Aktivierung der Wafer vor dem Bonden** Um Partikeleinschlüsse im Bondinterface, die zu sehr großen ungebondeten Bereichen führen, zu verhindern sollte vor jeder Bondung, unabhängig von der Art der Bondtechnologie, eine Reinigung der Wafer (z.B. RCA oder DI-Wasser) stehen. Vom direkten Halbleiterwaferbonden ist bekannt, dass es dabei zu einer Hydrophilisierung (Anlagerung von OH-Gruppen), d.h. einer Aktivierung der Oberfläche kommt, die eine notwendige Voraussetzung zur Ausbildung der Bondverbindung ist [27]. Für das anodische Bonden von Silizium- mit massiven Glaswafern ist eine derartige Aktivierung nicht notwendig. Bei Bondspannungen größer 800 V lassen sich sogar hydrophobe Siliziumoberfläche<sup>22</sup> gegen

<sup>22</sup>Bondung kurzzeitig nach Entfernen von Maskierungsschichten mittels konzentrierter Flusssäure

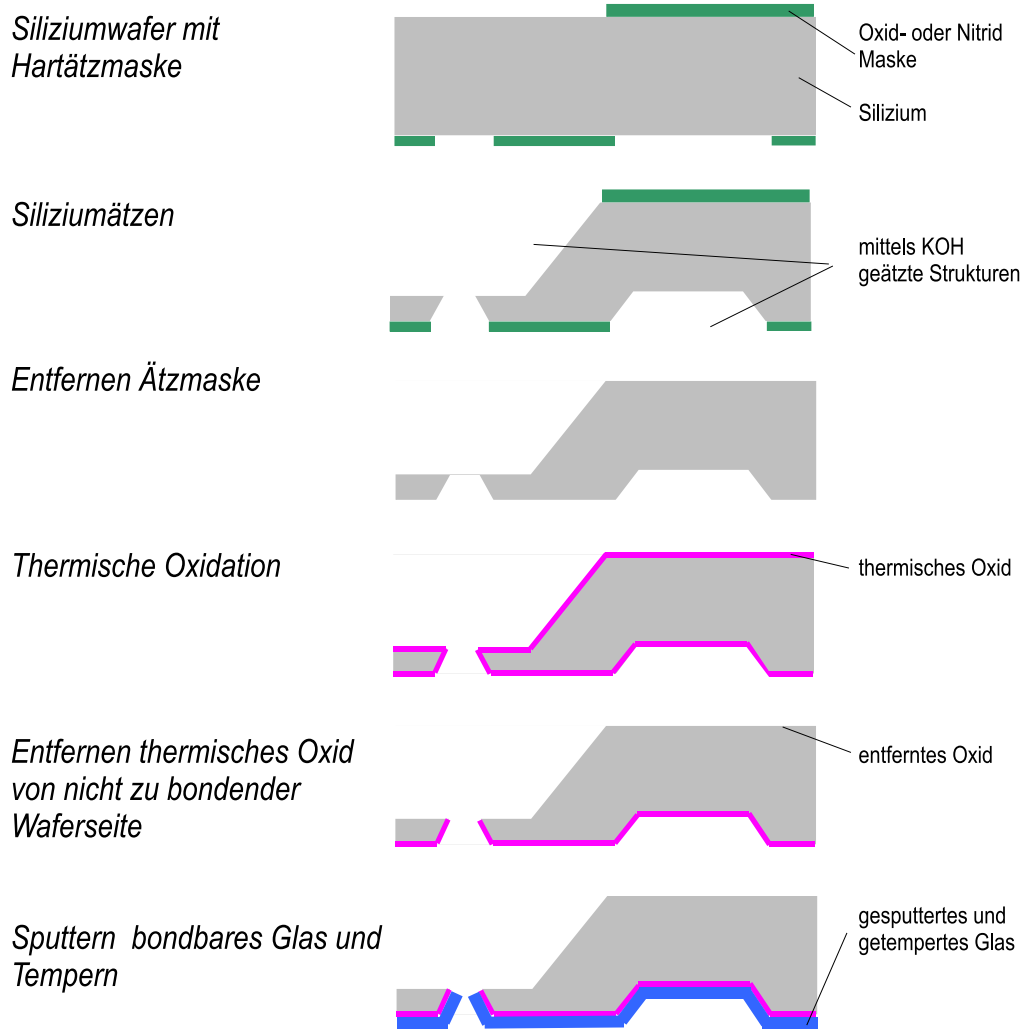


Abbildung 4.13: Gesamtablauf Herstellung Siliziumdeckwafer mit gesputterter anodisch bondbarer Glasschicht

Glaswafer mit hoher Ausbeute bonden.

Da die Vorgänge der Verbindungsbildung beim anodischen Bonden von gesputterten Glasschichten denen beim Bonden von massiven Glaswafern entsprechen sollten, die Sensorwafer mit den frei gelegten oberflächenmikromechanischen Strukturen nicht nass behandelt werden konnten (Sticking-Gefahr) und für die Aktivierung der Deckwafer keine geeignete Anlage<sup>23</sup> zur Verfügung stand, wurden zunächst Bondversuche ohne vorherige Aktivierung der Bondflächen unternommen. Bei diesen Versuchen kam es nicht zur Ausbildung einer Bondverbindung zwischen den Wafern, obwohl die Bondstromverläufe den für das anodische Bonden typischen Verlauf (Ladungsträgerverarmung) zeigten. Dies war ein eindeutiges Zeichen, dass die gesputterte Glasschicht im Kontakt mit der Siliziumoberfläche des Gegenwafers war, jedoch keine

<sup>23</sup>Gefahr von Na-Cross-Contamination des CMOS-Prozesses

Verbindungsbildung stattfand. Aufbauend auf Erfahrungen vom direkten Halbleiterwaferbonden wurden zunächst die Glasoberfläche durch eine nasschemische Reinigung<sup>24</sup> aktiviert. Bei der nachfolgenden Bondung verband sich der aktivierte Deckwafer zumindest partiell mit dem Sensorwafer. Die Bondausbeute war jedoch noch zu gering und der Bondprozess schlecht reproduzierbar. Es zeigte sich jedoch, dass für das erfolgreiche anodische Bonden von gesputterten Glasschichten aktivierte hydrophile Oberflächen, wie sie vom Siliziumdirektbonden bekannt sind, [27] benötigt werden. Da es sich bei der Aktivierung der Deckwafer um einen für das Siliziumdirektbonden optimierten Schritt handelte, war davon auszugehen, dass diese ausreichend für gute Bondergebnisse ist. Somit war für die Erhöhung der Ausbeute beim Bonden von gesputterten Glasschichten die Aktivierung der Gegenwafer notwendig. Da es sich hierbei um Wafer mit oberflächenmikromechanischen Sensorstrukturen handelte, war eine nasse Behandlung (Reinigung) nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine Sauerstoffbehandlung<sup>25</sup> dieser Wafer durchgeführt, die auch ohne nachfolgendes DI-Wasserspülen eine oberflächenaktivierende Wirkung hat [28], wie in einem Verbundprojekt zum direkten Siliziumniedertemperaturbonden<sup>26</sup> bereits gezeigt werden konnte. Nach Aktivierung beider zu bondender Wafer (Deckwafer nasschemisch, Sensorwafer Sauerstoffplasma) konnten sehr gute Bondergebnisse und Ausbeuten größer 80% erreicht werden. Abbildung 4.14 fasst den Einfluss der Oberflächenaktivierung zusammen, wobei die angegebenen Bondausbeuten anhand von IR-Bildern abgeschätzt wurden.

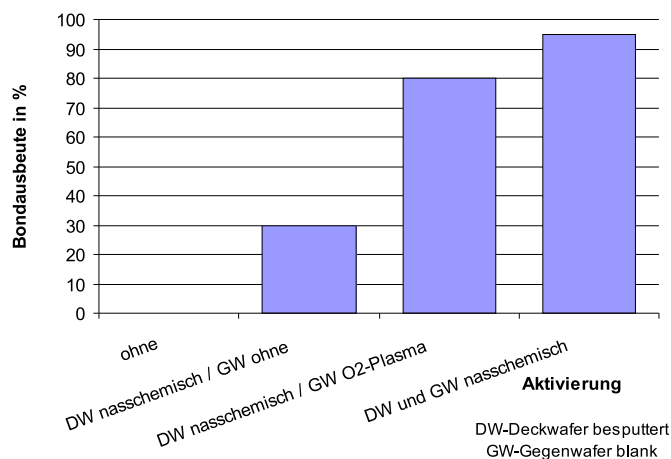


Abbildung 4.14: Ausbeute beim Bonden von gesputterten Glasschichten in Abhängigkeit von der Aktivierung

Mit diesen Versuchen wurde nachgewiesen, dass eine Aktivierung sowohl der zu bondenden

<sup>24</sup>kombinierte Schwefel- Salzsäurereinigung in Sprühschleuderanlage

<sup>25</sup>Sauerstoffplasma ICP-Kammer 2 min

<sup>26</sup>„NTB“-Niedertemperatur-Si-Si-Bonden, gefördert vom BMBF

gesputterten Glasoberfläche als auch der Siliziumgegenfläche für einen sicheren Bondprozess notwendig ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich sogar nach Standzeiten von mehr als 2 Jahren gesputterte Glasschichten durch derartige Aktivierung bonden lassen, was bisher nicht möglich schien<sup>27</sup>. Für die Erklärung der Notwendigkeit der Aktivierung der Oberflächen beim anodischen Bonden gesputterter Glasschichten im Gegensatz zum Bonden massiver Glaswafer gibt es folgende zwei Hypothesen, die mangels geeigneter Analysemethoden bzw. hohem experimentellen Aufwand jedoch nicht näher untersucht werden konnten:

- Die gesputterte Oberfläche der Glasschicht weist andere Oberflächenzustände als die von polierten Glaswafern auf, so dass durch die Aktivierung beider Bondflächen erst die Voraussetzung zur verbindungsbildenden anodischen Oxidation im Bondinterface geschaffen werden muss, nämlich das Vorhandensein einer ausreichenden Anzahl von Sauerstoffradikalen.
- Aufgrund der deutlich geringeren elektrischen Spannung beim Bonden von gesputterten Glasschichten<sup>28</sup> reicht die elektrostatische Kraft im Bondinterface nicht aus, um diese ganzflächig bis in den atomaren Bereich hinein in Kontakt zu bringen, um eine Verbindungsbildung zu ermöglichen. Bringt man jedoch die aktivierten Oberflächen in Kontakt<sup>29</sup>, so kommt es zur Ausbildung einer Prebondverbindung, ähnlich der beim direkten Bonden von Halbleiterwafern [27]. Diese Verbindung zeichnet sich durch Flächenkontakt im atomaren Bereich aus, weist aber nur eine geringe mechanische Festigkeit auf und muss noch durch Bindungstransfusion verhärtet werden. Dies könnte im Fall des anodischen Bondens gesputterter Glasschichten durch die anodische Oxidation in der Grenzfläche erfolgen.

**Bonden gesputterter dünner Schichten** Der eigentliche Bondvorgang unter Nutzung der gesputterten Glasschichten entspricht dem beim anodischen Bonden von Glaswafern und läuft wie folgt ab:

1. Ausrichten der beiden aktivierten Wafer anhand von Justagemarken
2. Laden des Waferpaares in die Bondkammer
3. Einstellen der gewünschten Bondatmosphäre (Stickstoff bei gewünschtem Druck)
4. Klemmen der Wafer in der Anlage (Wafermitte), Entfernen der Randklemmen und Abstandshalter

---

<sup>27</sup>Hinweis HSG-IMIT: Bondung gesputterter Glasschichten sollte innerhalb weniger Tage erfolgen

<sup>28</sup>Faktor 10-40 im Vergleich zum Bonden massiver Glaswafer

<sup>29</sup>geringer mechanischer oder elektrostatischer Druck des Bondtools ist dazu ausreichend

5. Heizen der Wafer auf Bondtemperatur, Abwarten des thermischen Ausgleiches
6. Anlegen der Bondspannung, Bondstromfluss bis zum Endpunktkriterium
7. Abkühlen der Bondanlage
8. Entnahme der Wafer

Bild 4.15 zeigt einen typischen Verlauf von Bondspannung und Bondstrom anhand einer realen Bondung. Die Bondparameter sollen hier kurz diskutiert werden.

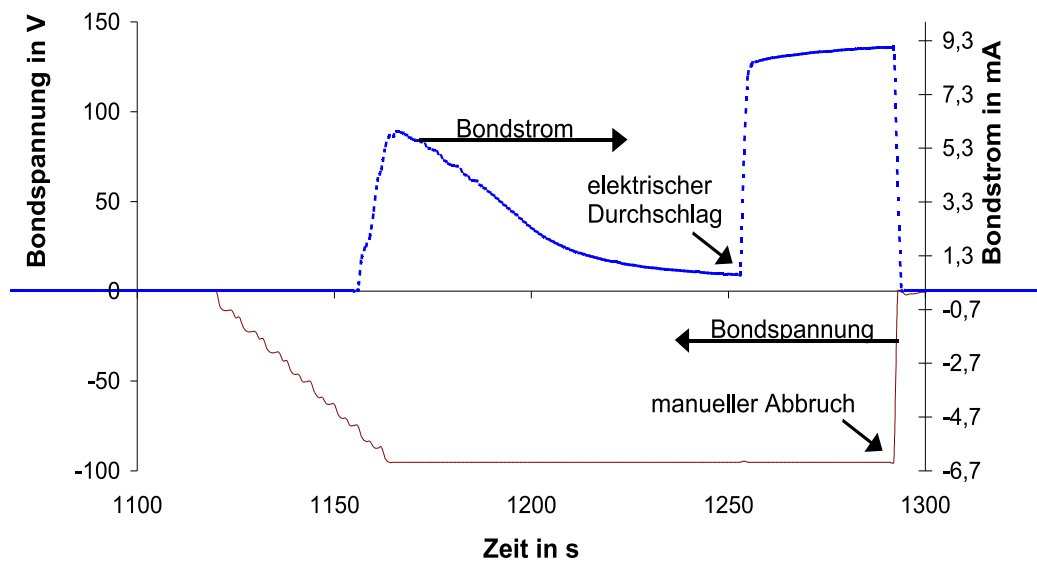


Abbildung 4.15: Verlauf von Strom und Spannung beim anodischen Bonden gesputterter Glasschichten

Voraussetzung für den Prozess des anodischen Bondens ist das Herauslösen der Natrium-Ionen aus dem Glasnetzwerk. Besonders im Bondinterface müssen genügend mobile Ionen zur Verfügung stehen, daher ist eine ausreichend hohe Temperatur an dieser Stelle notwendig. Erfolgreiche Bondungen mit gesputterten Glasschichten ließen sich bei Temperaturen zwischen 300 und 450 °C erzielen. Beim Bonden strukturierter Wafer zeigte sich, dass man bei der maximal möglichen Temperatur<sup>30</sup> von 450 °C die besten Ergebnisse erreicht. Bedingt durch die einseitige Heizung des Waferpaares (Heizchuck) und die sehr dünne Glasschicht, die nur ein geringes thermisches Isolationsverhalten aufweist, wird viel Wärme über das thermisch sehr gut leitende Silizium des Deckwafer zum Bondwerkzeug abgeführt. Dadurch besteht die Gefahr, dass bei geringeren Bondtemperaturen das Bondinterface zu kalt, der Bondstrom zu gering und die Bondung unzureichend ist. Besonders kritisch ist dieser Punkt beim Bonden im

<sup>30</sup>bedingt durch die Aluminiummetallisierung, die bei größer 450 °C mit dem Silizium zu legieren beginnt

Vakuum, da durch die fehlende Wärmeleitung an den Spalten zwischen den Auflagen und den Wafern der Wärmeeintrag in das Bondinterface verringert ist.

Als ideale Bondspannung zum Bonden strukturierter 6-Zoll-Sensorwafer hat sich ein Wert von 90 V herausgestellt. Bei dieser Spannung stellt sich ein maximaler Bondstrom von ca. 6 mA ein, der ausreichend für eine feste Bondung ist, wobei die Strombegrenzung der Bondanlage (10 mA) nicht erreicht wird. Dies ist vorteilhaft, da man den Bondprozess frei kontrollieren kann (Spannungsrampen), ohne dass die Maschinengrenzen limitierend wirken. Unterschiedliche Sensortypen konnten mit der selben Spannung erfolgreich gebondet werden. Dies liegt vermutlich daran, dass die effektiven Bondflächen mit etwa 30-40 % der Waferfläche nahezu identisch waren. Der Bondstrom zeigt im ersten Teil des Diagramms in Abbildung 4.15 den typischen Verlauf für das anodische Bonden. Mit der Erhöhung der Bondspannung steigt der Strom; es kommt zur Ausbildung der Verarmungszone im Glas, woraufhin der Strom nach Erreichen seines Maximalwertes von ca. 6 mA, bedingt durch das Wachsen der Verarmungszone, abfällt. Im weiteren Verlauf der Bondung kommt es zu einem unerwarteten Anstieg des Stroms, der sich nur durch einen elektrischen Durchschlag des Isolatorsystems Glas-Grundoxid erklären lässt. Damit ist keine weitere Ausbildung der Bondverbindung mehr möglich, da das Bondfeld zusammenbricht. Der Bondvorgang wird somit abgebrochen, das gebondete Waferpaar kann abgekühlt und aus der Anlage entnommen werden. Hiermit ist der prinzipielle Vorgang des anodischen Bondens gesputterter Glasschichten hinreichend beschrieben. Seine Vorteile sind die gegenüber Glaswafern deutlich geringeren Bondspannungen bei ausreichend hohen Bondströmen und die Tatsache, dass strukturierte Siliziumdeckwafer anodisch gebondet werden können. Dabei sind Form und Art der Bondelektrode unwichtig, da der Deckwafer leitfähig genug ist, um das Bondfeld an die zu bondenden Stellen zu leiten. Im Folgenden soll auf einige Besonderheiten und Limitierungen des Bondens gesputterter Glasschichten eingegangen werden.

Der oben beschriebene plötzliche durchbruchartige Anstieg des Stromes im Verlauf des Bondens bis zur anlagenbedingten Strombegrenzung bei gleichzeitigem Zusammenbrechen der Bondspannung lässt sich nur mit der Ausbildung eines ohmschen leitfähigen Pfades erklären. Leckströme im Grundoxid bedingt durch Natriumionen des gesputterten Glases können ausgeschlossen werden, da sich mit ihnen die auftretenden hohen Ströme (10 mA bei etwa 50 V) nicht erklären lassen. Da dieser Effekt auch beim Bonden unstrukturierter Waferpaare auftritt, scheiden des Weiteren Einflüsse von Strukturkanten aus. Somit lässt sich der Stromanstieg nur wie folgt erklären: an Partikeln, die sich auf den zu bondenden Waferoberflächen nicht vollständig vermeiden bzw. entfernen lassen, treten beim Ausbilden und Verfestigen der Bondverbindung so starke Kräfte auf, dass diese die Isolatorschichten (gesputtertes Glas und thermisches Grundoxid) durchstoßen können und so zu einem permanenten Stromfluss führen. Der Zeitpunkt der Ausbildung des leitfähigen Pfades hängt stark von der Anzahl und der Größe der Partikeln ab.



Größere Partikel können schon bei geringeren Bondkräften die Isolierschichten durchstoßen. Da Größe und Anzahl der Partikel in der Bondfläche als zufällige Erscheinung anzusehen sind, kann die Dauer des Bondvorgangs nicht eindeutig gesteuert werden, d.h. die Verbindungsbildung wird von einem zufälligen Aspekt stark beeinflusst und ist somit nicht reproduzierbar. Zur automatischen Prozessführung können nur die Bondzeit und die bewegte Ladungsmenge verwendet werden, wobei jedoch keine Aussagen über den eigentlichen Bondvorgang abgeleitet werden können, da letztere das zeitliche Integral des Bondstromes und des Stromes über den leitfähigen Pfad ist. Andererseits haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Ausbildung des leitfähigen Pfades als ein Zeichen für eine erfolgreiche Bondung gewertet werden kann, was sich wie folgt erklären lässt. Beim Bonden unter Reinraumbedingungen ist davon auszugehen, dass sich nur einige wenige Partikel im Bondinterface befinden. Statistisch gesehen ist somit das Durchstoßen der Isolierschichten nur wahrscheinlich, wenn große Gebiete des Wafers gut gebondet sind, zumal die Partikel selbst zunächst die Ausbildung der Bondverbindung in ihrem Umfeld behindern. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass dieser Effekt vorwiegend am Waferrand auftritt, da dort zum einen durch das Waferhandling die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Partikeln erhöht ist, zum anderen hier abscheidebedingt die Glasschicht am dünnsten ist. Abbildung 4.16 veranschaulicht die Ausbildung eines leitfähigen Pfades beim Bonden gesputterter Glasschichten, der zum einen den Bondvorgang stark zufällig beeinflusst und somit schwer beherrschbar macht, zum anderen aber auch als Indiz für die flächenhafte Ausbildung der Bondverbindung gewertet werden kann.

Beim Bonden von strukturierten Sensorwafern mit glasbesputterten Deckwafern stellte sich heraus, dass trotz Aktivierung und eines für das anodische Bonden typischen Bondstromverlaufs (jedoch ohne elektrischen Durchbruch) es nicht zu einer Verbindung der Bondflächen kam. Die Wafer waren nur örtlich an wenigen kleinflächigen Punkten miteinander verbunden. Analysen ergaben, dass sich in den gebondeten Bereichen unpassiviertes Aluminium in Form von kleinen Strukturen<sup>31</sup> und Ätzresten im Bondinterface befand. Bereits vom Bonden massiver Glaswafer ist bekannt, dass Aluminium ein besseres Bondverhalten als Silizium aufweist und sich somit bei weitaus geringeren Spannungen bonden lässt. Im vorliegenden Fall kam es zum Bonden der kleinen Aluminiumstrukturen bei niedriger Spannung. Eine weitere Erhöhung der Spannung zum Bonden der eigentlichen Siliziumgebiete war nicht möglich, da es an den gebondeten Aluminiumstrukturen, vermutlich bedingt durch Feldstärkenkonzentrationen an den Alukanten, zu Überschlügen und Strompfaden kam, die ein weiteres Bonden unmöglich machten. Erst nach entsprechenden aufwändigen Änderungen in Waferdesign und der Technologie konnten die strukturierten Sensorwafer, die nunmehr keine Aluminiumstrukturen im Bondinterface aufwiesen, gebondet werden. Dies zeigt, dass sich beim Bonden gesputterter

---

<sup>31</sup>Außerhalb der eigentlichen Sensoren (Marken, Beschriftungen, Messflächen); im Sensor-Design wurde darauf geachtet, kein Aluminium im Bondinterface zu haben, da es die Annäherung der Bondflächen verhindern würde.

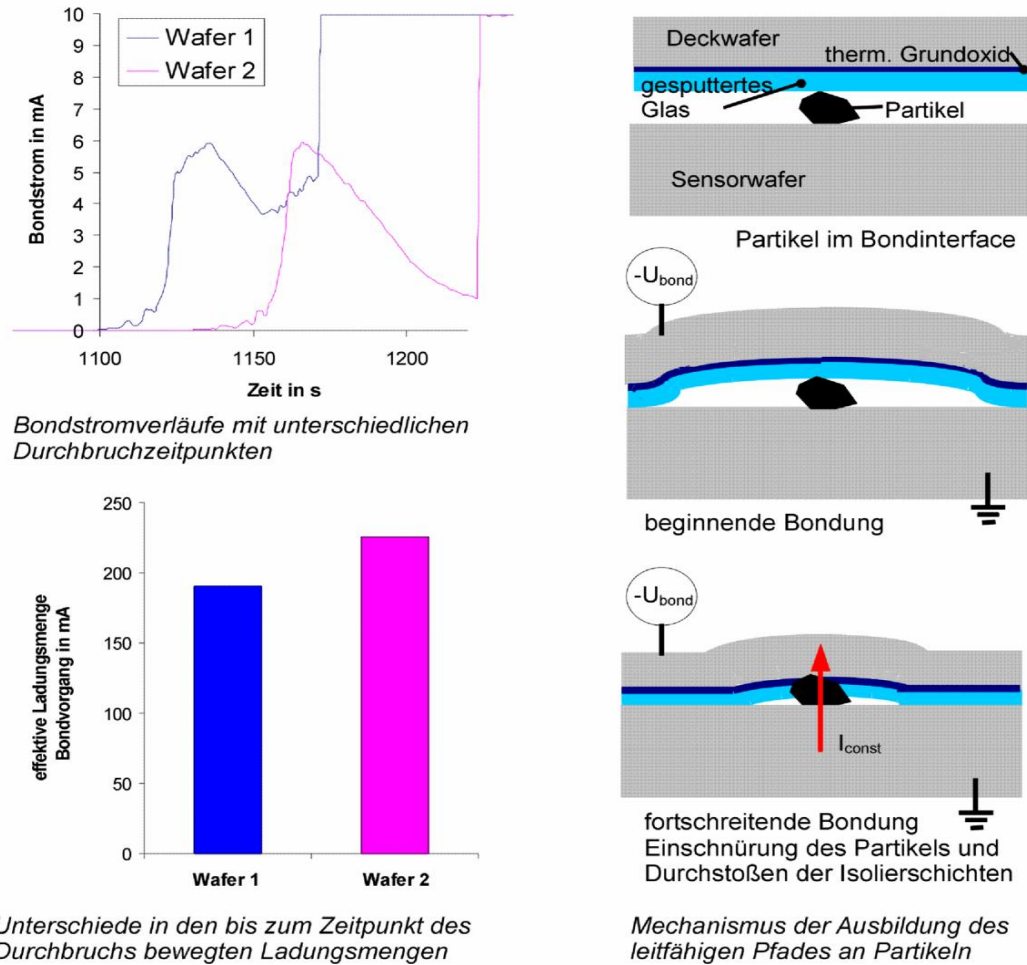


Abbildung 4.16: Mechanismus und Einfluss der Ausbildung eines leitfähigen Pfades an Partikeln beim Bonden gestutterter Glasschichten

Glasschichten keinerlei Aluminiumstrukturen im Bondinterface befinden dürfen. Dies ist eine große Herausforderung an die Gesamttechnologie der zu bondenden Wafer und das Gesamtwafersdesign und stellt eine latente Gefahr für ein sicheres Bonden dar.

Bei den ersten mittels gesputterten Glasschichten zu bondenden Sensoren handelte es sich um auf SOI-Waferbasis hergestellte Drehratensensoren (siehe 5.1). Die nach dem Bonden und Vereinzeln durchgeführten Messungen ergaben, dass die im Vakuum gebondeten Sensoren wasserdicht<sup>32</sup>, aber nicht gasdicht waren. Anhand von Zugversuchen (Bild 4.18) wurde festgestellt, dass der um das Chip umlaufende Bondrahmen gut gebondet war (Schichtübertrag siehe 4.4.3.1). An den Bondflächen um die Drahtbondpads, die durch offene Isolationsgräben voneinander und zum Chipbondrahmen hin isoliert sind, hatte sich jedoch keine Verbindung, gebildet, die zum Abdichten der Sensorkavität notwendig ist. Beim Bonden der Deckwafer

<sup>32</sup>Es war beim Wafersägen kein Wasser in die Sensorkavität eingedrungen, welches das Schwingen der Sensorstrukturen verhindern würde.

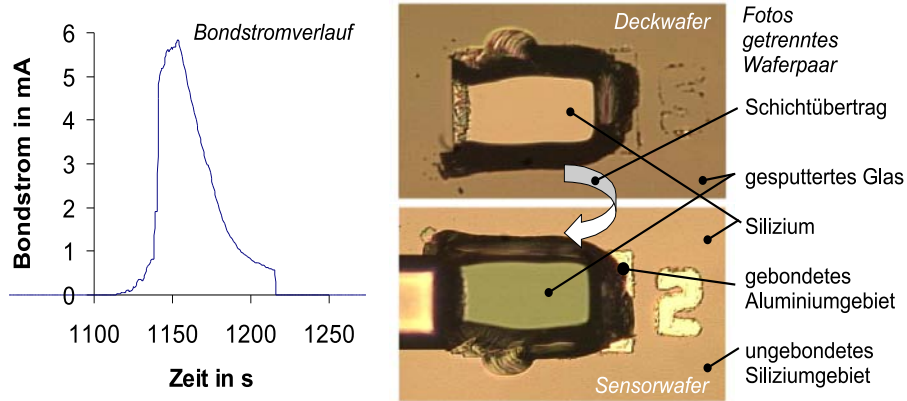


Abbildung 4.17: Ausbildung von Bondverbindungen an Aluminiumgebieten im Bondinterface

gegen unstrukturierte Bulk-Wafer konnten diese kritischen Bereiche jedoch sicher gebondet werden.

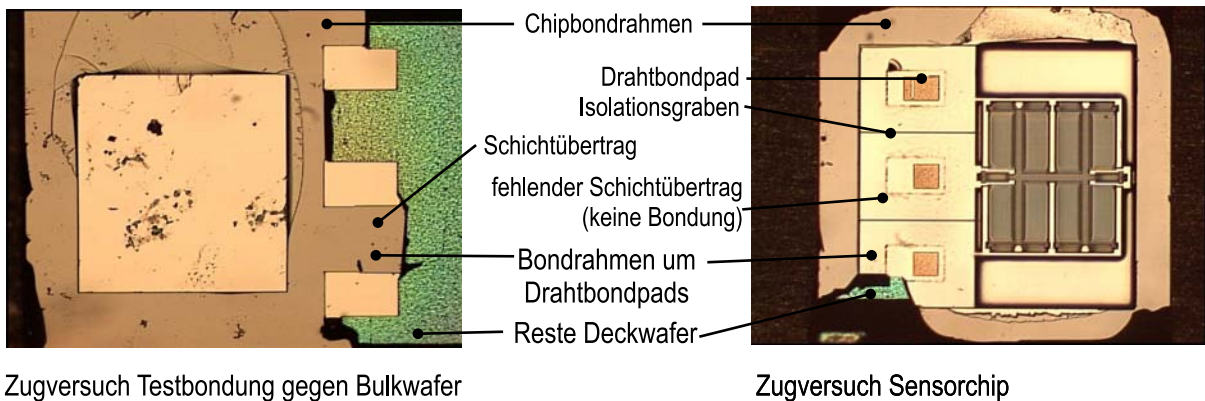


Abbildung 4.18: Vergleich gebondeter Gebiete von Sensor- und unstrukturierten Bulkwafern

Daher wurde die Ursache für das Ausbleiben der Bondung um die Drahtbondgebiete im Aufbau des Sensorwafers gesucht und gefunden. Die Chipbondrahmen sind designbedingt alle untereinander und mit dem unstrukturierten Waferrandbereich verbunden und stellen eine recht große Äquipotentialfläche dar, die bis zum undefinierten<sup>33</sup> Rand der aktiven Devicewaferschicht reicht. Die Drahtbondgebiete sind dagegen in ihrer Fläche sehr klein (einige 100  $\mu\text{m}$  Kantenlänge). Betrachtet man diese Konstellation hinsichtlich der Möglichkeit, dass Waferbondgebiete einen ungewollten elektrischen Kontakt zum Trägerwafer haben, so ist die Wahrscheinlichkeit für die Chipbondrahmen bedingt durch ihre große Fläche und den Kontakt zum Waferrand im Vergleich zu den Bondrahmen um die Drahtbondpads deutlich höher. Aufgrund der hohen Dotierung des Devicewafers und dem Bonden bei erhöhter Temperatur ist ein einzelner Kontaktpunkt ausreichend, um die gesamten Chipbondrahmen eines Wafers

<sup>33</sup>herstellungsbedingte Ausbrüche, zurückgesetzter überschlifffener Rand

anzuschließen. Ein Kontakt der Chipbondrahmen zum Trägerwafer würde bedeuten, dass in diese Gebiete die Bondspannung direkt, d.h. quasi ohmsch, in die Gebiete der Drahtbondpads jedoch nur kapazitiv eingekoppelt wird. Dies hätte zur Folge, dass die Bondspannung in den Bondrahmen der Drahtbondpads nicht hoch genug ist, um eine Bondverbindung auszubilden. Elektrische Messungen an prozessierten Wafern haben diese Hypothese bestätigt. Wie Abbildung 4.19 zeigt, besteht auch bei deutlich erhöhten Temperaturen vom Trägerwafer zu den Chipbondrahmen eine deutlich niedrigohmigere Verbindung als zu den Drahtbondrahmen. Vergleichsmessungen an unprozessierten SOI-Wafern, die einen sehr hohen Isolationswiderstand vom Device- zum Trägerwafer ergeben haben, deuten darauf hin, dass die leitende Verbindung zu dem Chipbondrahmen der Devicewaferschicht im Waferprozess im Bereich des Waferrandes entstehen. Defekte im vergrabenen thermischen Isolationsoxid der SOI-Wafer sind hingegen unwahrscheinlich.

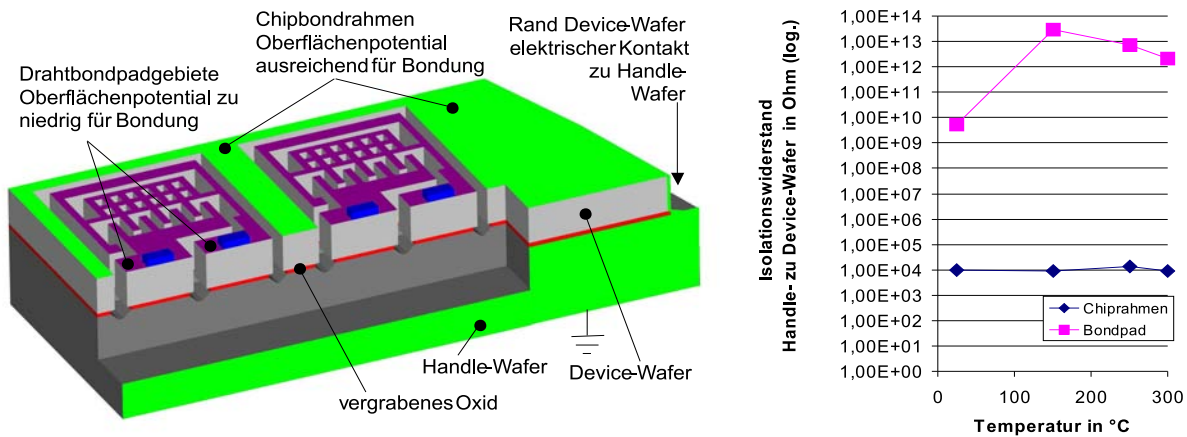


Abbildung 4.19: Oberflächenpotentiale beim Bonden von Sensorstrukturen und Ergebnisse Widerstandsmessungen

Anhand der theoretischen und praktischen Untersuchungen konnte eine Erklärung für die ungebundenen Waferbondrahmen um die Drahtbondpads gefunden werden. Die daraus resultierenden Maßnahmen, wie das Vereinzeln aller Waferbondgebiete und deren Isolation zum Waferrand, das definierte Bearbeiten des Device-Waferrandes (Rückätzen) oder die Vermeidung von ungewünschten Kontaktpfaden<sup>34</sup> konnten aufgrund des sehr hohen Aufwandes nicht realisiert werden. Somit konnten keine gasdichten Drehratensensoren mit diesem Bondverfahren gefertigt werden. Ihre Wasserdichtheit lässt sich dadurch erklären, dass die Deckel am Chipbondrahmen fest gebondet sind, wodurch sich auch im Bereich der Drahtbondpadrahmen ein Flächenkontakt zum Deckwafer ergibt, der das Eindringen von Wasser verhindert. Eine hermetisch dichtende Wirkung bezüglich Gasen besteht nicht, da keine stoffliche Verbindung

<sup>34</sup>Alu-Sputtern durch Blende, um Beschichtung des kritischen Randbereiches zu vermeiden

ausgebildet ist.

**Bewertung der Bondverbindung** Die Beurteilung der Bondverbindung gesputterter Glas-schichten erweist sich besonders bei strukturierten Waferpaaren als sehr schwierig. Sowohl die Infrarotinspektion (mangelnder Kontrast der Bondflächen) als auch die Ultraschallmikroskopie (teilweise ungebondeter Flächenkontakt) versagen. Als einzige Möglichkeit der Bewertung von gebondeten Sensoren war der Zugversuch einsetzbar. Dieser liefert nicht nur Angaben über die Festigkeit der Bondung, sondern gibt auch Aufschluss über die tatsächlich gebondeten Flächen-anteile. Dies ist möglich durch den Effekt des Schichtübertrages. Bei der Ausbildung einer guten Bondverbindung werden, gemäß des Prinzips des anodischen Bondens, Natriumionen von der Bondstelle weg bewegt. Diese wandern durch das gesputterte Glas und das thermische Grundoxid hindurch bis hin zur Siliziumoberfläche des Deckwafers. Da diese Ionen nicht in das Silizium eindringen können, setzen sie sich in der Grenzfläche Silizium-Oxid fest und schwächen diese mechanisch bzw. durch chemische Reaktionen [23]. Dies hat zur Folge, dass das Bondinter-face unerwarteterweise mechanisch fester als die Verbindung des Deckwafers zum thermisches Oxid ist. Belastet man derart gebondete Verbindungen, so kommt es zur Rissbildung in der Grenzfläche Oxid-Silizium und man findet das ursprünglich auf den Deckwafer aufgebraachte Schichtsystem (thermisches Oxid und gesputtertes Glas) auf dem Gegenwafer (Sensorwafer) wieder, daher der Begriff Schichtübertrag. Man kann daraus schlussfolgern, dass die Bereiche der Sensorwafer, auf denen sich nach dem Zugversuch Glas befindet gut gebondet waren. Die Bereiche ohne Schichtübertrag waren hingegen nur schwach oder gar nicht gebondet. Mit dieser Methode konnten die oben beschriebenen ungebondeten Bereiche der Drahtbondspadgebiete von Drehratensensoren erkannt werden. Der Effekt des Schichtübertrages muss aber auch bei der Wahl der Bondparameter beachtet werden. Bei zu hohen Bondspannungen können so viele Natriumionen in die kritische Grenzfläche gelangen, dass diese so stark geschwächt wird, dass die Verbindungsfestigkeit der beiden Wafer nicht mehr ausreichend ist.

Betrachtet man Sensorwafer, die unter Beachtung aller oben erwähnten Erkenntnisse gebon-det wurden, so lassen sich die mittels gesputterten Glases anodisch gebondeten Waferverbin-dungen wie folgt bewerten:

- Die Verbindung ist ausreichend fest, um nach dem Sägen eine ausreichend hohe Ausbeute gedeckelter Chips zu erzielen (70-95%).
- Die in Zugversuchen ermittelte Bondfestigkeit ist jedoch deutlich geringer als die von anderen Bondverfahren. Abbildung 4.20 zeigt eine Verteilung der Bruchlastwerte von Zugversuchen an Beschleunigungssensoren. Sehr deutlich ist das Maximum der Ausfälle schon bei geringen Belastungen zu erkennen.

- Die Bondverbindung ist bei ordnungsgemäßer Ausbildung prinzipiell hermetisch dicht, wie Probepbondungen von Absolutdrucksensoren ergaben. Das hermetische Abdichten von oberflächenmikromechanischen Sensoren scheiterte jedoch an den oben genannten Besonderheiten der SOI-Wafer.

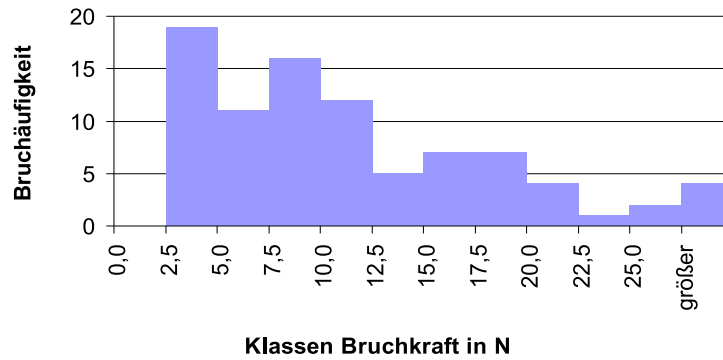


Abbildung 4.20: Verteilung Bruchlast Bondverbindung Beschleunigungssensor

Um die Auswirkung von Parameteränderungen zu untersuchen, wurden Bondversuche an unstrukturierten Wafern durchgeführt, da diese sich einfacher bewerten lassen. Dabei wurde die Bondtemperatur konstant gehalten, da aus Vorversuchen bekannt war, dass diese möglichst hoch sein soll und nur die Bondspannung variiert. Es zeigte sich dabei, dass die Bondspannung nicht zu niedrig, aber auch nicht zu hoch gewählt werden darf. Bei zu niedrigen Spannungen ist die Bondverbindung noch so schwach, dass sie, obwohl sie den Vereinzelungsprozess übersteht, unter mechanischer Belastung (Klingentest) getrennt werden kann. Bei zu hohen Bondspannungen erhöht sich die Gefahr von Durchschlägen der Isolationsschichten bereits in einem frühen Stadium des Bondvorganges, wodurch die Bondung bei noch schlechter Bondausbeute abgebrochen wird. Des Weiteren können sich bedingt durch das stärkere elektrische Feld mehr Natriumionen zwischen Deckwafer und thermischen Oxid festsetzen und diese Verbindung schwächen. Dies ist mit einem erhöhten Schichtübertrag und einer geringeren Bondfestigkeit verbunden. Abbildung 4.21 fasst die Ergebnisse zusammen, Details sind im Anhang C aufgeführt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich eine optimale Qualität der Bondverbindung mittels gesputterte Glasschichten nur mit für den konkreten Einzelfall (Design- und Technologievariante) optimierten Bondparametern (insbesondere Bondspannung), erzielen lässt.

**Bewertung der Bondtechnologie** Betrachtet man den Prozess des anodischen Bondens mit Glas besputterter Deckwafer hinsichtlich seiner technologischen Eignung für die Integration in den Fertigungsprozess von oberflächenmikromechanischen Sensoren, so muss man feststellen,

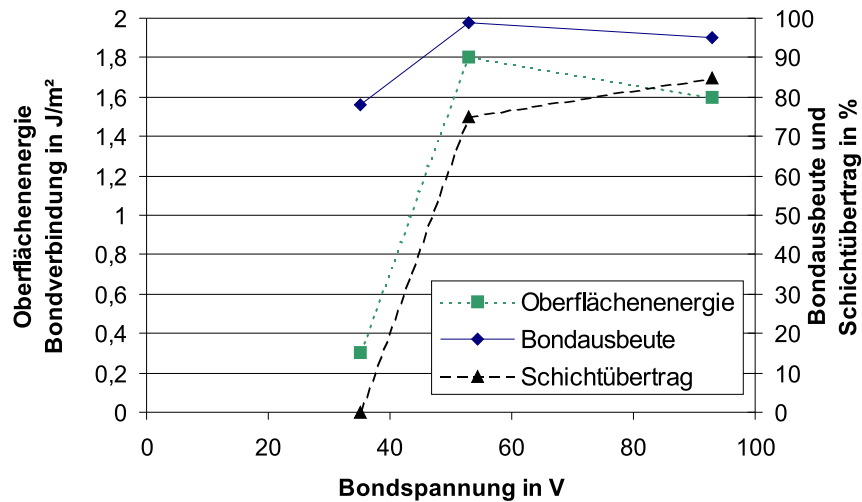


Abbildung 4.21: Ergebnisse Parametervariation beim anodischen Bonden mit gesputterten Glasschichten

dass dieser sich dafür nicht eignet, obwohl prinzipiell eine ausreichend feste Verbindung von Wafern möglich ist. Ausschlaggebend dafür sind folgende Hauptgründe:

1. Die sehr aufwändige Vorprozessierung der Deckwafer (thermische Oxidation und langwieriges Glassputtern) verursacht zu hohe Prozesskosten.
2. Der schwer kontrollierbarer Bondprozess mit zufälligen Einflüssen (partikelbedingte Durchschläge) und ohne eindeutige Bewertungskriterien ist nicht automatisierbar.
3. Das hermetisch dichte Bonden von Strukturen auf SOI-Wafern ist nur schwer möglich.
4. Vielfältige Design- und Technologieeinflüsse (z.B. Aluminium im Bondinterface), können den Bondprozess stören und sind nicht vollständig beherrschbar.
5. Die Bondoberflächenzustände (Aktivierung) sind kritisch.

Aus diesen Gründen wurden die Entwicklungsaktivitäten zu dieser Bondtechnologie an dieser Stelle eingestellt. Mit den aufgeführten Ergebnissen konnte jedoch zum besseren Verständnis des Bondens von gesputterten Glasschichten beigetragen werden, so dass es für spezielle Anwendungen<sup>35</sup>, vorteilhaft eingesetzt werden kann. Von den Aspekten des technologischen Anspruchs und der Prozesssicherheit aus gesehen, ist das Bonden gesputterter Glasschichten zwischen dem anodischen Bonden von Glaswafern und dem direkten Niedertemperaturbonden

<sup>35</sup>mit geringen Stückzahlz.B. im Bereich der Präzisionsmikrosensorik

von Halbleiterwafern einzuordnen. Zwar sind die Anforderungen an die Güte und Aktivierung der Bondoberfläche nicht so hoch wie beim direkten Niedertemperaturbonden, jedoch konnte auch nicht die erwartete hohe, vom anodischen Glaswaferbonden bekannte Prozesssicherheit erreicht werden.

#### 4.4.3.2 Bonden dickerer Glasschichten hergestellt durch Bonden und Rückdünnen von Glaswafern

Eine weitere Möglichkeit Siliziumwafer mittels anodischem Bondens einer Glaszwischen-schicht miteinander zu verbinden, besteht darin, dass man auf einem der beiden zu bondenden Wafer<sup>36</sup> einen massiven Glaswafer (dicker 300  $\mu\text{m}$ ) anodisch aufbondet und diesen dann auf die gewünschte Schichtdicke zurückdünn. Auch dieses Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich seiner Eignung zum Verkapseln oberflächenmikromechanischer Strukturen untersucht. Die Ergebnisse soll hier kurz vorgestellt werden.

**Herstellung der Schichten durch Bonden und Rückdünnen** Um das Bondverhalten gebondeter und rückgedünnter Glaswafer zu untersuchen, wurden zunächst Testwafer hergestellt, in dem auf unstrukturierte Siliziumscheiben Glaswafer aufgebondet wurden. Hauptanspruch dabei war es eine möglichst defektfreie Bondverbindung zu erreichen. Dies konnte durch eine Reinigung (Vermeidung von Partikeleinschlüssen) der Waferwafer unmittelbar vor dem Bonden im Vakuum (Vermeidung von Gaseinschlüssen) und dem Einsatz von Flächenelektroden (Vermeidung ungebondeter Gebiete) erreicht werden.

Als kritischer erwies sich das Rückdünnen der gebondeten Glaswafer. Dies erfolgte zunächst mittels Zeit kontrolliertem Badätzen in konzentrierter Flusssäure. Durch mehrstufiges Ätzen mit zwischengelagerten Glasdickenmessungen konnten Glasdicken zwischen 10 und 120  $\mu\text{m}$  mit einer Toleranz von 10 % realisiert werden. Die Oberflächen dieser Glasschichten waren sehr glatt, jedoch durch im Ätzbad maskierend wirkende Partikel und Gasbläschen lokal gestört.

Um ein schnelleres Rückdünnen des Glases bei einer gleichzeitig besseren Oberflächenqualität zu erreichen, wurde versucht, die Glaswafer zurückzuschleifen und die Oberfläche mittels eines Flusssäure-Spinätzprozesses zu polieren. Aufgrund des harten, spröde brechenden Charakters des Glases ist das Glasschleifen sehr schwierig, konnte aber mit geeigneten Schleifwerkzeugen beherrscht werden. Als nicht realisierbar hingegen erwies sich die Politur des Glases mittels Spinätzens. Während beim Ätzen geschliffener Siliziumwafer die Oberfläche geglättet wird, kommt es beim Spinätzen von geschliffenem Glas, vermutlich aufgrund des sehr isotropen Ätzverhaltens der Flusssäure, zu einer Erhöhung der Rauigkeit. Die überätzten Glasflächen waren

---

<sup>36</sup>meist der einfacher zu bearbeitende Deckwafer



somit nicht bondbar. Eine Politur der geschliffenen Glasoberflächen durch Kooperationspartner wurde in Erwägung gezogen, aus Kostengründen jedoch nicht weiter verfolgt. Abbildung 4.22 fasst die Versuche zum Rückdünnen der Glaswafer zusammen. Für die weiteren Versuche wurde auf Glasschichten, die im Ätzbad abgedünnt wurden zurück gegriffen.

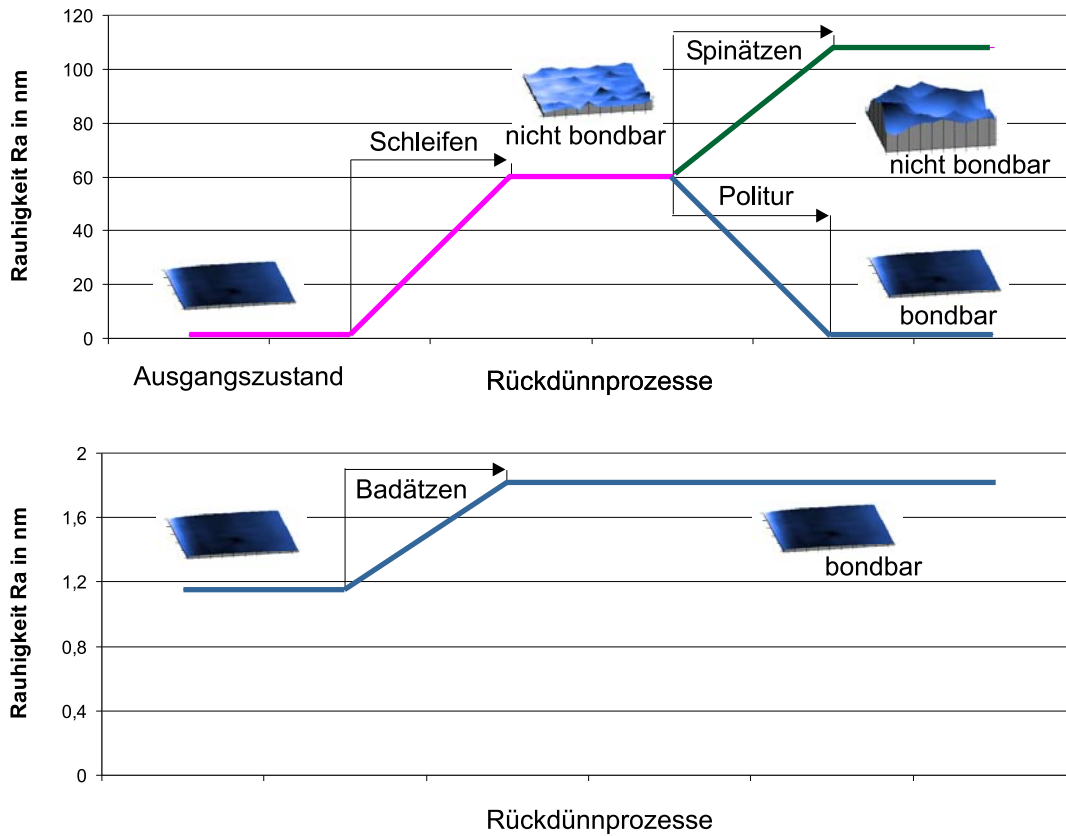


Abbildung 4.22: Entwicklung der Oberflächenrauigkeit bei unterschiedlichen Rückdünnverfahren

**Strukturierung der Glasschicht** Zur Strukturierung der Glasschichten wurde eine Aluminiumhartmaske aufgebracht. Das Ätzen erfolgte anschließend in konzentrierter Flußsäure. Bedingt durch den isotropen Ätzcharakter kommt es zur Maskenunterätzung in der Größenordnung der Schichtdicke. Somit lassen sich nur Bondrahmenstrukturen breiter  $100\ \mu\text{m}$  sicher realisieren. Für die Versuche wurde auf bestehende Masken mit breiteren Strukturen zurückgegriffen. Abbildung 4.23 zeigt eine Aluminiumätzmaske und das dazugehörige Ätzergebnis.

Mittels des beschriebenen nasschemischen Ätzens konnten sehr saubere Glasstrukturen auf Silizium hergestellt werden (Abbildung 4.24) die für Bondversuche geeignet waren. Bedingt durch die begrenzte Standzeit der Metallmaske im HF-Bad ist jedoch die strukturierbare Glasdicke auf kleiner  $100\ \mu\text{m}$  beschränkt. Bei längerem Ätzen kommt es zur Auflösung der Maske

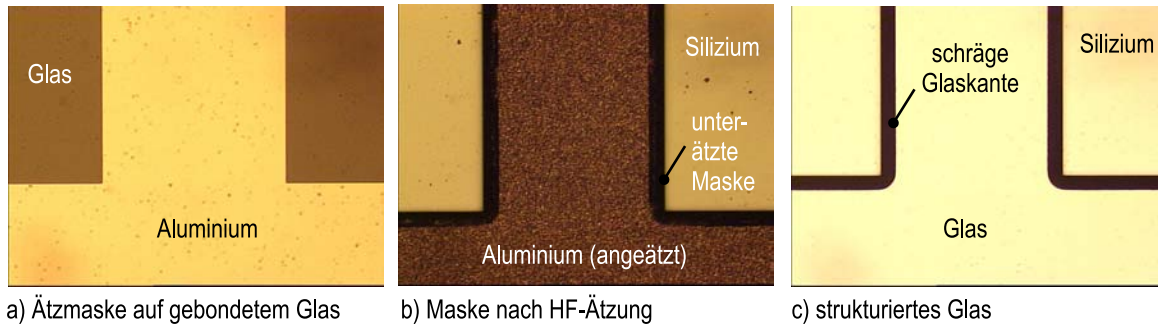


Abbildung 4.23: Strukturierung dicker Bondglasschichten

und zum Anätzen der unterliegenden Glasoberfläche, die damit ihre Bondbarkeit verliert. Weiterhin muss eine ausreichende Ätzzeit berücksichtigt werden, um in den geöffneten Strukturen das Glas komplett weg zu ätzen.

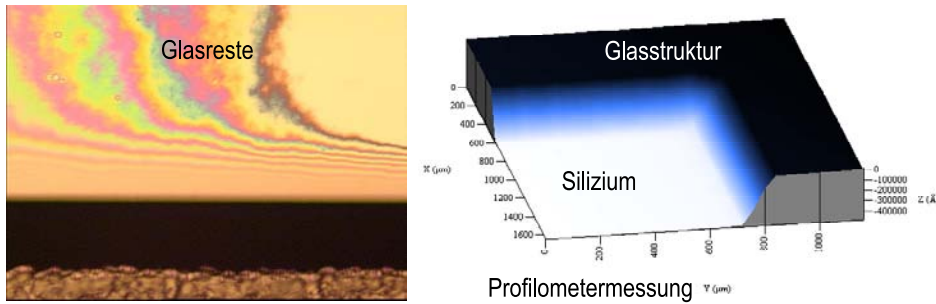


Abbildung 4.24: Ergebnisse Strukturierung dicker Bondglasschichten

**Anodisches Bonden der dicken Schichten** Ausschlaggebend für die Bondbarkeit der rückgedünnten Glasschicht ist neben einer geringen Oberflächenrauigkeit ihre Dicke. Da die Glasschicht ein zweites Mal anodisch gebondet wird, muss sie deutlich dicker sein als die Verarmungszone der ersten Bondung. Die Ausdehnung der Verarmungszone anodisch gebondeter Glaswafer wird in der Literatur [29] mit ca 500 nm angegeben. Wird die Glasschicht bis in die Nähe dieses Bereiches zurück gedünnt, so stehen nicht genügend Natriumionen mehr zur Verfügung, die für das anodische Bonden benötigt werden und es kann sich somit keine Bondverbindung ausbilden. Um diese Vermutung zu bestätigen, wurden unterschiedlich dicke Glasschichten gebondet, wobei eine Verbindungsbildung nur bei Schichten dicker 50  $\mu\text{m}$  beobachtet werden konnte (Abbildung 4.25).

Als negativ für den Bondprozess erwies sich die Tatsache, dass beim Rückätzen die Glaszwischen-schicht am Wafertrand deutlich zurückgesetzt wird. Dies hat zur Folge, dass sich beim Bonden die Potential führenden Waferoberflächen in geringem Abstand gegenüberstehen und es somit zu Überschlügen oder dauerhaften Plasmaentladungen kommt, die den Bondprozess

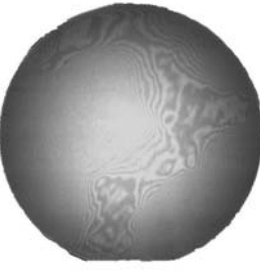
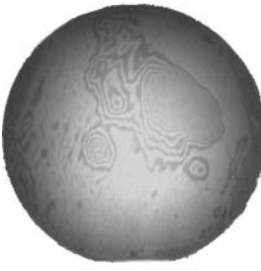
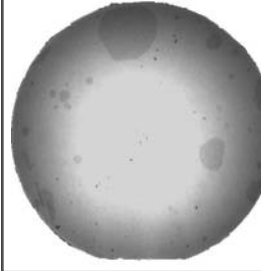
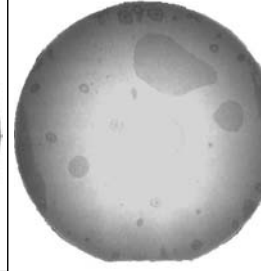
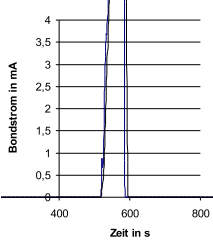
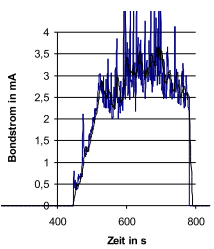
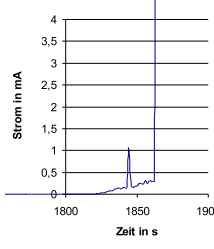
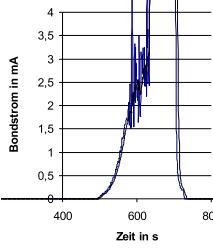
Dicke	25µm	40µm	55µm	110µm
Infrarotaufnahme				
Ausbeute	0%	70%	90%	85%
Festigkeit	nicht gebondet	mit Pinzette trennbar	30 MPa	28 MPa
Bondstromverlauf				

Abbildung 4.25: Ergebnisse von Bondversuchen an unterschiedlich dicken Glasschichten

stören bzw. die gezielte Auswertung des Bondstroms zur Endpunkterkennung unmöglich machen (Abbildung 4.26). Ursache für das Zurücksetzen der Glasschicht ist ein Unterätzen an ungebondeten Randbereichen, die durch ein Abflachen der Waferoberfläche am Rand bedingt sind.

Das Bonden strukturierter Glaszwischen-schichten erfolgte mit erhöhter Spannung (500 V), da die aktive Bondfläche entsprechend geringer war und sehr feste Verbindungen angestrebt wurden. Der Bondstromverlauf war meist während des Bondens durch starke Schwankungen gekennzeichnet (Abbildung 4.27). Diese lassen sich auf Unsauberkeiten an den Strukturkanten zurückführen. Wendet man eine gleitende Mittelwertbildung auf diese gestörten Stromwerte an, so kann man dennoch den für das anodische Bonden typischen Stromverlauf erkennen. Es konnten in den Versuchen sehr hohe Spitzenwerte des Bondstromes um 9 mA erreicht werden<sup>37</sup>, bevor es zum Abfall des Bondstromes aufgrund der Ausbildung der Verarmungszone kommt, ehe bedingt durch elektrische Durchbrüche am zurückgesetzten Rand der Bondglasschicht ein Stromanstieg bis zur Anlagenbegrenzung auftritt.

