

Neon Ultra-Feinlecktest zur Vorhersage der Vakuumerhaltung resonanter Mikrosensoren

Dissertation
zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieur
der
Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität Kiel

von
Diplom Physiker Wolfgang Reinert

Neumünster 2006

Tag der mündlichen Prüfung: 18.04.2007

1. Gutachter: Prof. Dr. Anton Heuberger

2. Gutachter: Prof. Dr. Helmut Föll

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie in Itzehoe.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Heuberger für die Fokussierung des Themas, die Betreuung der Arbeit und seine vielen Ideen, die zum Gelingen beigetragen haben. Ihm, wie auch Herrn Prof. Dr. Föll, der die Mühe des Koreferats übernommen hat, danke ich für die zügige Durchsicht meiner Promotionschrift.

Die Durchführung meiner Arbeit war eng verknüpft mit einer ständigen Optimierung und Weiterentwicklung des eutektischen Fügeverfahrens zur hermetischen Vakuumverkappung der untersuchten Inertialsensoren auf Waferebene, das in meinem Verantwortungsbereich lag. Mein Dank gilt daher all jenen, die mit viel Geduld immer neue Sensoren für mich hergestellt haben:

- Dr. Peter Merz, Marten Oldsen und Helge Schimanski am Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie in Itzehoe, für die Diskussionen zur Optimierung des Fügeverfahrens und der Bauteillebensdauer in feuchter Atmosphäre, und für das Schreiben immer neuer Prozessflows und der Überwachung der Waferlogistik,
- Oliver Schwarzelbach am Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie in Itzehoe für die Entwicklung, Bereitstellung und kontinuierliche Verbesserung der elektrischen Messtechnik zur Bauteilcharakterisierung,
- dem Prozessteam am ISIT für die Herstellung der vielen Kappen- und Devicewafer,
- den Metallographen Jan Lähn und Tim Kraft für die Herstellung einer großen Anzahl von Querschliffen,
- Dr. Giorgio Longoni und Dr. Marco Moraja von der Fa. Saes Getters für die Durchführung von Restgasanalysen und Ausgasungsmessungen, sowie für die Getterabscheidung und viele Diskussionen zur Optimierung der Getteraktivierung während der hermetischen Verkappung.

Herrn Dr.-Ing. Dirk Kähler danke ich im Besonderen für seine stete Diskussionsbereitschaft neuer Konzepte und die Hilfe bei der Entwicklung der Simulationsrechnungen. Nicht zu vergessen ist sein überaus gutes Verständnis der LATEX-Umgebung, ohne das diese Arbeit wahrscheinlich ein Opfer von Microsoft geworden wäre.

Schließlich danke ich allen Institutsangehörigen, insbesondere der Institutsleitung, für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die jederzeit verfügbare Unterstützung auch in schwierigen Projektphasen.

Meiner Frau Silke Bühse danke ich für ihre Unterstützung, ihre Geduld und den Glauben an mich.

Kurzfassung

Der rasante Fortschritt in der Automobilelektronik basiert auch auf dem breiten Einsatz unterschiedlichster Mikrosensoren. Erst durch diese werden vernetzte Drive-by-Wire Konzepte in Fahrzeugen aber auch Flugzeugen etc. umsetzbar. An die Sensoren werden höchste Anforderungen hinsichtlich hoher Messempfindlichkeit bei geringstem Stromverbrauch und Baumaß, hoher Robustheit und Langlebigkeit und geringer Kosten gestellt. Die Mikrosystemtechnik bietet die technologischen Grundvoraussetzungen, um diese Anforderungen weitestgehend abzudecken. Jedoch generiert diese Marktchance auch ein gewaltiges wirtschaftliches Risiko in Form von Rückrufaktionen wegen fehlerhafter Bauteile. Dieses Risiko kann oft nicht versichert werden und die Bildung von entsprechenden Risikorücklagen in der Größenordnung von 30.000.000 - 100.000.000 Euro ist wegen der geringen Margen im Automobilmarkt schwierig. Aus diesem Grund ist die prozessbegleitende Bauteilcharakterisierung oberflächen-mikromechanischer Strukturen aktuell Gegenstand der angewandten Forschung.

Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag durch die Entwicklung eines neuartigen ultra hochauflösenden Hermetizitätstests für resonante Mikrosensoren, der die Empfindlichkeit des bekannten Helium-Lecktests im Mil-Standard 883 um mindestens einen Faktor 10^6 übertrifft. Bei undichten Vakuumgehäusen stellt sich ein Leckgasstrom q_{Gas} durch den Leckkanal für ein spezifisches Gas entsprechend folgender Gleichung ein [1]:

$$q_{Gas}(T) = L_{Gas} \cdot (P_1 - P_2). \quad (1)$$

wobei L der Gesamtleitwert des Leckkanals ist, P_1 der Partialgasdruck auf der Hochdruckseite und P_2 der Partialgasdruck auf der Niederdruckseite des Lecks ist.

Das zugrundeliegende Konzept des Neon Ultra-Feinlecktests ist eine Druckanstiegsmessung auf Basis einer Güteüberwachung vor und nach einer Neon-Überdruckauslagerung. Mit einer gut optimierten Messroutine kann der Gütefaktor und die frequenzunabhängige Dämpfung von resonanten Mikrosensoren sehr genau und reproduzierbar gemessen werden. Aus der Differenzmessung kann der Neon-Leitwert L_{Ne} eventueller Gaslecks an resonanten Mikrosensoren auf Grundlage der Molekularströmung ermittelt werden. Grundlage für diese Berechnung ist eine an offenen Sensoren in einer Vakuumkammer gemessene Eichkurve, über die die Umrechnung von Gütefaktor in den Innendruck des Bauelementes erfolgt.

Der Neon-Leitwert wird in dieser Arbeit als eine integrale Größe für ein effektives Gasleck mit einem Gesamtleitwert unabhängig von der genauen Leckgeometrie angenommen (Anzahl von Einzellecks, Länge, Verwinkelungen, Öffnungs- und Kapillarquerschnitt). Der

Neon-Leitwert des unbekanntes Gesamtlecks wird über die Druckzunahme in der Sensor-kavität durch einströmendes Neon exakt bestimmt. Durch das gleiche Leck treten auch alle anderen Luftgase in die Kavität ein. Zwischen dem Moleküldurchmesser der Luftgase (z.B. CO: $d_{Stoss} = 3,92 \text{ \AA}$ [2]) und den hier relevanten Kapillardurchmessern liegen immer noch mindestens 2 Dekaden, so dass die Grundannahmen der Vakuumphysik als gültig vorausgesetzt werden können. Bedingung ist allerdings, dass die einströmenden Gase nicht chemisch mit den Kapillarwänden reagieren und diffus an den Wänden gestreut werden.

Aus dem Neon Leitwert kann unmittelbar die Standard Luftleckrate berechnet werden. Dies gilt auch dann noch, wenn nicht über die ganze Länge des Leckkanals molekulare Strömung vorliegt. Das Messkonzept kann durch zerstörende Restgasanalysen und beschleunigte Alterung verifiziert werden. Aus prozesstechnologischer Sicht ist nun weltweit erstmalig ein hochauflösender 100 % Screeningtest der Leckrate auf Wafer Ebene für resonante Mikrosensoren unterschiedlichen Designs und unabhängig von der gewählten Wafer Bondierungstechnik verfügbar.

Als Screen Test eingesetzt identifiziert der Neon Ultra-Feinlecktest undichte Bauteile mit einer zu großen Luftleckrate schon nach der Vakuumverkappung auf Wafer Ebene. Für Bauteile mit zulässiger Leckrate können aus den Messergebnissen Hinweise auf den zu erwartenden Vakuumverlust in der Gehäusekavität abgeleitet werden. Die Prognose beruht auf der aktuell bestimmten Initialleckrate für Luft. Hieraus können nach Wunsch auch Qualitätssortierungen für unterschiedliche Anwendungen abgeleitet werden.

Die weiteren Gehäusungsschritte des Bauteils (z.B. Transfermolding) üben verschiedene Beanspruchungen und Alterungseinflüsse aus, die den Leitwert des Leckpfades durch Querschnittsveränderung (durch mechanischen Stress oder eingelagertes Material) beeinflussen können. Eine Prognose der Vakuumlebensdauer mit Einbeziehung dieser Alterungseffekte ist möglich, bedarf aber einer solide abgesicherten Datenbasis. Hierzu sind unterschiedliche beschleunigte Alterungsuntersuchungen an einer Vielzahl genau bekannter Proben durchzuführen. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xii
1 Motivation und Themenstellung	1
1.1 Resonante Mikrosensoren	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	5
2 Gettertechnologie	6
2.1 Gettertypen	6
Flüssigkeitsgetter	6
Partikelgetter	8
Getter für Gase	8
2.2 Getter Auslegung	9
2.3 Getter Integration	14
2.4 Einfluss der Getterintegration auf Lecktest	15
3 Vakuum Wafer Bondtechnologie	17
3.1 Bauteilverkappung auf Waferebene	17
Typisierung der Wafer Bondtechnologien	17
Anodische Verbindung	18
Si-Si Direktverbindung	20
Glaslotverbindung	20
Eutektische Verbindung	21
Kappenklebung	23
Kappentransfer	23
Dünnschichtverkappung	23
3.2 Der eutektische AuSi Verbindungsprozess im ISIT	24
Vakuumerzeugung und Einstellung des Innendrucks	26

	Vorversuche	26
	Argonquellen	26
	Sputtern und Ionmilling	29
	Einfluss der Kappenwaferreinigung auf den Getter	31
3.3	Rückfüllung mit Edelgasatmosphäre	32
	N ₂ /Ar-Gasmischung	32
	Überwachung der Gettereigenschaften	35
	Heliumpermeation	35
	Neon als Rückfüllgas	38
	Prozessempfehlungen	39
4	Gedämpfte Feder-Masse-Systeme	40
4.1	Gedämpfte harmonische Schwingung	40
4.2	Fremderregte, gedämpfte harmonische Schwingung	43
	Alternativen zur Bestimmung der Güte	46
4.3	Energieverluste durch Dämpfung	47
	Dämpfung im intrinsischen Bereich	48
	Dämpfung im Knudsen-Bereich	48
	Dämpfung im viskosen Strömungsbereich	48
4.4	Elektrostatischer Antrieb	49
5	Hermetizitätstests	51
5.1	Hermetizitätsanforderungen	51
	Alterung in Luft	52
	Wasser als Schadgas	53
5.2	Hermetizitätstests	54
	Farbstoffmarkierung	56
	Membranresonanz	56
	Groblecktest	56
	Optische Verformungsmessung	56
	Helium-Lecktest	57
	Kr ⁸⁵ -Lecktest	58
	Interne Druckmessung	58
	Kumulative chemische Reaktion	60
	Restgasanalyse	61
	Überwachung des Gütefaktors	61

5.3	Knudsen-Parametrisierung	61
5.4	Neon Ultra-Feinlecktest	64
	Bestimmung der Eichkurve	64
	Bestimmung der Auslagerungsparameter	66
	Die Auslagerungszeit	71
	Lebensdauermodell der Vakuumerhaltung	71
	Messtechnische Bestimmung des Gütefaktors	73
	Einflussgrößen auf Messempfindlichkeit	76
	Eigenschaftsprofil des Neon Ultra-Feinlecktest	78
6	Ergebnisdiskussion	79
6.1	Einfluss von Prozessierungstoleranzen	79
6.2	Prozesssicherheit der Gütefaktoreinstellung	89
6.3	Einfluss der Gastemperatur	89
6.4	Einfluss der Bedämpfungsatmosphäre	91
6.5	Neonauslagerungen	94
7	Zusammenfassung und Ausblick	102
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	102
7.2	Schlussfolgerungen	104
7.3	Ausblick	105
	Anhang	107
A	Sensoraufbau und Prozessabfolge	107
B	Wafer Reinigungsprozeduren	114
	Thesen	118
	Literaturverzeichnis	122

Eigene Publikationen und Patente

Publikationen:

Vacuum wafer bonding technology, Wolfgang Reinert et. al., IMAPS Nordic 2004, Helsingör, DK

Eutectic vacuum wafer bonding with integrated non-evaporable getter, Wolfgang Reinert, S. Zerbini, Workshop on wafer bonding for MEMS technologies, Oct. 2004, Halle-D

High vacuum wafer bonding technology, AuSi eutectic wafer bonding with integrated getter thin film for long term stable high vacuum, Wolfgang Reinert, MST News, Spezialausgabe über Wafer Bond Technologie, February 2005

Vacuum wafer bonding technology, W. Reinert, MicroTech 2005, Cambridge, March 2005 (selected for Best Paper Award)

In-line critical leak rate testing of vacuum-sealed and backfilled resonating MEMS devices, Wolfgang Reinert, Dirk Kähler, Marten Oldsen, Peter Merz, Proceedings of the 207th Electrochemical Society Meeting, Quebec City, Canada May 2005

Q-factor enhancement for MEMS devices by the getter film at wafer level, G. Longoni, M. Amiotti, A. Conte, M. Moraja, W. Reinert, MICRO SYSTEM Technologies 2005, Munich

Three industrial sample applications of successful getter integration, S. Zerbini, A. Fourier, W. Reinert, VABOND-Workshop on Long-term stability of vacuum-encapsulated MEMS devices using eutectic wafer bonding, Itzehoe, September 2005

Hermeticity test to predict the vacuum lifetime in individual micro- and nano-liter packages, W. Reinert, VABOND-Workshop on Long-term stability of vacuum-encapsulated MEMS devices using eutectic wafer bonding, Itzehoe, September 2005

Vakuumdichte Gehäuse für hochempfindliche mikromechanische Sensoren, W. Reinert, öffentliche Vortragsreihe Aspekte moderner Siliziumtechnologie am Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie, September 2005

PSM-X2: Polysilicon surface micromechanic process platform for vacuum package sensors, P. Merz, W. Reinert, K. Reimer, B. Wagner, Mikrosystemtechnik Kongress 2005, Freiburg, 10.-12. October 2005

Assesment of vacuum lifetime in nL-packages, W. Reinert, K. Kähler, EPTC 2005, Singapore, December 2005

The role of the getter film in hermetically packaged MEMS resonant structures, M. Moraja, G. Longoni, W. Reinert, 2nd International Workshop on Wafer Bonding for MEMS Technologies, Halle, 9.-11. April 2006

Industrial Wafer Level Vacuum Encapsulation of Resonating MEMS Devices , W. Reinert DTIP 2006 in Stresa-Italy, 26.-28. April 2006

Critical leak rate screen on wafer level for the vacuum lifetime prediction in nano liter MEMS packages, W. Reinert, D. Kähler, P. Merz, 2006 KGD Workshop Packaging & Test Workshop, 10.-13. September 2006, Nappa-CA

Patente:

Patentantrag Nr. 04F45725

Titel: Verwendung von Neon zur Einstellung der Güte verkapselter Mikroresonatoren,
Erfinder: W. Reinert, P. Merz, M. Oldsen

PCT-Patentantrag Nr. 04F45769

Titel: Leak Test for a vacuum encapsulated device, Erfinder: W.Reinert, P. Merz, M.
Oldsen

Patentantrag Nr. 06F47296

Titel: In-Line Test der Getterkapazität, Erfinder: W. Reinert, P. Merz

Abbildungsverzeichnis

1.1	Rotatorischer Drehratensensor	2
1.2	Prinzip Sensorverkappung	2
2.1	MOEMS Gehäuse mit Getter	8
2.2	Aufsicht auf Kapfenwafer mit Dünnfilmgetter	10
2.3	Kornstruktur Dünnfilmgetter	10
2.4	Gasquellen	11
2.5	Zeitlicher Druckanstieg	12
2.6	Begrenzung des Vakuumverlustes	13
2.7	Keramikgehäuse mit Dickschichtgetter	14
2.8	Vakuum Gehäusung auf Waferenebene mit diskretem Getter	14
2.9	Vakuum Gehäusung auf Waferenebene mit Dünnschicht-Getter	15
3.1	Verkappungstechnologien	17
3.2	Vakuum-Verkappungstechnologien auf Waferenebene	19
3.3	Übersicht Wafer Bondtechnologien	19
3.4	Anodisches Bonden	19
3.5	Glasfritt Bonden	21
3.6	Bruchfläche AuSi-Bondierung	22
3.7	Phasendiagramm Au-Si	22
3.8	Dünnschichtverkappung	24
3.9	Ablauf der Waferpressung	25
3.10	AuSi-Bondprofil mit Getteraktivierung	25
3.11	Argon Tiefenspektrum nach Getterbeschichtung	27
3.12	Argon Tiefenspektrum nach Hochtemperaturausgasung	27
3.13	Argon Ausgasungstemperaturspektrum	28
3.14	Einbauraten verschiedener Arbeitsgase	28
3.15	Probenmatrix zur Identifizierung von Argonquellen	29
3.16	Quellen für Argonausgasung	30
3.17	Güteverteilung bei $Q = 500.000$	30

3.18	Waferreinigung beeinflusst Gettercharakteristik	32
3.19	Wafermap der Güteverteilung	34
3.20	Güteverteilung nach Neon-Auslagerung	34
3.21	Permeationrate von He und Ne	37
3.22	Neon Heißgasrückfüllung	38
4.1	Gedämpfte Schwingung	42
4.2	Dämpfungsklassen	42
4.3	Amplitude und Phasenwinkel vs. Anregungsfrequenz	46
4.4	Biegebalken	47
4.5	Antriebskämme	50
4.6	Elektrostatische Kraft und Elektrodenabstand	50
5.1	Aufbau Membranresonanzmessung	57
5.2	Kr ⁸⁵ -Messaufbau	58
5.3	Doppelt geankerter μ -Pirani-Sensor	59
5.4	Eichkurve μ -Pirani-Sensor	59
5.5	Optischer Transmissionsverlauf der Kupferoxidation	60
5.6	Kupferpad zur Messung der Dichtigkeit	60
5.7	Knudsenminimum der Gasströmung	62
5.8	Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenzen	65
5.9	Vakuumprober zur Messung unverkapteter Sensoren	65
5.10	Eichkurve der Güte vs. Druck	67
5.11	Konzept des Gesamtlecks	68
5.12	Bestimmung der Auslagerungszeit	70
5.13	Identifikation der Resonanzfrequenz	73
5.14	Amplitudenabnahme einer gedämpften Schwingung	74
5.15	Abklingkurve	75
5.16	Linearer Fit der Abklingkurve	75
5.17	Anregung und Dämpfung in unterschiedlichen Druckumgebungen	77
6.1	Bestimmung der Messgenauigkeit in Q	80
6.2	Bedienoberfläche Prototyp-Messplatz	81
6.3	Gestörtes Messsignal der Gütefaktormessung	81
6.4	Verschlechterte Messgenauigkeit bei Schnellmessung	82
6.5	Variation der Resonanzfrequenzen und Koordinatensystem	82
6.6	Resonanzfrequenzen und Gütefaktoren über Wafer	83
6.7	Dämpfung und Q_{bias} des Wafers FHGM749W09	84
6.8	Dämpfung und Güte in Abhängigkeit von Q_{bias}	85

6.9	Verhältnis der Resonanzfrequenzen F1 und F2	85
6.10	Frequenzabhängigkeit des Gütefaktors Q	86
6.11	Q- Wafermap des Wafers FHGM749W10	87
6.12	Verteilung der Resonanzfrequenzen und Güte im Schnitt	88
6.13	Dämpfung nach Neonauslagerung in 3D-Ansicht	88
6.14	Wafermaps der Gütefaktorverteilung an 6 Wafern	89
6.15	Gütefaktorverteilung von 15 Wafern	90
6.16	Temperaturabhängigkeit von Q und δ	91
6.17	Eichkurve für Argon	92
6.18	Eichkurve für Sensortyp X2V5	93
6.19	Eichkurve mit linearem Fit	94
6.20	Luft Leckrate von Drehratensensoren nach 247 h Neonauslagerung	95
6.21	Änderung der Dämpfung nach 247 h Neonauslagerung	96
6.22	Resonanzausfälle undichter Sensoren nach 247 h Neonauslagerung	96
6.23	Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz F2 und Leckrate	97
6.24	Stabilität der Resonanzfrequenzen und Gütefaktoren	98
6.25	Druckänderung berechnet über Gütefaktor	99
6.26	Leckratenverteilung am Wafer FHGM650W22	100
6.27	Druckanstieg durch Neon vrs. Realzeitalterung	101
A.1	Corioliseffekt	107
A.2	Prozessablauf 1 für Sensorwafer	108
A.3	Prozessablauf 2 für Sensorwafer	110
A.4	Prinzip und Beispiel DRIE	111
A.5	Prozessablauf Kappenwafer	112

Tabellenverzeichnis

1.1	Hermetizitätsanforderungen	3
3.1	Ergebnisse der ersten Restgasanalyse (in mbar)	26
3.2	Gas-Permeationskonstanten in SiO ₂	36
4.1	Druckabhängigkeit des Gütefaktors	49
5.1	Einteilung der Dichtigkeitsklassen	51
5.2	Zusammensetzung der Luft	53
5.3	Verfahren zur Überprüfung der Hermetizität	55
5.4	Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz	64
6.1	Fitparameter für Druckberechnung	93
B.1	Verfügbare Reinigungsverfahren (Nasschemisch)	115
B.2	Verfügbare Reinigungsverfahren (Physikalisch)	116
B.3	Temperaturabhängigkeit der Gasviskosität	117

1 Motivation und Themenstellung

1.1 Resonante Mikrosensoren

Das Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT) in Itzehoe entwickelt hochauflösende oberflächen-mikromechanische Inertialsensoren. Als erstes Produkt ist ein neuartiger Drehratensensor für sicherheitsrelevante Fahrzeuganwendungen in der Entwicklung.

Dieser Sensor soll synonym für die moderne Klasse der resonant betriebenen Mikrosensoren stehen, weitestgehend unabhängig von der eingesetzten Strukturierungstechnik des Siliziums (Volumenmikromechanik, Oberflächenmikromechanik oder monolithischer Integration) und der eingesetzten Vakuum-Verkappungstechnologie. Während der Entwicklung ergab sich aus der Fragestellung der langfristigen Vakuumhaltung innerhalb des Sensorgehäuses das Thema dieser Dissertation. Sie befasst sich mit der Erfassung der Initial-Luftleckrate zur Prognose der Vakuumhaltung in sehr kleinen Gehäusevolumina (Innenvolumen im Bereich einiger nano-Liter) unter Berücksichtigung von integrierten Getterschichten. Basierend auf der Überwachung des Gütefaktors wurde ein unaufwendiges Screening Verfahren der Initial-Luftleckrate mit 100 % Messabdeckung für resonante Mikrosensoren auf Waferebene und optional auf Modulebene entwickelt. Weil sich Neon als Testgas aus verschiedenen Gründen sehr gut eignet, wurde das Verfahren von mir "Neon Ultra-Feinlecktest" getauft. Der Test berücksichtigt spezifische Konstruktionsmerkmale von Mikrosensoren und weist eine im Vergleich zur Mil-STD883G Methode 1014.12 SE-AL überragend bessere Nachweisempfindlichkeit auf Gaslecks auf. Neben dem Einsatz als Screen im Produktionsprozess eignet sich das Verfahren zur Feinoptimierung des Vakuum-Verkappungsprozesses insbesondere in Zusammenhang mit beschleunigten Alterungstests. Das Verfahren ist zum weltweiten Patent angemeldet und wurde danach breit publiziert, siehe Auflistung *Eigene Publikationen und Patente* am Anfang der Arbeit.

Alle wichtigen Fragestellungen hinsichtlich der Vakuumhaltung werden an dem im ISIT entwickelten System erläutert und messtechnisch verifiziert. Technologisch basiert der Drehratensensor auf einem patentierten oberflächen-mikromechanischen Poly-Silizium Prozess (siehe Abb. 1.1). Dieser Sensor hat ein Eigenschaftsprofil mit vielen Vorteilen gegenüber älteren Sensor-Herstellungstechnologien (Piezostimmgabel, Quarz etc.), wie z.B. kleinere Abmessung, niedrigerer Stromverbrauch, geringe Drift, hohe Messauflösung und nicht zuletzt höhere Wirtschaftlichkeit durch eine neue Gehäusungstechnologie.

Der Drehratensensor beruht auf dem Prinzip des Vibrationsgyroskops und wird in Resonanz betrieben. Hierdurch wird ein exzellentes Signal zu Rauschverhältnis erreicht. Eine Trägerfrequenz im Bereich einiger kHz wird genutzt um niederfrequente Störungen im 0-50 Hz Bereich zu unterdrücken. Gerade in diesem Frequenzbereich liegt aber oft auch die zu messende Drehrate. Der resonante Betrieb moduliert die zu messende Größe auf

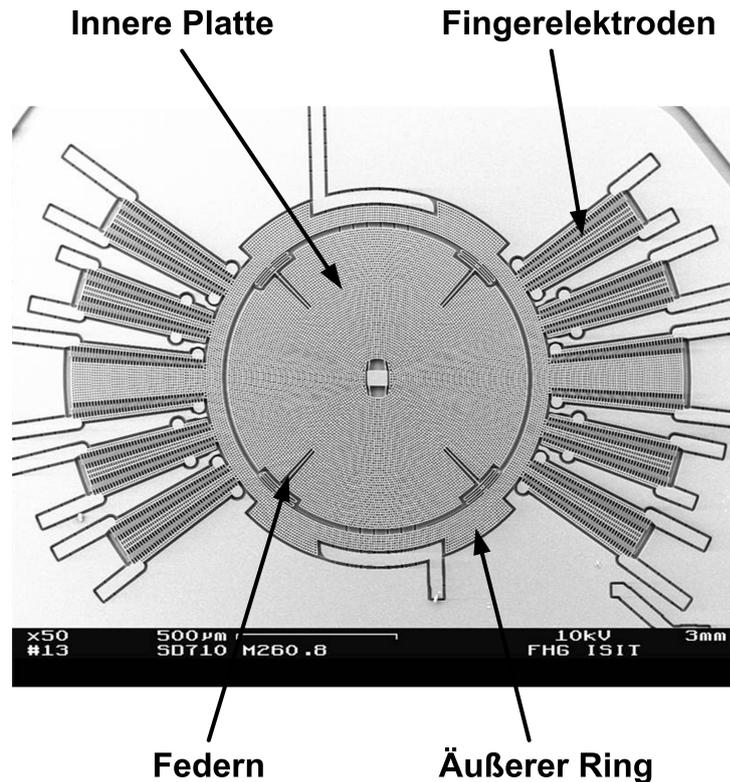


Abbildung 1.1. REM-Aufnahme des Drehratensensors

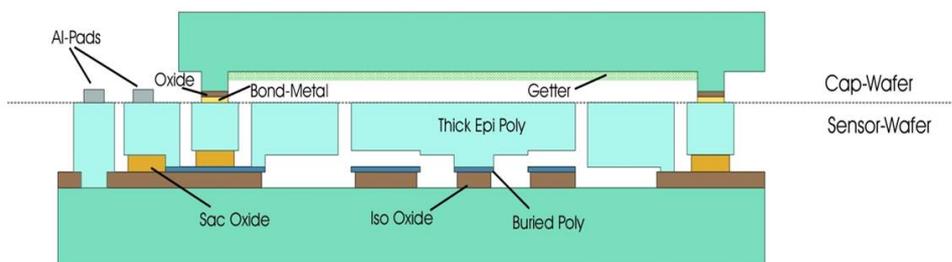


Abbildung 1.2. Prinzip der Sensorverkappung mit Deckelwafer

das Trägerfrequenzband bei ca. 5 kHz auf und die Auswerteelektronik verstärkt diese Modulation sehr schmalbandig. Die Weiterverarbeitung erfolgt dann in der Regel digital. Ziel war es einen Test zu entwickeln, der genau von diesem guten Signal zu Rauschverhältnis profitiert und den Sensor selbst als Messsystem benutzt.

Der Resonator schwingt in einer Vakuumatmosphäre mit definierter Dämpfung, um den Leistungsverbrauch und Temperaturdriftphänomene zu reduzieren, siehe Abbildung 1.2. Typische Umgebungsdrücke in der Sensorkavität liegen im Bereich 0,1 mbar. Eine detaillierte Beschreibung des Sensorprinzips und des Prozessflusses mit allen relevanten Einzelschritten ist im Anhang dieser Arbeit zu finden. Im Betrieb wird ein äußerer Ring durch einen elektrostatischen Finger-Antrieb rotatorisch angeregt. Die Ausdehnung der Sensorstruktur liegt bei etwa 2 mm und einer Dicke der strukturierten Poly-Siliziumschicht von 11 µm. Der resonante Betrieb des Sensors setzt eine definierte Gasdämpfung bei einem Innendruck im Bereich 0,1 mbar für das Abklingen des Sensorsignals bei Drehungen und

im Fall von Schockeinwirkungen voraus.

Frühere mikrosystemtechnisch hergestellte Drehratensensoren wurden auf Waferebene prozessiert, und erst nach dem Vereinzeln des Wafers in Chips separat in ein Metall- oder Keramikgehäuse eingebaut und das Gehäuse anschließend im Vakuum verschlossen [3] [4]. Der Verpackungsprozess einschließlich dem Bauteiltest nimmt im Hinblick auf die Kosten des Sensors einen vergleichsweise großen Anteil an den Gesamtherstellungskosten ein; ein Kostenanteil von 60 % - 85 % für den Verpackungsprozess ist nicht ungewöhnlich [5] [6].

Ein großer Kostenvorteil wird erreicht, wenn für die Gehäusung der Mikrosensoren Standardprozesse der Halbleitergehäusung genutzt werden können [4] [6]. Hierzu müssen die Sensoren jedoch durch eine Kappe vor mechanischen Zerstörungen geschützt werden. Die Kappe hat dabei weiterhin die Aufgabe eine Sensorkavität über dem Resonator zu bilden und eine definierte Atmosphäre dauerhaft (mindestens 15 Jahre sind für Automobilanwendungen gefordert) einzuschließen. Besonders vorteilhaft sind Verkappungsverfahren, die alle Sensoren auf Waferebene gleichzeitig hermetisch verpacken. Dieser Ansatz, bei dem ein mit Kavitäten ausgestatteter Kappenwafer mit einem Sensorwafer dauerhaft verbunden wird, wird allgemein als Waferverkappung oder auch Wafer Bondierung bezeichnet. Die Wafer Verkappungstechnologie kann weiter nach hermetischer- und Vakuumverkappung unterschieden werden [7][3][8]. Derartig hergestellte Sensorkavitäten weisen typischerweise sehr kleine Gehäusevolumina im Bereich $< 1 \text{ mm}^3$ auf, deshalb spricht man hier über Nano Liter Packages. Ausgasungseffekte der Oberflächen in der Sensorkavität während der Waferbondierung und während der Sensorlebensdauer verschlechtern das eingeschlossene Vakuum. Fortschrittliche Gehäusungskonzepte wie beim vorliegenden Drehratensensor integrieren einen breitbandigen Gasgetter, um den Druck in der Kavität über die Bauteillebensdauer zu stabilisieren, siehe Abbildung 1.2. Die Tabelle 1.1 zeigt die Anforderungen verschiedener Sensortypen hinsichtlich Hermetizität [9][10]:

Produkt	Vakuumverkappung	Hermetische Verkappung
Drucksensoren	ja (Absolutdruck)	ja (Differenzdruck)
Beschleunigungssensor	nein	ja
Resonator	ja	ja
Drehratensensor	ja	ja
Drehbeschleunigungssensor	ja	ja
Magnetfeldsensor	ja	ja
low end Transceiver	nein	ja
high-end Transmitter	nein	ggfs. (hängt vom Chip ab)
Mikrofluidik Chip	nein	möglicherweise ja

Tabelle 1.1. Hermetizitätsanforderungen verschiedener Mikrosystem Bauelemente und Systeme

Eine Einschränkung für die Vakuumverkappung von Mikrobauteilen auf Waferebene ergibt sich durch fehlende Qualifizierungsprozesse zur Bauteilelektrierung hinsichtlich der zu erwartenden Vakuumlebensdauer [11]. Insbesondere stand bisher für Mikrobauteile mit integriertem Getter kein automatisiert durchführbarer Lecktest auf Waferebene zur Überprüfung der Hermetizität mit auch nur ausreichender Empfindlichkeit (besser 10^{-15}

mbar · l /s) zur Verfügung [12]. Dabei sind an einen industriell einsetzbaren, idealen Lecktest für vakuumierte Mikrosensoren folgende Anforderungen zu stellen:

- unabhängig von Sensortyp
- unabhängig von der Verkappungstechnologie
- Nachweisempfindlichkeit besser 10^{-15} mbar · l /s Standard Luftleckrate
- Test im Waferverbund
- Einsetzbar für Nanoliter-Gehäuse
- Messergebnis unabhängig von Leckgeometrie und Leckanzahl
- Kompatibel mit integriertem Getter
- keine Beeinflussung oder Schädigung guter Bauteile
- Messergebnis nicht durch undichte Nachbarbauteile beeinflusst
- kein zusätzlicher Designaufwand oder Platzverbrauch durch spezielle Messstrukturen
- vernachlässigbarer Einfluss von Transferzeiten
- Mehrfachmessung möglich
- kurze Testzeit
- keine Zusatz- oder Verifizierungsmessung notwendig

Der Neon Ultra-Feinlecktest erfüllt alle diese Anforderungen bis auf die erste. Prinzipiell setzt der Neon Ultra-Feinlecktest eine resonant betreibbare Schwingerstruktur in der Sensorkavität voraus, weil der Test auf der Interaktion eines resonanten Schwingers mit der ihn umgebenden Atmosphäre beruht. Das Anwendungsspektrum beschränkt sich dadurch auf alle Sensoren mit resonantem Messprinzip oder resonant anregbare, kapazitiv auslesbare Sensoren, die in normaler Verwendung passiv betrieben werden. Die Messung in nicht-resonant angeregtem Schwingungsmodus ist prinzipiell nur mit großen Einschränkungen hinsichtlich der Messempfindlichkeit möglich. Membran-Drucksensoren mit Piezowiderständen und Mikrobolometer können mit dem Neon Ultra-Feinlecktest nur über den Umweg einer Membranverbiegung bzw. geänderter thermischer Isolation auf Hermetizität vermessen werden.

Der Neon Ultra-Feinlecktest kommt im Gegensatz zum Helium-Lecktest und zum Kr^{85} -Lecktest ohne einen zusätzlichen Grob-Lecktest zur Überprüfung und Einordnung des Testresultates aus. Die Bauelemente müssen deshalb nicht mehr in Lösungsmitteln ausgelagert und in Wasser erhitzt werden, um austretendes Lösungsmittel als Strom von Gasblasen nachzuweisen. Bei den sehr kleinen Bauteilgeometrien auf einem Wafer und den ungünstigen geometrischen Verhältnissen im Bereich der Siegelrahmen wäre die individuelle Zuordnung eines Blasenstromes zu einem Bauteil äußerst schwierig.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Die vorgelegte Arbeit befasst sich mit der Fragestellung wie die Vakuumerhaltung resonant betriebener Mikrosensoren mit kleinstem Aufwand sicher maximiert werden kann und gleichzeitig Frühausfälle durch Zunahme des Innendrucks im Feld absolut (0 ppm Philosophie) ausgeschlossen werden können.

Zur Lösung dieser Fragestellung führt die vorgelegte Ausarbeitung in die notwendigen technologischen und vakuumphysikalischen Hintergründe ein, soweit diese für das Verständnis des Vorgehens notwendig sind. Weitergehende Herleitungen und Zusammenhänge sind im Anhang dieser Arbeit zusammengefasst. Auf darüber hinausgehende Theorie wird verwiesen.

Das Kapitel 2 führt in die Gettertechnologie zur Kompensation von Gasballastquellen ein. Durch die Integration von Getterschichten ergeben sich einige Randbedingungen an das Lecktestverfahren, die für die Entwicklung und Durchführung des Neon Ultra-Feinlecktests ganz entscheidend waren.

Der Sensoraufbau und die eingesetzte eutektische Wafer-Verkappungstechnologie mit Edelgasrückfüllung wird in Kapitel 3 beschrieben. Verfügbare Gettertypen werden vorgestellt und die Anforderungen und das systematische Vorgehen zur erfolgreichen Prozessintegration eines ausgewählten Dünnschichtgetters werden aufgezeigt.