<sup>37</sup>deutet auf eine sehr gute Bondverbindung hin

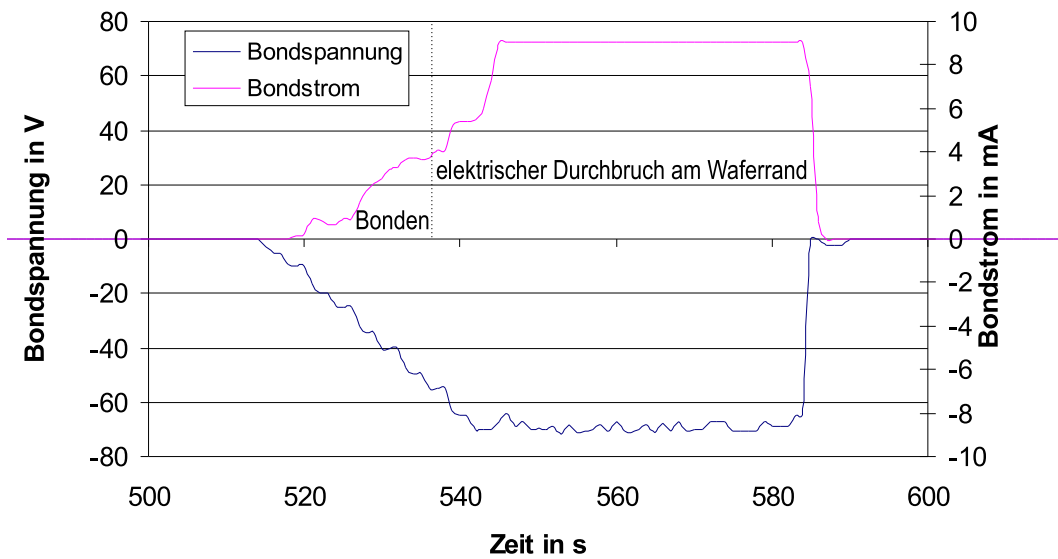


Abbildung 4.26: Typischer Bondstromverlauf dicke Bondglasschicht mit Durchbruch im Randbereich

Die Bewertung der gebondeten Wafer mit strukturierter Glaszwischenschicht mittels Infrarotinspektion zeigte, dass sehr hohe Bondausbeuten (70 bis 90 %) möglich sind und dass die Strukturen des Glases vollflächig und sicher bonden (Abbildung 4.28). Ungebondete Gebiete sind auf Anätzen während der Glasstrukturierung zurückzuführen, die jedoch prinzipiell vermeidbar sind. Besonders gut sind im Infrarotbild vereinzelte Ätzdefekte aufgrund von Kratzern in der Ätzmaske bzw. der Glasoberfläche zu erkennen, die sich beim Ätzen im Glas aufweiten. Da es sich dabei jedoch um Vertiefungen im Glas handelt, kommt es um diese Bereiche nicht zu größeren Bonddefekten. Die Bondung ist an den betroffenen Stellen jedoch nicht dicht. Insgesamt konnte jedoch gezeigt werden, dass gebondete Glaswafer nach dem Rückdünnen und einer Strukturierung als dicke Bondzwischenschicht verwendet werden können, wenn auch für eine Anwendung in einem Sensorprozess noch vielfältige Optimierungen notwendig sind.

**Bewertung der Bondverbindung** Die Verbindung von Siliziumwafern über beidseitig anodisch gebondete Zwischenglasschichten kann als sehr fest und bei ausreichend geringer Rauigkeit der rückgedünnten Glasoberfläche als hermetisch dicht angesehen werden. Aufgrund der signifikanten Dicke der Glaszwischenschicht ist jedoch das Sägen des Waferstapels sehr schwierig. Da Glas und Silizium mit unterschiedlichen Maschinenparametern gesägt werden müssen, erweist es sich als notwendig ein mehrstufiges Sägen durchzuführen bzw. bei der Strukturierung der Glaszwischenschicht die Sägestraßen entsprechend vom Glas zu räumen.

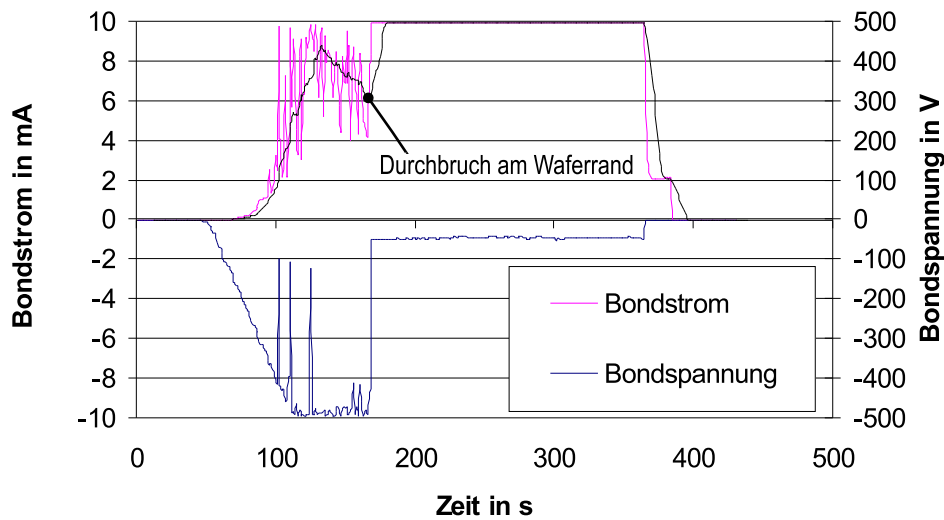


Abbildung 4.27: Stromverlauf beim anodischen Bonden strukturierter Glasschichten

**Bewertung der Bondtechnologie** Obwohl gebondete und zurückgedünnte Glaszwischen-schichten bereits in Produktionsprozessen [30] eingesetzt wurden und die Verbindung eine hohe Qualität aufweist, wurde nach den beschriebenen Versuchen die Untersuchungen zu diesem Bondverfahren eingestellt. Ursache dafür war der enorme technologische Aufwand und der große Materialeinsatz zum Aufbringen und Strukturieren der Glasschicht sowie die Notwendigkeit der Kooperation der Glaspolitur. Weiterhin bringt die Tatsache, dass die eigentliche Waferverbindung durch anodisches Bonden erfolgt, einige Nachteile mit sich (Bondspannung, planare Bondrahmenflächen, begrenzte Rauigkeit Bondfläche). Somit wurde in dieser Technologie nicht das angestrebte universell einsetzbare Bondverfahren gesehen und nicht weiter verfolgt. Der Vollständigkeit halber wurde dieses Verfahren und die sicherlich interessanten Ergebnisse jedoch in diese Arbeit aufgenommen.

Inzwischen werden von der Firma Planoptik [31] kommerziell Siliziumwafer mit aufgebondeten, rückgeschliffenen und polierten Glasschichten angeboten. Da diese eine sehr hochwertige Glasoberfläche und einen optimierten Waferrand aufweisen, ermöglichen sie diesem Bondverfahren neue Möglichkeiten. Aufgrund des aufwandsbedingt hohen zu erwartenden Preises werden sie jedoch eher Sonderanwendungen vorbehalten bleiben.

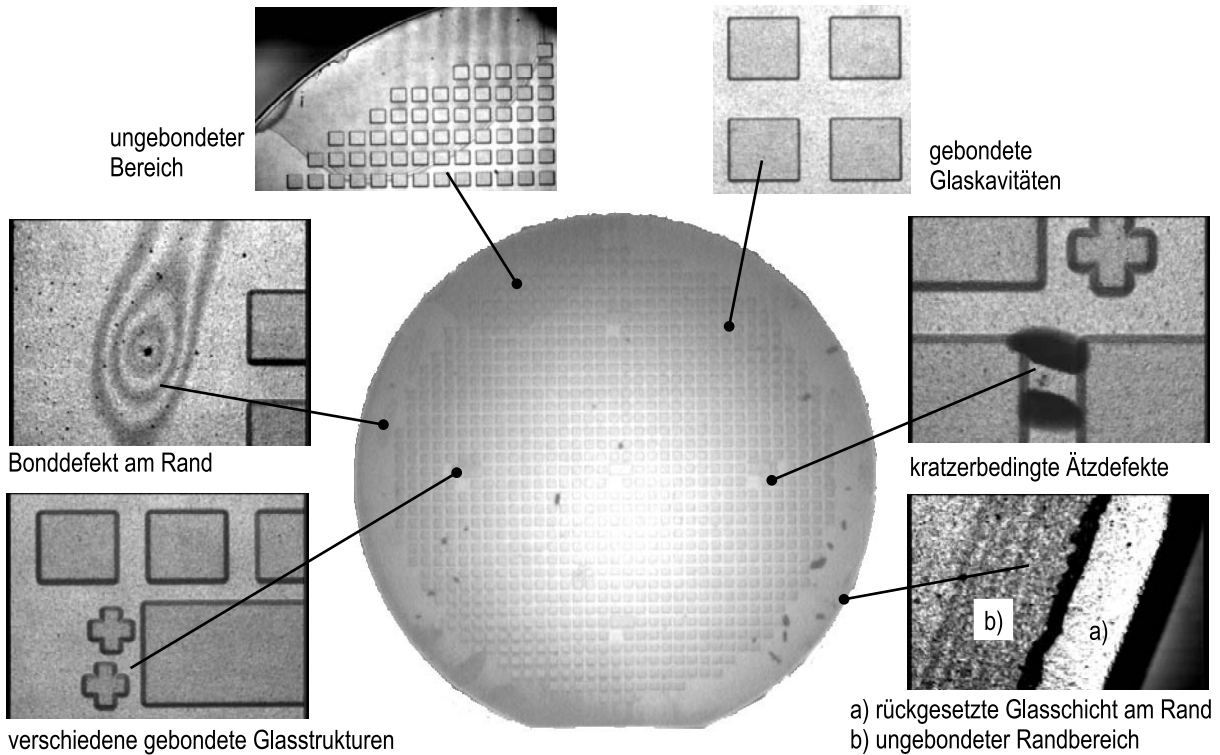


Abbildung 4.28: Bondergebnisse strukturierte Glaszwischen-schicht

## 4.5 Glaslotbonden

### 4.5.1 Bondprinzip

Beim Glaslotbonden handelt es sich um einen thermokompressiven Prozess zum Verbinden von Halbleiterwafern unter Verwendung niedrigschmelzender Glaszwischen-schichten. Das Prinzip des Thermokompressionsbondens besteht, wie der Name schon andeutet, darin, dass die zu verbindenden Wafer kurzzeitig erwärmt und gleichzeitig einem mechanischen Druck ausgesetzt werden, um eine dauerhafte Verbindung zu erzeugen. Im Gegensatz zu den direkten Waferbondverfahren ist nach dem eigentlichen Bonden keine langwierige Temperaturbehandlung zur Verfestigung der Bondverbindung notwendig. Für die Ausbildung einer thermokompressiven Waferbondverbindung ist stets eine Zwischenschicht notwendig, die vor dem Bondprozess auf mindestens einen der beiden zu bondenden Wafer aufgetragen werden muss. Je nach Art dieser Zwischenschicht bilden sich unterschiedliche Bindungsarten zwischen den Wafern und der Zwischenschicht aus. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über thermokompressive Bondverfahren und ihre wichtigsten Prozessparameter.

Während das adhäsive Waferbonden, bedingt durch Zweifel an der Langzeitstabilität, sehr selten eingesetzt wird, kommt dem eutektischen Bonden, auch in industriellen Produktionspro-

Bondart	eutektisches Bonden	adhäsives Bonden	Glaslotbonden
Zwischenschicht	Metall z.B. Gold	organische Adhäsive	Gläser
Bindungsart	intermetallische Phase	Adhäsionskräfte	Oxidbindungen
Bondtemperatur	363°C	100..200°C	400..450°C
Bonddruck	ca. 500 mbar	100...500 mbar	ca. 1000 mbar

Tabelle 4.1: Übersicht Thermokompressionsbonden

zessen, eine größere Bedeutung zu. Es wurde z.B. zur Herstellung von Beschleunigungssensoren in Volumenmikromechanik eingesetzt [30]. Die Nachteile des eutektischen Bondens liegen darin, dass zum einen die Verbindungsbildung durch eine eutektische Legierung erfolgt, d.h. beim Bondprozess muss die eutektische Temperatur des Legierungssystems Verbindungsmetall-Silizium sehr genau getroffen werden. Dies bedeutet sehr hohe Anforderungen an die Prozessführung bezüglich absoluter Temperaturgenauigkeit und Temperaturhomogenität, die besonders bei größeren Substraten (größer 4 Zoll) nur sehr aufwändig zu erreichen sind. Andererseits ergeben sich aus dem Legierungssystem weitere Schwierigkeiten. Gold ist als Legierungsbildner sehr gut geeignet, besitzt aber den Nachteil einer sehr hohen Ionenmobilität, so dass es in CMOS-basierten Mikromechanikprozessen nicht eingesetzt werden kann. Auf Aluminium basierende CMOS-kompatible Metalllegierungen besitzen den Nachteil, dass sie als Legierungen auf die Wafer aufgebracht werden müssen, wobei die Gefahr besteht, dass sich das Verhältnis der Legierungsanteile verschiebt. Damit ist eine Veränderung der eutektischen Temperatur verbunden, was die Prozessführung zusätzlich erschwert.

Als Alternative zu den eben erwähnten Zwischenschichten bietet sich der Einsatz niedrigschmelzender Gläser als Verbindungsschicht in Siliziumwaferverbindungen an. Glaslotprozesse sind als Verbindungstechnologie in der Fertigung elektronischer Bauelemente seit langem üblich, allerdings werden sie typischer Weise nicht auf Waferebene sondern in der Gehäuse-technik eingesetzt (z.B. Verschließen von Keramikgehäusen oder Glasdurchführungen von Anschlussdrähten). Als vorteilhaft erweist sich dabei die Tatsache, dass sich die thermischen Eigenschaften der Gläser, wie Verarbeitungstemperatur und thermische Ausdehnung, durch die Zusammensetzung der Glasschmelze einstellen lassen. Des Weiteren bieten Glaslote die prinzipielle Möglichkeit der hermetischen Abdichtung der Verbindungsstellen.

Das Glaslotbonden wird häufig auch als Glass-Frit-<sup>38</sup> oder als Seal-Glass<sup>39</sup>-Bonden bezeichnet. Da diese aus dem englischen Sprachgebrauch stammenden Begriffe nicht ganz exakt bzw. irreführend sind, wird der Prozess des Verbindens von Halbleitersubstraten mittels aufgeschmolzener Glaszwischenschichten in dieser Arbeit als Glaslotbonden bezeichnet.

<sup>38</sup>herrührend von dem Temperaturprozess des Bondens

<sup>39</sup>bezugnehmend auf die dichtende Wirkung des aufgeschmolzenen Glases beim Bonden

### 4.5.2 Technologischer Gesamtprozess

Die Grundidee des Glaslotbondens besteht darin, dass ein niedrigschmelzendes Glaslot als eine aus Glaspulver, organischen Bindern und Lösungsmitteln bestehende Paste mittels Siebdruck auf einen der beiden zu bondenden Wafer aufgebracht und gleichzeitig entsprechend der gewünschten Bondrahmengemetrie strukturiert wird. Der Siebdruck erfolgt dabei auf den weniger empfindlichen Wafer<sup>40</sup>. Anschließend werden die gedruckten Strukturen durch einen mehrstufigen Temperaturprozess in kompaktes Glas umgewandelt. Dazu müssen zunächst die organischen Lösungsmittel und der Binder ausgetrieben werden, bevor die Partikel des Glaspulvers miteinander verschmolzen werden können. Anschließend werden die zu verbindenden Wafer zueinander ausgerichtet und unter mechanischem Druck bei erhöhter Temperatur durch Aufschmelzen des Glaslotes miteinander verbondet. Abbildung 4.29 verdeutlicht den Gesamtprozess des Glaslotbondens im Überblick. Theoretische Grundlagen zum Fügen von Silizium mittels Glaslot können [33] entnommen werden.

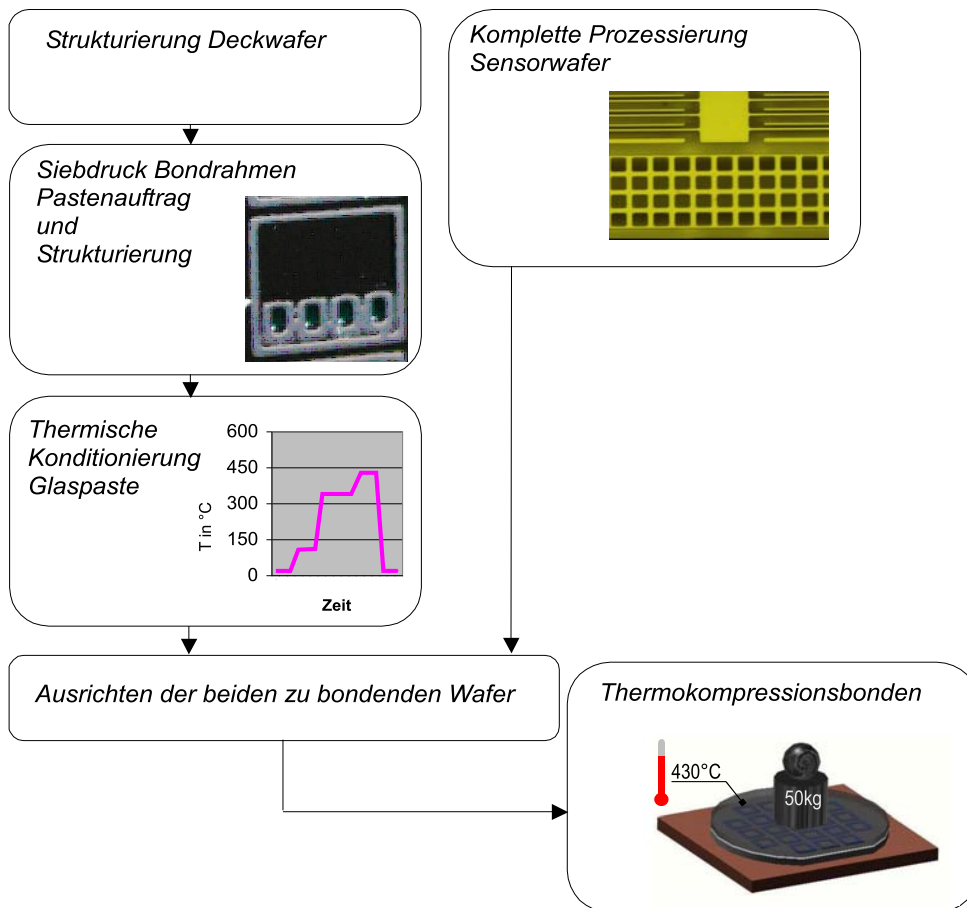


Abbildung 4.29: Ablauf Glaslotbondprozess

<sup>40</sup>meist der Deckwafer, da dieser in der Regel keine aktiven Strukturen aufweist



### 4.5.3 Glaspasten

Für das Glaslotbonden stehen zum einen kommerziell verfügbare Fertigpasten (z.B. von der Firma FERRO) bzw. Pastensysteme zum Ansetzen (z.B. von der Firma SCHOTT) zur Verfügung. Die kommerziellen Produkte bieten den Vorteil, dass ihre Einzelkomponenten auf einander und auf die technologischen Teilprozesse des Aufbringens und des Bondens optimiert sind. Des Weiteren sind Dokumentationen zu diesen Materialien verfügbar. Zum anderen ist es denkbar, geeignete Pasten für das Bonden entsprechend der jeweiligen Prozessanforderungen selbst zu entwickeln. Dazu müssen zum Bonden geeignete Gläser ausgewählt, entsprechend zerkleinert und mit Bindern zu einer Paste versetzt werden. Dieser Weg wurde aufgrund des sehr hohen Aufwandes in dieser Arbeit nicht verfolgt. Hauptziel bei den Untersuchungen zum Glaslotbonden war vielmehr die Entwicklung eines technologischen Prozesses, der unter industriellen Bedingungen eingesetzt werden kann. Daher sollte auf kommerziell verfügbare Glaspasten zurückgegriffen werden. Bei der Auswahl der Pasten standen folgende drei Kriterien im Mittelpunkt:

1. Die Verarbeitungstemperatur beim Bonden muss kleiner als 450°C sein, damit beim Bonden das Aluminiummetallisierungssystem nicht geschädigt wird.
2. Die Paste sollte mittels eines Siebdruckprozesses in einer Dicke von 10..50  $\mu\text{m}$  auf die Wafer aufgebracht werden können, um eine aufwändige nachträgliche Strukturierung zu vermeiden.
3. Das Glas, welches die Verbindungszwischenschicht bildet, muss in seiner thermischen Dehnung an Silizium angepasst sein.

Es wurden Glaspasten von unterschiedlichen Herstellern gefunden, die diese Kriterien erfüllen. Diese Materialien werden im folgenden vorgestellt, ihre Daten sind im Anhang D aufgeführt.

#### 4.5.3.1 Glaspasten der Firma FERRO

**Glaspaste FX11-036** Laut Herstellerspezifikation handelt es sich bei diesem Material um ein nicht kristallisierendes Glas für Dickfilmanwendungen auf Substraten mit geringer thermischer Dehnung (Silizium, Aluminium usw.). Die Paste ist für Siebdruckprozesse geeignet. Die Verarbeitungstemperaturen liegen im Niedertemperaturbondbereich, d.h. unter 450°C. Die Glaspaste besteht aus folgenden drei Grundbestandteilen:

1. gemahlene Blei-Zink-Silikatglaspulver, welches in Temperschritten zu einer Glasschicht verschmolzen wird und als aktive Glaslotkomponente dient

2. gemahlener Füller (Bariumsilikatglaskeramik), der zur Einstellung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten in das Glas eingeschmolzen wird
3. organische Binder, als pastenbildendes Trägermaterial, welches den Glas- und Füllerstaub zu einer viskosen Paste bindet und nach dem Siebdruckprozess auf dem Substrat zu fixieren, bis das Glas zu einer kompakten Schicht verschmolzen ist
4. Lösungsmittel, zum Einstellen der Viskosität der Binder und somit der Paste

Der Zinkanteil in der aktiven Bleisilikatglaskomponente wirkt beim Anschmelzen des Glaslots an Festkörper (Waferoberfläche) wie ein Flussmittel. Es setzt die Oberflächenspannung des geschmolzenen Glaslots herab und ermöglicht somit eine sehr gute Benetzung der Bondfläche, einschließlich eventuell vorhandener Strukturkanten [32].

Für die Behandlung der Paste wird vom Hersteller das in Tabelle 4.2 aufgeführte Temperaturregime vorgeschlagen [35]. Es dient dazu, die Mischpaste aus Glas und organischen Komponenten in eine massive Glasschicht zu überführen.

Arbeitsgang	Temperatur	Zeit
Ablüften	Raumtemperatur	5-7 min
Trocknen	100-120°C	7-5 min
Austreiben Binder (glazing)	325-350°C	10-20 min
Vorverschmelzen (sealing)	425-459°C	5-10 min

Tabelle 4.2: Spezifikation für die Behandlung der Paste nach dem Drucken

Aus dem Sicherheitsdatenblatt des Herstellers [67] geht die in Tabelle 4.3 aufgeführte genaue Zusammensetzung der Glaspaste hervor (Tabelle 4.3).

Komplex	Bestandteile	Eigenschaften	Masse
Glas	Blei-Zink-Borosilikatglas	sehr niedrige Erweichungstemperatur	70-80%
Füller	Barium-Borosilikatglas	höhere Erweichungstemperatur	bis 15%
Binder	Trimethylpentanediol-Monoisobutyrat	stützender und stabilisierender Filmbildner	10-25%
	Isobutyl-Methakralat	Polymerisator	bis 5%
Verdüner	Terpineol	Lösungsmittel	bis 5%
	Toluen	Lösungsmittel	in Spuren
	Benzen	Lösungsmittel	in Spuren

Tabelle 4.3: Stoffliche Zusammensetzung Glaspaste FERRO FX-11-036

Die Glas- und Fülleranteile sind zu Pulver zermahlen, dessen Körner kleiner als 15  $\mu\text{m}$  sind. Eine derart feine Zerkleinerung ist notwendig, um die spezifizierten Glasschichtdicken (22-28

$\mu\text{m}$  nach Siebrück, 11-14  $\mu\text{m}$  nach dem Verschmelzen) zu erreichen. Des Weiteren müssen die festen Partikel möglichst klein sein, damit sie von dem Binder umschlossen werden können. Als Binder wird Trimethylpentanediol-Monoisobutyrat eingesetzt. Recherchen ergaben, dass dieser Stoff als Filmbildner wirkt und in Pasten eine stützende und stabilisierende Wirkung besitzt. Zieht man dazu seinen relativ geringen Massenanteil an der Paste (ca. 15 % - der Volumenanteil wird bedingt durch die deutlich größere Dichte des Glases höher liegen) in Betracht, so kann man davon ausgehen, dass sich ein dünner Binderfilm um die einzelnen Glaspartikel legt und diese miteinander flexibel verbindet. Die flexiblen Verbindungen der festen Partikel in einer viskosen Paste sind die Voraussetzung für das Aufbringen der Paste bei Raumtemperatur mittels Siebdruck als umformendes Verfahren. Die Viskosität lässt sich vor dem Auftragen der Paste durch Zugabe von Lösungsmitteln, z.B. handelsübliche Farbverdünner, so weit verringern, dass ein optimaler Siebdruck und sogar Spin-On-Prozesse möglich werden. Da die Ausgangsviskosität der Paste sehr hoch ist (300-600 poise lt. [35] ), sollte eine Erhöhung nicht erforderlich sein. Die Viskosität verdünnter Paste lässt sich durch die Zugabe unverdünnter Paste wieder erhöhen. Beim Siebdruck wird die Glaspaste selektiv in den geöffneten Bereichen des Siebes auf die Waferoberfläche aufgebracht. An der Grenzfläche Silizium-Glaspaste sorgt die filmbildende Wirkung des Binders für die Haftung der Paste. Der Binder muss ein sehr gutes adhäsives Verhalten aufweisen, um ein sicheres Anhaften der Paste an der polierten Waferoberfläche zu ermöglichen.

Umfangreiche Untersuchungen, die in den folgenden Punkten beschrieben sind, haben gezeigt, dass sich das Material FX-11-036 sehr gut zum Glaslotbonden eignet. Daher wurde es als Vorzugsmaterial für den späteren Einsatz ausgewählt und dient als Basis für die Detailuntersuchungen dieser Arbeit.

**Leitfähige Glaspaste CN33-246** Bei diesem Material handelt es sich um ein leitfähiges Glaslot. Es basiert auf der Paste Ferro FX-11-036, dem ein hoher Silberanteil zugesetzt wurde. Dieses Silber bildet im Glasgefüge elektrisch leitende Pfade, so dass man mit diesem Material elektrisch leitende Verbindungen zwischen gebondeten Wafern herstellen kann. CN33-246 weist ähnliche Verarbeitungseigenschaften wie FX-11-036 auf. Details sind ebenfalls im Anhang D enthalten. Dieses Material wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, um Sensordächer, die mit der Paste FX11-036 mechanisch mit den Sensorchips gefügt sind, gleichzeitig elektrisch zu kontaktieren<sup>41</sup>.

---

<sup>41</sup>z.B. Massekontakt, damit der Deckel gleichzeitig als Abschirmung dient

### 4.5.3.2 Glaspaste der Firma Schott

**Glaspaste G018-173** Bei diesem Material wird ein Bleiboratglas als aktive Lotglaskomponente eingesetzt. Da seine Dehnung mit  $3,5 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$  sehr nah an Silizium liegt, ist kein Zusatz von Füllmaterial zur Veränderung der thermischen Dehnung notwendig. Über das organische Bindersystem liegen keine Herstellerangaben vor. Die Korngröße des Glases ist mit kleiner  $40 \mu\text{m}$  angegeben. Zur Umwandlung der Glaspaste in ein massives Glas vor dem Bonden durch Austreiben des Binders und Vorverschmelzen wird vom Hersteller ein ähnliches Temperaturprofil, wie bei dem Ferro-Material angegeben.

Bei der Verarbeitung der Schott-Paste kam es zu folgenden Problemen, die erfolgreiches Waferbondungen auch bei hohen Temperaturen und Drücken nicht ermöglichten wie Abbildung 4.30 belegt:

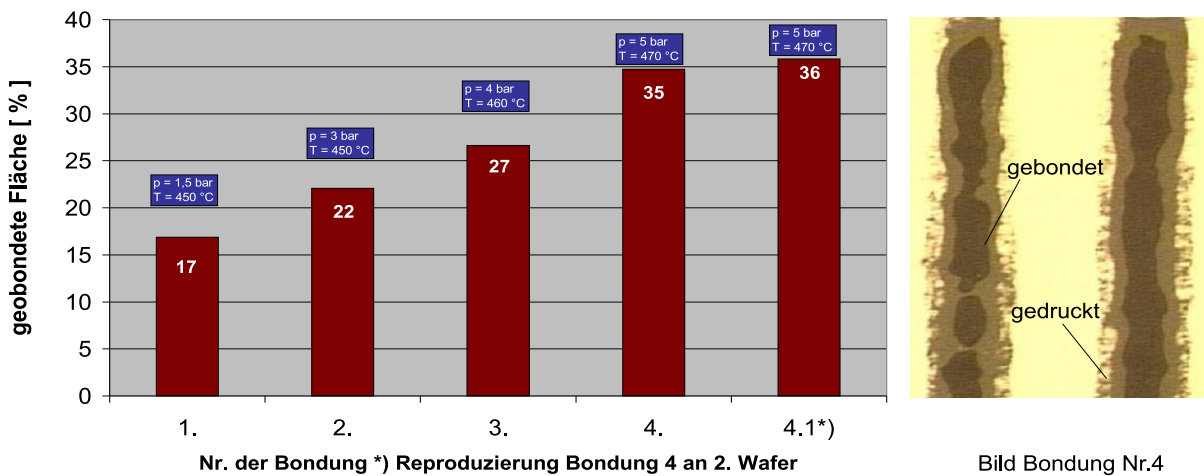


Abbildung 4.30: Ergebnisse Bondversuche mit Glaspaste Schott

- Es kommt bei der Lagerung zur Entmischung von Glasanteil und Binder, die durch erneutes Durchmischen unmittelbar vor dem Siebdruck aufgehoben werden muss. Da dabei der Grad der Durchmischung undefiniert ist, kam es unreproduzierbaren Siebdruckergebnissen.
- Die Siebdruckstrukturen sehen in der Draufsicht sehr sauber aus, weisen aber im Profil starke Schwankungen auf, die ein Abdichten beim Bonden erschweren.
- Beim Vorverschmelzen kam es immer zur Kristallisation des Glases, die dazu führte, dass das Glas beim Bonden an der Oberfläche nicht aufschmelzen und somit nicht die Oberfläche des Gegenwafer benetzen kann. Somit konnten keine guten Bondergebnisse erreicht werden.

- Auf einen Hinweis des Herstellers wurden Bondversuche nach dem Austreiben des Binders ohne Vorverschmelzen des Glases durchgeführt. Auch bei diesen Bondungen konnten keine guten Ergebnisse erzielt werden, da es vermutlich beim Erwärmen im Bonder erneut zu Kristallisationen kam.

Um die oben erwähnten Kristallisationen als Ursache für das schlechte Bonverhalten der Schottpaste nachzuweisen, wurden REM-Untersuchungen durchgeführt, die das veränderte Glasgefüge deutlich zeigen 4.4. Bei dieser Gelegenheit wurde die Glaszusammensetzung mittels EDX untersucht. Es zeigte sich wie oben erwähnt, dass das Glas im wesentlichen aus Bleioxid besteht und kein Siliziumoxid enthält.

Aufgrund des unerwartet schlechten Bondverhaltens des Schott-Materials wurden keine weiteren Versuche mit diesem Material durchgeführt. Sollte dieses Material, z.B. wegen seiner gut an Silizium angepassten thermischen Dehnung, gefragt sein, so bestehen noch technologische Optimierungsmöglichkeiten, wie etwa durch Auftragen des Glases auf beide Bondflächen, dickere Glasschichten oder optimierte Temperaturprozesse.

#### 4.5.3.3 Umweltschutzbestimmung

Um die geforderte niedrige Verarbeitungstemperatur kleiner  $450^{\circ}\text{C}$  zu ermöglichen, enthalten alle untersuchten Glaslote Blei. Die Verwendung dieses umweltschädlichen Schwermetalls soll in den nächsten Jahren aus der Fertigung elektronischer Komponenten nahezu verbannt werden (Bleifrei-Initiative). Gesetzlich geregelt ist diese Vorgehensweise in zwei Verordnungen, die jedoch auch Ausnahmen für die Fälle vorsehen, in denen auf Blei aus technischen Gründen nicht verzichtet werden kann:

1. Mit einer Verordnung der Europäischen Union [36] wird u.a. die Verwendung von Blei in Elektro- und Elektronikgeräten zum 1. Juli 2006 verboten. Im Anhang wird jedoch Blei in Gläsern elektronischer Bauelemente ausdrücklich ausgenommen.
2. In einer Automobilverordnung [37] wird die Gesamtmenge von Blei in Kraftfahrzeugen auf 6 g limitiert. Die Bleimenge je glaslotgebondeten mikromechanischem Sensor ist jedoch kleiner  $1\text{ mg}^{42}$  und fällt somit auch bei vielfachem Einsatz derartiger Sensoren in einem Fahrzeug nicht ins Gewicht.

Somit verstößt die Verwendung von Glasloten zum Verkapselungsbonden mikroelektromechanischer Systeme nicht gegen Umweltverordnungen. Da es aus glastechnischer Sicht keine

---

<sup>42</sup>Berechnungsbasis: Drehratesensor mit 5 mm Kantenlängen, Bondrahmenbreite  $200\ \mu\text{m}$ , Glaslotdicke  $10\ \mu\text{m}$

umweltverträglicheren Alternativen zum Blei als verarbeitungstemperatursenkenden Glasbestandteil gibt [38], ist zudem mit dem Verbot von Bleiglasloten in nächster Zeit nicht zu rechnen. Um unnötige Umweltbelastungen zu vermeiden, muss jedoch bei der Verwendung und Verarbeitung der Glaslote sorgfältig und sparsam umgegangen werden. Abfälle und Reste sind ordnungsgemäß zu entsorgen.

#### 4.5.4 Strukturiertes Auftragen der Glaspaste mittels Siebdruck

Der Siebdruck ist ein etabliertes Verfahren zum strukturierten Aufbringen pastenartiger Materialien auf Festkörper. Nach dem Druck werden die Pasten durch Wärmebehandlung verfestigt und somit stabil. Neben dem graphischen Siebdruck zu Dekorations- und Beschriftungszwecken hat sich mit dem technischen Siebdruck zum Aufbringen von Funktionsstrukturen ein eigenständiger Zweig entwickelt. Getrieben von Entwicklungen in der Leiterplatten- und Hybridtechnik (z.B. Ball-Grid-Array für Flip-Chip-Bonden) ist inzwischen ein Stand erreicht, der es erlaubt sehr feine Strukturen (ca. 200  $\mu\text{m}$ ) mit geringen Abständen (kleiner 100  $\mu\text{m}$ ) bei sehr hoher Positioniergenauigkeit zu drucken. Dies macht den Siebdruck zum Aufbringen relativ dicker Schichten auf Wafer, wie sie für das Glaslotbonden benötigt werden, anwendbar. Das Prinzip des Siebdrucks, welches das gleichzeitige Auftragen und die Strukturieren einer Schicht (in Situ-Strukturierung) ermöglicht, bringt folgende Vorteile:

- Es wird nur ein Arbeitsschritt zum Auftragen und Strukturieren der Schicht benötigt. Dadurch ist dieser Prozess schneller und ökonomischer als die fotolithographische Schichtstrukturierung.
- Es wird nur eine spezifische Anlage, der Siebdrucker, benötigt. Damit minimiert sich die Gefahr der Verschleppung von Kontaminationen.
- Es lassen sich dickere als in der Halbleiterplanartechnik übliche Schichten aufbringen. Die Dicke kann durch Wahl des Siebmaterials relativ variabel gestaltet werden.
- Es lassen sich eine Vielzahl von Materialien (Gläser, Metalle, Keramiken, Piezomaterialien, Kunststoffe) drucken. Voraussetzung ist, dass diese in Pastenform erhältlich sind und dass eine Rückwandlung der Materialien aus der Paste gesichert ist. Somit ist der flexible Einsatz unterschiedlicher Materialien mit einer Auftragstechnologie möglich.

Als nachteilig ist die im Vergleich zu fotolithographischen Strukturierungen begrenzte Präzision des Verfahrens anzusehen. Des Weiteren lassen sich bedingt durch die Dicke des Siebe keine beliebig dünnen Schichten drucken.

Zum Aufbringen von Glaslotbondrahmen mit Dicken von mehr als  $10\ \mu\text{m}$  und Breiten größer  $100\ \mu\text{m}$  ist der Siebdruck sehr gut geeignet. Aus diesem Grund soll im Folgenden auf Details dieses Prozesses eingegangen werden. Die vorgestellten Arbeiten zum Siebdruck erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mikrotechnologien der technischen Universität Chemnitz ([41, 42]).

#### 4.5.4.1 Prinzip des Siebdruckes

Der Siebdruck beruht, wie der Name schon sagt, auf der Verwendung eines Siebes als Träger einer strukturierten Schablone, durch deren geöffnete Bereiche Pastenmaterial auf den zu bedruckenden Festkörper hindurch gedrückt wird. Die Druckstruktur wird somit im Wesentlichen von der Schablone und nicht von dem Sieb bestimmt, wenn gewährleistet ist, dass der Drahtdurchmesser klein gegenüber der zu druckenden Struktur ist. Das Sieb hat vielmehr folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Wirkung als Trägerraster für die Schablone, welches die einzelnen oft nicht direkt miteinander verbundenen Schablonelemente hält. Somit werden beliebige Druckgeometrien (z.B. geschlossene Bondrahmen) möglich.
- Die Spannung der Schablone in einer Ebene zur Gewährleistung eines exakten Druckbildes.
- Das flexible Anlegen der Schablone an die zu bedruckende Oberfläche, um nicht zu bedruckende, in der Schablone nicht geöffnete Bereiche abzudichten, damit das Verlaufen der Druckstrukturen vermieden wird.

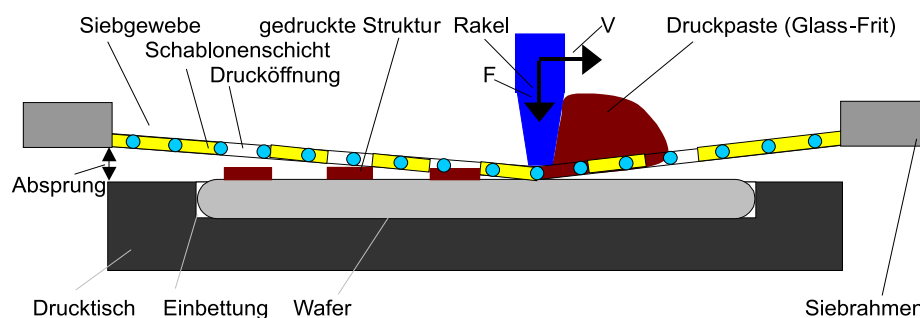


Abbildung 4.31: Prinzip des Siebdrucks

Abbildung 4.31 veranschaulicht den Vorgang des Siebdrucks. Der zu bedruckende Körper, in diesem Fall ein Wafer, wird zu dem in die Druckmaschine eingespannten Sieb positioniert.

Die Siebdruckpaste wird außerhalb des Druckbereiches auf das Sieb aufgebracht. Mittels eines Gummirakels wird die Paste über das Sieb gezogen und der Wafer bedruckt. Da beim Druckvorgang ein geringer Abstand zwischen Wafer und Sieb besteht (Absprung), sind Sieb und Druckoberfläche nur im unmittelbaren Rakelbereich in Kontakt. Dadurch kann sich das Sieb unmittelbar nach dem eigentlichen Druck von der Oberfläche lösen (abspringen) und die gedruckte Struktur freigeben. Hat der Rakel den Druckbereich überschritten, besteht kein Kontakt zwischen Sieb und Druckoberfläche mehr und der bedruckte Körper kann entnommen werden.

#### 4.5.4.2 Siebaufbau und -herstellung

Der Aufbau und die Herstellung der Drucksiebe lassen sich am besten als Einheit beschreiben. Abbildung 4.32 veranschaulicht die folgenden Ausführungen. Grundmaterial ist das Siebgewebe als Träger. Seine Auswahl richtet sich nach dem zu druckenden Material und der gewünschten Druckschichtdicke.

- Da die Partikel der Paste durch die Maschen des Siebes passen müssen, bestimmt ihre Größe die benötigte Maschenweite  $w$ , d.h. den Abstand zwischen den Siebdrähten. Die Maschenweite sollte mindestens das 2- bis 3-fache der Partikelgröße betragen. Diese bestimmt wiederum die minimale Breite der Druckstrukturen, da theoretisch mindestens zwei komplett geöffnete Maschen in der Strukturbereite liegen sollten. Siebmaterialien können mit der Gewebefeinheit (Maschen pro  $\text{cm}^2$  oder Quadratzoll) beschrieben werden.
- Die gewünschte Auftragstärke bestimmt die Gewebedicke  $D$  und den Drahtdurchmesser  $d$ , wobei bedingt durch das Verweben der Drähte die Gewebedicke bei ungewalzten Sieben dem doppelten Drahtdurchmesser entspricht. Da der Drahtdurchmesser nicht beliebig fein sein kann liegt die minimale Druckdicke im Bereich von  $30 \mu\text{m}$ . Da bei sehr dicken Druckstrukturen die benötigten Drahtdurchmesser zu grobe Siebe ergeben würden, kann die Schablonenstruktur durch Aufbringen von Folien auf das Gewebe aufgedickt werden.

Für den Druck der feinen Bondrahmenstrukturen, die beim Glaslotbonden eingesetzt werden sollen, kann nur Polyestergewebe eingesetzt werden, da Edelmetallgewebe zu dicke Drahtdurchmesser aufweisen.

Um das Siebgewebe handhaben zu können, muss es auf einem Siebdruckrahmen aufgespannt werden. Dabei wird der Grad der Spannung eingestellt, der verantwortlich für das Absprungsverhalten und die Lebensdauer des Siebes ist. Das Sieb wird unter einem Winkel auf den Rahmen aufgespannt, damit zum Erzielen besserer Druckergebnisse weder der Rakelweg noch die zu druckenden Strukturen parallel zum Siebgewebe verlaufen. Die Rahmengröße richtet sich nach



der Größe des zu bedruckenden Bereiches. Die Rahmenkantenlänge sollten etwa drei Mal so groß wie die Länge des Druckbereiches sein. Je größer der Rahmen im Vergleich zum Druckbereich ist, um desto geringer sind die Auswirkungen der Siebdehnung aufgrund des Absprungs hinsichtlich Druckgenauigkeit und Sieblebensdauer. Der Siebrahmen wird mechanisch belastet und muss entsprechend stabil sein. Seine Profilform richtet sich nach der Siebdruckanlage.

Nach dem Aufspannen wird das Sieb mit einem fotoempfindlichen Polymer beschichtet, welches die Maschen ausfüllt und die Drähte umschließt. Wird dabei nicht gleichzeitig eine fotoempfindliche Folie auflaminiert, kommt es zu keiner wesentlichen Erhöhung der Gewebedicke. Nach dem Trocknen der Beschichtung wird diese mit einer Positivmaske<sup>43</sup> der gewünschten Druckstruktur belichtet. In den Bereichen, die in der Schablonenschicht geschlossen bleiben sollen erreicht dabei Licht das Polymer und härtet dieses aus. Im Anschluss können die nicht belichteten Bereiche ausgewaschen werden und man erhält in den nicht belichteten Bereichen Öffnungen in der Schablonenschicht, die der gewünschten Siebdruckstruktur entsprechen. Zum Abschluss wird das Sieb getrocknet und die Gebiete zwischen Druckbereich und Rahmen mit einer Schutzfolie abgedeckt. Bei entsprechender Reinigung nach den Druckperioden können mehrere hundert Drucke je Sieb durchgeführt werden. Da für die Erstellung hoch präziser Siebe klimatisierte Reinraumbedingungen notwendig sind, sollte dies durch Spezialfirmen erfolgen. Weitere Information zur Siebherstellung sind in [39] enthalten.

#### 4.5.4.3 Anlagentechnik

Da es sich beim Siebdruck um ein weit verbreitetes Verfahren handelt, gibt es ein breites Angebot von Druckanlagen, die sich in der Umsetzung des oben beschriebenen Druckprinzipes kaum unterscheiden. Hinsichtlich der Positionierung des Druckbildes heben sich die Anlagen der Firma EKRA [40] jedoch ab, da sie nicht wie üblich das Substrat gegen ein gespeichertes Bild sondern direkt zum Sieb ausrichten und dadurch höhere Positioniergenauigkeiten erreicht werden können. Basis dafür ist ein Kamerasystem (CCD-Zeile), das vor und nach dem Druck in den Zwischenraum zwischen Sieb und Wafer einfahren kann (Abbildung 4.33) dabei zudem Sieb und Druckergebnis kontrolliert und somit Fehldrucke bzw. Siebverunreinigen erkennen kann. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich ein derartiges System sehr gut für den industriellen Einsatz bei den hohen Anforderungen, die das Drucken der Glaspaste zum Waferbonden stellt.

---

<sup>43</sup>meistens wird eine bedruckte Folie verwendet

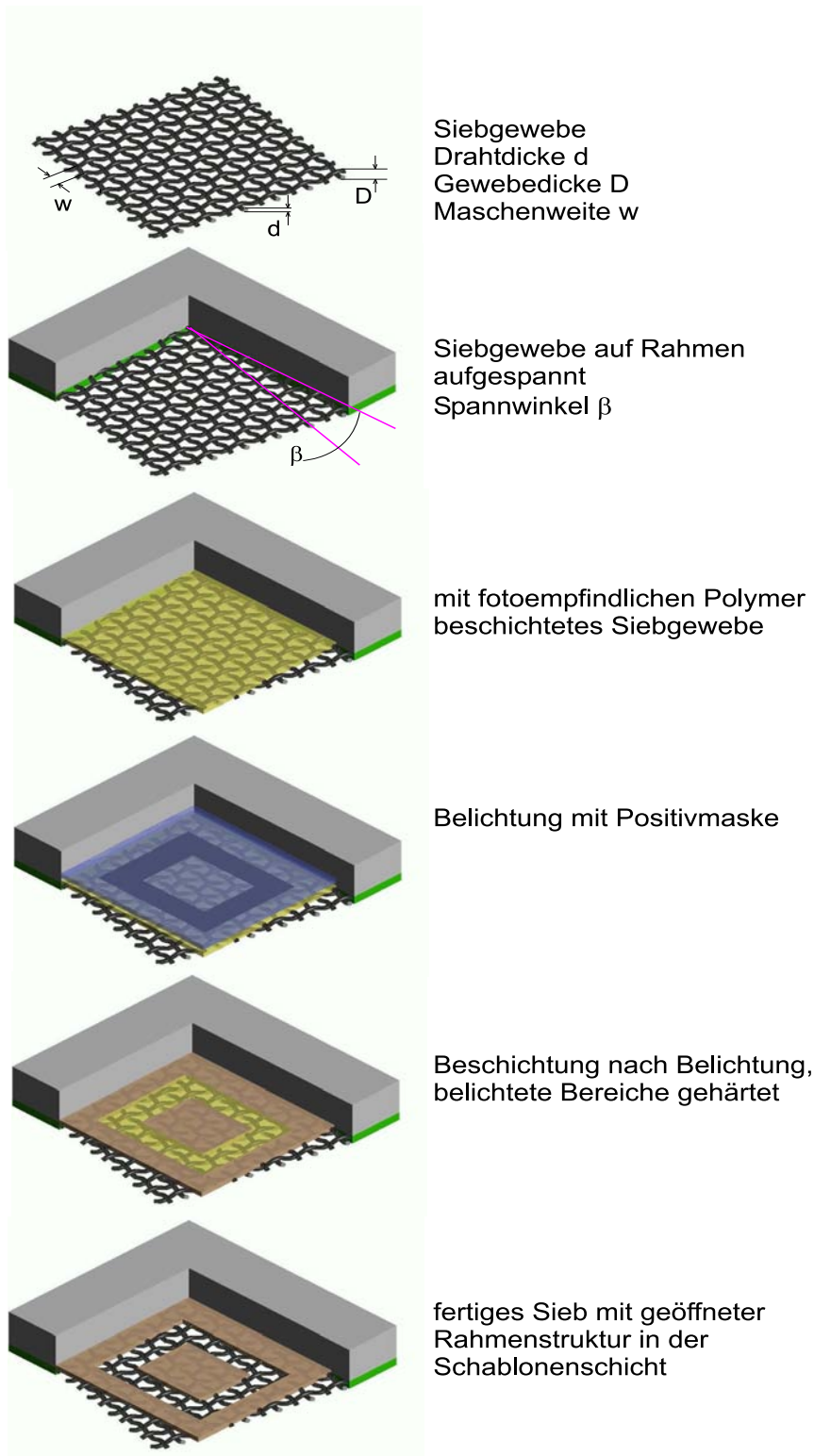


Abbildung 4.32: Siebherstellung und -aufbau

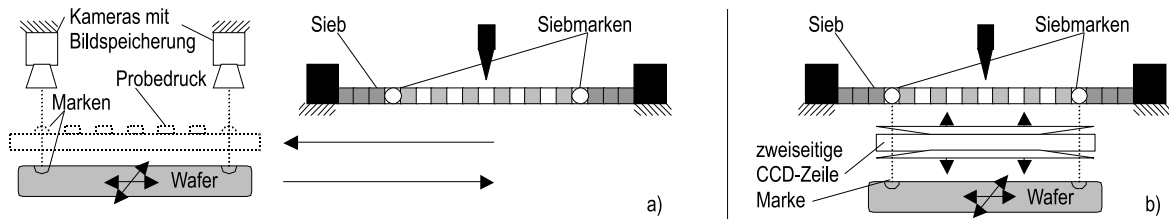


Abbildung 4.33: Ausrichtung Substrat zu Sieb a) herkömmliche Methode, b) Ausrichtung EKRA-Anlagen

#### 4.5.4.4 Drucken Glaspaste

Das Drucken der Glaspaste erfolgte als Kooperationsleistung durch das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Betriebsstätte Chemnitz. Dabei konnte auf bestehende Druckparameter zurückgegriffen werden, die nur leicht an das jeweilige Sieblayout angepasst wurden. Bei vorhergehenden Druckversuchen wurde eine Vielzahl von Parametern und Faktoren ausgemacht, die Einfluss auf das Siebdruckergebnis haben. Da diese sich gegenseitig beeinflussen, konnten sie nicht unabhängig von einander untersucht werden. Vielmehr wurden die Hardwareparameter (z.B. Sieb und Rakel) anhand von Literaturangaben [39] festgelegt und nur die Software- bzw. Prozessparameter, wie Rakeldruck und -geschwindigkeit zur Optimierung der Druckergebnisse eingesetzt. Abbildung 4.34 fasst die Parameter des Siebdruckprozesses zusammen.

Hardware-/Anlagenparameter		Software-/Prozessparameter
<i>Rakel</i>		<i>Paste</i>
Art	Ausführung	Viskosität
Flut- und Druckrakel nur Druckrakel geschlossenes System	Material Schliff Winkel	<i>Druckprozess</i>
<i>Sieb</i>		Rakeldruck Rakelweg Absprung Rakelgeschwindigkeit
Material	Ausführung	<i>Wafer</i>
Kunststoff Metall Laminierung	Spannung Maschenweite Drahtdurchmesser	
		Oberflächenzustände

Abbildung 4.34: Übersicht Auswahl Siebdruckparameter

Bei Inspektionen gedruckter Strukturen wurde festgestellt, dass ein Teil des Binders aus der gedruckten Glasstruktur austritt. Die Menge des ausgetretenen Binders variiert. Man kann daraus schließen, dass sich durch den mechanischen Druck beim Siebdruck ein ideales Binder-Glas-Verhältnis einstellt, d.h. der Binderfilm zwischen den Glaspartikeln und zur Oberfläche

des Siliziumwafers wird minimiert. Der austretende Binder ist als überschüssiges Material anzusehen. Zur Trocknung der Paste wird ein Ablüften bei Raumtemperatur empfohlen. Dieser Schritt dient zum Entweichen der Lösungsmittel aus der gedruckten Paste. Dabei erhöht sich die Viskosität des Binders sehr stark, ohne dass sich seine chemische Struktur verändert. Nach dem Trocknen sind die gedruckten Strukturen wischfest, jedoch noch sehr empfindlich gegen mechanische Einflüsse.

## 4.5.5 Bewertung gedruckter Bondrahmenstrukturen

### 4.5.5.1 Beschreibung Bondrahmen

Bei den gedruckten Bondrahmenstrukturen handelt es sich um dreidimensionale Gebilde, die durch folgende Parameter beschrieben werden können:

- **laterale Kenngrößen:** Bondrahmenbreite  $b$ , Positioniergenauigkeit ( $\Delta x$ ;  $\Delta y$ ) Siebdruck zu Struktur des Wafers und Mindestabstand  $a$  zwischen zwei Rahmenstrukturen
- **horizontale Kenngröße:** Dicke  $d$  der gedruckten Struktur

Neben diesen quantitativen Größen sind des Weiteren Formmerkmale der gedruckten Struktur, wie Kanten der Bondrahmen, die Ausbildung der Ecken und das Profil der gedruckten Struktur von Bedeutung. Abbildung 4.35 fasst die Beschreibungskriterien eines gedruckten Bondrahmens zusammen, die nachfolgend im Einzelnen diskutiert werden sollen. Die Untersuchungen wurden an bereits thermisch konditionierten Strukturen (siehe 4.5.7) vorgenommen, da in diesem Zustand genauere Messungen möglich sind und bedingt durch die Verfestigung des Glases nicht mehr die Gefahr der Verunreinigung der Messgeräte besteht. Das Verglasen hat, bis auf die Strukturdicke, keinen Einfluss auf die im folgenden untersuchten Kenngrößen, siehe auch 4.5.7.

### 4.5.5.2 Rahmenbreiten und -abstände

Zur Realisierung kleiner wafergebondeter Sensorchips ist es notwendig, schmale Bondrahmen zu drucken. Gleichzeitig stellen die Bondrahmen auch Dichtflächen für das hermetische Verschließen des Sensorinneren dar und dürfen somit keine Unterbrechungen aufweisen. Um die minimale Bondrahmenbreite zu ermitteln, die das Drucken geschlossener Strukturen noch ermöglicht, wurde eine Teststruktur mit zunehmenden Druckbreiten entworfen (Abbildung 4.36). Die Auswertung mehrerer Wafer, gedruckt unter Verwendung optimierter Siebdruckparameter, hat gezeigt, dass Strukturen, die eine Sieböffnung von mindestens  $150 \mu\text{m}$  aufweisen sicher, d.h. ohne Unterbrechungen oder Einschnürungen, gedruckt werden können.

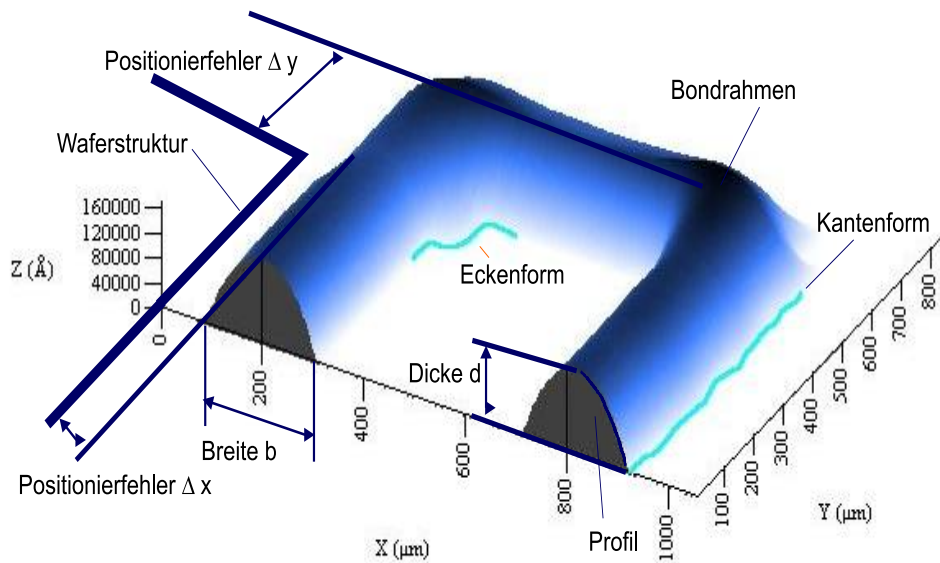


Abbildung 4.35: Bewertungskriterien gedruckter Bondrahmen

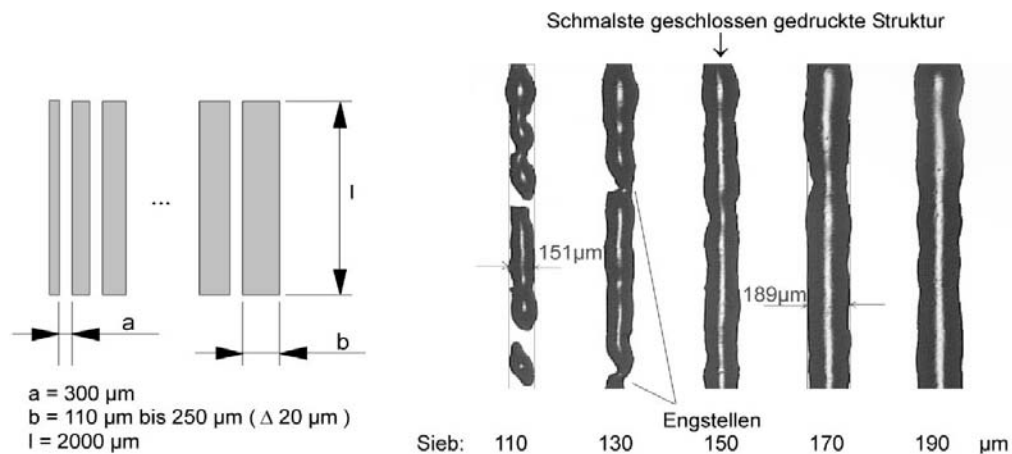


Abbildung 4.36: Teststruktur zur Ermittlung der minimalen Bondrahmenbreite

Bei der Messung der Breite der gedruckten Teststrukturen wurde festgestellt, dass diese 10 bis 20 % breiter ausfallen als im Design gezeichnet und als Sieböffnung realisiert. Abbildung 4.37 zeigt die Messwerte für einen typischen Wafer. Diese Verbreiterung beruht darauf, dass beim Siebdruck Paste unter den Randbereich der Sieböffnung gedrückt wird. Durch Variation der Siebdruckparameter lässt sich zwar diese Verbreiterung der Druckstruktur minimieren, allerdings leidet darunter die Druckqualität (Unterbrechungen, unregelmäßige Kanten). Daher ist es angebracht, die Verbreiterung in Kauf zu nehmen und im Design entsprechen zu berücksichtigen.

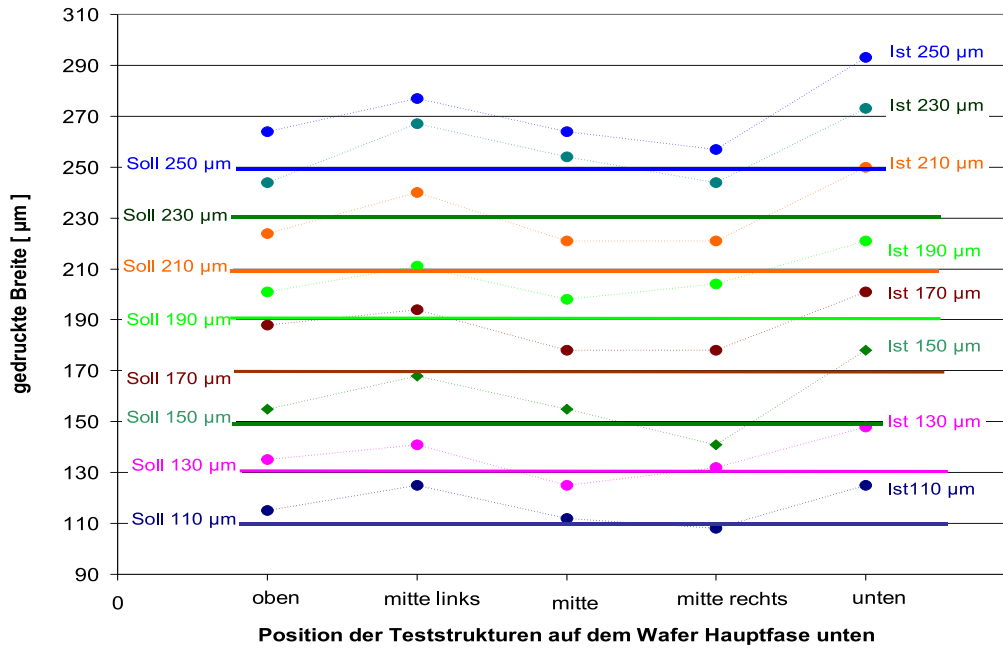


Abbildung 4.37: Strukturverbereitung beim Siebdruck ermittelt an Teststrukturen

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass sowohl die Ausbildung geschlossener Druckstrukturen als auch die gedruckte Breite abhängig sind von der zu bedruckenden Oberfläche. Die oben vorgestellten Ergebnisse wurden auf Silizium (mit natürlicher Oxidschicht) erzielt. Dies ist der typische Fall beim Bedrucken von Sensordeckwafern. Beim Druck auf Glaswafern kommt es zu einer stärkeren Strukturverbreiterung, wodurch Strukturen mit schmalere Sieböffnungen geschlossen gedruckt werden können. Ausschlaggebend dafür ist die Benetzbarkeit der zu bedruckenden Oberfläche durch die Paste.

Bei der Bewertung einer Vielzahl von Siebdruckstrukturen gleicher Sollbreite (Sieböffnung  $190\ \mu\text{m}$ ) wurde festgestellt, dass die tatsächlich gedruckte Breite stark schwankt. Diese Schwankungen liegen im Bereich von bis zu 20 % der Sollbreite (Abbildung 4.38), wobei die Strukturen meist zu breit gedruckt werden. Die Breitenschwankungen sind sowohl innerhalb eines Wafers als auch zwischen verschiedenen Wafers zu beobachten. Es muss somit festgestellt werden, dass die Breite von Siebdruckstrukturen zufälligen Schwankungen unterliegt, die im Design der zu bondenden Sensoren berücksichtigt werden muss.

Mittels einer zweiten Teststruktur (Abbildung 4.39) wurde untersucht, welcher minimale Abstand zwischen zwei gedruckten Strukturen bestehen muss, damit sie beim Drucken nicht ineinander verlaufen. Dies ist wichtig für die Gestaltung von Sägebereichen zwischen den Chips, wenn nicht durch das Bondglas gesägt<sup>44</sup> werden soll. Des Weiteren sind Doppelrahmen interes-

<sup>44</sup>Die Sägestraßen zwischen den Chips sollten nicht mit Bondglas bedeckt sein, da beim Sägen des Glases Mikrorisse entstehen können, welche zum Bruch schon bei geringen Belastungen führen.

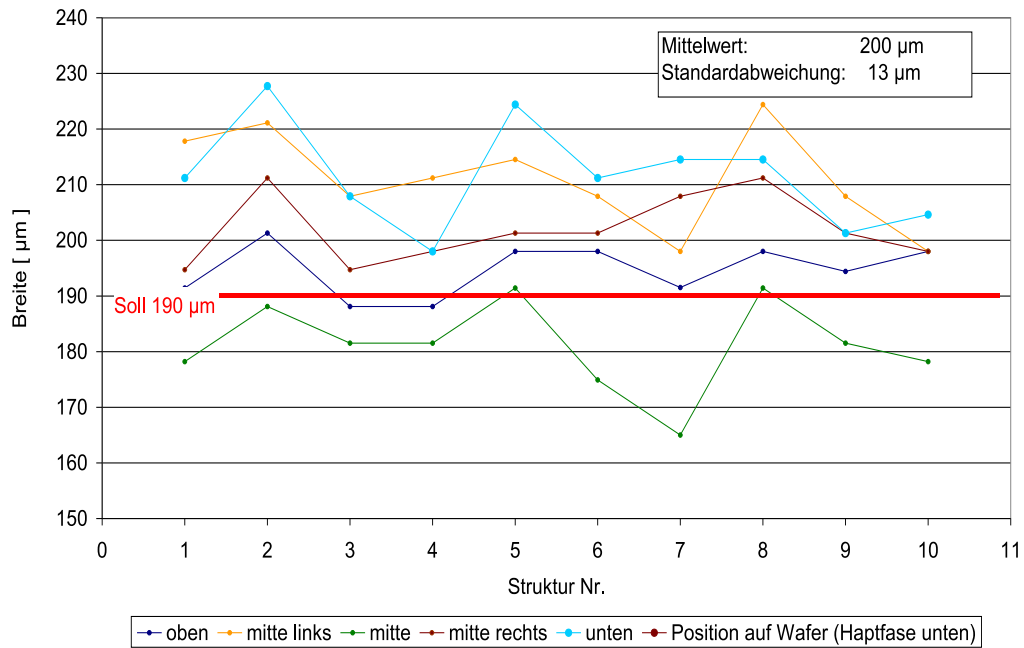


Abbildung 4.38: Strukturbreitenschwankungen beim Siebdruck, ermittelt an Teststrukturen

sant für die Erhöhung der Sicherheit hinsichtlich hermetisch dichten Bondens. Aus der Untersuchung der Teststruktur mit gestuften Strukturabständen ging hervor, das ein Mindestabstand von  $120\ \mu\text{m}$  zwischen den Druckstrukturen notwendig ist. Bedingt durch den oben beschriebenen Effekt der Verbreiterung der gedruckten Strukturen ist der reale gedruckte Abstand 10 bis 20 Prozent schmaler als im Sieb realisiert.

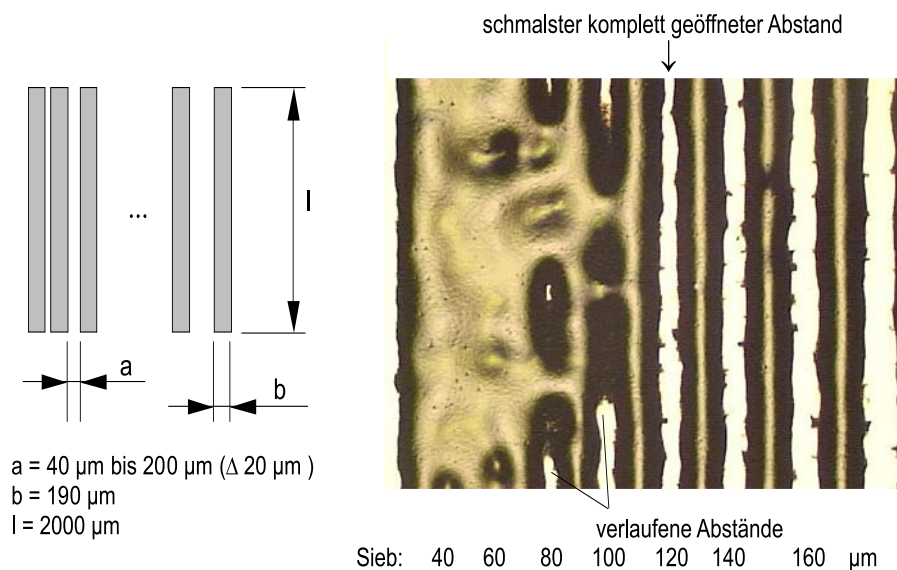


Abbildung 4.39: Bestimmung Minimalabstand zwischen Siebdruckstrukturen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die für das Glaslotbonden benötigten schmalen Strukturbreiten an der Grenze des mit Siebdruck Möglichen liegen. Die minimale Sieböffnung für geschlossene Strukturen beträgt  $150\ \mu\text{m}$ . Mit ihr lassen sich sicher Strukturbreiten von kleiner  $190\ \mu\text{m}$  realisieren. Der Mindestabstand zwischen Siebstrukturen beträgt  $120\ \mu\text{m}$ , was im Druck einem Abstand von etwa  $100\ \mu\text{m}$  ergibt.

##### 4.5.5.3 Druckdicke

Die Dicke der Siebdruckstrukturen ist ein weiterer wichtiger Parameter, da sie die Dicke der Bondfuge und somit den Abstand der gebondeten Wafer bestimmt. Die Druckdicke ist in der Materialspezifikation Ferro FX11-036 [35] mit  $28\ \mu\text{m}$  angegeben. Nach dem Trocknen und der Temperaturbehandlung verringert sich die Dicke, bedingt durch das Austreiben der organischen Komponenten, auf 10 bis  $15\ \mu\text{m}$ . Die Dicke der aufgetragenen Glaspaste konnte nur in wenigen Fällen direkt nach dem Siebdruck gemessen werden, da die Gefahr besteht, dass sich Paste an der empfindlichen Messspitze des verwendeten mechanischem Tastschnittgerätes absetzt. Aus diesem Grund wurden meist die Messungen der Dicke nach dem Temperaturprozess durchgeführt (feste Glasstruktur).

Die Dicke der Siebdruckstrukturen wird zunächst von der Dicke des verwendeten Siebes bestimmt. Um den spezifizierten Dickenwert zu erreichen, wird ein Siebgewebe mit  $30\ \mu\text{m}$  Drahtdurchmesser verwendet. Bereits bei den ersten untersuchten Siebdruckstrukturen wurde festgestellt, dass weiterhin die Breite der Sieböffnung einen starken Einfluss auf die Druckdicke hat. Beim ersten Design sollten zur optimalen Ausnutzung der Waferfläche alle Bereiche, die zum Bonden zur Verfügung standen mit Glaspaste bedruckt werden. Die Bewertung der gebondeten Sensoren ergab jedoch, dass diese nicht dicht waren. Ursache dafür waren schmale Bondbereiche, die eine deutlich geringere Druckhöhe (bis zu  $11\ \mu\text{m}$  dünner bedruckt) aufwiesen. Daraufhin wurden Siebdruckstrukturen mit konstanter Designbreite eingeführt, aus der eine homogenere Druckdicke<sup>45</sup> resultierte (Abbildung 4.40).

Um den Einfluss der Strukturbreiten auf die Druckdicke genauer zu untersuchen, wurden die bereits oben erwähnten Teststrukturen mit unterschiedlichen Strukturbreiten vermessen. Dabei stellte sich heraus, dass bei schmalen Strukturen die Druckdicke stark von der Breite abhängt. Bei Strukturen breiter  $210\ \mu\text{m}$  tritt dieser Effekt kaum noch auf (Abbildung 4.41). Dies lässt sich damit erklären, dass die schmalen Öffnungen wie ein Filter wirken, d.h. weniger Druckmaterial hindurch lassen. Aus diesen Ergebnissen ist zu schlussfolgern, dass im für die Anwendung interessanten Bereich schmaler Bondrahmen eine konstante Druckstrukturbreite im Chip, besser noch auf dem gesamten Wafer, zwingend notwendig ist, um ein homogenes

---

<sup>45</sup>An den Ecken treten noch, aufgrund der etwas größeren effektiven Breite leichte Erhöhungen auf (kleiner  $3\ \mu\text{m}$ ). Diese sind unkritisch, da sie beim Bonden verlaufen.



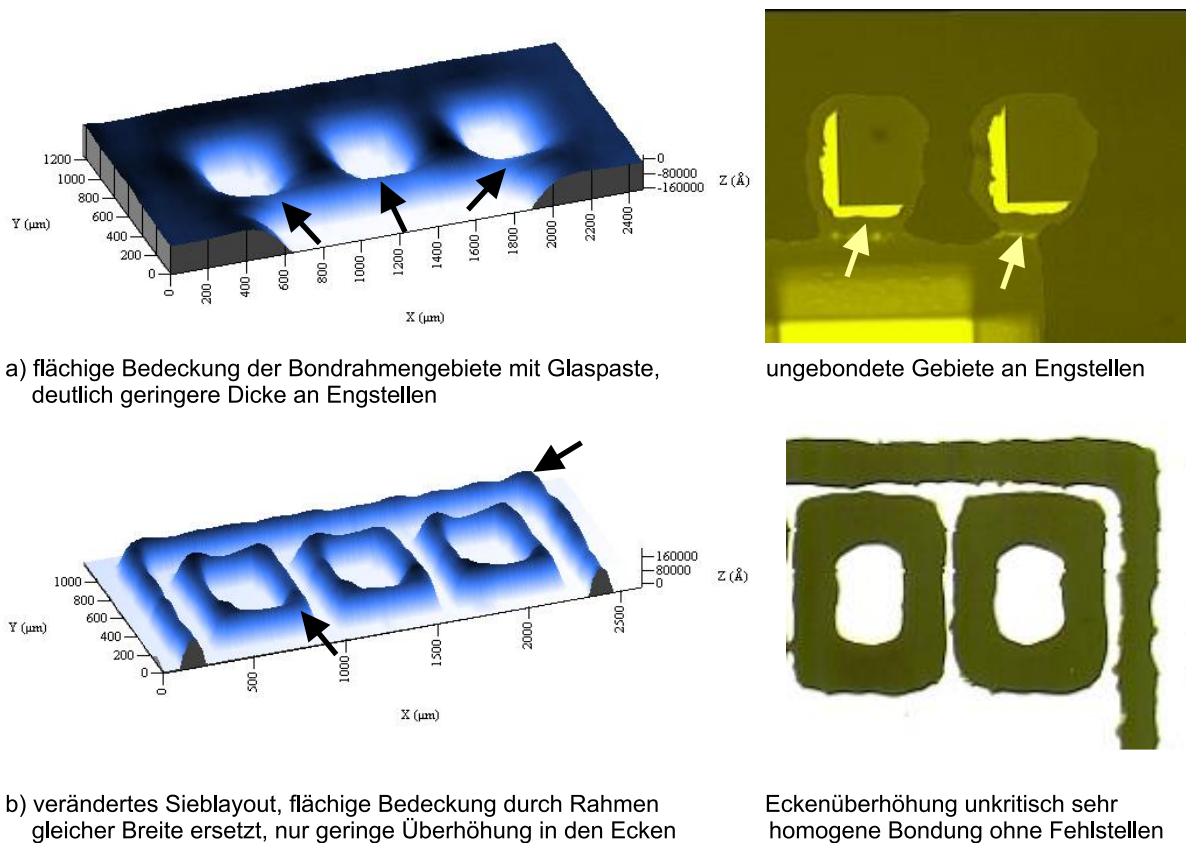


Abbildung 4.40: Bondundichtigkeiten an Engstellen von Siebdruckstrukturen und deren Vermeidung durch Designs mit identischen Strukturbreiten

dichtes Bonden zu erreichen.

Nachdem die Einflüsse auf die Dicke bekannt waren wurden die absoluten Dickenwerte an verschiedenen Wafern bestimmt. Bei der Messung ist zu beachten, dass der Bondrahmen keine konstante Höhe aufweist. Vielmehr besitzt er einen stollenförmigen Querschnitt mit schwankender Kammhöhe. Um einen relevanten Messwert zu erhalten, muss über den Kamm der Struktur gemessen und eine Mittelung vorgenommen werden (Abbildung 4.42).

Da es sich bei der Glasdicke um einen sehr wichtigen technologischen Parameter mit Einfluss auf die Sensorfunktion handelt, wurde sie bei mehreren Wafern an verschiedenen Positionen bestimmt. Die Mittelwerte der Wafer liegen zwar in dem vom Hersteller spezifizierten Bereich von 11 bis 14  $\mu\text{m}$ , so dass hinsichtlich des Bondprozesses ein guter Ausgangszustand erreicht ist. Die Gesamtheit der Messwerte weist jedoch starke Streuungen auf. Auf Basis der Messungen, welche im Anhang F zusammengefasst sind, lassen sich folgende statistische Kennwerte angeben:

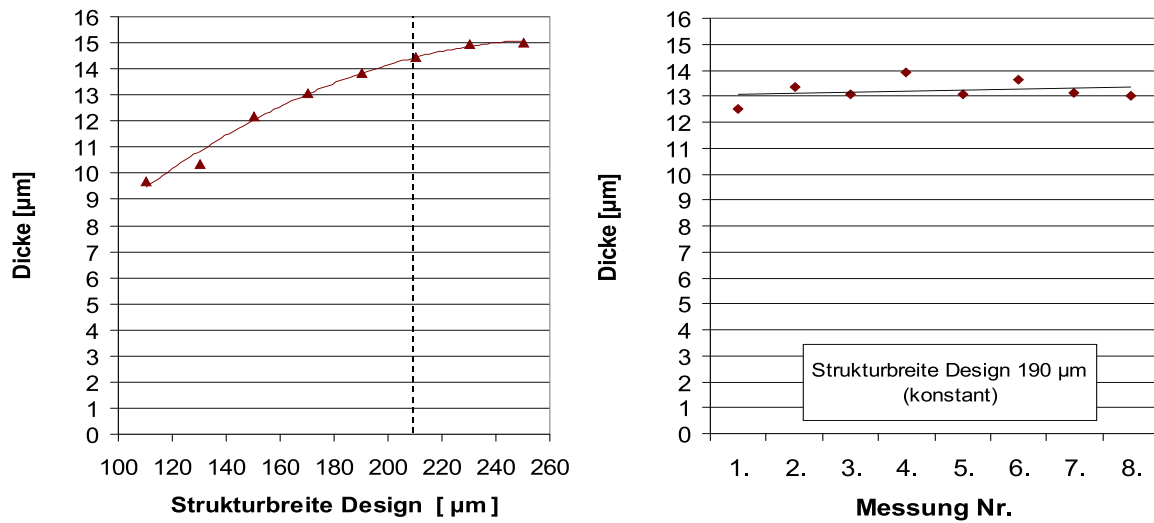


Abbildung 4.41: Abhängigkeit Dicke Siebdruckstrukturen von Strukturbreite

- mittlere Dicke: 13 µm
- 6σ-Prozessgrenzen: 9 bis 17 µm
- Prozesssicherheit cp: 0.8 - 1,6

Dabei ist die Prozesssicherheit cp (Berechnungsvorschrift Abbildung 4.43 entnommen aus [43]), ein normiertes Maß für den theoretisch geringsten Fehleranteil und erlaubt somit eine Aussage in wie weit die vorgegebenen Grenzen eines bestimmten Parameters im Produktionsprozess erreicht werden können. Aus den niedrigen Werten für die Prozesssicherheit, die entsprechend bestimmt wurde, lässt sich entnehmen, dass hinsichtlich einer stabilen Produktion die Dickenhomogenität des Siebdruckes noch verbessert werden muss.

#### 4.5.5.4 Positionierung

Da beim Bondprozess die zu bondenden Wafer anhand von Strukturen im Silizium ausgerichtet werden, ist die exakte Positionierung der Siebdruckstrukturen zum strukturierten Deckelwafer von großer Bedeutung. Bei einer Fehlpositionierung des Siebdruckes besteht die Gefahr, dass mechanisch bewegliche Funktionselemente angebondet und somit unbrauchbar werden.

Bei der Bewertung von Siebdruckstrukturen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit wurden zwei Effekte beobachtet:

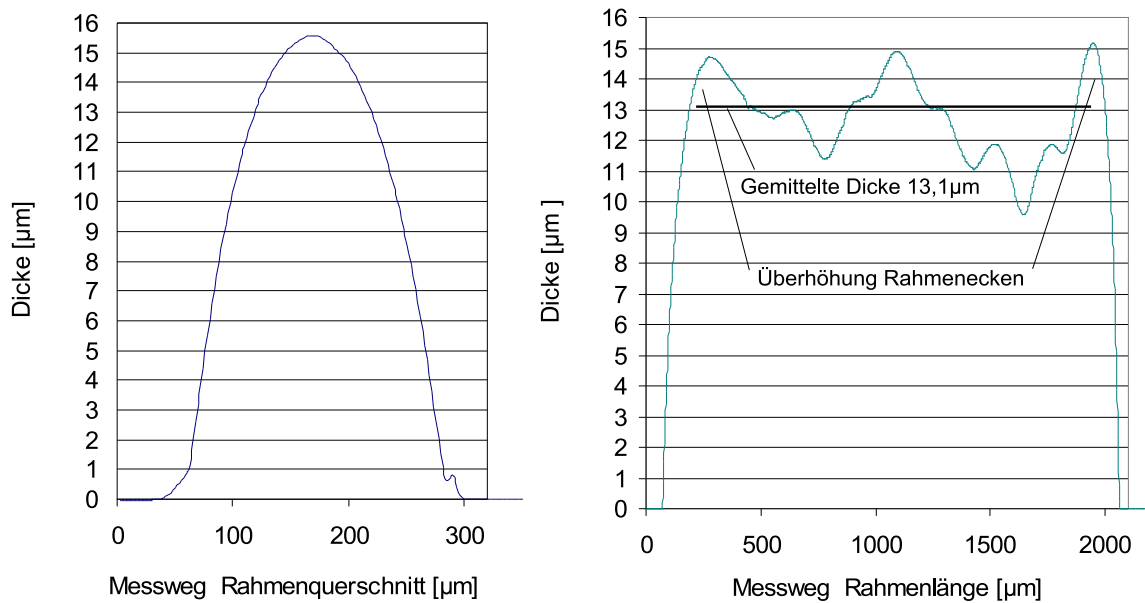


Abbildung 4.42: Messung Strukturdicke

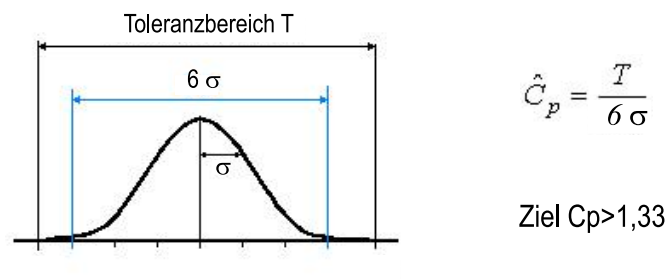


Abbildung 4.43: Ermittlung Prozesssicherheit

1. Fehlpositionierung des Siebes: Da die Siebdruckanlagen für Prozesse mit geringeren Genauigkeitsanforderungen (Solarzellen-, Leiterplattenfertigung) konzipiert sind, kommt es zu Versätzen von bis zu  $50 \mu\text{m}$  beim Ausrichten des Wafers zum Sieb.
2. Verzug des Siebes: Da das Sieb beim Drucken gedehnt wird, kommt es zu einem zweiten Fehleranteil, dem Siebverzug. Dieser kann je nach Druckprozess zwischen  $15$  und  $40 \mu\text{m}$  liegen. Dabei ist der Verzug in Druckrichtung am stärksten und zeigt lineares Verhalten, mit einem Nulldurchgang in der Verbindungslinie der Marke. Da die Waferausrichtung zu einem Probedruckbild erfolgt, wird somit der Verzug in Rakelrichtung an den Positionen der Marken kompensiert. Die anderen Verzuganteile sind hingegen eher zufällig.

Die in der Abbildung 4.44 aufgeführten Ergebnisse führen zu dem Schluss, dass mit einem

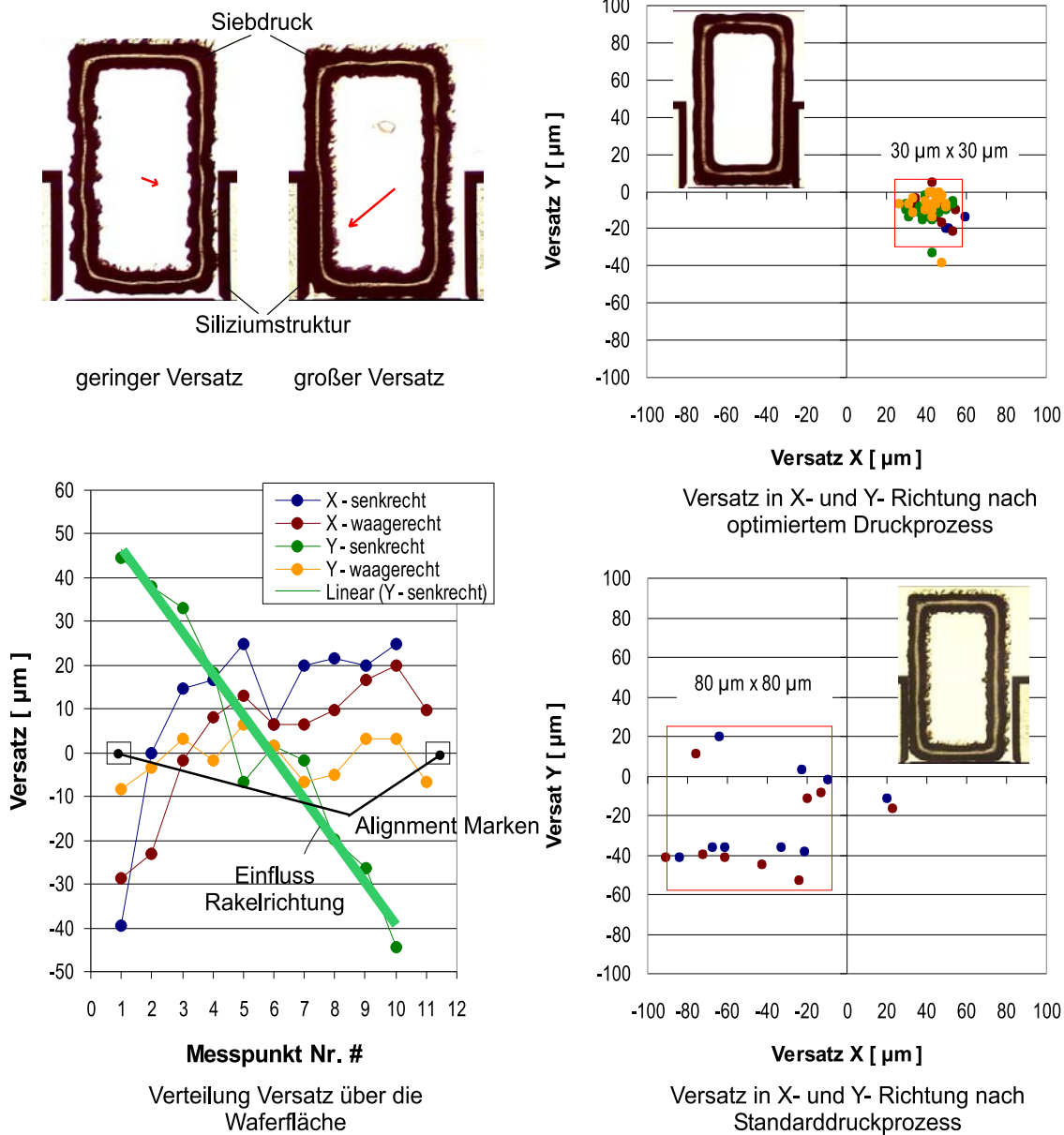


Abbildung 4.44: Positioniergenauigkeit Siebdruckstrukturen

Gesamtpositionierfehler von bis zu 90 µm gerechnet werden muss. Dieser Platz ist im Sensor-design entsprechend zu berücksichtigen.

#### 4.5.5.5 Kantengeometrie

Bedingt durch den Siebdruckprozess sind die Kanten der Bondrahmenstrukturen nicht exakt geradlinig. Sie können Ausbuchtungen und Ausfransungen aufweisen. In der Abbildung 4.45

ist zu erkennen, dass die Kanten­geometrie der gedruckten Strukturen von der Druck­richtung abhängt. Die senkrechten Strukturen, die entlang der Rakelzug­richtung verlaufen weisen mehr Unregelmäßigkeiten auf als die waagerechten. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Rahmen­kanten ist die Struktur­breite. Breitere Strukturen können sauberer gedruckt werden als schmale, da im Siebdruck mehr Paste durch die breitere Sieb­öffnung kommt, wodurch sich die Strukturen besser ausbilden können. Auf den Bondprozess haben die unregelmäßigen Kanten keinen Einfluss, da dieser Bereich des Bondrahmens flacher ist und somit beim Bonden nicht mit der Oberfläche des Sensor­wafers in Kontakt kommt. Dies gilt besonders für feine Ausfransungen der Kanten. Lediglich bei besonders kritischen Anwendungen <sup>46</sup> sind ggf. die unregelmäßigen Kanten­bereiche als Sicherheitszone zu beachten.

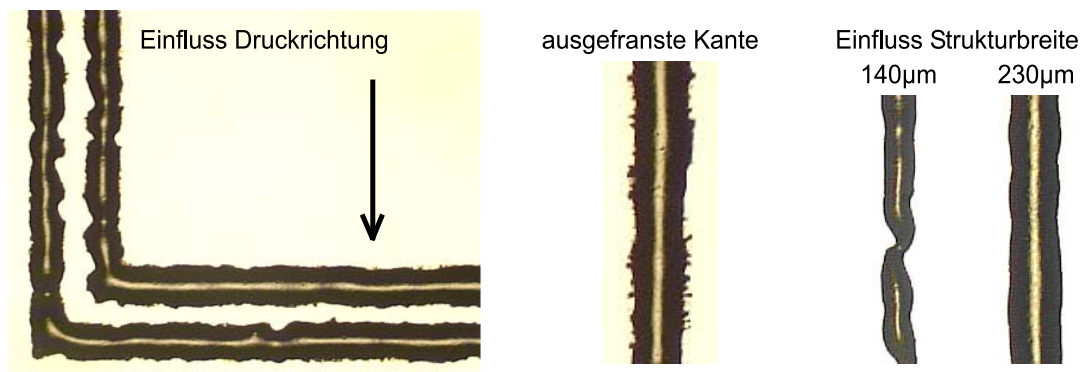


Abbildung 4.45: Einflussfaktoren auf die Kanten­geometrie von Siebdruck­strukturen

#### 4.5.5.6 Eckengeometrie

Während des Siebdruck­prozesses kommt es bedingt durch die Ober­flächen­spannung der Glas­paste und die Benetzungs­verhältnisse zur Abrundung von Struktur­ecken. Für die Bondrahmen bedeutet dies, dass in den Ecken Paste in den Innenbereich des Rahmens fließt. Somit gelangt Glas in Bereiche in denen es nicht vorgesehen ist und kann zum Anbonden von beweglichen Strukturen oder zum Abdecken von optisch aktiven Bereichen führen. Bei der Auswertung von unterschiedlichen Siebdruck­strukturen lagen die typische Eckradien zwischen 170 und 330  $\mu\text{m}$ . Besonders bei Bondrahmen mit sehr kleinen offenen inneren Bereichen (kleiner 300  $\mu\text{m}$  Kantenlänge) macht sich dieser Effekt stark bemerkbar. Dabei können benachbarte Ecken­ver­undungen ineinander übergehen, so dass keine geradlinige Kante entstehen kann. Des Weiteren ist der relative Flächenverlust, bedingt durch die kleinen Öffnungs­flächen, sehr groß (Abbildung 4.46).

Um den Einfluss des Verlaufens der Ecken der Siebdruck­strukturen zu minimieren, wurden

<sup>46</sup>ausreichender Abstand zu Bereichen, die nicht bedruckt werden dürfen, wie z.B. optische Fenster

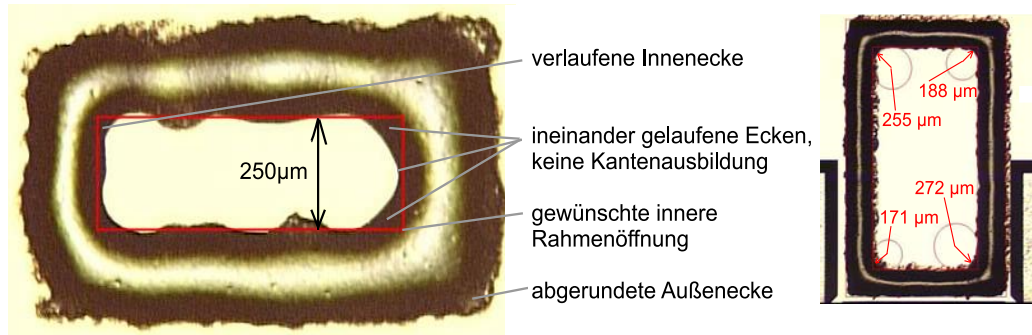


Abbildung 4.46: Typische Eckenstruktur an kleinen Siebdruckrahmen

Eckenkompensationsstrukturen angeprobt. Ziel war es dabei, die Druckpaste von den kritischen inneren Ecken fernzuhalten, indem in der Siebschablonenschicht diese Bereiche abgedeckt wurden. In einem Versuchssieb wurden 6 Designvarianten mit je 2 Maßen sowie ein schmalerer Rahmen<sup>47</sup> realisiert. Als Bewertungskriterien dienten die freie innere Fläche, die einen von der Anwendung vorgegebenen Bereich umfassen musste, und die geschlossene Ausbildung des Bondrahmens als Voraussetzung für einen hermetischen Abschluss des Rahmeninneren. Bei der Auswertung verschiedener Druckversuche musste festgestellt werden, dass die Eckenkompensation nur bedingt wirksam wurde, da die Ecken in Abhängigkeit ob sie dem Rakel zu- oder abgewandt waren, sehr unterschiedlich gedruckt wurden. Es ergaben sich Rahmen, wie in Abbildung 4.47 zu sehen, die zwei kompensierte und zwei verlaufene Ecken aufwiesen. Des Weiteren waren die Ergebnisse von Rahmen gleichen Designs sehr unterschiedlich, da die Eckenkompensationen zum Teil in ihrer Ausdehnung kleiner als eine Masche des Siebes waren und somit der Drahtverlauf und die Ausbildung der Schablonenschicht in jedem Einzelfall<sup>48</sup> großen Einfluss haben.

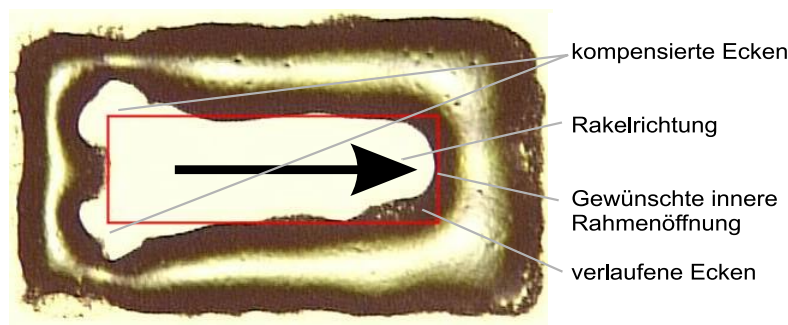


Abbildung 4.47: Rakelrichtungsbedingte unsymmetrische Eckenkompensation

<sup>47</sup>Rahmenbreite wurde von innen her reduziert, Rahmen mit gleichen äußeren Abmessungen aber größeren freiem Innenraum

<sup>48</sup>Sieb und Strukturen sind zueinander verdreht und weisen kein gemeinsames Rastermaß auf. Somit ist der Drahtverlauf unter den Kompensationstrukturen zufällig und führt zu deren unterschiedlichen Ausbildungen.

Aus den Druckergebnissen, die im Anhang E aufgeführt sind, konnten jedoch die folgenden Anforderungen für Eckenkompensationsstrukturen für geschlossene Bondrahmen ermittelt werden:

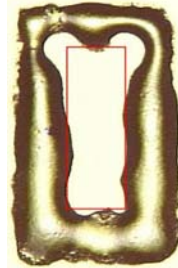
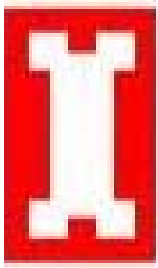
- Die durch die Kompensationsstrukturen abgedeckten Eckenbereiche müssen möglichst groß sein, um das Verlaufen der Druckpaste wirkungsvoll zu verhindern.
- Die Kompensationsstrukturen dürfen nicht die Rahmenöffnungen im Sieb unterbrechen, da dies stets zu Öffnungen im gedruckten Rahmen führen.
- Die Engstellen zwischen den Kompensationsstrukturen und der äußeren Druckrahmenbegrenzung dürfen nicht schmaler als die Maschenweite sein.

Als am geeignetsten haben sich die beiden in der Abbildung 4.48 dargestellten Varianten herausgestellt. Sowohl das Abdecken der Ecke mit einem Quadrat als auch das Umwandeln der konkaven inneren Ecke in konvexe Ecken durch Schlitze lieferten gute Ergebnisse. Dies bestätigte die Vermutung, dass sich konvexe innere Ecken beim Verrunden etwas zusammenziehen, so dass kein Material in die freizuhaltenden Bereiche fließt. Es muss jedoch festgestellt werden, dass für die schmalen Druckrahmenbreiten (Zielbreite  $190\ \mu\text{m}$ ) die Eckenkompensation oft zu Unterbrechungen im Druckbild führt, die ein hermetisch dichtes Bonden unmöglich machen. Ursache hierfür sind zu schmale Engstellen in den Sieböffnungen im Bereich der Eckenkompensationsstrukturen. Es kann zusammengefasst werden, dass sich das Verlaufen der Ecken der Siebdruckstrukturen durch geeignete Kompensationsstrukturen zwar beeinflussen lässt, bei sehr schmalen Bondrahmen, wie sie meist in der Praxis gefordert werden, ist ihr Einsatz jedoch nicht sicher und reproduzierbar möglich. Für breite Bondrahmen oder Sonderanwendungen, bei denen geringere Ausbeuten akzeptiert werden können, sind sie hingegen eine interessante Option.

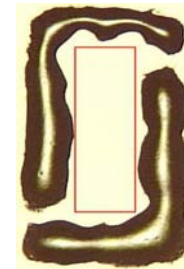
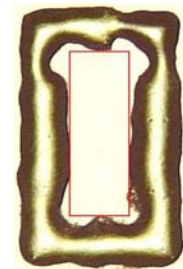
#### 4.5.5.7 Abgeleitete Designregeln

Bei der Anwendung des Glaslotwaferbondens muss sichergestellt werden, dass unter keinen Umständen Glaslot in Bereiche gelangt, in denen es nicht vorgesehen ist, da es dort z.B. bewegliche Strukturen anbonden und somit unbrauchbar machen könnte. Aufbauend auf den oben dargestellten Untersuchungen und unter Beachtung von Einflüssen des Bondvorganges auf die später eingegangen wird, lässt sich ein minimaler Platzbedarf von  $470\ \mu\text{m}$  für die Bondrahmenbreite ermitteln. Dabei entfallen etwa  $270\ \mu\text{m}$  auf den eigentlichen Bondrahmen und  $200\ \mu\text{m}$  dienen als Sicherheitszone zum Ausgleich von Alignmentfehlern. An den Rahmeninnenecken ist das Verlaufen der Glaspaste durch eine zusätzliche Pufferzone mit einem Radius

abgedeckte Ecken (Quadrate)



konvexe Ecken (Schlitze)



Design

ordnungsgemäßes  
Druckbild

verlaufene  
Ecken

offene  
Ecken

Abbildung 4.48: Geeignete Strukturen zur Kompensation des Verlaufens von inneren Siebdruckecken und Druckergebnisse

von  $300 \mu\text{m}$  zu berücksichtigen. Abbildung 4.49 verdeutlicht die Überlegungen zum Platzbedarf des Bondrahmens. Um den Einfluss des Pastenverlaufes an den inneren konvexen Ecken zu minimieren, sollte die Kantenlänge der Bondrahmen mindestens  $600 \mu\text{m}$  betragen. Insgesamt kann so erreicht werden, dass die Bondrahmen ordnungsgemäß gedruckt sowie gebondet werden und auch bei starker Fehlpositionierung beim Siebdruck und Bonden kein Glaslot in die frei zu lassenden Bereiche gelangt.

Nachdem der Platzbedarf der Bondrahmen ermittelt wurde, sollen hier Vorschriften, so genannte Design Rules, für ihre Gestaltung angegeben werden. Alle Angaben betreffen gezeichnete Maße im Entwurf und nicht die spätere Realisierung. Generell gilt, dass eine einheitliche Strukturbreite im gesamten Chip und Waferdesign verwendet werden muss, um eine nahezu konstante Druckdicke und somit ein gutes Bondverhalten zu erreichen. Die minimale gezeichnete Strukturbreite ist  $150 \mu\text{m}$ , bei einem Mindestabstand von  $120 \mu\text{m}$  zwischen benachbarten Strukturen. Die minimale Kantenlänge der inneren Bondrahmenstrukturen beträgt  $600 \mu\text{m}$ . In den meisten Fällen sollen rechteckige Glaslotbondrahmen die zu schützenden Sensorstrukturen umgeben. In diesen Fällen ist ein Abstand von  $160 \mu\text{m}$  von den aktiven Sensorelementen zur Innenkante des Bondrahmens einzuhalten. Der gleiche Abstand gilt von der Außenkante des



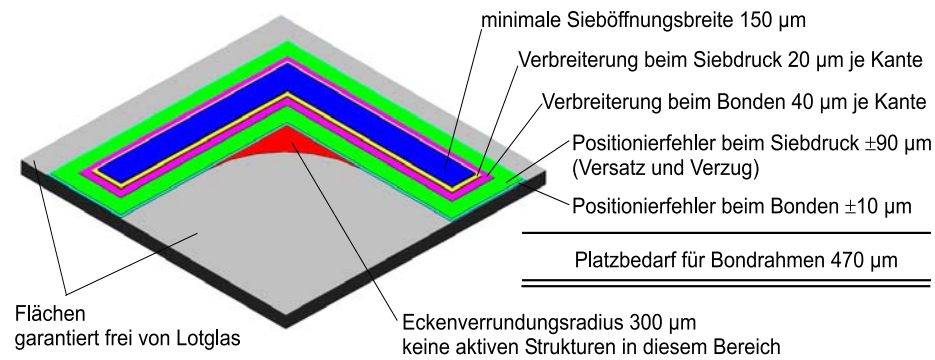


Abbildung 4.49: Maßstäbliche Darstellung des Platzbedarfs von Bondrahmenstrukturen unter Beachtung aller Lage- und Breitentoleranzen

Bondrahmens zu Strukturen (Bondpads, Ritzgraben), die nicht mit Lotglas bedeckt werden sollen. Befinden sich in den Ecken des mittels Bondens zu verkappenden Bereiches empfindliche Strukturen, so ist der Bondrahmen in einer Richtung um zwei mal 300  $\mu\text{m}$  oder an allen Seiten um 90  $\mu\text{m}$  zu vergrößern, um ausreichend Abstand zu den nach innen verlaufenen Ecken zu erreichen. Für Eckenkompensationstrukturen lassen sich aufgrund der wenig reproduzierbaren Versuchsergebnisse keine Regeln angeben. Polygonale Bondrahmen Strukturen sind möglich, wenn die angegebenen Mindestabstände zu aktiven Strukturen eingehalten werden, was jedoch bei Einbuchtungen im Bondrahmen einem sehr hohen Platzbedarf gleichkommt. Die Verrundung an konvexen Ecken erfolgt eher in den gezeichneten Bondrahmen hinein, so dass an ihnen kein besonderer Sicherheitsabstand eingehalten werden muss. Abbildung 4.50 fasst die Designregeln für die Bondrahmen zusammen.

#### 4.5.5.8 Siebdruckverhalten an Vertiefungskanten

Da die oben aufgestellten Designregeln trotz schmaler Lotglasrahmenbreiten (190  $\mu\text{m}$ ) bedingt durch die Positionierungsgenauigkeiten beim Siebdruck sehr große Bondflächen (470  $\mu\text{m}$ ) benötigen, wurde erfolgreich versucht, die Siebdruckflächen seitlich durch Vertiefungen im Deckwafer einzugrenzen. Kommt es dabei zu einer Fehlpositionierung des Siebes durch Versatz oder Verzug, so ragt die Öffnung des Siebes über die vorgesehene Siebdruckfläche hinaus. Dabei kann die in den Siebmaschen gespeicherte Paste beim Druck die abgesenkte Oberfläche nicht erreichen, d.h. im Bereich der Strukturkante reißt der Pastenfilm ab und es wird nur gering über die Kante hinaus gedruckt (Abbildung 4.51 und 4.52). Erfolgt in Einzelfällen kein Abriss, so wird die überschüssige Paste an den abfallenden Strukturflanken angelagert und kann so den Druckrahmen nicht verbreitern.

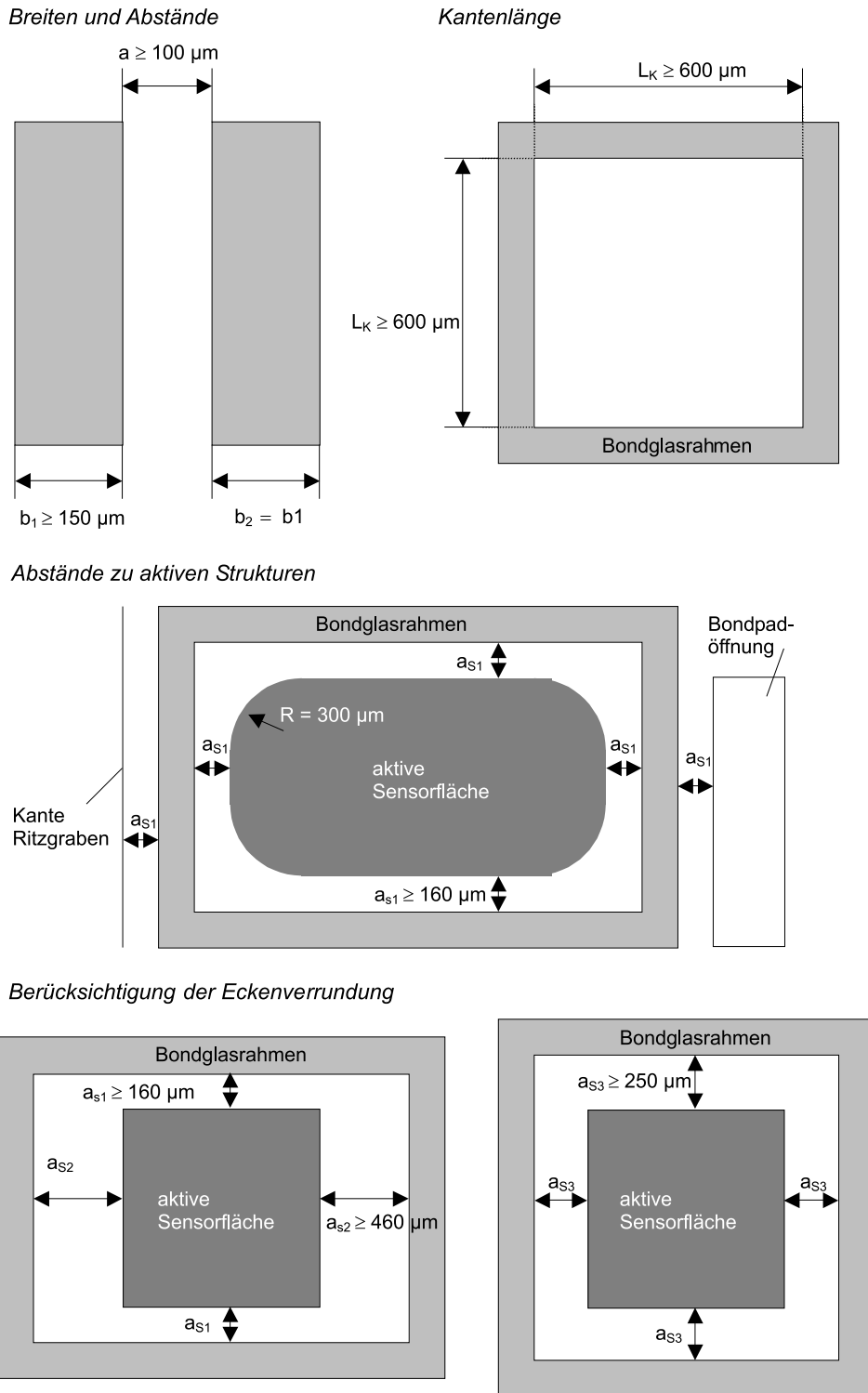


Abbildung 4.50: Design Rules Bondglasrahmen

Dieser Effekt konnte an senkrechten und geneigten Strukturkanten beobachtet werden und führt zu sehr sauberen Druckergebnissen. Da die Kante nicht nur für den Siebdruck sondern auch für die Bondung (siehe 4.5.9.2) begrenzend wirkt, kann die notwendige Bondflächenbreite auf ca.  $220\ \mu\text{m}$ <sup>49</sup> bei einer Glasrahmenbreite von  $190\ \mu\text{m}$  verringert werden. Die bei einem großen Versatz entstehenden schmalen Bondrahmenbereiche weisen trotzdem ein gutes Bondverhalten auf (Abbildung 4.53).

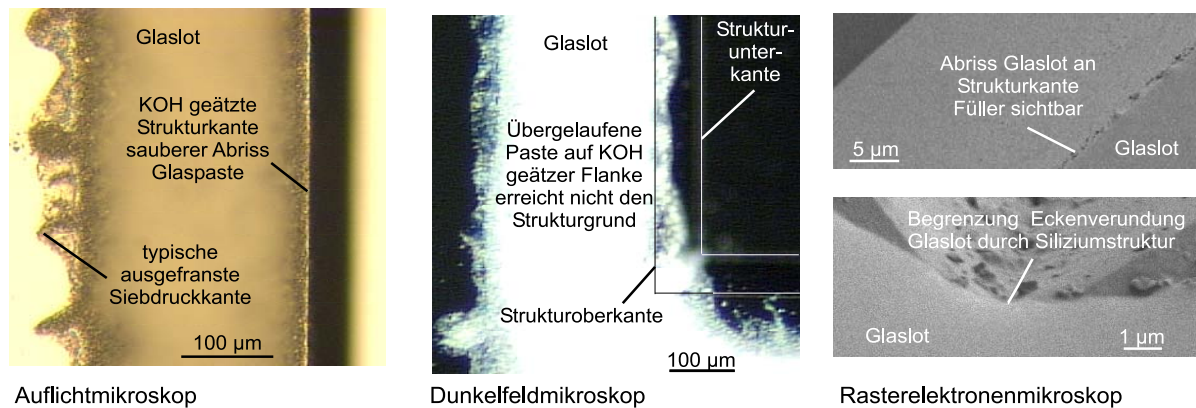


Abbildung 4.51: Verhalten der Siebdruckpaste an Strukturkanten

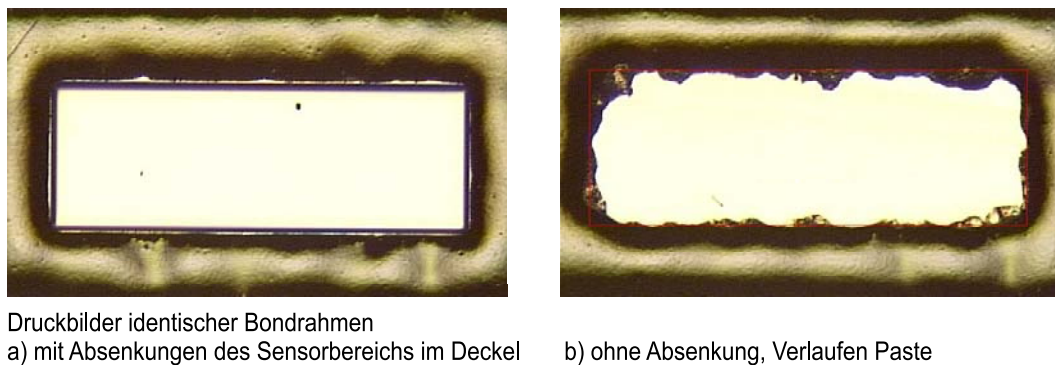


Abbildung 4.52: Einfluss von Absenkungen im Deckwafer auf das Siebdruckbild

Es ist somit möglich, durch Vorstrukturierung der Druckfläche schmalere Bondrahmen zu realisieren, die letztlich durch die Überlagerung von vorstrukturierter Bondfläche und Sieböffnung definiert werden (Abbildung 4.54). Legt man die Siebdruckstrukturen dabei deutlich größer als die erhabenen Druckflächen aus, so kann man einen Selbstausrichtungseffekt erzielen, was jedoch noch nicht praktisch ausprobiert werden konnte.

<sup>49</sup>damit die Bondrahmen nicht zu schmal werden zu lassen wird, muss ein kleiner Versatz unkompensiert bleiben

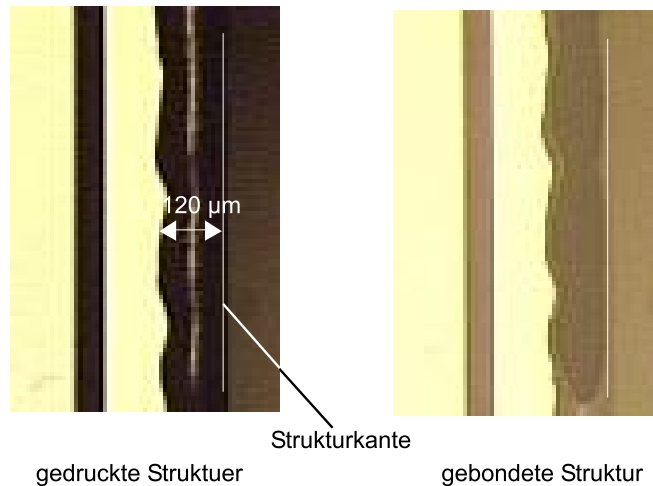


Abbildung 4.53: Bondverhalten aufgrund begrenzender Kantenwirkung verschmalterter Bondrahmen

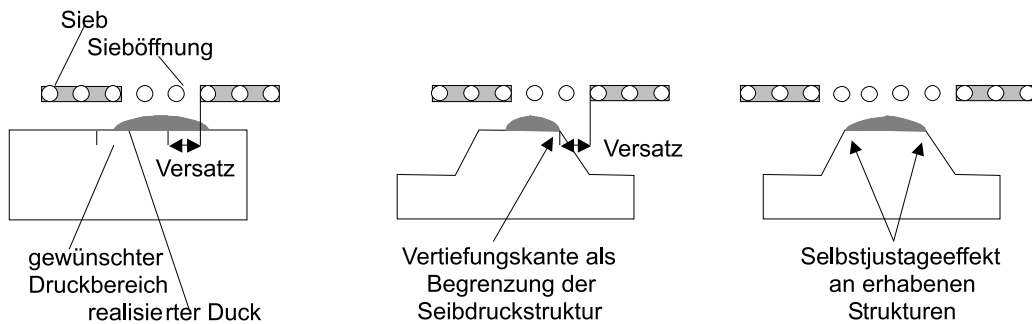


Abbildung 4.54: Wirkung von Siliziumstrukturkanten als Begrenzung für den Siebdruck

## 4.5.6 Strukturierungsalternativen Glaspaste

Da, wie oben ausführlich beschrieben, der Siebdruck auf Strukturen größer  $150 \mu\text{m}$  begrenzt ist, Strukturdetails wie Ecken z.T. unsauber gedruckt werden und es bedingt durch den Verzug des Siebes beim Drucken zu Positionierfehlern kommt, wurde nach alternativen Strukturierungsmöglichkeiten gesucht, um die Genauigkeit der Glaslotstrukturen zu verbessern.

### 4.5.6.1 Schablonendruck

Der Schablonendruck ist ein aus dem Siebdruck abgeleitetes Verfahren. In ein sehr dünnes Edelstahlblech werden mittels eines Laserstrahls Öffnungen in den Formen der zu bedruckenden Strukturen hinein geschnitten. Die Edelstahlschablone wird dann mit einem aus dem Siebdruck bekannten Siebmaterial in einen Druckrahmen eingespannt. Der Druckprozess entspricht dem

des Siebdrucks, jedoch ohne dass mit einem Absprung gearbeitet wird. Der Vorteil des Schablonendrucks besteht darin, dass sich im Gegensatz zum Drucksieb unter den Öffnungen der Schablone keine Siebdrähte<sup>50</sup> befinden, die den Druck stören, in dem sie die geöffnete Struktur verkleinern. Somit lassen sich auch kleine und schmale Strukturen sicher öffnen und drucken. Weiterhin ist eine Edelstahlschablone stabiler gegen Verzug beim Drucken. Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch darin, dass sich keine in sich geschlossenen Rahmendruckstrukturen in der Schablone realisieren lassen. Aufgrund des fehlenden unterliegenden Siebträgers würde ein umlaufender Schlitz dazu führen, dass die innenliegende Schablonenstruktur heraus fallen würde. Statt eines umlaufenden Schlitzes würde ein Loch entstehen. Um dies zu vermeiden muss, z.B. an den Ecken, die innere Struktur durch Aufhängungen befestigt werden, die aber gleichzeitig den Schlitz (Bondrahmen) unterteilen. An den Stellen dieser Aufhängungen würde dann vermutlich keine Glaspaste auf den Wafer gedruckt werden (Unterbrechung im Bondrahmen). Um das Druckverhalten der Paste bzw. ein mögliches nachträgliches Verlaufen zu untersuchen, wurde eine entsprechende Teststruktur in ein Drucksieb integriert. Die nachgestellten Aufhängungen hatten eine Breite von  $75\ \mu\text{m}$ <sup>51</sup>. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Aufhängungen den Druckprozess tatsächlich so stark stören, dass sich keine geschlossenen Bondrahmen ausbilden können, die für das hermetisch dichte Bonden benötigt werden (Abbildung 4.55). Aus diesen Grund und der Tatsache, dass bei einer Schablone ein schlechteres Anlageverhalten an die Oberfläche der Wafer und somit ein unsauberer Druck zu erwarten ist, wurde der Schablonendruck nicht weiter verfolgt. Diese Verfahren sind im Wesentlichen für den Lotpastendruck auf Leiterplatten einsetzbar, wobei keine geschlossenen Rahmen gedruckt werden müssen.

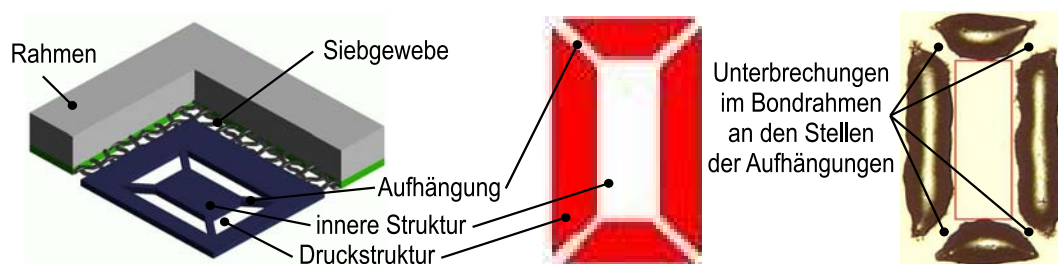


Abbildung 4.55: Schablonendruck: Schablonenaufbau und Druckverhalten an Aufhängungen der inneren Strukturen

<sup>50</sup>Schablonenblech wird nur am Rand zum Rahmen hin von Siebgewebe gehalten

<sup>51</sup>Vorgabe Schablonenhersteller

#### 4.5.6.2 Fotochemische Strukturierung

Nach entsprechend starkem Verdünnen lässt sich die Glaspaste FX11-036 auf Waferoberflächen aufschleudern<sup>52</sup>. Um deutlich feinere Bondrahmenstrukturen (schmäler 100  $\mu\text{m}$ ) zu realisieren, sollte eine derartig aufgebrachte Schicht nach dem Verglasen fotochemisch strukturiert werden. Dazu wurde, wie aus dem Ätzen von Glaswafern bekannt, eine Aluminiumhartmaske aufgebracht, um die Glasschicht in konzentrierter Flusssäure zu ätzen. Obwohl die flächig aufgebrachte Glasschicht beim Abkühlen nach dem Verschmelzen gerissen war, ließ sich die Hartmaske sauber aufbringen. Bei den Ätzversuchen zeigte sich jedoch, dass die Glasschicht nicht abgeätzt wird, sondern in Partikel zerfällt. Dies wurde auch an maskierten Bereichen beobachtet. Weiterhin stellte sich heraus, dass die unmaskierte Glaspaste in vorherigen Spülprozessen so viel Wasser aufgenommen hatte, dass im Ätzbad in der Nähe der Waferoberfläche die Flusssäure verdünnt und somit die Aluminiummaske angegriffen wird (Abbildung 4.56). Plasmachemische Ätzversuche zeigten eine sehr geringe Ätzrate und ein durch die Glaszusammensetzung bedingt sehr inhomogenes Ätzbild. Da der Einsatz anderer geeigneter Chemikalien nicht möglich war, konnte eine fotochemische Strukturierung der Glaslotschicht nicht realisiert werden. Sie bleibt jedoch ein interessanter Ansatz.