Das Kapitel 5 erklärt die physikalischen Grundlagen unterschiedlicher Leckpfade (Gasquellen) an einem typischen Mikrosensoraufbau und bewertet deren Relevanz. Die derzeit verfügbaren Lecktests mit ihren charakteristischen Eigenschaften werden kurz skizziert und es wird aufgezeigt warum höchste Messempfindlichkeiten für einen relevanten Lecktest gefordert werden müssen. Der Neon Ultra-Feinlecktest, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und zum weltweiten Patent angemeldet ist, wird vorgestellt und charakterisiert. Das zugehörige Konzept der maximal zulässigen (kritischen) Initialleckrate und die vakuumphysikalischen Grundlagen der Neon-Leitwertbestimmung zur Berechnung der äquivalenten Luft-Leckrate wird beschrieben. Ein darauf aufbauendes, universell parametrisierbares, computergestütztes Vakuum-Lebensdauermodell zur Berechnung der benötigten Auslagerungszeit für beliebige resonante Mikrosensoren in einer Neon-Überdruckatmosphäre wird vorgestellt und die Berechnungsergebnisse werden bewertet.

Die messtechnische Anwendung des Neon Ultra-Feinlecktests auf im ISIT prozessierte Wafer mit unterschiedlichen Sensordesigns wird in Kapitel 6 beschrieben. Hierbei wird das Verfahren zum Identifizieren undichter Sensoren nach dem Waferbonden, nach dem Transfermolden von Sensoren auf Leadframe und nach der beschleunigten Alterung sowohl auf Waferebene als auch in Prototyp-Keramikgehäusen eingesetzt. Die Ergebnisse werden aufbereitet dargestellt und diskutiert. Die Tauglichkeit des Verfahrens für den geplanten Einsatz wird bewertet.

In der *‘Zusammenfassung’* in Kapitel 7 werden die Eigenschaften des Neon Ultra-Feinlecktests zusammengestellt. Kapitel 7.3 enthält einen *‘Ausblick’* auf noch offene Fragestellungen. Die für die Arbeit wesentlichen *‘Thesen’* werden in Kapitel B.4 aufgeführt.

Im *‘Anhang’* folgt eine Beschreibung des Prozessablaufs zur Sensorherstellung, Waferreinigungsverfahren, Leitwertberechnung dünner Kapillaren im Bereich molekularer Strömung und die mathematische Beschreibung des Gütefaktors.

Den einzelnen (Teil-)Kapiteln sind jeweils kurze Zusammenfassungen vorangestellt.

2 Gettertechnologie

Eine Schlüsseltechnologie am Anfang des 20. Jahrhunderts war die elektronische Verstärkung. Als Lee De Forest 1907 seinen Vakuum-Röhrenverstärker demonstrierte war die Lebensdauer des Wolfram-Filaments durch die unkontrollierte Sauerstoff Aufnahme der Glasröhre stark begrenzt. Der technologische Durchbruch kam erst einige Jahre später durch die Integration von leicht oxidierbaren Metallen in die Röhre, die schneller als das Wolfram Filament oxidieren. Diese Sauerstoffbinder waren die ersten großtechnisch eingesetzten Getter. Unter Getter kann man allgemein Stoffe verstehen, die auf andere Substanzen anziehend oder bindend wirken. Ab 1994 sind erste Anwendungen von Getter in MST-Bauteilen publiziert [13] [14] [15]. Für diese ersten Anwendungen wurden vorgesehene NEG-Getter (Non Evaporable Getter) als Formteile in dafür vorgesehene Einbauplätze eingesetzt.

2.1 Gettertypen

Man kann Getter in verschiedene Klassen einteilen. Für hoch zuverlässige Elektronik und Mikrosystem-Bauteile sind die wichtigsten Klassen Getter für verschiedene Gase, Flüssigkeitsgetter und Partikelgetter. Unter den Gasen sind insbesondere Sauerstoff und Wasserstoff in hermetischen Gehäusen unerwünscht. Allen Flüssigkeiten voran muss flüssiges und gasförmiges Wasser, selbst unter Vakuumbedingungen, in Gehäusen durch Flüssigkeitsgetter gebunden werden. Diese Getter können je nach Zusammensetzung auch Schadgase wie Ammoniak, Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff binden. Partikelgetter wirken unspezifisch auf kleine Partikel unabhängig von deren Zusammensetzung.

Flüssigkeitsgetter

Der anfängliche nach dem Gehäuseverschluss noch zulässige Feuchtegehalt in hermetischen Gehäusen für Militär, Raumfahrt, Medizin und andere Anwendungen ist nach MIL STD 883 auf 5000 ppm beschränkt. Der Taupunkt der eingeschlossenen Atmosphäre beträgt damit $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beim Unterschreiten dieser Temperatur kondensiert das Wasser als Eisfilm mit sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit. Hierdurch werden Korrosionseffekte und Kurzschlüsse vermieden. Die nach MIL STD 883 noch zulässige Leckrate für Luft ist auf $10^{-8}\text{ mbar}\cdot\text{l/s}$ beschränkt, um das Eindringen von zu viel Wasserdampf im Verlauf der Bauteillebensdauer zu vermeiden. Für MST-Bauteile ist Feuchte besonders schädlich. Feuchte induziert ein Oberflächen Kontaktphänomen, das Haftung (Stiction) genannt wird. Haftung ist eine hohe Anziehungskraft zwischen zwei sich berührenden Oberflächen

die dazu führt, daß die Oberflächen aneinander kleben, oft permanent. Feuchte in mikrooptischen MST-Bauteilen kann zum Beschlagen von Spiegeln und Linsen führen und vergütete Oberflächen korrodieren.

Wasser tritt aber nicht nur durch Gehäuselecks ein sondern kann während des Gehäuseverschlusses eingeschlossen oder sogar gebildet werden oder aus Gehäusematerialien und Klebstoffen ausgasen. Der Einsatz von Gettern hilft die langfristige Zuverlässigkeit des Bauteils sicherzustellen. Flüssigkeitsgetter für Wasser halten über lange Zeiträume die Gehäuseatmosphäre trocken.

Flüssigkeitsgetter, hier speziell Feuchtegetter, enthalten starke Trocknungsmittel in einer Bindermatrix. Diese Trocknungsmittel können in zwei Klassen eingeteilt werden: physikalische Trockner und chemische Trockner.

Physikalische Trockner sind Materialien, die Wasserdampf über physikalische Reaktionen an ihre sehr großen spezifischen Oberflächen binden. Diese Reaktionen basieren auf sehr schwachen Bindungen, vorwiegend Van der Waals Anziehung. Typische Werte für die Bindungsenthalpie liegen im Bereich ≤ 10 kcal/mol. Molekulare Siebe sind typische physikalische Trockner. Der Porendurchmesser dieser Materialien zu denen z.B. Natrium und Kalziumaluminiumsilikate gehören, wird etwas größer als der Durchmesser eines Wassermoleküls eingestellt. Z.B. hat Zeolyt 4A einen Porendurchmesser von 4 Å, der sehr nah am Durchmesser von 3,2 Å vom Wassermolekül liegt [16]. Physikalische Trockner sind billig in der Herstellung und weisen eine hohe Aufnahmefähigkeit für Feuchte auf, die jedoch mit steigender Temperatur absinkt. Hierin besteht auch die wesentliche Einschränkung. Die Bindung wird schon bei relativ niedriger Temperatur um 85 °C aufgelöst und das gebundene Wasser wird als Wasserdampf entsprechend dem sich neu einstellenden Gleichgewichtsdruck abgegeben.

Chemische Trockner reagieren mit Wasser und bilden stabile chemische Verbindungen. Die Reaktionsprodukte sind im Betriebstemperaturbereich gewöhnlicher MST-Bauteile thermodynamisch stabil. Typische chemische Trockner sind Oxide der Elemente in Gruppe III der Periodentafel. Hierzu gehören vor allem Barium und Calciumoxide als die effektivsten. Diese Oxide reagieren mit Wasser entsprechend der Reaktion:



Hierbei kann M für Ba oder Ca stehen.

Die theoretische Kapazität für solche Oxide ist sehr hoch. CaO hat eine stöchiometrische Aufnahmekapazität für Wasser von rund 33 Gewichts %. Die effektive erreichbare Kapazität hängt jedoch stark vom Herstellungsprozess ab. Hierdurch werden Reinheit, Korngrößenverteilung und spezifische Oberfläche bestimmt.

Die Feststoffe sind als Pulver in Kunststofffilmen eingebettet und werden als gestanztes Formteil in Gehäuse eingelegt. Auch Klebstoffpasten mit Mineralfüller sind verfügbar [17]. Nach dem Dispensieren erfolgt eine Aushärtung der Paste. Feuchtegetter werden durch einen Temperprozess dehydriert und aktiviert.

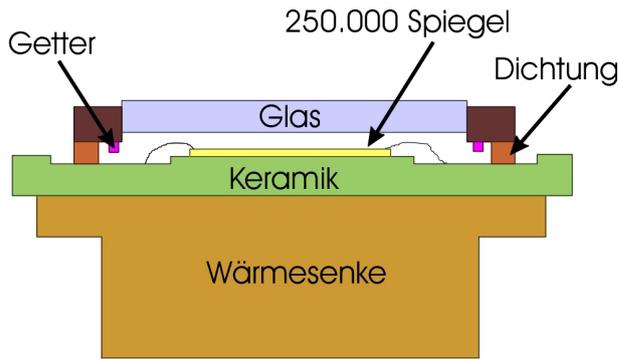


Abbildung 2.1. Gehäuse für Mikrospiegel mit Getter

Partikelgetter

Mikroskopische Partikel führen insbesondere bei Mikrobauteilen mit beweglichen Strukturen (Resonatoren, Spiegel, Schalter etc.) zu schwerwiegenden Funktionsstörungen. Partikel können durch unzureichend gereinigte Waferoberflächen während der Waferbondung im Gehäuseinneren eingeschlossen werden oder sie entstehen durch Reibung oder mechanische Überbelastung im Betrieb des Bauteils [18]. Insbesondere metallische Partikel im Bereich weniger Mikrometer sind bei Mikroresonatoren besonders schädlich. Sie können elektrische Kurzschlüsse verursachen, die Beweglichkeit einschränken oder die Resonanzfrequenz der beweglichen Struktur durch ihr Gewicht verschieben [19]. Partikelgetter sind Fangstrukturen, die im einfachsten Fall aus einem klebrigen Film bestehen können, aber auch elektrisch aufgeladene Flächen oder Labyrinthstrukturen sind denkbar. Klebefilme können mit mineralischem Füller ausgestattet gleichzeitig als Partikel- und Feuchtegetter arbeiten. Dieser Typ ist insbesondere für Mikrospiegelanwendungen ohne Vakuumanforderung sehr effektiv.

Getter für Gase

Prinzipiell sind für ein Bauteil alle eindringenden Gase schädlich, wenn dessen Funktion auf einer kontrollierten Vakuumatmosphäre beruht. Neben dem verursachten Druckanstieg können Gase jedoch auch andere Schädigungsmechanismen aktivieren. Für Gallium Arsenid-Bauteile ist eine langsame Wasserstoffdegradation der elektrischen Eigenschaften bekannt [17]. Molekularer Wasserstoff wird hierbei durch katalytisch wirkende Metallisierungen (z.B. Platin oder Palladiumkontaktmetallisierungen des Bauteils) in hochaktiven atomaren Wasserstoff gespalten, der das Bauteil vergiftet. Wasserstoff-Getter werden deshalb oft in hermetischen Gehäusen eingesetzt. Wasserstoff akkumuliert sich in hermetischen Gehäusen durch Freisetzung aus galvanischen Metallschichten, durch Ausgasung aus Hochfrequenz-Abschirmblechen und auch durch Freisetzung aus Klebstoffen. Katalytische Wasserstoffgetter können aus Palladiumoxid hergestellt werden. Dieses fördert die Reaktion von Wasserstoff zu Wasser, das über Feuchtegetter gebunden wird [20]. Ein anderer Gettermechanismus für Wasserstoff basiert auch auf der katalytischen Wirkung von Palladium und nutzt die hohe Löslichkeit von atomarem Wasserstoff in Palladium aus. An der Palladiumoberfläche physisorbierter molekularer Wasserstoff dissoziiert in atomaren Wasserstoff, der in das Atomgitter des Palladiumfilms diffundiert [21]. Der Palladiumfilm deckt einen Titanfilm ab und schützt ihn vor einer Passivierung durch die Reaktion mit atmosphärischen Gasen (Oxide, Carbide und Nitride). Sobald der Wasserstoff auf den Titanfilm trifft wird er als Titanhydrid chemisch gebunden.

Die in der Luft primär vorhandenen aktiven Gase wie Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid werden durch einen anderen Gettermechanismus gebunden. Die Passivierung auf der Oberfläche traditioneller Getter Systeme wird durch eine Temperaturbehandlung entfernt [22]. Dies kann z.B. eine Oberflächenoxidschicht sein, die während einer Temperaturbehandlung im Vakuum aufgelöst wird [10] [23]. Sobald z.B. Stickstoff an einer aktiven Stelle des aktivierten Getters physisorbiert wird findet eine chemische Bindung statt, die das Gas permanent bindet. Die Getterkapazität für diese Oberflächenbindung hängt von der effektiven, aktivierten Oberfläche des Getters ab. Herkömmlich wurden diese großen Oberflächen durch Sinterung von Metallpulvern erzeugt (z.B. Ti-Pulver gemischt mit Zr70V24.6Fe5.6-Pulver im Verhältnis 7:3 [24]). Die so hergestellten hochporösen Getter können als Dickschichten auf metallischem Träger (high porosity thick film getter (HPTF-Getter)) oder als geformte Volumenkörper ausgebildet sein [16]. Obwohl dieser Gettertyp über eine hohe Getterkapazität verfügt und schon im Bereich der Mikrobauteile eingesetzt wird, ist dessen Eignung durch seine Neigung zur Partikelemission begrenzt [19].

Kolumnar aufgewachsene Getterdünnschichten aus einer Zirkonium-Cobalt Legierung sind eine interessante Alternative. Diese Getter werden direkt in die Kavitätsvertiefungen des Kappenwafers aufgesputtert und gehören zu der Klasse der nicht aufdampfbaren Metalle; Non Evaporable Getter (NEG). Die Oberfläche des Getters passiviert sich durch Bildung einer dünnen Oxidschicht und gewährleistet eine Lagerfähigkeit behandelter Wafer von einigen Jahren in trockenem Stickstoff. Während der Waferbondung löst sich die Oxidschicht auf und der Sauerstoff wird im Gettervolumen gelöst [25]. Der in Abbildung 2.3 dargestellte Getter Dünnschicht wird ohne Verwendung von Argon gesputtert, um eine Einlagerung und späteres Ausgasen während des Gehäuseverschlusses zu vermeiden. Durch die Änderung der Sputterparameter während der Schichtaufbringung wird eine kompakte Startschicht von einigen 100 nm erzeugt, auf der ein ca. 3 μm dünner Getterfilm mit einer kolumnaren Kornstruktur aufwächst. Beide Schichten bestehen dabei aus dem gleichen Material. Die kolumnare Struktur vergrößert die effektive Oberfläche und erhöht damit sowohl die Getterkapazität und Absorptionsgeschwindigkeit. Als Nebeneffekt der Kornentkopplung stellt sich ein geringer mechanischer Stress in der Getterschicht ein, der sich auf einem geringen Niveau stabilisiert. Eine Verdopplung der Getterschichtdicke bewirkt kaum eine Zunahme des eingebrachten mechanischen Stresses.

Die Strukturierung des Getterfilms geschieht in diesem Fall schon bei der Abscheidung durch eine metallische Schattenmaske über dem Deckelwafer, siehe Abbildung 2.2.

2.2 Getter Auslegung

Die Optimierung der Gettereigenschaften auf den während der Lebensdauer eines Bauelementes anfallenden Gasballast muss sowohl die Gasquellen, Gasarten und den Betriebstemperaturbereich des Bauteils berücksichtigen.

Der sich in der Sensorkavität anhäufende Gasballast kommt aus vier wesentlichen Quellen:

1. Den während der Waferbondung in die Sensorkavität eingeschlossenen Umgebungsdruck,
2. Ausgasungen von den Oberflächen in der Sensorkavität,



Abbildung 2.2. Strukturiert abgeschiedener Getter-Dünnsfilm auf Kappenwafer

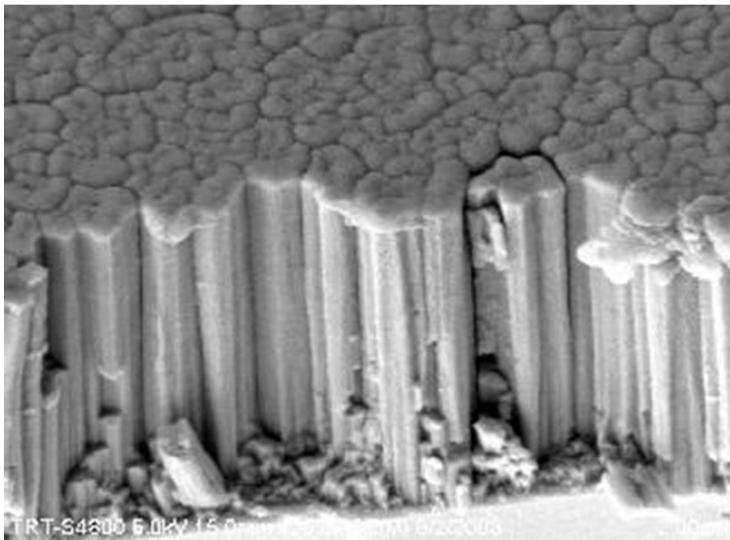


Abbildung 2.3. Kolumnare Kornstruktur eines PaGewafer-Dünnsfilmgetters der Fa. Saes Getters

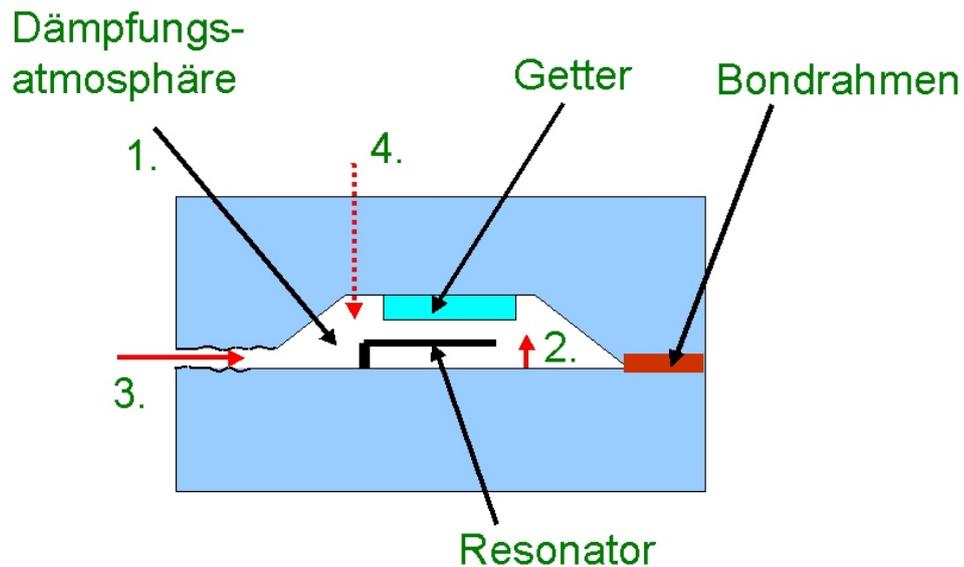


Abbildung 2.4. Gasquellen in Mikrosensoren

3. Gaseinströmung durch Kapillarlecks,
4. Permeation (Diffusion) durch Gehäusewandungen.

Abbildung 2.4 zeigt diese Quellen schematisch auf. Die Geschwindigkeit der Gasfreisetzung bzw. des Gaseindringens ist sehr unterschiedlich zwischen den aufgeführten Mechanismen. Die Permeation durch spezifische Konstruktionsmaterialien eines Mikrosensors ist primär für Helium wichtig und bei Raumtemperaturen ein sehr langsamer Effekt (Jahre bis Angleich an Helium Partialdruck in der Luft). Ausgasungseffekte von den Oberflächen sind ein Effekt der ersten Minuten, während der Peaktemperatur des Waferbondens. Der eingeschlossene Druck hängt stark vom Basisvakuum und der Gasrückfüllung ab. Für den schleichenden Vakuumverlust über Monate bis Jahre ist alleine der Gaseintritt durch Strömungslecks verantwortlich.

In Abbildung 2.5 ist exemplarisch der zeitliche Anstieg in einem evakuierten Gehäusevolumen von $V = 0,265 \text{ mm}^3$ aufgezeigt. Drei Fälle werden zum Vergleich unterschieden: das Gehäuse einmal ohne integrierten Getter, mit idealem Getter und mit realem Getter. Der ideale Getter hat eine so hohe Getterkapazität, dass niemals eine Sättigung bei der angenommenen Standard Luftleckrate von $1 \cdot 10^{-14} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ auftreten wird. Der reale Getter weist eine Getterkapazität von nur $2,86 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l}$ in jedem Gehäuse auf. Es wird zusätzlich angenommen, dass der Getter eine Vorsättigung von ca. 42 % erleidet, weil während des Wafer Verkappungsprozesses eine Rückbefüllung mit 4,5 mbar Stickstoff durchgeführt wird.

Das Gehäuse ohne Getter nimmt stetig Luft auf und der Innendruck gleicht sich nach über 1000 Jahren dem Luftdruck an. Mit einem integrierten Getter verzögert sich der Innendruckanstieg, weil alle aktiven Luftgase absorbiert werden, nur der eingedrungene Edelgasanteil der Luft führt zu einem Druckanstieg. Ein idealer Getter ohne Sättigungseffekt durch Aufnahme von aktiven Luftgasen begrenzt langfristig den Innendruckanstieg auf ca. 9,3 mbar (Summe aller Edelgaspartialdrücke), siehe Abbildung 2.6. Somit liegt der Innendruck um einen Faktor 100 niedriger als bei Gehäusen ohne Getter. Ein realer Getter zeigt jedoch eine maximale Aufnahmefähigkeit für Luftgase. Diese ist

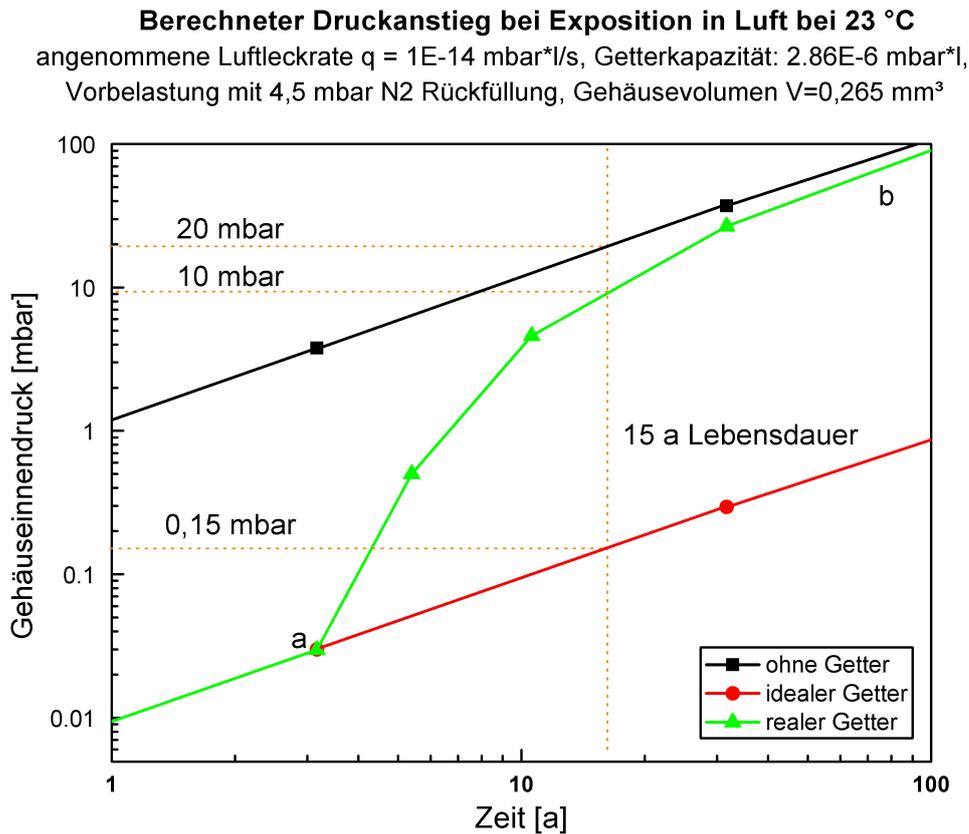


Abbildung 2.5. Zeitlicher Druckanstieg in einem evakuierten Gehäusevolumen $V = 0,265$ mm bei Realzeitalterung in Luft. Angenommen ist eine Standard Luftleckrate von $1 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s. Der Innendruck des Gehäuses gleicht sich nach über 1000 Jahren dem Luftdruck an. Mit einem integrierten Getter verzögert sich der Innendruckanstieg, weil alle aktiven Luftgase absorbiert werden, nur der eingedrungene Edelgasanteil der Luft führt zu einem Druckanstieg. Ein idealer Getter ohne Sättigungseffekt durch Aufnahme von aktiven Luftgasen begrenzt langfristig den Innendruckanstieg auf ca. 9,3 mbar (Summe aller Edelgaspartialdrücke). Ein realer Getter zeigt je nach Vorsättigung im Verkappingsprozess eine maximale Aufnahmefähigkeit für Luftgase. Ab diesem Punkt a) steigt der Innendruck stark an und nähert sich im Punkt b) asymptotisch der Druckzunahme ohne Getter an.

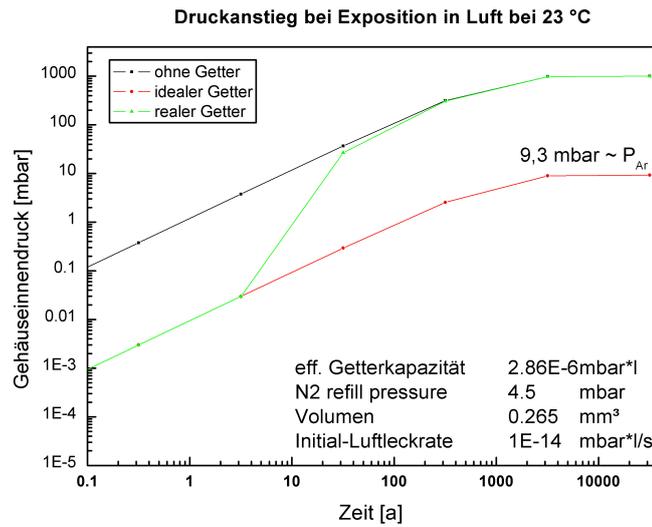


Abbildung 2.6. Der Vakuumverlust kann durch einen idealen Getter auf ca. 9,3 mbar begrenzt werden.

umso geringer je höher die Vorsättigung im Verkappungsprozess war und hängt natürlich auch noch von anderen Faktoren der Prozessierung ab: vollständige thermische Getter Aktivierung, Vorreinigung des Getters. Der reale Getter kann alle aktiven Luftgase absorbieren und der Innendruckanstieg ist durch den aufgenommenen Edelgasanteil der Luft bestimmt. Tritt eine Sättigung ein, so steigt der Innendruck stark an und nähert sich asymptotisch der Druckzunahme ohne Getter an. Eine genaue Berechnung des zeitlichen Druckanstiegs muss den Übergang der Gastransportmechanismen von molekularer Strömung zu viskoser Strömung berücksichtigen. Dies ist hier für das erklärende Schaubild nicht gemacht worden. Diese Vereinfachung wirkt sich insbesondere auf den Bereich für Innendrucke über 1 mbar aus.

Für die Getterauslegung kann man aus der Abbildung 2.5 einige Punkte lernen. Eine gewünschte Vakuum-Lebensdauer eines exemplarischen Bauelementes von 15 Jahren sei dadurch definiert, dass nach dieser Zeit der Innendruck immer noch auf 1 mbar begrenzt sein muss. Mit den oben erklärten Parametern ergibt sich jedoch eine Lebensdauer von nur ca. 6 Jahren. Nach 15 Jahren hat sich der Innendruck auf 10 mbar erhöht und liegt nur um einen Faktor 10 niedriger als beim Gehäuse ohne Getter.

Als Ausweg kann die Gettervorsättigung reduziert werden, wodurch sich der Punkt a entlang der Geraden für den Innendruckanstieg mit idealem Getter verschiebt. Eine Erhöhung der Getterkapazität kann eventuell auch (designabhängig) durch Vergrößerung der Getterfläche erfolgen. Verdoppelt man das Gehäuseinnenvolumen, z.B. durch eine tiefer geätzte Kavität, so verdoppelt sich auch die Vakuum-Lebensdauer. Ohne Design oder Prozessänderungen kann die Vakuumlebensdauer auch erhöht werden, jedoch auf Kosten der Ausbeute. Das Leckratenkriterium im Neon-Ultra Feinlecktest als Screen muss entsprechend niedriger angesetzt werden.

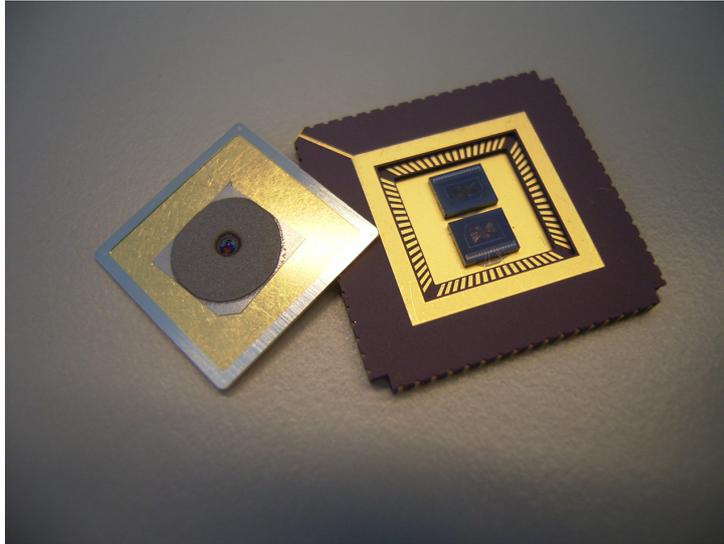


Abbildung 2.7. Keramikgehäuse mit Dickschichtgetter

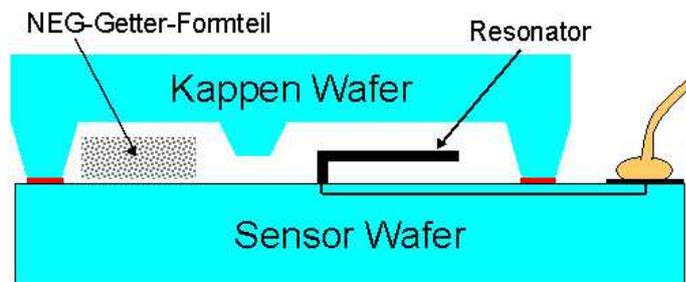


Abbildung 2.8. Siliziumgehäuse mit seitlich angeordnetem NEG-Getter in der Kappe.

2.3 Getter Integration

Die Einbringung von Gettern in mikrotechnische Bauteile kann auf unterschiedliche Art erfolgen. In den Anfängen der miniaturisierten Vakuum Gehäuseung wurden poröse Getter Formteile in speziell dafür vorgesehene Gehäusehohlräume der Keramikgehäuse eingebracht, siehe Abbildung 2.7. Die seitliche Anordnung vergrößert das Bauteil. Als Weiterentwicklung wurden Metallträgerfilme mit gesinterten Getterschichten in den Gehäusedeckel eingeschweißt oder gleich als Dickschicht in den Gehäusedeckel gedruckt und mit diesem versintert. Die vertikale Anordnung spart Platz, eventuell entstehende Partikel fallen jedoch direkt auf die empfindliche Bauteilstruktur. Die Getteraktivierung erfolgt in beiden Fällen in der Regel nach dem hermetischen Gehäuseverschluss durch Temperung in einem Ofen.

Nach Einführung der Bauteilverkappung auf Wafer Ebene wurden in den Anfängen Getter als NEG-Formteil in dafür vorgehaltene Kavitäten eingelegt, die sich seitlich vom Resonator befinden und mit diesem durch Kanäle verbunden sind, siehe Abbildung 2.8. Erst die Entwicklung des strukturiert abscheidbaren Dünnschichtgetters direkt in Vertiefungen des Kappenwafers macht Vakuumgehäuse auf Wafer Ebene mit Kavitätäsvolumen im Bereich einiger Nanoliter möglich, siehe Abbildung 2.9.

Die Integration eines Getters in einen Vakuum-Waferbondprozess zur Herstellung von

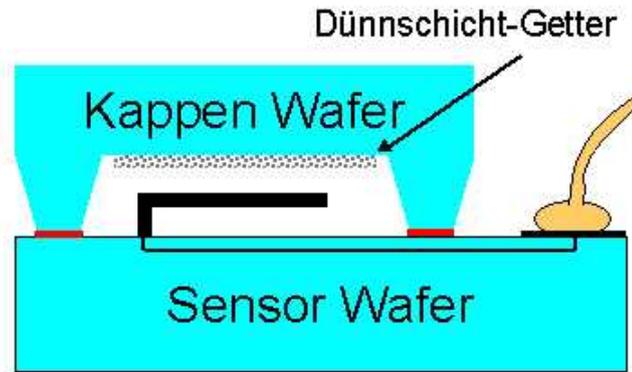


Abbildung 2.9. Siliziumgehäuse mit vertikal angeordnetem Dünnschicht-Getter in der Kappe.

Mikrobauteilen stellt hohe Anforderungen an den Getter:

- Getter verhält sich bei Lagerung und Waferhandling passiv,
- vernachlässigbarer zusätzlich eingebrachter Stress,
- Abscheidungsprozess erfolgt bei moderater Temperatur,
- Getterstrukturierung beeinflusst nicht den Kappenwaferprozess hinsichtlich Metallauswahl und Tiefe der Kavitäten,
- Getter muss exzellent haften und darf keine Partikel emittieren,
- charakteristische Eigenschaften des Getters dürfen sich nicht durch Waferreinigung negativ verändern,
- Getter darf während der Waferbondung kein Edelgas abgeben,
- Getter Aktivierungstemperatur sollte nicht über der Fügetemperatur liegen und der Aktivierungsprozess zeitlich nicht zu lange dauern,
- ein idealer Getter sollte nicht schon durch Ausgasungen während der Waferbondierung gesättigt werden,
- das gebundene Gas darf nicht bei üblichen Betriebstemperaturen des Bauteils wieder freigesetzt werden.

2.4 Einfluss der Getterintegration auf Lecktest

Für den Lecktest mikrotechnischer Bauteile ergeben sich durch die Getterintegration Einschränkungen. Prinzipiell muss ein Testgas ausgewählt werden, das sich in der Sensorkavität ansammelt und zu einer Druckzunahme in undichten Bauteilen führt. Gase, die vom Getter absorbiert werden, führen erst nach erfolgter Getterstättigung zu einem messbaren Druckanstieg. Für einen breitbandigen, metallischen Gasgetter fallen damit mögliche Testgase wie Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid aus.

Es bleiben nur Edelgase und bestimmte Kohlenwasserstoffe (z.B. Methan) übrig. Vorzugsweise wird ein Testgas mit möglichst kleiner Molekularmasse eingesetzt, um kurze Testzeiten bei Raumtemperatur zu ermöglichen. Die notwendigen Testzeiten bei Einsatz schwerer Testgase können durch erhöhte Gastemperatur beim Lecktest teilweise ausgeglichen werden, wodurch gleichzeitig Ausgasungseffekte z.B. von Argon aus gesputterten Metallschichten zu überhöhten Leckratenmessungen führen können. Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen birgt die Gefahr, dass Gas in minimal undichte Sensorkavitäten eindringt und dort bei Prozessen mit höherer Prozesstemperatur (Plastikumspritzung bei 175 °C, Bauteillötung bei 265 °C) vom Getter katalytisch zu Wasser, Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgesetzt wird. Die entstehenden Gase können vom Getter absorbiert werden, jedoch verschiebt sich der eingestellte Kalibrierpunkt des Sensors bezogen auf die Resonator-dämpfung. Obwohl diese Bauteile nur akzeptable Lecks aufweisen, werden sie im Feldeinsatz durch elektrische Fehlfunktion zu Frühausfällen und Rückrufen führen.

Für Mikrosensoren mit integriertem Getter bleiben demnach nur Edelgase als mögliche Testgase übrig. Von diesen sind die leichten Gase wie Helium, Neon und Argon für die Verwendung als Testgas prädestiniert.