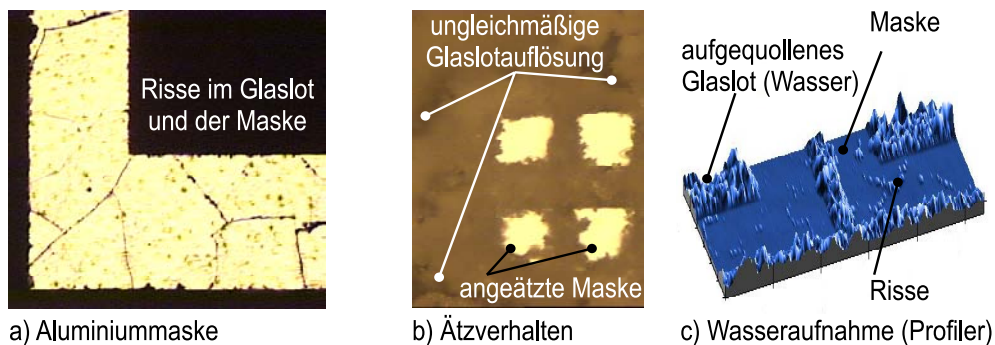


Abbildung 4.56: Fotochemische Strukturierung Glaslot

#### 4.5.6.3 Lift-Off-Prozesse

Eine weitere Möglichkeit der Strukturierung der Glaslotschicht ist ein sogenannter Lift-Off-Prozess. Dazu ist ein organisches Opferschichtmaterial fotochemisch zu strukturieren. Auf dieses kann dann die Glaspaste aufgeschleudert werden. Nach dem Austreiben des Binders bei 350°C kann durch die poröse Struktur des Glases hindurch das Opfermaterial durch Lösungsmittel aufgelöst und die sich darauf befindliche Glasschicht abgehoben werden. Auf den Bereichen der Waferoberfläche, auf denen sich nach der Strukturierung kein Opfermaterial befunden

<sup>52</sup>Kooperationsleistung Fraunhofer IZM Chemnitz, Prozess ist sehr kritisch, da die Glaspartikel der Paste den Prozess sehr stark stören können

hat, bleibt das Glas erhalten, kann verschmolzen und zum Bonden verwendet werden. Geeignete organische Opferschichtmaterialien, die eine Temperatur von 350°C überstehen, werden kommerziell angeboten [44]. Auf Grund fehlender technischer Voraussetzungen konnte der Lift-Off-Prozess an der Glaspaste nicht ausprobiert werden. Somit kann hier keine Aussage über die praktische Realisierbarkeit getroffen werden.

Bei den bisherigen Untersuchungen konnte keine technisch anwendbare Alternative zum Siebdruck als Verfahren zum Aufbringen und Strukturieren der Glaslotschicht gefunden werden. Auf Grund der begrenzten Strukturauflösung und Genauigkeit des Siebdruckverfahrens wird weiter nach Alternativen gesucht.

## **4.5.7 Thermische Konditionierung der Glaspaste vor dem Bonden**

### **4.5.7.1 Notwendigkeit der thermischen Konditionierung**

Nach dem Aufbringen der Glaspaste auf den Wafer und deren Abtrocknung muss diese thermisch konditioniert werden um die Paste in ein Glas zu verwandeln und ein definiertes Bonden zu ermöglichen. Dieser mehrstufige Prozess umfasst folgende Schritte und ist im Bild 4.57 als Überblick dargestellt:

1. Austreiben der organischen Bestandteile Binder und Lösungsmittel
2. Verschmelzen der Glaspartikel zu einem kompakten, lunkerfreien Glas
3. Ausbildung einer festen Verbindung zwischen dem Glas und der Waferoberfläche, auf die die Paste gedruckt wurde

Erfolgt vor dem Bonden der Wafer kein vollständiges Vorschmelzen des Glasmaterials, so kommt es beim Bondprozess zur Ausbildung von Hohlräumen in der Bondzwischen-schicht. Diese Hohlräume setzen zum einen die Bondfestigkeit herab. Zum anderen stehen sie dem hermetisch dichten Bonden entgegen, da die Wahrscheinlichkeit von durchgehenden Leckkanälen sehr groß ist. Abbildung 4.58 verdeutlicht diesen Effekt.

### **4.5.7.2 Vorgänge während der Konditionierung**

Anhand der Paste FERRO FX11-036, die als Vorzugsmaterial für das Glaslotbonden ausgewählt wurde, sollen im Folgenden die Vorgänge bei der thermischen Konditionierung beschrieben werden. Die Beschreibung basiert auf den Herstellerangaben zu Verarbeitung und

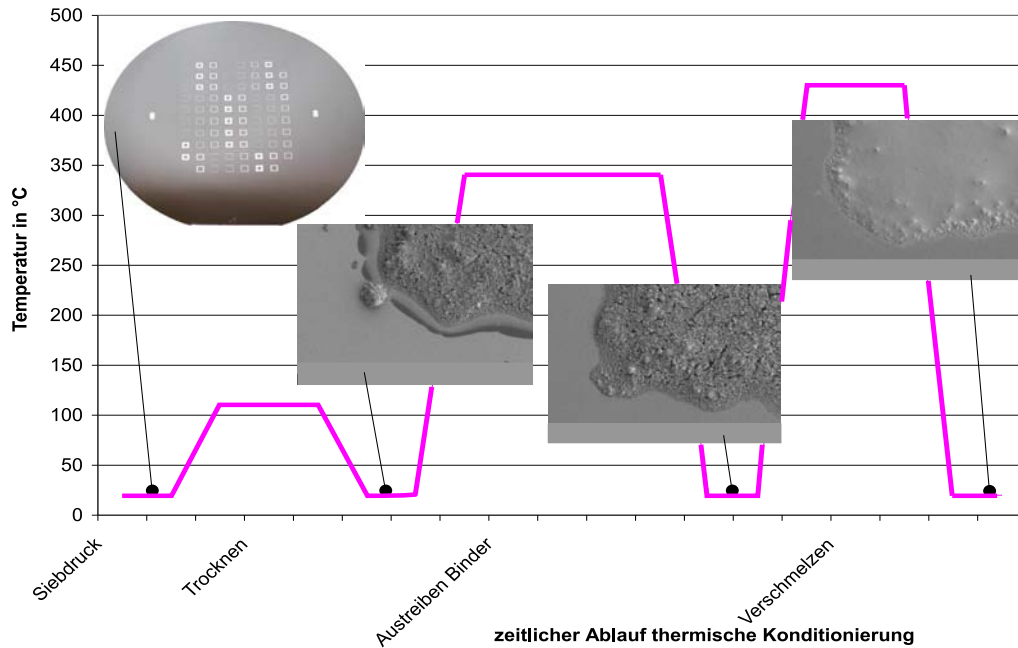


Abbildung 4.57: Ablauf der thermischen Konditionierung der Paste FERRO FX11-036

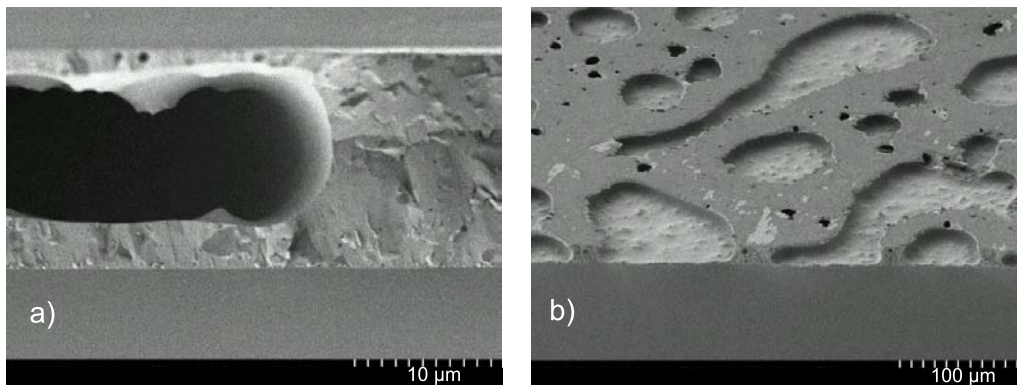


Abbildung 4.58: Auftreten von Hohlräumen in der Bondfuge bei unzureichender Vorkonditionierung a) Querschnitt, b) Bondglas nach Zugversuch

Zusammensetzung des Materials sowie auf umfangreichen eigenen Untersuchungen. Die Bezeichnungen der einzelnen Prozessschritte sind an die des Pastenherstellers angelehnt. Im ersten Temperaturschritt, dem Trocknen (100-120°C für 5-7 Minuten), werden die verbliebenen Lösungsmittelreste ausgetrieben und es kommt zu einer Polymerisation des Binders, d.h. seine Moleküle werden zu langkettigen Polymeren verlinkt, der Stoff verfestigt sich. Als Polymerisator wirkt das in der Paste enthaltene Isobutyl-Metakralat, welches durch Wärme aktiviert wird. Tests haben gezeigt, dass die gedruckten Strukturen nach der ersten Wärmebehandlung deutlich stabiler gegenüber mechanischer Einwirkungen sind. Die Glasbestandteile zeigen zu diesem Zeitpunkt noch keine Veränderungen. Sie weisen eine kantige Gestalt auf, die vom Zer-



kleinern des Glases herrührt. Abbildung 4.59 zeigt den Zustand der gedruckten Glaspaste nach dem Trocknen.

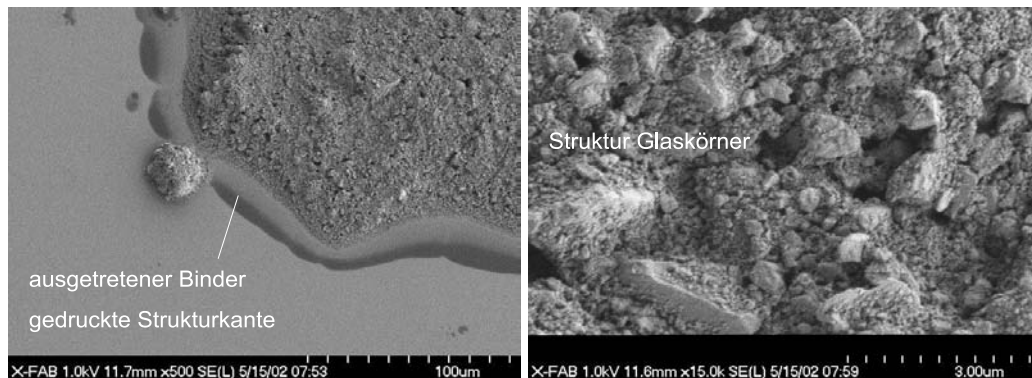


Abbildung 4.59: Gedruckte Glasstruktur nach dem Trocknen (REM-Aufnahmen)

Nach dem Trocknen folgt das Austreiben des Binders, der so genannte “Glazing“-Schritt. Die Namensgebung rührt daher, dass durch Erhitzen auf 325-350°C (10-20 Minuten) die Binderanteile ausgetrieben werden und danach eine Glasstruktur ohne organische Bestandteile vorliegt - Abbildung 4.60. Da in diesem Prozessschritt der Binder verloren geht, es aber noch nicht zu einer kompletten Verschmelzung der Glaspartikel kommt, müssen neue Verbindungen zwischen den Glaskörnchen und zum Wafer entstehen. Wie bereits erwähnt, sind in der Glaspaste zwei Glasarten enthalten. Das Blei-Zink-Borosilikatglas liegt, bedingt durch seinen sehr hohen Bleianteil, in seiner dilatometrischen Erweichungstemperatur etwa im Bereich der Glazing-Temperatur. Die stark bleihaltigen Glaspartikel erreichen in diesem Temperaturschritt eine ausreichend niedrige Viskosität um zu verrunden und mit benachbarten Körnern gleicher Zusammensetzung zu verschmelzen. Zu den Barium-Borosilikatglas-Körnchen, die bei 350°C keine signifikante Viskositätsveringerung aufweisen (kein Verrunden) und zu der Siliziumwaferoberfläche werden feste Verbindungen, im Sinne von Glasverschmelzungen, durch das erweichte Blei-Zink-Borosilikatglas hergestellt. Die Barium-Borosilikatglas-Partikel verhindern beim Glazing ein komplettes Verschmelzen der Glasschicht und führen somit zu einer porösen Struktur. Durch die Poren kann der Binder komplett entweichen, wodurch eine Blasenbildung beim späteren kompletten Verschmelzen vermieden wird (Abbildung 4.60).

Durch EDX-Analysen konnten im geglasten Zustand die beiden Glassorten identifiziert werden. Die schon leicht verschmolzenen größeren Bereiche bestehen aus dem stark bleihaltigem Glas, während die noch unverschmolzenen kantigen Strukturen deutlich weniger Blei enthalten (Abbildung 4.61) und somit dem Bariumsilikatglasfüller zuzuordnen sind. In der rasterelektronenmikroskopischen Abbildung ist deutlich die poröse Struktur zu erkennen.

Das Bonden einer derartig porösen Struktur ist nicht möglich, da es zum einen aufgrund der Porosität zu Gaseinschlüssen im Bondinterface kommen würde und zum anderen eine reprodu-

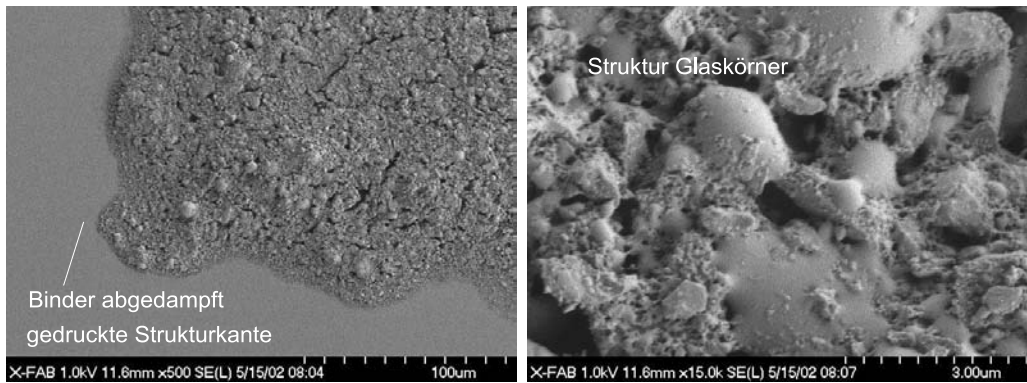


Abbildung 4.60: Gedruckte Glasstruktur nach dem Austreiben des Binders (REM-Aufnahmen)

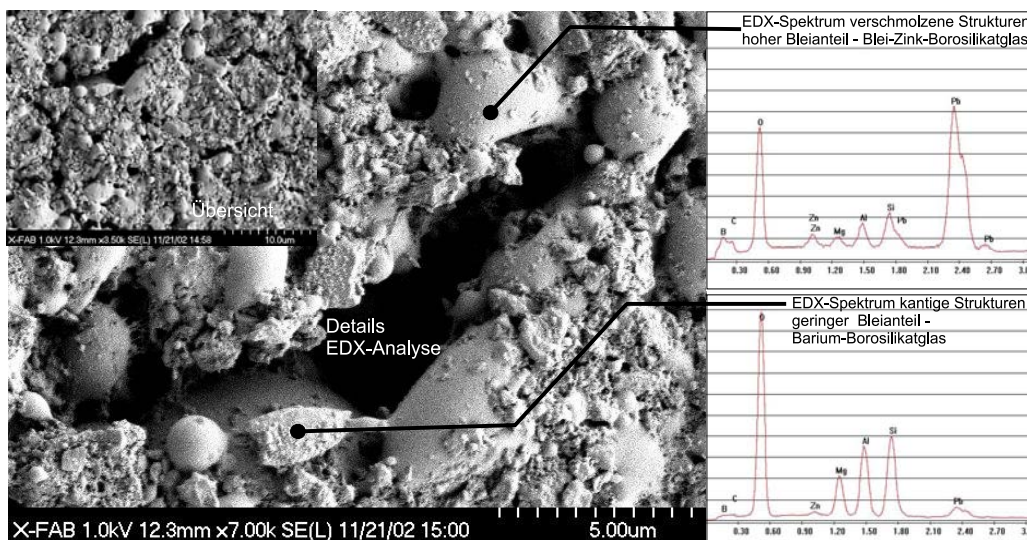


Abbildung 4.61: REM-Aufnahmen und EDX-Analysen an geglaster Struktur (10 keV 200 s)

zierbare Druckeinleitung in die Glasschicht nicht möglich wäre. Aus diesem Grund ist ein weiterer Temperaturschritt, das "Sealing", d.h. das vollständige Verschmelzen der Glasbestandteile zu einem kompakten, dichten Glas notwendig. Dazu wird der Wafer auf die Benetzungstemperatur, die deutlich oberhalb der dilatometrischen Erweichungstemperatur des Bleisilikatglases liegt, erwärmt. Bei diesem Prozess wird der Bariumsilikatglasfüller nicht mit aufgeschmolzen, da seine Erweichungstemperatur deutlich oberhalb der Benetzungstemperatur des Bleisilikatglases liegt. Das Bleisilikatglas erreicht jedoch eine ausreichend niedrige Viskosität um die Füllerpartikel zu benetzen, so dass diese vollständig von dem Bleisilikatglas umflossen und somit in die Glasschicht eingeschmolzen werden, wie Abbildung 4.62 zeigt. Dabei kommt es jedoch nicht zu einer glaschemischen Vereinigung der beiden Glasarten. Die Gläser können sich durch ihre unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen nicht ineinander lösen. Somit ist auch beim späteren Bondprozess das Temperatur- und Benetzungsverhalten des Bleisilikatgla-

ses entscheidend. Bei den mechanischen Verhalten überlagern sich hingegen die beiden Gläser additiv. So wird bewusst die sehr hohe thermische Dehnung des Bleisilikatglases durch den Füller herabgesetzt. In diesem Sinne kann man bei der Lotglasschicht von einem Mischglas sprechen.

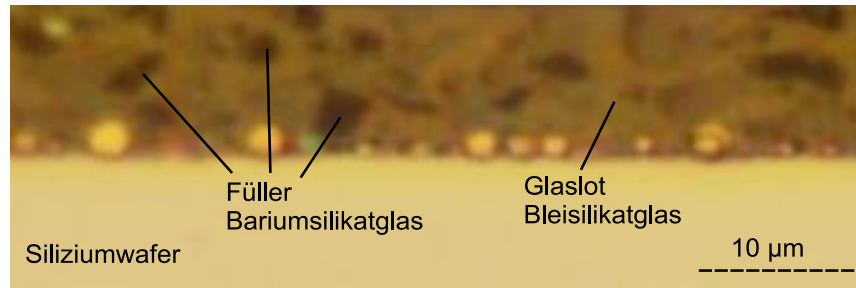


Abbildung 4.62: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Schliffes durch das Glaslot FX11-036

Bedingt durch die Unterschiede in den thermischen Eigenschaften von Glas und Silizium (Wärmekapazität und -leitfähigkeit) erwärmt sich der Siliziumwafer etwas schneller als das Glas, so dass die Verschmelzung der Gläser an der Grenzfläche Silizium-Glas beginnt und dann in Richtung freie Glasoberfläche fortschreitet. Durch diesen zeitlichen Ablauf des Verschmelzens werden Gaseinschlüsse im Glas vermieden, da die Luft aus den Poren nach oben durch die noch nicht verschmolzenen Glasbereiche entweichen kann (Abbildung 4.63). In REM-Aufnahmen der komplett geschmolzenen Glasschichten (Abbildung 4.64) ist deutlich zu erkennen, dass es sich um kompaktes Glas handelt. Die Erhebungen auf der Glasoberfläche sind in die Bleisilikatglasschicht eingebettete Füllerpartikel, die beim Sealing nicht aufschmelzen.

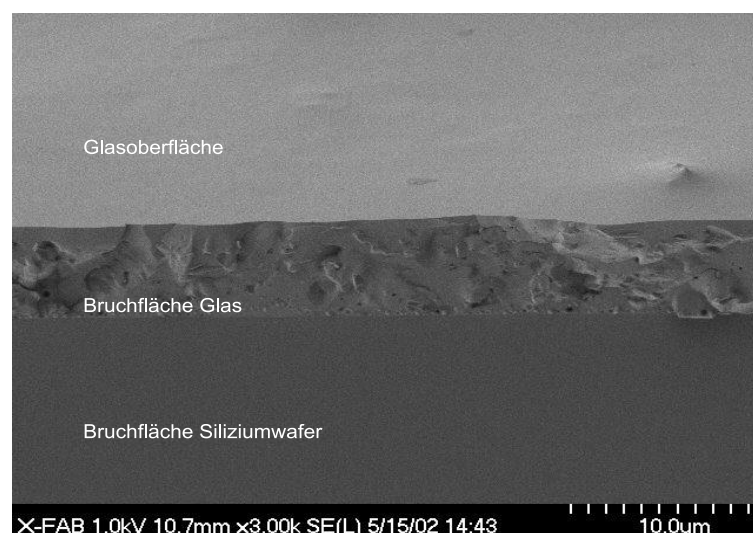


Abbildung 4.63: REM-Querschnittsaufnahme durch komplett geschmolzene Struktur - keine Blasen erkennbar

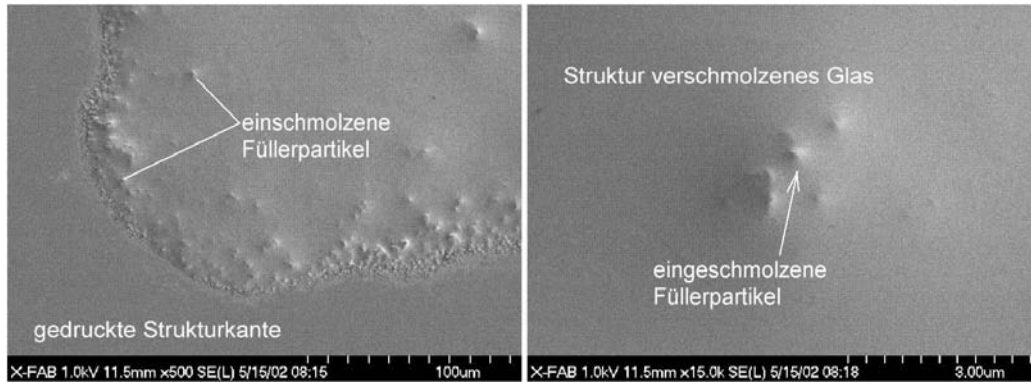


Abbildung 4.64: Gedruckte Glasstruktur im komplett verschmolzenen Zustand (REM-Aufnahmen)

### 4.5.7.3 Geometrische Veränderungen der Glasstrukturen

Da bei dem Verschmelzen die Porosität des Glases aufgehoben wird, kommt es zu einer deutlichen Verdichtung. Diese äußert sich darin, dass die Dicke des Glases im letzten Temperaturschritt deutlich abnimmt. Eine Verringerung auf die Hälfte der Druckdicke, wie in der Spezifikation [35] angegeben, konnte typischerweise beobachtet werden. In Abhängigkeit von Druckprozess und Strukturgeometrie kommt es aber auch zu größeren oder geringeren Verdichtungsverhältnissen (Abbildung 4.65).

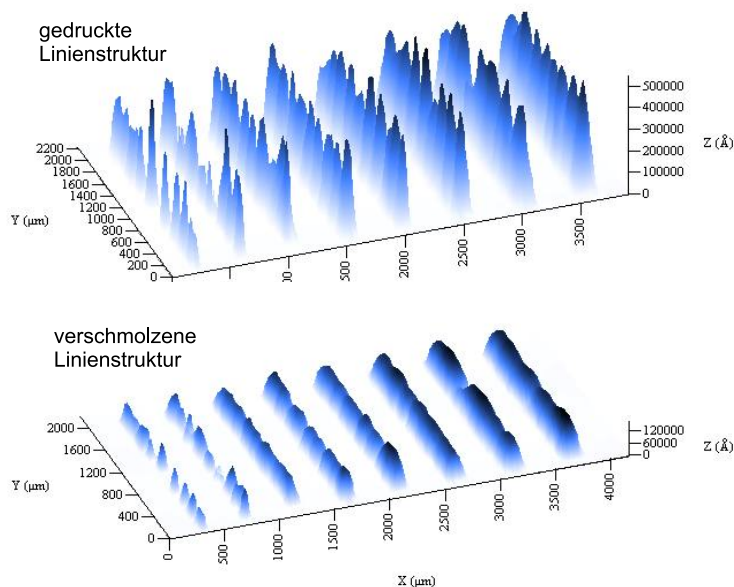


Abbildung 4.65: Verdichtung und Verrundung von Siebdruckstrukturen beim Einschmelzen des Bondglases)

Bedingt durch die Oberflächenspannung des Glases im geschmolzenen Zustand kommt es zu einer Verrundung der vertikalen Kanten sowie zu einer Glättung der Glasoberfläche wie die Abbildung 4.66 zeigt. Die laterale Geometrie der Strukturen am Fußbereich (Grenzfläche Silizium- Glas) wird durch die Temperaturprozesse quasi nicht verändert (Abbildung 4.67). Dies bedeutet, dass die Geometrie der bondbaren Glasstruktur der Gestalt der gedruckten Struktur entspricht und keinerlei Korrekturmaßnahmen bei der Sieberstellung notwendig sind. Der Erhalt der Strukturen ist auf den mehrstufigen Temperaturprozess, mit der schrittweisen Umwandlung der Paste in ein massives Glas zurückzuführen. Voraussetzung ist eine waagerechte Lagerung der Wafer im Ofen, um ein Verlaufen des Glases in der Waferebene im warmen Zustand zu verhindern.

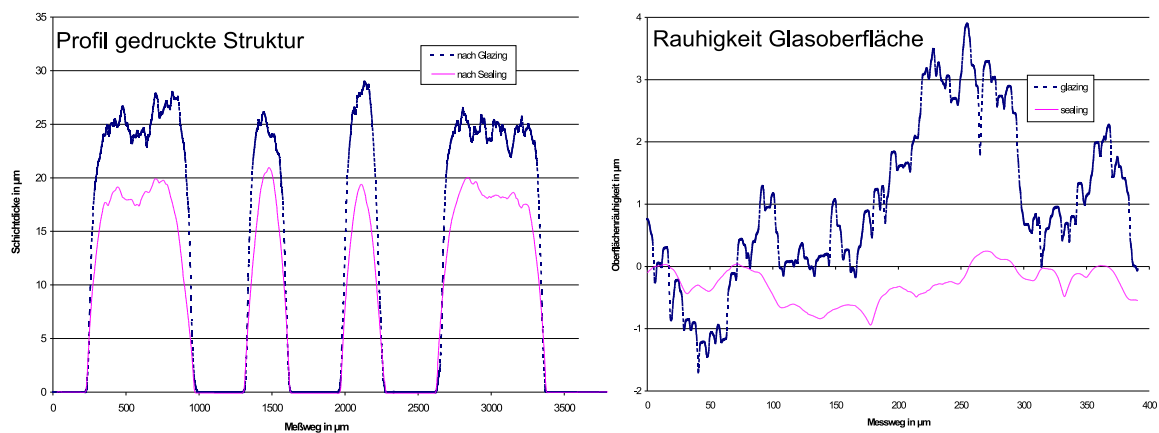


Abbildung 4.66: Messungen an vorverschmolzenen Glaslotstrukturen mittels mechanischen Profilometer

#### 4.5.7.4 Bewertung des Verschmelzungsverhalten

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die untersuchte FERRO-Paste ideal an das Aufbringen auf eine Oberfläche angepasst ist. Ein polymerisierender Binder ermöglicht das Aufbringen von Glaspartikeln auf eine Waferoberfläche sowie eine sichere Verfestigung der Struktur nach einer Behandlung bei 120°C. Der Binder wird bei ca. 350°C ausgetrieben und durch Verschmelzen der Blei-Glaskomponente entsteht eine poröse Glasstruktur, die um 440°C durch komplettes Aufschmelzen zu einer kompakten blasenfreien Glasschicht verdichtet werden kann. Abbildung 4.68 fasst den Prozessablauf nochmals schematisch zusammen. Das beim Einschmelzen der Paste entstehende Glas ist ein Mischglas aus den beiden Glaskomponenten, wobei der Füller in das Bleisilikatglas eingeschmolzen wird. Durch die Mischung der Glaspulver lassen sich gezielt die Eigenschaften des aufgetragenen und verschmolzenen Glases einstellen. In diesem Falle der thermische Ausdehnungskoeffizient des Glaslotes und die Porosität beim Austreiben des Binders .

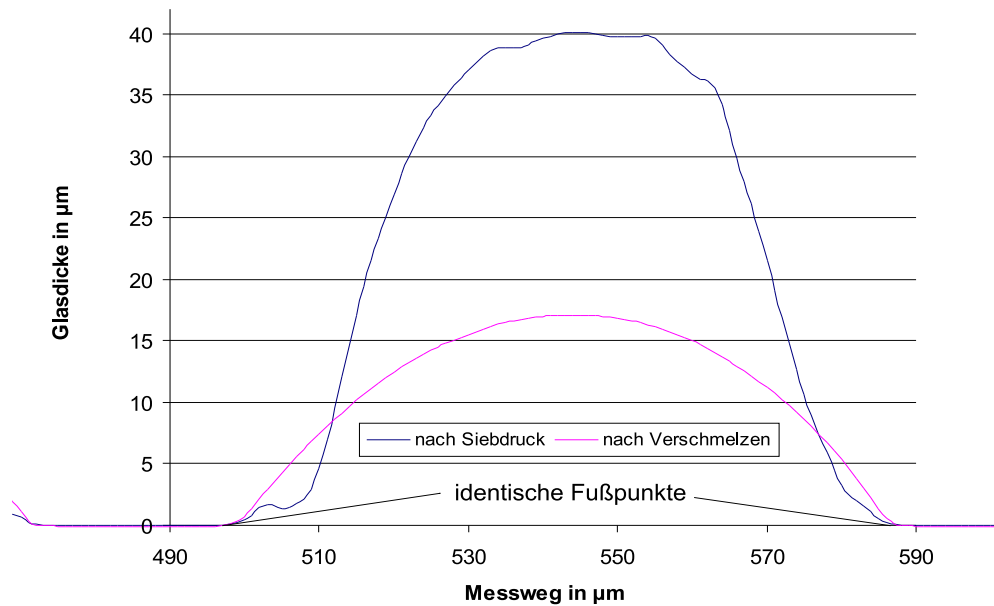
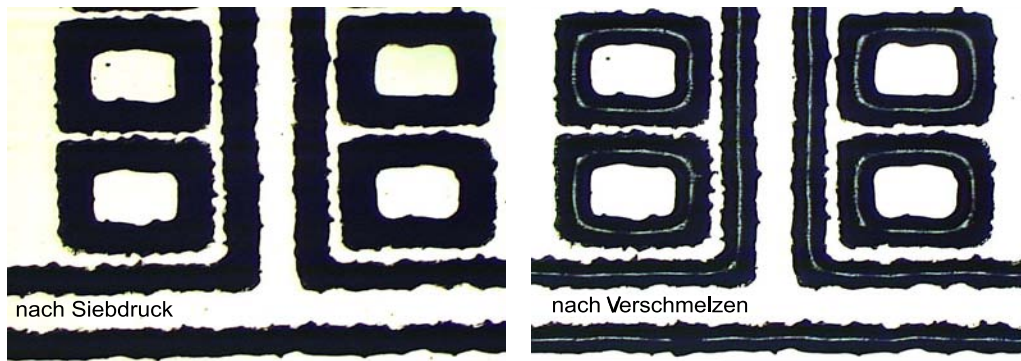


Abbildung 4.67: Strukturtreue über die Temperaturprozesse - Strukturkanten verlaufen nicht beim Verschmelzen

## 4.5.8 Bonden

### 4.5.8.1 Ausbildung der Bondverbindung

Betrachtet man die Glaslotbondverbindung zwischen zwei Wafern makroskopisch, so stellt man fest, dass es sich um eine stoffschlüssige Verbindung handeln muss. In der Regel werden ebene, quasi parallel verlaufende Bereiche von Waferoberflächen miteinander verbondet, wodurch Kraftschluss durch Verspannen ausgeschlossen werden kann. Auch lassen die sehr ebenen und glatten Oberflächen das Wirken von Formschluss nicht zu. Die Abbildung verdeutlicht diese Aussagen anhand von Beispielen unterschiedlicher Glasverschmelzungen.

Beim Glaslotbonden dient eine Zwischenschicht zur Verbindung zweier Wafer. Dies bedeutet,

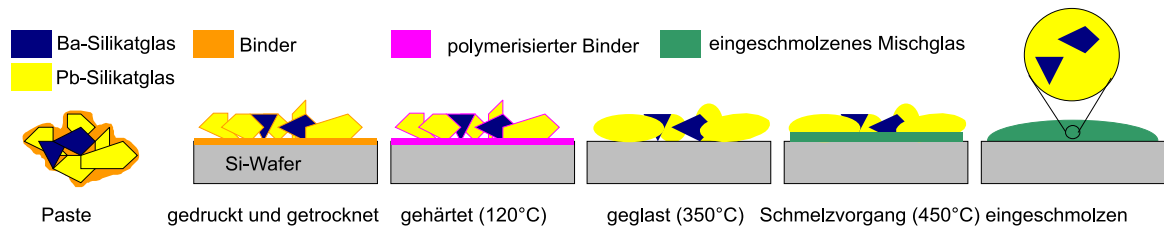


Abbildung 4.68: schematische Darstellung thermische Konditionierung Ferro FX11-036

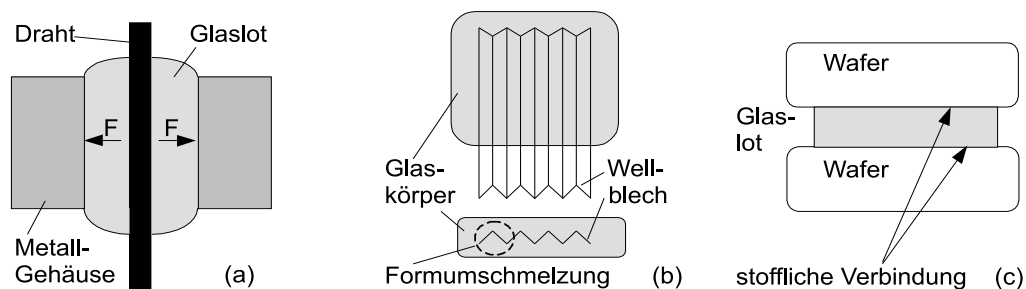


Abbildung 4.69: Möglichkeiten von Glasverschmelzungen - (a) Druckglasdurchführung eines Drahtes - Kraftschluss, (b) formschlüssiges Einschmelzen eines Wellbleches in einen Glaskörper, (c) stoffschlüssige Glaslotverbindung

dass im Bereich der Verbindungsstelle zwei Grenzflächen bestehen, die zur Ausbildung der Bondverbindung beitragen. Die Grenzflächen werden hiermit wie folgt definiert.

- Grenzfläche GF1: Berührungsfläche Silizium -Glaslot, die beim Siebdruck entsteht und durch die Temperaturprozesse vor dem Bonden in ihren Eigenschaften bestimmt wird.
- Grenzfläche GF2: Glaslot-Silizium, die beim Bonden entsteht und dabei in ihren Eigenschaften definiert wird.

Da die Verbindungsbildung an beiden Grenzflächen vom Glaslot ausgeht, wirken prinzipiell die gleichen Mechanismen, so dass im Folgenden beide Fälle gemeinsam behandelt werden können.

Die Verbindungsbildung zwischen Wafer und Glaslot ist ein mechanisch-chemischer Prozess und kann prinzipiell ausgehend von Metall-Glasverschmelzungen, wie sie in [45] und [46] dargestellt sind, erklärt werden. Die Theorie besagt, dass sich Metalle und Gläser verbinden, in dem das ausreichend erwärmte Glas aufgrund seiner geringen Viskosität das Metall benetzt, so dass Oberflächenoxide der Metalle im Glas gelöst werden. Im Ergebnis dieses Prozesses entsteht nach der Abkühlung ein Mischglas im Bereich der Grenzfläche, welches einen kontinuierlichen

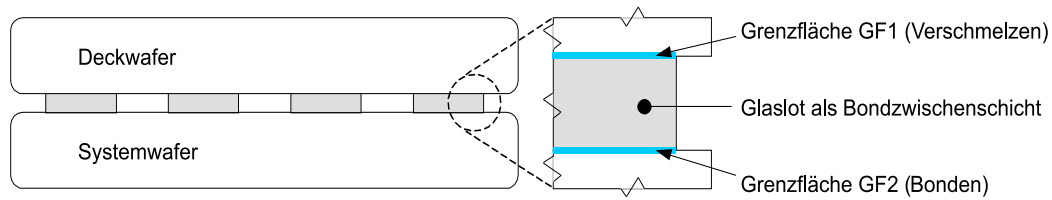


Abbildung 4.70: Grenzflächenverhältnisse einer Glaslotwaferverbindung

Übergang zwischen Metalloxid und Glas darstellt und somit die Verbindung zwischen Metall und Glaslot realisiert. Man kann aus diesem Modell zunächst zwei notwendige Bedingungen für die Ausbildung der Glaslotverbindungen ableiten.

1. Die mechanische Bedingung: Glaslot muss den Wafer benetzen, damit es sich auf seiner Oberfläche verteilen kann, so dass ein inniger Kontakt zwischen Wafer und Glaslot zustande kommt, ohne dass Gaseinschlüsse (Blasen) in der Kontaktfläche entstehen.
2. Die chemische Bedingung: Im Bereich der Grenzfläche muss es zu einer glaschemische Reaktion kommen, in deren Verlauf es durch Diffusions- oder Lösungsvorgänge zur Ausbildung eines Mischglases kommt, welches die eigentliche stoffliche Verbindung realisiert.

Zunächst soll die mechanische Bedingung näher untersucht werden. Da es sich bei dem Glaslot um einen Stoff handelt, dessen Viskosität sich durch Temperaturerhöhung kontinuierlich verringern lässt kann man eine Temperatur definieren, ab der eine Benetzung von Oberflächen gleicher Temperatur möglich ist. Die Benetzungsviskosität liegt im Bereich von  $10^6$  Poise, die dazugehörige Temperatur ist experimentell bestimmbar (siehe 4.5.8.2) und entspricht der Verarbeitungstemperatur der kommerziellen Glaslotmaterialien.

Zur Bewertung der Benetzung von Flächen mit viskosen Materialien kann die Randwinkelmethode verwendet werden. Dabei gilt: je kleiner der Randwinkel, um so besser die Benetzung der Fläche. Um die Benetzung der Deckwafer (Grenzfläche GF1) zu untersuchen, wurden Randwinkel aus bestehenden Daten (REM-Aufnahmen, Profilometermessungen) bestimmt. Nach dem Abschluss alle Temperaturschritte (sealing) lag der Randwinkel des Ferro-Materials unter  $30^\circ$ . In einigen Fällen konnten Randwinkel kleiner  $10^\circ$  gemessen werden. Beachtet man, dass die Viskosität des Glases beim Glazing noch deutlich über den Wert von Flüssigkeiten liegt, so kann man davon ausgehen, dass der Benetzungsgrad der Siliziumoberfläche sehr hoch ist. Des Weiteren lässt sich aus den Profilometermessungen ableiten, dass die Benetzung der Oberfläche erst beim Einschmelzen der Pastenpartikel zu einem massiven Glas (sealing) erfolgt. Bei diesem Schritt kommt es zu einer Abnahme des Randwinkels um nahezu  $40^\circ$ , bedingt durch die bei der höheren Temperatur erreichte geringere Viskosität. REM-Aufnahmen belegen diese



Feststellung, während nach dem Glazing (350°C) nur partiell Kontakt zwischen Glaslot und der Waferoberfläche besteht, ist nach dem Sealing (450°C) ein vollflächiger Kontakt erkennbar (Abbildung 4.72).

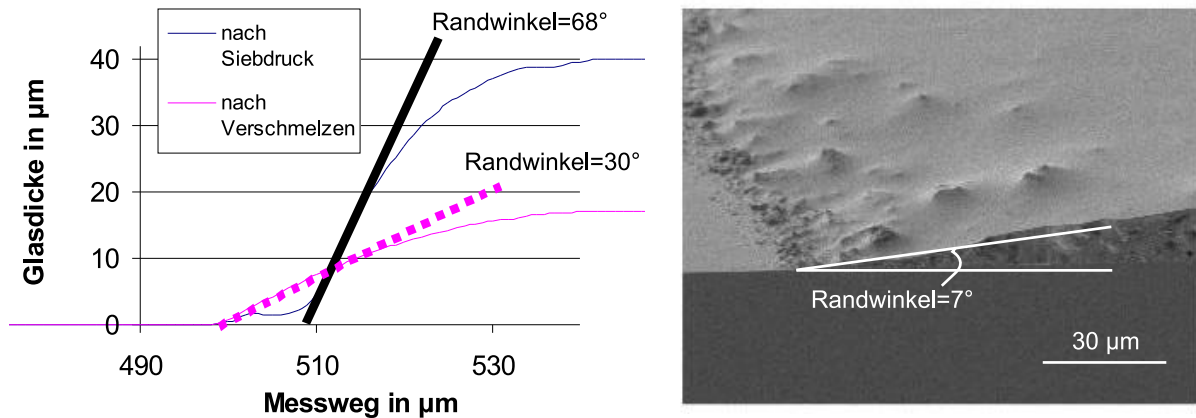


Abbildung 4.71: Randwinkeluntersuchungen anhand von Daten aus Profilometermessungen(links)und REM-Untersuchungen

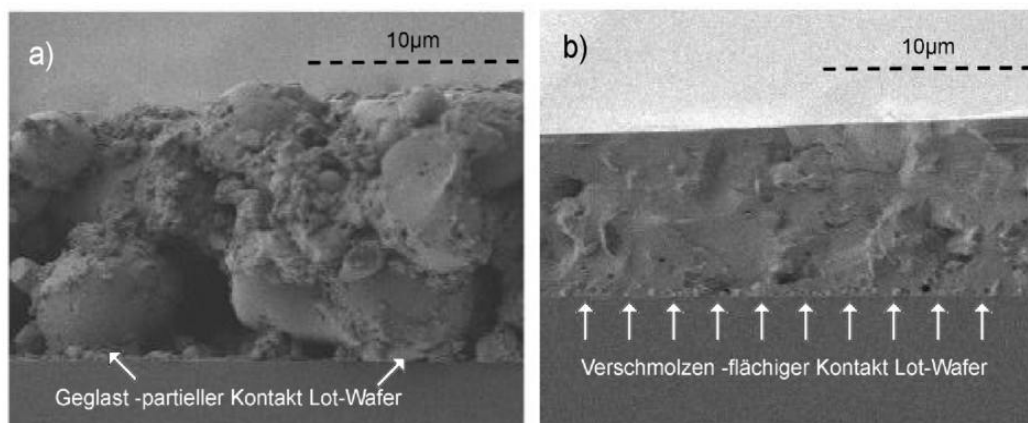


Abbildung 4.72: Nachweis der Benetzung der Siliziumoberfläche: a) partiell nach dem Austreiben des Binders b) vollflächig nach dem Verschmelzen

Auch beim Bonden der vorpräparierten Deckwafer ist die Benetzung des Systemwafers (Grenzfläche GF2) Grundvoraussetzung. Um das Benetzungsverhalten beim Bonden zu untersuchen, wurden Schriffe gebondeter Chips hergestellt. In den Querschnittsbildern erkennt man deutlich, dass auch beim Bonden eine sehr gute Benetzung auftritt. Der Abschluss des Glaslots in der Bondfuge ist konkav, d.h. das Glas ist sowohl an der Oberfläche des Deck- als auch des Systemwafers deutlich verlaufen. Der etwas größere Randwinkel deutet darauf hin, dass die Temperatur beim Bonden, wenn auch ausreichend hoch, doch etwas geringer als beim

Sealing-Prozess war. Ein weiteres Detail beweist, dass das Glaslot beim Bonden eine ausreichend geringe Viskosität erreicht hat. An einer unterätzten Struktur eines Grabens kam es zum Umfließen der hinterschnittenen Struktur, wobei die obere Kante ideal vom Glas umschlossen wurde. Dies ist nur durch eine optimale Benetzung zu erreichen.

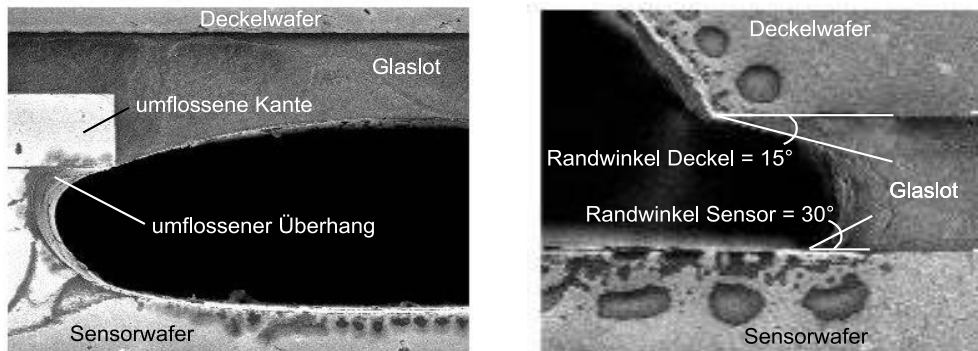


Abbildung 4.73: Benetzung der Oberfläche des Systemwafer beim Bonden

Die glaschemische Reaktion von Oberflächenschichten der zu bondenden Wafer mit dem Lotglas und das damit verbundene Entstehen eines Übergangsglases im Interface Lotglas-Wafer konnte analytisch nicht nachgewiesen werden, da keine entsprechenden Verfahren zur Verfügung standen. Querschnittspräparationen, die in der Abbildung 4.74 zu sehen sind, stützen jedoch die von Metall-Glasverschmelzungen bekannte Theorie der Lösung von Oberflächenschichten im Glas. In einem polierten Querschliff eines Bondinterfaces sind 3 Zonen zu erkennen: in der Mitte das ungestörte Glaslot, an das sich beidseitig Übergangszonen im Glas anschließen, die das verbindende Mischglas hin zum Silizium sein könnten, obwohl die Dicke dieser Übergangsschichten mit 2 bis 3  $\mu\text{m}$  recht groß scheint. In einer Bruchpräparation sind unmittelbar im Interfacebereich Glas-Silizium Störungen im Glasgefüge zu erkennen, die ebenfalls durch die verbindungs bildenden Lösungsvorgänge im Glas hervorgerufen sein könnten. Die Ausdehnung dieser Störungszone von weniger als 1  $\mu\text{m}$  ist deutlich geringer als im polierten Schliff, was eher auf Lösungsvorgänge hindeutet. Aufgrund dieser beiden Beobachtungen ist die aus der Theorie der Glas-Metall-Verschmelzungen übernommene Auffassung, dass die Verbindung durch Lösungsvorgänge von Oberflächenschichten im Glas und das Ausbilden eines Mischglases, das einen kontinuierlichen stofflichen Übergang Glas-Bondoberfläche darstellt, ausgebildet wird gerechtfertigt.

#### 4.5.8.2 Bondvorgang

Aus den obigen Ausführungen zur Ausbildung der Bondverbindung lassen sich der Ablauf und die Parameter des Bondprozesses ableiten. Im Sinne des Prinzips des Thermokompressi-

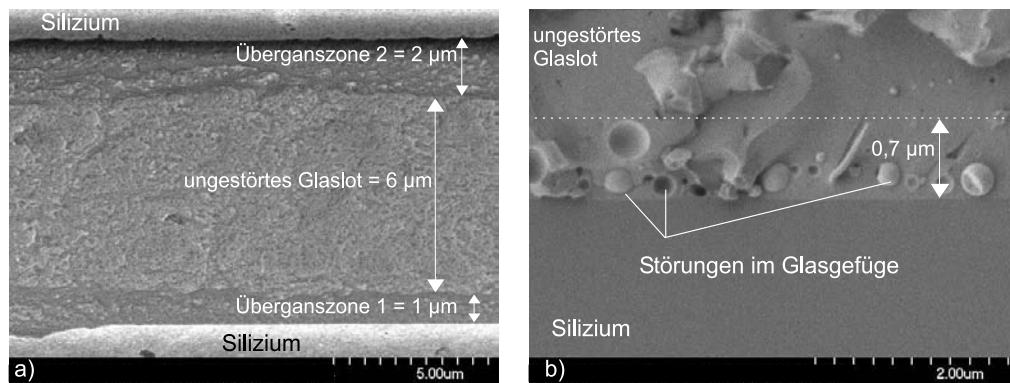


Abbildung 4.74: Verbindungsbildung Glas Bondoberfläche durch Lösungsvorgänge im Glas und Mischglasbildung a) polierter Schliff, b) Bruch

onsbondens müssen die Wafer unter mechanischem Druck aufgeheizt werden, so dass es bei Erreichen der Verarbeitungstemperatur zur Ausbildung einer Verbindung kommt, die sich beim Abkühlen verfestigen kann. In Versuchen wurden die Einflüsse der Hauptparameter untersucht. Dazu wurden Glas- auf Siliziumwafer mit Lotglasstrukturen gebondet. Nach der Abkühlung konnte das Bondinterface optisch inspiziert und die Größe des gebondeten Teils des Bondrahmens vermessen werden:

- **Bondtemperatur:** Wie bereits erwähnt, muss die Temperatur beim Bonden ausreichend hoch sein, um eine Benetzung der zu bondenden Fläche als notwendige Bedingung für die Verbindungsbildung zu erreichen. Um die minimal notwendige Bondtemperatur zu ermitteln, wurde bei geringem Bonddruck<sup>53</sup> gebondet. Es zeigte sich dabei, dass eine Temperatur von 430°C notwendig ist, um eine selbständige Benetzung der Bondfläche zu erreichen. Bei niedrigeren Temperaturen lassen sich zwar erste gebondete Bereiche im Bondinterface erkennen, es tritt aber keine vollständige Benetzung der Bondrahmengebiete auf und selbst bei sehr hohem Bonddruck kann kein vollständiges Bonden erreicht werden.
- **Bonddruck:** Anhand der Versuche zur Bondtemperaturermittlung wurde festgestellt, dass der Bonddruck eher eine unterstützende Wirkung hat und nicht wie ursprünglich angenommen eine notwendige Bedingung für das Bonden darstellt. Wird bei ausreichend hoher Temperatur eine Glasviskosität erreicht, die niedrig genug ist, dass das Glas selbsttätig die Bondfläche benetzen kann, so ist kein Druck für die Bondung notwendig. Das Glass benetzt die Bondfläche des Gegenwafers, zieht diesen dabei an und formt beim Abkühlen eine feste Verbindung. Ist bedingt durch eine zu geringe Bondtemperatur die Glasviskosität zu hoch, führt auch ein sehr hoher Bonddruck nicht zu einer vollständigen Bondung.

<sup>53</sup>ein geringer mechanischer Druck ist notwendig um die Fixierung der Wafer und einen guten Wärmeübergang zu sichern

Somit kann festgestellt werden, dass der ausschlaggebende Prozessparameter beim Glaslotbonden die Bondtemperatur ist. Dies wird durch die Abbildung 4.75 unterstrichen, die zeigt, dass sich nur bei ausreichend hoher Temperatur vollständig gebondete Bondrahmen realisieren lassen.

In der technologischen Praxis kann jedoch auf den Bonddruck nicht vollständig verzichtet werden, da er unterstützende Wirkungen auf den Bondprozess hat:

- Durch das Zusammendrücken der Wafer wird ein besserer und definierterer Wärmeeintrag in das Bondglaslot erreicht; dies ist besonders beim Bonden im Vakuum von großer Bedeutung.
- Prozessierte Wafer weisen bedingt durch mechanische Spannungen in Oberflächenschichten Verbiegungen<sup>54</sup> auf, die durch das Zusammendrücken der Wafer eliminiert werden, wodurch erst die benetzende Wirkung des Glaslotes auf dem Wafer ermöglicht wird.
- Der mechanische Druck ermöglicht den Ausgleich von größeren Höhenunterschieden im gedruckten Glaslot, der allein durch die Benetzung nicht sicher möglich wäre (siehe 4.5.5.3).

Aus dem geringeren Einfluss des Bonddruckes bei ausreichend hoher Bondtemperatur ergeben sich sogar technologische Vorteile.

- Eine Optimierung des Bonddruckes ist nicht notwendig, da in einem weiten Druckbereich (300 bis 1000 mbar) gleichbleibend gute Bondergebnisse erreicht werden können.
- Ein zu hoher Bonddruck führt nicht zum vollständigen Verlaufen der Bondrahmenstrukturen, da die Viskosität des Glases noch ausreichend hoch ist, um den Bonddruck aufzunehmen. Es ergibt sich nach einer Bondstrukturverbreiterung von ca. 40% ein stabiler Zustand.
- Da der mechanische Druck letztlich nicht dazu dienen muss die Bondrahmen breit zu drücken, besteht keine Korrelation zum Deckungsgrad der Bondrahmenstrukturen auf dem Wafer, d.h. der Bonddruck muss nicht an das Design verschiedener Sensortypen angepasst werden.
- Weiterhin können an die Parallelität der Druckplatten (Chuck und Bondwerkzeug) geringere Anforderungen gestellt werden. Abbildung 4.75 zeigt, dass die Homogenität einer Bondung bei niedrigerer Temperatur und hohem Druck deutlich geringer ist als bei Verwendung einer ausreichend hohen Temperatur.

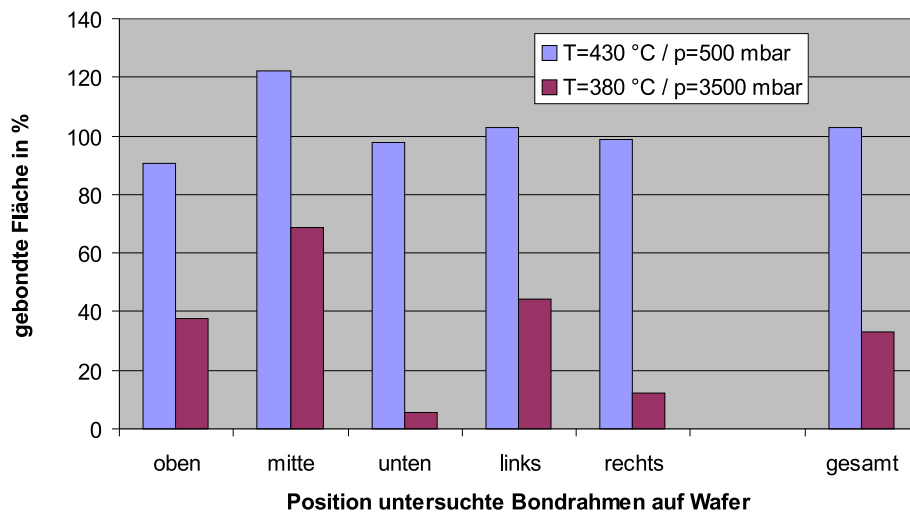


Abbildung 4.75: Homogenität der Ausbildung der Bondverbindung bei unterschiedlichen Bondparametern (Werte größer 100% entsprechen verlaufenen Bondrahmen)

Abbildung 4.76 fasst die Untersuchungen zu den Einflüssen von Bondtemperatur und -druck zusammen<sup>55</sup>. Daraus lässt sich ableiten, dass die optimalen Bondparameter eine Temperatur von 430°C und ein Druck im Bereich von 300 bis 1000 mbar sind. Unter diesen Bondbedingungen lassen sich geschlossene hermetisch dichte Bondrahmen bei einer hohen Bondausbeute erzielen, d.h. es liegt ein sehr stabiler und sicherer Bondprozess vor.

Da, wie das Diagramm in Abbildung 4.76 zeigt, sowohl eine Temperatur- als auch eine Druckerhöhung zu einer Vergrößerung der tatsächlich gebondeten Bondrahmenfläche beitragen, lässt sich aus den Bildern der Versuchsreihen des Bondens bei niedriger Temperatur und ansteigendem Druck das Verhalten des Glaslotes bei ausreichend hoher Bondtemperatur rekonstruieren. Dazu ist der schrittweise, während mehrerer aufeinander folgender Bondprozesse, erhöhte Bonddruck mit der sich während einer Einzelbondung stetig erhöhenden Temperatur gleichzusetzen, die zur Verringerung der Glasviskosität und somit zur Benetzung der Bondfläche führt. In Abbildung 4.77 ist dem entsprechend der Ablauf einer Glaslotbondung rekonstruiert. Man kann erkennen, dass die Verbindungsbildung an den höchsten Stellen des Glaslotbondrahmens beginnt. Im weiteren Verlauf werden die umgebenden Bereiche benetzt, bis sich die einzelnen gebondeten Gebiete vereinigen und einen geschlossenen Bondrahmen bilden. Im weiteren Verlauf kann es bedingt durch Benetzungsvorgänge am Bondrahmenrand und den Unterstützungsdruck zum seitlichen Verlaufen des Bondrahmens kommen.

<sup>54</sup>besonders das Glaslot selbst führt aufgrund seiner begrenzten thermischen Anpassung an das Silizium zu starker Verbiegung des Wafers auf den es einseitig aufgebracht ist

<sup>55</sup>Einzelbilder, aus denen die Messwerte des Diagramms ermittelt wurden, befinden sich im Anhang H

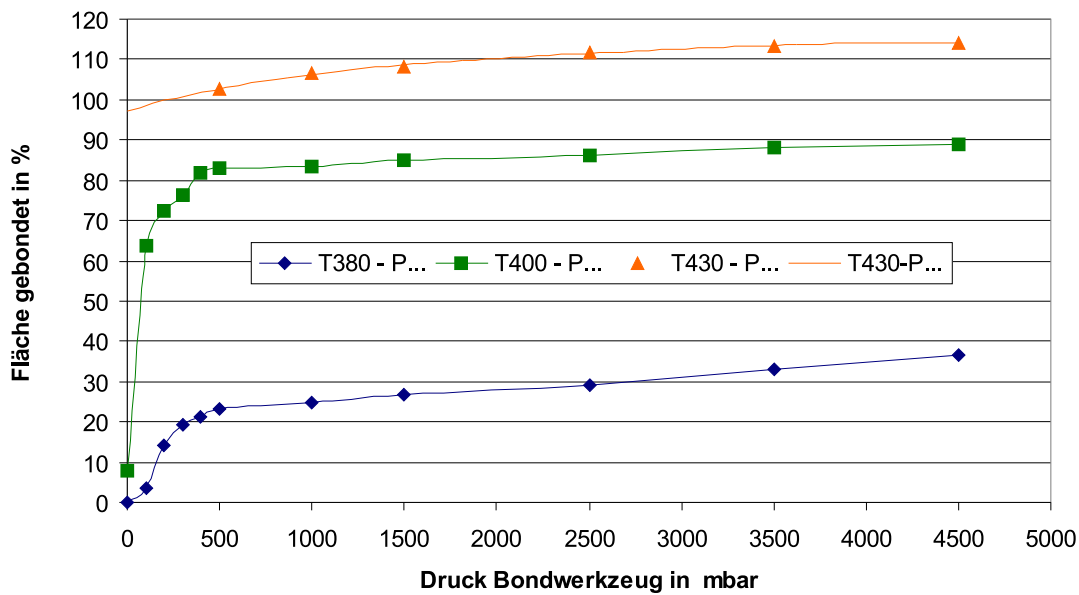


Abbildung 4.76: Einfluss von Bondtemperatur und Druck auf die Ausbildung der Glaslotbondverbindung

#### 4.5.8.3 Positioniergenauigkeit gebondete Wafer

Nach heutigem Stand der Technik können die beiden zu bondenden Wafer vor dem Bondvorgang mit einer Genauigkeit von ca.  $1 \mu\text{m}$  zueinander ausgerichtet werden, um sicherzustellen, dass die Strukturen beider Wafer wie gewünscht zueinander passen. Beim eigentlichen Bonden soll sich diese Positionierung nicht verändern, da ansonsten die Funktionsfähigkeit<sup>56</sup> des gebondeten Mikrosystems nicht mehr gewährleistet ist. Bei der Verwendung der Glaslotbondtechnologie ist die Aufrechterhaltung der Positioniergenauigkeit nicht selbstverständlich, da sich beim Bondvorgang eine weiche Masse zwischen den Wafern befindet, die bei Wirkung von Querkraftkomponenten zu einem gegenseitigen Verschieben der Wafer führt. Der dabei entstehende Versatz führt zu einer Fehlpositionierung der Wafer, die auch als Shift bezeichnet wird. Als die Verschiebung auslösende Querkraftkomponenten kommen folgende Faktoren in Betracht:

- nicht senkrechte und somit querkraftbehaftete Druckeinleitung in das Waferpaar bedingt durch Fehljustage des Bondwerkzeuges
- zeitlich gestaffelte Druckeinleitung, bedingt durch Bondwerkzeugkonzept (Membrantool<sup>57</sup>)

<sup>56</sup>Drahtbondpads sind nicht mehr erreichbar oder Funktionselemente werden angebondet

<sup>57</sup>eine flexible Stahlmembrane legt sich ausgehend von der Wafermitte an die Waferoberfläche an und presst

## Versuchsreihe schrittweise Bonddruckerhöhung

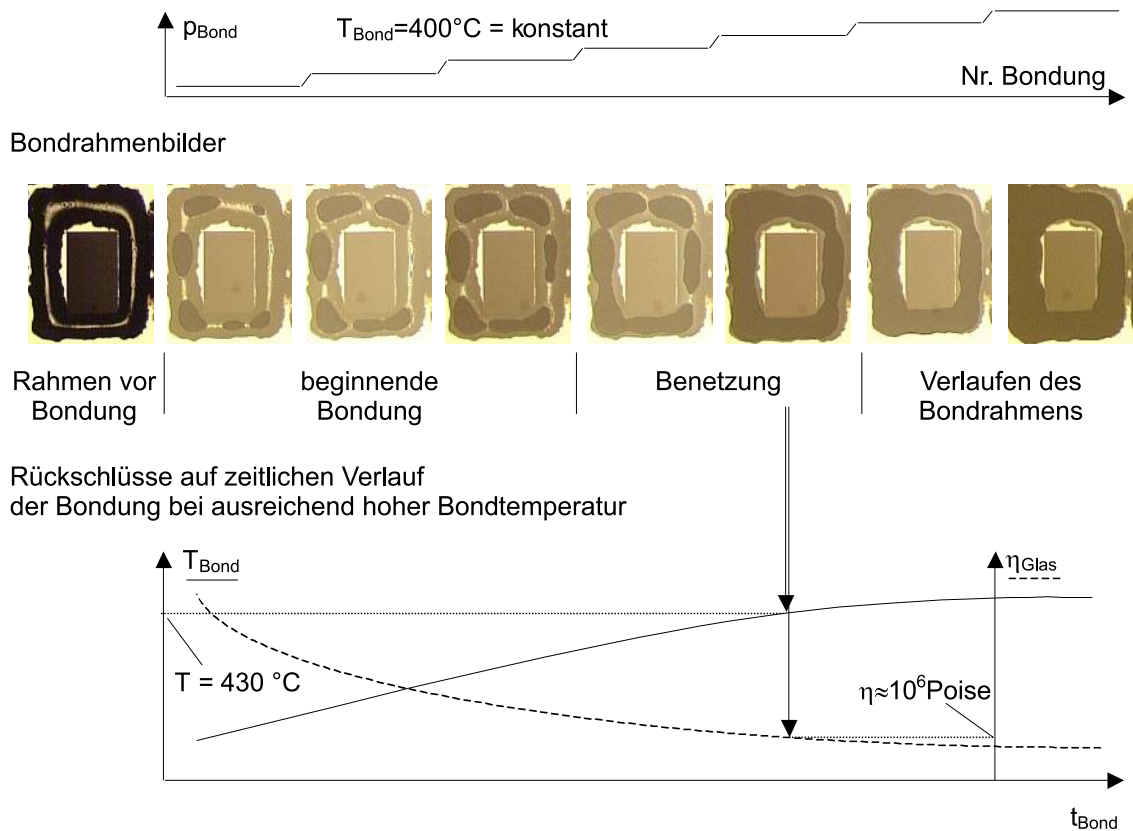


Abbildung 4.77: Rekonstruktion des zeitlichen Ablaufs der Ausbildung Glaslotbondverbindungen ermittelt anhand schrittweiser Druckerhöhung

oder Druckplatte mit Mittelstempel<sup>58</sup>)

- thermische Dehnungsunterschiede zwischen den Druckplatten und den zu bondenden Wafern lassen Kräfte auf das Waferpaar wirken, die letztlich in einer lateralen Verschiebung relaxieren.