3 Vakuum Wafer Bondtechnologie

Zur Qualitätsbewertung der am Fraunhofer ISIT entwickelten resonanten Mikrosensoren auf Basis des so genannten Bosch-Prozesses wurde ein hochauflösender Lecktest zur Überprüfung des hermetischen Gehäuseverschlusses auf Waferebene benötigt. Nachfolgend wird die Vakuumverkappung von Mikrosensoren auf Waferebene mit allen etablierten Technologien erklärt und die am ISIT industrialisierte eutektische AuSi-Bondierung mit integriertem Getter und Gasrückbefüllung zur Einstellung einer definierten Resonatorbedämpfung im Detail erläutert.

3.1 Bauteilverkappung auf Waferebene

Nicht nur wirtschaftliche Aspekte machen eine Verbindungstechnik auf Waferebene sinnvoll. Zum Schutz vor Beschädigung durch den Sägeprozess ist es erforderlich, die Sensoren auf diese Weise zu verpacken und so ein Vakuum herzustellen. Die nach dem Gasphasenätzen entstehenden Strukturen sind sehr empfindlich und würden ungeschützt einen Sägeprozess nicht überstehen. Durch das Wafer Level Packaging (WLP) können alle Sensoren auf einem Wafer gleichzeitig hermetisch verschlossen und so vor Wasser und Partikeln geschützt werden. Im Folgenden wird die Bezeichnung Bonden in Anlehnung an den englischen Sprachgebrauch für Verbinden oder Fügen synonym verwendet.

Typisierung der Wafer Bondtechnologien

Die Gehäusungstechnologien für Mikrosensoren und -aktuatoren können nach dem Integrationsgrad, mit dem die Gehäusung durchgeführt wird, klassifiziert werden, siehe Abbildung 3.1 [12]:

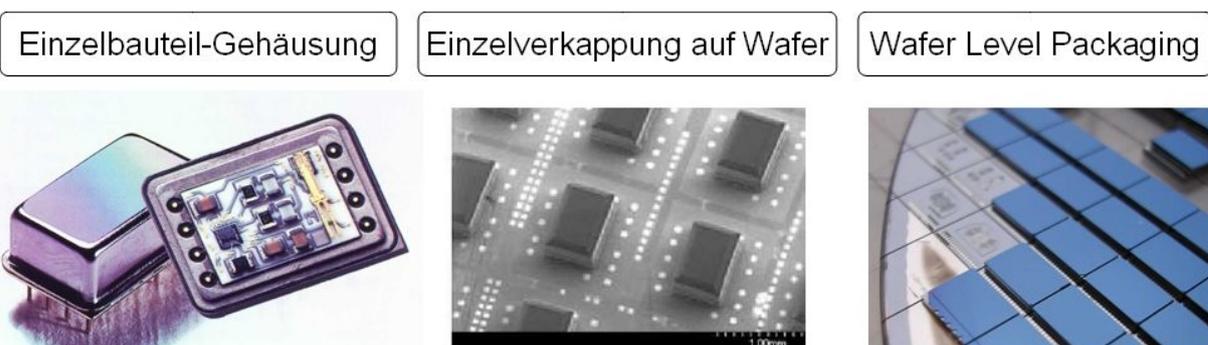


Abbildung 3.1. Klassifizierung von hermetischen Verkappungstechnologien

Auch für den hermetischen Gehäuseverschluss von Mikrosensoren mit eingeschlossenem Vakuum stehen unterschiedliche Verfahren zur Auswahl, siehe Abbildung 3.2 [3]:

Die verfügbaren Wafer Bondtechnologien kann man grob in zwei Klassen einteilen. Technologien mit Verwendung von Zwischenschichten oder ohne, siehe Abbildung 3.3.

Das Waferbonden allein ist nicht grundsätzlich neu, es gibt mehrere Verfahren zum Verbinden zweier Wafer. Die Wahl des geeigneten Verbindungsverfahrens wird von verschiedenen Anforderungen beeinflusst [26] :

- Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen
- angepasste Wärmeausdehnung
- Materialkombination
- erforderliche Festigkeit der Waferverbindung
- Hermetizität
- Vakuumtauglichkeit
- Langzeitzuverlässigkeit
- geringe Ankopplung externer mechanischer Spannungen auf den Sensorchip
- Übertragung unterschiedlicher elektrischer Spannungen bei niedriger ohmscher Übergangsimpedanz
- Vermeidung parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten
- Toleranz gegenüber hohen Prozesstemperaturen
- Prozessintegration von Getterschichten

Im Folgenden sollen kurz die heute verfügbaren WLP-Verfahren vorgestellt werden.

Anodische Verbindung

Das anodische Bonden (anodic bonding) von einem Glaswafer auf einen Siliziumwafer ist heutzutage eine häufig eingesetzte Verbindungsart, durch die die Wafer fest und langzeitstabil verbunden werden.

Voraussetzung für das Verfahren ist zum einen, dass die verwendeten Glas- und Siliziumwafer nahezu gleiche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen, da ansonsten Spannungen zum Waferbruch führen könnten. Zum anderen muss das verwendete Glassubstrat einen hohen Anteil an Alkaliionen (z.B. Na) aufweisen. Das am häufigsten verwendete Glas ist Pyrex-7740 [26], welches einen ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 3,3 \cdot 10^{-6}/K$) wie Silizium hat.

Durch ein angelegtes elektrisches Gleichspannungsfeld (50-1000V) und Erwärmung der Wafer auf Temperaturen von 200° - 500°C diffundieren die Na⁺-Ionen zur gaseitigen Kathode und die O²⁻-Ionen zur Grenzfläche Si/Glas (Abb. 3.4). Dadurch entsteht eine

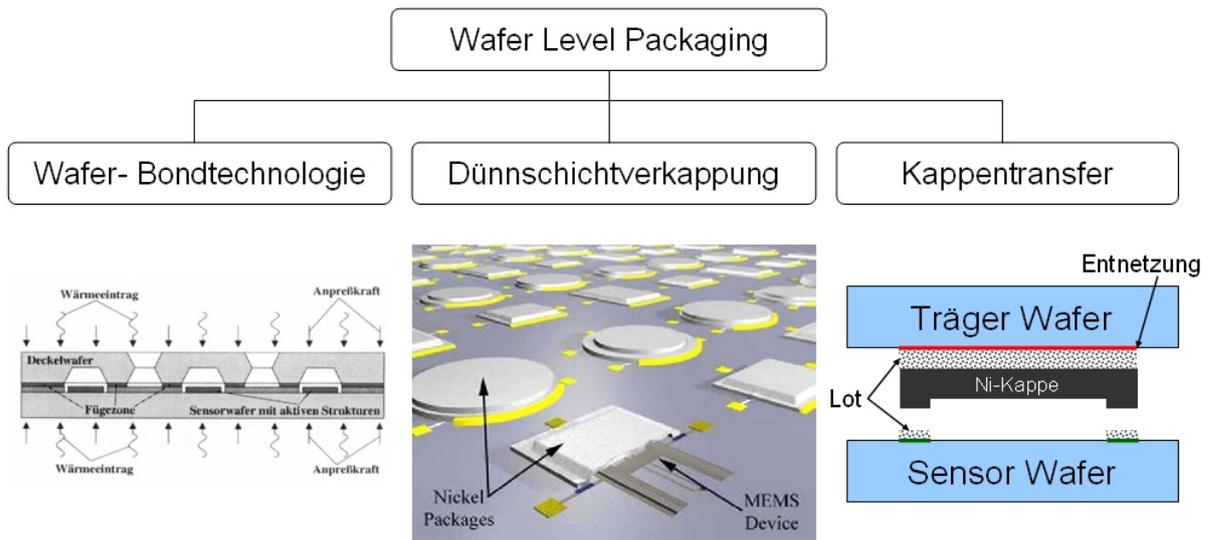


Abbildung 3.2. Klassifizierung von Vakuum-Verkappungstechnolgien auf Waferebene

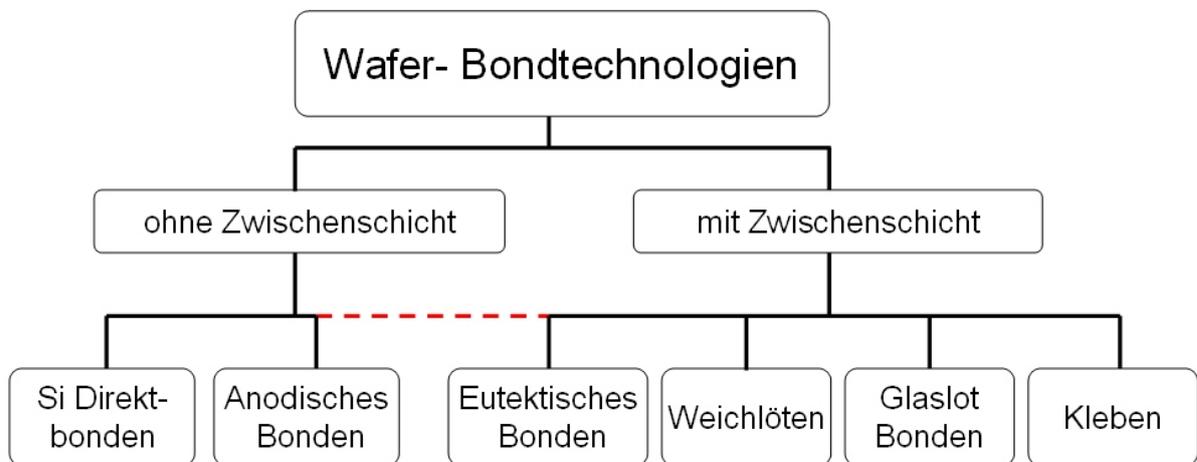


Abbildung 3.3. Übersicht Wafer Bondtechnologien mit und ohne Zwischenschicht

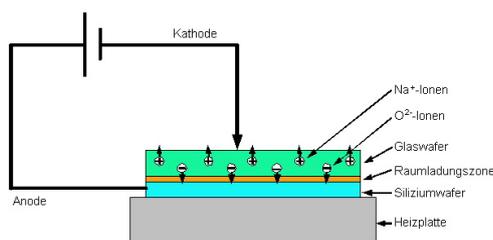


Abbildung 3.4. Prinzip einer anodischen Verbindung

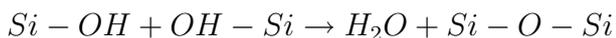
Raumladungszone, die für ein starkes elektrisches Feld zwischen dem Glaswafer und Siliziumwafer sorgt und damit einen starken Kontakt zwischen den Bindungspartnern herstellt. Da der Sauerstoff des Glases zum Silizium diffundiert, entsteht auf der Siliziumoberfläche eine SiO₂-Schicht, die eine chemische Bindung zwischen den beiden Wafers ausbildet.

Ein Nachteil der Methode hinsichtlich der Vakuumverpackung ist, dass durch die Abgabe des Sauerstoffs durch das Glas nur mäßig niedrige Drücke zu erreichen sind.

Si-Si Direktverbindung

Die Direktverbindung zweier Siliziumsubstrate (auch Fusion Bonding) stellt hohe Anforderung an die Oberflächenbeschaffenheit und Ebenheit der verwendeten Wafer, da die Oberflächen in sehr engen Kontakt gebracht werden müssen. Durch bestimmte Reinigungsschritte wird die Eigenschaft der Waferoberflächen beeinflusst. Werden die Wafer einem oxidierenden Reinigungsschritt ausgesetzt, z.B. Piranha oder SC1/SC2, bildet sich natürliches Oxid aus und die Oberfläche wird hydrophil. Im Gegensatz dazu wird die Oberfläche hydrophobiert, indem das natürliche Oxid entfernt wird, z.B. durch eine Behandlung der Wafer in Flusssäure. Hydrophile Oberflächen bilden hauptsächlich OH - Bindungen aus, hydrophobe Oberflächen sind durch Si-H bzw. Si-CH_x Bindungen terminiert.

Bis heute ist der Verbindungsmechanismus der Direktverbindung nicht vollständig aufgeklärt. Es wird aber angenommen, dass er auf der Polymerisation von Silanolverbindungen zu Siloxannetzwerken beruht [143]. Bei Raumtemperatur wird eine Verbindung der Wafer durch Silanole geformt. Die Verbindung, die durch in Kontaktbringen der beiden Wafer entsteht, kann durch eine nachträgliche Temperung über 300°C [147], bei der die Wafer aneinander gepresst werden, zusätzlich gefestigt werden. Werden die Wafer jedoch bei Temperaturen höher als 800°C getempert, kommt es zur der Ausbildung von Si-O-Si Bindungen:



Dabei steigt die Festigkeit ein weiteres Mal an, wobei die typische Bindungsfestigkeit bei ca. 20 MPa liegt [143].

Nachteilig an dieser Verbindungsmethode ist Folgendes:

- es sind sehr glatte Oberflächen (Rauigkeit kleiner 1 nm) erforderlich
- bei der Ausbildung der Verbindung wird H₂O und H₂ in die Kavität abgegeben
- es sind hohe Prozesstemperaturen erforderlich

Glaslotverbindung

Bei Glaslotverbindungen (glass frit bonding) wird die niedrige Erweichungstemperatur bestimmter Gläser, die z.B. PbO oder ZnOB₂O₃ enthalten, ausgenutzt. Die Erweichungstemperaturen liegen dabei im Bereich zwischen 400 und 650°C [26]. Diese Gläser werden mit unterschiedlichen Verfahren (Aufputtern, Sintern einer mit Glaspulver versetzten

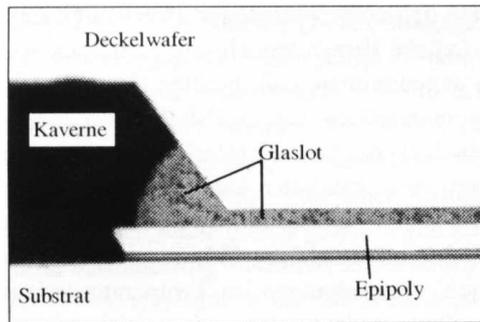


Abbildung 3.5. Querschnitt einer Glasfritt Bondierung

organischen Trägersubstanz) auf eines der zu verbindenden Substrate gebracht, wobei Schichtdicken im Bereich von 10 bis 20 μm verwendet werden. Die zu verbindenden Wafer werden aufeinandergepresst und auf die zum Aufschmelzen des Glases notwendige Temperatur gebracht.

Die Festigkeitswerte dieser Verbindungen liegen im Bereich 2-4 MPa [26]. Nachteilig an dieser Verbindungsmethode ist der relativ hohe Platzbedarf, weil die Glasrahmen durch das unkontrollierte Fließen des Glases in der Regel Breiten von ca. 500 μm oder mehr nach der Bondierung aufweisen, siehe Abbildung 3.5. Allerdings wird diese Methode heutzutage am häufigsten für die Vakuumverpackung verwendet, da beim Verbindungsprozess bei optimal vorprozessierten Kappenwafern wenig Gas generiert wird (s. Kap. 3.1) und so relativ niedrige Drücke von 1-5 mbar innerhalb der Kavitäten erreicht werden können [152][139].

Eutektische Verbindung

Beim eutektischen Bonden erfolgt die eigentliche Verbindung durch ein Eutektikum. Ein Eutektikum stellt einen Mikrogefügebestandteil dar, der dadurch gebildet wird, dass sich zwei oder mehrere feste Phasen gleichzeitig und bei konstanter Temperatur aus einer einzigen, einheitlich flüssigen Phase ausscheiden. Diese zwei oder mehrere Bestandteile sind im festen Zustand völlig unlöslich. Der eutektische Punkt ist der Punkt, bei dem das Mischungsverhältnis der Komponenten gerade so ausgebildet ist, dass direkt aus der Schmelze beide Bestandteile erstarren. Dieser Punkt liegt aufgrund von Kristallisationsbehinderungen niedriger als der Schmelzpunkt der jeweiligen Legierungsbestandteile. Liegen nichteutektische Mischungsverhältnisse in der Schmelze vor, so erstarrt zunächst der eine Bestandteil (während er noch von der Schmelze umgeben ist), der in höherer Konzentration vorhanden ist als für die eutektische Mischung erforderlich ist, siehe Abbildung. Durch diese Erstarrung reduziert sich die Konzentration des einen Bestandteils in der Schmelze, so dass sich die Konzentration der Restschmelze zunehmend der des eutektischen Punktes annähert. Schließlich erstarrt der Schmelzerest bei der Schmelztemperatur des Eutektikums, siehe Abbildung 3.6. Beim eutektischen Bonden wird also die Eigenschaft von Fügepartnern verwendet, ein Eutektikum zu bilden, welches einen niedrigeren Schmelzpunkt als die beteiligten Fügepartner selbst besitzt.

Die Verwendung einer eutektischen Verbindung auf Waferebene erfordert die Kompatibilität der Fügepartner bzw. der aufzubringenden Schichten und eine Eignung des Sensors bei der erforderlichen Füge­temperatur. Die praktischen Füge­temperaturen liegen einige zehn Grad über der jeweiligen eutektischen Temperatur.

Das eutektische Waferbonden basiert im großtechnischen Einsatz primär auf zwei unterschiedlichen Gold-Legierungen: Au93Si3 mit einer Liquidustemperatur $T_L = 363\text{ °C}$ und

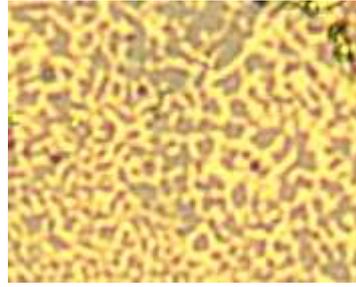


Abbildung 3.6. Aufsicht auf Bruchfläche einer eutektischen AuSi-Bondierung mit Siliziumausscheidungen

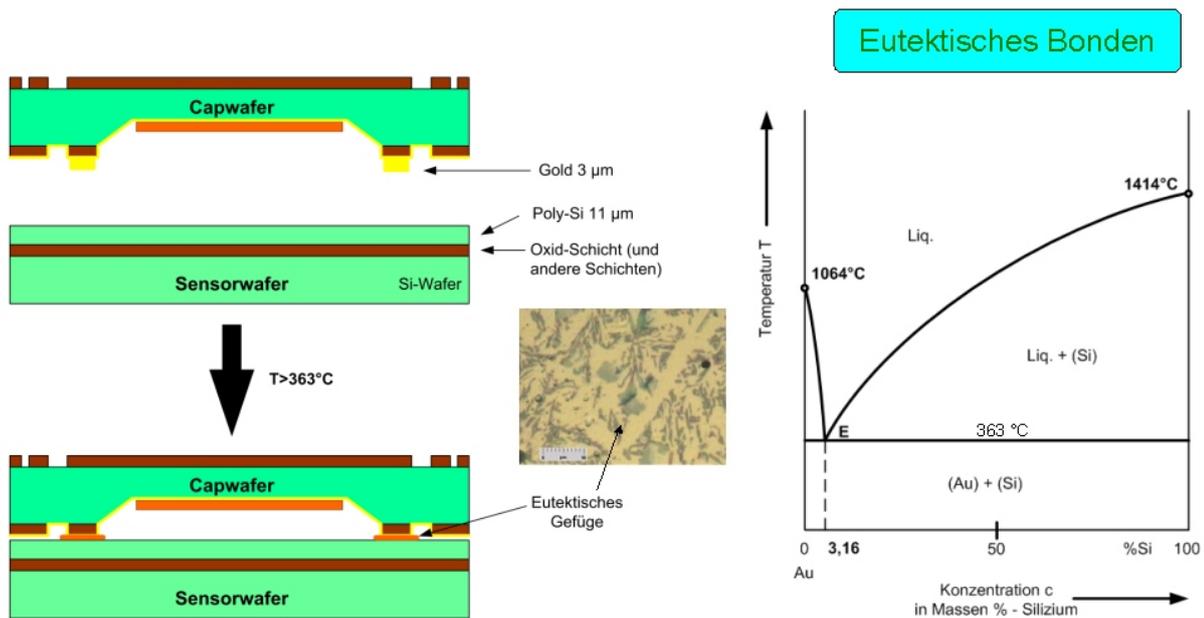


Abbildung 3.7. Phasendiagramm des Au-Si Systems: den 18,6 Atom % Si im AuSi-Eutektikum entsprechen 3 Gewichts % gelöstem Silizium

Au₈₀Sn₂₀ mit einer Liquidustemperatur bei 280 °C. Es sind noch weitere eutektische Verbindungen bekannt, wie z.B. Pd-Si und Al-Au. Diese Verbindungen haben aber wegen ihrer vergleichsweise hohen Liquidustemperaturen weit über 450 °C keine Bedeutung für den Gehäuseverschluss von Mikrosensoren auf Wafer Ebene. Eutektische Verbindungen sind üblicherweise thermisch und chemisch beständig und weisen eine hohe mechanische Festigkeit auf. Die benötigten Metallschichten werden entweder als Schichtsystem oder als Einzelschichten (jeweils mit Haftvermittler, z.B. Ti, Cr, W, Ta) auf die Wafer abgeschieden und als Bondrahmen strukturiert. Während der Waferfügung bildet sich die niedrighmelzende eutektische Legierung durch Diffusion von Si bzw. Sn in die Goldschicht, siehe Abbildung 3.7.

Das Eutektikum ist auf Füge­temperatur schmelzflüssig und wird in der Regel durch die hohen Bondkräfte aus der Fügezone gequetscht. Die Benetzungskontrolle für das austretende Eutektikum erschwert die Prozessführung. Die Verwendung des AuSi-Eutektikums zur Verkappung von Oberflächenmikromechnik-Sensoren hat den Vorteil, dass auf der Sensorseite nur Silizium benötigt wird und keine zusätzliche Ringmetallisierung. Die AuSi-Waferbondierung wird bei ca. 400 °C durchgeführt. Nachteilig ist der relativ hohe Wärmeausdehnungskoeffizient von $12,3 \cdot 10^{-6}/K$ im Vergleich zu dem von Silizium

($2,3 \cdot 10^{-6}/K$). Die Fehlanpassung verursacht intrinsische Spannungen bei Betriebstemperatur und kann einen starken Temperaturgang des Ausgangssignals bedingen und zum Versagen der Bondverbindung führen. Die eutektische AuSn-Waferbondierung kann bei einer Fügetemperatur von ca. 300 °C durchgeführt werden und verursacht aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Erstarrungstemperatur und Betriebstemperatur niedrigere intrinsische Spannungen. Die Prozessintegration der AuSn-Metallisierung wirft jedoch große Probleme auf, weil beide Wafer metallisiert werden müssen. Die metallische Versiegelung ist tolerant gegenüber Oberflächentopographie, Kratzern und Partikeln. Die hohe mechanische Festigkeit im Bereich um 100 MPa erlaubt schmale Rahmenstrukturen und hohe Sensorausbeuten auf dem Wafer. Sofern die Bondringmetallisierung nicht gesputtert wird, ist die Vakuumeignung dieser Verbindungstechnik außerordentlich gut [88].

Kappenklebung

Das Aufkleben des Kappenwafers ist ein einfaches Verfahren zur permanenten Versiegelung von Mikrosensoren. Hierbei kommen ausgewählte siebdruckbare oder fotostrukturierbare Polymere als Zwischenschicht zum Einsatz. Neben Epoxyden wird Polyimid und auch Benzocyclobuthen (BCB) eingesetzt. Mit einer Klebverbindung kann kein Vakuum dauerhaft eingeschlossen werden, jedoch können Verbindungen mit ausreichender Festigkeit und guter Langzeitstabilität in feuchter Wärme erreicht werden [105].

Kappentransfer

Bei der Kappentransfer-Versiegelung werden vorgeformte Einzelkappen auf den ungesägten Sensorwafer aufgesetzt und mit einem der zuvor beschriebenen Verfahren gefügt [134][43][105]. Vorzugsweise werden gleichzeitig alle Sensoren auf einem Wafer in einem Schritt verkappert. Das Verfahren erlaubt das Einschließen einer Vakuumatmosphäre und kann Vorteile hinsichtlich mechanischem Stress haben, wenn z.B. metallische oder keramische Kappen mit großer thermomechanischer Fehlanpassung eingesetzt werden müssen [48].

Dünnschichtverkappung

Mittels Dünnschichtverkappung können extrem flache, hermetisch versiegelte Mikrosensoren realisiert werden. Im erweiterten Oberflächenmikromechnik-Herstellungsprozess wird eine Opferschicht auf die bereits vorstrukturierte Silizium-Resonatorstruktur abgeschieden. Die Opferschicht besteht aus einem Material, das nachfolgend selektiv entfernt werden kann. Sowohl SiO₂ als auch Kupfer oder ausgewählte Polymere kommen zum Einsatz. Vor der Strukturierung der Opferschicht wird diese mit einer Dünnschicht aus Poly-Silizium, Metall oder einer Polymer/Metall-Doppelschicht überlappend abgedeckt. Durch Öffnungen in dieser Abdeckschicht wird die Opferschicht chemisch entfernt. Hierdurch entsteht eine freie Sensorkavität, in der sich die Resonatorstruktur frei bewegen kann. Die Kavität kann nachfolgend durch Sputter- oder CVD-Abscheidung einer zusätzlichen Schicht hermetisch verschlossen werden, siehe Abbildung 3.8. Der Arbeitsgasdruck während der Schichtabscheidung bestimmt den erreichbaren Unterdruck in der Sensorkavität [127] [108]. Die

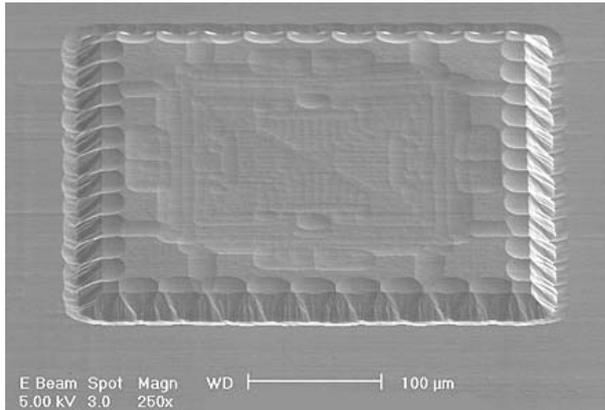


Abbildung 3.8. Beispiel einer Dünnschichtverkappung

reaktive Versiegelung ist eine weitere Alternative. Z.B. führt eine thermische Oxidation des die Öffnungen begrenzenden Siliziums zum Verschluss der Kavität [65].

3.2 Der eutektische AuSi Verbindungsprozess im ISIT

Die Bauteilverkappung mit einem metallischen Verbindungsprozess der Wafer bietet einige Vorteile. Im Vergleich zum Glasfritt-Bonden kann mit einer geringeren Ausgasung, schmalen Bondrahmen und einer elektrisch direkt ankontaktierten Kappe gerechnet werden. Beim Einsatz ausreichend hochschmelzender Legierungen besteht außerdem keine Gefahr eines Festigkeits- und Vakuumverlustes bei nachfolgenden Heißprozessen wie z.B. einer Bauteillötung bei 265 °C. Speziell die eutektische AuSi-Fügeverbindung mit einer Prozessstemperatur bei 400 °C und einer Aufschmelztemperatur bei 363 °C eignet sich gut für diese Anwendung.

Die eutektische AuSi-Fügeverbindung kann in vier separate Prozessphasen eingeteilt werden. In einer ersten Phase werden die Wafer in einer evakuierten Prozesskammer auf eine Temperatur von etwa 250 °C erhitzt und ca. 15 min auf Temperatur gehalten (Desorptionsphase), dabei sollen die an den Waferoberflächen adsorbierten Gase entfernt werden, ohne dass der Getter schon aktiviert ist und vorgesättigt wird. In dieser ersten Phase werden die beiden Wafer durch Abstandhalter um ca. 180 μm voneinander getrennt gehalten (Abb.3.9). Der obere Heizer ist vom Deckelwafer ca. 1 cm entfernt.

In der darauffolgenden Aktivierungsphase wird der Getter bei erhöhter Temperatur aktiviert. Hierzu werden die Wafer miteinander verbunden. Dazu werden die Abstandhalter (Spacer) herausgezogen und der obere Heizer auf den Deckelwafer gefahren. Die Wafer werden unter einem Anpressdruck von ca. 2000 N aufeinander gepresst und auf eine Temperatur von 350 °C gebracht, gerade so dass die eutektische Temperatur bei 363 °C nicht erreicht wird. Während einer definierten Haltezeit im Bereich von ca. 30-100 Minuten wird der Getter aktiviert. Danach wird die Temperatur auf 400 °C gesteigert. In der Eutektikum-Bildungsphase bildet sich innerhalb weniger Minuten ein schmelzflüssiges AuSi-Eutektikum, das unter dem hohen Druck aus der Fügezone gedrückt wird und den metallisierten Deckelwafer benetzt. Zuletzt werden die Wafer in einem Abkühlungsschritt auf 200 °C abgekühlt (Abkühlungsphase). Abbildung 3.10 zeigt ein typisches Temperaturprofil einer eutektischen Bondverbindung mit einer Getteraktivierung bei 350 °C.

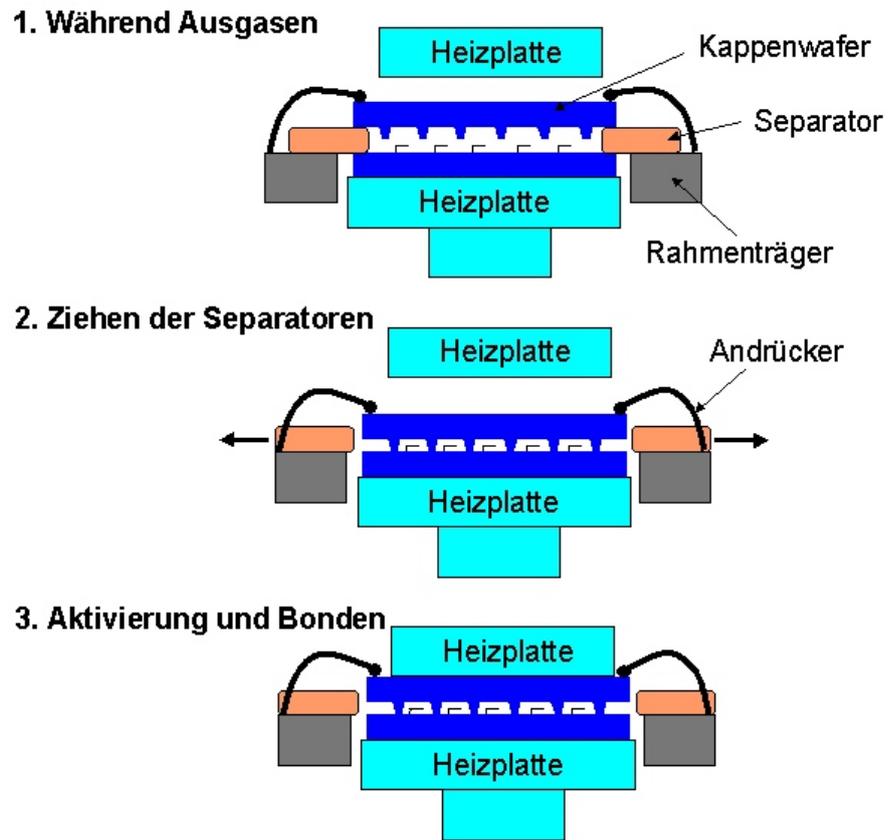


Abbildung 3.9. Die verschiedenen Heizplattenanordnungen während des Verbindungsprozesses

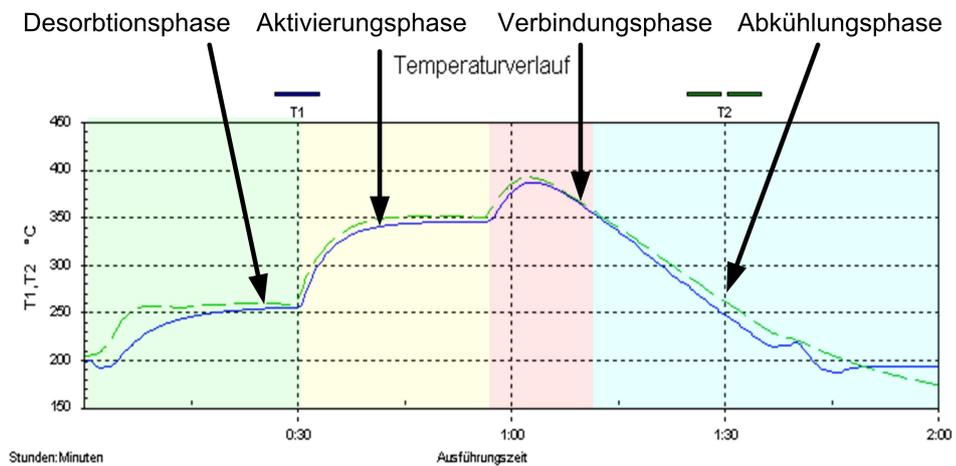


Abbildung 3.10. Temperaturverlauf während der Waferbondung mit Getteraktivierung

Vakuumerzeugung und Einstellung des Innendrucks

Vorversuche

In ersten Versuchen kam ein Deckelwafer zum Einsatz, der mit einer gesputterten Platingbase-Metallisierung hergestellt wurde. Außerdem wurde das Metall in den Sensorgruben durch Ionmilling entfernt. Es wurden verkappte Bauelemente (mit Getter) auf das eingeschlossene Restgas untersucht. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der massenspektroskopischen Restgasanalysen aufgeführt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die vorherrschende

Gassorte	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
H ₂	-	-	-	-
He	$8,00 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-4}$	$6,93 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
H ₂ O	$5,07 \cdot 10^{-4}$	-	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$5,73 \cdot 10^{-3}$
CO	$6,93 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-3}$	-	$7,60 \cdot 10^{-3}$
CO ₂	$1,87 \cdot 10^{-4}$	-	$3,60 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$
N ₂	-	-	-	-
CH ₄	$9,73 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	-	$1,87 \cdot 10^{-3}$
C _n H _m	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$
Ar	$7,33 \cdot 10^{-1}$	$3,87 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$	$6,27 \cdot 10^{-1}$
Total	$7,60 \cdot 10^{-1}$	$4,13 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$	$6,40 \cdot 10^{-1}$

Tabelle 3.1: Ergebnisse der ersten Restgasanalyse (in mbar)

Gassorte mit einem Partialdruck von ca. 0,6 mbar innerhalb der Sensorkavitäten Argon ist. Andere Gase sind nur in sehr geringen Mengen festzustellen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der Getter vollständig aktiviert ist und alle aktiven Gase durch ihn gebunden werden. Gase wie H₂ und N₂ wurden bei den Analysen aus Zeitgründen nicht analysiert. Die Restgasanalysen zeigen auch, dass in den Kavitäten organische Verbindungen wie Methan (CH₄) und Kohlenwasserstoffverbindungen in geringen Mengen vertreten sind. Es ist anzunehmen, dass diese vom Sensorwafer während des Verbindungsprozesses desorbieren und vom Getter nicht gebunden werden können.

Argonquellen

Durch eingehende Untersuchungen der Fa. SAES Getters konnten die verschiedenen Quellen für das Argon mit den verwendeten Schichten innerhalb der Sensorkavität in Verbindung gebracht werden. Da die Getterschicht in die Gruben des Deckelwafers durch einen Argon-Sputterprozess eingebracht wurde, kann während des Sputterprozesses Argon in die Schicht eingebaut werden, welches bei Erwärmung während des Verbindungsprozesses emittiert wird. Die Untersuchung gesputterter Getterschichten direkt nach der Aufbringung des Getter und nach einer Hochtemperaturausgasung bei 450 °C mittels Auger-Tiefenspektren geben Aufschluss über den Einbauort des Argons, siehe Abbildungen 3.11 und 3.12. Aus Abbildung 3.11 sieht man einen relativ geringen Anteil von Argon im ca. 4 µm dicken Getterfilm und eine starke Konzentration im Interface zum Siliziumwafer. Diese Konzentration dürfte mit einem Rückspalterprozess zusammenhängen, der für eine bessere Schichthftung des Getters sorgen soll. Die gleiche Getterschicht weist nach einer 1 stündigen Hochtemperaturausgasung bei 450 °C im Hochvakuum bei $2 \cdot 10^{-7}$ mbar

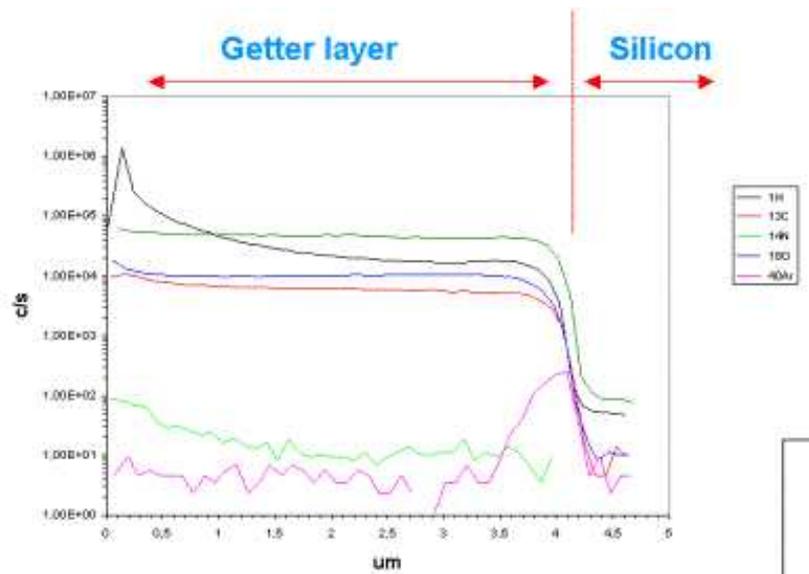


Abbildung 3.11. Argon Tiefenspektrum nach Getterbeschichtung

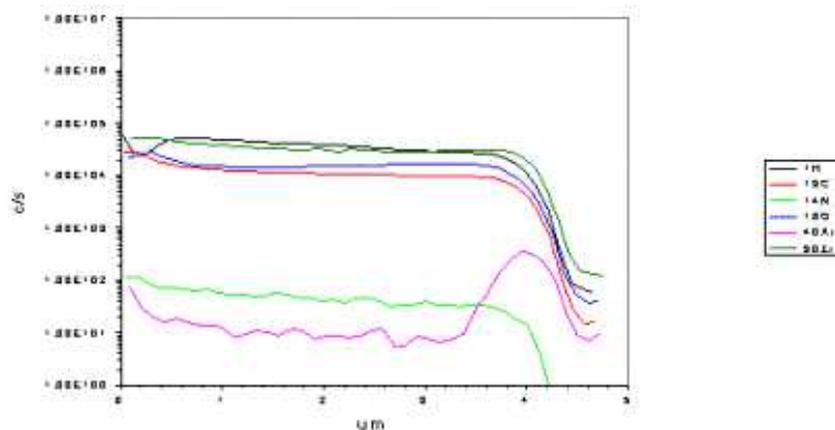


Abbildung 3.12. Argon Tiefenspektrum nach Hochtemperaturosausgasung des Getters

einen erhöhten Argongehalt der Getterschicht auf, bei etwas verringerter Konzentration im Übergang zum Siliziumwafer, siehe Abbildung 3.12. Bei der verwendeten Ausgastemperatur ist das Argon demnach auch im ZrCo-Gettergefüge mobil, was sich auch mit Literaturangaben für Aluminium deckt, siehe Abb. 3.13.

Aus diesem Grunde wurde der Sputterprozess für den Getterfilm geändert. Anstelle des Sputtergases Argon wurde Krypton zur Abscheidung des Getterfilms benutzt. Untersuchungen von SAES Getters bestätigen Angaben in der Literatur, dass Krypton eine ähnlichen Sputterrate erzielt, es aber weniger bei der Erwärmung des Getterfilms ausgast Abb.3.14.

Eine weitere Argonquelle ist die anfänglich gesputterte Platingbase auf dem Deckelwafer. Außerdem wurde die Platingbase in den Sensorgruben durch Ionmilling entfernt. Da bei diesem Prozess ebenfalls Argon als Arbeitsgas verwendet wurde, bestand hier ebenfalls die Möglichkeit, dass an dieser Stelle Argon in das Silizium des Deckelwafers eingebaut wurde. Abbildung 3.15 listet die verschiedenen untersuchten Proben auf. Anhand der Proben 1 + 2 wird das Ausgastungsverhalten von sensorseitigen Wafermetallisierungen (primär Al-

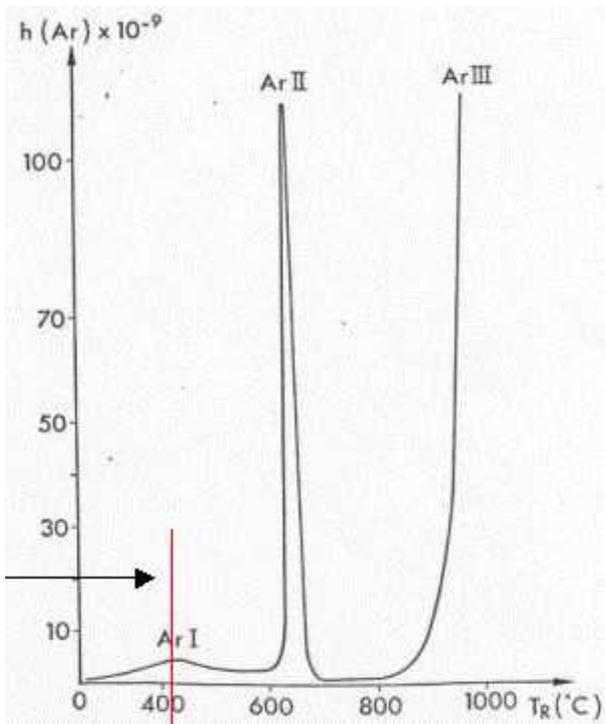


Abbildung 3.13. Charakteristische Argon Ausgasungspeaks aus gesputterten Aluminiumschichten

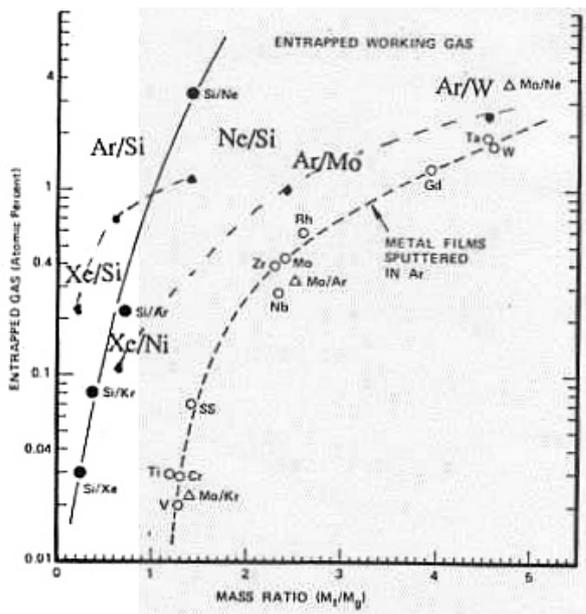


Abbildung 3.14. Das Verhältnis der Molekulargewichte von Arbeitsgas und Target-Atom bestimmt die Gas-Einbaurrate beim Sputtern

Probe	Bild	ID Code	Wafer	Eigenschaften	Fläche (cm ²)
1		---	Sensor	vier MEMS structures with Al connections	0.81
2		---	Sensor	Sputtered Al layer on Si cutted from the region near the flat	0.76
3		---	Cap	Ar sputtered PB1 + ion milling	0.71
4		---	Cap	Monitor ion milled cap wafer	1.60
5		W1 FHGM463.6	Cap	gedampfte PB2	1.59
6		W2 FHGM463.8	Cap	gedampfte PB2 + ion milling	1.61
7		W7 FHGM463.7	Cap	gedampfte PB2 bis	1.60
8		W11 FHGM462.5	Cap	Ar sputtered PB1	1.59

Abbildung 3.15. Probenmatrix für Ausgasungsuntersuchungen

Legierungen) untersucht, die Proben 3 bis 8 dienen zur Untersuchung der deckelseitigen Metallisierungen bzgl. Argonausgasung. Die Abbildung 3.16 zeigt die Argonausgasungsrate der verschiedenen Proben im Vergleich. Eine mit Argon Arbeitsgas aufgesputterte Kappenmetallisierung weist eine rund 4000 mal höhere Argon Ausgasungsrate als eine aufgedampfte Metallisierung auf.

Sputtern und Ionmilling

Da die vorigen Restgasanalysen die Erkenntnis brachten, dass die dominierende Argonquelle nicht durch den Getter sondern durch die Platingbase bzw. durch das Ionmilling eingebracht wurden, musste die Quelle genauer identifiziert werden. Um den Einfluss der in den Gruben gesputterten und anschließend durch Ionmilling entfernten Platingbase mit einer gedampften Schicht zu vergleichen, wurden zwei unterschiedlich hergestellte Deckelwafer vorbereitet.

Ein Deckelwafer wurde mit gesputterter Platingbase hergestellt, die in den Gruben durch

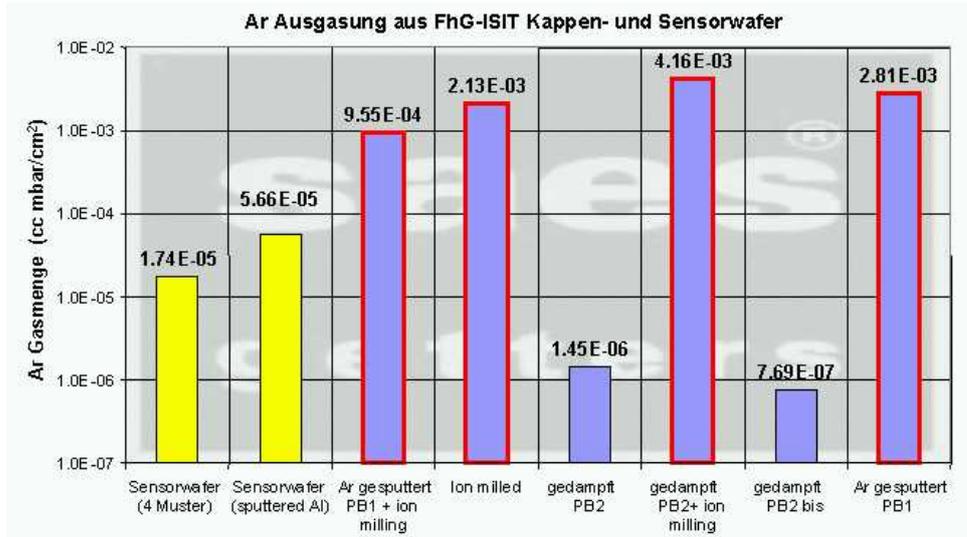


Abbildung 3.16. Identifizierung von Argonquellen mittels Ausgasungsuntersuchungen

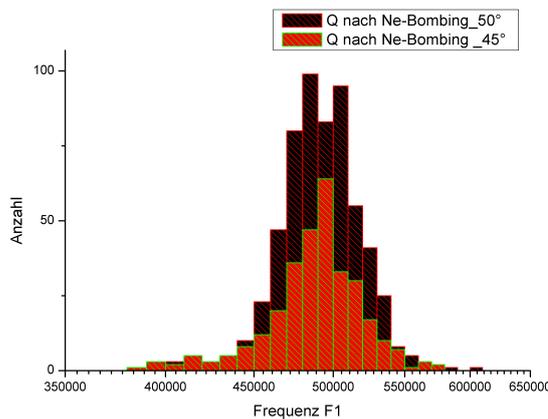


Abbildung 3.17. Güteverteilung hochgüter Drehratensensoren (2 Typen) nach Prozessoptimierung

Ionmilling entfernt wurde. Anschließend wurde die Getterschicht mit Krypton als Arbeitsgas aufgesputtert.

Ein weiterer Deckelwafer wurde mit gedampfter Platingbase hergestellt, wobei auf den Ionmillingprozess verzichtet wurde. Auch bei diesem Wafer wurde der Getterfilm mit dem verbesserten Kryptonprozess aufgebracht.

Beide Deckelwafer wurden mit einem identischen Bondprozess mit Sensorwafern verbunden.

Die Güten der Sensoren mit gesputterter und entfernter Platingbase lagen bei Werten um $Q = 5.000$. Der Wafer mit gedampfter Platingbase weist Güten bei $Q_{max} = 500.000$ auf. Dieses entspricht einem Innendruck von ca. $p = 1 \cdot 10^{-3}$ mbar. Diese Erkenntnis stellt den Durchbruch zu einer ganz wesentlichen Prozessoptimierung dar. Die Abbildung 3.17 zeigt die Güteverteilung von zwei unterschiedlichen Drehratensensortypen nach der Prozessoptimierung und ohne eine zusätzliche Rückbefüllung der Sensorkavitäten.

Im Verlauf einiger Monate ist eine Gütegradation der Sensoren auf Werte von ca. $Q = 350.000$ zu messen. Dies entspricht einem Innendruck von etwa $p = 2 \cdot 10^{-3}$ mbar. Es ist anzunehmen, dass sich mit der Zeit in der Sensorkavität ein Heliumpartialdruck von $p_{He} =$

$5,0 \cdot 10^{-3}$ mbar einstellt. Dies entspricht dem dauerhaft erreichbaren Minimaldruck für die vorliegende Sensorkonstruktion mit Siliziumoxidinterface. Eine tiefere Erklärung der Heliumaufnahme in an sich hermetisch dichte Sensorkavitäten ist weiter hinten in diesem Kapitel beschrieben.

Einfluss der Kappenwaferreinigung auf den Getter

Neben dem Gaseinschluss beim Waferbonden ist eine solide eutektische Fügeverbindung notwendig, um ein eingeschlossenes Vakuum langfristig zu erhalten. Hierbei hat sich insbesondere eine chemische Reinigung des Kappenwafers vor dem Verbonden als kritisch für das Fügeergebnis herausgestellt. Die als „Standard Clean“ bezeichnete Reinigungsprozedur besteht aus zwei Schritten und dient dazu sowohl organische Kontaminationen als auch Partikel von Oberflächen zu entfernen:

Standard Clean 1 (SC1): Ammoniumhydroxid / Wasserstoffperoxid / DI Wasser (APM, 1:1:5 $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ bei 60-80°C). APM oxidiert und ätzt leicht die Oberflächen an, um Partikel von Oberflächen zu entfernen; außerdem werden organische und metallische Kontaminationen entfernt;

Standard Clean 2 (SC2): Salzsäure / Wasserstoffperoxid / DI Wasser (HPM, 1:1:6 $HCl/H_2O_2/H_2O$ bei 60-80°C). HPM entfernt metallische Kontaminationen von Silizium Substraten und wirkt oxidierend.

Abbildung 3.18 zeigt den Einfluss der Reinigungsprozedur auf die Absorptionseigenschaften des Getters für zwei Testgase (H_2 , CO) auf. Die Reinigung des Kappenwafers nur mit dem SC1- Reinigungsschritt verschlechtert die Gettereigenschaften hinsichtlich der Absorptionsrate und der Absorptionskapazität für beide Gase. Die Kombinationsreinigung mit SC1 und SC2 hingegen verbessert diese Eigenschaften im Vergleich zu einem unbehandelten Getter. Die Verringerung der Absorptionskapazität durch die SC1-Reinigung kann auf eine Oberflächenkontamination mit Stickstoff aus der Dissoziation von Ammoniumhydroxid zurückzuführen sein, während die zusätzliche SC2 Reinigung die kolumnare Morphologie des Getters vorteilhaft verändert und die Oberfläche durch eine Oxidschicht passiviert, siehe Abb. 2.3 [110].

Der von der Firma SAES Getters in Mailand als „PaGeWafer“ angebotene Dünnfilmgetter erreicht nach Durchlaufen der SC1+SC2 Reinigung eine maximale Getterkapazität für Kohlenmonoxid von $0,15 \cdot 10^{-3} \text{mbar} \cdot \text{l}/\text{cm}^2$ und für Wasserstoff von $0,23 \cdot 10^{-3} \text{mbar} \cdot \text{l}/\text{cm}^2$. Beide Getterkapazitäten sind unabhängig voneinander, weil Wasserstoff im Volumen des Getters aufgenommen wird und Kohlenmonoxid an der Oberfläche gebunden wird. Die Oberflächengetterkapazität ist aber als Gesamtbindungskapazität für alle aktiven Luftgase gemeinsam zu verstehen.

Die aus dem Diagramm ermittelten Werte bilden die Grundlage für die Berechnung der Vakuumlebensdauer in der Sensorkavität.

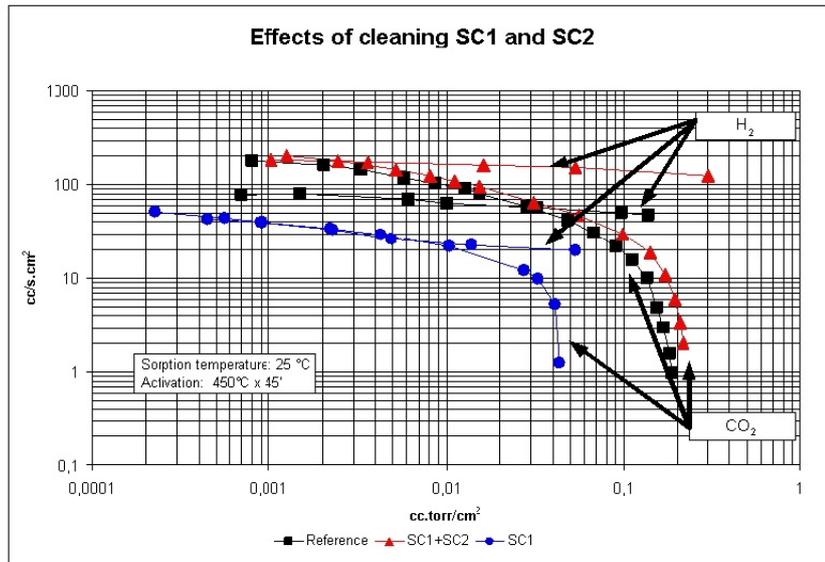


Abbildung 3.18. Die Absorptionskapazität des Getters wird durch eine Waferreinigung mit SC1 + SC2 Prozess verbessert.

3.3 Rückfüllung mit Edelgasatmosphäre

Extrem hochwertige Sensoren, also solche, die mit sehr geringen Kavitätsdrücken betrieben werden, reagieren auf Vibrationen sehr anfällig, da ihre Dämpfung sehr gering ist. Ein langsames Abklingverhalten ist zudem wegen der langen Totzeit für die Messung eines neuen Ereignisses nicht gewollt. Aus diesem Grund muss in den Sensorkavitäten ein Betriebsdruck gezielt eingestellt werden können. Für die Verwendung im Automobilbereich ist die optimale Güte der am ISIT gefertigten Drehratensensoren im Bereich um $Q_{opt} = 7.000-10.000$ spezifiziert. Das gezielte Einstellen des Vakuums im Bereich 10^{-3} mbar bis einige mbar mit Verkapselungsverfahren auf Waferebene wird weltweit nur von sehr wenigen Herstellern beherrscht. Im Folgenden werden zwei Verfahren aufgeführt, mit denen es möglich ist, den Druck innerhalb der Sensorkavität einzustellen.

N_2/Ar -Gasmischung

Es ist grundsätzlich möglich einen konstanten Argon-Gasfluss in die Bondkammer eines geeigneten Waferbonders einzustellen, während diese permanent abgepumpt wird. Man kann den Gasballast so einstellen, dass sich ein statischer Kammerdruck von ca. 0,1 mbar Argon ergibt. So können die Sensorkavitäten mit einem definierten Argon (oder einem anderen Edelgas oder Edelgasgemisch) Innendruck ausgestattet werden.

Wegen Einschränkungen in der Vakuumsteuerung eines am ISIT vorhandenen Waferbonders (Süss Microtec SB6), wurde an den Bonder ein Gasgemisch angeschlossen, das sich aus Stickstoff und einem ausgewählten Edelgas (z.B. Argon) zusammensetzt. Das Mischungsverhältnis beträgt 95 % Stickstoff und 5 % Argon. Das Mischgas strömt während des Wafer Bondprozesses kontinuierlich in die Bondkammer ein und befindet sich auch zwischen den getrennt gehaltenen Wafern während diese zusammengepresst werden. Das

Mischgas wird so in den einzelnen Kavitäten eingeschlossen. Der Gasballast wird allein durch eine Vorpumpe abgepumpt (der Gasdruck ist so gewählt, dass die im System vorhandene Turbopumpe nicht eingeschaltet wird). Bei der im nächsten Bondschritt durchgeführten Aktivierung des Getters bei 350°C wird der Stickstoffanteil gebunden und nur der verbleibende Argonanteil bestimmt die Güte der Sensoren. Das Verfahren ist nur bei Verwendung von Getterschichten in der Sensorkavität einsetzbar. Natürlich ist dabei zu beachten, dass der Getter nach Möglichkeit nicht mehr als 20 % vorgesättigt wird.

Um den gewünschten Gütebereich um $Q = 7.000 - 10.000$ einzustellen, ist ein Druck des Gasgemisches von 5 mbar bei der Rückfüllung notwendig. Die Einleitung des Gasgemisches in die Bondkammer und das Einschließen des Drucks in die Kavitäten durch Waferklemmung erfolgt schon bei einer Temperatur von 250°C, der Betrieb der Sensoren findet aber bei Raumtemperatur statt. In einem Gesamtdruck von 5 mbar des Gasgemisches ist bei einem Argonanteil von 5 % ein Argon-Partialdruck von 0,25 mbar enthalten. Die Zustandsgleichung eines idealen Gases lautet[2]:

$$\frac{pV}{T} = const. \quad (3.1)$$

Da sich das Kammervolumen bei der Abkühlung nicht ändert, wird aus (3.1)

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (3.2)$$

und somit:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 0,25 \cdot \frac{300K}{523K} = 0,14mbar$$

Bei einem Rückfülldruck von 5 mbar stellt sich also bei Raumtemperatur ein Argondruck von ca. 0,14 mbar ein.

Versuche mit unterschiedlicher Rückfüllzeit zeigen, dass schon eine Haltezeit von 5 min zum homogenen Rückfüllen ausreichen. Die Prozessausbeute bezüglich der Güteverteilung innerhalb der Spezifikation ist mittlerweile über 94 %.

Abbildung 3.19 zeigt eine typische Verteilung der Gütewerte über den Wafer. Es ist keine Orientierungsabhängigkeit des Wafers bezüglich der Absaugöffnung an der Kammer zu erkennen. Die Güteverteilung von Sensoren auf einem ähnlichen Wafer ist in Abbildung 3.20 als Plot dargestellt. Es ist deutlich die enge Normalverteilung um einen mittleren Gütewert zu erkennen und einige undichte Sensoren, die sich nach der Neon-Überdruckauslagerung von 24 h mit einem deutlich niedrigeren Gütewert von den dichten Sensoren separieren.

Nachteilig ist an dieser Methode der Güteinstellung, dass der Getterfilm schon vor dem eigentlichen Beginn der Lebensdauer des Bauteils belastet und so in seiner Absorptionskapazität eingeschränkt wird. Berechnungen für einen Sensor mit dem Kavitätvolumen von $V = 0,265 \text{ mm}^3$ und einer Getterkapazität von $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l}$ ergeben eine Vorsättigung des Getters durch Aufnahme des Stickstoffanteils des Gasgemisches von ca. 7 %.

Q in spec

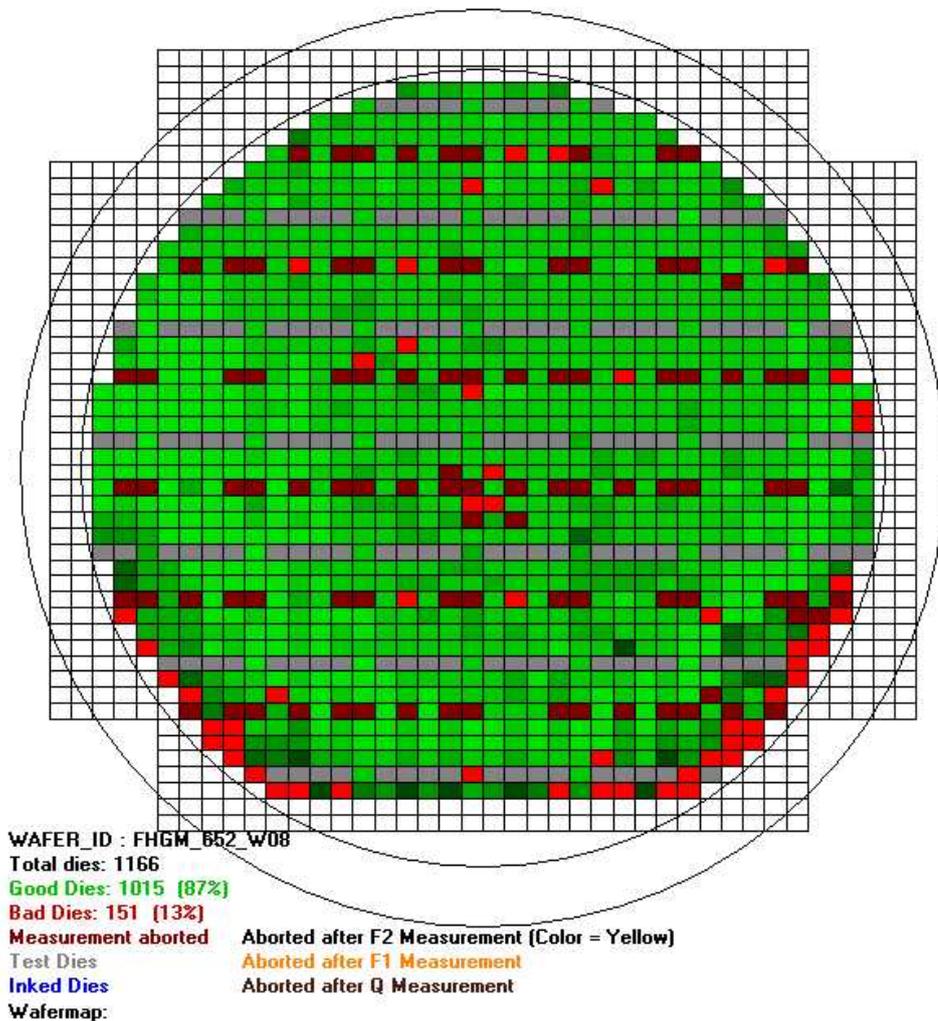


Abbildung 3.19. Verteilung der Sensoren mit Güten im Bereich 3000-15.000 über den Wafer

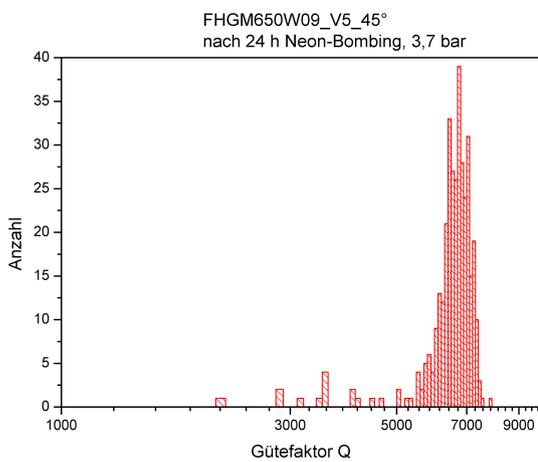


Abbildung 3.20. Güteverteilung der Sensoren mit 45°-Feder mit Rückfüllung und nach 24 h Neon-Auslagerung

Überwachung der Gettereigenschaften

Der integrierte Dünnschichtgetter ist von der Herstellerfirma Saes Getters bei Anlieferung charakterisiert, durchläuft aber noch einige Prozessschritte, die Einfluss auf seine Gasaufnahmeigenschaften haben können. Im ISIT ist eine vakuumphysikalische Charakterisierung der Gettereigenschaften wegen dem großen Aufwand und fehlender Messproben nicht möglich. Bislang muss sich jeder Anwender blind auf die Spezifikation des Getters verlassen. Die Gettereigenschaften nach einer Waferreinigung sind jedoch nicht spezifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Weg gefunden, wie mit einer unaufwändigen Prozedur die Gettereigenschaften zumindest grob verifiziert werden können. Als Messvehikel dient dabei wieder der resonante Drehratensensor und die automatische Gütefaktormessung auf einem Waferprober. Einige Kappen des Deckelwafers sind mit kleineren Getterflächen versehen worden. Diese Flächen sind rund ausgeführt und entsprechen einer Abstufung der Getterfläche von 0 % bis 20 % in Stufen von 5 %. Zusammen mit der N₂Ar-Mischgasrückfüllung kann nun die Gasabsorptionsfähigkeit des Getters anhand des sich einstellenden Innendrucks in den Sensoren überprüft werden. Bei einer rechnerisch zu erwartenden Gettersättigung von 12 % durch den Stickstoff der Rückfüllung muss sich ein hoher Innendruck bei Proben mit 0 %, 5 % und 10 % der nominellen Getterfläche einstellen. Der Sensor mit 15 % der nominellen Getterfläche kann aufgrund der Prozessschwankungen, z.B. bei der Getterabscheidung, einen leicht höheren Innendruck aufweisen. Der Sensor mit 20 % der nominellen Getterfläche zeigt den gleichen Druck wie alle Sensoren mit voller Getterfläche. Liegt der Druckübergang erst bei dem Sensor mit 20 % der nominellen Getterfläche ist die Gasaufnahmeleistung des Sensors schlechter als erwartet. Die Probe ohne Getter stellt für diesen Fall die Möglichkeit einer nachträglichen Analyse der Rückfüllatmosphäre durch Restgas Analyse (RGA) sicher. Im Produktionsbetrieb werden auffällige Wafer gesperrt.

Mit den abgestuften Getterflächen lässt sich auch die Getteraktivierung während des Waferbondzykluses untersuchen und optimieren. Die Abstufung sollte dabei jedoch bis 100 % weitergeführt werden. Das Verfahren zur prozessbegleitenden Getterüberprüfung ist zum Patent angemeldet.

Heliumpermeation

Für Bauelemente mit sehr niedrigem Innendruck im Bereich kleiner als 10^{-3} mbar muss das Eindringen von Helium beachtet werden [37][48]. In der Eichkurve, Abbildung 5.10, ist der dem Partialdruck von Helium in der Luft entsprechende Druckbereich farbig markiert. Für den vorliegenden Drehratensensor ist die langfristige Aufnahme von Helium unproblematisch, weil der Arbeitsdruck um einen Faktor 100 höher liegt.

Das Eindringen von Helium entlang der Oxide im Bondinterface kann nur schwer unterbunden werden, weil hier schon bei Raumtemperatur eine hohe Löslichkeit in SiO₂ gegeben ist. Siliziumoxid wird oft als elektrische Isolatorschicht zum Herausführen der Anschlusskontakte eingesetzt. Durch die hohe He-Löslichkeit stellt sich ein Permeationsgasstrom in das Gehäuse ein, der proportional zum Partialdruckunterschied $P_2 - P_1$ des Gases sowie zur Querschnittsfläche A des Oxids und der erforderlichen Diffusionslänge L

ist. Es stellt sich ein Permeationsleckgasstrom q_{Gas} ein [154]:

$$q_{Gas}(T) = (P_2 - P_1) \cdot \frac{A}{L} \cdot K_{Gas}. \quad (3.3)$$

Die Permeationskonstante K der verschiedenen Gase ist stark temperaturabhängig [54]:

$$K_{Gas}(T) = K_0 \cdot T \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot T}\right)}, \quad (3.4)$$

mit der Gaskonstante $R = 8,3145 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, der Aktivierungsenergie E_A und der Temperatur T . Die materialabhängige Diffusionskonstante K' in SiO_2 kann mit Angaben aus [54] für verschiedene Gase ausgerechnet werden. Tabelle 3.2 gibt die Permeationskonstante ausgewählter Gase in SiO_2 an.

Gas	$K(25 \text{ }^\circ\text{C})$ (m^2/s)	$K(1000 \text{ }^\circ\text{C})$ (m^2/s)	E_A KJ/mol	K_0 (m^2/s)
Helium	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	20,09	$2,68 \cdot 10^{-11}$
Neon	$5,0 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	36,84	$4,81 \cdot 10^{-12}$
Argon		$1,4 \cdot 10^{-13}$	111,35	
Wasserstoff	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-10}$	35,58	
Sauerstoff		$6,6 \cdot 10^{-13}$	104,65	

Tabelle 3.2: Gas-Permeationskonstanten in SiO_2

Die benötigte Zeit für eine Druckänderung um ΔP in einem Gehäuseinnenvolumen V errechnet sich aus:

$$t(T) = \frac{\Delta P \cdot V}{q_{Gas}(T)}, \quad (3.5)$$

Beispielhaft sei hier der Einfluss der Permeation auf den am ISIT entwickelten Drehratensensor beschrieben. Der Sensor weist ein Kavitätvolumen von $V = 2,65 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$ auf. Er gehört mit 265 nl Innenraum in die neue Gehäuseklasse der "Nanoliter-Packages". Umlaufend um den Bondrahmen des Sensors ist eine ca. 1 μm dicke Oxidschicht sowohl außen wie in der Sensorkavität exponiert. Es ergibt sich eine Querschnittsfläche $A = 1,47 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ mit einer mittleren Diffusionslänge $L = 500 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Wird ein ideal evakuierter Sensor einer Überdruckauslagerung bei $P_2 = 4 \text{ bar} = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ und einer Gastemperatur von $T = 300 \text{ K}$ unterzogen, so nimmt er im Fall von Helium als Prüfgas in nur 88 Sekunden 0,1 mbar (10 Pa) Gas in die Kavität auf, siehe Abbildung 3.21.

Der gleiche Druckanstieg wird für Neon als Prüfgas nach einer Zeit von 112 Stunden beobachtet. Im Vergleich dazu wird für Argon als Prüfgas kein Druckanstieg beobachtet. Hieraus ergibt sich, dass Helium sowohl als Rückfüllgas wie auch als Prüfgas für Sensoren mit exponierter Oxidschicht ungeeignet ist. Führt man die obige Berechnung jedoch für eine Überdruckauslagerung in Neon bei $T = 600 \text{ K}$ durch (maximale Temperaturbelastbarkeit des Sensors nach dem Waferbonden) ergibt sich der gleiche Druckanstieg in der Sensorkavität innerhalb von 125 Sekunden, siehe Abbildung 3.22. In der experimentellen Überprüfung mit vorher auf Dichtigkeit geprüften Drehratensensoren wird für eine Auslagerungstemperatur bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ pro mbar Neon Auslagerungsdruck ein Neon-Gasstrom

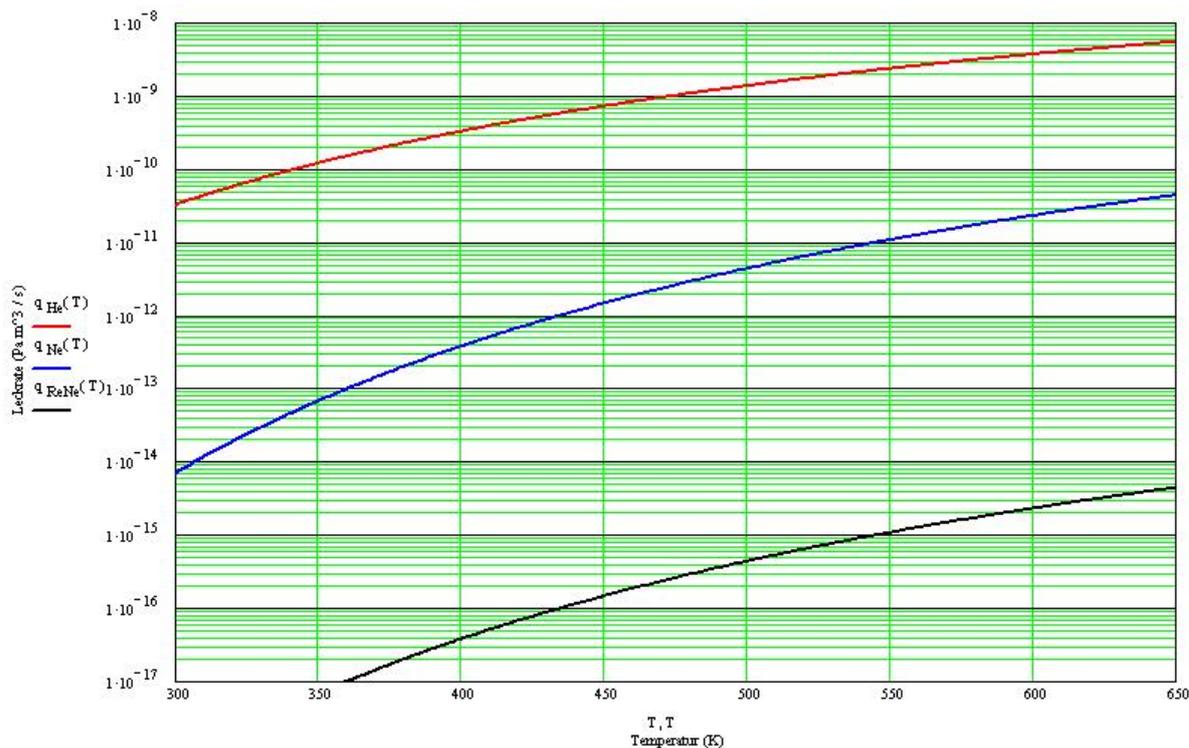


Abbildung 3.21. Permeationsraten von Neon und Helium

in die Kavität von rund $6.8 \cdot 10^{-16}$ l/s gemessen. Bei einem Auslagerungsdruck von 4000 mbar kann damit ein vollständig evakuiertes Kavitätswolumen (eines gleichartig konstruierten Sensors) von z.B. $0,25 \text{ mm}^3$ innerhalb 153 Minuten Auslagerungszeit mit einer Neon-Dämpfungsatmosphäre von 0,1 mbar aufgefüllt werden.