Um die Einflüsse der Krafteinleitung auf die Verschiebung der Wafer beim Bonden zu untersuchen, wurden Versuche mit unterschiedlichen Bondwerkzeugkonfigurationen durchgeführt. Zur genaueren Vermessung des Versatzes<sup>59</sup> wurde neben dem für die spätere Produktion vor-

dadurch die Wafer zusammen, wobei bei den kleinsten Unregelmäßigkeiten Querkräfte auftreten

<sup>58</sup>die kleine Fläche des Mittelstempels (Durchmesser ca. 1cm) ermöglicht keine ausreichend senkrechte Justage, so dass es beim Absenken des Stempels bereits zum Verschieben der Wafer kommt

<sup>59</sup>Der Versatz fasst die Fehlpositionierung des gebondeten Waferpaares zusammen, die sich aus der Fehlaustrichtung vor dem Bonden und der Verschiebung während des Bondens ergibt. Zur Bewertung wird die Länge des Verschiebungsvektors, welche die x- und y-Komponente nach dem Satz des Pythagoras umfasst, herangezogen.

gesehen Positioniersystem ein zusätzliche feinere Skala in einen Maskensatz integriert. Abbildung 4.78 fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt, dass der angestrebte maximale Versatz von  $10\ \mu\text{m}$  sich nur reproduzierbar erzielen lässt, wenn die Querkräfte durch entsprechende einteilige Bondwerkzeuge mit in der thermischen Dehnung an das Silizium angepassten Siliziumkarbid-druckplatten erreicht werden können. Da die Querkräfte sich jedoch nicht vollständig vermeiden lassen, ist es notwendig, entgegen der üblichen Vorgehensweise das Waferpaar auch während der Bondung am Rand zu klemmen, damit die Restquerkräfte nicht zur Verschiebung der Wafer führen können<sup>60</sup>.

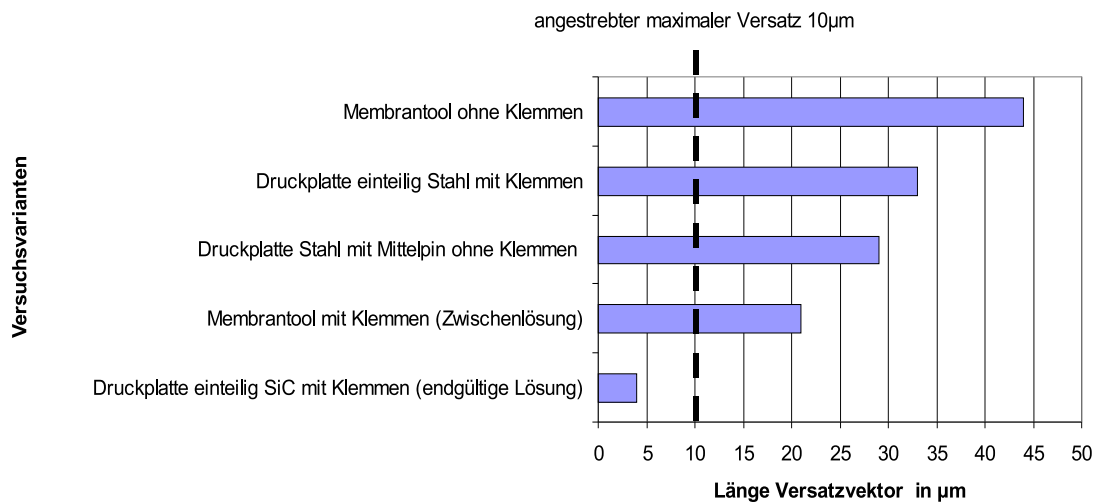


Abbildung 4.78: Minimierung des Versatzes der gebondeten Wafer beim Glaslotbonden

#### 4.5.8.4 Bonden im Vakuum

Glaslotbonden unter Vakuum zum Einschließen niedriger Drücke ist problemlos möglich. Da bei der thermischen Konditionierung die organischen Anteile nahezu vollständig ausgetrieben wurden, lassen sich Kammerdrücke von kleiner  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar erreichen. Lediglich nach Standzeiten von mehreren Monaten ist vor dem Bonden ein nochmaliges Ausheizen der mit dem Lotglas-Glaslot beschichteten Wafer notwendig, um Feuchte aus den obersten Glasschichten auszutreiben, die das Vakuum in der Bondkammer verschlechtern würde. Im übrigen ist wie bei allen Vakuumprozessen zu beachten, dass der Wärmereübergang durch die fehlende Konvektion verschlechtert ist. Ein Erhöhung des Drucks des Bondwerkzeuges, um die Wafer mit den Auflagen in innigen mechanischen Kontakt zu bringen und so die Wärmeleitung zu verbessern ist, nicht unbegrenzt möglich, da dies zum Breitdrücken des Glaslotes führen kann. Dabei kann

<sup>60</sup>Die Optimierung der Positioniergenauigkeit der gebondeten Waferpaare erfolgte mit Unterstützung der Süss Microtech AG Garching b. München



dies in Bereiche gelangen, in denen es die Sensorfunktion erheblich stört<sup>61</sup>. Das Abwarten des vollständigen Temperatúrausgleiches zwischen Heizer und Wafern dauert wiederum oftmals zu lange für eine industriellen Anwendung. Daher ist es notwendig, mit erhöhten Heizleistungen, d.h. erhöhten Zieltemperaturen, zu arbeiten, um den vakuumbedingten Temperaturabfall an Spalten zwischen den Wafern und den Auflagen zu kompensieren. Bei einseitiger Waferheizung ist eine Temperaturerhöhung von bis zu 100 K und bei zweiseitiger Heizung von 20 bis 40 K im Vergleich zum Bonden bei Normaldruck notwendig.

#### 4.5.8.5 Ablauf Bondprozess

Aus den obigen Ausführungen ergibt sich für den Bondprozess folgender zeitlicher Ablauf:

1. Ausrichten der zu bondenden Wafer anhand von Markensystemen
2. Laden der Wafer in die Bondkammer mittels Transportvorrichtung, die Handling und Aufrechterhaltung der Positionierung sicherstellt
3. Einstellung des Bondkammerdruckes entsprechend der Anwendung (Vakuum, Normal- oder Überdruck)
4. Absenken des Bondwerkzeuges auf das Waferpaar
5. Anlegen des Bonddruckes (300 bis 1000 mbar)
6. Aufheizen des Waferpaares unter dem angelegten Druck
7. Wartezeit zum thermischen Ausgleich des Systems, um sicherzustellen, dass die gewünschte Bondtemperatur erreicht wurde
8. eine Verweilzeit auf der Bondtemperatur ist nicht notwendig, da Benetzung der Bondfläche sehr schnell erfolgt und die eigentliche feste Verbindung erst beim Abkühlen erfolgt
9. Abkühlen der Wafer auf 200°C, erstarren des Glaslotes und Verfestigung der Verbindung
10. Abschalten des Bondwerkzeugdrucks
11. Ausgleich des Kammerdruckes auf Normaldruck
12. Lösen der Klemmen
13. Nachkühlen auf eine sichere Entladetemperatur im Bereich von 100 bis 200 °C abhängig von der konkreten Anwendung (Waferdicke, aktive Strukturen) unter Beachtung thermomechanischer Spannungen

---

<sup>61</sup>Anbonden beweglicher Strukturen, Abdecken optischer Elemente

14. Entnahme der Wafer aus der Bondkammer
15. Nachkühlen auf Raumtemperatur

Da der entwickelte Prozess in einer industriellen Massenfertigung eingesetzt werden soll, wurde mit den maximal möglichen Heiz- und Kühlgeschwindigkeiten der Bondanlage gearbeitet, ohne dass es zu thermisch induzierten Rissen kam. Mit den in Abbildung 4.79 nochmals illustrierten Prozess wurden bereits mehr als 100 Wafer erfolgreich gebondet.

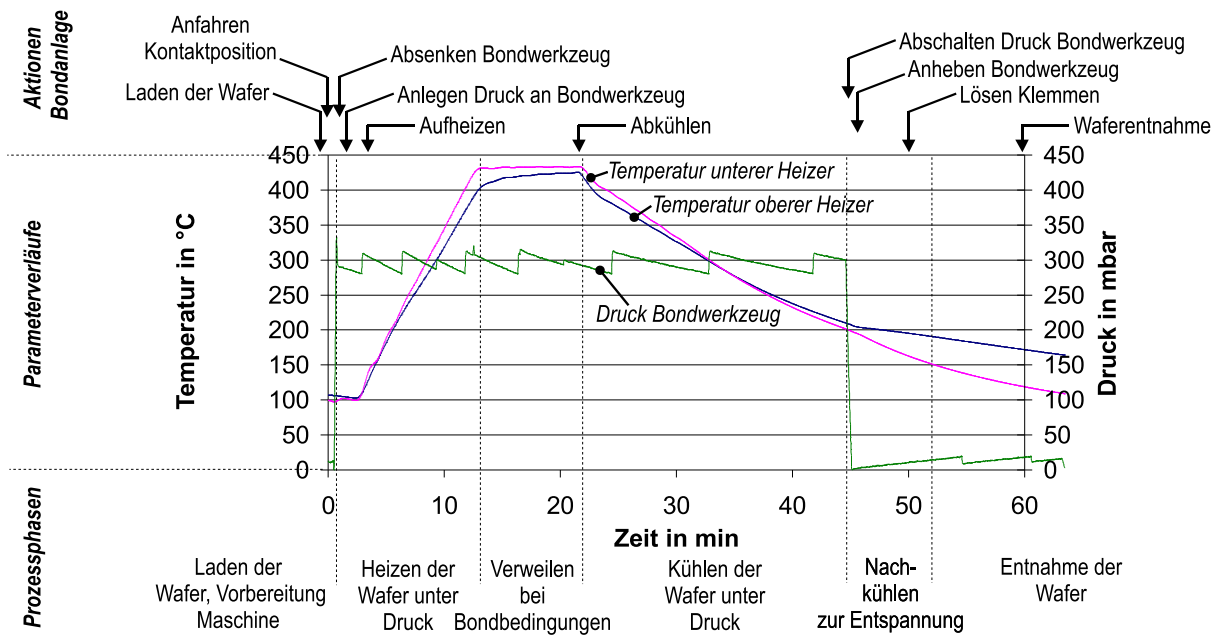


Abbildung 4.79: Ablauf Glaslotbondprozess

#### 4.5.8.6 Verlaufen des Glaslotes beim Bonden

Da die Position und die Ausdehnung des Glaslotbondrahmens durch den Siebdruck und die Ausrichtung der Wafer zueinander bestimmt werden soll, darf das Glaslot beim Bonden nur minimal verlaufen. Im Idealfall haben die gebondete und die gedruckte Grenzfläche Glas-Silizium etwa die gleiche Größe. Um dies zu erreichen, dürfen Bondtemperatur und Bonddruck nicht zu hoch gewählt werden. Kommt es dennoch zum Verlaufen des Glaslotes, wird in der Regel die besser benetzbare Grenzfläche stärker als die andere vom Glaslot bedeckt, so dass es nicht auf dem gesamten verlaufenem Gebiet zu einer Verbindungsbildung zwischen den beiden Wafern kommt. Da in den einseitig benetzten Bereichen die Glaslotschicht dünner ist, zeichnen diese sich bei der Infrarotinspektion heller als ordnungsgemäß beidseitig gebondete Gebiete ab

(Abbildung 4.80). Somit lassen sich bei stark verlaufenem Glaslot in etwa die ursprünglichen Druckstrukturen noch erkennen. Das Verlaufen des Glaslotes birgt also nicht nur eine Gefahr für das Anbonden aktiver Sensorstrukturen, es kann bedingt durch die dabei meist auftretende einseitige Benetzung auch nicht gezielt technologisch, z.B. zur Verbreiterung von Dichtflächen, genutzt werden.

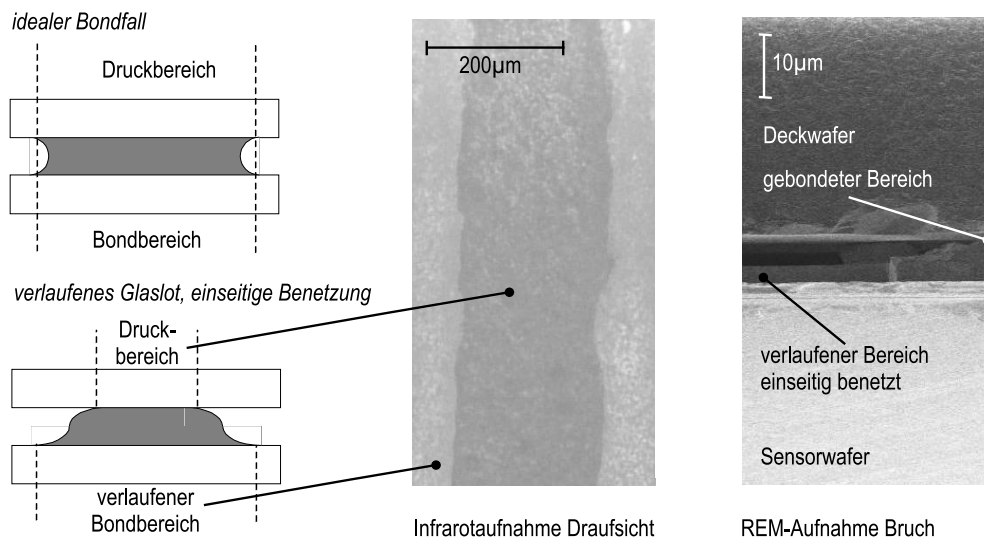


Abbildung 4.80: Einseitige Benetzung bei verlaufenem Glaslot

## 4.5.9 Bewertung der Lotglasbondverbindungen

### 4.5.9.1 Dicke Bondfuge

Bedingt durch das Prinzip des Glaslotbondens bildet sich eine Fuge zwischen den verbundenen Wafern aus. Dabei ist in der Regel das Glaslot so strukturiert, dass es geschlossene Rahmen um die aktiven Strukturen bildet. Die Dicke dieser Fuge hat Einfluss auf die Gesamtdicke des gebondeten Waferstapels<sup>62</sup> sowie auf den Abstand zwischen beweglichen Strukturen und dem Deckel. Daher wurde die Fugendicke nach dem Vereinzeln der Wafer zu Chips untersucht. Dabei zeigte sich, dass sich beim Bonden die Glasschichtdicke um ca. 30 % verringert. Dies lässt sich damit erklären, dass bei der thermischen Konditionierung des Glaslotes eine gewölbte Oberfläche entsteht, die beim Bonden flach gedrückt wird, um eine flächige Bondverbindung zu erreichen. Dazu muss Glas aus dem Mittelbereich des Bondrahmens zu dessen Rändern fließen, wodurch die Struktur zwar flacher, aber auch homogen gefüllt wird. Abbildung 4.81 zeigt, dass die Dickenreduzierung von 30 % der Umverteilung des Glaslotes beim Bonden entspricht, wenn

<sup>62</sup>wichtig für Weiterverarbeitung, z.B. Rückschleifen der Deckel zum Öffnen der Bondpads oder Platzbedarf in Umgehäusen

idealerweise die gebondete Rahmenbreite identisch der des Fußpunktes der gedruckten Struktur ist. Höhere Bondtemperaturen und -drücke würden zu einem weiteren seitlichen Verlaufen des Glaslotes und somit zu geringeren Fugendicken führen.

Zur statistischen Bewertung wurden die Fugendicken mehrerer Wafer an verschiedenen Positionen bestimmt. Die Dickenwerte lagen in einem Bereich von 7 bis 15  $\mu\text{m}$ . Die Gesamtheit der Messwerte weist jedoch starke Streuungen auf. Auf Basis der Messungen, die im Anhang G zusammengefasst sind, lassen sich folgende Kennwerte angeben:

- mittlere Dicke: 10  $\mu\text{m}$
- $6\sigma$ -Prozesssgrenzen: 5 bis 15  $\mu\text{m}$
- Prozesssicherheit  $cp$ : 0,7 - 1,1

Im Vergleich zu den Messungen an den ungebondeten Rahmen lässt sich feststellen, dass sich die relative, auf die mittlere Dicke bezogene Schwankung der Werte erhöht hat. Dies lässt sich zum eine darauf zurückführen, dass beim Bonden zusätzliche Fehlereinflüsse, wie Inhomogenitäten in der Bonddruck- und Temperaturverteilung, sowie die Benetzung der Sensorwafer eine Rolle spielen. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass sich eine in der Sensorfunktion nutzbare, eng tolerierte Bondfuge nicht einstellen lässt. Um diese zu verbessern, müsste zunächst der Siebdruck hinsichtlich der Dicke und anschließend der Bondprozess hinsichtlich der Homogenität optimiert werden. Für kritische Anwendungen lassen sich durch das Einbringen einer Grube in den Sensordeckel jedoch ausreichend große und reproduzierbare Abstände zu den aktiven Strukturen einstellen. Der zusätzliche Aufwand ist durchaus vertretbar, da die Grubenkante zusätzlich als Stopp für das Glaslot wirkt und somit insgesamt zur Ausbeuteerhöhung beiträgt.

#### 4.5.9.2 Selektivität Glaslotbonden

Durch den Einsatz strukturierter Bondrahmen soll beim Glaslotbonden erreicht werden, dass die Verbindungsbildung selektiv in den vorgesehenen Bondbereichen und nicht an der aktiven Sensorstruktur erfolgt. Ansonsten würden die beweglichen Strukturen durch das Glaslot fixiert und unbrauchbar werden. Voraussetzung für das selektive Bonden ist, dass sich der Glaslotrahmen an der vorgesehenen Stelle befindet. Dies muss im Design durch Beachtung der Designregeln (siehe 4.5.5) erfolgen. Zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit des Rahmens beim Siebdruck können die angrenzenden Deckelwafer abgesenkt werden. Um ein selektives Bonden sicherzustellen, darf im Bondprozess kein zu großer Versatz der beiden Wafer auftreten und

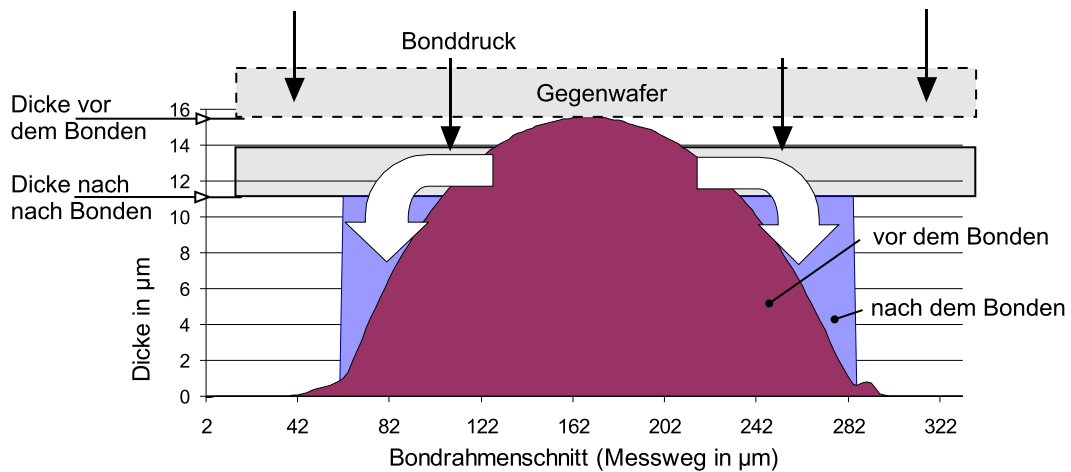


Abbildung 4.81: Umverteilung Glaslot beim Bonden, Profil- und Dickenänderung

das Glaslot darf nicht aus dem vorgesehenen Rahmenbereich heraus in die Sensorstruktur fließen. Während der Versatz beim Bonden sicher verhindert werden kann (siehe 4.5.8.3), ist ein Verlaufen<sup>63</sup> des Glaslotes beim Bonden nicht vollständig auszuschließen (Abbildung 4.82).

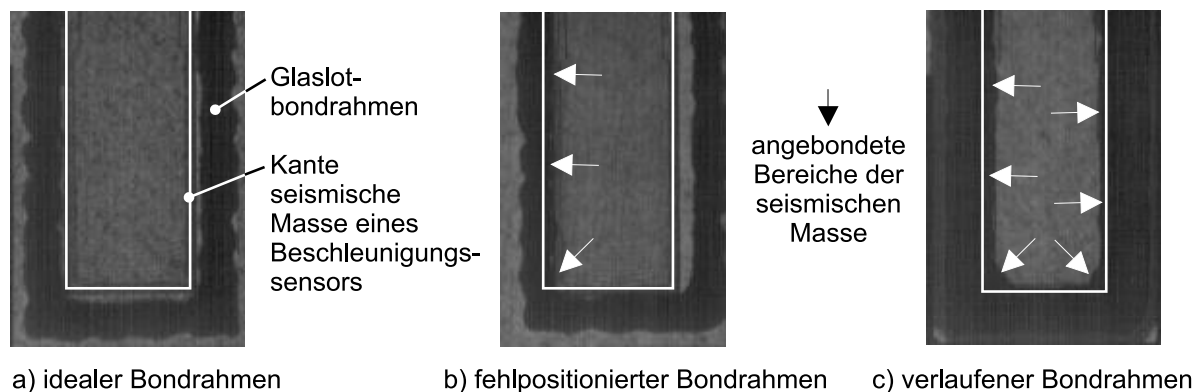


Abbildung 4.82: selektives Bonden mittels Glaslotrahmen

Um die Wirkung des Verlaufens zu minimieren, erweisen sich Absenkungen neben den Bondrahmen erneut als hilfreich. Da das Glaslot beide Bondoberflächen benetzt, fließt es in die Absenkungen hinein und füllt den größer werdenden Zwischenraum zwischen den Wafern aus, so dass es nicht bis an die aktiven Sensorstrukturen heran verlaufen kann. Besonders gut eignen sich KOH-geätzte Absenkungen, da aufgrund des Flankenwinkels von  $54,74^\circ$  die Bondfuge im Übergangsbereich kontinuierlich größer wird. Dabei kann mit dem zunehmenden Verlaufen in die Kante hinein immer mehr Material aufgenommen werden, wie Abbildung 4.83 zeigt. Ein

<sup>63</sup>bedingt durch ungleichmäßige Auftragstärke Glaslot oder inhomogene Druck- und Temperaturverteilung beim Bonden

Stoppverhalten lässt sich auch an senkrechten, mittels ASE erzeugten, Kanten beobachten, wobei an den steilen, senkrechten Übergängen das Verhalten des Glaslotes nicht so definiert ist wie an den KOH-geätzten Schrägen.

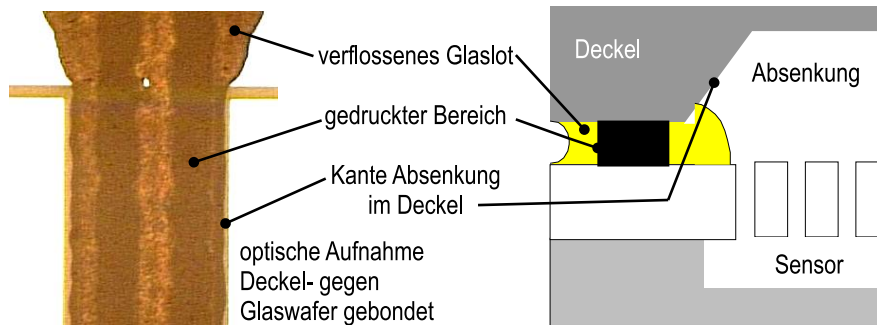


Abbildung 4.83: Verlaufstopp Glaslot an Kanten

Um ein sehr sicheres selektives Bonden mittels Glaslot zu erreichen, müssen in den zu bedruckenden Wafern (meist Deckwafer) Vertiefungen, bevorzugt durch KOH-Ätzen, neben den Bondrahmenbereichen eingebracht werden, die begrenzend beim Siebdruck und auf das Verlaufen des Glases beim Bonden wirken.

#### 4.5.9.3 Bondfestigkeit

Die Bondfestigkeit von Glaslotverbindungen ist im Allgemeinen als sehr hoch einzustufen. In Zugversuchen wurden mittlere Bruchwerte um 20 MPa (Bruchkraft bezogen auf theoretische Bondfläche) erreicht. Dabei führten in der Regel Brüche im Glas zum Versagen. Die Grenzflächen zwischen Glas und Silizium bzw. Oberflächenschichten sind somit fester als das Glaslotmaterial selbst. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Verbindungsprozesse zwischen dem Lotglas und den Bondpartnern sicher und zuverlässig ablaufen. Der festigkeitslimitierende Faktor ist somit das Glaslot selbst, auf das nur sehr wenig Einfluss, z.B. durch Reduzierung innerer Spannungen durch langsames Kühlen oder Entspannungstempern, genommen werden kann. Für die Anwendung der gebondeten Sensoren war bisher die Festigkeit der Glaslotverbindung ausreichend. Weder beim Vereinzeln der Wafer zu Chips noch beim Handling oder Verkappen der Chips (Plastmoulding) kam es zum Ablösen von Deckeln in signifikantem Umfang.

#### 4.5.9.4 Bondbare Materialien

Bei den mittels Glaslot bondbaren Materialien ist nach Oberflächenschichten auf Siliziumwafern und dem Bonden von Wafern aus anderen Substratmaterialien, wie z.B. Glas untereinander oder mit Silizium, zu unterscheiden.

**Bondbare Schichten auf Silizium** Im Rahmen dieser Arbeit konnten nahezu alle in der Mikrosystemtechnik üblichen Oberflächen bzw. Schichten, aufgebracht auf Siliziumwafer, gebondet werden:

- Silizium: ein- und polykristallin, in hydrophobem und hydrophilem Zustand
- Isolations- bzw. Passivierungsschichten : Siliziumoxid, (thermisch, CVD - z.B. TEOS), Siliziumnitrid, Polyimid
- Metalle: Aluminium, Aluminiumsilizium, Titan, Titanwolfram, Titannitrid
- Sonderschichten: Indiumzinnoxid (durchsichtig und leitfähig)

Besonders zu erwähnen ist das erfolgreiche Glaslotbonden von Polyimid, da es zeigt, dass auch organische Materialien auf diese Weise bondbar sind, insofern sie die hohen Bondtemperaturen aushalten. Bei den Bondversuchen hat sich das Polyimide, soweit optisch zu erkennen, nicht verändert. Es ist lediglich im Bereich der Bondrahmen etwas geschrumpft. Abbildung 4.84 fasst die Ausbeuten von Bondversuchen an verschiedenen Schichten zusammen. Es ist festzustellen, dass die Ausbeuten bei allen gebondeten Schichten sehr hoch sind (um die 90%). Die Unterschiede ergeben sich zumeist durch abgelöste Chips im Waferrandbereich, in dem die Bondrahmen etwas schmaler ausgelegt waren, da sich in ihm keine Sensorchips befinden. Es ist daher davon auszugehen, dass bei diesen Versuchen vielmehr die Siebdruckqualität am Waferrand als die zu bondende Schicht die Bondausbeute bestimmt hat und sich alle untersuchten Schichtmaterialien gleich gut bonden lassen.

Aus den in Abbildung 4.85 dargestellten Ergebnissen von Zugversuchen an glaslotgebondeten Chipproben mit unterschiedlichen Materialschichten im Bondinterface, kann man hingegen erkennen, dass diese großen Einfluss auf das Bruchverhalten und die Festigkeit haben. Da bei allen Versuchen die Brüche im Glaslot und nicht in der Grenzfläche zur gebondeten Schicht lagen, ist davon auszugehen, dass nicht die Verbindungsbildung, sondern die durch die zu bondenden Schichten in das Glas eingebrachten unterschiedlich mechanischen Spannungen zu den Unterschieden im Bruchverhalten und der Festigkeit führen. Für die gebondeten Polyimidschicht ist anzumerken, dass diese elastisch auf die Zugbelastung reagiert, wodurch sich die größeren Streuung der Messwerte (flacherer Anstieg der Gerade) erklären lässt. Insgesamt sind die Festigkeitswerte aller gebondeten Schichten allerdings sehr hoch, so dass die Unterschiede für die Anwendung im Bereich der Sensorverkappung nicht relevant sind. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass zur Bewertung von Technologien, mit neuen oder veränderten Schichtsystemen im Bondinterface, Zugversuche zur Bewertung der Verbindungsfestigkeit durchzuführen sind, um sicher zu stellen, dass diese durch die Schichtspannungen nicht beeinträchtigt wird.

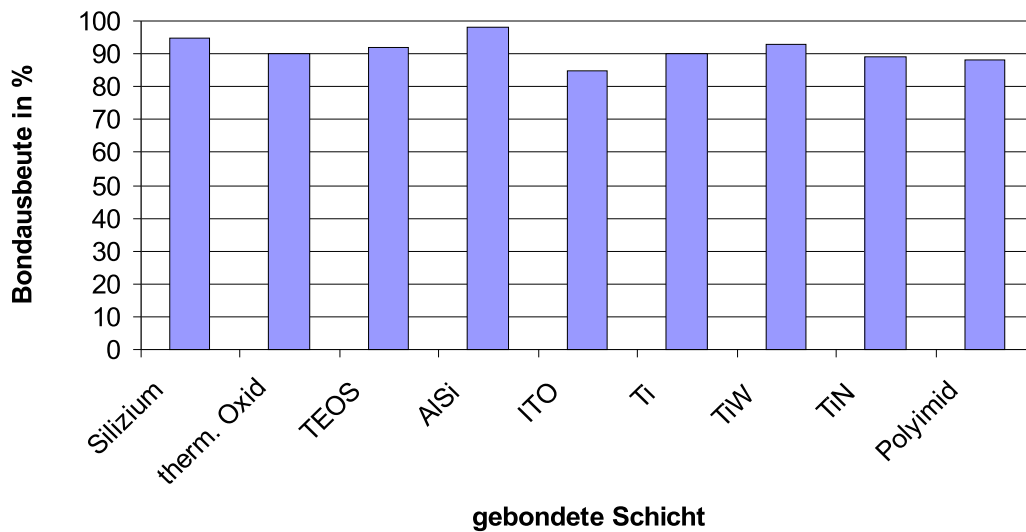


Abbildung 4.84: Bondausbeuten verschiedener glaslotgebondeter Schichten

**Bonden unterschiedlicher Substratmaterialien** Die Verbindungsbildung von Glaslot zu verschiedenen Substratmaterialien (Gläser, Keramiken) ist aufgrund seines guten Benetzungs- und Verbindungsverhaltens gegeben. Es ist jedoch zu beachten, dass der Verbund nach dem Bonden bei 430°C auf Raumtemperatur abgekühlt werden muss, ohne dass dabei Zugspannungen im Glaslot oder in den gebondeten Wafern entstehen, da diese zu Rissen führen. Somit beschränkt sich das Glaslotbonds auf das Fügen von Substratmaterialien mit nahezu gleicher thermischer Dehnung im Bereich des Glaslotes ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ). So konnten erfolgreich Glaswafer vom Pyrex-Typ mit Silizium mittels Glaslot verbondet werden, während das Bonden von Silizium mit Quarzglas oder fotostrukturierbarem Glas<sup>64</sup> nicht möglich war (Abbildung 4.86), da auf Grund der Dehnungsunterschiede zwischen den Materialien Risse auftraten.

#### 4.5.9.5 Einschluss von Vakuum

Wird vor dem Bondprozess die Prozesskammer evakuiert, so kann Vakuum in Hohlräume zwischen den zu bondenden Wafern eingeschlossen werden. Die Evakuierung der Sensorinnenvolumina wird durch die unregelmäßige Oberflächenstruktur der Glasbondrahmen begünstigt, so dass selbst beim Kontakt der zu bondenden Wafer keine Abdichtung besteht. Somit kann unter Umständen auf Abstandhalter zwischen den Wafern beim Evakuieren verzichtet werden bzw. ihre Lage und Form sind als unkritisch anzusehen. Eine weitere Voraussetzung für den Einschluss von Vakuum ist eine hermetisch dichte Bondverbindung (siehe 4.5.9.6), da es

<sup>64</sup>FS21, TU-Ilmenau, FG Glas und Keramiktechnologie



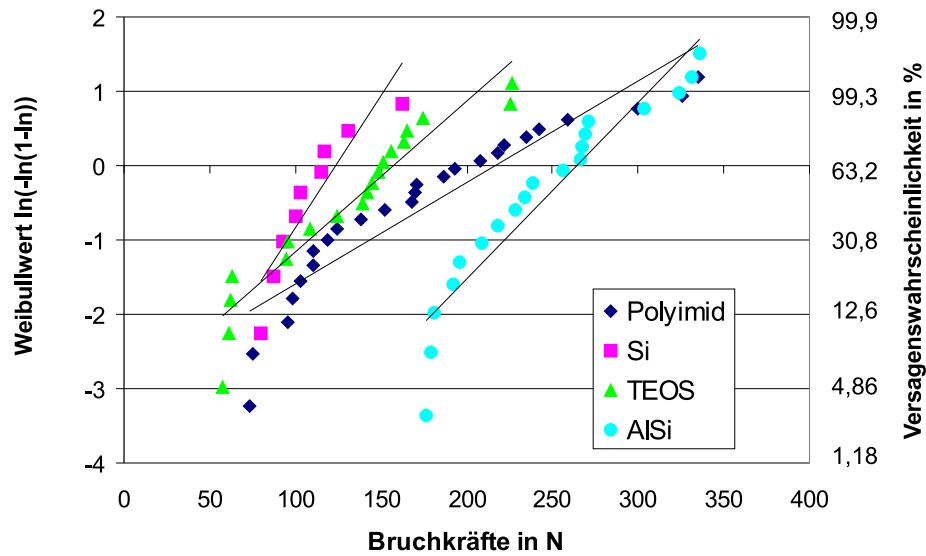


Abbildung 4.85: Weibullplot der Zugfestigkeiten verschiedener glaslotgebondeter Schichten

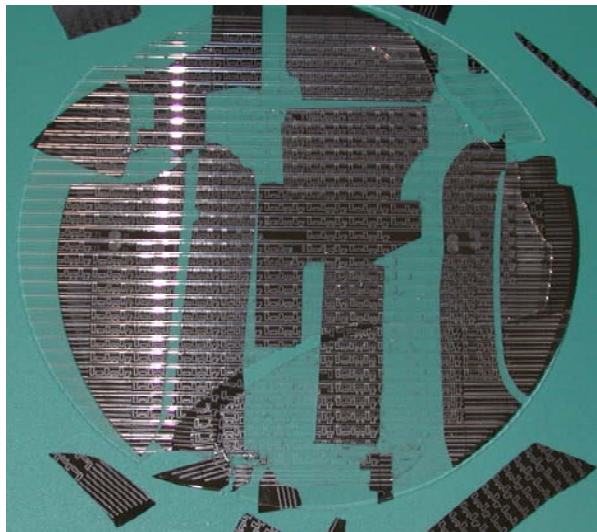


Abbildung 4.86: Waferbruch nach versuchter Glaslotbondung Silizium-Quarzglas

ansonsten im Nachhinein (Entnahme aus Bonder, Vereinzeln) zur Belüftung der evakuierten Bereiche kommen würde.

Obwohl bei verschiedenen Bondversuchen die Verbindungsbildung nachweislich bei einem Kammerdruck kleiner  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar erfolgte, ergaben Gütemessungen an derart verkapteten resonanten Strukturen einen Innendruck von 1 bis 5 mbar. Dies bedeutet, dass sich nach der Verbindungsbildung geringe Mengen an Gas aus dem Glaslot in dem verschlossenen Volumen gesammelt haben. Ursachen hierfür können sein:

- Verbrennen organischer Reste des Binders, die bei der thermischen Konditionierung des Glaslotes zurückgeblieben sind
- Freisetzen von im Glas gelösten Gasen
- Freisetzen von an dem Glaslot angelagerter Feuchte

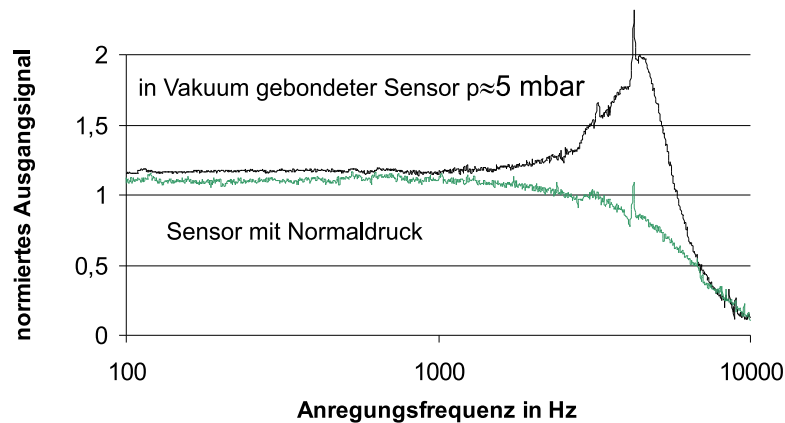


Abbildung 4.87: Amplitudenfrequenzgang Beschleunigungssensor in Abhängigkeit vom eingeschlossenen Druck

Somit muss festgestellt werden, dass mit dem entwickelten Glaslotbondprozess zwar sehr geringe Drücke, aber kein Hochvakuum eingeschlossen werden kann. Bei der Bewertung der Funktionalität von gebondeten Sensoren (siehe 5) stellte sich heraus, dass der erreichte Innendruck von einigen mbar jedoch ausreichend ist, wie der Frequenzgang eines Beschleunigungssensors in Abbildung 4.87 zeigt. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Optimierungen hinsichtlich geringerer Innendrucke unternommen, obwohl folgende Möglichkeiten nahe liegen bzw. aus der Literatur bekannt sind.

- Verlängertes in-situ-Ausheizen des Lotglases in der Bondkammer vor dem Bonden
- Vergrößerung des Verhältnisses von eingeschlossenem Vakuumvolumen zur Bondrahmenlänge, um den Einfluss der frei werdenden Gase auf den Druck zu minimieren
- Einsatz von strukturierten Getterschichten, welche die entstehenden Gase binden [54]
- Spezielle Behandlungen des Glaslotes vor, während bzw. nach der thermischen Konditionierung, wie in [32] beschrieben, die aber als aufwendig anzusehen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit einem modifizierten Temperaturregime Drücke kleiner 10 mbar sicher mittels Glaslotbondens eingeschlossen werden können. Analog

ist der Einschluss von Überdruck möglich, welcher jedoch nach der Zustandsgleichung der Gase stark temperaturabhängig ist, d.h. er verringert sich um den Faktor 2,4 beim Abkühlen von der Bond- auf Raumtemperatur.

#### 4.5.9.6 Dichtigkeit Bondrahmen

Mittels des Glaslotbondens sollen oberflächenmikromechanische Strukturen so verschlossen werden, dass es zu keinem Medienaustausch zwischen Sensor und Umwelt kommt. Diese Forderungen gelten unabhängig vom eingeschlossenen Innendruck für alle Anwendungen. Während bei eingeschlossenem Unter- bzw. Überdruck die Druckerhaltung im Vordergrund steht, ist es bei eingeschlossenem Normaldruck vor allem wichtig, Gasaustausch zwischen dem Sensorinneren und der Umwelt zu verhindern, um den Eintrag von Feuchte oder Lösungsmitteln zu unterbinden. Die Wasserdichtigkeit der Bondverbindung ist wichtig, weil die gebondeten Wafer mittels wassergekühlten Standardsägeschritten vereinzelt werden sollen. Dabei darf keinerlei Wasser in die Sensoren eindringen, da diese dadurch unbrauchbar werden.

Das Glaslotbonden wurde bewusst anhand der Dichtigkeitseigenschaften der Gläser ausgewählt. Da das aufgeschmolzene Glas die zu bondenden Oberflächen benetzt, besitzt es eine aktiv dichtende Wirkung, wobei Stufen und Rauigkeiten in den Bondflächen ausgeglichen werden. Aufgrund ihres kompakten molekularen Gefüges gelten Gläser als gasdicht, d.h. sie weisen sehr geringe Diffusionsraten für Gase auf. Obwohl Glasverschmelzungen, wie das Glaslotbonden, als hermetisch dicht gelten, birgt die 3-dimensionale Struktur der Glaslotbondrahmen folgende Gefahren für Undichtigkeiten (Abbildung 4.88):

- Unterbrechungen der Bondrahmenstruktur aufgrund von Siebdruckfehlern
- Bondfehler durch unzureichende Benetzung des Gegenwafers oder nicht ausreichende Planarisierung der gewölbten Bondrahmenoberfläche beim Bonden, bedingt durch zu geringen Bonddruck
- Hohlräume (Blasen) im Glaslot, die Leckkanäle bilden können

Während Hohlräume im Glaslot bei ordnungsgemäßem Vorschmelzen des Glaslotes sicher verhindert werden können, lassen sich Siebdruck- und Bondfehler weder durch Prozessoptimierung vollständig vermeiden noch durch Inspektionen sicher erfassen. Bedingt durch die signifikante Dicke der Bondfuge weisen Undichtigkeiten eher Kanal- als Spaltstruktur auf. Somit können sie als Groblecks angesehen werden, d.h. bereits bei kurzzeitiger Lagerung unter Normaldruck stellt sich ein Druckausgleich ein bzw. Wasser kann beim Spülen in die Kavitäten eindringen. Diese Tatsache lässt sich zur Detektion von Undichtigkeiten verwenden, wenn die

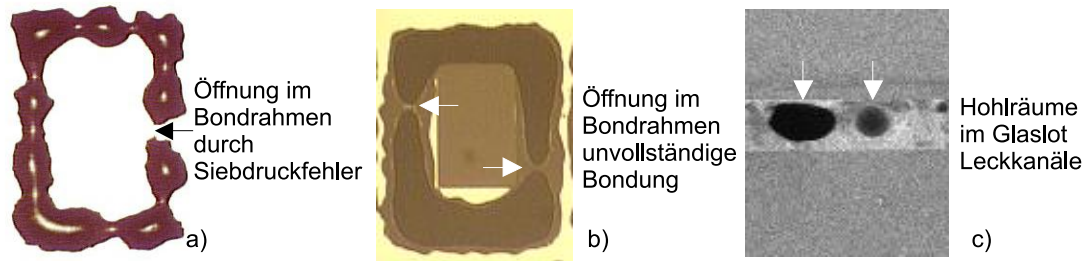


Abbildung 4.88: Ursachen für Undichtigkeiten Glaslotbonden a) optische Aufnahme gedruckter Bondrahmen, b) optische Aufnahme nach Bonden eines Glaswafers, c) REM-Aufnahme

Strukturen auf Druckausgleich (Veränderung des Resonanzverhaltens) bzw. auf das Eindringen von Wasser (Sticking) reagieren. So konnten nach einem Wasserspülen undichte Sensoren auf mit der SCRESOI-Technologie hergestellten Wafern beim Waferprobing erkannt werden.

Der Nachweis der Langzeitdichtigkeit der Glaslotbondverbindungen gestaltet sich jedoch deutlich schwieriger, da keine definierten beschleunigten Tests vorliegen, die zuverlässige Aussagen liefern. Nach Lagerung von unter Vakuum gebondeten Drehratensensoren über 7 Monaten konnten bei Gütemessungen [61] nur geringe Änderungen ermittelt werden, die Leckraten kleiner 0,5 mbar/Jahr entsprechen. Die Änderungen sind jedoch vermutlich auf Messprobleme (Messtemperatur, Kontaktprobleme) zurückführbar, so dass die tatsächlichen Leckraten deutlich geringer sein sollten. Für die meisten Anwendungen ist die ermittelte Leckrate ausreichend gering, da ein Gasaustausch sicher ausgeschlossen werden kann. Für resonante Sensoren die auf einen konstanten Innendruck angewiesen sind wäre eine Leckrate von 0,5 mbar/Jahr kritisch, in diesen Fällen wären dann genauere Untersuchungen notwendig.

#### 4.5.9.7 Bondausbeute

Bei Verkapselungsbonden ist die Bondausbeute ein Maß für die Anzahl ordnungsgemäß verschlossener Chips auf einem Wafer. Beim Glaslotbonden gibt es im Wesentlichen folgende drei ausbeutebegrenzende Faktoren:

1. Ablösen von Deckeln beim Vereinzeln oder Rückschleifen des Deckwafers
2. undichte Bondrahmen
3. Verlaufen von Glaslot in aktive Sensorbereiche

Im Vergleich zu anderen Bondverfahren spielt das Ablösen von Deckelchips beim Weiterverarbeiten eine sehr geringe Rolle. Die beiden anderen Faktoren sind hingegen typisch für

das Glaslotbonden und können nur durch eine verbesserte Siebdruckqualität eliminiert werden. Da sich weder das Anbonden von beweglichen Strukturen als auch undichte Bondrahmen automatisch (z.B. beim Waferprobing) ermitteln ließen, können keine statistisch gesicherten Angaben zur Bondausbeute gemacht werden. Untersuchungen an einzelnen Wafern haben jedoch gezeigt, dass Ausbeuten von 80 bis 95 % erreichbar sind. Dazu ist es jedoch zwingend notwendig, durch Absenkungen im Deckel um den Bondrahmen dessen optimale Platzierung zu garantieren und ein Verlaufen des Glaslotes zu verhindern.

## 4.5.10 Bewertung gebondetes Glaslot

### 4.5.10.1 elektrische Eigenschaften

Die Hauptanwendung des Glaslotbondens ist die Verkapselung oberflächenmikromechanischer Systeme, wobei das Glaslot direkt mit elektrisch leitenden und potentialführenden Flächen (Aluminiumleitungen, Siliziumflächen der Bondpadbondrahmen) in Verbindung kommt. Da es dadurch bei schlechtem Isolationsverhalten des Glaslotes zu Beeinträchtigungen der Sensorsignalqualität (Leckströme, kapazitives Übersprechen) kommen kann, wurden die elektrischen Eigenschaften des Glaslotes untersucht.

**Relative Dielektrizitätskonstante** Zur Untersuchung der kapazitiven Eigenschaften des Glaslotes FX11-036 wurde eine großflächige Differentialkondensatoranordnung (Abbildung 4.89) aufgebaut, in der aufgeschleudertes und gebondetes Glaslot als Dielektrikum wirkt. Aus der Messung der Gesamtkapazität bei 10 KHz ließ sich unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  des Glaslotes mit 4,6 bestimmen. Dieser Wert ist typisch für Glaswerkstoffe. Aufgrund des relativ hohen Ionengehalts des Glases ließ sich der Verlustwinkel  $\tan\delta$  nicht ermitteln.

**Isolationsverhalten** Zur Bestimmung des elektrischen Isolationsverhaltens des Glaslotes FX11-036 wurden sowohl TVS-Messungen an Dot-Strukturen<sup>65</sup> als auch an realen Leiterbahndurchführungen vorgenommen. Wie Abbildung 4.90 zeigt, besitzt das Glaslot bis 120°C einen sehr hohen Isolationswiderstand im Teraohm-Bereich, wobei der Leckstrom unterhalb der Messgrenze von 1 fA lag (Messspannung 5V). Erst ab 150°C ließen sich Leckströme bestimmen, die bei 250° 1nA überstiegen, was einem Isolationswiderstandseinbruch in den unteren Gigaohmbereich gleichkommt. Für die Anwendung des Glaslotes im Sinne eines Isolators ist es vorteilhaft, dass die thermische Generation von Ladungsträgern durch das Herauslösen von Ionen aus dem

<sup>65</sup>triangle voltage sweep an runden Metallisierungsstrukturen aufgebracht auf Glaslot auf Silizium, Standardmethode zur Bewertung von Oxidqualitäten [47]

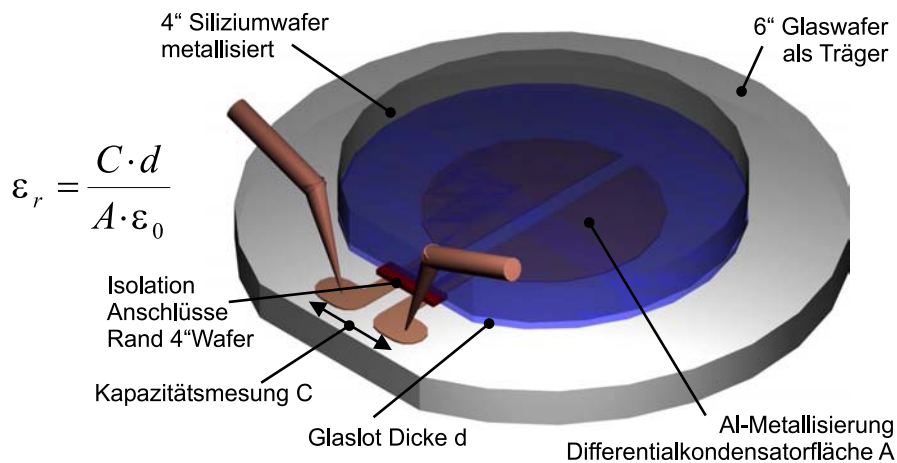


Abbildung 4.89: Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante Glaslot

Glasgefüge erst bei ca. 130-140°C einsetzt. Somit lässt sich das Glaslot FX11-036 bis zu einer Temperatur von 125°C (Automotive-Temperaturbereich) einsetzen, ohne dass es beim Bonden leitfähiger Bereiche unterschiedlicher elektrischer Potentiale (z.B. benachbarte unpassivierte Leitbahnen) zu ungewollten Stromflüssen kommt.

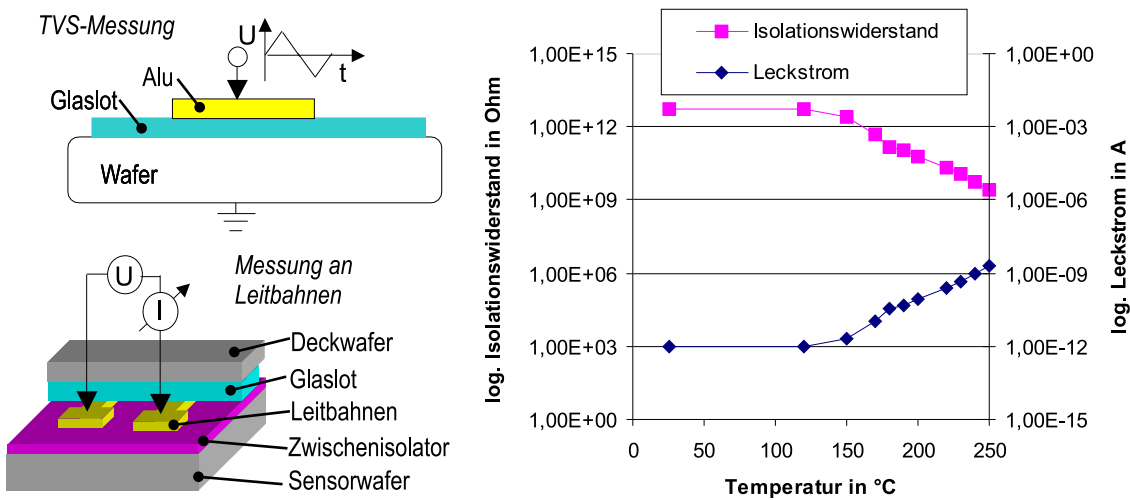


Abbildung 4.90: Bestimmung Isolationsverhalten Glaslot FX11-036

#### 4.5.10.2 Thermomechanische Spannungen

Da viele mikromechanische Systeme empfindlich auf mechanische Verspannung reagieren, wurde das thermomechanische Verhalten des Glaslotes FX11-036 untersucht. Vom Hersteller der

Glaspaste sind keine Angaben zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügbar. Eine Literaturstelle [62] gibt jedoch für ein vergleichbares Material einen Ausdehnungskoeffizienten von  $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  an. Berechnet man den Ausdehnungskoeffizienten des Glaslotes anhand der additiven Überlagerung der Eigenschaften seiner Glasbestandteile unter Beachtung des Mischungsverhältnisses (siehe 4.1.3.1 Formel (1)), so erhält man einen Wert von  $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Berechnung siehe Anhang J). Da die zur Berechnung herangezogenen Werte der Einzelbestandteile [49] nur Näherungswerte sind, kann der Literaturwert als richtig angenommen werden. Somit muss davon ausgegangen werden, dass das Glaslot nur bedingt in seiner thermischen Dehnung an das Silizium ( $\alpha = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) angepasst ist. Beim Abkühlen eines Siliziumglaslotverbundes nach dem Thermokompressionsbondens sind somit Eigenspannungen im Glaslot zu erwarten, da dieses sich stärker als das Silizium zusammen zieht. Diese Eigenspannungen lassen sich mittels FEM-Simulation<sup>66</sup> für entsprechende Bondrahmen modellieren [48].

Aber auch in der Praxis lassen sich Spannungen im Lotglas beobachten. So kommt es an großen bedruckten Flächen (größer  $25 \text{ mm}^2$ ) und ganzflächig beschichteten Wafern beim Abkühlen nach dem Vorverschmelzen des Glaslotes zu Rissen (Abbildung 4.91). Die dabei entstehenden Bruchschollen haben eine Ausdehnung von 0,5 bis 1 mm. Diese Tatsache stellt eine Begrenzung der maximalen Glaslotstrukturweite auf etwa 1 mm dar, die aber praktisch nicht relevant ist, da aus Gründen der Platzeinsparnis stets deutlich kleinere Strukturen angestrebt werden. An der Durchbiegung der mit vorverschmolzenem Glaslot beschichteten Deckwafer lässt sich ebenfalls die Eigenspannung des Glases erkennen. Während die Durchbiegung der Deckwafer vor der thermischen Konditionierung der aufgedruckten Paste nahezu null ist, erreicht sie, je nach Bedeckungsgrad des Glases, recht hohe Werte (Abbildung 4.92), wobei das Glaslot kompressiv wirkt. Bei den am stärksten durchgebogenen Wafern war aufgrund der Verwölbung die automatische Handhabung der Wafer in der Bondanlage nicht mehr möglich. Eine quantitative Abschätzung der vom Glas induzierten thermomechanischen Spannungen war anhand der durchgebogenen Wafer nicht möglich, da die Wafer selbst perforiert waren (entsprechend strukturierte Glasschicht). Versuche an vollflächig beschichteten Wafern schlugen fehl, da es zu der oben erwähnten Rissbildung kam. Neben der Platzeinsparung sind somit auch aus Gründen der Reduzierung mechanischer Spannungen die Bondrahmen schmal und somit die gedruckte Waferfläche gering zu halten.

Während an den einseitig mit verschmolzenem Glaslot beschichteten Wafern die mechanischen Spannungen deutlich sichtbar werden, lassen sie sich im Waferverbund nicht erkennen. Weder ist eine signifikante Durchbiegung der Wafer zu erkennen, noch zeigen Stressindikatorstrukturen in der Sensorebene einen Ausschlag (Abbildung 4.93). Des Weiteren sind keine auf mechanische Spannungen zurückführbare Effekte im Verhalten gebondeter Sensoren bekannt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch annähernd gleiche Dicken von Sensor- und Deck-

<sup>66</sup>Leistung Fraunhofer Institut IWM Halle im Rahmen des BMBF-Förderprojektes „Mikroprüf“

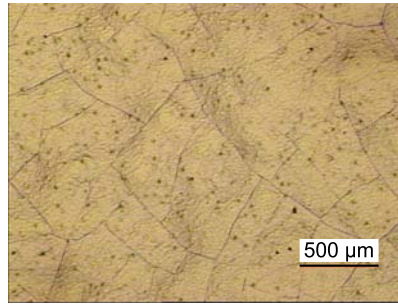


Abbildung 4.91: Risse nach Abkühlung vorverschmolzenen Glaslot

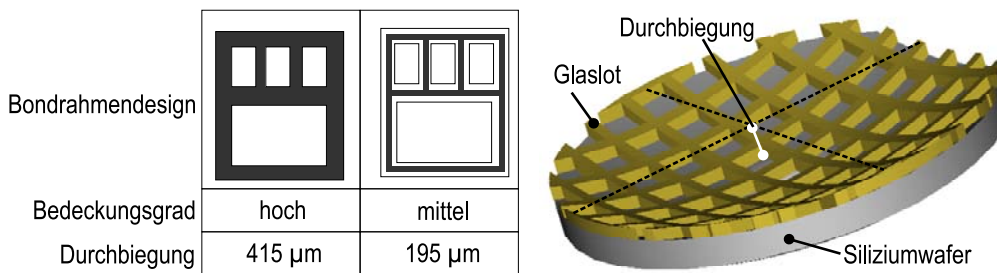


Abbildung 4.92: Einfluss Glaslot auf die Durchbiegung beschichteter Wafer

wafers die mechanischen Spannungen weitestgehend kompensiert und als Druckspannungen in der Bondebene gehalten werden. Zumeist sind zudem die Sensorstrukturen durch Gräben von dem Bondrahmen entkoppelt, so dass die Restspannungen nicht auf sie wirken können.

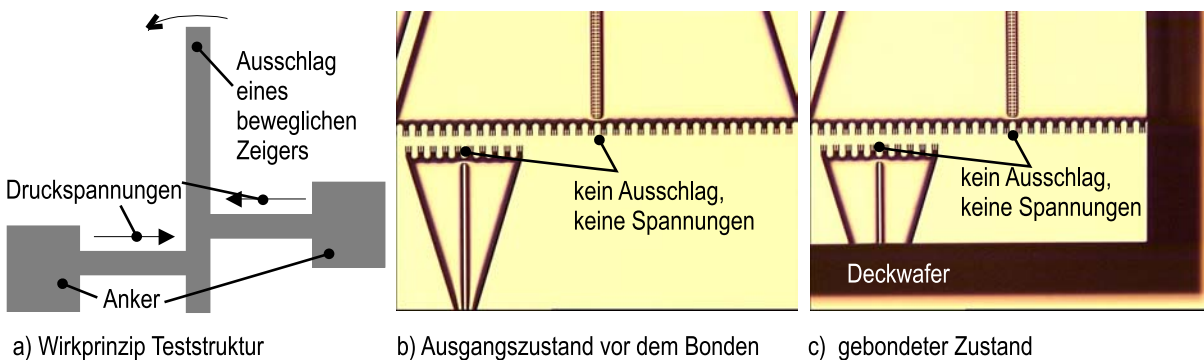


Abbildung 4.93: Stressteststrukturen vor und nach dem Glaslotbonden

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund von Unterschieden in der thermischen Dehnung von Silizium deutliche mechanische Spannungen entstehen, die jedoch im gebondeten Waferstapel meist keinen Einfluss auf die Sensoren haben. Bei Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit der Bondverbindung sind sie hingegen zu beachten.