Durch die nachträgliche Heißgasrückfüllung lassen sich ebenfalls Feinlecks detektieren. Dadurch wird eine spätere, zusätzliche Kontrolle auf Dichtigkeit überflüssig gemacht, da schon kurze Auslagerungszeiten zu einem Versagen von undichten Sensoren führen. Die Heißgas-Überdruckauslagerung kann damit sehr effizient zum nachträglichen Einbringen von Neon als Dämpfungs gas genutzt werden. Diese alternative Rückfüllmethode hat einige Vorteile:

- hohe Homogenität der Rückfüllung (keine Strömungs- oder Druckgradienteneffekte)
- Rückfülldruck über Gasdruck gut kontrollierbar
- Neon wirkt sich im Vergleich zu Argon positiv auf die Vakuumlebensdauer aus
- Vermeidung einer Gettervorsättigung
- Rückfüllung auf Waferebene mit mehreren Wafern gleichzeitig
- Bondprozess wird von Rückfüllung entkoppelt
- Bondprozess wird beschleunigt
- Rückfüllung bei 330 bis 350 °C kann zur zusätzlichen Getteraktivierung genutzt werden

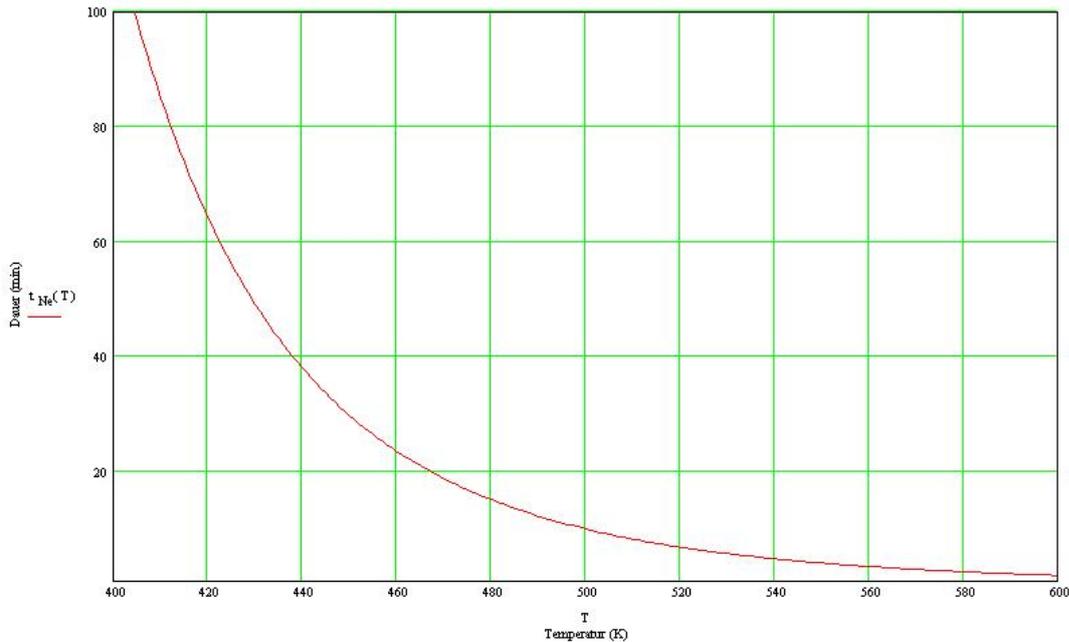


Abbildung 3.22. Permeationdauer für Neon zur Erhöhung des Kavitätsdrucks um 0,1 mbar

- undichte Bauelemente nehmen zusätzlich mehr Neon auf und können identifiziert werden

Neon als Rückfüllgas

Aus einer Neon-Rückbefüllung ergeben sich auch Konsequenzen für die Vakuumlebensdauer in der Sensorkavität. Ein dichter Sensor mit 0,1 mbar Neon als Dämpfungsgas erleidet bei 300 K innerhalb 513 Jahre einen Druckabfall auf 0,018 mbar. Damit ist der Neon Partialdruck in der Luft erreicht und der Gasverlust stoppt automatisch. Der Sensor pumpt sich quasi selbst leer! Gleichzeitig dringt Helium über eventuelle Lecks oder Diffusionspfade in die Sensorkavität ein, bis sich ein Helium Partialdruck von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt hat. Nur über eventuelle Leckpfade kann Argon zusammen mit anderen Luftgasen in die Kavität eindringen. Die Luftgase werden vom Getter gebunden und Argon führt zu einem Druckanstieg in der Sensorkavität. Je weniger Argon demzufolge anfänglich in der Kavität vorhanden ist, desto länger verkraftet der Sensor das Eindringen von Argon. Argon stellt damit eine Voralterung des Sensors hinsichtlich der Bedämpfungsatmosphäre dar! Betrachtet man die maximal zulässige Argon-Leckrate im Betrieb ergibt sich für den oben beschriebenen Drehratensensor ein Unterschied von 40% zwischen Neon-Backfill und Argon-Backfill. D.h. bei einem konstanten Leck und ausreichender Getterkapazität (es tritt keine Sättigung auf) wird der Sensor mit Neon-Backfill eine 40 % längere Lebensdauer des Kavitätsvakuums aufweisen! Im Fall eingeschränkter Getterkapazität oder ohne Verwendung von Getter besteht sogar die Notwendigkeit Neon-Backfill zu verwenden oder zumindest Argon gänzlich aus der Kavität zu entfernen, um eine Vakuumlebensdauer von 15 Jahren zu realisieren. Die Lebensdauer des Kavitätsvakuums ist durch den Kalibrierungsbereich der Dämpfung des Mikroresonators gegeben. Im Beispiel des beschriebenen Drehratensensors reicht die Kalibrierung von 0,1 mbar bis 0,35 mbar Innendruck, was einem Gütefaktor zwischen $Q = 10.000$ bis 3.000 entspricht. Nach Erreichen der Vakuumle-

Lebensdauer ist der Sensor damit noch voll funktionsfähig und weist noch ein Feinvakuum in der Kavität auf. Die elektrischen Eigenschaften des Sensors entsprechen jedoch hinsichtlich der Empfindlichkeit und den zulässigen Energieverlusten nicht mehr den Spezifikationen. Eine integrierte Auswerteschaltung kann über die Gütemessung den Innendruckanstieg messen und die Lebensdauer des Sensors prognostizieren. Ein vorbeugender Austausch im Rahmen einer Wartung ist damit möglich.

Prozessempfehlungen

Aus diesen Überlegungen folgt somit für den Sensorentwurf und einen Wafer Bondprozess mit kontrolliertem Vakuum für resonant betriebene Inertialsensoren:

- Sensorkavität physikalisch so groß wie möglich auslegen,
- Getter mit möglichst großer Getterkapazität verwenden und voll aktivieren,
- Vorsättigung des Getters vermeiden,
- Ausgasungsschritt der Wafer vor dem Bonden vorsehen,
- Argonausgasung aus gesputterten Schichten reduzieren, ggfs. auf Krypton-Arbeitsgas umstellen,
- Gasdämpfung mit Neon-Backfill einstellen, ggfs. auch Krypton oder Xenon,
- Lecktest mit Neon durchführen,
- fertige Sensoren nicht in Räumen mit erhöhtem Helium-Partialdruck lagern.

4 Amplituden- und Phasengang schwach gedämpfter Feder-Masse-Systeme

Der in dieser Arbeit beschriebene Neon Ultra-Feinlecktest basiert auf der Methode der Gütefaktorüberwachung. Es wurde im ISIT beobachtet, dass der Gütefaktor Q eines Mikroresonators im Druckbereich 10^{-3} mbar bis ca. 1 mbar sehr empfindlich vom Gehäuseinnendruck abhängt. Um die Gütefaktormessung und das Antriebskonzept des vorliegenden Sensors zu erklären, werden hier kurz die relevanten Zusammenhänge aufgeführt.

4.1 Gedämpfte harmonische Schwingung

Ein schwingfähiger Körper führt nach einer Auslenkung freie Schwingungen aus und kehrt selbständig in den Gleichgewichtszustand zurück. Die Frequenz der freien Schwingungen ist die natürliche Eigenfrequenz ω_n des ungedämpften Schwingers, definiert durch die in 2π Sekunden ausgeführten Schwingungen[35]. Bei mehreren Freiheitsgraden der Schwingungen gibt es ebenso viele Eigenfrequenzen. Eine harmonische Schwingung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine zurücktreibende Federkraft $F_F = -k \cdot x$ proportional zur Auslenkung x wirksam ist, die ihr Maximum erreicht, wenn der Massepunkt im Endpunkt seiner Bewegung zur Ruhe kommt und seine Bewegungsrichtung umkehrt. Die Konstante k wird Federkonstante oder auch Richtgröße genannt. Für den besonderen Fall von Dreh-schwingungen gelten die folgenden Überlegungen auch, jedoch tritt in den Gleichungen anstelle der Masse m das Massenträgheitsmoment J und anstelle der Federkonstante k das Richtmoment D [35].

Im Umkehrpunkt hat der Schwinger die potentielle Energie $E_p = \frac{1}{2}mkx_0^2$, wenn x von der Gleichgewichtslage aus gemessen wird. In der Gleichgewichtslage, dem Punkt mit der höchsten Geschwindigkeit, ist die potentielle Energie null und die kinetische Energie $E_k = \frac{1}{2}m\omega^2x_0^2$ maximal. Die Energie oszilliert deshalb mit der doppelten Kreisfrequenz, wobei die Gesamtenergie $E_{ges} = \frac{1}{2}kx_0^2$ des ungedämpften Schwingers zu allen Zeiten konstant ist.

Durch zu überwindende Reibung wird dem Schwinger Energie entzogen und es stellt sich keine konstante Schwingungsamplitude ein. Die Reibungskraft $F_R = -c\eta \cdot v$ bei Bewegung in Medien (z.B. Gasen, Flüssigkeiten) ist proportional der Geschwindigkeit des Schwingers und dieser entgegengesetzt. Der Koeffizient c hängt von der Gestalt des Körpers ab. Der Koeffizient η hängt von der inneren Reibung des Mediums ab und wird

auch Viskositätskoeffizient genannt. Der Viskositätskoeffizient von Flüssigkeiten nimmt mit steigender Temperatur ab, während der von Gasen mit steigender Temperatur zunimmt, siehe Anlage B.4. Die Proportionalität der Reibungskraft zur Geschwindigkeit lässt sich durch den Impulsübertrag der Moleküle auf den Schwinger erklären. Von allen Seiten übertragen dabei Moleküle auf den Schwinger. Bei ruhendem Schwinger ist der Impulsübertrag im Mittel null. Bei bewegtem Schwinger erfährt er mehr bremsende Stöße von vorn als beschleunigende Stöße an der Rückseite. Die Bewegungsgleichung der gedämpften harmonischen Schwingung lautet nun:

$$F = m \cdot a = -k \cdot x - c\eta \cdot v \quad (4.1)$$

Nach Umformen der Gleichung und Division durch die Masse m erhält man mit der natürlichen Kreisfrequenz des ungedämpften Systems $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ und $2\delta = \frac{c\eta}{m}$ die Bewegungsgleichung der gedämpften harmonischen Schwingung in folgender Form:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (4.2)$$

Mit dem Lösungsansatz $x(t) = x^{i\alpha t}$ erhält man die allgemeine Lösung der Differentialgleichung:

$$x(t) = x_0 e^{-\delta t} \cdot e^{\pm\sqrt{\omega_n^2 - \delta^2}t} \quad (4.3)$$

Überträgt man diese Lösung mit Hilfe der Eulerschen Formel von der komplexen in die reelle Ebene so ergibt sich für die Amplitude eine exponentiell mit der Zeit abfallende Schwingungsfunktion:

$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t) \quad \text{gedämpfte freie Schwingung} \quad (4.4)$$

mit der Anfangsamplitude x_0 zur Zeit $t = 0$, siehe Abbildung 4.1.

Die erste Exponentialfunktion der Lösung der allgemeinen Differentialgleichung

$$A(t) = x_0 e^{-\delta t} \quad \text{Amplitudenfunktion} \quad (4.5)$$

beschreibt die einhüllende Kurve der Schwingungsfunktion. Sie wird auch Amplitudenfunktion genannt. Die Abnahme der Amplitude wird durch die Ausgangsamplitude x_0 und den Dämpfungsfaktor δ beeinflusst. Wäre also der Dämpfungsfaktor gleich null, so würde die Amplitude zeitlich nicht abnehmen. Die Schwingung würde sich ewig fortsetzen. Im Fall zu großer Dämpfung geht die Exponentialfunktion sofort gegen null und es findet keine Oszillationsschwingung statt. Das System kriecht in die Ruhelage zurück. Diese Dämpfungseinstellung nennt man den Kriechfall. Den Übergang von gedämpfter Schwingung zum Kriechfall bildet der aperiodische Grenzfall, siehe Abbildung 4.2.

Als Abklingdauer τ wird die Zeit bezeichnet, in der die Amplitude auf den e-ten Teil ($\approx 0,367$) abgefallen ist[35]. Dafür muss τ gleich dem reziproken Wert des Exponenten der Funktion sein:

$$\tau = \frac{1}{\delta} \quad \text{Abklingdauer} \quad (4.6)$$

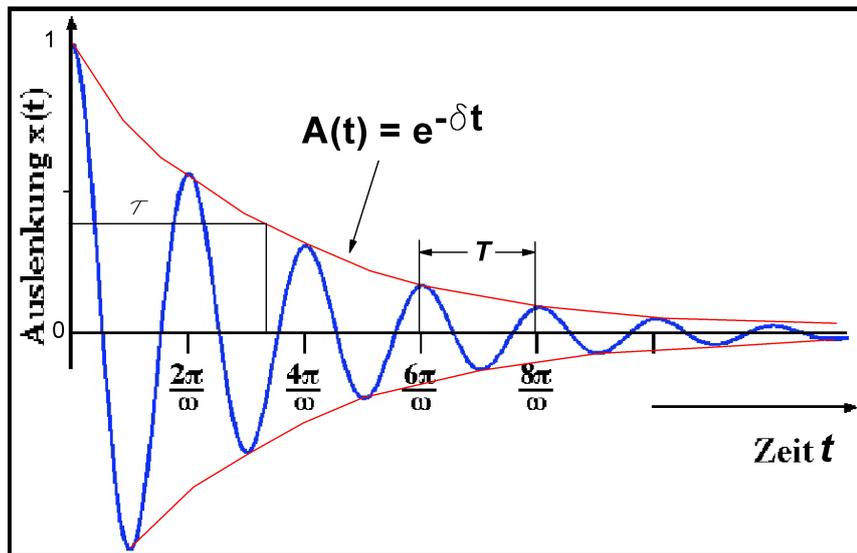


Abbildung 4.1. Gedämpfte Schwingung

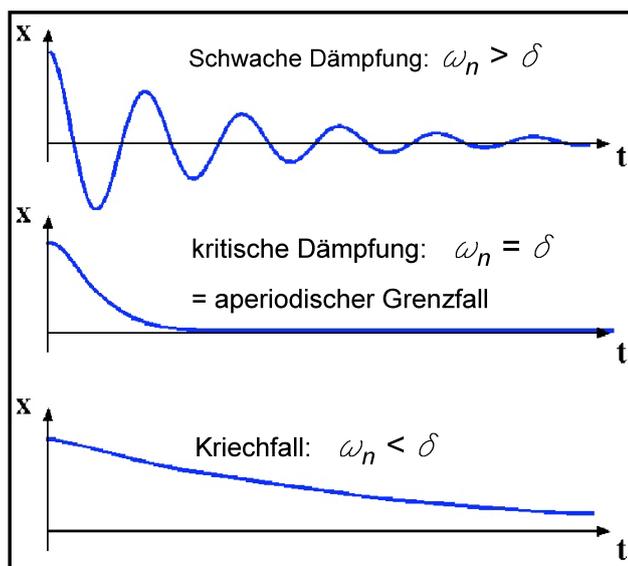


Abbildung 4.2. Einteilung gedämpfter Schwingungen in drei Klassen

Die zweite Exponentialfunktion der Lösung der allgemeinen Differentialgleichung gibt die Schwingung eines Systems an. Es gilt dafür

$$x(t) = e^{\pm\sqrt{\omega_n^2 - \delta^2}t} \quad \text{Schwingfunktion} \quad (4.7)$$

Den Exponenten dieser Funktion nennt man gedämpfte Kreisfrequenz ω_d . Für ein gedämpftes Schwingersystem gilt damit:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \delta^2} = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad \text{Kreisfrequenz des gedämpften Schwingers} \quad (4.8)$$

Für eine ungedämpfte Schwingung mit dem Dämpfungsfaktor $\delta = 0$ schwingt das System mit der Eigenkreisfrequenz ω_n . Eine Dämpfung führt damit zu einer Verringerung der Kreisfrequenz. Als Beispiel sei hier ein System angenommen, das bei jeder Schwingungsperiode 0,1% der Gesamtenergie verliert. Aus $\Delta E = 0,1\%E$ ergibt sich ein Gütefaktor $Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} = 2\pi \frac{1}{0,001} = 6283$. Aus der Gleichung 4.8 ergibt sich das Frequenzverhältnis $\frac{\omega}{\omega_n} = 0,999999996$. Der Effekt der Frequenzänderung durch Gasreibung ist damit für zu meist schwach gedämpfte, resonant betriebene Mikrosensoren kaum relevant und kann damit auch nicht als Messsignal für die Hermetizitätsprüfung genutzt werden. Als Anmerkung sei erwähnt, dass eine Frequenzverminderung darüber hinaus auch durch einen auf den Resonator gefallenen Partikel verursacht werden kann, der die Masse oder im Fall eines Drehschwingers das Massenträgheitsmoment erhöht. Zudem führt der Bruch einer Aufhängungsfeder zu einer Verringerung der Federkonstante und damit auch zu einer Abnahme der Kreisfrequenz.

4.2 Fremderregte, gedämpfte harmonische Schwingung

Ein fremderregtes Feder-Masse-Dämpfer-System mit einem Bewegungsfreiheitsgrad x in harmonischer Bewegung wird mathematisch durch die Differentialgleichung

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (4.9)$$

beschrieben [163]. Darin bedeuten x , \dot{x} und \ddot{x} die Auslenkung bzw. deren zeitliche Ableitungen, m die Masse des Schwingers, k die Federsteifigkeit und c ist ein Dämpfungsmaß. Die harmonische Kraft $F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t)$ treibt die Dämpfung. Die auf den Schwinger wirkenden Dämpfungskräfte setzen sich zusammen aus äußerer und innerer Dämpfung. Silizium als Werkstoff der bewegten Federelemente besitzt eine geringe Hysterese, so dass die Dämpfung durch Wechselwirkung mit der die Strukturen umgebenden Atmosphäre gegenüber den inneren strukturellen Energieverlusten dominiert. Wird die Gleichung 4.1 durch die Masse m dividiert, so erhält man die Bewegungsgleichung:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_n^2 \cdot x = A_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (4.10)$$

Hierbei ist A_0 die Amplitude der Beschleunigung und ω_n die natürliche Kreisfrequenz des freien Schwingers. Das Dämpfungsmaß bzw. die Abklingkonstante δ hängt wegen der geringen inneren Dämpfung maßgeblich vom umgebenden Druck p ab. Die mechanische Güte eines schwingenden Systems wird allgemein definiert durch die im Gesamtsystem enthaltene Energie E_{System} bezogen auf den Energieverlust pro Schwingungsperiode $\Delta E_{Periode}$ [161][58][38]:

$$Q = 2\pi \cdot \frac{E_{System}}{\Delta E_{Periode}} \quad (4.11)$$

Bei schwach gedämpften mechanischen Schwingern wird das Verhältnis von Resonanzamplitude $R(\omega = \omega_n)$ zur statischen Auslenkung $R(\omega = 0)$ als Resonanzüberhöhung oder Güte bezeichnet. Der Gütefaktor ergibt sich auch direkt aus den Koeffizienten der Schwingungsgleichung 4.10 [3]:

$$Q = \frac{\sqrt{m \cdot k}}{c} = \frac{m}{c} \cdot \omega_n = \frac{\omega_n}{2 \cdot \delta} = \frac{\pi \cdot f_n}{\delta} \quad (4.12)$$

Es ist wichtig zu bemerken, dass die Güte Q damit proportional zur natürlichen Kreisfrequenz ist. Die Abklingkonstante

$$\delta = \frac{\omega_n}{2 \cdot Q} \quad (4.13)$$

ist jedoch unabhängig von der Kreisfrequenz ω_n des Schwingers. Für die Bestimmung der Leckrate an mikromechanischen Sensoren ist die Abklingkonstante δ das bessere Maß, weil prozessbedingte Resonanzverschiebungen (Strukturbreitenschwankungen der Federn beim Trockenätzprozess, Dickenschwankungen der Federn und bewegten Massen) keinen Einfluss haben.

Die Lösung der Gleichung 4.10 besteht aus zwei Teilen, der allgemeinen Lösung der zuvor beschriebenen homogenen Differentialgleichung ($\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_n^2 \cdot x = 0$) für eine gedämpfte Schwingung und der speziellen Lösung der inhomogenen Differentialgleichung für die kontinuierliche Anregung mit der Kreisfrequenz ω . Die spezielle Lösung ist eine stabile Schwingung mit der gleichen Frequenz wie die Anregung und kann als folgende Form angenommen werden [50]:

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (4.14)$$

mit der Schwingungsamplitude X und der Phasenverschiebung zur anregenden Kraft ϕ . Für die momentane Schwingungsamplitude x in der Einschwingzeit gilt [3]:

$$x(t) = x_0 \cdot (1 - e^{-\delta \cdot t}) \quad (4.15)$$

Im eingeschwungenen Zustand wird die Schwingungsamplitude x_0 erreicht. Wenn die Frequenz der wirkenden Kraft gleich der natürlichen Frequenz des Oszillators ohne Dämpfung ist, kommt es zur Energieresonanz.

Der Dämpfungskoeffizient δ ist über die Gleichung 4.12 zugänglich. Damit kann die Dauer, bis ein gewisser Prozentsatz der Amplitude des eingeschwungenen Zustandes erreicht wird,

errechnet werden. Für die im ISIT verkappten Drehratensensoren mit einem Innendruck von rund 0,135 mbar ergeben sich Gütefaktoren von rund 6500 bei einer Resonanzfrequenz von 5600 Hz. Diese Sensoren weisen damit eine typische Dämpfung von 2,7/s auf. Zum Erreichen von 99,9 % des Amplitudenendwertes sind damit 0,4 ms notwendig. Höher gedämpfte Sensoren erreichen einen niedrigeren Amplitudenendwert schon früher. Dieser Sachverhalt muss bei der Messung des Gütefaktors berücksichtigt werden.

Die Amplitude und Phase der Schwingung kann durch die Einführung der folgenden Parameter dimensionslos beschrieben werden:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{natürliche Frequenz der ungedämpften Schwingung,} \quad (4.16)$$

$$c_c = 2m\omega_n \quad \text{kritische Dämpfung,} \quad (4.17)$$

$$\delta = \frac{c}{c_c} \quad \text{Dämpfungsfaktor.} \quad (4.18)$$

Die dimensionslosen Gleichungen der Amplitude und Phase werden dadurch zu

$$\frac{x_0 \cdot k}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\delta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (4.19)$$

und

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\delta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4.20)$$

Die Gleichungen 4.19 und 4.20 sind in der Abbildung 4.3 geplottet. Im Fall schwacher Dämpfung wird die Amplitude in der Resonanz (bei $\omega = \omega_n$) sehr groß. Die Amplitude nimmt einen konstant großen Wert an, denn die Leistung der Erregerkraft ist gleich der Reibungsarbeit. Die Frequenz größter Amplitude (Amplitudenresonanz) wandert mit zunehmender Güte bzw. abnehmender Dämpfung hin zur Resonanzkreisfrequenz des ungedämpften Oszillators. Die Resonanzkurve der mittleren Leistung mit ihrem Maximum bei $\omega = \omega_n$ ist um so schmaler, je geringer die Dämpfung. Für schwache Dämpfung ist die Halbwertsbreite $\Delta\omega = 2\delta$. Der Phasenwinkel bei dieser Frequenz ist $+90^\circ$ oder -90° . Die Phasenänderung zwischen $+90^\circ$ und -90° kann zur Detektion der Resonanz genutzt werden [160].

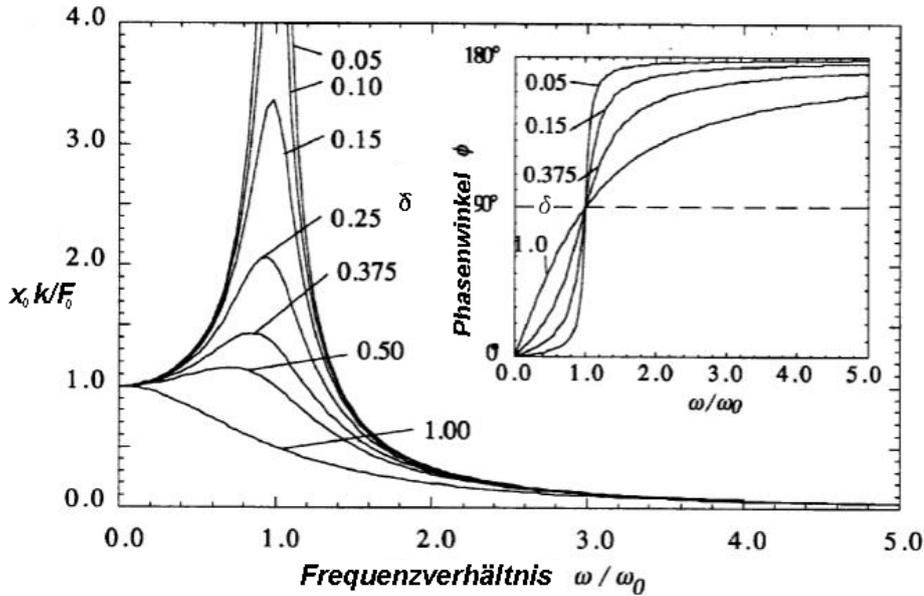


Abbildung 4.3. Grafische Darstellung der dimensionslosen Gleichungen von Amplitude und Phase gegen ω/ω_n und Dämpfungsfaktor δ [50].

Alternativen zur Bestimmung der Güte

Der Gütefaktor Q kann aus dem Amplituden-Frequenzspektrum der Schwingung bestimmt werden, indem man die Resonanzfrequenz ω_n durch die Breite des Resonanzpeaks bei -3dB teilt (Amplitude ist gegenüber der Resonanzfrequenz auf $1/\sqrt{2}$ abgefallen):

$$Q = \frac{\omega_n}{\Delta\omega_{n,-3dB}} \quad (4.21)$$

Alternativ kann man die Steigung des Phasengangs im Resonanzpunkt ermitteln, also bei -90° . Wird die Phasenfunktion 4.20 nach der Kreisfrequenz abgeleitet so ergibt sich für den Gütefaktor nach einigen Rechenschritten:

$$Q = \frac{\omega_n}{2} \cdot \left. \frac{d\phi}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_n} \quad (4.22)$$

Bei einem resonanten Sensor mit hohem Gütefaktor lassen sich die Resonanzfrequenz und die Verluste genauer bestimmen [161]. Der Resonator verhält sich wie ein Bandpass Filter, indem er Störungen (Noise) außerhalb seiner Bandbreite unterdrückt. Ein schmaler Resonanzverlauf ergibt einen hohen Gütefaktor mit guter Unterdrückung äußerer Störungen und eine hohe Stabilität der Schwingung. Ein hoher mechanischer Gütefaktor bedeutet für die Sensorempfindlichkeit eine nahezu vollständige Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften der resonanten Struktur.

Als weitere Möglichkeit kann der Gütefaktor aus der Abklingkurve einer gedämpften Schwingung bestimmt werden. Aus der Steigung ergibt sich der Dämpfungskoeffizient δ und aus Gleichung 4.22 folgt $Q = \frac{\omega_n}{2\delta}$. Dieses Verfahren ist in Abschnitt 5.4 genauer beschrieben.

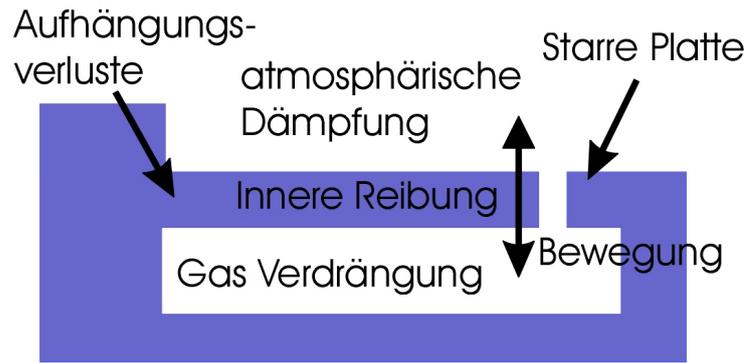


Abbildung 4.4. Dämpfungsmodell für einen Biegebalken

4.3 Energieverluste durch Dämpfung

Der Gütefaktor eines resonanten Siliziumsensors ist in der Regel durch Dämpfung beschränkt. Ein hoher Gütefaktor ist gleichbedeutend mit einer geringen Dämpfung. Mehrere Dämpfungsmechanismen müssen beim Sensorentwurf berücksichtigt werden. Der Gesamtdämpfungsfaktor einer resonanten Siliziumstruktur kann für jeden Schwingungsmodus in drei Komponenten aufgeteilt werden [161]: δ_a repräsentiert die akustischen und viskosen Verluste, δ_s stellt die Aufhängungsverluste dar und δ_i korrespondiert mit den internen- und materialbasierten Verlusten. Daraus ergibt sich für den Gesamtdämpfungsfaktor:

$$\delta = \delta_a + \delta_s + \delta_i \quad (4.23)$$

Diese Abhängigkeit weist darauf hin, dass der Gesamtdämpfungsfaktor durch den größten Dämpfungsfaktor der drei Einzelanteile bestimmt wird. In einer Umgebung wie Luft wird der größte δ -Faktor normalerweise δ_a sein, der die akustischen und viskosen Verluste repräsentiert. Durch Definition wird viskose Dämpfung durch die laterale Verschiebung von Luft verursacht, die die schwingende Oberfläche eines Resonators umgibt. Die viskose Dämpfung entspricht der Quetschfilm-Dämpfung während die akustischen Verluste auf der dazu orthogonalen Bewegung der Luft in der Umgebung des Schwingers beruhen [161]. Falls die resonante Struktur des Sensors aus einkristallinem Silizium besteht, kann der Beitrag der intrinsischen Dämpfung δ_i im Vergleich zu den anderen Dämpfungsmechanismen vernachlässigt werden [161]. Der Beitrag der Aufhängungsverluste δ_s kann auch vernachlässigt werden, wenn der Resonator in einem ausgewogenen Schwingungsmodus oszilliert (Ballenced Vibration Mode). Somit ist der Gesamtdämpfungsfaktor eines ausgewogen schwingenden Systems in guter Näherung bestimmt durch die akustische Dämpfung δ_a . Schwingt ein Resonator nahe zu einer Oberfläche auf der üblicherweise die Elektroden für die Anregung und Detektion aufgebracht sind, so müssen die Luftmoleküle verdrängt werden, damit der Resonator sich annähern kann, siehe Abbildung 4.4. Bei sehr engen Spalten im Verhältnis zur Überlappung baut sich ein hoher Druck zwischen Resonator und Oberfläche auf, der der Resonatorbewegung entgegenwirkt und eine niedrige Güte bewirkt. Diese Quetschfilm-Dämpfung (Squeeze-Film-Damping) muss im Sensorentwurf wegen der notwendigen Antriebsenergie berücksichtigt werden.

Dämpfung im intrinsischen Bereich

Atmosphärische Dämpfung ist vernachlässigbar in diesem Druckbereich. Der Gütefaktor ist deshalb druckunabhängig. Die Energieverluste durch intrinsische Dämpfung sind bestimmend. Es tritt keine Verschiebung der Resonanzfrequenz in diesem Druckbereich auf.

Dämpfung im Knudsen-Bereich

Die Dämpfung im Bereich molekularer Strömung wird durch die Kollision unabhängiger Gasmoleküle mit der bewegten Oberfläche des Schwingers verursacht. Die freie Weglänge der Moleküle λ_n ist nicht vernachlässigbar im Vergleich zur Geometrie des Schwingers und das Gas kann nicht als homogenes Medium aufgefasst werden. Für einen einseitig eingespannten, rechteckigen Biegebalken der Länge l und der Breite w kann die akustische Dämpfung bei einem Gasdruck p berechnet werden [38]:

$$\delta_a = k_m \cdot w \cdot l \cdot p \quad (4.24)$$

Mit einem Proportionalitätsfaktor k_m für die molekulare Dämpfung:

$$k_m = \sqrt{\frac{32 \cdot M_g}{9 \cdot \pi \cdot R \cdot T}} \quad (4.25)$$

Mit der Masse M_g der Gasmoleküle, R der Gaskonstante und T der absoluten Temperatur. Aus Gleichung 4.13 folgt deshalb eine Abhängigkeit des Gütefaktors in der molekularen Region vom Gasdruck, der absoluten Temperatur und der Molekularmasse des umgebenden Gases:

$$Q = \frac{\text{const.}}{p \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}}} \quad \text{Gütefaktor im Knudsen-Bereich} \quad (4.26)$$

Dämpfung im viskosen Strömungsbereich

Im Bereich viskoser Dämpfung wirkt das umgebende Gas als viskose Flüssigkeit. Der Gasfilm ist gefangen und wird zwischen den sich bewegenden Oberflächen verdrängt bzw. komprimiert. In dieser Region kann der Biegeschwinger als oszillierende Kugel mit Radius r beschrieben werden [38]. Der Gütefaktor ist in diesem Bereich abhängig von der dynamischen Gasviskosität μ , dem Gasdruck p und der absoluten Temperatur T :

$$Q = \frac{\alpha}{\mu \cdot (1 + \beta \cdot \sqrt{\frac{p}{\mu}})} \quad \text{Gütefaktor im viskosen Strömungsbereich} \quad (4.27)$$

Mit α und β als Konstanten.

Die Tabelle 4.1 gibt zusammenfassend Druckabhängigkeiten des Gütefaktors Q an:

Bereich	Druckabhängigkeit	Gasdruck
intrinsische Dämpfung	unabhängig	weniger als 1 Pa
molekulare Gasströmung	proportional $1/p$	1 bis 100 Pa
viskose Gasströmung	proportional $1/\sqrt{p}$	über 100 Pa

Tabelle 4.1: Druckabhängigkeit des Gütefaktors

4.4 Elektrostatischer Antrieb

Zum Antreiben resonanter Mikrostrukturen wird oft das elektrostatische Antriebsprinzip genutzt. Die Kammstrukturen des beweglichen Resonators stellen zusammen mit den entsprechenden festen Gegenelektroden eine Kapazität dar. Durch Anlegen einer Spannung zwischen den äußeren Antriebs-Elektrodenkämmen entsteht eine elektrostatische Kraft, die die Platte des Resonators auslenkt. Diese Kraft ist immer so gerichtet, dass die Kapazität maximal wird. Die Kapazität C ist abhängig von der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 , der Feldkonstante des Dielektrikums ϵ_r (für Luft ist $\epsilon_r \approx 1$), der Überlappungsfläche $A [x \cdot y]$, der Elektrodenfinger und des Elektrodenabstands z .

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{z} \quad (4.28)$$

Die Kraft lässt sich berechnen, indem man die Energie eines Kondensators ableitet nach der sich ändernden geometrischen Größe. Die Energie ist nach [142] gegeben durch:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (4.29)$$

Anregung über die seitlichen Kammstrukturen

Bei einem mittig aufgehängten rotatorischen Resonator werden die seitlichen Kammstrukturen zur Anregung genutzt, siehe Abbildung 4.5. In diesem Fall ändert sich der Elektrodenabstand nicht, sondern die Überlappungsfläche.

Die Ableitung nach y ist in Gleichung 4.30 wiedergegeben, die Ableitung nach x berechnet sich analog:

$$F_{el.stat.,y} = \frac{dE}{dy} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{x}{z} \cdot U^2 \quad (4.30)$$

Angetrieben werden die Resonatoren, indem man eine sinusförmige Spannung anlegt. Setzt man $U(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ in Gleichung 4.30 ein erhält man die elektrostatische Kraft in Abhängigkeit von der Zeit. Unter Verwendung der Additionstheoreme erhält man somit folgenden Term:

$$F_{el.stat.,y}(t) = -\frac{1}{4} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{x}{z} \cdot \hat{U}^2 \cdot (1 - \cos(2\omega \cdot t)) \quad (4.31)$$

Man erkennt hieraus, dass die elektrostatische Kraft mit doppelter Frequenz eingeht. Das heisst, dass die Resonatorplatte zweimal pro Periode der Antriebsspannung angezogen wird. Eine Darstellung dieses Verhaltens ist in Abbildung 4.6 abgebildet.

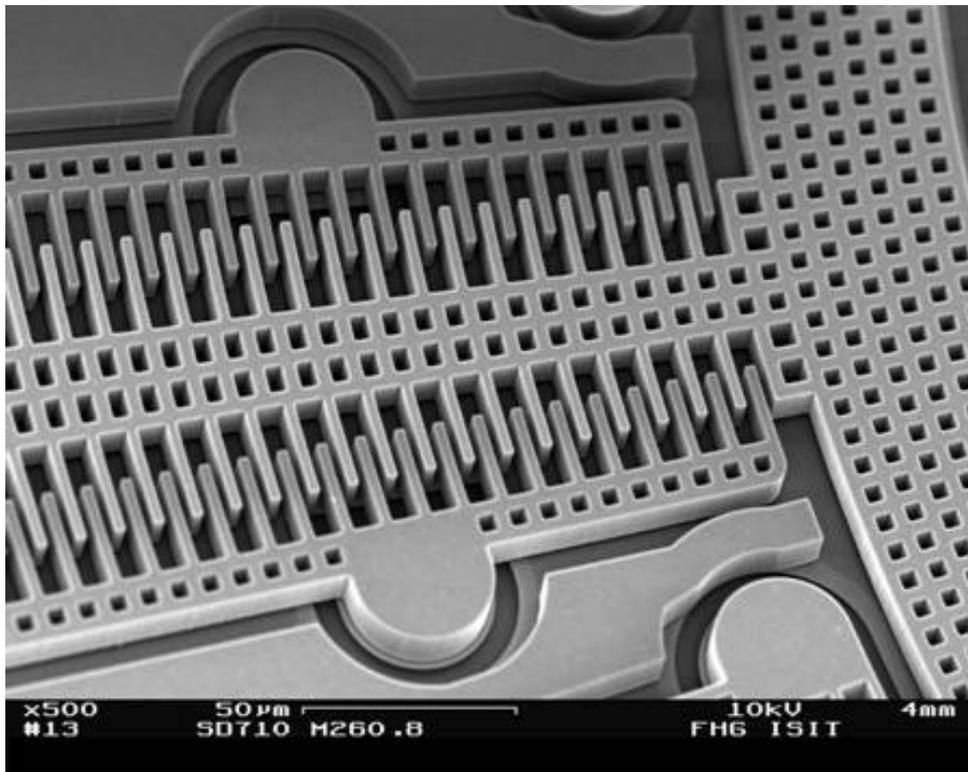


Abbildung 4.5. Seitliche Kammstrukturen zur Schwingungsanregung

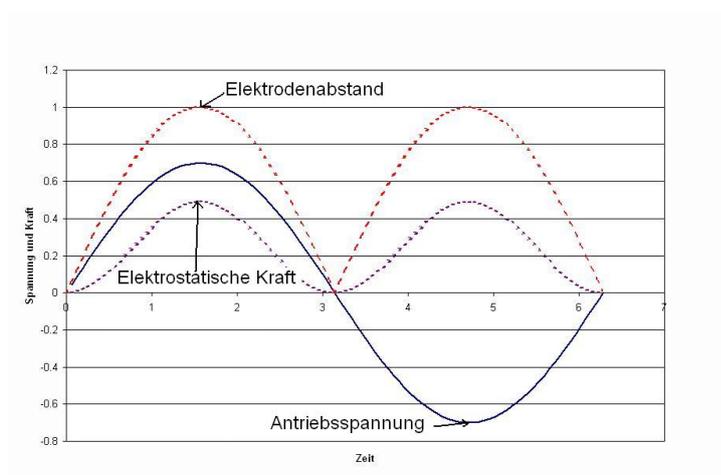


Abbildung 4.6. Elektrostat. Kraft und Elektrodenabstand

5 Hermetizitätstests

Das Verständnis der Funktionsweise existierender Hermetizitätstests und ihrer Einschränkungen ist wichtig für die Entwicklung des Neon Ultra-Feinlecktests. Dieses Kapitel beschreibt den vakuumphysikalischen und messtechnischen Hintergrund des Neon Ultra-Feinlecktests. Hieraus lässt sich die besonders hohe Messempfindlichkeit der Gütefaktorüberwachung erklären. Auf Basis dieser Darstellungen wird das in dieser Arbeit entwickelte Lebensdauermodell für die Vakuumerhaltung in Nanoliter-Gehäusen beschrieben.

5.1 Hermetizitätsanforderungen

Es sind eine ganze Reihe von Hermetizitätstests mit unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften verfügbar. Der Anspruch an die Integrität der Dichtung variiert je nach Gehäuse und Anwendung. Die Testmethoden können nach ihrer Nachweisempfindlichkeit in verschiedene Klassen gruppiert werden [98].

Klasse	Leckrate (cm ³ /Tag)	Leckrate mbar · l/s
grob	~ 8	~ 9 · 10 ⁻⁵
moderat	0,1-0,01	1 · 10 ⁻⁶ – 1 · 10 ⁻⁷
fein	0,01-0,001	1 · 10 ⁻⁸ – 1 · 10 ⁻⁹
extra fein	0,001-0,0001	1 · 10 ⁻¹⁰ – 1 · 10 ⁻¹¹
super fein	0,0001-0,00001	1 · 10 ⁻¹² – 1 · 10 ⁻¹³
ultra fein	0,00001-0,00000001	1 · 10 ⁻¹⁴ – 1 · 10 ⁻¹⁷

Tabelle 5.1: Einteilung der Dichtigkeitsklassen

Die in dieser Arbeit definierten Dichtigkeitsklassen sind in Tabelle 5.1 angegeben. Die hier definierten Dichtigkeitsklassen orientieren sich an den verschärften Anforderungen der stark miniaturisierten Vakuumgehäuse. Der amerikanische ASTM Standard F2391-05 „Standard Test Method for Measuring Package and Seal Integrity Using Helium as the Tracer Gas“ definiert die Dichtigkeitsklassen anders, verwendet aber teilweise gleiche Begrifflichkeiten. Die hermetischste Leckklasse dieses Standards, die „Ultra-fine leaks“, sind hier mit der relativ groben Leckrate im Bereich 10⁻⁸ - 10⁻¹⁰ mbar · l/s definiert. Die Leckraten-Klassen „extra fein“ und „super fein“ fehlen dafür ganz [30].

Es macht nach derzeitigem Kenntnisstand keinen Sinn die Klassifizierung im Bereich kleinster Leckraten noch feiner zu unterteilen. Ggfs. muss der Leckratenbereich für den

ultra-fein Lecktest noch bis nach 10^{-19} mbar · l/s erweitert werden, wenn resonante Sensoren mit Dünnschichtversiegelung und minimalsten Innenvolumina Serienreife erlangen.

Das Kavitätvolumen von auf Waferebene gehäusten Mikrosystemkomponenten kann sehr klein sein und in naher Zukunft nicht selten nur $1 \cdot 10^{-13}$ m³ = 0,1 Nanoliter betragen (100 µm x 100 µm x 10 µm (BxLxH)). Das Gehäusevolumen ist viele Größenordnungen kleiner als in konventionellen Metallgehäusen [66]. Die Kontrolle der eingeschlossenen Atmosphäre über 15 bis 20 Jahre ist heute schon eine Herausforderung. Gleichung 5.1 zeigt auf, dass schon kleinste Leckraten q zu einer schnellen Änderung der Innenatmosphäre $\Delta P/\Delta t$ führen, wenn das Kavitätvolumen V reduziert wird.

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{q}{V} \quad (5.1)$$

Betrachtet man den Helium Feinlecktest mit einer praktischen unteren Nachweisgrenze von $5 \cdot 10^{-12}$ mbar · l/s und ein Gehäuseinnenvolumen von $1 \cdot 10^{-11}$ m³, so ergibt sich aus Gleichung 5.1, dass die anfängliche Druckänderung im evakuierten Gehäuse bis zu 2 mbar pro Stunde betragen kann, bei einem anfänglichen Druckunterschied von 1 bar über den Leckpfad [66]. Dies ist offensichtlich für die meisten Mikrosystem Bauteile nicht vertretbar, weil sich die Innenatmosphäre sehr schnell ändern würde. Hieraus ergibt sich ganz klar die Notwendigkeit für einen sehr viel empfindlicheren Lecktest, der Leckraten bis in den Bereich von 10^{-18} mbar · l/s sicher nachweisen kann.

Eine Nachweisempfindlichkeit für Leckraten im Bereich $4 \cdot 10^{-18}$ mbar · l/s ist notwendig für ein Gehäuse mit $V = 1 \cdot 10^{-11}$ m³ (0,01 mm³), dass innerhalb von 15 Jahren seinen Gehäuseinnendruck von anfänglich 0,1 mbar auf 0,3 mbar verdreifachen darf. Diese Leckrate entspricht einer Gasaufnahme inklusive Ausgasungen und Permeation von 107 Molekülen/s. Für den am ISIT entwickelten Drehratensensor mit einem Innenvolumen von $26,5 \cdot 10^{-11}$ m³ (0,265 mm³) ergibt sich mit der Lebensdauerforderung von 15 Jahren und einer zulässigen Druckänderung von 0,15 mbar auf 0,35 mbar eine maximal zulässige Luft Leckrate von $1,26 \cdot 10^{-16}$ mbar · l/s. Durch die Verwendung von Getter wird diese Forderung um etwa einen Faktor 300 entspannt.

Alterung in Luft

Die Auswahl des Edelgases zur Bedämpfung der resonanten Schwingung hat entscheidenden Einfluss auf die maximal zulässige Leckrate des Mikrosensors und damit auf die Vakuumlebensdauer des Sensors. Während der Lebensdauer wird Luft durch eventuell vorhandene Leckpfade in die Sensorkavität eindringen. Es ist Aufgabe des Getters alle eindringenden aktiven Luftgase während der Lebensdauer des Sensors zu binden [10] [85]. Natürlich setzt das eine Getterschicht voraus, die nicht schon beim Waferbondprozess durch Ausgasen gesättigt wird und die eine ausreichend hohe Getteraktivität auch bei niedrigen Temperaturen aufweist. Zu den aktiven Luftgasen gehören vor allem N₂, O₂, CO₂, H₂O, H₂ aber auch Methan aus Fäulnisprozessen und verschiedene Industrieabgase wie H₂S, Cl etc . In der eindringenden Luft sind auch Edelgase mit unterschiedlichem Partialdruck enthalten, die vom Getter nicht gebunden werden können und folglich zu einem Druckanstieg in der Sensorkavität führen [85]. Die Tabelle 5.2 listet die in der Normluft enthaltenen Gase mit ihrem Partialdruck und der Molekülmasse auf [2], [137].

Als häufigstes Edelgas ist Argon mit einem Partialdruck von 9,3 mbar in der Luft vorhanden, gefolgt von Neon mit einem Partialdruck von $1,2 \cdot 10^{-2}$ mbar und Helium mit $5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Alle anderen Edelgase sind vergleichsweise selten und für die Betrachtung der Vakuumlebensdauer im Bauelement irrelevant. Für alle Mikroresonatoren mit Kavitätssinnendruck kleiner 5 mbar und integriertem Getter stellt Argon das hauptsächlich zu betrachtende Schadgas dar.

Wasser als Schadgas

Neben den in der Luft vorhandenen Edelgasen muss insbesondere Wasserdampf als mögliches Schadgas betrachtet werden. Eindringende Feuchte kann den Getter frühzeitig sättigen und zu einem Druckanstieg in der Bauteilkavität führen. Dies ist insbesondere wegen des relativ hohen Wassergehaltes von rund 23 mbar (oder 1,57 Volumen % bei 50 % relativer Luftfeuchte und 23 °C [51]) der Luft relevant und wird durch die oft feuchtwarmen Qualifizierungsprozesse für elektronische Bauelemente noch zunehmend wichtiger. Derzeit werden aus Kostengründen kaum noch hermetische Gehäuse aus Metall oder Keramik zur weiteren Verarbeitung von Mikrosensoren eingesetzt. Während der Qualifizierungsprozesse wirkt deshalb z.B. die Feuchte beim 1000 h Test mit 85 % relativer Feuchte und 85 °C Umgebungstemperatur direkt auf die Dichtungs- und Fügezone des Bauelementes ein. Die beschleunigten Alterungsuntersuchungen zielen primär auf die Aufdeckung von Schwachstellen hinsichtlich Korrosion und Interfacedelamination ab [100]. Die zu klärende Fragestellung ist das Verhältnis von Wasserleckrate zu Luftleckrate. Genauer muss der Zusammenhang insbesondere im Bereich sehr kleiner Standard Luftleckraten $< 10^{-8}$ mbar · l/s für den Fall eines sehr kleinen Druckgradienten (innen 10^{-3} mbar zu außen 23 mbar) und den Fall eines sehr hohen Druckgradienten (innen 10^{-3} mbar zu außen 2000 mbar) über einen Leckpfad untersucht werden. Diese Frage wird um so dringender zu beantworten sein, je mehr sich zusätzlich der Drucktopftest mit gesättigtem Wasserdampf bei 2 bar Absolutdruck und 121 °C als zu bestehender Qualifizierungstest durchsetzt [100][69][91]. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese aufwendigen Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt werden. Untersuchungen der Fa. Raytheon zu dieser Thematik

Molekül	Partialdruck bei 1000 mbar	Molekülmasse
Stickstoff	780,9 mbar	28 g/mol
Sauerstoff	209,5 mbar	32 g/mol
Kohlendioxid	0,3 mbar	44 g/mol
Wasser	~ 23 mbar	18 g/mol
Kohlenmonoxid	~ 10^{-4} mbar	28 g/mol
Wasserstoff	$5 \cdot 10^{-4}$ mbar	2 g/mol
Argon	9,3 mbar	40 g/mol
Neon	$1,8 \cdot 10^{-2}$ mbar	20 g/mol
Helium	$5 \cdot 10^{-3}$ mbar	4 g/mol
Xenon	$8,8 \cdot 10^{-5}$ mbar	131 g/mol
Krypton	$1,1 \cdot 10^{-3}$ mbar	84 g/mol
Luft bei 293 K	1000 mbar	29 g/mol

Tabelle 5.2: Zusammensetzung der Luft [137][34]

an kleinen hermetischen Gehäusen mit bekannten Luftleckraten bestätigen einen linearen Zusammenhang der Luftleckrate im Verhältnis zur Wasserdampf Leckrate für den Grobbleckbereich [63]. Ab dem Feinleckbereich stimmen die experimentell gewonnenen Daten nicht mehr mit Berechnungen überein, die die Leckrate zunehmend stark unterschätzen. Die Untersuchungen bestätigen für Wasserdampf folgende Eigenschaften:

- Wasserdampf dringt schnell auch noch in Gehäuse mit sehr kleinen Lecks ($< 10^{-11}$ mbar \cdot l/s) ein.
- Die Wasserdampf Leckrate kann mit der Annahme molekularer Gasströmung beschrieben werden.
- Für Gehäuse mit kleinsten Innenvolumina sind die im Militärstandard 883 definierten zulässigen Innenfeuchten nicht streng genug.
- Messabweichungen bei Bauteilen mit Feinleck legen den Schluss nahe, dass Wasser in Kapillaren kondensiert und diese mitunter permanent abdichtet.

Die Beobachtung von sich permanent verschließenden Lecks während der experimentellen Bestimmung der Wasserdampf Leckrate wurde auch an anderer Stelle gemacht [129][45]. Hieraus könnte sich auch ein Ansatz zur dauerhaften Abdichtung von Gehäusen mit Feinlecks als Reparaturstrategie ergeben. Durch Temperaturbehandlung kann die Mehrzahl verstopfter Lecks wieder geöffnet werden. Die wenigen permanent verstopften Lecks können ggfs. durch eine Querschnittsverengung des Leckpfades erklärt werden. Hierzu kann es kommen, wenn z.B. gelöste Salze auskristallisieren oder chemische Prozesse zu einer Volumenänderung der Wandungsmaterialien führen. Daraus abgeleitet könnte eine Reparaturstrategie aus dem Einbringen von wasserunlöslichen Salzen in den Anfangspunkt eines Leckpfades bestehen, gelöst in organischen Lösungsmitteln mit guten Benetzungseigenschaften.

Für sehr kleine Leckgeometrien könnte sich ein neuer Transportmechanismus der Wassermoleküle entlang der Kapillarenwandungen als dominant herausstellen. Die Neigung von Wassermolekülen exponierte Oberflächen zu bedecken ist lange bekannt [51]. Die hohe latente Verdampfungswärme von Wasser von 44 kJ/mol [80] führt dazu, dass sich ein dauerhafter, molekularer Wasserfilm auf den Kapillarenwandungen ausbildet. Sobald der Leckpfad über die gesamte Länge mit Wassermolekülen bedeckt ist können Wassermoleküle an dessen Übergang zur Vakuumkavität direkt in diese abdampfen und Innendruck erhöhen bzw. zuerst die Wandungen belegen. Über kurzreichweitige Diffusion werden die Lücken aufgefüllt, es stellt sich ein Strom von gebundenen Wassermolekülen ein, ähnlich einem osmotischen Transport in Zellmembranen.

5.2 Hermetizitätstests

Die Tabelle 5.2 zählt die bekannten Testmethoden mit ihren charakteristischen Eigenschaften auf:

Die Betrachtung der Tabelle 5.2 zeigt auf, dass nur drei nicht zerstörende Verfahren Leckraten mit annähernd der notwendigen Nachweisempfindlichkeit messen können. Im Folgenden werden die heute für mikrosystemtechnische Bauteile häufig eingesetzten Lecktests kurz charakterisiert.

Verfahren	Nachweisgrenze [mbar · l/s]	quantitativ	Eigenschaften
Blasentest (Groblecktest)[98]	$1 \cdot 10^{-5}$	nein	Lokalisierung grober Lecks und Verifizierung von Feinlecks bei Helium/Kr ⁸⁵ Lecktest
Farbstoff Markierung [98][1]	-	nein	Prüfung von Schweißnähten, Materialfehlern
Druckabfall [98]	$1 \cdot 10^{-5}$	ja	Prüfung von Druckkesseln und Gasanschlüssen
Membranresonanz	$1 \cdot 10^{-8}$	ja	benötigt sehr dünne Sensormembran (ca. 20 µm dick), schädigt ggfs. Sensorstrukturen
Optische Verformungsmessung [102]	$5 \cdot 10^{-8}$	ja	Metallgehäuse, jedoch stark geometrieabhängig
Helium Lecktest [120][129][1]	$5 \cdot 10^{-12}$	ja	limitiert auf Gehäuseinnenvolumen $\geq 5 \text{ mm}^3$
Kr ⁸⁵ Lecktest [74][120][1]	$1 \cdot 10^{-12}$	ja	Umgang mit Radioisotopen
Überwachung der Güte	$1 \cdot 10^{-17}$	ja	nur für Mikroresonatoren geeignet
interne Druckmessung [127][42]	$1 \cdot 10^{-15}$	ja	Mikrogehäuse mit integriertem µ-Pirani Drucksensor
kumulative chem. Reaktion [66]	$5 \cdot 10^{-16}$	ja	IR Transmissionsmessung oxidierter Metallschichten
Restgas Analyse [131]	Gaszusammensetzung	ja	zerstörender Test, aufwendig für kleine Gehäuse

Tabelle 5.3: Verfahren zur Überprüfung der Hermetizität

Farbstoffmarkierung

Spezielle kriechfähige Tinten erlauben die Dekorierung makroskopischer Materialdefekte wie Risse und Poren. Dieses Verfahren wird bei Industriegütern, z.B. geschweißten Druckkesseln zur Begutachtung der Wandung und gelegentlich bei polymervergossenen Mikrochips ohne Kavitätvolumen zur Überprüfung von Delaminationen eingesetzt. Das Verfahren kann wegen der verdeckten Fügezone (optisch oft nicht sichtbar) nur schwer für nichtzerstörende Lecktests an Mikrobauteilen eingesetzt werden [87]. An hermetischen Metallgehäusen mit Glas-Metalldurchführungen können Bruchstellen jedoch lokalisiert werden [45][1].

Membranresonanz

Bei Mikrosensoren mit Membrandeckel, insbesondere Absolutdrucksensoren, kann die freie Beweglichkeit der Membran zur Innendruckvermessung eingesetzt werden. Hierzu werden die zu vermessenden Bauteile in einem evakuierten Gefäß in vertikale Schwingungen versetzt, um eine resonante Membranschwingung anzuregen, siehe Abbildung 5.1. Die Membranschwingung wird durch ein Laserinterferometer sehr empfindlich gemessen. Sobald der Kammerinnendruck mit dem Gehäuseinnendruck übereinstimmt, ergibt sich die maximale Schwingungsamplitude der Membran. Aus der Differenzmessung vor und nach einer Überdruckauslagerung z.B. in Helium kann eine Leckrate für das Testgas berechnet werden. Die Methode ist nur auf Membransensoren mit Membrandicken bis ca. 20 μm anwendbar, wobei das Verhältnis von Membranfläche zu Membrandicke die Messauflösung mitbestimmt und sogar die Anwendbarkeit auf sehr kleine Bauteile in Frage stellt. Die Messung pro Bauteil ist relativ langwierig, weil für jedes Bauteil der Kammerdruck neu einreguliert und die individuelle Resonanzfrequenz der Membran bestimmt werden muss. Für Bauteile mit empfindlichen schwingungsfähigen Strukturen birgt diese Messtechnik die Gefahr einer mechanischen Überbeanspruchung. Eine absolute Referenzmessung zur Bestimmung des eingeschlossenen Absolutdrucks bzw. die Messung einer Eichkurve ist schwierig. Hierzu müssen Bauteile mit gelochtem Boden (entsprechen Relativdrucksensoren) eingesetzt werden, um den Effekt der Membranverspannung durch den verbliebenen intrinsischen Stress vom Waferbonden zu berücksichtigen.

Groblecktest

Der Groblecktest dient zum Aufspüren grober Leckagen und zur Verifizierung der Testergebnisse von Helium- und Kr^{85} Lecktest. Zu prüfende Gehäuse werden in ein Lösemittel mit niedrigem Siedepunkt eingebracht und mit einem Überdruck beaufschlagt, der das Lösemittel durch Öffnungen ins Gehäuseinnere drückt. Die Gehäuse werden nachfolgend grob getrocknet und in heißes Wasser überführt, wodurch das Lösemittel im Gehäuse verdampft. Der Dampf tritt durch die Öffnungen im Gehäuse aus. Der Blasenstrom hält in der Regel länger an und Verschlussdefekte können lokalisiert werden.[1]

Optische Verformungsmessung

Das von der Firma NorCom Systems entwickelte Verfahren basiert auf der Messung einer Membran- oder Deckelverbiegung in einer Helium-Überdruckatmosphäre [101]. Durch die

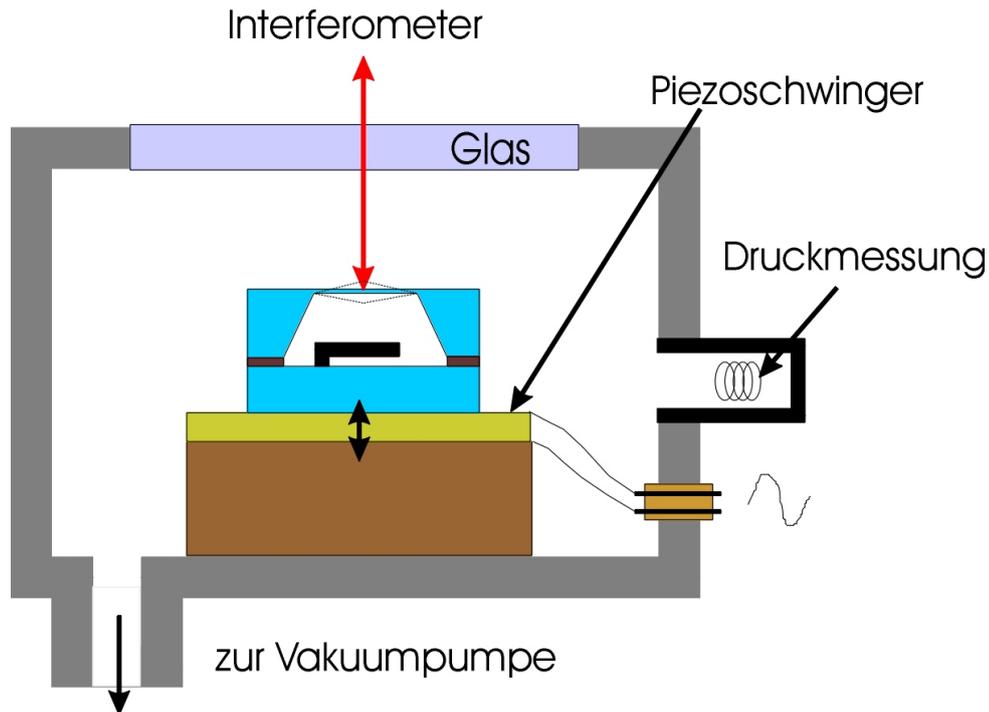


Abbildung 5.1. Prinzip des Messaufbaus zur Messung der Membranresonanz

permanente Messung der Verbiegung können zeitliche Änderungen z.B. durch eindringendes Gas mit einer Wegmessauflösung im Bereich $0,5 \mu\text{m}$ aufgezeichnet werden. Aus dem Kurvenverlauf wird interpretiert, ob ein Fein- oder Grobleck vorliegt. Hierbei hilft zusätzlich eine geringe Modulation des Überdrucks in Form von Druckstößen, die bei Groblecks zu einem nichtlinearen Verhältnis von Druckstoss zu Membrangeschwindigkeit führen soll. Durch die Verwendung von optischen Fasersensoren kann der Test gleichzeitig für mehrere Bauteile (ca. 10) durchgeführt werden. Die Messauflösung ist vergleichbar zum Helium-Lecktest, wenn die Gehäusewandungen nicht zu dick sind oder geometrische Beschränkungen die Membranverformung limitieren. Der Test eignet sich primär zur Überprüfung von geschweißten Metallgehäusen mit dem Vorteil, dass kein zusätzlicher Groblecktest durchgeführt werden muss.

Helium-Lecktest

Beim Helium-Lecktest werden mehrere Gehäuse gleichzeitig einem Heliumüberdruck für eine bestimmte Zeit ausgesetzt. Die Gehäuse werden danach einzeln in eine Vakuumkammer transferiert, in der das aus undichten Gehäusen ausströmende Helium mit einem Massenspektrometer gemessen wird. Das ausströmende Helium wird dabei in der Regel nur einmal gemessen und über eine Vakuumpumpe abgepumpt. Die Messauflösung verschlechtert sich in der praktischen Anwendung dieses Verfahrens über den Tag, weil der Helium Untergrund durch Anreicherungen in der Messumgebung stetig zunimmt. Auf die jeweiligen Transferzeiten der einzelnen Gehäuse von der Überdruckauslagerung zur Vermessung des austretenden Heliums muss sehr streng geachtet werden. Die Evakuierungsdauer der Messeinrichtung, während der auch das Gehäuse leergepumpt wird, begrenzt die Anwendbarkeit des Tests auf nicht zu kleine Gehäuseinnenvolumina, in der Regel $\geq 5 \text{ mm}^3$ und gleichzeitig nicht zu große Leckraten im Bereich $\leq 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$. Um Groblecks

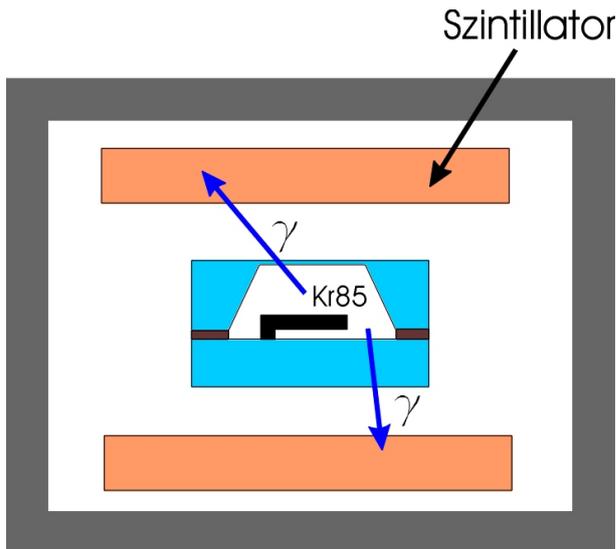


Abbildung 5.2. Messaufbau zum Nachweis der Kr^{85} Gamma-Strahlung

sicher von sehr feinen Lecks identifizieren zu können muss nach dem Helium-Lecktest ein Groblecktest durchgeführt werden[1].

Kr^{85} -Lecktest

Das Krypton85 Radioisotop gibt beim radioaktiven Zerfall γ -Strahlung mit $\sim 0,5$ MeV ab, die durch alle gebräuchlichen Gehäusewände dringen kann [74][120]. Nach einer Überdruckauslagerung in $\text{Kr}^{85}\text{-N}_2$ Mischgas verbleibt das Krypton in einem undichten Gehäuse. Die Bauteile werden in eine Szintillator-Zählkammer transferiert, in der die Gammaquanten registriert werden, siehe Abbildung 5.2.

Die festgestellte Gammazählrate R^* ergibt sich zu

$$R^* = (PV) \cdot A \cdot K \quad (5.2)$$

wobei P der Kr^{85} Partialdruck im Gehäuse, PV die Gasmenge von Kr^{85} bei Umgebungstemperatur im Gehäuse, A die Aktivität des unverdünnten Kr^{85} und K die Registrierungseffizienz des Detektors für ein spezifisches Gehäuse ist. Die sehr hohe Nachweiswahrscheinlichkeit für eingedrungenes Krypton85, die Unabhängigkeit der Auslagerungsdauer vom Gehäusevolumen im Gegensatz zum Helium-Lecktest und der geringe Einfluss von Transferzeiten wegen der geringen Gasmobilität von Krypton im Vergleich zu Helium sind positive Eigenschaften dieses Tests. Das radioaktive Gas bedingt aber auch besondere Sicherheitsvorkehrungen und wird wegen Zulassungsbeschränkungen nur verdünnt mit Stickstoff eingesetzt. Das Messequipment und alle Dichtungen werden mit der Zeit radioaktiv. Der Einsatz dieses Tests auf Waferebene ist nicht möglich, weil bei sehr dicht benachbarten Gehäusen die Zuordnung des aufgezeichneten Gammaquants zu einem individuellen Gehäuse verloren geht. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, muss nach dem Kr^{85} -Test ein zusätzlicher Groblecktest durchgeführt werden[1].

Interne Druckmessung

Das Verfahren der internen Druckmessung verwendet miniaturisierte Drucksensoren zur Messung des Druckanstiegs in einem Gehäusevolumen. Zumeist werden aufgehängte Poly-

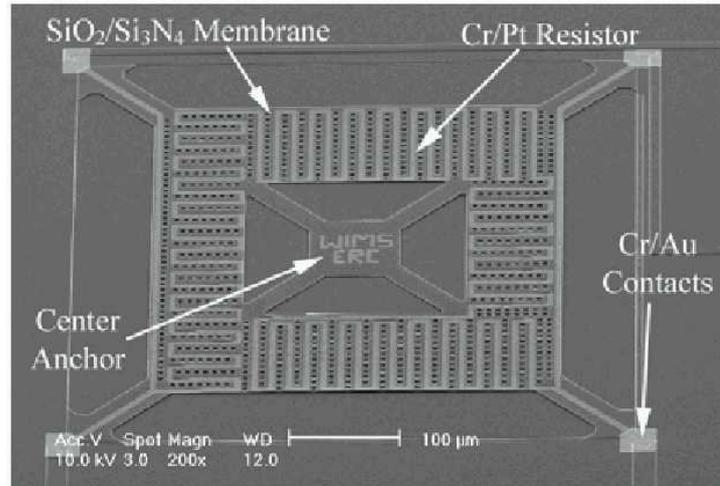


Abbildung 5.3. Aufnahme eines doppelt geankerten μ -Pirani-Sensors mit 800 nm Luftspalt zum Substrat [127].

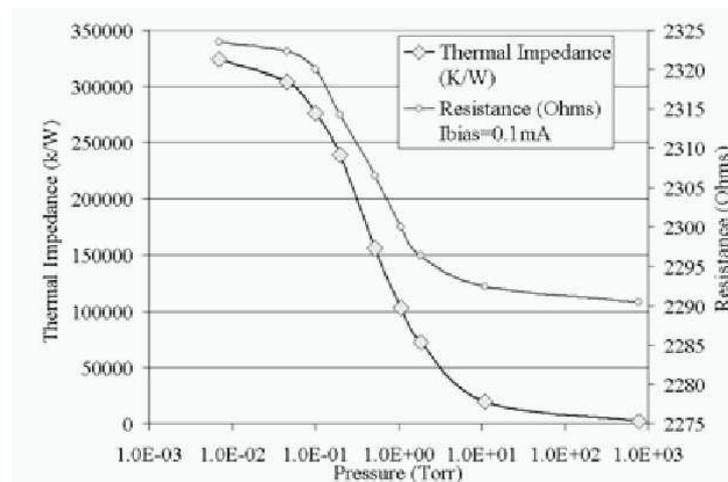


Abbildung 5.4. Thermische Impedanz und elektrischer Widerstand des μ -Pirani-Sensors in Abbildung 5.3 in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks [127].

Silizium Widerstandsbrücken als Pirani-Sensoren eingesetzt. Im Betrieb wird ein Stromfluss aufgeprägt, der den Widerstand erwärmt. Über die Widerstandsänderung der Struktur kann deren Temperatur bestimmt werden. Ein reduzierter Umgebungsdruck vermindert die Wärmeverluste über das Gas an das Substrat und die Temperatur und damit nimmt der Widerstand zu. Optimierte Sensorentwürfe für sehr niedrige Druckbereiche maximieren hierzu das Verhältnis der Wärmeverluste durch das Gas H_g vs. der Wärmeverluste durch die Aufhängung H_a und verlängern die Basislänge der aufgehängten Struktur [95], siehe Abbildung 5.3.

Die Bestimmung der Leckrate für Luft läuft analog ab wie im vorher vorgestellten Verfahren der Güteüberwachung. Es muss eine Eichkurve für den μ -Pirani-Sensor erstellt werden, siehe Abbildung 5.4. Aus dieser Kurve kann der Kavitätsdruck vor und nach einer Überdruckauslagerung bestimmt werden. Messauflösungen für Leckraten im Bereich $1 \cdot 10^{-15}$ mbar \cdot l/s werden erreicht [127]. Auch bei diesem Verfahren ist die Verwendung von Neon wg. der relativ guten thermischen Leitfähigkeit gegenüber Argon vorzuziehen. Grundvoraussetzung zur Erzielung sehr hoher Messreproduzierbarkeiten ist ein sehr stabi-

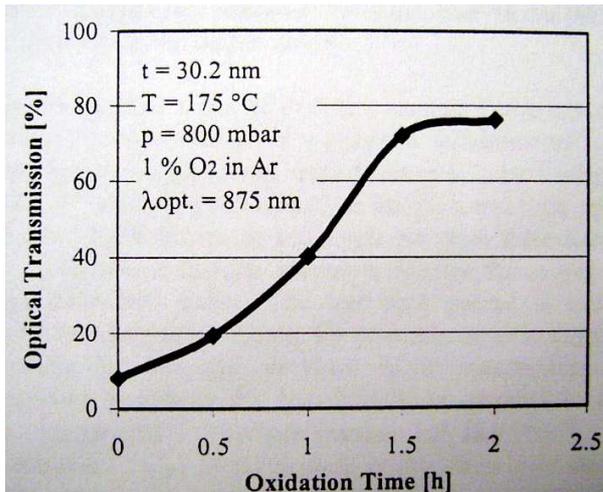


Abbildung 5.5. Änderung der optischen Transmission bei $\lambda = 875 \text{ nm}$ an einem 30 nm dicken Kupferfilm bei 175 °C Oxidationstemperatur [66].