### 4.5.10.3 Feuchteinflüsse

Aus der Literatur [49] und den Versuchen zur fotochemischen Strukturierung, ist bekannt, dass Glaslote Wasser aufnehmen und dadurch angegriffen werden können. Auch konnte nach dem Sägen (Kühlwasser) von Wafern mit freiliegendem Glaslot beobachtet werden, dass sich dessen Oberfläche verändert (farbliche Schlieren). Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zum Feuchteverhalten des Glaslotes durchgeführt. Zunächst wurde ein Pressure-Cooker-Test an auf unpassivierten Aluminiumleitungen gedrucktem und ausgetempertem Glaslot durchgeführt. Da bei diesem Test das Glaslot komplett frei lag (kein Aufbunden eines Deckwafers), konnte die komplette Glasoberfläche Feuchte aufnehmen. Dabei löste sich das Glaslot an der Oberfläche teilweise auf und durch Kondensation kam es zur Ablagerung der abgelösten Glasbestandteile auf der Waferoberfläche (Abbildung 4.94). Somit war eine Feuchteempfindlichkeit des Glaslotes nachgewiesen, die zu Zuverlässigkeitsproblemen sowohl für die Bondverbindung als auch für freiliegende Metallisierungsgebiete führen könnte. Die Untersuchungen der Ablagerungen auf den unpassivierten Aluminiumleitungen ergab jedoch, dass diese nicht angegriffen worden waren. Die umverteilten Glaslotbestandteile liegen lediglich fest auf, ohne mit dem Metall zu reagieren. Somit ist die Umverteilung von Glasbestandteilen durch die Einwirkung kondensierender Feuchte nicht kritisch für die Zuverlässigkeit freiliegender Aluminiumstrukturen, sollte jedoch trotzdem durch geeignete Maßnahmen (Überstand des Deckwafers über das Glaslot) verhindert werden. Diese Erkenntnisse konnten durch eine Wiederholung des Feuchtetests an gebondeten Chips bestätigt werden. Während es an freiliegendem Glaslot, das an Kanten von Bondpadöffnungen ausgetreten war, zu den beschriebenen Glasumlagerungen kam, konnten diese an Chips, bei denen das Glaslot nicht aus der Bondfuge ausgetreten war, nicht beobachtet werden (Abbildung 4.95). Somit ist die Stirnfläche einer Glaslotbondfuge bedingt durch ihre kleine Fläche und geschützt durch einen leicht überstehenden Deckwafer deutlich unempfindlicher gegen Feuchteeinwirkung. Auf die Festigkeit der Bondverbindung hat eine Feuchtebelastung keinen negativen Einfluss, wie in 4.5.10.5 dargestellt. Da der Feuchteeffekt oberflächennah und die Bondfuge sehr schmal in bezug auf die Bondrahmenbreite ist (Verhältnis 1:20), sind keine Auswirkungen auf die Dichtigkeit der Sensoren zu erwarten. Für den Bondprozess spielt die an der Glaslotoberfläche angelagerte Feuchte (Standzeit zwischen thermischer Konditionierung und Bonden) keine Rolle, da durch die hohen Temperaturen und das optionale Vakuum in der Bondkammer ein in-situ-Trocknen der Wafer vor dem Bonden erfolgt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Glaslotmaterialien empfindlich auf Feuchte- und Wassereinwirkungen reagieren. Dieser negative Effekt ist bei der Prozessierung, Weiterverarbeitung und Anwendung glaslotgebondeter Bauteile unbedingt zu berücksichtigen. Bei entsprechenden Prozess- und Designmaßnahmen (kein freiliegendes Glaslot) lassen sich die negativen Auswirkungen jedoch sehr stark minimieren.

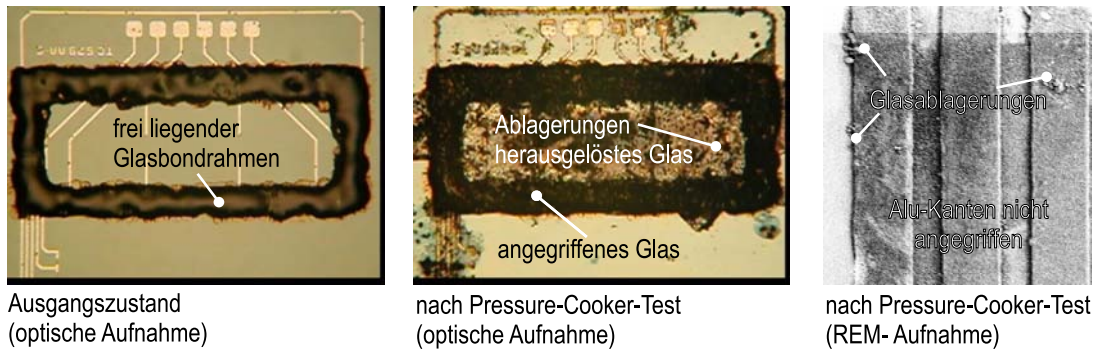


Abbildung 4.94: Untersuchung Feuchteinfluss an offenen Bondrahmen

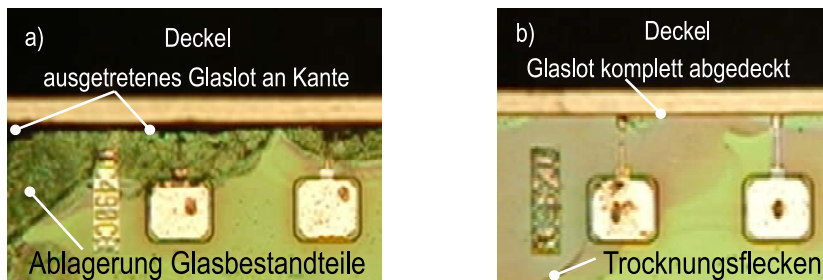


Abbildung 4.95: Feuchtetest an Chipproben a) Glasangriff und -ablagerung bei ausgetretenem Glaslot, b) Vermeidung Glasangriff durch komplettes Abdecken mit Deckwafer

#### 4.5.10.4 Bruchverhalten

Wie bereits unter 4.5.9.3 beschrieben, bestimmt das Bruchverhalten des Glaslotes die Festigkeit der gebondeten Bauteile. Untersuchungen an im Zugversuch gebrochener Bondverbindungen haben ergeben, dass das Glasmaterial und nicht eine der beiden gebondeten Grenzflächen (GF1 oder GF2) versagt. Typischerweise findet man also Glaslot sowohl auf dem Deckel- als auch auf dem Sensorchip. Durch Profilometermessungen wurde festgestellt, dass der Bruch des Glases nicht parallel zu den Chipoberflächen verläuft, vielmehr scheint er unsystematisch zwischen den beiden Grenzflächen hin und her zu springen (Abbildung 4.96). Da es sich bei dem Glaslot um ein spröde-elastisches Material handelt, kann davon ausgegangen werden, dass der Bruch von kerbartigen Defekten ausgeht, unter mechanischer Last instabil wächst und schließlich zum Versagen führt. Die eigentümlichen Glaslotbruchbilder mit den hin- und herspringenden Brüchen deuten darauf hin, dass im Glaslot nahe der Grenzfläche zum Silizium entsprechende Defekte vorhanden sind, von denen ein oder mehrere Risse ausgehen, die zum Versagen führen. Weder in Bruchbildern noch in Querschliffaufnahmen ließen sich derartige Defekte eindeutig lokalisieren. Dies deutet darauf hin, dass es sich entweder um viele sehr kleine Defekte (Störungen im Glasgefüge aufgrund der verbindungs bildenden Lösungsvorgänge)

oder um einzelne größere Defekte (Einschlüsse, Lunker) handelt. Weiterhin ist auch nicht auszuschließen, dass die Risse von den z.T. sehr scharfkantigen Füllerpartikeln ausgehen, deren Spitzen kerbartig in das verschmolzene Glaslot hineinragen. Für diese Theorie spricht die aus Chevron-Notch-Versuchen und Simulationen<sup>67</sup> ermittelte Initialrisslänge von  $8\ \mu\text{m}$ , die in etwa der Größe der Füllerpartikel entspricht. Aus FEM-Simulationen ließen sich keine Bereiche mit erhöhter mechanischer Spannung ermitteln, von denen bevorzugt Risse starten könnten. So ist bei Zugbelastung an den Mittelbereichen der Bondrahmenseiten die lokale Spannung zwar am höchsten, berücksichtigt man jedoch die aus dem Abkühlvorgang resultierenden mechanischen Eigenspannungen des Glaslotes, so ist dieser Effekt vernachlässigbar. Theoretisch ist somit die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung an allen Stellen gleich groß. Dies hat zur Folge, dass zum einen durch Verbreiterung der Bondrahmen ihre absolute Zugfestigkeit erhöht werden kann [50], da keine lokalen Spannungserhöhungen an der Bondrahmenkante versagensbestimmend sind. Zum anderen erhöhen Defekte an der äußeren Bondrahmenkante (Säge- oder Handlingsdefekte) das Bruchrisiko für den Bondrahmen. Dies bedeutet, dass zwischen Sägestraße und Glaslotbondrahmen genügend Platz sein sollte, um ein Ansägen des Glaslotes sicher zu vermeiden.

Es konnte somit gezeigt werden, dass das Glaslot aufgrund seiner stofflichen und strukturellen Eigenschaften limitierend für die Festigkeit der gebondeten Bauteile ist. Da die Festigkeit des Glaslotes bezogen auf die zu erwartenden Belastungen der Bauteile ausreichend ist, wurden keine aktiven Maßnahmen zu ihrer Erhöhung unternommen. Für Anwendungen, die extrem fester Bondverbindungen bedürfen, ergeben sich Optimierungsansätze sowohl im Design (breitere oder Doppelbondrahmen) als auch in der Technologie (Eigenspannungsreduzierung durch nachträgliches Entspannungstempern).

#### 4.5.10.5 Zuverlässigkeitseigenschaften

Basierend auf den beiden Materialschwächen des Glaslotes, der im Vergleich zum Silizium größeren thermischen Dehnung und der Feuchteempfindlichkeit, wurden zwei Zuverlässigkeitstests hinsichtlich der Bondfestigkeit abgeleitet und durchgeführt.

**Temperaturschocktest** Da es sich bei dem Glaslot FX11-036 um einen spröde-elastischen Werkstoff mit einer größeren thermischen Dehnung als Silizium handelt, ist zu erwarten, dass es bei Temperaturwechselbelastungen zur Bildung von Initialrissen kommt, die bei mechanischer Belastung zu einem Versagen bereits bei geringerer Belastung führen. Um dies zu untersuchen wurde ein verschärfter Temperaturschocktest<sup>68</sup> durchgeführt. In nachfolgenden Zugver-

---

<sup>67</sup>Fraunhoferinstitut IWM Halle

<sup>68</sup>190°C auf 25°C Abschrecken in Wasser

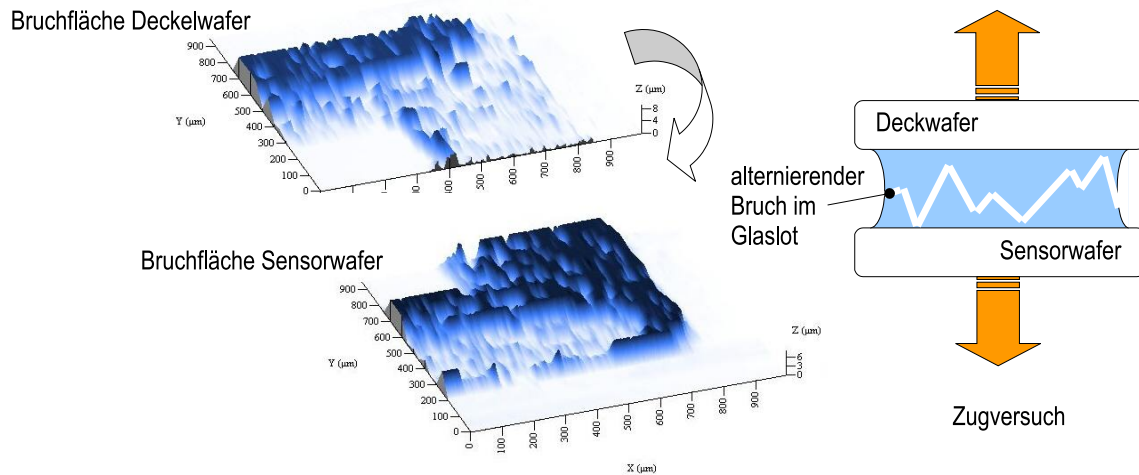


Abbildung 4.96: Bruchausbildung im Glaslot bei Zubelastung

suchen wurde eine signifikant geringere Bruchfestigkeit im Vergleich zu unbelasteten Proben vom selben Wafer ermittelt. Aus der Literatur [62] sind ähnliche Untersuchungen bekannt, die jedoch nach üblichen Standards [12], [14] mit geringeren Temperaturwechselgeschwindigkeiten bei gleicher Temperaturdifferenz durchgeführt wurden, ohne dass es zu einer Verringerung der Bruchfestigkeit kam. Aus beiden Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass Temperaturwechselbelastungen wie erwartet zur Inertialbruchbildung im Glaslot und somit zur Herabsetzung der Bruchfestigkeit führen können. Unter Standardbedingungen sollte dieser Effekt jedoch keine Rolle spielen, entsprechende Tests zur Bauteilqualifikation sind jedoch in jedem Fall zu empfehlen.

**Temperaturfeuchte Lager** Parallel zu den Temperaturwechseltests wurden Chipproben vom selben Wafer einer Pressure-Cooker-Belastung von 96 Stunden unterzogen. Die nachfolgend durchgeführten Zugversuche lieferten entgegen der Erwartung eine erhöhte Bruchfestigkeit. Dies lässt sich damit erklären, dass die Feuchte nicht zu einer Schwächung des Glases, sondern vielmehr zu einer Überätzung der Stirnflächen der Bondfuge führt, wodurch Defekte, z.B. vom Sägen, verrundet werden und die Belastbarkeit steigt. Somit können Bedenken hinsichtlich einer Verringerung der Bondfestigkeit aufgrund von Feuchteinwirkung ausgeschlossen werden.

Abbildung 4.97 fasst die Ergebnisse der beiden Zuverlässigkeitstests in einem Weibullplot zusammen und verdeutlicht anhand der charakteristischen Bruchkraft die Veränderung der Glaslotfestigkeit durch die Belastungen.

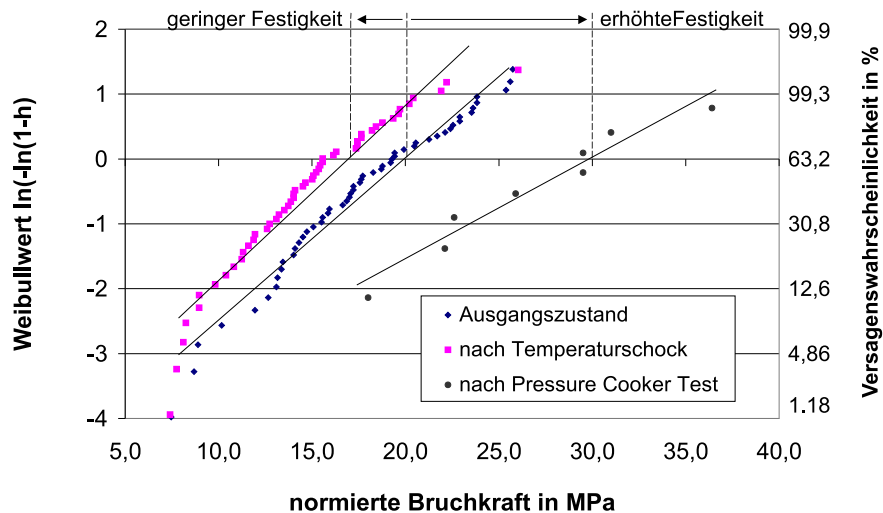


Abbildung 4.97: Weibullplot zur Bestimmung der Einflüsse von Zuverlässigkeitstests auf die Bondfestigkeit von Glaslotbondungen

#### 4.5.11 Laterale Leitbahndurchführungen in der Glaslotschicht

Um die durch das Verkapselungsbonden hermetisch abgedichteten Sensorbereiche elektrisch anschließen zu können, sind Leitbahndurchführungen durch den Bondrahmen notwendig. Dabei sind Metalleitbahnen implantierten (quasi vergrabenen) Anschlüssen vorzuziehen, da sie bessere elektrische Eigenschaften aufweisen und leichter herzustellen sind. Da Metalleitbahnen aber ein Höhenprofil aufweisen, können sie, ohne dass sie durch Vergraben planarisiert werden, mit den herkömmlichen Bondverfahren (anodisches Glasbonden, Siliziumdirektbonden) nicht hermetisch dicht überbondet werden. Durch das sehr gute Fließ- und Benetzungsverhalten des Glaslotes ist jedoch ein Einbetten von Leitbahnen in die Bondzwischen-schicht möglich, wobei das Leitbahnprofil so gut umflossen wird, dass eine hermetisch dichter Abschluss entsteht (Abbildung 4.98). Diese Art der Kontaktierung der inneren Sensorbereiche wurde bereits in mehreren Sensordesigns eingesetzt, funktioniert zuverlässig und eröffnet neue Möglichkeiten in der Sensorgestaltung. Bedingt durch die sehr guten elektrischen Isolationseigenschaften des Glaslotes ist eine Passivierung der Leitbahnen nicht zwingend notwendig.

#### 4.5.12 Elektrisch leitfähige Waferbondverbindung

Bei der Bewertung kapazitiver oberflächenmikromechanischer Beschleunigungssensoren stellte sich heraus, dass durch elektromagnetische Einflüsse die Signalauswertung gestört und somit die Sensorempfindlichkeit herabgesetzt wird. Legt man den Deckel des Sensors und den Trägerwafer des Ausgangs-SOI-Substrates elektrisch auf Masse, dienen diese als Abschirmung und die

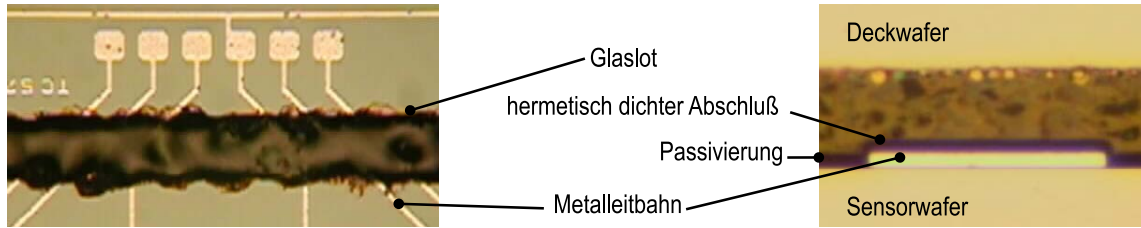


Abbildung 4.98: Metallische Leitbahndurchführungen im Glaslot

Sensorempfindlichkeit steigt an. Um in der Aufbau- und Verbindungstechnik ein Drahtbonden auf unterschiedlichen Ebenen<sup>69</sup> zu vermeiden, wurde eine Möglichkeit gesucht, beim Bonden gezielt eine leitfähige Verbindung zwischen Sensor und Deckwafer herzustellen. Hierfür bot sich die Paste Ferro CN33-246, eine mit Silber gefüllte Variante der Paste FX11-036, an. In die Paste einbrachte Silberpartikel werden in die Bleiglas-Komponente des Glaslotes ein- und an die Kontaktflächen angeschmolzen, verbinden sich dabei während der Temperaturprozesse zu leitfähigen Pfaden, an denen eine Stromleitung durch den an sich isolierenden Glaskörper möglich wird.

Da jedoch in der Waferbondebene weiterhin freiliegendes Silizium vorhanden ist bzw. unpassivierte Metalleitbahnen realisiert werden sollen, konnte nicht einfach das elektrisch leitfähige gegen das isolierende Glaslot ausgetauscht werden. Vielmehr mussten zusätzlich zu den isolierenden und mechanisch verbindenden sowie hermetisch dichtenden Glaslotstrukturen die Kontaktstellen mit dem leitenden Glas realisiert werden. Da das elektrisch leitfähige Glaslot auf dem isolierenden aufbaut besitzen beide ähnliche Verarbeitungseigenschaften, so dass folgender technischer Ablauf realisiert werden konnte.

1. Vorbereitung der Deckwafer
2. Siebdruck der Bondrahmenggebiete mit der elektrisch isolierenden Paste FX11-036
3. thermische Konditionierung (austreiben Binder und verschmelzen)
4. Siebdruck der Kontaktgebiete mit der elektrisch leitenden Paste FX33-246
5. thermische Konditionierung (austreiben Binder und verschmelzen)
6. Standardbondprozess (430°C, 1000mbar) zum gemeinsamen Fügen der mechanischen und elektrischen Verbindung in ein und demselben Schritt

Abbildung 4.99 zeigt die Realisierung der zusätzlichen elektrischen Kontaktierung des Deckwafers beim Glaslotbonden. Besonders ist darauf hinzuweisen, dass die Druckdicken beider

<sup>69</sup>Bondpads Sensor und Oberseite Deckel, Höhenunterschied 400  $\mu\text{m}$

Glaslote nahezu gleich sind. Dies ist eine notwendige Bedingung für die erfolgreiche Bondung, da nur so sich beide Verbindungen optimal ausbilden können.

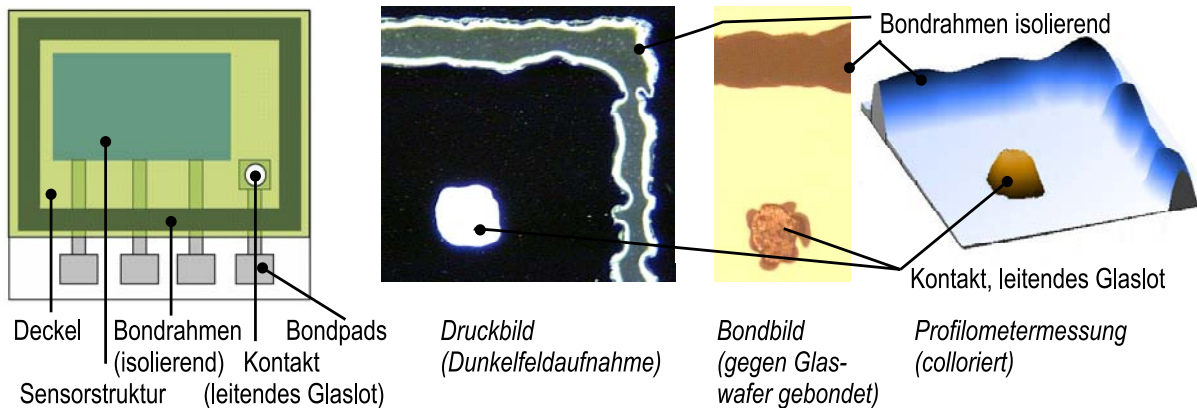


Abbildung 4.99: Prinzip und Ausführung leitfähiger Glaslotbondverbindungen

Die elektrische Bewertung der realisierten Kontakte erfolgte an speziellen Testfeldern, die gezielt die Messung des Verhaltens des einzelnen Kontaktes ermöglichen. In diesen Teststrukturen wurde zusätzlich die Deviceschicht des SOI-Wafers so strukturiert, dass das auf dem Deckwafer aufgebraute Glaslot durch sie hindurch bis hin zum Trägerwafer fließen und so auch diesen elektrisch anschließen kann (Abbildung 4.100). Die Bondversuche zeigten, dass das Benetzungsverhalten des Glaslotes tatsächlich so gut ist, dass es die Struktur des Devicewafers ausfüllt. Somit kann prinzipiell beim Bonden ein Kontakt zwischen den drei Siliziumlagen (Deck-, Device-, Trägerwafer) von in der SCRESOI-Technologie hergestellten Sensoren realisiert werden. Bei den ersten Messungen konnte zunächst kein elektrischer Kontakt über das Glaslot festgestellt werden. Dies lag daran, dass bedingt durch eine noch nicht optimale Prozessführung (Standzeiten) sich isolierende Schichten an den Kontaktflächen gebildet hatten, die jedoch durch Belastungen mit höheren Spannungen<sup>70</sup> dauerhaft durchschlagen werden konnten. Da in den Teststrukturen direkt die entsprechenden Siliziumgebiete angeschlossen worden waren, zeigt die nachfolgende messtechnische Charakterisierung das typische Schottky-Verhalten von Metall-Halbleiterübergängen. Während aufgrund der hohen p-Dotierung von Device und Deckwafern ein guter ohmscher Kontakt deutlich kleiner 1 kOhm erreicht werden konnte, kam es bedingt durch die geringe n-Dotierung des Trägerwafers zu einer Diodenkennlinie am Kontakt Device-Trägerwafer (Abbildung 4.100).

Mit diesen ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass es durch den Einsatz silbergefüllter elektrisch leitfähiger Glaslote möglich ist, während des Bondprozesses gezielt und selektiv eine elektrisch leitfähige Verbindung zu schaffen. Um dieses Prinzip für Sensoren einsetzen zu können, sind jedoch noch umfangreiche Optimierungen notwendig (Siebdruck, Vermeidung

<sup>70</sup>10 bis 20 Volt, was auf wenige nm Dicke Oxidschichten hindeutet

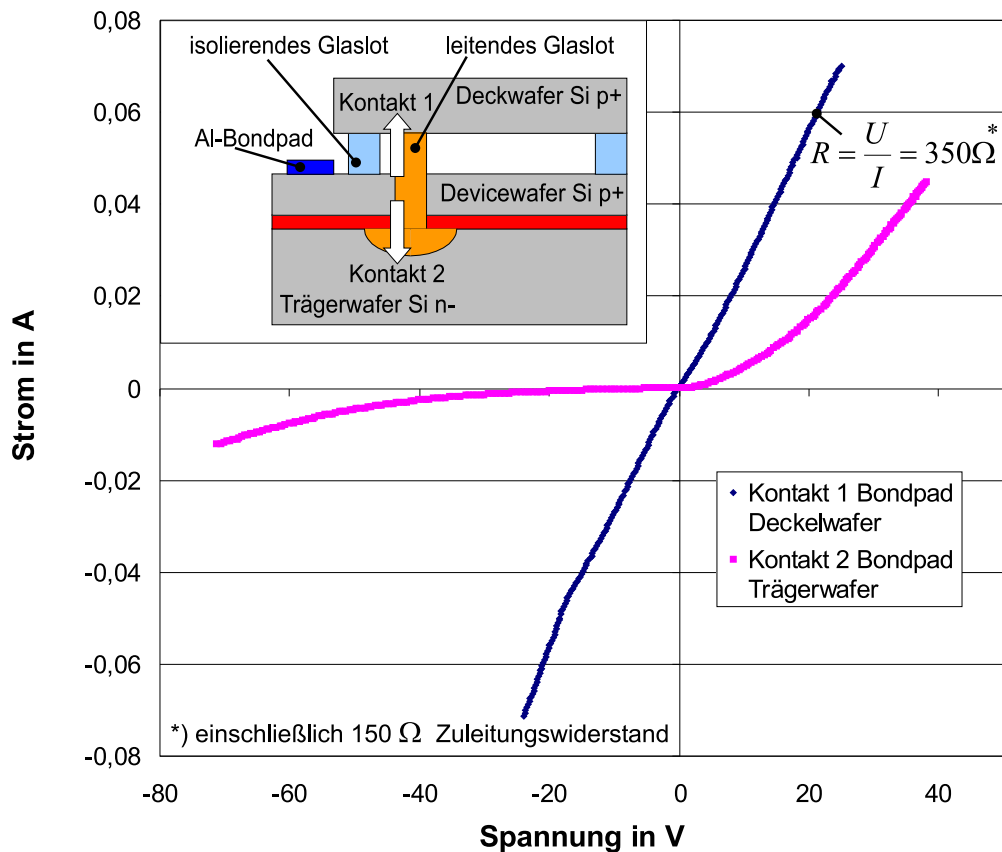


Abbildung 4.100: Messungen an leitfähigen Glaslotbondverbindungen

von Isolationsschichten, Kontaktgestaltung), auch liegen noch keine Zuverlässigkeitsergebnisse vor. Nach Abschluss der Entwicklung sollte es jedoch möglich sein, Abschirmungs- und vielleicht auch Signalkontakte mittels leitfähigem Glaslot zu realisieren. Aufgrund des Fließ- und Benetzungsverhaltens des leitfähigen Glaslotes ist es sogar möglich, Kontakte über Stufen mit mehreren Mikrometern Höhe zu realisieren.

### 4.5.13 Gesamteinschätzung Glaslotbonden

Die Glaslotbondtechnologie erfüllt alle anfangs dieser Arbeit aufgestellten Forderungen an eine Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren. Besonders hervorzuheben ist die hohe Prozesssicherheit unter industriellen Bedingungen, die einfache und kostengünstige Prozessführung (Glasauftrag und -strukturierung in einem Schritt) sowie ihre universelle Einsetzbarkeit (alle relevanten Oberflächen sind bondbar). Dies hat dazu geführt, dass bereits während der Prozessentwicklung diese Bondtechnologie für viele unterschiedliche Anwendungen einge-



setzt wurde. Aufgrund der großen Bedeutung dieses Bondverfahrens wurden sowohl der Prozess als auch die Eigenschaften der Verbindung und des Glaslotmaterials sehr intensiv untersucht. Dies macht den universellen Einsatz des Glaslotbondens bei optimaler Prozessführung möglich. Über die erstellten Designregeln werden die Entwerfer von zu bondenden Sensoren in die Lage versetzt, die Bondrahmen in ihren Entwurf zu integrieren. Des Weiteren ermöglicht der Einsatz leitfähiger Glaslote die Möglichkeit, neben der mechanischen Verbindung einen elektrischen Kontakt zu realisieren. Die wenigen Nachteile des Glaslotbondens (Bondrahmen gleicher Breite, Feuchteempfindlichkeit des Glaslotes, Umweltverträglichkeit) haben sich nicht als gravierend gezeigt bzw. konnten durch geeignete Maßnahmen (z.B. Designregeln) kompensiert werden. Somit steht mit dem Glaslotbonden ein leistungsfähiger Prozess zur Verfügung, der zukünftig verstärkt in der Produktion mikroelektromechanischer Systeme der X-FAB AG eingesetzt werden wird.



# 5 Anwendung des Bondens mit Glaszwischen-schichten in der Sensorentwicklung und -produktion

Während der Entwicklung der Bondtechnologien mit Glaszwischen-schichten für oberflächen-mikromechanische Sensoren hat sich sehr schnell herausgestellt, dass das Glaslotbonden das größte Potential für eine industrielle Anwendung besitzt. Daher wurde es recht frühzeitig in der Entwicklung von Inertialsensoren eingesetzt. Die dabei erzielten sehr guten Ergebnisse, d.h. eine sehr hohe Bondausbeute und das hermetische Abdichten der Sensorstruktur zur Umwelt, verbunden mit einer sehr sicheren Technologieführung und der universellen Einsetzbarkeit dieses Verfahrens, haben dazu geführt, dass es schnell auch für weitere Arten von Sensoren eingesetzt wurde. In diesem Kapitel sollen insgesamt 5 Sensoren vorgestellt werden, bei denen das Glaslotbonden zur Anwendung kommt, um empfindliche Strukturen bereits auf Wafer Ebene abzudecken. In allen Fällen handelt es sich um fertigungsnahe Entwicklungen, d.h. die Sensoren sind produktionsreif und werden bereits industriell gefertigt bzw. stehen vor der Einführung in die Produktion. Die vorgestellten Sensoren sind im Wesentlichen Produkte von Kunden der X-FAB Semiconductor Foundries AG, welche die technologische und technische Fertigungsbasis für Anwender ohne eigene Waferproduktion bereitstellt. Daher soll weniger auf die funktionellen Details und die Endanwendung der Sensoren, sondern vielmehr auf deren technologische Realisierung und im Besonderen auf Aspekte des Waferbondens eingegangen werden.

Für das Bonden mittels gesputterter oder gebondeter und rückgedünnter Glasschichten haben sich hingegen in den letzten 3 Jahren keine Anwendungen ergeben. Die Gründe dafür sind deren schwierige technologische Beherrschbarkeit und insbesondere die hohen Kosten bei ihrer Umsetzung unter industriellen Bedingungen. Somit können hier keine konkreten Anwendungen dieser Verfahren beschrieben werden. Die Vielfalt der Anwendungen des Glaslotbondens zeigt hingegen die Leistungsfähigkeit und universelle Einsetzbarkeit dieser Bondtechnologie und unterstreicht nochmals die Notwendigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Entwicklung eines Verfahrens zum Verkapseln oberflächenmikromechanischer Strukturen auf Wafer Ebene.

## 5.1 Drehratensensoren

Drehratensensoren sind Inertialsensoren zur Erfassung von Drehbewegungen. Das Wirkprinzip beruht auf der Corioliskraft, einer Trägheitskraft in rotierenden Systemen, die dem Kreuzprodukt der Lineargeschwindigkeit einer seismischen Masse und des auf sie einwirkenden Drehmomentes entspricht. In der Praxis ist die Linearbewegung eine Schwingung. Bei einer entsprechenden doppelt gefederten Aufhängung einer seismischen Masse initiiert die Corioliskraft eine Sekundärschwingung, die als Maß für die Drehbewegung gilt und senkrecht zur Primärschwingung gerichtet ist. Es handelt sich hierbei somit um ein aktives Sensorprinzip (Schwingungsanregung ist notwendige Voraussetzung).

Drehratensensoren könnten in den SCRESOI-Technologien, bei der die Drahtbondpadgebiete durch offene Gräben zueinander isoliert sind, gefertigt werden. Das Deckwaferbonden sollte unter Vakuum erfolgen, da sich mit sinkendem Umgebungsdruck die Güten der Schwinger erhöhen und somit die Messgenauigkeit verbessert wird. Bezüglich des hermetisch dichten Waferbondens ergab sich dadurch die Notwendigkeit, um jedes Drahtbondpad einen Waferbondrahmen zu platzieren. Nachdem das Bonden mittels gesputterter Glasschichten keine hermetische Abdichtung ergab (siehe 4.4.3.1), wurde das Glaslotbonden verwendet. Um die störenden parasitären Kapazitäten ausreichend gering zu halten, war der Platz für die Bondrahmenstrukturen minimal zu halten. Nur durch Zusammenlegen der Bondrahmen benachbarter Bondpadgebiete zu einem Waferbondsteg (Breite von ca. 200  $\mu\text{m}$ ) konnte dies erreicht werden.

Das Bonden von Sensor- und Deckwafer erfolgte bei einem Umgebungsdruck von  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar. Anhand der Güte gebondeter Sensoren und dem Vergleich mit Simulationen wurde ein eingeschlossener Druck von 1 bis 3 mbar ermittelt. Dies bedeutet, dass es während oder nach der Verbindungsbildung zu einem Druckanstieg in dem abgeschlossenen Volumen kommt, vermutlich durch Ausgasungen des Glaslotes (organische Binderreste). Für die gewünschte Messgenauigkeit der Drehratensensoren ist der erreichte Innendruck jedoch ausreichend. Geringere Innendrucke lassen sich nur erzielen, wenn gasbindende Getterschichten zusätzlich in das Sensorvolumen eingebracht werden [54]. Eine Nachmessung der Sensoren nach mehrmonatiger Lagerung ergab keine Erhöhung des Sensorinnendrucks, sie können somit als hermetisch dicht angesehen werden. Da, wie oben erwähnt, ein und die selbe Glaslotstruktur zwei unpassivierte Bondpadgebiete bedeckt, muss das Glaslot ausreichend elektrisch isolieren, um Leckströme, die das Messergebnis verfälschen, zu verhindern. Daher wurde bereits in 4.5.10.1 das elektrische Verhalten des Glases untersucht. An den realen Sensoren konnte bestätigt werden, dass die Isolationseigenschaften des Glaslotes ausreichend sind. Anhand der Drehratensensoren konnte die Freigabe für das Glaslotbonden als Verkapselungsschritt der X-FAB MEMS-Foundry-Technologie erteilt werden [51, 52]. Abbildung 5.1 fasst die wichtigsten Informationen zusammen (Details siehe [53]).

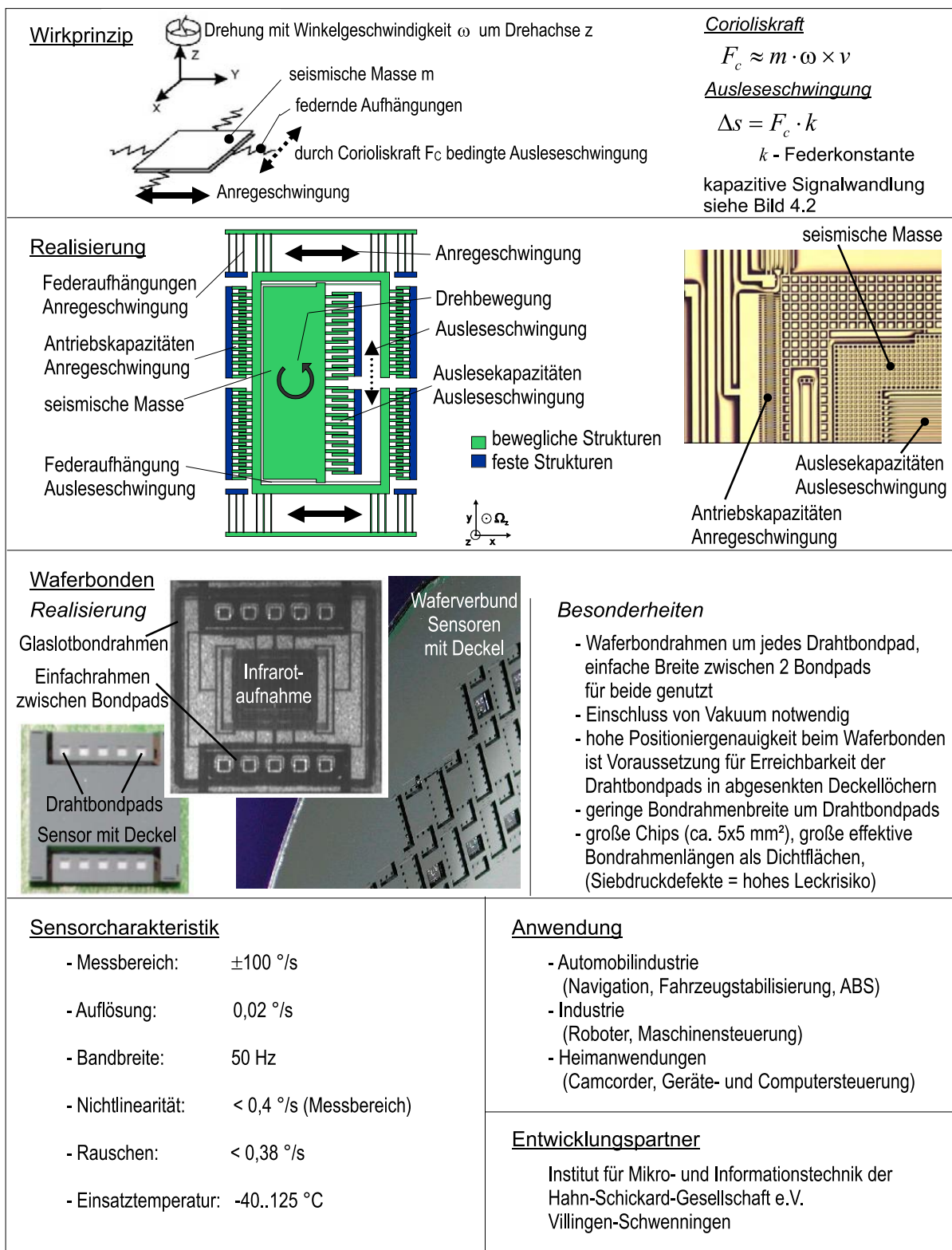


Abbildung 5.1: Zusammenfassung Funktionsweise und Realisierung Drehratensensor

## 5.2 Beschleunigungssensoren

Die für die Drehratensensoren entwickelte SCRESOI-Technologie eignet sich prinzipiell auch zur Realisierung von oberflächenmikromechanischen Beschleunigungssensoren. Dazu ist eine seismische Masse federnd so aufzuhängen, dass sie sich in der Waferebene in x- bzw. y-Richtung bewegen kann. Des Weiteren sind an die Masse Kondensatorplatten anzubringen, so dass diese mit feststehenden korrespondierenden Platten einen Kondensator bilden. Wirkt auf eine derartige Anordnung eine Beschleunigung, so wird die bewegliche Masse durch Trägheitskraft entgegen der Beschleunigungsrichtung ausgelenkt. Dabei ändert sich der Abstand und somit die Kapazität zwischen den feststehenden und den beweglichen Kondensatorplatten. Das entstehende kapazitive Signal ist ein Maß für die Beschleunigung. Proportionalitätsfaktor (Maßverkörperung) zwischen Beschleunigung und Kapazitätsänderung ist die Federkonstante der Aufhängung. Durch Vervielfachung der Plattenpaare (Parallelschaltung von Messkondensatoren) lässt sich die Empfindlichkeit erhöhen.

Nach der Realisierung der ersten Muster in der SCRESOI-Technologie stellte sich heraus, dass diese nicht für die geplante Anwendung geeignet waren. Die parasitären Kapazitäten der großen von Waferbondrahmen umschlossenen Drahtbondpads erschwerten die Auswertung des Sensorsignals, so dass dieses nicht sauber verarbeitet werden konnte. Obwohl sehr wenig Drahtbondpads benötigt werden, erreichte der Flächenbedarf der zur Abdichtung zu umbondenden Drahtbondpads den des eigentlichen Sensors. Eine wirtschaftliche Produktion ist jedoch nur bei kleiner Sensorgröße möglich. Beide Einschränkungen konnten durch verfüllte Isolationsgräben gelöst werden. Durch sie und eine zusätzliche Isolationsebene ist keine offene Grabenisolation zwischen den Bondpads mehr notwendig. Die Bondpads liegen auf der Isolation und sind durch Metallleitungen, die über die verfüllten Gräben führen, mit der Sensorstruktur verbunden. Die einzelnen Sensorteile sind jedoch weiterhin funktionsbedingt durch offene Gräben gegeneinander isoliert. Somit konnten die parasitären Kapazitäten deutlich minimiert und eine wirtschaftliche Fertigung sehr kleiner Chips ermöglicht werden.

Für das Waferbonden bedeutet dies, dass sich im Bereich der Glaslotrahmen unpassivierte Metallleitungen im Sinne von Signaldurchführungen befinden. Es zeigte sich in der Praxis, dass diese sehr gut beim Bonden vom Glaslot umflossen und eingeschmolzen werden, so dass ein hermetisch dichter Verschluss erreicht werden konnte. Auch hier kommt der exakten Position des Deckels auf dem Sensorwafer eine große Bedeutung zu. Zum einem sind die Abstände vom Bondrahmen zur Sensorstruktur gering, um kleine Chips zu erzielen, zum anderen wird anhand von Marken auf dem Deckel der Wafer vereinzelt. Somit führt ein Versatz des Deckels dazu, dass der Sensorwafer falsch gesägt und der Einzelsensor eventuell beschädigt wird. In Abbildung 5.2 ist die Funktionsweise und die Realisierung des Beschleunigungssensors zusammengefasst.

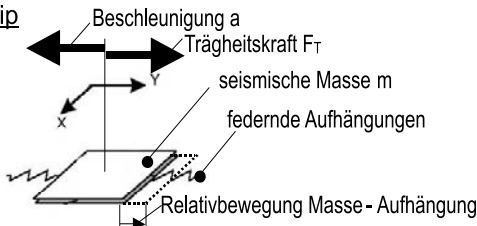
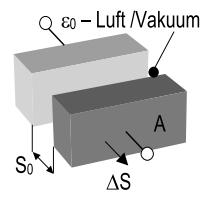
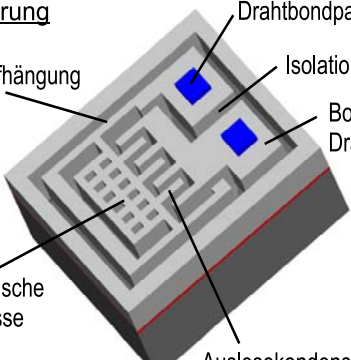
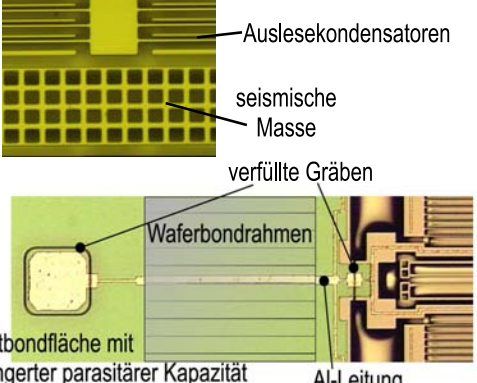
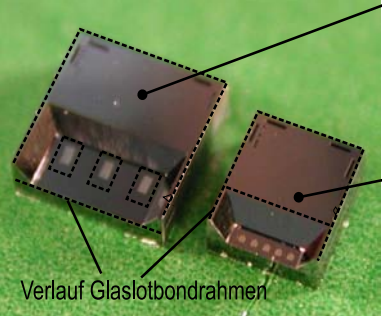
<p><u>Wirkprinzip</u></p>  <p>Beschleunigung a Trägheitskraft <math>F_T</math> seismische Masse m federnde Aufhängungen Relativbewegung Masse - Aufhängung</p>	<p><u>Trägheitskraft</u> <math>F_T = m \cdot a</math></p> <p><u>Auslenkung</u> <math>\Delta s = F_T \cdot k</math></p> <p><u>Kapazitätsänderung</u> <math>\Delta C = \frac{-\epsilon_0 \cdot A}{s_0^2} \cdot \Delta s</math></p>  <p><math>\epsilon_0</math> - Luft / Vakuum <math>s_0</math> A <math>\Delta s</math></p>
<p><u>Realisierung</u></p>  <p>Drahtbondpads Isolationsgräben Bondfläche um Drahtbondpads seismische Masse Auslesekapazitäten Federaufhängung</p>	 <p>Auslesekapazitäten seismische Masse verfüllte Gräben Waferbondrahmen Drahtbondfläche mit verringerter parasitärer Kapazität Al-Leitung</p>
<p><u>Waferbonden Realisierung</u></p>  <p>Verlauf Glaslotbondrahmen SCRESOI-Technologie ohne verfüllte Gräben Waferbondrahmen um jedes Drahtbondpad SCRESOI-Technologie mit verfüllten Gräben eine große Deckelöffnung deutlich kleineres Chip</p>	<p><u>Besonderheiten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- kleine Chips mit rechteckigen Bondrahmen durch verfüllte Isolationsgräben</li> <li>- kein Bonden im Vakuum notwendig</li> <li>- metallische Leitbahndurchführungen in der Bondglasschicht</li> <li>- Metallisierung auf Deckel, damit dieser als elektrische Abschirmung auf Masse gelegt werden kann - verbesserte Signalqualität, hoher Prozessaufwand für Deckelwafer</li> <li>- geringe parasitäre Kapazitäten</li> <li>- Sägen nach Marken auf Deckel, genaue Positionierung Deckel- zu Sensorwafer nötig</li> </ul>
<p><u>Sensorcharakteristik</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empfindlichkeit: 5.5 mV/g (Differentialausgang)</li> <li>- Messgenauigkeit: 0,1 g</li> <li>- Messbereich: <math>\pm 300</math> g</li> <li>- Einsatztemperatur: -40...125 °C</li> </ul>	<p><u>Anwendung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Automobilindustrie (Airbaganwendungen und Fahrzeugstabilisierung)</li> </ul>
<p><u>Kunde und Entwicklungspartner</u></p> <p>Melexis NV, Tessenderlo Belgien</p>	

Abbildung 5.2: Zusammenfassung Beschleunigungssensor, Wirkungsweise und Realisierung

## 5.3 Reifendruckmesssystem

Systeme zur Online-Messung des Reifendrucks von Kraftfahrzeugen werden als die nächste hochvolumige Anwendung von mikromechanischen Sensoren angesehen. Ein Systemkonzept beruht auf der Integration eines batteriebetriebenen Senders im Reifen, der die Reifendruckdaten zu einem Empfänger im Fahrzeug sendet. Um die Standzeit der Batterie zu erhöhen, ist die Integration eines Beschleunigungssensors notwendig, der nach Fahrtbeginn die Drehbewegung des Rades erfasst, um das Reifendruckmesssystem einzuschalten. Für diese Anwendung sollten ein mikromechanischer Beschleunigungssensor und ein Drucksensor auf einem Chip integriert werden. Die Hauptprozessschritte zur Fertigung beider Sensoren sollten identisch sein, was mit der in 3.3.2.3 beschriebenen Technologie möglich ist. Es zeigte sich jedoch, dass einseitig aufgehängte Zungen nur dann ausreichend beschleunigungsempfindlich sind, wenn sie im Bereich der Aufhängung etwa auf die Hälfte abgedünnt werden. Dies kann durch KOH-Ätzen unter Nutzung einer zusätzlichen Maskenebene vor dem Bonden des Membranwafers erfolgen. Seitens des Verkapselungsbondens beinhaltet diese Sensorkombination zwei neue Herausforderungen an das Glaslotbenden:

1. Der Deckel sollte dünn sein (ca. 100  $\mu\text{m}$ ), um eine Plastverkappung zu ermöglichen. Zu dem waren neben den Bondpadgebieten auch die Drucksensorbereiche zu öffnen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die zu öffnenden Bereiche von der Bondseite des Deckwafers abgesenkt werden. Nach dem Bonden wird der Deckwafer dann soweit abgeschliffen, dass sich diese Bereiche öffnen. Für das Schleifen ist eine sehr hohe Bondqualität erforderlich, da die Verbindung beim Schleifen stark belastet wird.
2. Damit bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten die einseitig aufgehängte seismische Masse nicht abbricht, muss sie sich an den Deckel anlegen können (Überlastschutz). Dazu darf der Abstand zum Deckel nicht zu groß sein. Somit ist keine Vertiefung im Deckel möglich und der Abstand muss letztlich durch das Glaslot eingestellt werden. Dieses darf beim Bonden nicht verlaufen, da es sonst zum Anbenden der Masse kommen würde. Durch Optimierung der Siebdruckqualität und des Bondprozesses konnte dieser Anspruch erfüllt werden. Für den Start der Produktion sind jedoch Verlaufstopprahmen im Deckel vorgesehen, um den Prozess sicher zu gestalten.

Mit dieser Technologie (siehe Abbildung 5.4) zur Herstellung von Druck- und Beschleunigungssensoren auf einem Chip konnte die monolithische Integration verschiedener mikromechanischer Komponenten gezeigt werden. Das Deckelbenden erfolgte im Vakuum. Undichte Beschleunigungssensoren konnten im Test anhand fehlenden Resonanzverhaltens erkannt werden.



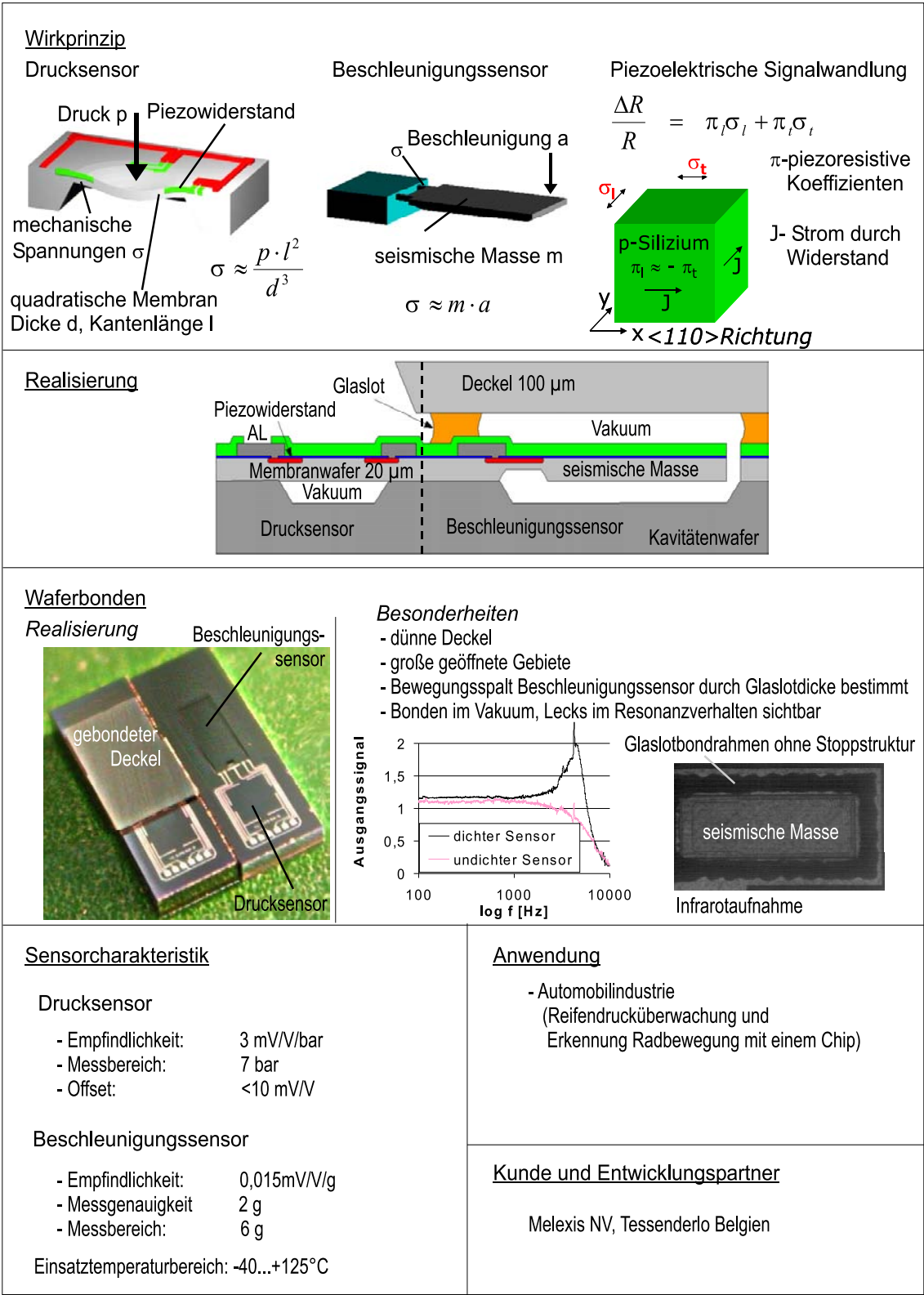


Abbildung 5.3: Reifendruckmesssystem Zusammenfassung, Wirkungsweise und Realisierung

## 5.4 Verkapseln optischer Strukturen auf Wafer ebene

Die nächste Generation optischer Speichermedien, DVD-Systeme mit erhöhter Datendichte, bedürfen kurzwelligeren Lichtes im nahen ultravioletten Bereich (405 nm, blau), um die räumlich eng gepackten Informationen lesen und schreiben zu können. Für diesen Zweck wurden Dioden der X-FAB-CMOS- und BiCMOS-Prozesse, die prinzipiell alle eine Lichtempfindlichkeit aufweisen, entsprechend optimiert. Die Lichtempfindlichkeit der Dioden beruht darauf, dass die Energie des einfallenden Lichtes Ladungsträger in der Verarmungszone des in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergangs der Diode freisetzt. Diese Ladungsträger bewegen sich unter der Einwirkung des äußeren elektrischen Feldes und führen zu einem erhöhten Sperrstrom, der somit ein Maß für die Intensität des einfallenden Lichtes darstellt. Die Optimierung der Dioden für den blauen Bereich umfasst sowohl technologische als auch Designaspekte [55].

Neben der Realisierung der eigentlichen optisch aktiven Fotoempfängerchips werden an das Assembly hohe Anforderungen gestellt. Die klassischen lichtdurchlässigen Plastikgehäuse können nicht eingesetzt werden, da sie unter Einwirkung von UV-Licht nicht langzeitstabil sind. Das Einsetzen von optischen Glasfenstern in die Plastikgehäuse während des Aufbauprozesses ist schwer möglich, da es sich durch den Einsatz hochintegrierter BiCMOS-Technologien um sehr kleine Chips ( $\leq 4 \text{ mm}^2$ ) und noch kleinere Fenster handelt ( $\leq 1 \text{ mm}^2$ ). Unter diesen Randbedingungen konnte eine Assemblyvariante entwickelt werden, bei der im Waferverbund sehr kleine optische Fenster auf die Chips aufgebracht werden. Nach dem Vereinzeln der Chips werden diese auf einen normalen Trägerstreifen aufgebracht und mittels Drahtbonden kontaktiert. Beim Umspritzen der Chips mit Mouldmasse zu verkapselten Bauelementen dichtet eine weiche Einlage in der Form die Oberfläche des optischen Fensters ab, so dass diese frei bleibt. Somit ragt das optische Fenster aus der Plastoberfläche heraus und gibt dem Licht einen Weg ins Gehäuseinnere frei.

Das Aufbringen der optischen Fenster erfolgt durch Bonden von Glaswafern (SCHOTT Borofloat33), die im Wellenlängenbereich um 400 nm ausreichend transparent sind. Nach dem Siebdruck und vor dem Bonden werden die Glaswafer bis zur Hälfte ihrer Dicke eingesägt, so dass nach dem Bonden von der anderen Seite erneut gesägt werden kann, um das ungebondete Glas über den Drahtbondgebieten zu entfernen ohne die Oberfläche des Sensorwafers zu beschädigen. Bedingt durch die kleinen Chipmaße muss das Glaslotbonden auf elektrisch aktiven Strukturen erfolgen, die jedoch durch die Standardpassivierung ausreichend geschützt sind, wie Sondermessungen und erste Lebensdauertests ergaben. Um die Bondfläche zu minimieren, wurden Eckenkompensationstrukturen und schmale Rahmen verwendet. Mit dem Aufbringen der optischen Fenster auf integrierte Schaltungen konnte gezeigt werden, dass das Glaslotbonden CMOS-kompatibel ist und keiner gesonderten Bondflächen bedarf. Damit ist der Nachweis der Einsetzbarkeit des Glaslotbondens für integrierte Sensoren erbracht.