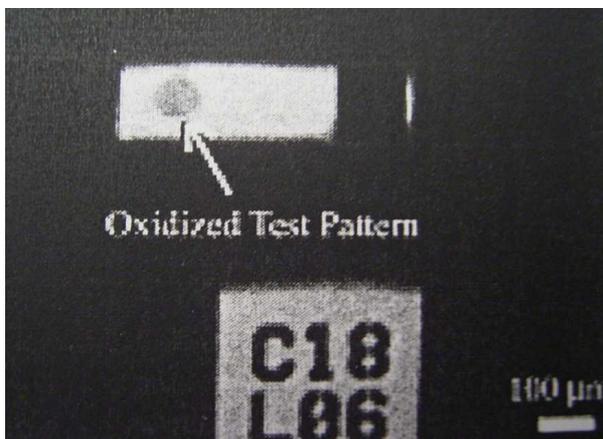


Abbildung 5.6. Kupfer Testfläche in einem undichten magnetostatischen MEMS Schalter (erscheint schwarz bei hermetischem Gehäuse) [66].

ler Herstellungsprozess der Heizerstrukturen in Bezug auf den Abstand zum Substrat und eine vernachlässigbare Alterungsdrift der elektrischen Kennwerte der Widerstandsbrücke.

Kumulative chemische Reaktion

Ein eher ungewöhnliches Messverfahren ist die Detektion einer kumulativen chemischen Reaktion, z.B. der Oxidation von dünnen Kupferfilmen, die zum Nachweis von eingedrungenem Prüfgas (z.B. Sauerstoff) ausgenutzt werden kann. Der Oxidationsgrad ausgewählter Metallschichten kann durch eine einfache optische Transmissionsmessung im Infrarot-Spektrum ausgemessen werden. Sowohl Pyrex-Gehäuse als auch Silizium-Bauteile können unter Verwendung langwelliger IR Strahlung ($\sim 1 \mu\text{m}$) ausgemessen werden. Die optische Transmission von Kupferoxid nimmt mit dem Oxidationsgrad zu, siehe Abbildung 5.5. Die Überdruckauslagerung kann in Reinsauerstoff-Atmosphäre bei erhöhter Temperatur im Bereich 125 °C bis 150 °C durchgeführt werden. Eine Erhöhung der Messempfindlichkeit wird durch die Verringerung der Kupferfläche erzielt (auf ca. $25 \mu\text{m}$ Durchmesser der Testfeld Fläche), bei einer typischen Kupferschichtdicke von rund 30 nm , siehe Abbildung 5.6.

Im Fall von Kupfer erzielt man ein optisches Kontrastverhältnis von 11 bei 875 nm Wellenlänge zwischen oxidiertem und nicht-oxidiertem Zustand. Die Verhältnisse reichen zur Verwendung einer einfachen IR LED Beleuchtung und einer IR empfindlichen CCD Kamera ohne IR Filter aus [66]. Im automatisierten Betrieb wird die Form

der Testfläche mit einem Bildverarbeitungs-Algorithmus im Bild detektiert und die Bildhelligkeit in diesem Bereich ausgewertet. Der von Kupfer freigestellte Umgebungsbereich dient zur Eichung der Maximalhelligkeit. Die Messauflösung der patentierten Methode liegt bei Leckraten $> 5 \cdot 10^{-16}$ mbar·l/s [66].

Eine Einschränkung ergibt sich jedoch aus dem Messprinzip des Verfahrens für Mikrobauteile mit Getter. Durch den Getter wird eine reduzierte Oxidation der Messflächenmetallisierung auftreten, die zu einer wesentlichen Unterschätzung der Leckraten führt.

Restgasanalyse

Die Restgasanalyse (RGA) ist ein zerstörendes Testverfahren, das oft zur Überprüfung nichtzerstörender Hermetizitätstests eingesetzt wird. In einer besonders konstruierten Vakuumkammer werden Bauteile im Hochvakuum mechanisch aufgeschlagen und das ausströmende Gas wird mit einem Massenspektrometer analysiert. Das Verfahren ist wegen der erforderlichen Ausheizphase der Vakuumanlage sehr aufwendig und langwierig. Die Interpretation und Normierung der Daten erfordert sehr viel vakuumphysikalisches Wissen. Bedingt durch die eingeschränkten Möglichkeiten Mikrobauteile im Hochvakuum zu handhaben sind Einschränkungen für die Bauteilgeometrie gegeben. Die geringe Messempfindlichkeit der Massenspektromer setzt Bauteilinnenvolumina von mindestens $0,1 \text{ mm}^3$ voraus. Neue Entwicklungen im Bereich der Gasanalyse scheinen diese Limitierung jedoch zu durchbrechen und Messungen an Gehäusen mit 30 Nano Liter Innenvolumen zu erlauben [131]. Die Stärke der RGA-Untersuchung liegt allgemein in der Angabe der Gaszusammensetzung, aus der Prozessdefizite wie z.B. Argonausgasung von Metallschichten abgelesen werden können.

Überwachung des Gütefaktors

Über die Messung der Güte eines Resonators kann mittels einer Eichkurve (Q vs. P) eine Aussage über den Innendruck in der Sensorkavität gemacht werden. Resonante Inertialsensoren sind somit auch sensible Drucksensoren für einen eingeschränkten Druckbereich. Bei der Überwachung des Gütefaktors wird die Druckzunahme in einem Gehäuse während einer Überdruckauslagerung in einem Testgas durch eine Differenzmessung des Gütefaktors bestimmt. Der Test ist auch anwendbar auf Sensoren, die nicht resonant arbeiten (z.B. oberflächenmikromechanische Beschleunigungssensoren), die aber für eine Messung resonant angeregt und ausgelesen werden können. Alternativ kann für den Lecktest eine resonante Teststruktur zusätzlich in die Sensorkavität integriert werden.

Die hohe Messempfindlichkeit resultiert aus der Vielzahl von fortwährenden Interaktionen des Resonators mit der Bedämpfungsatmosphäre. Messungen können zudem beliebig wiederholt und gemittelt werden, weil anders als beim Helium-Test das eingedrungene Testgas im Gehäuse verbleibt und die resonante Messung zudem Störungen weitestgehend unterdrückt.

5.3 Knudsen-Parametrisierung

Knudsen hat den Leitwert von langen Röhren basierend auf experimentellen Befunden mathematisch beschrieben [79]. Die KNUDSEN-Gleichung integriert die kinetische Gas-

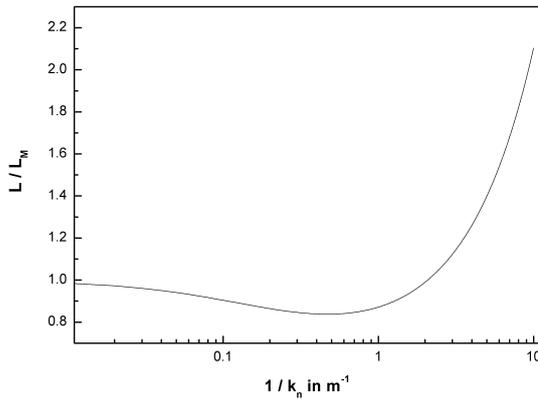


Abbildung 5.7. Das Knudsenminimum der Gasströmung im Übergangsbereich ergibt sich aus dem Verhältnis des Leitwertes zum molekularen Leitwert als Funktion der reziproken Knudsen Zahl $K_n = \frac{\lambda}{r}$.

theorie zur Berechnung des Leitwertes L von langen Röhren im Fall molekularer Strömung mit der POISEUILLE-Strömungsgleichung für viskose Strömung und einer Interpolationsfunktion, bestimmt durch experimentelle Daten, zur Beschreibung der Gasströmung im Übergangsbereich.

$$L = \frac{\pi r^4 p_a}{8 \eta l} + \frac{4r^3}{3l} \cdot \sqrt{\frac{2\pi kT}{m} \cdot \frac{1 + 2.507 \frac{r}{\lambda_a}}{1 + 3.095 \frac{r}{\lambda_a}}} \quad (5.3)$$

Hierbei ist l die Länge der Röhre, r der Radius der Röhre, p_a ist der mittlere Druck in der Röhre, λ_a ist die mittlere freie Weglänge des Gases beim Druck p_a , k ist die BOLTZMANN Konstante und m ist das Molekulargewicht des strömenden Gases. Das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge zum Radius der Röhre wird Knudsenzahl genannt: $K_n = \lambda/r$. Tison bestätigt durch eigene Leitwertuntersuchungen an Metallröhren mit Kapillarlecks die Formel von KNUDSEN und weist die Existenz eines Leitwertminimums im Bereich der Übergangsströmung nach, siehe Abbildung 5.7.

Aus seinen experimentellen Befunden kann die Beschreibung des Leitwertes in der KNUDSEN-Formel noch exakter gefittet werden. Basierend auf der exakter gefitteten KNUDSEN-Formel beschreibt Tison den Gesamtleitwert in langen Röhren bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen, jedoch mit konstantem Radius r über die Länge l mit der sogenannten KNUDSEN-Parametrisierung [132]:

$$L = b \cdot r^3 \cdot \left(0.1472 \frac{r}{\lambda} + \frac{1 + 3.50 \frac{r}{\lambda}}{1 + 5.17 \frac{r}{\lambda}} \right) \quad (5.4)$$

wobei

$$b = \frac{4}{3l} \cdot \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}}. \quad (5.5)$$

Die Formel reduziert sich für $\lambda \gg r$ auf den molekularen Leitwert einer Röhre der Länge l und Radius r für ein strömendes Gas mit dem Molekülgewicht M in g/mol bei der absoluten Temperatur T in K:

$$L_M = 9.83 \cdot \frac{r^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (5.6)$$

Die Leckrate q für die molekulare Gasströmung durch das Rohr berechnet sich als Produkt des Leitwertes L und dem Druckgradienten $p_1 - p_2$:

$$q = L \cdot (p_1 - p_2) = 9.83 \cdot \frac{r^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot (p_1 - p_2) \quad (5.7)$$

Aus der beschriebenen vereinheitlichenden Knudsen-Parametrisierung ergibt sich der Leitwert L für den Spezialfall eines glatten Kapillarlecks der Länge l und einem offenen Kapillarradius r zu:

$$L = 9.83 \cdot \frac{r^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (5.8)$$

Der Leitwert L hängt damit von der Gastemperatur und der Molekularmasse ab. Dieser Term steht für die Gasbeweglichkeit. Ein geometrischer Vorfaktor bestimmt als Eintritts- und Durchgangswahrscheinlichkeit die Proportionalität. Die tatsächlichen Kapillargeometrien lassens sich mit dieser Gleichung nicht erschließen, jedoch kann man mit Gleichung 5.8 verifizieren, ob die Grundannahme eines Transportmechanismus mit molekularer Gasströmung zutreffend ist. Auslagerungsversuche bei stark erniedrigter Temperatur und mit schwereren Gasen müssen rechnerisch (bei Berücksichtigung der geänderten Versuchsparemeter) die gleichen Leckraten für ein undichtes Gehäuse ergeben.

5.4 Neon Ultra-Feinlecktest

Bestimmung der Eichkurve

Eine Eichkurve der Resonatorbedämpfung in Abhängigkeit des Drucks ist der Schlüssel, um aus Gütefaktorveränderungen während einer Überdruckauslagerung eine Aussage über den Innendruck in der Sensorkavität zu machen. Da im für die Anwendung interessanten Knudsen-Bereich der Gütefaktor unabhängig von der Gasviskosität ist, muss die Eichkurve nicht zwingend mit unterschiedlichen Testgasen aufgenommen werden. Zur Überprüfung der Theorie wurde dies jedoch mit den Testgasen Neon, Argon und Stickstoff durchgeführt. Nach Gleichung 4.26 ist der Gütefaktor gering temperaturabhängig, weshalb die Messung in einer temperaturkontrollierten Umgebung durchgeführt werden muss. Zudem ist das Elastizitätsmodul im Fall von Poly-Siliziumfedern temperaturabhängig [92]. Die primäre Resonanzfrequenz ist proportional zur Wurzel des Elastizitätsmoduls. Messungen an jeweils drei gleichartigen Resonatoren bei drei unterschiedlichen Temperaturen (kalt = -30 °C, Raumtemperatur (RT) = 25 °C, warm = + 80°C) wurden durchgeführt.

Sensor	F ₁ bei -30°C	F ₁ bei 25°C	F ₁ bei 80°C
chip 1=SOIC-001	5644 Hz	5633 Hz	5627 Hz
chip 2=SOIC-054	5502 Hz	5494 Hz	5486 Hz
chip 3=SOIC-109	5506 Hz	5498 Hz	5490 Hz
E-Modul gefittet	170,6 GPa	170 GPa	169,6 GPa

Tabelle 5.4: Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz

Nimmt man bei Raumtemperatur einen Wert von 170 GPa ergibt ein Fit E=170,6 GPa bei -30 °C und E=169,6 GPa bei +80 °C. Die Standard Abweichung des Fits ist 1,2 Hz. Ausgehend von der Resonanzfrequenz eines Sensors bei Raumtemperatur kann die entsprechende Frequenz bei unterschiedlichen Temperaturen mit einer Genauigkeit von +/- 1,2 Hz berechnet werden.

$$f_{1,kalt} = \sqrt{\frac{E_{-30^{\circ}C}}{E_0}} \cdot f_{1,RT} \quad (5.9)$$

Dieses Ergebnis kann in der Form zusammengefasst werden, dass sich das E-Modul um 7,3 MPa pro Grad Celsius im warmen Bereich verringert und um 10,9 MPa im kalten Bereich. Der Übergang ist fließend. Das Ergebnis ist konsistent mit der Literatur, die für den Temperaturbereich von 0°C bis 100°C eine Abnahme des E-Moduls von rund 10 MPa pro Grad Celsius angibt [92].

Die Abbildung 5.8 zeigt nochmals grafisch diese Temperaturabhängigkeit an vier mehrfach gemessenen Sensoren. Ein Sensor fällt dabei jedoch aus unbekanntem Gründen für die Messung bei Raumtemperatur aus dem Rahmen.

Die Resonanzfrequenz der vermessenen Bauteile muss dokumentiert werden, weil der Gütefaktor nach Gleichung 4.12 frequenzabhängig ist. Es ist nicht möglich die Druckabhängigkeit der Güte für eine beliebige Resonatorstruktur exakt zu berechnen. Deshalb ist es nötig, eine Gütekurve über einen Druckbereich von 10⁻⁴ mbar bis 1 mbar (ggfs. bis 10 mbar) am offenen Sensor in einem Vakuumgefäß zu messen, siehe Abbildung 5.9. Man erhält eine Eichkurve für den spezifischen Sensortyp für eine Temperatur. Sofern

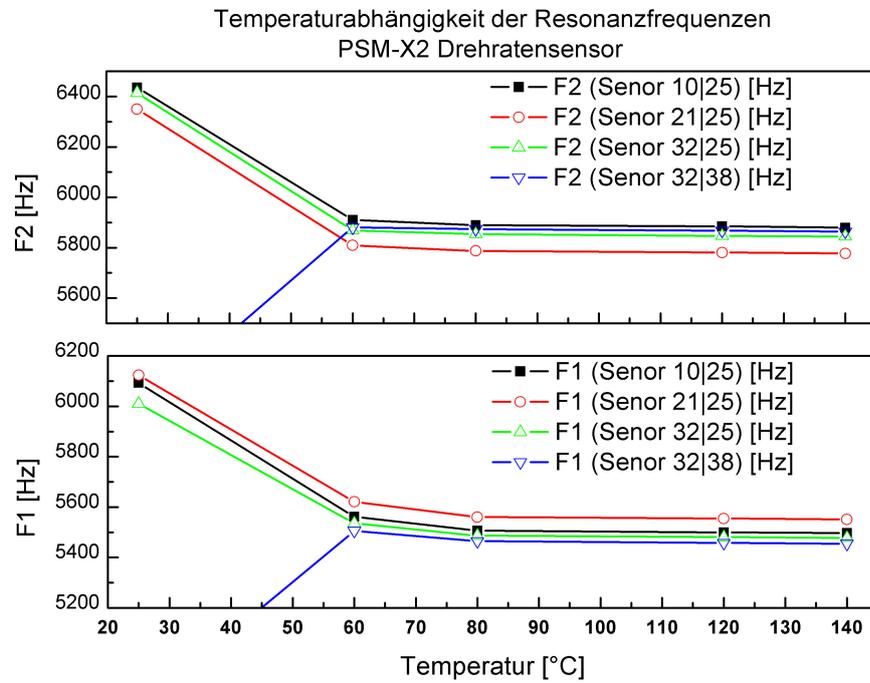


Abbildung 5.8. Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenzen

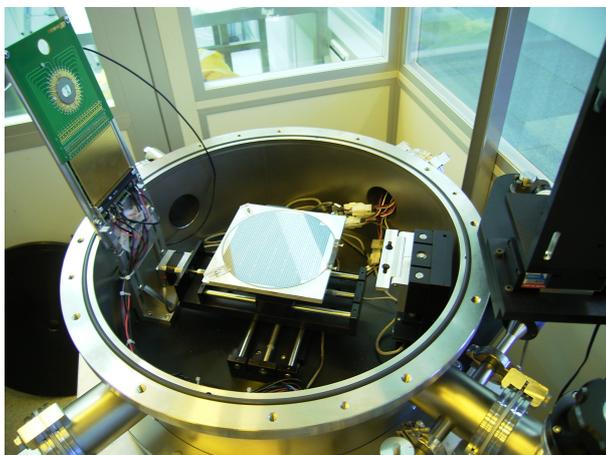


Abbildung 5.9. Vakuumprober zur Messung unverkapselter Sensoren

Prozessschwankungen zu sehr verschiedenen Resonanzfrequenzen führen, müssen diese für die Gütefaktor-Eichkurve separat gemessen werden. Durch die Verwendung einer frequenzunabhängigen Eichkurve der Dämpfung δ vrs. p wird diese allgemein auch für Sensoren mit prozessbedingten Resonanzverschiebungen einsetzbar. Die späteren Screening Messungen der Güte bzw. der Dämpfung müssen bei der gleichen Temperatur wie die Messung der Eichkurve durchgeführt werden, um den Einfluss der temperaturabhängigen Güte zu vermeiden. Aus der Eichkurve ergeben sich verschiedene wichtige Parameter für einen Sensortyp:

1. der für eine ausreichende Vibrationsdämpfung notwendige Rückfülldruck,
2. der zulässige Innendruck am Ende der Sensorlebensdauer,
3. der Temperaturgang der Dämpfung während verschiedener Betriebszustände des Sensors.

Abbildung 5.10 zeigt als Beispiel die Abhängigkeit des Gütefaktors vom Kavitätsdruck für den am ISIT entwickelten Drehratensensor. Die Eichkurve in Abbildung 5.10 weist unterschiedliche Steigungen auf. Man kann die Kurve grob in drei Bereiche unterteilen:

- hochgütiger Bereich ($Q \geq 80.000$) mit starkem Einfluss der intrinsischen Dämpfung und geringer Abhängigkeit vom Umgebungsdruck,
- mittulgütiger Bereich ($80.000 \geq Q \geq 2000$) mit molekularer Gasdämpfung proportional zum Umgebungsdruck
(nur dieser Bereich ist für die Leckratenbestimmung relevant!)
- niedergütiger Bereich ($Q \leq 2000$) mit viskoser Gasdämpfung.

Bestimmung der Auslagerungsparameter

Der Neon Ultra-Feinlecktest bestimmt den Innendruck eines Gehäuses indirekt über die Dämpfung eines resonanten Schwingers. Ähnlich wie beim Helium- und Kr^{85} -Lecktest muss der Gastransportmechanismus während der Überdruckauslagerung und für die Wartezeit danach bis zur Messung bekannt sein. Zudem muss ein brauchbares mathematisches Modell erstellt werden, um die Auslagerungsparameter festzulegen.

Anders als beim Helium- und Kr^{85} -Lecktest ergibt sich aber beim Neon Ultra-Feinlecktest keine Zweideutigkeit der Beziehung zwischen Messergebnis und vorliegendem Gasleck. Bei einem Feinleck strömt wenig Neon während der Überdruckauslagerung in das Gehäusevolumen ein und verringert den Gütefaktor nur wenig. Liegt ein Grobleck vor, strömt entsprechend viel Neon ein und die große Verstimmung des Gütefaktors weist eindeutig auf ein Grobleck hin. Der relativ hohe Neon Partialdruck in der Luft von $1,8 \cdot 10^{-2}$ mbar, siehe Tabelle 5.2, reduziert effektiv die sich nach der Überdruckauslagerung einstellende Neon Ausströmung aus Gehäusen mit Grobleck. Im Falle von Feinlecks kompensiert der Neon Partialdruck der Luft ausströmendes Neon und bei Ultra-Feinlecks stellt sich ein effektiver Neon Gasfluss in das Gehäuse ein, wenn auch vernachlässigbar klein. Fehlinterpretationen des Messergebnisses durch abgepumptes (Helium) oder ausgeströmtes (Kr^{85}) Testgas kommen beim Neon Ultra-Feinlecktest damit nicht vor. In der Konsequenz ergibt

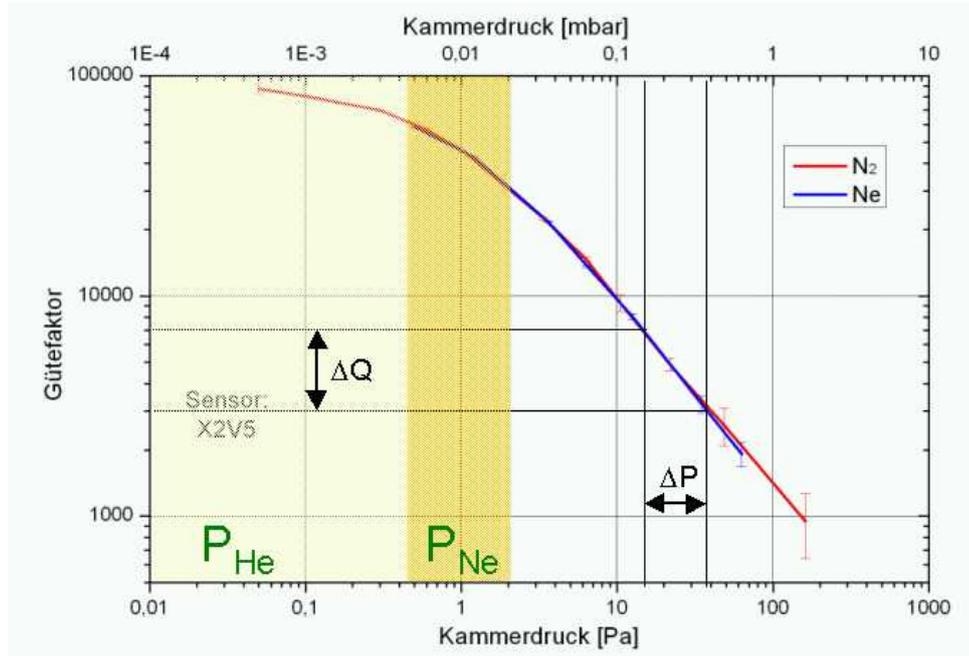


Abbildung 5.10. Beispielhafte Eichkurve der Sensorgüte mit eingetragenem Toleranzbereich des Gütefaktors über die Bauteillebensdauer. Der tolerierbare Vakuumverlust liegt bei diesem Bauelement bei 0,2 mbar in 15 Jahren, was einer Verschlechterung von rund 17 % pro Jahr entspricht!

sich ein relativ einfaches mathematisches Modell zur Bestimmung der Auslagerungsparameter.

Der Gas-Transportmechanismus bei sehr kleinen Strömungslecks wird durch die Molekularströmung beschrieben [120][63][132][79]:

$$V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta t} = L \cdot (P_1 - P_2) \quad (5.10)$$

mit dem für die Gasaufnahme verfügbaren freien Gehäuseinnenvolumen V , VdP/dt ist die Strömungsrate (Leckrate q) (in oder aus dem Gehäuse) bei Umgebungstemperatur, L ist der molekulare Strömungsleitwert des Leckkanals (oder effektiven Lecks) und P_1 und P_2 sind die Partialdrücke des Testgases an jedem Ende des Leckkanals.

Die Leckrate q kann als Gesamtleckrate durch ein oder mehrere vorhandene molekulare Strömungslecks unbekannter Geometrie verstanden werden, siehe Abbildung 5.11. Das Prüfgas dient im eigentlichen Sinne dazu den Leitwert L des effektiven Gesamtlecks für das Prüfgas zu ermitteln.

Unter der Voraussetzung, dass die Durchlaufwahrscheinlichkeit für alle Gase gleich ist und dass nur diffuse Reflexion der Gasmoleküle an den Wänden des Leckpfades vorkommt (also keine spiegelnde Reflexion, keine chemische Reaktion und auch keine dauerhafte Adsorption) lassen sich die Leitwerte L_{gas} unterschiedlicher Gase mit dem Molekulargewicht M_{gas} bei gleicher Temperatur mit der Formel 5.11 ineinander umrechnen [137]:

$$\frac{L_{gasA}}{L_{gasB}} = \sqrt{\frac{M_{gasB}}{M_{gasA}}} \quad (5.11)$$

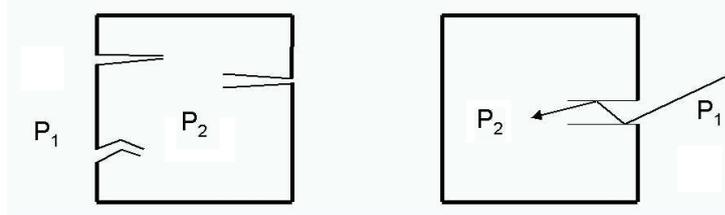


Abbildung 5.11. Mehrere Strömungslecks unbekannter Geometrie werden zu einem Gesamtleck (effektives Gasleck) mit Leitwert L zusammengefasst.

Die Umrechnung des Leitwertes für ein Gas bei verschiedenen Temperaturen erfolgt mit Gleichung 5.12 [137]:

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (5.12)$$

Über das effektive Gesamtleck dringt auch Luft in das Gehäuseinnere ein. Die Leckrate für Luft bei 1 bar Umgebungsdruck errechnet sich aus der Summe der Einzelleitwerte für alle Luftgase und ihrem spezifischen Partialdruckunterschied zum Gehäuseinneren:

$$q_{Luft} = \sum_{Luftgase} L_{Gas} \cdot (P_{Gas,Luft} - P_{Gas,Kavität}) \quad (5.13)$$

In sehr guter Näherung kann man für Gehäuse mit geringem Innendruck mit Hilfe von Gleichung 5.11 und dem mittleren Molekulargewicht der Luft von 28,98 g/mol direkt den Neon Leitwert des Gesamtlecks in eine Standard Luftleckrate umrechnen [137]. Es ergibt sich:

$$q_{Luft} = L_{Ne} \cdot 0,8316 \cdot P_n \quad (5.14)$$

Per Definition ist die Standard Leckrate q für ein gegebenes Gas die Strömungsrate, die sich bei 1013 mbar Gasdruck strömungsaufwärts zum Leckkanal und 0 bar strömungsabwärts einstellt, so dass nach Gleichung 5.10 gilt:

$$q = L \cdot P_0 \quad (5.15)$$

für P_0 gleich 1013 mbar [120][137].

Aus Gleichung 5.10 und 5.15 folgt für ein zuvor nicht exponiertes Gehäuse bei Auslagerung in einem Testgas beim Druck P_E für eine Auslagerungszeit t ein sich einstellender Innenpartialdruck P von

$$P = P_E \cdot \left[1 - e\left(-\frac{q}{P_0 V} t\right) \right] \quad (5.16)$$

Der sich einstellende Druck ist proportional zum Druck des Testgases und nicht linear abhängig von der Auslagerungszeit.

Nach Beendigung der Überdruckauslagerung strömt das Testgas aus dem undichten Gehäuse wieder aus. Der Partialinnendruck des Testgases im Gehäuse nimmt exponentiell mit der Wartezeit t' ab:

$$P = P_E \cdot \left[1 - e\left(-\frac{q}{P_0 V} t'\right) \right] \cdot e\left(-\frac{q}{P_0 V} t'\right) \quad (5.17)$$

Sofern das Gehäuse schon vorgetestet wurde oder mit dem Testgas vorbefüllt war, liegt ein Partialinnendruck P' vor. Der sich nach einer Überdruckauslagerung im Testgas einstellende Partialinnendruck P ergibt sich damit zu:

$$P = \left[P' + [P_E - P'] \cdot \left[1 - e\left(-\frac{q}{P_0 V} t'\right) \right] \right] \cdot e\left(-\frac{q}{P_0 V} t'\right) \quad (5.18)$$

Die Druckänderung im Gehäuse ist deshalb bestimmt durch eine Zeitkonstante

$$\tau = \frac{P_0 V}{q}. \quad (5.19)$$

Das eingedrungene Testgas verbleibt als Gasballast im Gehäuse und die Druckzunahme kann (in-)direkt über die Gasdämpfung des Resonators gemessen werden. Die messbare Gütefaktoränderung $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ mit einem Gütefaktor Q_1 vor der Auslagerung und einem Gütefaktor Q_2 nach der Auslagerung beträgt:

$$\ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) = K \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (5.20)$$

wobei P_1 der Innendruck vor der Auslagerung und P_2 der Innendruck nach der Auslagerung ist, und K ist der Dämpfungsfaktor für ein ausgewähltes Testgas und Resonatordesign. Der Dämpfungsfaktor ist jedoch keine vom Innendruck unabhängige Konstante. Dies ist beispielsweise beim entsprechenden Zähleffizienzfaktor des Kr^{85} -Tests anders. Für die hier interessanten Absolutinnendrucke von 10^{-2} bis 1 mbar herrscht eine Stoßwechselwirkung des Gases mit dem Resonator vor. Einflüsse von viskosen Verdrängungsströmungen (Squeeze Film Damping) können ausgeklammert werden.

Mit Gleichung 5.17 und ergibt sich aus Gleichung 5.20 mit einer Einschränkung auf große Zeitkonstanten für die Standard Leckrate q eine einfache Abhängigkeit vom Auslagerungsdruck in einem definierten Testgas:

$$q = P_E \cdot K \cdot t \quad (5.21)$$

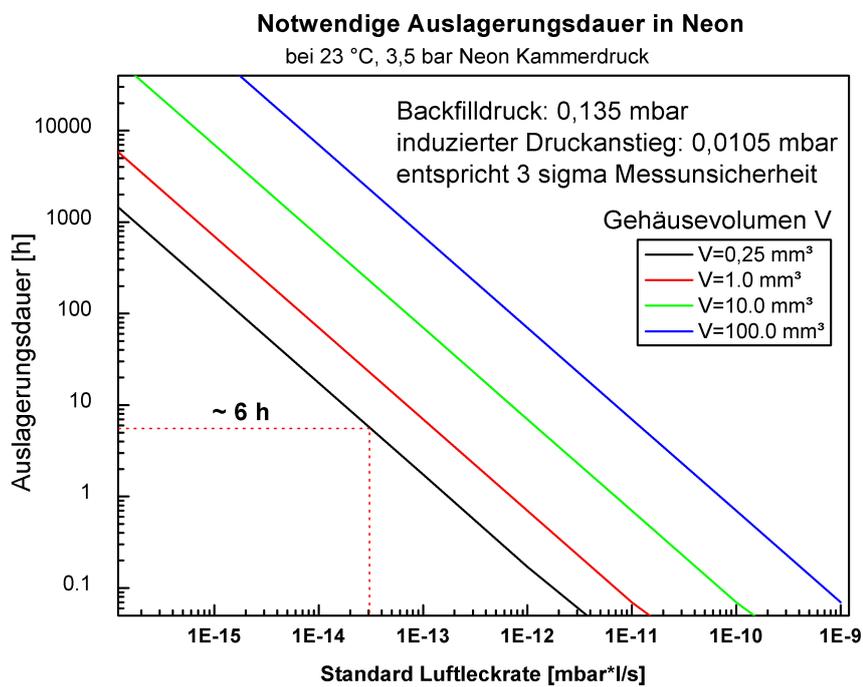


Abbildung 5.12. Die Auslagerungszeit in Neon nimmt mit abnehmendem Gehäuseinnenvolumen ebenfalls ab und mit zunehmender Dichtigkeitsanforderung zu. Lange Auslagerungszeiten können durch Erhöhung des Auslagerungsdrucks reduziert werden.

Die Auslagerungszeit

Um den Neon Ultra-Feinlecktest zum 100 % Screening nutzen zu können, muss eine noch akzeptable kritische Standard Luftleckrate für das Testgas (nachfolgend als die kritische Leckrate bezeichnet), für den Gehäusetyp und die Anwendung definiert werden. Diese ergibt sich in der Regel aus vorgegebenen Spezifikationen und anderen Einschränkungen z.B. der Leistungsfähigkeit des ASICs zur Resonatoranregung und dem Toleranzbereich der Bauteilkalibrierung.

Die notwendige Auslagerungszeit $t_{bomb} = \Delta t$ in Neon Überdruckatmosphäre ergibt sich aus der Gleichung 5.10 mit der Vernachlässigung des absoluten Innendrucks zu:

$$t_{bomb} = \frac{V \cdot \Delta P}{L_{Ne} \cdot P_1} \quad (5.22)$$

mit dem für die Gasaufnahme verfügbaren freien Gehäuseinnenvolumen V , der Gastemperatur T , der molekularen Masse M , einem aus der kritischen Luftleckrate rückgerechneten kritischen molekularen Strömungsleitwert des Lecks für Neon L_{Ne} , dem Neon Auslagerungsdruck P_1 und dem für eine Leckdetektion notwendigen Druckanstieg ΔP während der Messung. Um sicher zu gehen sollte dieser Druckanstieg um einen Faktor 3-10 mal höher als die Messunsicherheit der Druckbestimmung liegen.

Die Abbildung 5.12 zeigt notwendige Auslagerungszeiten für verschiedene Gehäusevolumen. Um sicher eine Leckrate nachzuweisen, soll ein Druckanstieg induziert werden, der 3 Sigma der Messunsicherheit entspricht. Bei einem Gehäusevolumen mit 0,25 mm mit einem Argon-Rückfülldruck von 0,135 mbar (entspricht $Q \sim 6500$) muss eine Auslagerungszeit von mindestens 6 Stunden in Neon bei 3,5 bar und 23 °C eingehalten werden, um die Bauteile auf eine kritische Leckrate von $3 \cdot 10^{-14}$ mbar · l/s zu prüfen. Die notwendige Auslagerungsdauer in einer Neon Überdruckatmosphäre nimmt für große Gehäusevolumen und kleine kritische Leckraten stark zu. Praktische Auslagerungszeiten unter 100 h sind bei Leckratenforderungen $< 10^{-14}$ mbar · l/s nur für Gehäusevolumen unter 1 mm realisierbar. Sofern diese Forderung jedoch reduziert werden kann ergeben sich auch für größere Gehäuse neue Möglichkeiten. Bemerkt sei jedoch, dass in einem großen Gehäuse jeweils ein unverkappter Resonator als Gütefaktormonitor eingebaut sein müsste, was nicht der eigentlichen Intention des Neon Ultra-Feinlecktests entspricht.

Lebensdauermodell der Vakuumhaltung

Der Neon Ultra-Feinlecktest kann verwendet werden um undichte Bauteile mit einer zu großen Luftleckrate schon nach der Herstellung auf Waferebene zu identifizieren. Für Bauteile mit zulässiger Leckrate können aus den Messergebnissen Hinweise auf den zu erwartenden Vakuumverlust in der Gehäusekavität abgeleitet werden. Die Prognose beruht auf dem messtechnisch bestimmten Neon Leitwert, der in eine Standard Luftleckrate umgerechnet wird. Hierbei wird das Leck als zeitlich unveränderlich angenommen. Es handelt sich also um eine Aussage bezogen auf die Initial-Leckrate des Bauteils, direkt nach seiner Herstellung und vor eventuellen zusätzlichen Gehäusungsschritten.

Berechnung des Innendrucks aus einem gemessenen Gütefaktor im Bereich 20.000 bis 1000 für die linear gefittete Eichkurve ($\log Q = A + B \log P$) in Abbildung 5.4.

$$P = e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{Q}{10^4}\right)}{B}\right)} \quad (5.23)$$

mit Fitparametern $A = 4,790$ und $B = -0,814$.