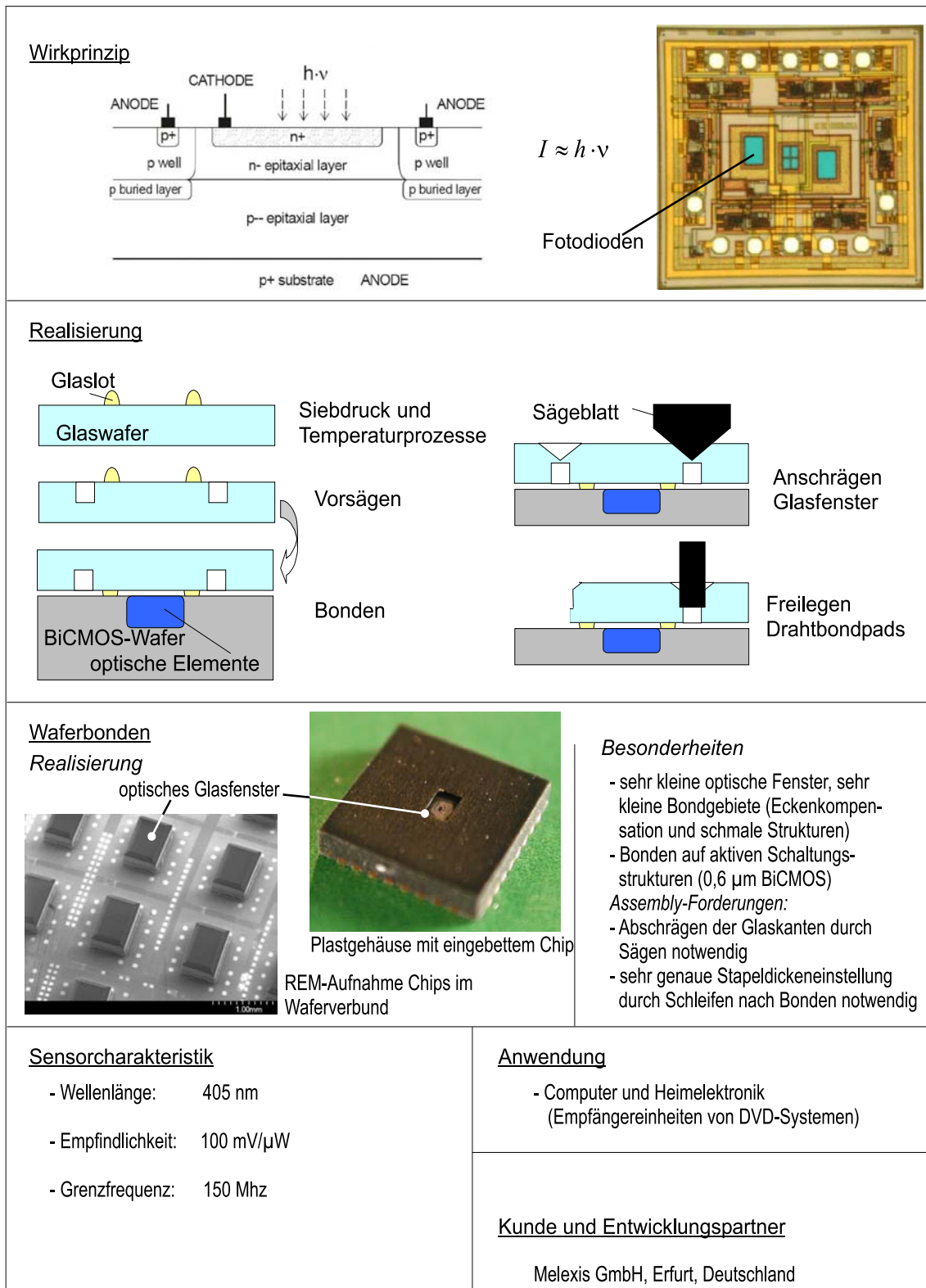


Abbildung 5.4: Verkapselung optischer Elemente durch Glaslotbonden; Zusammenfassung und Realisierung

## 5.5 Elektrisch trimmbare Widerstände

Bei analogen und gemischt analog-digitalen integrierten Schaltungen ist es häufig notwendig Widerstände im Nachhinein abzugleichen, um Exemplarstreuungen zu minimieren und so die gewünschte Funktion der Schaltung zu erzielen. Die Ursachen für Variationen der Widerstände liegen in Prozesstoleranzen, Designschwächen und Einflüssen des Packagings. Des Weiteren sind Kompensationsschaltungen notwendig, wenn die Schaltungen in einem weiten Temperaturbereich eingesetzt werden sollen. Die bisher verbreiteten Abgleichmethoden (externe Potentiometer, Laserabgleich, Fuse-Arrays) weisen diverse Nachteile auf (Platzbedarf, Kosten, begrenzte Genauigkeit). Dies hat O. Grudin, L. Landsberger und G. Frolov von der Firma Microbridge Technologies Inc. veranlasst, einen mehrfach, bidirektional, kontinuierlich, elektrisch trimmbaren Widerstand Rejustor<sup>®</sup> (Re-adjustable resistor) zu entwickeln [56]. Das Prinzip beruht auf der Veränderung des Wertes von polykristallinen Widerständen bei Temperaturbehandlungen ( $T \gg 500^\circ\text{C}$ ) aufgrund von Veränderungen im Korngefüge von Polysilizium. In dem man in einem abgeschlossenen Volumen einen Widerstand durch sich selbst oder einen von ihm räumlich getrennten Heizer erwärmt, kann man dessen Wert dauerhaft verändern und somit einstellen. Der Vorteil besteht dabei darin, dass im aufgebauten und verkapselten Zustand ein Trimmen durch das Zuführen von Leistung mittels Anlegen einer Spannungen an Heizer oder Widerstände vorgenommen werden kann [57]. Zur technischen Realisierung der beschriebenen Anordnung, sind die zu trimmenden Widerstände und der dazugehörige Heizer auf einer perforierten Membran anzubringen. Diese Anordnung garantiert die thermische Isolation der Funktionselemente zueinander und zu den anderen Elementen des Schaltkreises, die sich beim Trimmen nicht erwärmen dürfen. Technologisch können diese Strukturen in einen CMOS-Prozess integriert werden, indem man die tragende Membranschicht beim Schichtaufbau berücksichtigt und am Prozessende die Widerstände und Heizer durch ein Unterätzen mittels KOH freilegt. Dazu ist eine Schutzschicht über den Schaltungselementen notwendig, die nach dem Ätzen wieder zu entfernen ist, damit die Drahtbondpads wieder zugänglich werden. Bei dieser Anwendung kommt dem Verkapseln auf Waferbasis doppelte Bedeutung zu. Zum einen müssen die frei stehenden feinen Strukturen mit einem Deckel geschützt werden, um das Vereinzeln und Aufbauen der Chips ohne deren Beschädigung zu ermöglichen. Zum anderen werden durch den Abschluss des Volumens die Wärmeübergangsverhältnisse definiert. Da zukünftig diese Elemente in Standardsschaltkeise integriert werden sollen, müssen die Deckel dünn ( $\leq 100 \mu\text{m}$ , um die AVT nicht zu stören) und klein (Flächenbedarf) sein. Die sehr dünnen Deckel wurden auch in diesem Fall durch das Rückschleifen der Deckwafer bei gleichzeitigen Öffnen der Bondpads erreicht. Schmale Bondrahmen konnten mittels beidseitiger Begrenzung der Druckflächen durch Absenkungen im Deckel realisiert werden. Somit konnte eine Verkapselungsmethode für den neuartigen trimmbaren Widerstand gefunden werden, die eine AVT-Standardverarbeitung ermöglicht.

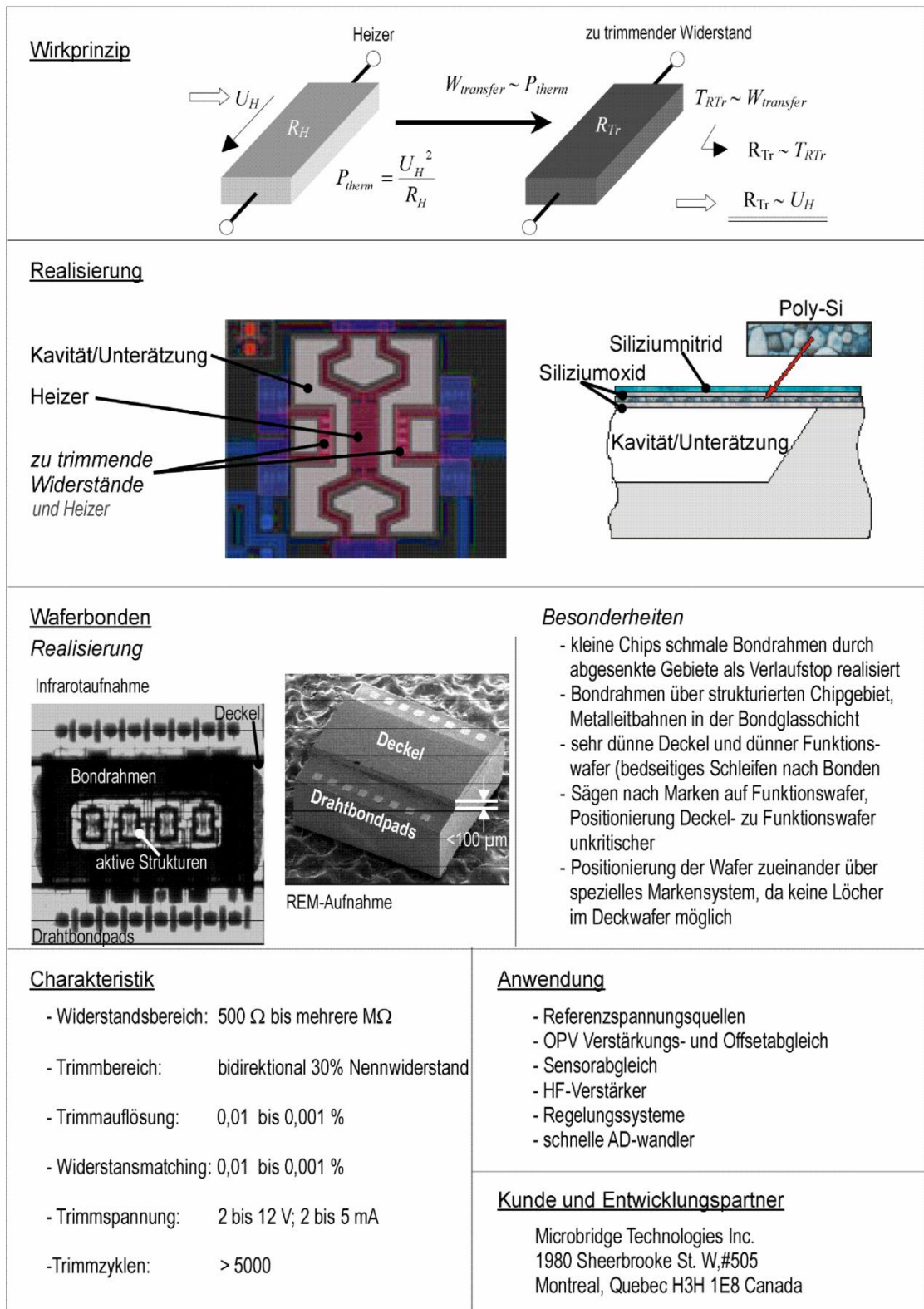


Abbildung 5.5: Zusammenfassung elektrisch trimmbare Widerstände, Wirkungsweise und Realisierung



# 6 Zusammenfassung und Ausblick

## 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ausgehend von der wachsenden Bedeutung der Mikrosystemtechnik und dem steigenden Anteil von Oberflächenmikromechanik an der Fertigung mikroelektromechanischer Systeme auf Siliziumbasis wurden drei Technologievarianten vorgestellt, die sich inzwischen in der X-FAB AG etabliert haben. Während in der SCRESOI-Technologie, in der ursprünglichen und der verbesserten Variante, kapazitive Inertialsensoren für Drehraten und Beschleunigung hergestellt werden können, ist die Oberflächentechnologie für piezoresistive Sensoren dazu geeignet, Absolutdrucksensoren sowie Beschleunigungssensoren und sogar ihre gemeinsame Integration auf einem Chip zu realisieren. Zum besseren Verständnis wurden einige Basisteilschritte dieser Technologien erläutert. Da bei allen Technologien der Oberflächenmikromechanik sehr feine, frei bewegliche und somit fragile Strukturen entstehen, müssen diese nach dem Freilegen für die Weiterverarbeitung und ihren Einsatz mit einem Deckel geschützt werden. Das Aufbringen dieser Deckel erfolgt am Besten parallel für alle Chips eines Wafers durch Waferbonden. Die Entwicklung einer für den Einsatz in einem industriellen Produktionsprozess geeigneten Bondtechnologie für eine derartige Verkapselung stand im Mittelpunkt dieser Arbeit. Ausgehend vom Stand der Technik im Bereich der Waferbondtechnologien und deren Systematisierung sowie der Analyse der spezifischen Anforderungen an das Bonden von Wafern mit oberflächenmikromechanischen Strukturen wurde festgestellt, dass der Einsatz von Bondtechniken mit strukturierten Zwischenschichten notwendig ist. Als Zwischenschichtmaterial wurden Gläser gewählt, da sie aufgrund ihres amorphen Charakters vielfältige technologische Möglichkeiten bieten sowie als langzeitstabil und zuverlässig gelten. Nach einer kurzen allgemeinen Einführung zu Gläsern und ihren spezifischen Eigenschaften wurden geeignete Bondgläser vorgestellt.

Als gängigste Technologie zum Verbinden von Glas mit Halbleitermaterialien wurde das anodische Bonden anhand praktischer Erfahrungen aus der Bulkmikromechanik erläutert. Dieses Verfahren sollte zum Bonden von auf Siliziumwafern aufgetragenen Glasschichten eingesetzt werden. Dazu wurde zunächst die Methode des Bondens dünner gesputterter Glasschichten

untersucht. Dabei zeigte sich, dass sich bei entsprechender Aktivierung der zu bondenden Oberflächen ein anodisches Bonden dieser ca. 3  $\mu\text{m}$  dicken Zwischenglasschichten erreichen lässt, wobei die Bondfestigkeit letztendlich durch das beim Bondvorgang geschwächte gesputterte Glas-Silizium-Interface eher gering ist. Aufgrund partikelbedingter Durchschläge der Glasschicht, kritischer Designeinflüsse und der inhomogenen Verteilung des Bondoberflächenpotentials konnte jedoch kein sicherer Prozess zum hermetisch dichten Abschließen von Oberflächenmikromechanikstrukturen entwickelt werden. Daraufhin wurde die Nutzung gebondeter und rückgedünnter Glaswafer als Bondzwischen-schicht untersucht. Dazu wurden massive Glaswafer anodisch gegen Deckwafer gebondet und mittels Ätzens rückgedünnt. Anschließend erfolgte die nasschemische Strukturierung der Glasschicht. Die Bondversuche ergaben, dass aufgrund der Verarmungszone des ersten Bondschrittes eine Mindestglasdicke von 50  $\mu\text{m}$  benötigt wird. Aufgrund der am Waferrand prozessbedingt zurückgesetzten Glaszwischen-schicht erwies sich auch hier die Bondprozessführung als schwierig (Überschläge). Obwohl sehr gute Bondqualitäten erreicht werden konnten, wurde diese Variante aufgrund des hohen Aufwandes beim Aufbringen und Strukturieren der Glaszwischen-schicht nicht weiter verfolgt.

Als technologische Lösung für die Verkapselung von oberflächenmikromechanischen Strukturen erwies sich schließlich das Glaslotbonden. Hierbei werden aus Glaspulver und organischem Binder bestehende Pasten, die von verschiedenen Herstellern kommerziell angeboten werden, auf die Waferoberfläche aufgebracht. Dies erfolgt in der Regel im Siebdruckverfahren, welches den Vorteil der insitu-Strukturierung der Bondrahmen von etwa 200  $\mu\text{m}$  Breite mit sich bringt. Da bei der Gestaltung der Bondrahmen vielfältige Aspekte zu beachten sind, um einen sicheren Siebdruck zu ermöglichen, wurden entsprechende Designregeln aufgestellt. Nach dem Aufbringen werden die gedruckten Pastenstrukturen in einem mehrstufigen Prozess thermisch konditioniert, d.h. der organische Binder wird ausgetrieben und das Glaslot wird vorverschmolzen. Nach dem Ausrichten der Waferpaare werden diese in einem thermokompressiven Prozess bei 430°C und 300 bis 1000 mbar gebondet. Zur Ermittlung der geeigneten Bondparameter wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Ausschlaggebend für die Verbindung sind die Benetzung der Waferoberfläche durch das Glaslot und nachfolgende Lösungsvorgänge von Oberflächenschichten im Glas, so dass beim Abkühlen eine verbindende Übergangsglasschicht entsteht. Durch das Benetzungsverhalten wirkt das Glaslot planarisierend und gleicht somit Stufen und Oberflächenrauigkeiten aus. Um eine hohe Positioniergenauigkeit der Wafer (weiche Zwischen-schicht beim Bonden) zu gewährleisten, ist eine Fixierung der Wafer am Rand notwendig und die thermischen Dehnungen von Wafern und Bondwerkzeug dürfen sich nur wenig unterscheiden. Die Dicke der gebondeten Fuge beträgt etwa 10  $\mu\text{m}$  und wird im Wesentlichen durch die Auftragstärke beim Siebdruck bestimmt, wenngleich es bei der thermischen Konditionierung zu einer Verdichtung und beim Bonden zu einer Umverteilung des Glaslotes kommt. Bedingt durch die strukturierten Bondrahmen ist eine selektives Bonden möglich. Es empfiehlt sich



jedoch, im Deckwafer Vertiefungen neben den Bondgebieten einzubringen. Diese erhöhen zum einen die Positioniergenauigkeit beim Siebdruck und dienen zum anderen als Ausgleichszone bei einem eventuellen Verlaufen des Glaslotes während des Bondens. Zugversuche zeigten eine sehr hohe Festigkeit der Bondverbindung (20 MPa, bezogen auf die Bondrahmenfläche), wobei es stets zum Versagen des Glaslotes und nicht der Grenzflächen kam. In Bondversuchen haben sich alle in der Siliziummikromechanik üblichen Oberflächen als bondbar erwiesen (Silizium, Isolatoren, Metalle, Polyimide), wobei stets sehr hohe Bondausbeuten erreicht wurden. Ebenfalls war das Bonden von Gläsern der Pyrexfamilie gegen Silizium möglich, das Bonden von Substraten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hingegen erwartungsgemäß nicht. Das Bonden in und somit der Einschluss von Vakuum ist bei modifizierter Temperaturführung (verändertes Wärmeübergangsverhalten) möglich. Der Innendruck gebondeter resonanter Strukturen wurde anhand ihrer Güte mit etwa 3 mbar bestimmt, was auf ein Ausgasen organischer Reste aus dem Lotglas beim Bonden hindeutet. Die Bondrahmen können als hermetisch dicht angesehen werden, auch wenn sie von metallischen Leitbahnen gekreuzt werden. Das Glaslot ist bis 150°C ausreichend isolierend, so dass es direkt auf Bereiche mit unterschiedlichen Potentialen (benachbarte Leitbahnen) aufgebracht werden kann. Bedingt durch eine zum Silizium erhöhte thermische Dehnung des Glases treten bei der thermischen Konditionierung des Glaslotes und beim Bonden thermomechanische Spannungen auf, die sich nicht auf die Sensoren auswirken, jedoch das Bruchverhalten des Glaslotes bestimmen. Aufgrund seines Bleigehaltes weist das Glaslot eine Feuchteempfindlichkeit auf, die im gebondeten Zustand bedingt durch die beidseitige Abdeckung nicht relevant ist. Der Einsatz bleihaltiger Glaslote ist mit den bestehenden und künftig zu erwartenden Umweltschutzbestimmungen vereinbar. Zuverlässigkeitstests ergaben eine Beeinflussung der mechanischen Festigkeit der Glaslotverbindung, jedoch in einem Maße, das für die praktische Anwendung nicht relevant ist. Durch den Einsatz leitfähiger Glaslote konnte neben dem mechanischen Fügen von Sensor und Deckel auch ein elektrischer Kontakt zwischen beiden realisiert werden.

Anhand fünf unterschiedlicher Anwendungen konnte der universelle Einsatz des Glaslotbondens zum Verkappen mechanischer, optischer und elektrischer Strukturen, hergestellt in verschiedenen Technologien gezeigt werden. Das erfolgreiche Aufbringen von Glaslot auf die passivierte Oberfläche von integrierten Schaltungen zeigte das Potential dieser Technologie für die Herstellung integrierter Sensoren. Somit konnten die anfangs aufgestellten Anforderungen an eine universell unter industriellen Bedingungen sicher und zuverlässig mit hoher Ausbeute und ohne Rückwirkungen auf die zu schützenden Strukturen anwendbare Bondtechnologie mit dem Glaslotbonden erfüllt werden. Begrenzend für deren Anwendbarkeit ist lediglich die mit 430°C noch recht hohe Bondtemperatur, die das Bonden temperaturempfindlicher Strukturen nicht zulässt.

## 6.2 Schlussfolgerungen

Anhand der Produktion und Entwicklung von mikroelektromechanischen Siliziumkomponenten in der X-FAB AG während der Dauer der Bearbeitung dieses Themas lässt sich schlussfolgern, dass dem Verkapselungsbonden auf Waferebene die enorm wichtige Aufgabe zukommt, empfindliche Strukturen direkt nach ihrem Freilegen zu schützen und somit eine Weiterverarbeitung mit Standardprozessen der Aufbau- und Verbindungstechnik zu ermöglichen. Erfahrungen haben gezeigt, dass das Gehäusekonzept genau so wichtig für den kommerziellen Erfolg eines Sensors ist, wie seine eigentliche Funktionalität. Ohne eine einfache, sichere und preiswerte Umverpackung und -verdrahtung lassen sich Sensoren nicht in den Markt einführen. Durch das Glaslotbonden konnte eine sehr geeignete und universell einsetzbare Lösung geschaffen werden, Sensoren auf Waferebene effektiv so vorzubereiten, dass im eigentlichen Aufbau- und Verbindungsprozess Aufwand und Kosten gesenkt werden können. In der Kombination von Verkappung auf Waferbasis und der klassischen AVT lassen sich sehr effektiv zuverlässige Mikrosysteme herstellen und in den Markt einführen. Dabei übernimmt das Waferbonden den direkten Schutz der Strukturen, während das Umgehäuse (z.B. DIL oder SMD) definierte von klassischen Halbleiterbauelementen bekannte Handhabungs- und Anschlussmöglichkeiten bietet. Gleichzeitig ist eine derartige Lösung eine günstige Alternative zu Wafer-Level- oder Chip-Size-Packaging-Technologien, die sich momentan noch im Entwicklungsstadium befinden.

Wenn auch das Bonden gesputterter Glasschichten, bedingt durch die unsichere Prozessführung, sowie die Verwendung von gebondeten und rückgedünnten Glasschichten als nicht geeignet für das Verkappen oberflächenmikromechanischer Sensoren eingeschätzt wurden, so handelt es sich dennoch um interessante technologische Möglichkeiten. Diese beiden Varianten haben sicher Berechtigung wenn das Glaslotbonden, z.B. wegen seiner recht dicken strukturierten Zwischenschicht, nicht eingesetzt werden kann oder soll bzw. für die schnelle Fertigung kleiner Stückzahlen.

Das Glaslotbonden hat sich während seiner Entwicklungsphase als eine sehr sichere und universell einsetzbare Bondtechnologie erwiesen und ist somit ideal für die Verkappung mikromechanischer Strukturen geeignet. So konnten in den letzten beiden Jahren fünf unterschiedliche Sensorarten mit insgesamt 12 verschiedenen Siebdruckdesigns und somit insgesamt mehr als 200 Wafer gebondet werden. Aufgrund der umfangreichen Prozessuntersuchungen können Design- (Bondrahmengestaltung) und Technologieänderungen (zu bondende Oberflächenschicht, Bonden im Vakuum) problemlos ohne Einbußen in der Bondausbeute verkräftet werden. Die planarisierende Wirkung des während des Bondprozesses aufgeschmolzenen Glases ermöglicht das sichere und hermetische Bonden rauer Oberflächen sowie metallischer Leitbahndurchführungen und trägt somit zum universellen Einsatz des Verfahrens und seiner Prozesssicherheit bei. Die Eigenschaften der Bondverbindung und des Glaslotmaterials sind bekannt und

können bei neuen Entwicklungen gezielt eingesetzt und teilweise angepasst werden. Somit ist eine Flexibilität der Anwendung gegeben. Der technologische Ablauf des Prozesses ist sicher zu beherrschen und kann als kostengünstig angesehen werden. Entscheidend dabei sind das Aufbringen und Strukturieren der Glaspaste in einem Schritt sowie die unkritischen Temperaturprozesse. Qualifizierungen an verschiedenen Sensoren haben gezeigt, dass die Bondverbindung als stabil und sicher angesehen werden kann. Durch den Einsatz von leitfähigen Glasloten kann zudem eine gezielte elektrische Kontaktierung zwischen beiden Wafern vorgenommen werden.

Obwohl das Glaslotbonds sehr universell einsetzbar ist, wird es nicht die bisherigen etablierten Bondverfahren komplett verdrängen. Für das Abdecken mikrofluidischer Kanalstrukturen wird das anodische Glaswaferbonds weiterhin am geeignetsten sein. Zum einen können mit ihm sehr schmale Stege (wenige Mikrometer breit) sicher und hermetisch dicht gebondet werden. Zum anderen wäre bei der Anwendung von Glaslot in Fluidiksystemen bedingt durch dessen Feuchtempfindlichkeit ein Auflösen des Glases und somit Verunreinigungen der Flüssigkeiten zu befürchten. Auch bleibt weiterhin das plasmaunterstützte Niedertemperaturdirektbonds von Halbleiterwafern interessant, da dabei, bei ausreichend hohen Oberflächengüten, die in der industriellen Praxis jedoch nur schwer zu erreichen sind, gänzlich auf Zwischenschichten verzichtet werden kann. Wenn nur geringe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und den eingeschlossenen Innendruck gestellt werden, kann auch das adhäsive Waferbonds (Waferkleben) eingesetzt werden, welches in seiner Prozessführung noch etwas einfacher als das Glaslotbonds ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem Glaslotbonds eine sehr sichere universell einsetzbare Technologie zur Verkapselung von oberflächenmikromechanischen Strukturen gefunden und beschrieben werden konnte, die inzwischen Eingang in die Sensorfertigung der X-FAB AG gefunden hat.

## 6.3 Ausblick auf weitere Entwicklungen und technologische Möglichkeiten

Wenn auch im Rahmen dieser Arbeit das Glaslotbonds bis zur Produktionsreife entwickelt werden konnte und die Eigenschaften der Verbindung und des Glasmaterials weitestgehend untersucht wurden stehen doch noch folgende Untersuchungen und Optimierungen aus:

- Evaluierung weiterer Glaspasten für technologische Alternativen, bzw. Untersuchungen an fotosensitiven Pasten, die nach dem Auftrag fotochemisch strukturiert werden können.
- Verbesserung der Siebdruckqualität zur Realisierung schmalerer Bondrahmen und besse-

rer Positioniergenauigkeit, so dass u.U. auf die Strukturierung der Bondrahmenbegrenzung im Deckwafer verzichtet werden kann.

- Optimierung der Bondfuge hin zu höheren oder niedrigeren, jedoch in jedem Fall enger tolerierten Dicken.
- Weiterentwicklung des Bondens leitfähiger Glaslote, um deren Einsatz in Sensoren zu ermöglichen.
- Verbesserung von Kontroll- und Inspektionsverfahren für die gedruckten und gebondeten Glaslotstrukturen.
- Weitere Untersuchungen zur Zuverlässigkeit (mechanische Stabilität, hermetische Dichtigkeit) der Lotglasverbindungen.
- Einsatz von Getterschichten zur gezielten Senkung des Innendrucks verschlossener Sensoren.

Jedoch auch auf den Gebieten der anderen beiden untersuchten Bondverfahren haben sich in der letzten Zeit Entwicklungen ergeben, die es wert sind, weiter verfolgt zu werden. So werden von der Firma Planoptik inzwischen Siliziumwafer mit aufgebondeten und rückgedünnten Glasschichten in hoher Qualität angeboten, die sicherlich für Sonderanwendungen interessant sind. Im Bereich des Bondens gesputterter Glasschichten liegt ein neuer Ansatz vom IPHT Jena vor. Dabei wird ein Lithium-Niobatglas auf Silizium aufgesputtert, welches aufgrund seiner schon bei Raumtemperatur recht hohen Ionenleitfähigkeit bei sehr niedrigen Temperaturen anodisch gebondet werden kann [59].

Da es neben neuen Ideen zu den in dieser Arbeit vorgestellten Bondtechnologien mit Glaszwischen-schichten auch noch ganz neue Ansätze, wie das anodische Bonden aufgesponnener SolGel-Schichten gibt, bleibt diese Gebiet auch weiterhin von wissenschaftlichem Interesse. Dass die Technologie des Glaslotbondens als universelles Bondverfahren der X-FAB AG angesehen und somit in den nächsten Jahren verstärkt Eingang in die Produktion finden wird, wurde bereits mehrfach erwähnt. Somit ist die praktische Nutzung der Hauptergebnisse dieser Arbeit und die Weiterentwicklung des Verfahrens gesichert.

# Anhang



# A Bewertung der Bondfestigkeit

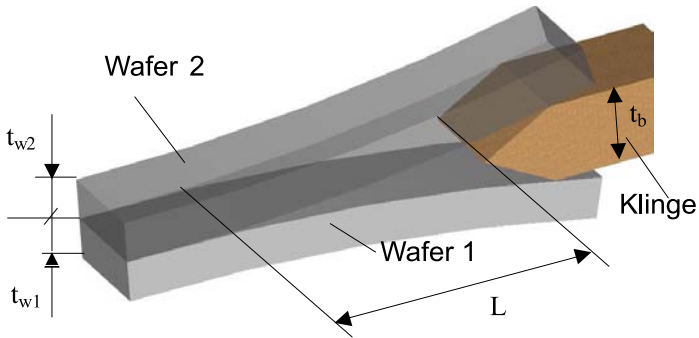
<u>Zugversuche an Chipproben</u>		<u>Abbildung:</u>
<u>Prinzip:</u> Zugebelastung von gebondeten und vereinzelt Chipproben	<u>Anwendung:</u> Bewertung der Bondverbindung an realen Bauteilen mit ihren entsprechenden Bondrahmen	
<u>Auswertung:</u> statistische Auswertung ist für sichere Aussagen notwendig, Probenumfang >20, für Vergleiche Normierung auf Bondfläche und Weibulldarstellung sinnvoll, Weibullfunktion liefert Aussagen zu Ausfallwahrscheinlichkeiten unter Belastung  Weibullverteilung: $P_f = 1 - e^{-\left(\frac{F_B}{F_\Theta}\right)^m}$ $P_f$ : Ausfallwahrscheinlichkeit $F_B$ : Bruchkraft $F_\Theta$ : charakteristische Bruchkraft $m$ : Weibull Modul		
<u>Weibullplot:</u> Aproximierung der Verteilungsfunktion durch Geraden <p>Weibullwert 0 entspricht 63,2% Ausfallwahrscheinlichkeit</p> <p><math>H_k</math> = kumulierte Häufigkeit der Bruchlasten im Test</p>		<u>Bemerkungen:</u> Die Einzelmesswerte schwanken bedingt durch Testprinzip (Krafteinleitung, Klebereinflüsse und etwaige Vorschädigungen) sehr stark.  Geringe Festigkeitsunterschiede, wie sie z.B. bei technologischen Varianten auftreten, können nur sehr schlecht aufgelöst werden. Zur Bauteilbewertung jedoch sehr wichtig, da nur mit ihm die direkten Verhältnisse an der Waferbondverbindung eines realen Chips untersucht werden können.

Literatur: [50]

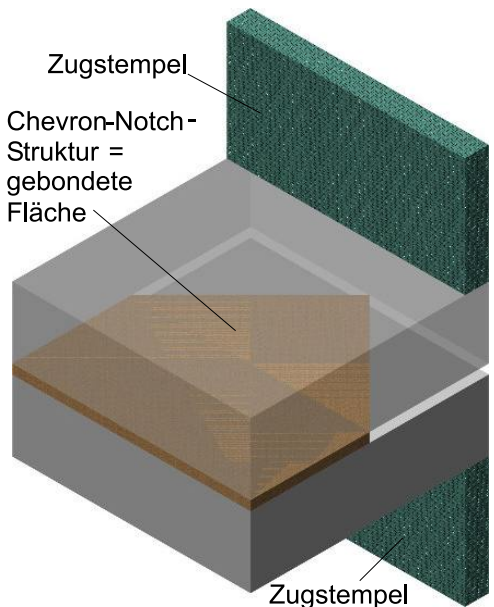
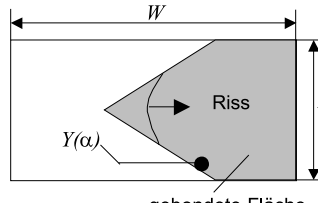
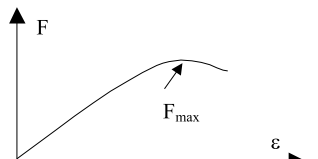
<b><u>Sägen gebondeter Wafer</u></b>		<b>Abbildung:</b>
<b><u>Prinzip:</u></b> Beim Sägen zum Vereinzeln der gebondeten Wafer zu Chips wirken meist größere Kräfte auf die Bondverbindung als in der eigentlichen Anwendung. Somit kann dieser Arbeitsgang als Selektionstest angesehen werden, da Sensoren, bei denen der Deckel abgehoben wurde (zu schwach oder gar nicht gebondet) nicht weiter verarbeitet werden.		
<b><u>Anwendung:</u></b> Routinetest, da Wafer zur Weiterverarbeitung gesägt werden müssen - Aussage über Bondausbeute in der Produktion  Sonderuntersuchungen mit sehr feinem Sägeraster möglich, Ausbeuteverteilung wird sichtbar		
<b><u>Auswertung:</u></b> Auszählen der Chips bei denen sich der Deckel gelöst hat und Berechnen der Ausbeute.	<b><u>Bemerkungen:</u></b> keine reproduzierbare Krafteinwirkung	

<b><u>Überbondete Strukturen</u></b>		<b>Abbildung:</b>
<b><u>Prinzip:</u></b> Ausbildung von ungebondeten Bereichen um erhabene Strukturen im Bondinterface, die ein Maß für die Bondfestigkeit darstellen		
<b><u>Anwendung:</u></b> qualitative Überwachung sicherer Bond-prozesse in der Produktion  nicht geeignet für Bondverfahren mit planarisierenden Zwischenschichten		
<b><u>Auswertung:</u></b> ungebondetes Gebiet darf vorgegebene Maximalausdehnung (Verwerfkriterium) nicht überschreiten, Vergleich mit Skalenstruktur auf Wafer  Bondfestigkeitsberechnung sehr aufwendig und designspezifisch (FEM-Simulationen notwendig)	<b><u>Bemerkungen:</u></b> Bondteststruktur darf Bondverhalten der Nachbarchips nicht beeinträchtigen  bei Siliziumwaferpaaren Infrarotauswertung notwendig	



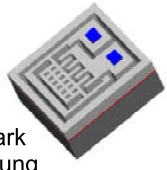
<p><b><u>Klingentest nach Maszara</u></b></p>	<p>Abbildung:</p>	
<p><u>Prinzip:</u></p> <p>Spaltversuch an gebondeten Waferpaaren bzw. an aus ihnen herausgesägten Streifen durch einführen einer Klinge, Spalllänge ist Maß für Bondfestigkeit</p>		
<p><u>Anwendung:</u></p> <p>unstrukturierte Waferpaare, Grundlagenentwicklung, nicht für sehr feste Bondungen geeignet (Klinge lässt sich nicht einführen)</p>		
<p><u>Auswertung:</u></p> <p>Berechnung der Oberflächenenergie der Bondverbindung aus der Spalllänge, die sich nach dem Einführen der Klinge ergibt.</p> <p>allgemein:</p> $(\gamma_{1E} + \gamma_2) = \frac{3t_b^2 E_1 t_{w1}^3 E_2 t_{w2}^3}{8L^4 (E_1 t_{w1}^3 + E_2 t_{w2}^3)}$ <p>identische Wafer:</p> $\gamma = \frac{3t_b^2 E t_w^3}{32L^4}$ <p>ein Wafer sehr dick:</p> $\gamma = \frac{3t_b^2 E t_{w1}^3}{16L^4}$ <p> <i>E:</i> E-Modul  <i>t<sub>w</sub>:</i> Waferdicke  <i>t<sub>b</sub>:</i> Klingendicke  <i>L:</i> Spalllänge  <i>1,2:</i> Waferindex </p>	<p><u>Bemerkungen:</u></p> <p>Die Durchführung dieses Tests zur Ermittlung der Oberflächenenergien ist sehr aufwendig, da beim Bonden von zwei Siliziumwafern die Spalllänge mit Infrarotverfahren ermittelt werden muss. Diese muss mit einer hohen Genauigkeit erfolgen, da dieser Parameter in der 4. Potenz in die Rechnung eingeht.</p> <p>Die genauesten Ergebnisse lassen sich an gesägten Streifen erzielen (hoher Präparationsaufwand). Nachteilig ist, dass dieses Verfahren auf unstrukturierte Wafer begrenzt ist und bei sehr festen Bondverbindungen versagt.</p>	

Literatur: [11] und [27]

<p><b><u>Chevron-Notch-Test</u></b></p>	<p><u>Abbildung:</u></p>
<p><u>Prinzip:</u></p> <p>Selbstinitiiierung eines scharfen Abrisses bedingt durch die lokale Spannkonzentration an Kerben bei geringer Belastung. Geometriebedingt erweitert sich die Risslänge stetig, wobei der Spannungsintensitätsfaktor sinkt. Es bildet sich ein stabiles Risswachstum bis zu einer kritischen Risslänge aus, ab der es in ein instabiles Risswachstum übergeht. Im Kraft-Dehnungsdiagramm ist eine Maximalkraft zu erkennen, aus der sich die Bruchzähigkeit der Probe berechnen lässt.</p>	
<p><u>Anwendung:</u></p> <p>Die durch die definierten Rissausbildungsbedingungen geringen Streuungen der Messwerte lassen genauere Untersuchungen technologischer Einflüsse zu (z.B. Verteilung Bondfestigkeit über Waferfläche, Einfluss von Bondparametern). Weiterhin lässt sich mit wenigen Proben die Bondfestigkeit eines Waferpaares sicher bestimmen (Testproben in Produktionswafern).</p>	<p><u>Bemerkungen:</u></p>
<p><u>Auswertung:</u></p> <p>Berechnung Bruchzähigkeit</p> $K_{IC} = \frac{F_{max}}{B\sqrt{W}} Y(\alpha)$ <p><math>\alpha</math>: relative Risslänge Bezogen auf Probe</p> <p><math>Y</math>: Probengeometriefunktion</p>  	<p>Integration in Wafertechnologie nicht immer möglich, da Chevron-Notch-Struktur als Stufe realisiert wird und gleiches Bondverhalten wie Chipbondrahmen aufweisen muss</p> <p>Bestimmung Probengeometriefunktion nicht analytisch möglich, Einschränkung möglicher Probengeometrien</p>

Literatur: [58]



<p><b>Resonante Strukturen</b></p>	<p><b>Abbildung:</b></p>
<p><u>Prinzip:</u></p> <p>In dem auf Dichtigkeit zu prüfenden mittels Waferbonden verschlossenem Volumen befindet sich eine resonante Struktur, deren Güte (Resonanzüberhöhung) von dem eingeschlossenen Innendruck abhängt. Steigt dieser leckbedingt während des Lebensdauertests oder während der Verwendung des Bauelements an, verringert sich die Güte und das Leck kann qualitativ ermittelt werden.</p>	<p>Voraussetzung: resonante Struktur als Feder-Masse-Dämpfungssystem mit stark druckabhängiger Dämpfung</p> 
<p><u>Messbare Leckrate:</u></p> <p>vakuumbondete Sensoren: <math>\Delta p &lt; 0,2 \text{ mbar}</math> abnehmende Empfindlichkeit bei Innendrücken von größer 1bar</p>	
<p><u>Einschätzung / Bemerkungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr empfindliches Verfahren zur Dichtigkeitsbewertung</li> <li>- direkte Messungen an resonanten Sensoren möglich</li> <li>- aufwendige Messung (frequency sweep) und Auswertung</li> <li>- Beziehung Güte-Innendruck muss bekannt sein (Simulation, Kalibrierungsmessung)</li> </ul>	<p>Diagramme: HSG-IMIT</p>

Literatur: [60, 61]

<p><b>Wärmeleitung</b></p>	<p><b>Abbildung:</b></p>
<p><u>Prinzip:</u></p> <p>Der Wärmeübergang von einem Heizer auf einen temperaturabhängigen Widerstand, die sich beide in einem abgeschlossenen Volumen, dessen Dichtigkeit zur Umwelt zu prüfen ist befindet, hängt vom Innendruck ab. Erwärmt sich der Messwiderstand in einer vakuumbondeten Anordnung schneller als erwartet, bzw. als in einer vorhergehenden Messung, so ist bedingt durch ein Leck der Innendruck angestiegen.</p>	
<p><u>Messbare Leckrate:</u></p> <p><math>\Delta p = 0,1 \text{ mbar}</math></p>	
<p><u>Einschätzung / Bemerkungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr empfindliches Verfahren zur Dichtigkeitsbewertung</li> <li>- spezielle Messstrukturen notwendig</li> <li>- einfache Widerstandsmessung</li> <li>- Beziehung Widerstand-Innendruck bei konstanter Heizleistung muss bekannt sein</li> </ul>	

Literatur: [63]

**Bondverbindung als Dichtung in makroskopischem System**

Prinzip:

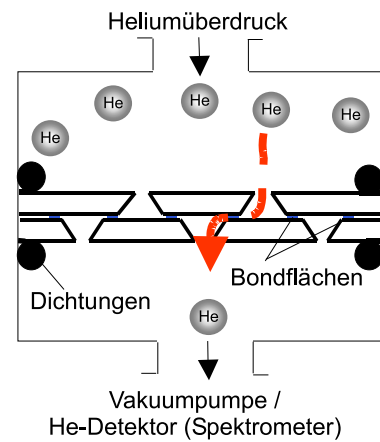
Zwei perforierte Wafer werden mit dem zu untersuchenden Bondverfahren miteinander gebondet. Anschließend wird ein gesägtes Element des Waferpaares so in eine Testkammer eingespannt, dass es als Trennwand zwischen einem Heliumüberdruck und dem Vakuum eines Heliumdetektors wirkt. Die Bondverbindung ist dabei die Dichtfläche zwischen den Kammerhäften. Erkennt der Detektor Helium, liegt ein Leck vor.

Messbare Leckrate:  $5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$

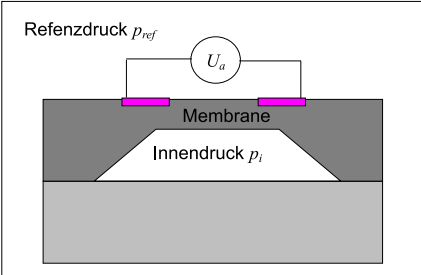
Einschätzung / Bemerkungen:

- sehr empfindliches Verfahren da direkt die He-Durchströmung des Bondinterfaces gemessen und parallel eine große Anzahl von Bondrahmen untersucht wird
- kritisch sind einzelne Groblecks (Bondfehler)
- sehr gut geeignet für Alterungsuntersuchung
- ermöglicht Untersuchungen zu unterschiedlichen Bond-Technologien unabhängig von konkreten Sensoren

Abbildung:



Literatur: [64]

<p><b><u>Absolutdrucksensoranordnung</u></b></p>	<p><b><u>Abbildung:</u></b></p>
<p><b><u>Prinzip:</u></b></p> <p>Mittels des zu untersuchenden Bondverfahrens wird die Kavität eines mikromechanischen Drucksensors verschlossen. Anschließend wird dessen Ausgangssignal bei einem äußeren Referenzdruck vermessen. Ändert sich dieses bei einer erneuten Messung unter identischen Bedingungen, nach Lagerung oder Alterungstests, so liegt ein Leck vor, das anhand der Sensorempfindlichkeit quantifiziert werden kann.</p>	
<p><b><u>Messbare Leckrate:</u></b></p> <p>abhängig von Genauigkeit des äußeren Referenzdruckes und der Sensorauflösung</p>	$U_a \sim p_{ref} - p_i$
<p><b><u>Einschätzung / Bemerkungen:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- für hohe Auflösungen werden spezielle Drucksensorgeometrien benötigt</li> <li>- Umgebungsbedingungen (Referenzdruck und Temperatur) haben hohen Einfluss und sind kritisch</li> <li>- geeignet für erste prinzipielle Dichtigkeitsaussagen</li> </ul>	

Zur Bewertung von Innendrüken bzw. der Dichtigkeit von wafergebondeten Mikrosystemen sind noch weitere Verfahren, wie Gasentladung, Krypton-85 oder Ultraschall denkbar, die jedoch gravierende Nachteile (Sicherheitsaspekte, hoher Messaufwand, geringe Auflösungen) aufweisen. In [65] sind diese sowie die oben aufgeführten Verfahren vergleichend zusammengefasst.

# C Ergebnisse Optimierung Bonden gesputterter Glasschichten

Wafer 1	Wafer 2	Wafer 3
<b>Bondspannung</b>		
U = 53 V	U = 93 V	U = 35 V
<b>Bondstromverlauf</b>		
<p><math>I_{max} = 5,9 \text{ mA}</math> <math>Q = 1402 \text{ mAs}</math></p>	<p><math>I_{max} = 7,8 \text{ mA}</math> <math>Q = 876 \text{ mAs}</math></p>	<p><math>I_{max} = 4,3 \text{ mA}</math> <math>Q = 308 \text{ mAs}</math></p>
<b>Infrarotaufnahmen</b>		
<b>Bondausbeute</b>		
99 %	95 %	78 %
<b>Schichtübertrag (rechter ursprünglich besputterter Deckwafer)</b>		
75 %	85 %	0 %
<b>Klingentest</b>		
Risslänge: $l=11,28\text{mm}$ Oberflächenenergie: $\gamma=1,83 \text{ J/m}^2$	Risslänge: $l=11,78\text{mm}$ Oberflächenenergie: $\gamma=1,60 \text{ J/m}^2$	Risslänge: $l=17,25\text{mm}$ Oberflächenenergie: $\gamma=0,36 \text{ J/m}^2$





# D Daten Glaspasten

<b>FERRO FX11-036</b>	
<p><u>Zusammensetzung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- aktives Lotglas: Blei-Zink-Silikatglas 70-80 %</li> <li>- Füller: Bariumsilikatglas bis 15 %</li> <li>- Binder: Trimethylpentanediol-Monoisobutyrat 10-25 %</li> <li>- Lösungsmittel: verschiedene 5%</li> <li>- Korngröße Glaspulver: &lt;15 µm</li> </ul>	
<p><u>Siebdruck:</u></p> <p>Sieb mit 200-250 mesh Viskosität: 300-600 Poise</p>	
<p><u>Besonderheiten:</u></p> <p>nicht kristallisierend</p>	
<p><u>Verarbeitung:</u></p> <p>Druckdicke: 22-28 µm verglaste Dicke: 11-14 µm</p> <p>Haltbarkeit: 6 Monate</p> <p>Bondtemperatur: 425-450°C</p>	

Literatur: [35, 34, 67]


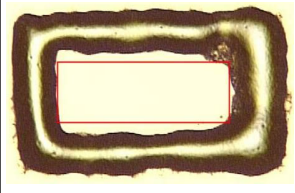
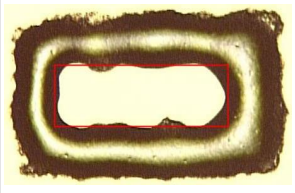
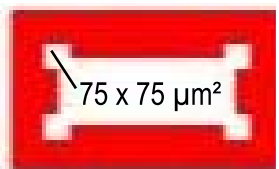
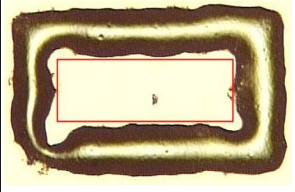
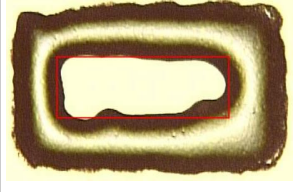

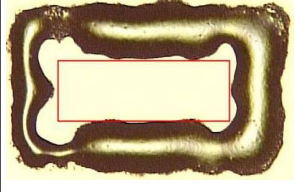
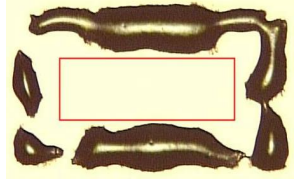
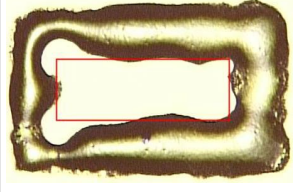
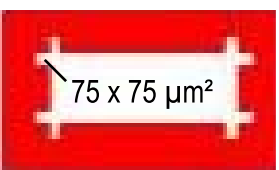
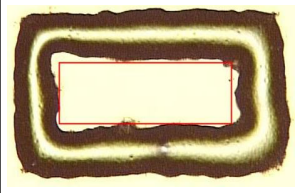
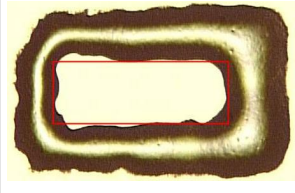
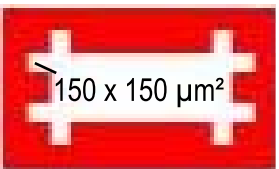
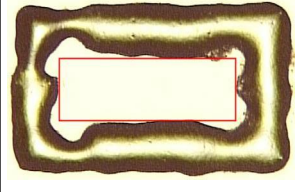
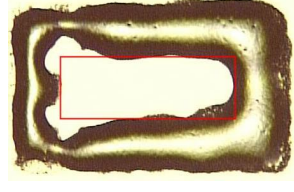
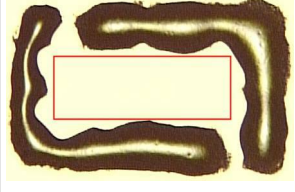
<b>FERRO CN33-246</b>	
<b>Zusammensetzung:</b>	
- aktives Lotglas: Blei-Zink-Silikatglas	bis 15 %
- Füller: keiner	
- Binder: Trimethylpentanediol-Monoisobutyrat	5 bis 10 %
- Lösungsmittel: keine Angabe	
- Silberpulver: Kugeln und Flocken	70 bis 85 %
- Korngröße:	<15 µm
<b>Siebdruck:</b>	
Sieb mit 325 mesh Viskosität: 300-600 Poise	
<b>Besonderheiten:</b>	
nicht kristallisierend, elektrisch leitend	
<b>Verarbeitung:</b>	
Druckdicke:	18-24 µm
verglaste Dicke:	10-13 µm
Schichtwiderstand:	2-2,4 mΩ/□ (13 µm dick)
Haltbarkeit:	6 Monate
Bondtemperatur:	420-450°C

Literatur: [66, 68]

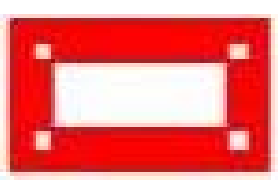
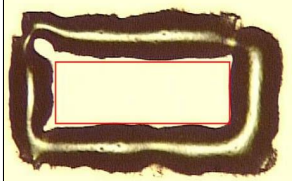
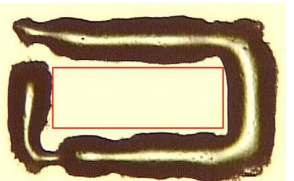
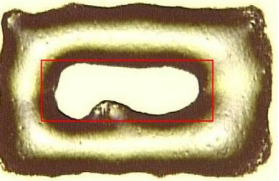
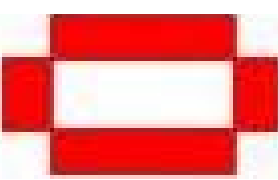
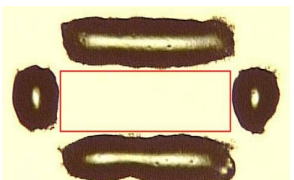

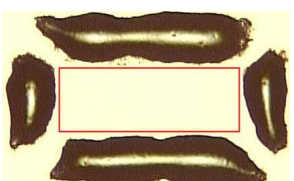

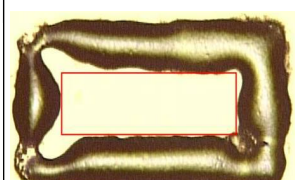
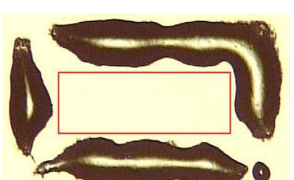
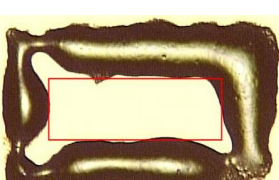

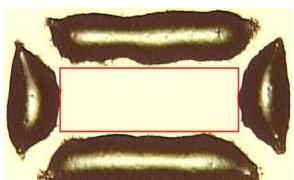
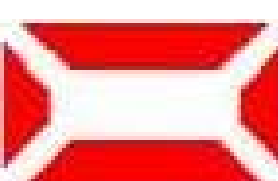
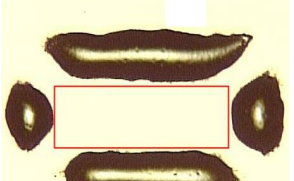

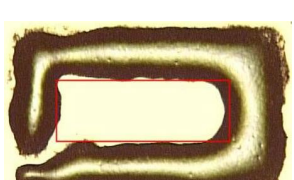
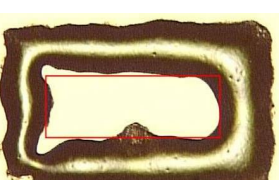

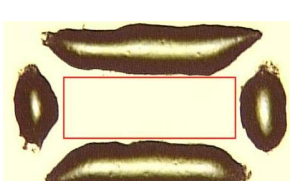
<b>SCHOTT G018-173</b>	
<b>Zusammensetzung:</b>	
- aktives Lotglas: Bleiboratglas	
- Füller: keiner	
- Binder; unbekannt	
- Lösungsmittel: verschiedene	
- Korngröße Glaspulver: d <sub>50</sub> < 7 µm d <sub>99</sub> < 40 µm	
<b>Siebdruck:</b>	
keine Angaben	
<b>Besonderheiten:</b>	
neigt zur Kristallisation	
<b>Verarbeitung:</b>	
Druckdicke:	keine Angaben
verglaste Dicke:	keine Angaben
Bondtemperatur:	430°C
therm. Ausdehnung	$\alpha = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Transformationstemperatur:	320°C
Dichte:	6,56 g/cm <sup>3</sup>

Literatur: [69]

# E Ergebnisse Eckenkompensation

<i>Design</i>	<i>besten Druck</i>	<i>offene Struktur</i>	<i>verlaufene Ecken</i>
 <p>Referenzrahmen</p>		<p>X</p>	
 <p>75 x 75 <math>\mu\text{m}^2</math></p>		<p>X</p>	
 <p>150 x 150 <math>\mu\text{m}^2</math></p>			
 <p>75 x 75 <math>\mu\text{m}^2</math></p>		<p>X</p>	
 <p>150 x 150 <math>\mu\text{m}^2</math></p>			

Designbreite der Rahmen mit den Kompensationsstrukturen 150  $\mu\text{m}$ , Referenzrahmen 120  $\mu\text{m}$

Design	ordnungsgemäßer Druck	offene Struktur	verlaufene Ecken
			
	X		X
	X		X
			
	X		X
	X		X
	X		
	X		X

# F Messung Dicke Bondglasschicht vor dem Bonden

A73101-10 Dicke Glaslot vor dem Bonden in $\mu\text{m}$					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			11,6		
unten-mitte		10,3		12,3	
mitte	10,2		12,5		12,2
oben-mitte		11,5		13,7	
oben			13,2		

Mittelwert= 11,9  
 Standardabweichung= 1,2  
 Cp= 1,1  
 Cpk= 0,8

A73101-05 Dicke Glaslot vor dem Bonden in $\mu\text{m}$					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			15,3		
unten-mitte		13,5		16,5	
mitte	11,1		13,3		14,8
oben-mitte		13,0		14,5	
oben			13,5		

Mittelwert= 14,0  
 Standardabweichung= 1,5  
 Cp= 0,9  
 Cpk= 0,7

A73101-04 Dicke Glaslot vor dem Bonden in $\mu\text{m}$					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			13,4		
unten-mitte		13,5		15,0	
mitte	11,5		13,5		13,8
oben-mitte		13,8		13,1	
oben			13,1		

Mittelwert= 13,4  
 Standardabweichung= 0,9  
 Cp= 1,6  
 Cpk= 1,5

A73101-11 Dicke Glaslot vor dem Bonden in $\mu\text{m}$					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			13,7		
unten-mitte		12,8		13,4	
mitte	11,5		12,2		13,4
oben-mitte		12,5		14,2	
oben			13,1		

Mittelwert= 13,0  
 Standardabweichung= 0,8  
 Cp= 1,6  
 Cpk= 1,6

A73101 gesamt Dicke Glaslot vor dem Bonden in $\mu\text{m}$					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			13,5		
unten-mitte		12,5		14,3	
mitte	11,1		12,9		13,5
oben-mitte		12,7		13,9	
oben			13,2		

Mittelwert= 13,1  
 Standardabweichung= 1,3  
 Cp= 1,0  
 Cpk= 1,0

obere Grenze	17,0
untere Grenze	9,0
Mittelwert	13,0



# G Messung Dicke gebondete Glasschicht

A73144-04 Glaslotverbindungszwischenschichtdicke in µm					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			11,5		
unten-mitte		9,9		11,2	
mitte	8,4		7,9		8,7
oben-mitte		8,3		9,0	
oben			15,3		

Mittelwert=	10,0
Standartabweichung=	2,4
Cp=	0,7
Cpk=	0,7

A73144-11 Glaslotverbindungszwischenschichtdicke in µm					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			9,9		
unten-mitte		10,0		8,8	
mitte	10,6		9,1		9,2
oben-mitte		7,4		12,1	
oben			12,1		

Mittelwert=	9,9
Standartabweichung=	1,5
Cp=	1,1
Cpk=	1,1

A73144-06 Glaslotverbindungszwischenschichtdicke in µm					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			9,3		
unten-mitte		12,2		11,5	
mitte	7,7		11,0		8,0
oben-mitte		9,0		8,1	
oben			13,7		

Mittelwert=	10,1
Standartabweichung=	2,1
Cp=	0,8
Cpk=	0,8

A73144 Mittelung Glaslotverbindungszwischenschichtdicke in µm					
	links	links-mitte	mitte	rechts-mitte	rechts
unten (Flat)			10,2		
unten-mitte		10,7		10,5	
mitte	8,9		9,3		8,6
oben-mitte		8,2		9,7	
oben			13,7		

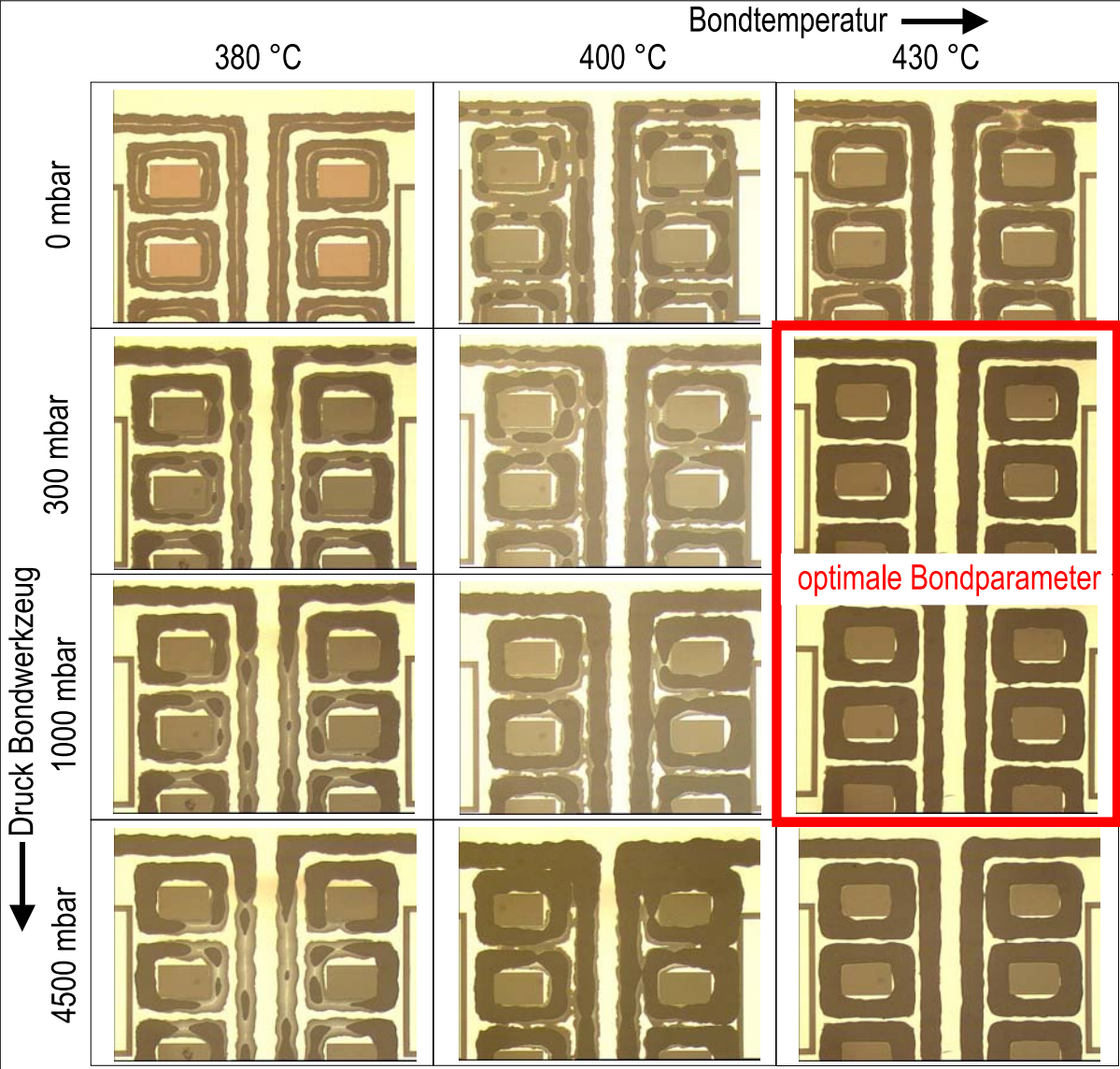
Mittelwert=	10,0
Standartabweichung=	1,6
Cp=	1,0
Cpk=	1,0

obere Grenze=	15,0
untere Grenze=	5,0
Mittelwert=	10,0



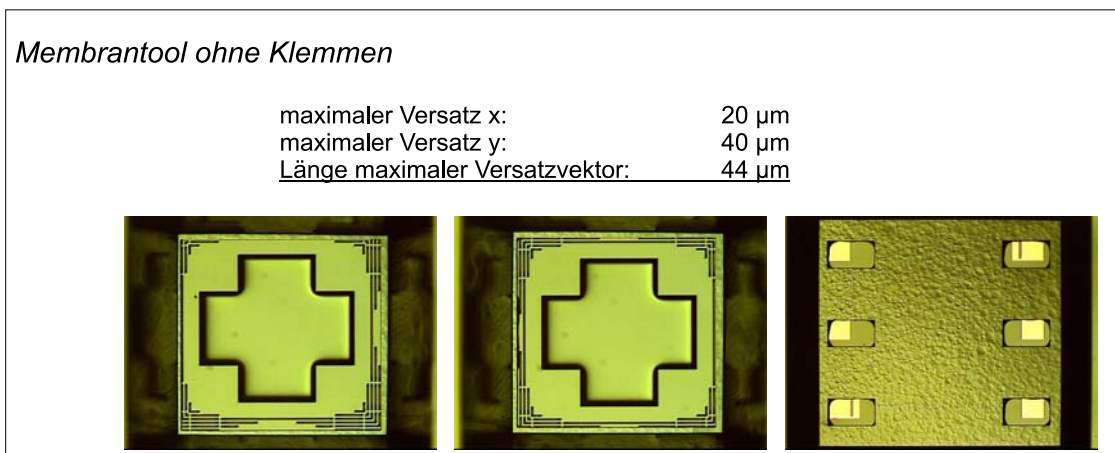
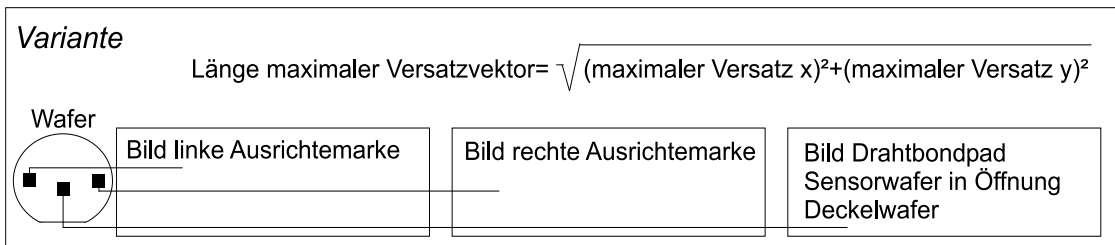


# H Parameteroptimierung Glaslotbonden



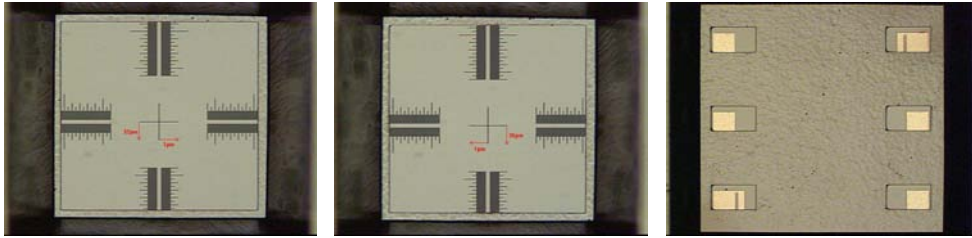


# I Optimierung Waferversatz Glaslotbonden



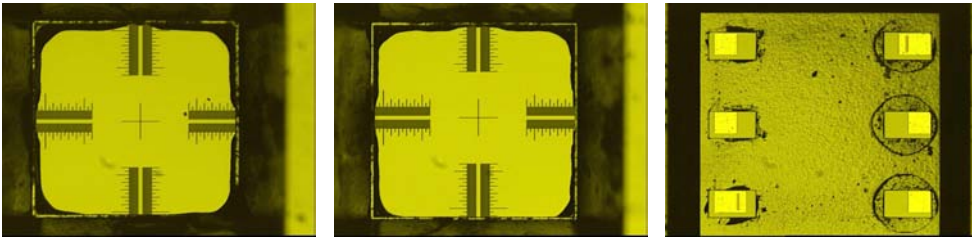
*Druckplatte Stahl einteilig mit Klemmen*

maximaler Versatz x: 1  $\mu\text{m}$   
maximaler Versatz y: 33  $\mu\text{m}$   
Länge maximaler Versatzvektor: 33  $\mu\text{m}$



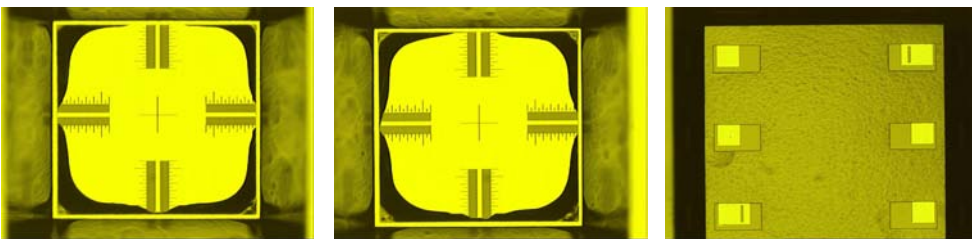
*Druckplatte Stahl mit Mittelpin ohne Klemmen*

maximaler Versatz x: 24  $\mu\text{m}$   
maximaler Versatz y: 16  $\mu\text{m}$   
Länge maximaler Versatzvektor: 29  $\mu\text{m}$



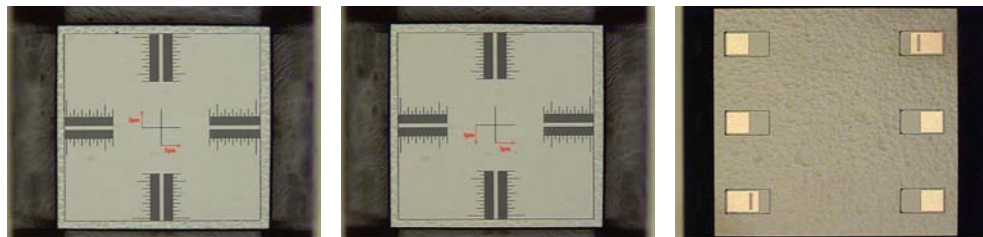
*Membrantool mit Klemmen und Adapter (Zwischenlösung)*

maximaler Versatz x: 4  $\mu\text{m}$   
maximaler Versatz y: 20  $\mu\text{m}$   
Länge maximaler Versatzvektor: 21  $\mu\text{m}$



*Druckplatte SiC mit Klemmen ( endgültige Lösung)*

maximaler Versatz x: 3  $\mu\text{m}$   
maximaler Versatz y: 3  $\mu\text{m}$   
Länge maximaler Versatzvektor: 4  $\mu\text{m}$





# J Berechnung Ausdehnungskoeffizient Glaslot FERRO FX 11-036

Glasbestandteil	Blei-Zink-Silikatglas	Barium-Silikatglas (Füller)
Masseanteil*)	82%	18%
thermischer Ausdehnungskoeffizient	$9,5 \cdot 10^{-6}/K$	$4,8 \cdot 10^{-6}/K$

\*) im verglastem Zustand

$$x = \sum a_v \cdot b_v \quad (\text{siehe 3.1.3.1})$$

$$\alpha_{Glaslot} = 0,82 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6} K^{-1} + 0,18 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\underline{\underline{\alpha_{Glaslot} = 8,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}}}$$

Die Angaben der Zusammensetzung sind dem Metaterialsicherheitsdatenblatt [67] entnommen und wurden auf den verglasten Zustand umgerechnet. Die Angaben der thermischen Dehnung wurden aus [49] entnommen, entsprechen somit nicht denen der konkreten Glaskomponente und müssen daher als Näherungen angesehen werden. Anhand der Rechnung lässt sich aber die Einstellung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten anhand von Füllerstoffen nachvollziehen.





# Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr. T. Gessner: *Mikrotechnologien: Technologien der Mikroproduktion, Technologien der Mikrosystem- und Gerätetechnik*, Zentrum für Mikrotechnologien der TU-Chemnitz, Vorlesungsunterlagen Sommersemester 2004
- [2] G. Gerlach, W. Dötzel: *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*, München, Wien; Hanserverlag ISBN 3-446-183957
- [3] R. Knechtel, U. Schwarz: *CMOS und MEMS verbinden sich* Elektronikindustrie Nr. 4, 2001, Hüthig Verlag
- [4] T. Gessner, A. Bertz, C. Lohmann, S. Kurth, K. Hiller: *Advanced Silicon Micromachining*, International Journal of Computational Engineering Science (IJCES), Volume 4, Number 2, June 2003
- [5] [www.mdl.sandia.gov](http://www.mdl.sandia.gov), Sandia National Laboratories, Albuquerque NM, USA
- [6] J. Bhardwaj, H. Ashraf, A. McQuarrie: *Dry Silicon Etching for MEMS*, Symposium on Microstructures and Microfabricated Systems at the Annual Meeting of the Electrochemical Society, Montreal, Quebec, Canada, May 4-9, 1997
- [7] A. Berthold: *Low Temperature Wafer-to-Wafer Bonding for Microchemical Systems*, Dissertation TU-Delft, 2001
- [8] M. Wiemer: *Technologieentwicklung für Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren unter Nutzung von Waferbondverfahren*, Dissertation April 1999 Chemnitz
- [9] W. Vogel: *Glaschemie*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1979
- [10] [www.suss.de](http://www.suss.de), Suss MicroTec AG, Garching bei München
- [11] W. Maszara, G. Goetz, A. Chaviglia, J.B. McKittrick: *Bonding of silicon wafers for silicon on insulator*, J. Appl. Phys., 64, 1989, 4943-4949

- [12] US. Department of Defense *Test Method Standard Microcircuits MIL-STD-883*, Nov. 1991
- [13] L.I. Maisel and R. Glang: *Handbook of thin film technology* 2-54, Mc Graw Hill, New York, 1970
- [14] *www.jedec.com*, Joint Electron Devices Engineering Council
- [15] *www.semi.org*, Semiconductor Materials and Equipment Suppliers Forum
- [16] *JEDEC Standard No. 22-A102-C*, *www.jedec.com*
- [17] D.I. Pomerantz: *Anodic bonding* U.S. Pat. 3,397,278 13. August 1968
- [18] K. Freywald, R. Knechtel: *Verfahren zum Passivieren anodischer Bondgebiete, die über elektrisch aktiven Strukturen von mikroelektromechanischen Systemen angeordnet sind*, Deutsches Patent DE000010129821C2
- [19] M. Harz: *Untersuchung thermo-mechanischer Spannungen beim anodischen Bonden von TEMPAX-Glas und Silizium*, Dissertation 1996, TU-Dresden
- [20] R. Knechtel, K.-D. Preuß: *Methoden zur Vermeidung von natriumhaltigen Ablagerungen auf der Oberfläche anodisch gebondeter Glaswafer*, 5. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik und Mikromechanik 23./24. Oktober 2001
- [21] R. Knechtel, K.-D. Preuß: *Verwendung von Glaswafern beim anodischen Bonden*, DVS Arbeitsgruppe A2.6 Waferbonden, Jahressitzung November 2002
- [22] S. Weichel, R. d. Reus, M. Lindahl: *Silicon-to-Silicon bonding using evaporated glass*, *Sensors and Actuators*, A 70 (1998), 170-184
- [23] P. Nommensen: *Untersuchungen zum anodischen Bonden von Siliziumwafern mit gesputterten Pyrex-Schichten*, Diplomarbeit Institut für angewandte Physik der Universität Tübingen, 1996
- [24] A.D. Brooks, R. P. Donovan, *J. Electrochem. Soc.*, 119 (1972) S. 545
- [25] A. Hanneborg, M- Nese, H. Jakobsen, R. Holm, *J. Micromech. Microeng.*, 2(1992), S. 117
- [26] W. Menz, J. Mohr: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, VHC Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1997, zweite Auflage
- [27] Q.-Y. Tong, U. Gösele: *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology*, John Wiley and Sons, Inc. 1999, ISBN 0-471-57481-3

- 
- [28] T. Hülsmann, R. Knechtel u.a.: *Infobörse Mikrosystemtechnik Nr. 34-2002 Niedertemperatur-Silizium-Silizium-Bonden (NTB)* Informationsreihe der VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, 2002
- [29] P. Nitschke, K. Lange, B. Schmidt, St. Grigull, U. Kreissig: *Ion Drift Processes in Pyrex-Type Alkali-Borosilicate Glass during Anodic Bonding*, Journal of the Electrochemical Society Vol. 145, No. 5, May 1998
- [30] K. Kapsler, H. Seidel: *Niedertemperatur Si-Si-Bonden*, Abschlussbericht BMBF-Förderprojekt NTB ContiTemec Mikroelektronik GmbH, 2001
- [31] [www.planoptik.de](http://www.planoptik.de), Planoptik GmbH Elsoff
- [32] H. Emmerich: *Oberflächenmikromechanische Sensoren für Drehbeschleunigung und magnetische Feldstärke*, Dissertation, Shaker Verlag Aachen 2002, ISBN 3-8265-9786-9
- [33] F. Vizetum: *Fügen von Silizium mit Glasloten*, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1986
- [34] *MEMS & Sensor Materials 11-036 Sealing glass*, Verarbeitungsspezifikation FERRO Electronic Materials Santa Barbara, Ca , Rev. 1200 2002
- [35] *FERRO 11-036 SEALING GLASS for low temperature processing*, Verarbeitungsspezifikation FERRO Electronic Materials Santa Barbara, Ca , 1999
- [36] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, *RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*, Brüssel, 8. November 2002
- [37] persönliche Mitteilung Dr. O. Fritz SCHOTT Elektronik Packaging GmbH Landshut , e-mail Juni 2003
- [38] persönliche Mitteilung Dr. O. Fritz SCHOTT Elektronik Packaging GmbH Landshut , e-mail Juni 2003
- [39] Koenen Siebdrucktechnik GmbH: *Siebdruck Präzision*, Katalog 7. Auflage, Ottobrunn
- [40] [www.ekra.de](http://www.ekra.de), EKRA Material Deposition GmbH, Bönningheim
- [41] M. Wiemer, J. Frömel, C. Jia, T. Gessner: *Bonding and contacting of MEMS-Structures on wafer level*, Semiconductor Waferbonding VII: Science, Technology, and Applications, Seite 301, Electrochemical Society, Pennington, NJ USA, 2003, ISBN 1-56677-402-0

- [42] R. Knechtel, J. Heller, M. Wiemer, J. Frömel: *Silicon wafer bonding for encapsulation of surface-micromechanical-systems using intermediate glass layers*, Semiconductor Wafer-bonding VII: Science, Technology, and Applications, Seite 321, Electrochemical Society, Pennington, NJ USA, 2003, ISBN 1-56677-402-0
- [43] Intranetseite X-FAB AG
- [44] *www.brewerscience.com*, Brewer Science, Inc., Rolla, Missouri, USA
- [45] HVG Fortbildungskurs 1995: *Fügen von Glas*, Verlag der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft Frankfurt Main 1995 ISBN 3-921089-14-X
- [46] A. Zinke: *Technologie der Glasverschmelzungen*, Technisch-physikalische Monographien Band 12, Leipzig 1996 Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G.
- [47] K. Schneider: *Die TVS - Messung im Prozess der Chipherstellung*, Abschlussarbeit in der Ausbildung zur Mikrotechnologin, Erfurt, 2002
- [48] M. Ebert, J. Bagdahn: *Determination of residual stress in glass frit bonded MEMS by Finite Element Analysis*, Eurosime, Brüssel, Mai 2004
- [49] U. Schmidt: *Tabellen der Glastechnik*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1980
- [50] K. Glien, J. Graf, R. Müller-Fiedler, H.Höfner, M. Ebert, J. Bagdahn: *Strength and reliability properties of glass frit bonded micro packages*, DTIP Montreux 2004
- [51] *MEMS Process: Surface Micromachining Process for Inertial Sensors*, Data-Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG
- [52] *MEMS Process: Surface Micromachining Process for Inertial Sensors*, Info-Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG
- [53] W. Geiger: *Mikromechanische Drehratengyroskope mit hoher Genauigkeit*, Dissertation, Shaker Verlag Aachen 2002, ISBN 3-8322-0393-1
- [54] M. Moraja, M. Amiotti, G. Longoni: *Patterned getter film wafers for wafer level packaging of MEMS*, Micro System Technologies, München, 2003
- [55] M. Förtsch, H. Zimmermann, W. Einbrodt, K. Bach, H. Pless: *Integrated PIN Photodiodes in High-Performance BiCMOS Technology*, Technical Digest IEDM 2002
- [56] O. Grudin, G. Frolov, L. Landsberger: *Method for Effective Trimming of Resistors Using Pulsed Heating and Heat Localising*, Patent WO 03023794, März 2003

- [57] N. Tasker: *MEMS-Enabled Electrical Trimming of Precision Resistors and their TCR*, SEMI - International MEMS/MST Industry Forum München, Deutschland 2004
- [58] J. Bagdahn: *Festigkeit und Lebensdauer direkt gebondeter Siliziumwafer unter mechanischer Belastung*, Dissertation, VDI-Verlag Düsseldorf 2001, ISBN 3-18-333409-7
- [59] V. Baier, A. Gebhardt, St. Barth: *Anodisches Bonden bei Raumtemperatur* DVS Arbeitsgruppe A2.6 Waferbonden, Jahressitzung November 2002
- [60] M. Wiemer: *Resonante Strukturen*, Projekttreffen BMBF-Förderprojekt MikroPrüf, Erfurt, April 2004
- [61] I. Simon: *MANGHO Mikromechanische anwenderspezifische Gyroskope mit hoher Nullpunktstabilität, Sensorverkapselung: Messtechnische Untersuchungen*, Zwischenbericht BMBF-Förderprojekt MANGHO, August 2004
- [62] R. Müller-Fiedler, J. Graf, H. Höfer: *Zuverlässigkeit sealglasgebondeter Micropackages für Sensoranwendungen im Automobil*, 6. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik und Mikromechanik 29./30. Oktober 2003
- [63] J. Graf: *Innendruckmessung über Wärmeleitfähigkeit des eingeschlossenen Gases*, Projekttreffen BMBF-Förderprojekt MikroPrüf, Erfurt, April 2004
- [64] D. Mund: *Mikrostrukturiertes Glas - Packaging mit neuen Technologien* DVS Arbeitsgruppe A2.6 Waferbonden, Jahressitzung Dezember 2003
- [65] M. Wiemer, T. Geßner: *Montage- und Kontaktierungstechnologien zur Waferlevelintegration*, VTE, Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik, Heft 6, Dezember 2002
- [66] *Hybrid Microcircuit Materials CN33-246 Low Temperature Silver Conductor*, Verarbeitungsspezifikation FERRO Electronic Materials Santa Barbara, Ca, Rev. 1200 2002
- [67] *Material safety data sheet product FX-11-036 Seal Glass Paste*, FERRO Electronic Materials Vista, Ca
- [68] *Material safety data sheet product FX-CN33-246 Low Temperature Silver Conductor*, FERRO Electronic Materials Vista, Ca
- [69] *Datenblatt Glasnummer: G180-173 Glaslot für Duran und Silizium*, Schott Glass GB Electronic Packaging Landshut



# Abbildungsverzeichnis

3.1	Mikromechanischer Beschleunigungssensors als Beispiel eines Mikrosystems . .	24
3.2	Volumenmikromechanischer Drehratesensor, TU-Chemnitz: Einsatz von Waferbondverfahren zur Realisierung dreidimensionaler Mikrostrukturen und deren Verkapselung . . . . .	27
3.3	Systematischer Überblick Oberflächenmikromechaniktechnologien . . . . .	30
3.4	Beispiele oberflächenmikromechanischer Strukturen: a) Mikromotorgetriebe Sandia National Laboratories Polysilizium-Opferschichttechnik [5], b) Detail Gyroskope SOI-basierte Technologie mit isotropen Unterätzen, c) AIM-Struktur ZfM Chemnitz . . . . .	31
3.5	Prozessablauf SCRESOI-Technologie . . . . .	33
3.6	Gestaltung der Deckelwafer für die SCRESOI-Technologie . . . . .	34
3.7	Beispiel SCRESOI-Technologie, Teilansicht eines Drehratesensors . . . . .	34
3.8	Prozessablauf verbesserte SCRESOI-Technologie . . . . .	36
3.9	Drehratesensor gefertigt mit der verbesserten SCRESOI-Technologie . . . . .	37
3.10	Prozessablauf der Oberflächenmikromechaniktechnologie für piezoresistive Sensoren . . . . .	39
3.11	Absolutdrucksensor in Oberflächenmikromechanik: a) Infrarotaufnahme, b) Querschnittsbild (REM) . . . . .	39
3.12	Prozessablauf anisotropes plasmachemisches Siliziumätzen und Beispielstruktur	41
3.13	REM-Aufnahmen von Effekten beim ASE-Ätzen a) ASE-Lag, b) Notching, c) glatte Seitenwände, d) Grabenform . . . . .	42
3.14	Isotropes Siliziumätzen . . . . .	43
3.15	Sticking beweglicher Strukturen . . . . .	44
3.16	Methoden zur Verfüllung von Isolationsgräben . . . . .	46
3.17	Einordnung der am häufigsten verwendeten Waferbondtechnologien nach der Art der technologischen Verbindungsbildung . . . . .	49
3.18	Einordnung von Waferbondschritten in technologische MEMS-Gesamtprozesse	50

3.19 Anforderungen an das Verkapselungsbonden oberflächenmikromechanischer Sensoren . . . . .	53
3.20 Sensordeckel . . . . .	54
3.21 Möglichkeiten der Gestaltung und Strukturierung von Sensordeckeln . . . . .	55
3.22 Zusammenhang Deckelgestaltung und Drahtbonden . . . . .	56
4.1 Darstellung Glasstruktur a) dreidimensionale Abbildung Siliziumoxiddetraeder, b zweidimensionale Abbildung Siliziumoxiddetraeder (4. Sauerstoffatom ragt aus Zeichenebene heraus), c) Netzwerk Quarzglas d) Glasnetzwerk mit Netzwerkwandlern . . . . .	61
4.2 Abhängigkeit Viskosität-Temperatur für verschiedene Gläser, Definition charakteristischer Temperaturen und Bearbeitungsmöglichkeiten . . . . .	64
4.3 Dehnungsverhalten von Gläsern . . . . .	64
4.4 Kristallisationsdiagramm und REM-Aufnahme eines kristallisierten Glaslotes	66
4.5 Bondanlagen, Bondwerkzeuge und Transportvorrichtung . . . . .	69
4.6 Vergleich der Inspektionsmethoden gebondeter Siliziumwafer anhand von Beispielen (X-FAB Proben) . . . . .	71
4.7 Darstellung des Prinzips des anodischen Bondens . . . . .	76
4.8 Typischer Bondstromverlauf und Ermittlung von Endpunktkriterien . . . . .	77
4.9 Natriumablagerung auf anodisch gebondetem Glas: a) Ablagerungen, b) saubere Oberfläche nach Verwendung einer Glaselektrode . . . . .	79
4.10 Beschleunigungssensor hergestellt mittels Bulkmikromechanik und anodischen Waferbondens (schematischer Querschnitt und fotografische Aufnahmen) . . .	80
4.11 Aufbau einer Hochfrequenz-Sputteranlage einschließlich Prozessablauf und elektrischer Potentiale . . . . .	81
4.12 Schichtdickeninhomogenität gesputterter Glasschichten . . . . .	83
4.13 Gesamtprozess Herstellung Siliziumdeckwafer mit gesputterter anodisch bondbarer Glasschicht . . . . .	84
4.14 Ausbeute beim Bonden von gesputterten Glasschichten in Abhängigkeit von der Aktivierung . . . . .	85
4.15 Verlauf von Strom und Spannung beim anodischen Bonden gesputterter Glasschichten . . . . .	87
4.16 Mechanismus und Einfluss der Ausbildung eines leitfähigen Pfades an Partikeln beim Bonden gestutterter Glasschichten . . . . .	90
4.17 Ausbildung von Bondverbindungen an Aluminiumgebieten im Bondinterface .	91
4.18 Vergleich gebondeter Gebiete von Sensor- und unstrukturierten Bulkwafern .	91
4.19 Oberflächenpotentiale beim Bonden von Sensorstrukturen und Ergebnisse Widerstandsmessungen . . . . .	92



---

4.20	Verteilung Bruchlast Bondverbindung Beschleunigungssensor . . . . .	94
4.21	Ergebnisse Parametervariation beim anodischen Bonden mit gesputterten Glas- schichten . . . . .	95
4.22	Entwicklung der Oberflächenrauigkeit bei unterschiedlichen Rückdünnverfah- ren . . . . .	97
4.23	Strukturierung dicker Bondglasschichten . . . . .	98
4.24	Ergebnisse Strukturierung dicker Bondglasschichten . . . . .	98
4.25	Ergebnisse von Bondversuchen an unterschiedlich dicken Glasschichten . . . . .	99
4.26	Typischer Bondstromverlauf dicke Bondglasschicht mit Durchbruch im Randbe- reich . . . . .	100
4.27	Stromverlauf beim anodischen Bonden strukturierter Glasschichten . . . . .	101
4.28	Bondergebnisse strukturierte Glaszwischen-schicht . . . . .	102
4.29	Ablauf Glaslotbondprozess . . . . .	104
4.30	Ergebnisse Bondversuche mit Glaspaste Schott . . . . .	108
4.31	Prinzip des Siebdrucks . . . . .	111
4.32	Siebherstellung und -aufbau . . . . .	114
4.33	Ausrichtung Substrat zu Sieb a) herkömmliche Methode, b) Ausrichtung EKRA- Anlagen . . . . .	115
4.34	Übersicht Auswahl Siebdruckparameter . . . . .	115
4.35	Bewertungskriterien gedruckter Bondrahmen . . . . .	117
4.36	Teststruktur zur Ermittlung der minimalen Bondrahmenbreite . . . . .	117
4.37	Strukturverbereiterung beim Siebdruck ermittelt an Teststrukturen . . . . .	118
4.38	Strukturbreitenschwankungen beim Siebdruck, ermittelt an Teststrukturen . . . . .	119
4.39	Bestimmung Minimalabstand zwischen Siebdruckstrukturen . . . . .	119
4.40	Bondundichtigkeiten an Engstellen von Siebdruckstrukturen und deren Vermei- dung durch Designs mit identischen Strukturbreiten . . . . .	121
4.41	Abhängigkeit Dicke Siebdruckstrukturen von Strukturbreite . . . . .	122
4.42	Messung Strukturdicke . . . . .	123
4.43	Ermittlung Prozesssicherheit . . . . .	123
4.44	Positioniergenauigkeit Siebdruckstrukturen . . . . .	124
4.45	Einflussfaktoren auf die Kantengeometrie von Siebdruckstrukturen . . . . .	125
4.46	Typische Eckenstruktur an kleinen Siebdruckrahmen . . . . .	126
4.47	Rakelrichtungsbedingte unsymmetrische Eckenkompensation . . . . .	126
4.48	Geeignete Strukturen zur Kompensation des Verlaufs von inneren Siebdruckecken und Druckergebnisse . . . . .	128
4.49	Maßstäbliche Darstellung des Platzbedarfs von Bondrahmenstrukturen unter Beachtung aller Lage- und Breitentoleranzen . . . . .	129
4.50	Design Rules Bondglasrahmen . . . . .	130

---

4.51	Verhalten der Siebdruckpaste an Strukturkanten . . . . .	131
4.52	Einfluss von Absenkungen im Deckwafer auf das Siebdruckbild . . . . .	131
4.53	Bondverhalten aufgrund begrenzender Kantenwirkung verschmalierter Bondrahmen . . . . .	132
4.54	Wirkung von Siliziumstrukturkanten als Begrenzung für den Siebdruck . . . . .	132
4.55	Schablonendruck: Schablonenaufbau und Druckverhalten an Aufhängungen der inneren Strukturen . . . . .	133
4.56	Fotochemische Strukturierung Glaslot . . . . .	134
4.57	Ablauf der thermischen Konditionierung der Paste FERRO FX11-036 . . . . .	136
4.58	Auftreten von Hohlräumen in der Bondfuge bei unzureichender Vorkonditionierung a) Querschnitt, b) Bondglas nach Zugversuch . . . . .	136
4.59	Gedruckte Glasstruktur nach dem Trocknen (REM-Aufnahmen) . . . . .	137
4.60	Gedruckte Glasstruktur nach dem Austreiben des Binders (REM-Aufnahmen)	138
4.61	REM-Aufnahmen und EDX-Analysen an geglaster Struktur (10 keV 200 s) . .	138
4.62	Lichtmikroskopische Aufnahme eines Schliffes durch das Glaslot FX11-036 . .	139
4.63	REM-Querschnittsaufnahme durch komplett geschmolzene Struktur - keine Blasen erkennbar . . . . .	139
4.64	Gedruckte Glasstruktur im komplett verschmolzenen Zustand (REM-Aufnahmen)	140
4.65	Verdichtung und Verrundung von Siebdruckstrukturen beim Einschmelzen des Bondglases) . . . . .	140
4.66	Messungen an vorverschmolzenen Glaslotstrukturen mittels mechanischen Profilometer . . . . .	141
4.67	Strukturtreue über die Temperaturprozesse - Strukturkanten verlaufen nicht beim Verschmelzen . . . . .	142
4.68	schematische Darstellung thermische Konditionierung Ferro FX11-036 . . . . .	143
4.69	Möglichkeiten von Glasverschmelzungen - (a) Druckglasdurchführung eines Drahtes - Kraftschluss, (b) formschlüssiges Einschmelzen eines Wellbleches in einen Glaskörper, (c) stoffschlüssige Glaslotverbindung . . . . .	143
4.70	Grenzflächenverhältnisse einer Glaslotwaferverbindung . . . . .	144
4.71	Randwinkeluntersuchungen anhand von Daten aus Profilometermessungen(links)und REM-Untersuchungen . . . . .	145
4.72	Nachweis der Benetzung der Siliziumoberfläche: a) partiell nach dem Austreiben des Binders b) vollflächig nach dem Verschmelzen . . . . .	145
4.73	Benetzung der Oberfläche des Systemwafers beim Bonden . . . . .	146
4.74	Verbindungsbildung Glas Bondoberfläche durch Lösungsvorgänge im Glas und Mischglasbildung a) polierter Schliff, b) Bruch . . . . .	147

---

4.75	Homogenität der Ausbildung der Bondverbindung bei unterschiedlichen Bondparametern (Werte größer 100% entsprechen verlaufenen Bondrahmen) . . . . .	149
4.76	Einfluss von Bondtemperatur und Druck auf die Ausbildung der Glaslotbondverbindung . . . . .	150
4.77	Rekonstruktion des zeitlichen Ablaufs der Ausbildung Glaslotbondverbindung ermittelt anhand schrittweiser Druckerhöhung . . . . .	151
4.78	Minimierung des Versatzes der gebondeten Wafer beim Glaslotbonds . . . . .	152
4.79	Ablauf Glaslotbondprozess . . . . .	154
4.80	Einseitige Benetzung bei verlaufenem Glaslot . . . . .	155
4.81	Umverteilung Glaslot beim Bonden, Profil- und Dickenänderung . . . . .	157
4.82	selektives Bonden mittels Glaslotrahmen . . . . .	157
4.83	Verlaufstopp Glaslot an Kanten . . . . .	158
4.84	Bondausbeuten verschiedener glaslotgebondeter Schichten . . . . .	160
4.85	Weibullplot der Zugfestigkeiten verschiedener glaslotgebondeter Schichten . . . . .	161
4.86	Waferbruch nach versuchter Glaslotbondung Silizium-Quarzglas . . . . .	161
4.87	Amplitudenfrequenzgang Beschleunigungssensor in Abhängigkeit vom eingeschlossenen Druck . . . . .	162
4.88	Ursachen für Undichtigkeiten Glaslotbonds a) optische Aufnahme gedruckter Bondrahmen, b) optische Aufnahme nach Bonden eines Glaswafers, c) REM-Aufnahme . . . . .	164
4.89	Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante Glaslot . . . . .	166
4.90	Bestimmung Isolationsverhalten Glaslot FX11-036 . . . . .	166
4.91	Risse nach Abkühlung vorverschmolzenen Glaslotes . . . . .	168
4.92	Einfluss Glaslot auf die Durchbiegung beschichteter Wafer . . . . .	168
4.93	Stressteststrukturen vor und nach dem Glaslotbonds . . . . .	168
4.94	Untersuchung Feuchteinfluss an offenen Bondrahmen . . . . .	170
4.95	Feuchtetest an Chipproben a) Glasangriff und -ablagerung bei ausgetretenem Glaslot, b) Vermeidung Glasangriff durch komplettes Abdecken mit Deckwafer . . . . .	170
4.96	Bruchausbildung im Glaslot bei Zubelastung . . . . .	172
4.97	Weibullplot zur Bestimmung der Einflüsse von Zuverlässigkeitstests auf die Bondfestigkeit von Glaslotbondungen . . . . .	173
4.98	Metallische Leitbahndurchführungen im Glaslot . . . . .	174
4.99	Prinzip und Ausführung leitfähiger Glaslotbondverbindungen . . . . .	175
4.100	Messungen an leitfähigen Glaslotbondverbindungen . . . . .	176
5.1	Zusammenfassung Funktionsweise und Realisierung Drehratensensor . . . . .	181
5.2	Zusammenfassung Beschleunigungssensor, Wirkungsweise und Realisierung . . . . .	183
5.3	Reifendruckmesssystem Zusammenfassung, Wirkungsweise und Realisierung . . . . .	185

5.4	Verkapselung optischer Elemente durch Glaslotbonden; Zusammenfassung und Realisierung . . . . .	187
5.5	Zusammenfassung elektrisch trimmbare Widerstände, Wirkungsweise und Realisierung . . . . .	189

# Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht Thermokompressionsbonden . . . . .	103
4.2	Spezifikation für die Behandlung der Paste nach dem Drucken . . . . .	106
4.3	Stoffliche Zusammensetzung Glaspaste FERRO FX-11-036 . . . . .	106



# Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützung von folgenden Personen erhalten:

- Dr.-Ing. Maik Wiemer, Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration Chemnitz
- Dipl.-Phys. Uwe Schwarz, X-FAB Semiconductor Foundries AG
- Dipl.-Inf. Mike Schubert

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Ich erkläre außerdem, nicht bereits früher oder gleichzeitig bei anderen Hochschulen oder an dieser Universität ein Promotionsverfahren beantragt zu haben.

Chemnitz, 30. August 2004





# Thesen

1. Oberflächenmikromechanische Sensoren lassen sich durch unterschiedliche Technologievarianten fertigen, sind inzwischen weitverbreitet und stellen somit ein bedeutendes Basiskonzept der Mikrosystemtechnik dar. Oberflächentechnologien bieten neben den Vorteilen der einseitigen Waferbearbeitung und günstiger Gesamtprozesse (wenig Maskenebenen) die Möglichkeit zur Realisierung sehr kleiner Sensoren sowie zur monolithischen Integration von Auswerteschaltungen.
2. Zum Schutz der frei beweglichen Strukturen oberflächenmikromechanischer Systeme sind diese unmittelbar nach ihrem Freilegen (noch im Waferverband, am besten durch Waferbonden) mit einem Deckel zu versehen, um die weitere Verarbeitung (Vereinzeln, AVT) zu ermöglichen sowie einen Schutz während des Einsatzes zu gewährleisten. Diese Verkapselung ist als Vorbereitung der AVT auf Waferbasis anzusehen und ermöglicht den Einsatz von kostengünstigen Standardmethoden beim Aufbau der Einzelsensoren in Umgehäusen.
3. Bedingt durch ihre Struktur und die Herstellungstechnologien stellen oberflächenmikromechanische Komponenten besondere Anforderungen an den Bondprozess (raue Bondoberflächen, begrenzte Bondtemperatur, kleine Bondrahmen, selektives Bonden, begrenzte Aktivierungsmöglichkeiten, perforierte Deckwafer, Leitbahndurchführungen in der Bondebene), die bei der Entwicklung von geeigneten Bondtechnologien mit Glaszwischen-schichten zu berücksichtigen waren.
4. Die Analyse bekannter Bondtechnologien ergab, dass der Einsatz von Bondzwischen-schichten notwendig ist, um alle Anforderungen zu erfüllen. Glas als anorganischer amorpher Stoff mit zusammensetzungsabhängigen Eigenschaften ist als derartige Verbindung-zwischenschicht sehr gut geeignet, da es auf verschiedene Arten bearbeitet werden kann, chemisch weitgehend beständig, hermetisch dicht, mechanisch sehr fest und somit sehr zuverlässig ist.
5. Zur Inspektion der zwischen zwei Siliziumwafer eingebetteten und damit nicht optisch

sichtbaren Bondglasschichten eignet sich am besten die Infrarotinspektion. Ultraschallmikroskopie ergab keine eindeutigen Ergebnisse und Röntgenverfahren erweisen sich als gerätetechnisch zu aufwändig.

6. Ein anodischer Bondprozess basierend auf gesputterten Glasschichten, die auf vorstrukturierte und thermisch oxidierte Deckwafer aufgebracht wurden, ist untersucht und im Rahmen der technologischen Möglichkeiten optimiert worden. Nach nass- bzw. plasma-chemischer Aktivierung der Bondflächen ist ein anodisches Bonden der gesputterten Glasschichten bei relativ hohen Temperaturen (450 °C), jedoch niedrigen Spannungen (100 V), sicher möglich.
7. Der Bondprozess wird meistens durch Partikel in der Bondebene gestört, die eingeschnürt werden, dabei die Isolationsschichten durchstoßen, zu einem direkten elektrischen Kontakt zwischen den Wafern führen und dadurch die Ausbildung der Bondverbindung abbrechen.
8. In der Bondfläche darf sich beim Bonden gesputterter Glasschichten kein frei liegendes Aluminium befinden, da dieses zuerst bondet und somit das Bonden der Hauptflächen verhindert.
9. Die Festigkeit der Verbindung über gesputterte Glasschichten ist eher gering, da mit der Verfestigung des Bondinterfaces die gesputterte Verbindung durch die Anlagerung bewegter Natriumionen geschwächt wird. Es ergibt sich somit ein Festigkeitsmaximum in Abhängigkeit von der Bondzeit bzw. der Bondspannung.
10. Ein hermetisch dichtes Bonden von auf SOI-Wafer basierenden Sensoren war nicht möglich, da bedingt durch die Wafergestaltung und Prozesseinflüsse die Chip- und Bondpadbondrahmen unterschiedliche elektrische Potentiale aufwiesen und deshalb nur die Chipbondrahmen gebondet werden konnten.
11. Aufgrund der schwierigen Prozessführung und der Unmöglichkeit des hermetisch dichten Bondens von SOI-Strukturen wurde das Sputterglasschichtbonden als ungeeignet für die Produktion eingeschätzt und nicht weiter verfolgt.
12. Siliziumwafer lassen sich über anodisch gebondetes und rückgedünntes Glas als Bondzwischen-schicht verbinden. Hierzu wurden massive Glaswafer gegen Silizium gebondet. Das Rückdünnen erfolgte mittels Badätzen. Das Dünnen des Glases mittels Schleifen und Polieren wird jedoch als vorteilhafter angesehen. Die Strukturierung der Glasschicht kann durch nasschemisches Ätzen unter Verwendung einer Aluminiummaske erfolgen.

- 
13. Um zu vermeiden, dass das Rückdünnen bis in die Nähe der Verarmungszone der ersten Bondung erfolgt, wodurch keine zweite Bondung mehr möglich wäre, beträgt die Mindestdicke des Glases  $50\ \mu\text{m}$ .
  14. Bedingt durch die dicke Glasschicht erweist sich das Sägen als sehr schwierig. Es muss in mehreren Schritten erfolgen oder der Sägegraben ist beim Strukturieren des Glases frei zu legen.
  15. Die Bondverbindung unter Nutzung der gebondeten und rückgedünnten Glasschichten ist sehr fest und bei einer hochwertigen rückgedünnten Glasoberfläche als hermetisch dicht anzusehen.
  16. Trotz der guten Bondqualität wurde dieses Bondverfahren nicht weiter verfolgt, da bedingt durch den hohen Materialeinsatz und das aufwändige Aufbringen und Strukturieren der Glasschicht die Kosten in der Produktion viel zu hoch ausfallen würden.
  17. Das Glaslotbonden beruht auf dem Aufbringen eines niedrigschmelzenden Glases in Form einer Paste mittels Siebdruck. Anschließend wird die Paste durch thermische Konditionierung in ein massives Glaslot umgewandelt. Das Bonden erfolgt durch ein erneutes Aufschmelzen des Glaslotes unter Druck in Kontakt mit der zweiten zu bondenden Waferoberfläche (thermokompressiver Prozess).
  18. Als Glaslote stehen Pasten, d.h. Gemische aus Glaspulver, Füllern, organischen Bindern und Lösungsmitteln, verschiedener kommerzieller Anbieter zur Verfügung. Während, bedingt durch Kristallisation, das Bonden von Materialien der Firma SCHOTT nicht möglich war, konnten Pasten der Firma Ferro, insbesondere FX11-036, sehr sicher verarbeitet werden.
  19. Um die Fließtemperatur der Glaslote auf unter  $450^\circ\text{C}$  abzusenken, enthalten diese einen hohen Bleianteil. Eine Überprüfung von Umweltschutzbestimmungen ergab, dass der Einsatz von bleihaltigen Glasloten nicht gegen diese verstößt.
  20. Der mittels Siebdruck entstandene Glaslotbondrahmen ist ein dreidimensionales Gebilde. Seine minimale Breite beträgt  $190\ \mu\text{m}$  bei einer Sieböffnungsbreite von  $150\ \mu\text{m}$ . Seine Höhe wird durch die Siebdicke und die Öffnungsweite bestimmt, d.h. breite Strukturen werden dicker als schmale gedruckt. An inneren Ecken zieht sich beim Druck die Glaspaste zusammen und verrundet nach innen. Bedingt durch die begrenzte Positioniergenauigkeit des Siebes und dessen Verzug beim Bonden kommt es zu Positionierfehlern, deren Wert, wie alle Rahmenmerkmale, über den Wafer schwanken. Der minimale Abstand zwischen 2 Strukturen beträgt  $100\ \mu\text{m}$  ( $120\ \mu\text{m}$  im Sieb). Das Druckergebnis ist von einer Vielzahl von Prozessparametern abhängig.

21. Um trotz seiner Ungenauigkeiten den Siebdruck einsetzen zu können, wurden Designregeln aufgestellt, die alle Einflussfaktoren berücksichtigen.
22. Bessere Druckergebnisse und ein geringer Platzverbrauch lassen sich erreichen, wenn die Druckgebiete durch benachbarte Absenkungen im Deckwafer begrenzt werden. Da beim Siebdruck die Paste die abgesenkten Gebiete nicht erreichen kann, machen sich Fehlpositionierungen weniger stark bemerkbar (Selbstjustageeffekt).
23. Die thermische Konditionierung der Glaspaste ist Voraussetzung für ein sicheres Bonden. Nach dem Austreiben des Binders bei 350°C wird das Lotglas bei 450°C vorverschmolzen. Dabei entsteht eine kompakte Glasschicht, in die Füllerpartikel zum Einstellen der thermischen Dehnung eingeschmolzen sind. Ohne das Vorverschmelzen würde es beim Bonden zur Bildung von Hohlräumen im Glas kommen. Beim Verschmelzen verdichtet sich das Glas sehr stark, ohne dass sich jedoch seine laterale Struktur ändert.
24. Das Bonden erfolgt als thermokompressiver Prozess bei 430°C und 300 bis 1000 mbar. Dabei wird das Glas aufgeschmolzen und benetzt die zu bondende Fläche. Es kommt zur Lösung von Oberflächenschichten im Glas, so dass sich beim Abkühlen eine verbindende Glasübergangsschicht bildet.
25. Die Bondparameter wurden experimentell optimiert, dabei stellte sich heraus, dass eine ausreichend hohe Bondtemperatur entscheidend ist, um eine zur Benetzung ausreichend niedrige Glasviskosität zu erreichen. Der Bonddruck hingegen ist ein Unterstützungsparameter und kann somit stärker variieren.
26. Um eine ausreichend hohe Positioniergenauigkeit des Waferpaares zu erreichen, sind die Wafer beim Bonden am Rand zu fixieren. Die Druckplatten sollten in ihrer thermischen Dehnung an das Silizium angepasst sein (z.B. Siliziumkarbid).
27. Ein starkes Verlaufen des Glaslotes beim Bonden ist zu vermeiden, da dies meist mit einer einseitigen Benetzung und somit einer undefinierten Verbindung verbunden ist. Zudem kann das Lot in Bereiche verlaufen, in denen es die Sensorfunktion stört.
28. Die Dicke der gebondeten Glaslotschicht beträgt im Mittel 10  $\mu\text{m}$ , schwankt jedoch recht stark. Somit kann das Glaslot nicht zur Einstellung von funktionsrelevanten Abständen in Sensoren genutzt werden.
29. Ein sicheres selektives Bonden lässt sich erreichen, wenn im Deckwafer Absenkungen für die Aufnahme verlaufenden Glaslotes vorhanden sind.
30. Die Bondfestigkeit der Glaslotverbindung ist sehr hoch. Im Zugversuch konnten typische Werte von 20 MPa, bezogen auf die Bondrahmenfläche, erreicht werden.

- 
31. Mittels Glaslot sind alle gängigen Schichten der Mikrosystemtechnik (Silizium, Isolatoren, Metalle und sogar Polyimide) mit gleich hoher Ausbeute bondbar. Bedingt durch den schichtspezifischen Eintrag mechanischer Spannungen wurden jedoch unterschiedliche Festigkeiten erreicht. Auch lässt sich Glas der Pyrex-Familie mit Silizium fügen, während das Bonden von Substraten mit deutlich unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten nicht möglich ist.
  32. Das Bonden unter und somit der Einschluss von Vakuum ist möglich. Allerdings liegt der minimal einschließbare Druck bei ca. 3 mbar, bedingt durch Ausgasung organischer Reste aus dem Glaslot. Bei einer hohen Siebdruckqualität (keine Unterbrechungen im Siebdruckrahmen) lassen sich hermetisch dichte Bondungen realisieren.
  33. Die Bondausbeute des Glaslotbondens ist sehr hoch und wird weniger durch abgelöste Deckel als durch verlaufenes Lot bzw. siebdruckbedingt durch undichte Bondrahmen geschmälert.
  34. Die elektrische Charakterisierung des Glaslotes ergab eine relative Dielektrizitätskonstante von 4,6 und bis 150°C ein ausreichendes Isolationsverhalten.
  35. Aufgrund seines Bleianteils ist das Glaslot feuchteempfindlich. Liegt jedoch kein aus der Bondfuge ausgetretenes Glaslot frei, ist dieser Effekt nicht von Bedeutung.
  36. Das Bruchverhalten des spröd-elastischen Glaslotes wird durch Defekte nahe der Grenzflächen oder durch die eingeschmolzenen scharfkantigen Füllerpartikel bestimmt. Somit sind die Grenzflächen fester als das Verbindungsmaterial.
  37. Zuverlässigkeitstests zeigten, dass die Festigkeit des Glaslotes durch Temperaturschocks und Feuchtelager verändert wird. Für die praktische Anwendung haben diese minimalen Effekte jedoch keine Bedeutung.
  38. Aufgrund des Planarisierungsverhaltens des beim Bonden aufgeschmolzenen Glaslotes sind hermetisch dichte metallische Leitbahndurchführungen durch den Bondrahmen möglich.
  39. Durch den Einsatz eines silbergefüllten elektrisch leitfähigen Glaslotes lassen sich selektiv Kontakte zum aufgebondeten Deckwafer realisieren, wobei gleichzeitig metallische Leitungsdurchführungen durch einen elektrisch isolierenden Bondrahmen möglich sind.
  40. Anhand von fünf Anwendungen (Inertialsensoren, elektrisch trimmbare Widerstände, optische Bauelemente) konnte das Potential des Glaslotbondens in unterschiedlichen Gesamttechnologien gezeigt werden. Selbst das Bonden auf der Passivierung von integrierten Schaltungen ohne deren Beeinflussung ist möglich.

41. Mit dem Glaslotbonden konnte eine sehr sichere, universell einsetzbare Verkapselungstechnologie auf Waferbasis für Produktionsanwendungen entwickelt werden, die den Anforderungen oberflächenmikromechanischer Strukturen genügt.
42. Optimierungen und Untersuchungen zum Glaslotbonden sind noch hinsichtlich der Siebdruckqualität, der Bondfugendicke, der leitfähigen Glaslote, des Einsatzes von Getterschichten, verbesserter Kontrollmethoden und der Zuverlässigkeitseigenschaften notwendig.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Roy Knechtel  
Anschrift: Geraer Straße 23  
98716 Geraberg  
Geburtsdatum/-ort: 21.07.1972 in Erfurt  
Familienstand: verheiratet, 1 Sohn  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Schulbildung

1979–1989 Polytechnische Oberschule Liebknecht-Luxemburg in Geraberg

## Berufsausbildung

1989–1992 RFT-SEL Nachrichtenelektronik GmbH Arnstadt, Ausbildung zum Elektronikfacharbeiter, Berufsausbildung mit Abitur

## Wehrdienst

1992–1993 Grundwehrdienst in der Bundeswehr

## Studium

1993–1995 Grundstudium Elektrotechnik an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau

1995–1998 Vertiefungsstudium Prozessmess- und Sensortechnik an der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau, Abschluss Diplomingenieur

1996/1997 Auslandspraktikum RAUTE PRECISION OY Lahti, Finnland

## Anstellungen

seit 1998 Entwicklungsingenieur X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt

Geraberg, 30. August 2004





# Summary

The importance of surface micromachining technologies has increased greatly over the last years. The reasons are advantages over the classical bulk technologies like smaller chip sizes, new and better chip performances as well as the layer related design philosophy as known from CMOS-designs. A real challenge to surface micromachining technologies is the encapsulation of the structures on wafer level by wafer bonding. On one hand the structures are very sensitive and fragile, and therefore there is a fundamental need for a cap which protects the structures during the dicing and assembly process. On the other hand most of the known bonding techniques can not be used for this application. Anodic bonding of compact glass wafers is not suitable because the glass wafers can not be structured with the required accuracy and the glass can induce stress into the mechanical structure. Furthermore there is a risk to bond the easily moveable structures to the glass cap wafer. Silicon direct bonding for encapsulation purposes is very often also not possible, because of process damages to the bonding surface (increased roughness), small bonding areas and the impossibility to use wet activation and cleaning processes. Accordingly, both bonding techniques are not suitable for the encapsulation of surface micromachined structures and there is a need for alternative techniques such as bonding with interlayers.

In principle, there are three kinds of interlayer bonding techniques. Metal or alloy interlayers are used to produce an eutectic bond by alloying silicon and metal. This process depends very much of the process temperature (the eutectic point has to be hit exactly). Furthermore the suitable materials are not CMOS compatible and the bond strength is rather low. Therefore eutectic bonding is not well suitable for a general solution. A second kind of interlayer materials are organic adhesives, which join the wafers by a gluing process. Because there are significant doubts concerning the reliability of these organic layers and outgassing into sealed cavities can not be neglected also this bonding principle is not suitable. The third kind of interlayer material usable for wafer bonding is glass. This amorphous non-organic material offers a lot of technological advantages. The excellent reliability of glass as a joining material is well known and it was quickly identified as the most promising technological solution.

All technologies which use glass as bonding interlayer follow a typical regime. First, the

glass layer has to be deposited on one of the wafers to be bonded. Normally this deposition is performed on the cap wafer, without active structures, because the processing of this wafer is less critical. The deposition of glass can be done in different ways: sputtering, glass wafer bonding as well as screen printing of special glass containing viscose pastes. In most of the applications a structured glass layer is necessary to get a selective bonding behaviour, e.g. prevent the bonding of moveable structures to the cap wafer. The patterning can be done during the deposition (screen printing) or in additional steps. Before bonding, the deposited and structured glass layer has to be conditioned. This step depends on the glass material employed and the bonding process and gives the glass the required properties. The conditioning could be glass pre-melting, stress relaxation or surface activation. After that the prepared cap-wafer can be bonded to the system-wafer, carrying the active electrical and mechanical structures. After the bonding a post-conditioning of the glass is possible, e.g. for relaxation of mechanical stress at medium temperatures.

Depending on the type of glass material and on the bonding principle different bonding technologies can be distinguished:

1. Anodic bonding of cap wafers with sputtered thin sodium-borosilicate-glass
2. Anodic bonding of cap wafers with bonded and thinned thick sodium-borosilicate-glass
3. Glass frit bonding using low melting point glasses

The characteristics of these three bonding technologies, including specific process steps will be discussed in the following paragraphs.

*Anodic bonding of wafers with sputtered thin sodium-borosilicate-glass:* The bonding of sputtered thin sodium containing glass layers is reported in the literature [22]. The idea behind this technique is that this glass layers shows the same anodic bonding behaviour like thick Pyrex®-glass-wafers, which are often used for a very safe and reproducible bonding in microsystems technology processes. The usage of very thin layer (few microns) of anodic bondable glass on the surface of a silicon wafer can solve the main problems of the anodic glass wafer bonding. The bonding occurs at very low voltages in the range of 50 to 100V and the residual stress in the bonded stack is comparably low. This kind of bonding works in principle quite well, but trials to scale this technique up to an industrial production level lead to several significant problems which could not completely be solved:

1. very complex process flow:
  - thermal base oxide needed before glass sputtering
  - glass sputtering at low deposition rates

- 
- thermal conditioning of sputtered layers
  - wet activation of sputtered glass layer
  - plasma activation of sensor wafers
  - bonding at critical parameters
2. the chemical composition and structure of the glass is changed during sputtering, so the bonding process is not the same as for glass wafers
  3. the amount of sodium ions, moved during the bonding process is critical, too little leads to a weak bond, too much leads to a delimitation of the base oxide from the silicon wafer
  4. the bonding voltage is also critical, because for thin layers the electrical breakdown voltage is rather low, therefore it is difficult to maintain the bonding conditions over the complete wafer area
  5. the bond strength is low compared to other techniques

In summary, the bonding of sputtered sodium doped glass layers works, but the process is too complex, too expensive and the yield is low due to the problems described above. Therefore this technique is not used for industrial manufacturing processes.

*Anodic bonding of wafers with bonded and thinned thick sodium-borosilicate-glass:* Because of the difficulties with bonding sputtered layers, an alternative was evaluated. A thick glass layer (300  $\mu\text{m}$ ) was formed on a silicon wafer by anodic wafer bonding. This layer was thinned to reduce the mechanical stress and to reduce the bonding voltage at the second bonding step. The thinning was done by wet chemical etching (HF) or grinding. In both cases a polishing step is recommended to get well bondable surfaces. A structuring of the polished glass layer is carried out through mask processes. The bonding of this glass layers is possible if the thickness is higher than 50  $\mu\text{m}$ . At lower thicknesses the sodium concentration in the glass is too low (depletion of first bonding step) to allow a second anodic bonding, which is caused by the depletion zone created during the first bonding step. Direct bonding of glass to silicon (first bonding step) without any field assistance can solve this problem and allows the bonding of thinner glass layers. This technology provides a very safe and stable process, but the effort and the costs are too high to use it for industrial production. Especially the anodic bonding of the glass wafer, its grinding and polishing are too expensive.

*Glass frit bonding using low melting point glasses:* It was shown that the previously mentioned bonding techniques with glass layers give good results, but they are not stable enough or too expensive for industrial production processes. Therefore an alternative was required, a very stable and cheap bonding technology. Glass frit bonding meets these requirements. The

main principle is that a low melting point glass joins two wafers together by a soldering and sealing process. Glass frit bonding has a lot of advantages with respect to the application of encapsulation bonding of microsystems fabricated by surface micromachining techniques:

- In situ structuring of glass layers by screen printing
- Deposition on structured cap-wafer (high topography, holes)
- Commercially available glass materials
- High alignment accuracy after bonding
- Very high bonding yield
- Planarising behaviour of the glass interlayer
- Bonding tolerant to previous bonding steps and surface layers

The low melting point glass is commercial available as a glass paste (e.g. FERRO 11-036) consisting of different glass powders and organic binders. This paste has a moderate viscosity and can be deposited by screen printing. The screen printing allows a structured deposition of the paste on a wafer surface with high topography (e.g. cavities or holes). The minimum structure width is  $190\ \mu\text{m}$  with a minimum spacing of  $100\ \mu\text{m}$  and high alignment accuracy can be achieved, which has been defined in a design rule specification. A main issue is the conditioning of the glass frit material after screen printing. The glass paste has to be transformed into a glass, free of organic residues by a multi step temperature process. During this step the glass is compressed in horizontal direction, but its lateral structure is not influenced. This thermal process is necessary for a successful bonding.

The bonding is a thermo-compressive process. The aligned wafers are heated under slight pressure up to the melting temperature of the glass. The glass is wetting the system wafer and forms a strong compound (solving surface layers) between the wafers when it solidifies while cooling down. The temperature is the critical process parameter. It has to be high enough, so that the viscosity is low enough to wet the wafer surface. By varying the mechanical pressure on the wafer pair, the flowing of the glass at the bonding temperature can be controlled. A certain flow of the glass is necessary to ensure the planarising behaviour of the glass and to compensate for defects of the screen printing. The maintenance of alignment accuracy over the complete bonding process is very important. At the bonding temperature the glass is soft. At this state, a small side force, which can not be neglected in any bonding system, leads to a shift between the wafers. Because this effect is not reproducible a suitable measurement is necessary to prevent the shift. Closed clamps at the edge of the bonding pair, which are

---

unusual in common bonding processes solved this problem and alignment accuracy better 5  $\mu\text{m}$  is possible. The thickness of the bonded glass between the joined wafers is 5 to 15  $\mu\text{m}$ , large enough to realise a working gap between sensor and cap, but the exactness has to be optimised. Vacuum bonding by glass frit is possible, but the minimum pressure is limited to 1-5 mbar, caused by outgassing of organic residuals from the glass. Once the process is completed, the bond interface is hermetic. Nearly all materials and layers known in microsystems technologies (silicon, oxides, nitrides, metals, glass, polyimide) can be bonded using glass frit. Caused by the self-planarising behaviour of the melted glass this process is tolerant to previous process steps and metallic lead-throughs are possible. The bonding strength and yield are always very high. Pull test, thermal cycles and pressure cooker tests have shown a good reliability of the bond interface. Even if the glass is not free of internal mechanical stress it does not influence moveable structures. The electrical properties of the glass frit material were measured. Its high electrical resistivity allows the realisation of metallic electrical lead throughs without any passivation. In addition, a silver filled electrical conductive glass frit was tested, which allows the mechanical bonding and the electrical contacting of the wafers.

The reason for the investigation of the different bonding technologies, including the glass interlayer bonding, was the requirement to find a universal solution for the encapsulation of sensors, especially for those fabricated using surface micromachining technologies. The glass frit bonding was chosen as the most suitable process to cap on wafer level surface micromachined inertial sensors (gyroscopes, acceleration sensors) produced in a SOI-based standard X-FAB technology. In the meantime, a substantial number of wafers were successfully processed using this bonding technique. Moreover, glass frit bonding is also suitable for other applications like optical wafer level packaging and capping of tire pressure monitoring systems (on chip integration of pressure and acceleration sensors) or electrical trimmable resistors with relatively thin silicon layers of about 100  $\mu\text{m}$ .

All in all, glass frit bonding could be established as a safe and universally usable process. It was shown that it can be used for very different applications in industrial production processes and it fulfils the reliability requirements.