Die Berechnung des Luftleitwerts basiert auf dem mit dem Testgas bestimmten Gesamtleitwert, normiert auf die Messtemperatur T_0 bei der Bestimmung der Eichkurve, in dieser Arbeit z.B. $T_0 = 296K$:

$$L = \frac{-V \cdot \ln\left(\frac{P_E - P}{P_E - P'}\right) \cdot \sqrt{\frac{M_{Neon}}{M_{Luft}}}}{\sqrt{\frac{T_{bomb1}}{T_0}} \cdot t_{bomb1} + \sqrt{\frac{T_{bomb2}}{T_0}} \cdot t_{bomb2}} \quad (5.24)$$

Die Standard Luftleckrate ergibt sich als Produkt des Luftleitwerts mit dem Luftdruck.

Der sich am Ende der Bauteillebensdauer in der Kavität angesammelte Gasballast hängt von der Rückbefüllung und Ausgasungen während des Waferbondens ab und den in der Luft enthaltenen Gasen. Für jedes relevante Luftgas muss der Partialdruckanteil am gesamten Gasballast einzeln berechnet werden. In der Gleichung 5.24 wird schon berücksichtigt, dass im Betrieb des Sensors im Automobil mindestens zwei unterschiedliche Beanspruchungen vorliegen. Im Fahrbetrieb bei hohen Temperaturen stellt sich eine höhere Leckrate als beim Parken des Autos ein. Jedoch sind die jeweiligen Dauern über eine durchschnittliche Nutzungsdauer eines Autos von 15 Jahren recht unterschiedlich. Als schlimmsten Fall kann man annehmen, dass ein Auto während seiner gesamten prognostizierten Nutzungsdauer von 8000 Stunden mit Höchstbelastung gefahren wird und der Sensor dabei $125^\circ C$ heiß wird. Das Auto parkt den Rest der Zeit von rund 123.000 Stunden bei einer mittleren Temperatur von $15^\circ C$.

$$P_{gas} = P_{gasLuft} - (P_{gasLuft} - P_{gasinitial}) \cdot \exp\left[-L_{gasT_0} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \cdot t_1 - L_{gasT_0} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_0}} \cdot t_2\right] \quad (5.25)$$

Nach Gleichung 5.25 verringert sich die zeitliche Partialdruckzunahme immer weiter bis der Außendruck am Ende auch im Gehäuseinneren vorliegt.

Diese Gleichung beschreibt aber auch ebenfalls die Überdruckauslagerung in einem Testgas bei zwei unterschiedlichen Auslagerungsbedingungen (z.B. Druck oder Gastemperatur variiert). Für einen Sensor mit großer Getterkapazität C für aktive Luftgase ist im Wesentlichen die Argonkonzentration in der Luft als primäres Schadgas zu betrachten. Lässt man alle anderen Edelgase der Luft in der Betrachtung weg, so ergibt sich aus der Luftzusammensetzung in Tabelle 5.2 ein Fehler von nur 0,22 %.

Die kritische Luftleckrate, bei der dann in diesem Fall der Getter am Ende der Lebensdauer versagt berechnet sich wie folgt:

$$L_{Luft,kritisch} = \frac{\text{Getterkapazität} - \text{Vorsättigung}}{\sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \cdot t_1 + \sqrt{\frac{T_2}{T_0}} \cdot t_2} \quad (5.26)$$

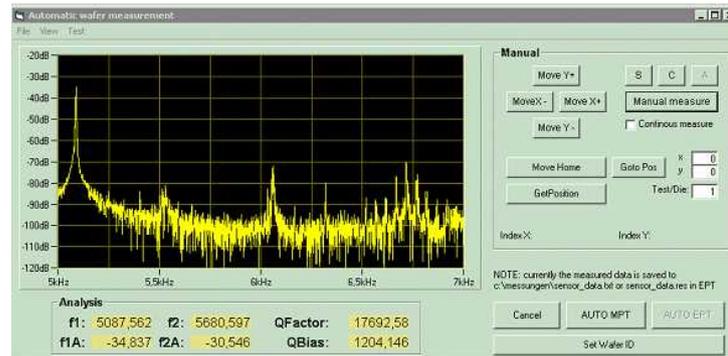


Abbildung 5.13. Identifikation der Resonanzfrequenz durch Frequenzchirp.

Der kritische Argonleitwert ergibt sich aus der Gleichung 5.25 durch Auflösen nach L_{Ar,T_0} . Hierbei ist der Parameter P_{gas} gleich dem kritischen Argoninnendruck bei dem das Bauteil ausfällt. Der Parameter $P_{gas_{Luft}}$ ist gleich dem Partialdruck von Argon in Luft und der Parameter $P_{gas_{initial}}$ ist gleich dem Rückfülldruck mit Argon während der Bauteilverkappung. Zum Vergleich mit der im Neon Lecktest bestimmten Leckrate muss der Argonleitwert erst in eine äquivalente Luftleckrate umgerechnet werden.

Der kleinere von beiden kritischen Leitwerten bestimmt die Lebensdauer des Bauelementes beim Betrieb in Luft. Dieser Wert muss im Vergleich größer sein, als die mittels Neon Ultra-Feinlecktest ermittelte Luft Leckrate. Nur diese Bauelemente sind ausreichend dicht um den Lebensdauieranforderungen zu entsprechen.

Messtechnische Bestimmung des Gütefaktors

Die verwendete Messtechnik und die Auswertalgorithmen insbesondere die Signalfilterung zur Rauschunterdrückung hat entscheidenden Einfluss auf die Messauflösung und Reproduzierbarkeit der Gütemessung. Die Ring-Down-Methode, bei der die zeitliche Amplitudenabnahme des Resonators kapazitiv gemessen wird, hat sich am ISIT bewährt, um möglichst genaue Messwerte mit einem Waferprober automatisch aufzunehmen. Die Methode erlaubt sowohl die Ermittlung der mechanischen Resonanzfrequenz F_1 der angetriebenen Ringschwingung als auch der sich bei Drehungen einstellenden Verkippungsschwingung F_2 des am ISIT entwickelten Drehratensensors.

Zur Vermessung der Resonanzfrequenz werden an die entsprechenden Antriebs-Elektroden sog. Chirpsignale angelegt. Hierbei wird die Frequenz eines Sinussignals mit definierter Amplitude periodisch von einer Start- zu einer Endfrequenz erhöht. Liegt die Resonanzfrequenz des Sensors innerhalb des Frequenzbandes, so beginnt dieser aufgrund seines bandpassähnlichen Verhaltens genau bei dieser zu Schwingen. Eine Analyse des Frequenzspektrums mittels FFT zeigt deutlich den sich ausbildenden Resonanzpeak der Ringschwingung, siehe Abbildung 5.13. Neben dem Resonanzpeak der Drehschwingung treten weitere Nebenresonanzen auf.

Für die Vermessung des Gütefaktors Q als Maß für den Sensorinnendruck wird der Sensor in eine resonante Drehschwingung versetzt. Nachdem der Einschwingvorgang abgeschlossen ist, wird die Anregung abgeschaltet und die Abklingkurve aufgenommen. Je niedriger der Umgebungsdruck, d.h. je geringer die Gasdämpfung, desto langsamer nimmt die

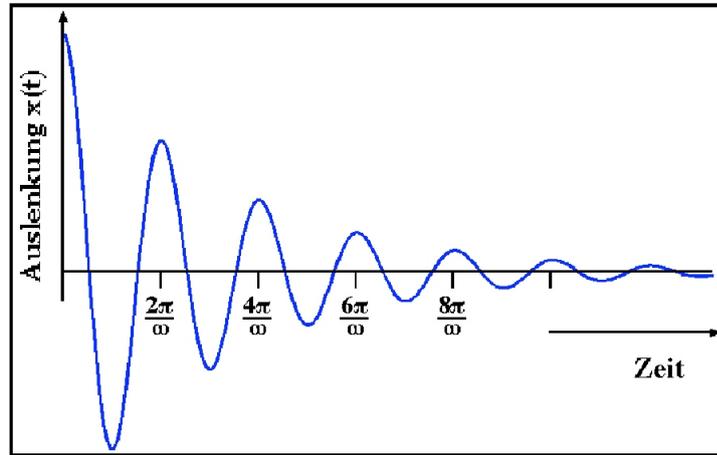


Abbildung 5.14. Abnehmende Amplitude einer gedämpften Schwingung

Schwingungsamplitude über die Zeit ab. Der Abfall ist nach [142] folgendermaßen mit dem Gütefaktor Q verknüpft:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\omega_0}{2 \cdot Q} \cdot t} \quad (5.27)$$

mit der Resonanzfrequenz ω_0 . Die Schwingungsamplitude eines unverkappten Mikroresonators kann über ein Laservibrometer, dessen Ausgang an ein Oszilloskop angeschlossen ist, direkt zugänglich gemacht werden. Durch einen Frequenzgenerator kann ein Resonator in eine resonante Schwingung versetzt werden. Beim Abschalten des Frequenzgenerators wird so die Abklingkurve am Oszilloskop aufgenommen. Die Amplitudenmesswerte können elektronisch an einen PC übertragen und weiterverarbeitet werden. Die Zeitinformation muss hierzu noch ergänzt werden. Die Abbildung 5.14 zeigt beispielhaft ein Amplitudensignal. Im normalen Messbetrieb kann das Vibrometer wegen der Siliziumkappen nicht eingesetzt werden. Die Abklingkurve wird durch Messung der an den Anregungselektroden anliegenden Spannung gemessen:

$$\text{Spannung der Ringschwingung: } U_{MS}(t) = \hat{U} \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t) \quad (5.28)$$

Da das Amplitudensignal auch ungewollte Frequenzen enthält die das Nutzsignal überlagern, werden die Messwerte zunächst zwecks einer Frequenzfilterung einer Fourier Transformation unterzogen. Ein Bereich um 150 Hz um die Resonanzfrequenz wird bei dieser Filterung durchgelassen, alle anderen Frequenzen werden herausgefiltert. Bei der nachfolgenden Rücktransformation erhält man dann eine Abklingkurve, die nur noch die Schwingungen in diesem Frequenzbereich enthält. Aus dieser Kurve bestimmt man die maximalen Auslenkungen, wie in Abbildung 5.15 eingezeichnet, so dass man die Einhüllende der Abklingkurve erhält. Diese Meßwerte werden nun logarithmiert, da das Abklingverhalten sich nach Gl. (5.27) exponentiell verhält, und man fittet eine Gerade durch diese Punkte, siehe Abbildung 5.16. Die Steigung a_0 dieser Geraden liefert dadurch den Exponenten der e - Funktion $\delta = \frac{\omega_0}{2 \cdot Q}$ und damit ergibt sich der Gütefaktor zu:

$$Q = \frac{\omega_0}{2 \cdot \delta} \quad (5.29)$$

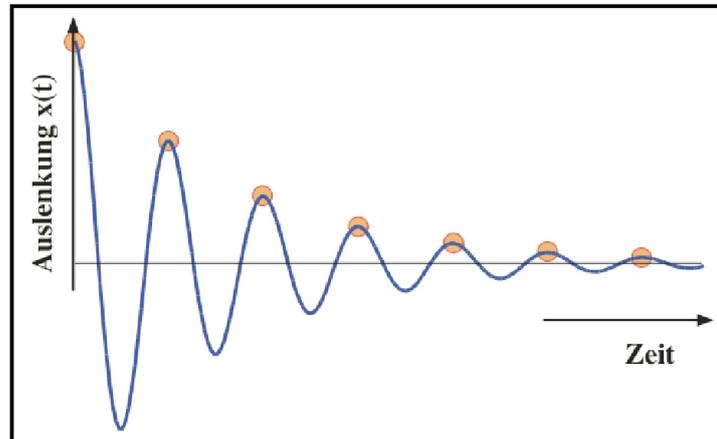


Abbildung 5.15. Amplitudenmaxima bestimmen zeitlichen Verlauf der Abklingkurve

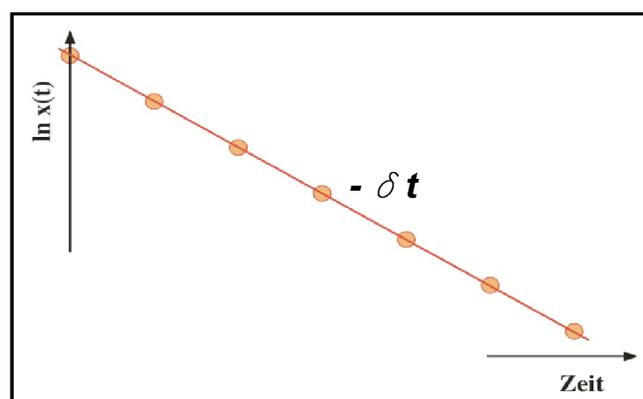


Abbildung 5.16. Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten mit linearem Fit

Einflussgrößen auf Messempfindlichkeit

Für eine präzise Bestimmung des Gütefaktors ist es wichtig unterschiedliche Einflüsse auf die Messsicherheit zu betrachten. Im Wesentlichen sind dies:

1. Referenzdruckmessung
Ungenauigkeiten bei der Messung der Eichkurve verursachen Abweichungen vom Absolutdruck in der Sensorkavität
2. Temperatur
aufgrund der temperaturabhängigen Gasviskosität verursachen Temperaturabweichungen zur Eichkurve Messfehler
3. Bauteil Individualität
prozesstechnologisch verursachte Geometrieänderungen z.B. der Epipolydicke, der Federgeometrie oder von Verbiegungen aufgrund von Stress im Silizium-Epilayer führen zu Verstimmungen der Resonanzfrequenz und geringen Abweichungen von der Eichkurve
4. Messdauer
ungünstig parametrisierte Messabläufe erreichen nicht die gleiche Messsicherheit bei Bauelementen mit stark unterschiedlichem Gütefaktor
5. Resonatoranregung
unzureichende Anpassung der Anregungsamplitude an Resonatorbedämpfung
6. Messfrequenz
bei zu breitem Resonanzsuchfenster kann unbeabsichtigt eine Nebenresonanz bei der ersten Messung und die Hauptresonanz bei der Differenzmessung ausgewertet werden
7. Störeinstrahlung
bei unzureichend abgeschirmten Messeinrichtungen
8. Messwertauswertung
Stützstellen auf Messwertausreißern generieren falsche Steigung der Amplitudenabnahme

Die Abbildung 5.17 zeigt die Anregung eines schwingenden Systems durch eine sinusförmige Anregungsspannung U_0 für eine Zeit t , (siehe Abbildung 5.17 a). Die Frequenz der Anregung entspricht der Resonanzfrequenz des Schwingers. Ein mittelbedämpfter Schwinger wird zu einer Resonanzschwingung angeregt, deren Amplitude exponentiell anwächst, (siehe b). Es stellt sich eine der Anregungsspannung proportionale Resonanz-Schwingungsamplitude ein, die solange stabil bleibt wie die Anregung andauert. Ohne Anregung fällt die Schwingungsamplitude aufgrund der Energieverluste durch Dämpfung exponentiell ab. Bei starker Bedämpfung stellt sich eine kleinere Schwingungsamplitude und ein beschleunigtes Abklingen der Schwingung ein, (siehe c). Im Fall der sehr hochgütigen, geringst gedämpften Schwinger kann sich ggfs. nicht die volle Resonanzüberhöhung der Schwingungsamplitude einstellen, wenn die Anregung nur kurz andauert, (siehe d). Die Amplitude der Schwingung klingt nur langsam ab.

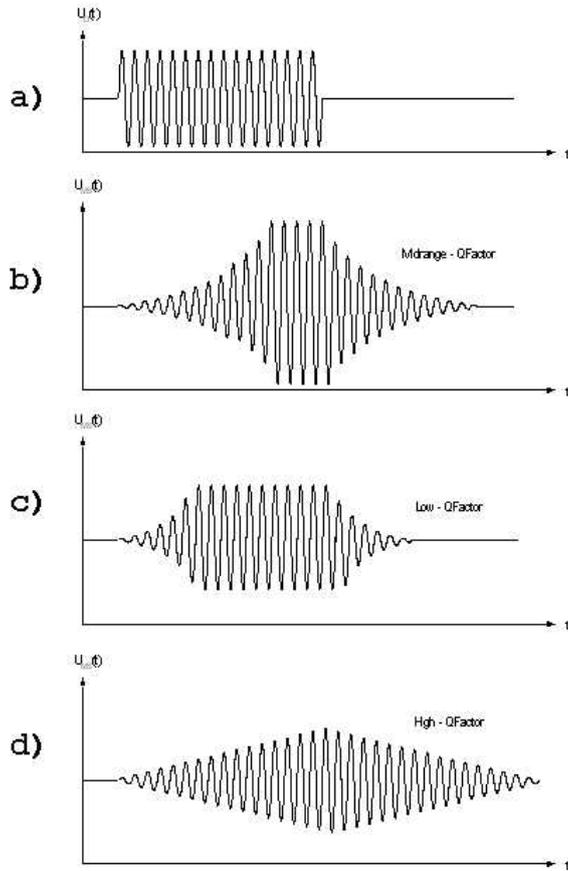


Abbildung 5.17. Anregung und Abklingen einer Schwingung in unterschiedlichen Druckumgebungen.

Ein einfacher Messalgorithmus mit einer festen Anregungsdauer, Messzeit und Messfrequenz funktioniert gut im mittleren Dämpfungsbereich. Im ISIT beträgt z.B. der Fehler bei der Wiederholbarkeit der Gütemessung 1,6 % am Waferprober mit einfachem Messalgorithmus. Sobald jedoch Sensoren mit unterschiedlichen Bedämpfungen zu messen sind, muss mit großen Fehlern bei der Gütefaktorbestimmung gerechnet werden, weil die Anzahl der gemessenen Daten von der Bedämpfung abhängt. Im stark bedämpften Fall ergibt sich für eine feste Messzeit t zwar ein großer Amplitudenabfall, es werden jedoch bei festgelegter Messfrequenz nur wenige Messdaten generiert, wodurch sich eine größere Auswerteunsicherheit für die Bestimmung der Steigung δ ergibt als im Fall einer großen Messdatenanzahl. Es ist also günstig in diesem Fall die Messfrequenz zu erhöhen. Im Fall schwach bedämpfter Schwinger muss die Messzeit verlängert werden, um die Steigung δ exakt bestimmen zu können.

Durch einen sich selbst parametrisierenden Messalgorithmus kann eine schnelle automatische Präzisionsmessung der Gütefaktoren von unterschiedlich bedämpften resonanten Mikrosensoren auf einem Wafer erreicht werden. Dabei wird zuerst der Gütebereich grob bestimmt und dann der Messablauf entsprechend parametrisiert. Durch die Anpassung der Anregung, des Messintervalls und der Messrate an die jeweilige Gasdämpfung wird eine hohe Messgenauigkeit erzielt. Die Gütemessung an einem Resonator kann optional mehrfach hintereinander durchlaufen werden, um statistisch gesicherte Messwerte zu erhalten. Diese Messstrategie wurde im ISIT von Herrn Oliver Schwarzelbach konzeptionell entwickelt und als Messprogramm sowohl auf Waferprobern wie auch auf Einzelsensormessplätzen verfügbar gemacht.

Eigenschaftsprofil des Neon Ultra-Feinlecktest

Zusammenfassend hat der „Neon Ultra-Feinlecktest“ für resonant betriebene Mikrosensoren folgende Eigenschaften:

- einziger verfügbarer nicht zerstörender Hermetizitätstest auf Waferebene
- anwendbar auf verschiedene Waferdicken, Wafermaterialien und Waferdurchmesser bis hin zu 300 mm Durchmesser
- geringste Kosten durch Batchauslagerung und geringen Handlingaufwand
- die Messung ergibt die Initialleckrate für Neon, aus der sich die Leckrate für atmosphärische Luft berechnen lässt
- Messergebnis weitestgehend unbeeinflusst von Wartezeit zwischen Auslagerung und Messung
- Messung kann mehrfach wiederholt werden
- das Verfahren ist kompatibel mit integriertem Getter
- Neon beschleunigt die Auslagerung um 40 % gegenüber Argon
- Neon als Prüfgas erzeugt bei Raumtemperatur keine Permeationseffekte
- 100 % Test aller Bauteile auf Standard Waferprober möglich
- Leckratenmessung in normale Bauteilcharakterisierung integrierbar, deshalb kein zusätzlicher Messschritt
- Nachweis von sehr kleinen Luft Leckraten im Bereich 10^{-17} mbar · l/s bei hochgütigen Sensoren mit integriertem Getterfilm
- Messempfindlichkeit nimmt mit abnehmendem Sensorkavitätsvolumen zu
- Messempfindlichkeit ist unabhängig von Resonanzfrequenz
- Messung funktioniert auch nach der weiteren Verpackung des Sensors in Plastikgehäuse und nach einer beschleunigten Alterung
- Option: durch eine temperierte Ne-Überdruckauslagerung (600 K) können Schwankungen im Gasbefüllungsdruck der Sensoren auf dem Wafer ausgeglichen werden und gleichzeitig Sensoren mit zu hoher Leckrate identifiziert werden

6 Ergebnisdiskussion

6.1 Einfluss von Prozessierungstoleranzen

In der Theorie wird die Resonanzfrequenz durch das Bauteillayout und die Silizium-Schichtdicke bestimmt. In der Praxis hat jedoch jeder Mikroresonator seine individuelle Resonanzfrequenz. Für die Beurteilung der Hermetizität von resonanten Mikrobauteilen muss man deshalb verschiedene Einflussfaktoren aus der Bauteilherstellung bedenken. Heute wird überwiegend Gasphasenätzen von dünnen dotierten Siliziumschichten eingesetzt, um Mikroresonatoren herzustellen. Diese Strukturierungstechnik erlaubt die Herstellung filigraner Siliziumfedern, von Kammstrukturen für Antrieb und Messung und Masseflächen. Bei dieser Strukturierung kommt es jedoch auch zu lokalen Prozessabweichungen durch Plasmahomogenitäten, Partikel, Maskendefekte und unterschiedliche Ätztiefenprofile. Zusätzlich kann die Dicke der chemisch-mechanisch polierten Siliziumschicht um einige Nanometer schwanken. Betrachtet man die Auswirkung der Prozessabweichungen auf Federelemente können sich unterschiedlich dicke Federn, zu schmale oder zu breite Federn oder asymmetrische Federn ergeben. Diese variierende Federgeometrie hat direkte Auswirkungen auf die Resonanzfrequenz des produzierten Mikroresonators. Im Fall des am ISIT hergestellten Drehratensensors erzeugen asymmetrisch breite Federn zudem noch eine Energiekopplung zwischen rotatorischer Antriebsschwingung und der Kippschwingung zur Messung des Drehratensignals, den so genannten Quadrature Bias Q_{bias} .

Als Grundlage für die Bestimmung der Gehäusedichtigkeit muss die Wiederholbarkeit der Gütefaktormessung bestimmt werden. Die Abbildung 6.1 stellt die Messauflösung der aktuell im ISIT eingesetzten Messtechnik und Auswertalgorithmen nach der bereits beschriebenen Ring-Down Methode dar. Die gesamte Messanordnung, Programmierung der Algorithmen und ihre Parametrierung ist von meinem Kollegen Herrn Oliver Schwarzelbach entwickelt und realisiert worden.

Es stehen insgesamt drei unterschiedliche Typen von Messapparaturen zur Verfügung um auf Wafer Ebene offene Bauelemente vor dem Verkappen, nach dem Verkappen und Freisägen der Kontaktpads und um verkappte Bauelemente in Keramik-Prototyp Gehäusen charakterisieren zu können, siehe Abbildung 6.2 mit der Bedieneroberfläche der vier Prototyp-Messplätze. Alle Messplätze greifen auf die gleichen Messalgorithmen zu, mit jeweils gleichen Messparametern. Im experimentellen Teil dieser Arbeit werden diese Messeinrichtungen vielfältig benutzt um Abhängigkeiten charakteristischer Kenngrößen der Sensoren zu untersuchen. Das Interesse ist dabei auf Bauteileigenschaften gerichtet, die Einfluss auf die Genauigkeit des Neon-Ultra Feinlecktests haben könnten. Die betrachteten Bauteileigenschaften sind die beiden Resonanzfrequenzen und der Gütefaktor, jeweils

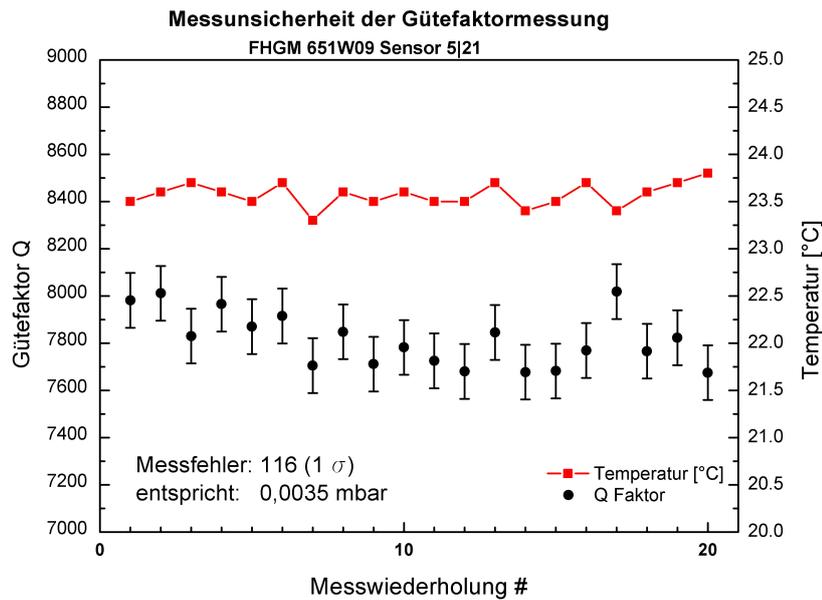


Abbildung 6.1. Der Gütefaktor kann bei der Standardmessung mit einer Messungenauigkeit von 116 bei 1 Sigma bestimmt werden. Dies entspricht einer Ungenauigkeit der Innendruckbestimmung von 0,0035 mbar. Eine Abhängigkeit der Messabweichungen von Temperaturschwankungen im Bereich $\pm 0,4$ °C ist hierbei nicht zu bemerken.

auch mit ihrer lateralen Verteilung auf dem Wafer und der Quadrature Bias. Aus eventuellen gegenseitigen Abhängigkeiten und ihrer Temperaturabhängigkeit können Rückschlüsse auf eine optimierte Durchführung des Lecktests gezogen werden.

Während die beiden Resonanzfrequenzen F1 und F2 mit einem Fehler von $\pm 0,63$ Hz sehr reproduzierbar gemessen werden können gibt es bei der Messung des Gütefaktors kleinere Abweichungen. Der Gütefaktor kann in der aktuellen Standard Messroutine mit einer Standardabweichung von 116 bestimmt werden, was einer Messunsicherheit im Gehäuseinnendruck von 0,0035 mbar (0,35 Pa) entspricht.

Die bei der kapazitiven Messung der Resonatoramplitude fließenden Ströme sind sehr klein und werden schnell durch elektrische Einstrahlungen gestört, siehe Abbildung 6.3. Ein elektronischer Bandpassfilter wird eingesetzt um die Einflüsse der Störungen zu reduzieren. Die Filtereigenschaften passen sich jedoch noch nicht automatisch an die detektierten Gütefaktoren an, dies kann in einer weiteren Ausbaustufe der Auswertelgorithmen implementiert werden. Die gefilterten Daten werden in Zeitintervallen von 5 ms gemittelt wodurch eine Signalglättung erreicht wird. Die Länge der Zeitintervalle ist in der heutigen Messroutine als Variable definiert, die in einer späteren Ausbaustufe automatisch je nach gemessenem Gütefaktor neu an die Anforderungen angepaßt wird. Dabei gilt das die Länge des Zeitintervalls umgekehrt proportional zu Dämpfung des Resonators einzustellen ist, um jeweils über ausreichend viele Messwerte zu mitteln.

Ungünstige Parametrisierungen der Messalgorithmen verschlechtern die Messauflösung wesentlich, siehe Abbildung 6.4. Die Messungenauigkeiten werden meist umso größer, je schneller man die Messroutine macht.

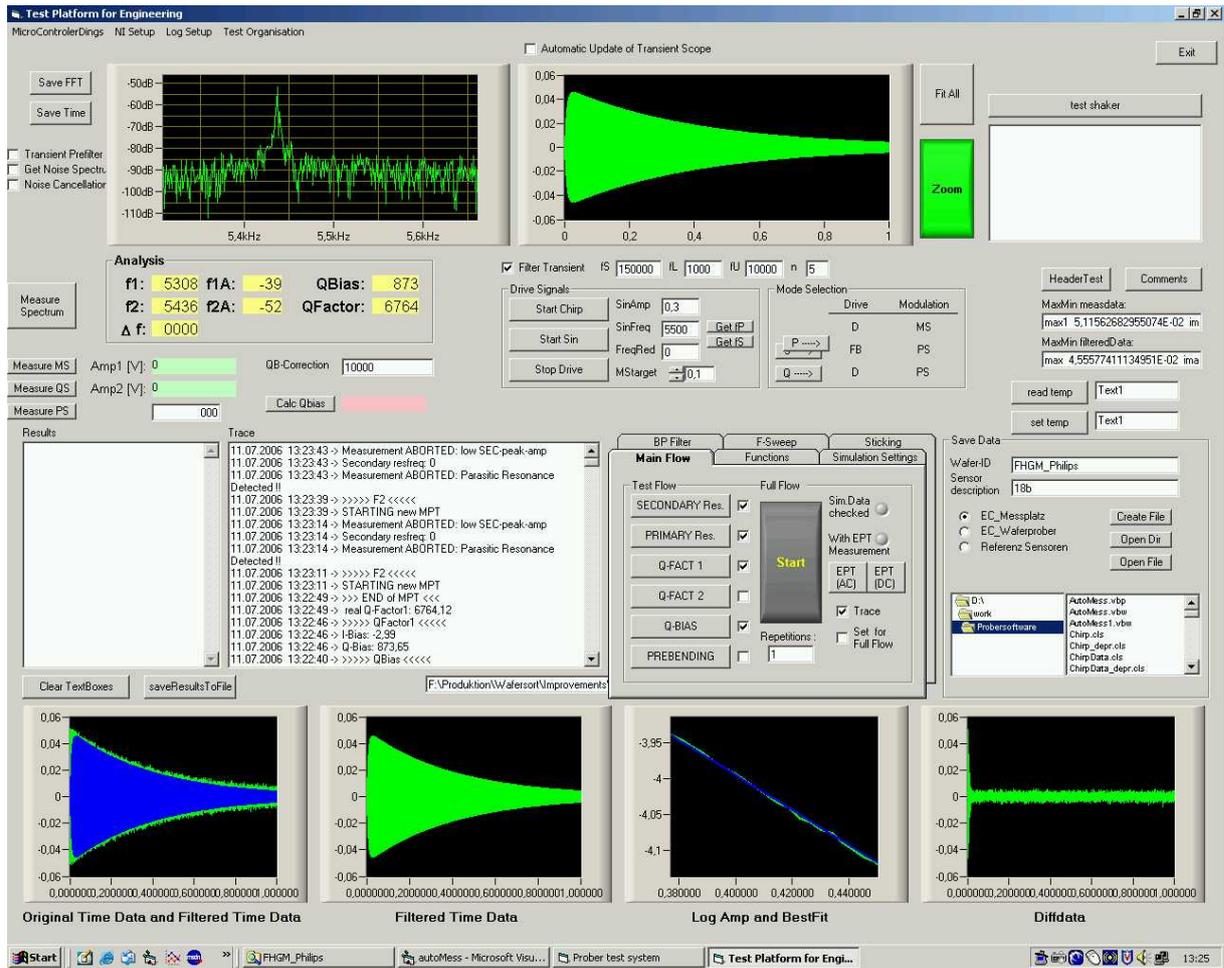


Abbildung 6.2. Die Benutzeroberfläche läßt vielfältige Parametrierungen der Filtereigenschaften und Messabläufe zu. Alle erfassten Daten der Bauteile werden elektronisch dokumentiert.

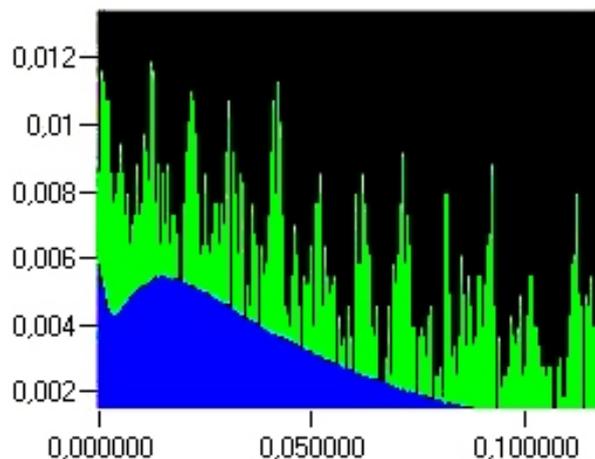


Abbildung 6.3. Typisches Messsignal der Dämpfungsmessung (hellgrün) und gefiltertes Signal (dunkelblau) als Bildschirmzug. Die X-Achse skaliert in Sekunden und die Amplitude ist in mA gemessen.

Messungen mit Parametern zur Reduzierung der Messzeit (Messzeit ca. 12s)

Lfd Nr	f1 [Hz]	f2 [Hz]	Q	Qbias	lbias
1	5875	5644	7407.00	-3526	557
2	5872	5644	6917.00	-3547	588
3	5875	5644	6991.00	-3557	596
4	5875	5644	7590.00	-3538	533
5	5872	5644	7500.00	-3562	558
Min	5872	5644	6917	-3562	533
Max	5875.00	5644.00	7590.00	-3526.00	596.00
Mean	5873.80	5644.00	7281.00	-3546.00	566.40
SD(n)	1.47	0.00	274.19	12.98	22.88

Abbildung 6.4. Eine nicht ausreichend optimierte Schnellmessroutine verschlechtert die Messgenauigkeit des Gütefaktors auf 822 bei 3 Sigma.

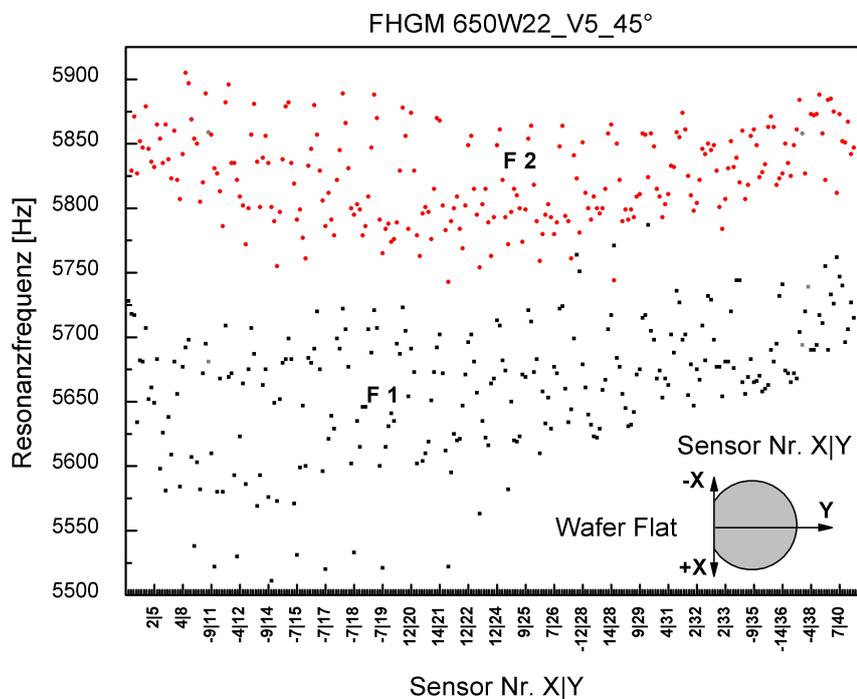


Abbildung 6.5. Variation der Resonanzfrequenzen F1 und F2 über einen Wafer.

Die Messung der Gasdichtigkeit an gehäusten Mikroresonatoren auf Basis der Gütefaktorüberwachung setzt voraus, dass diese Prozessabweichungen keinen Einfluss auf den Gütefaktor haben. Im Abschnitt 4.1 wurde jedoch schon auf den Frequenzeinfluss hingewiesen. Die Abbildung 6.5 zeigt wie stark die beiden Resonanzfrequenzen über einen Wafer variieren. Der Frequenzabstand der beiden Resonanzfrequenzen bezogen auf individuelle Sensoren ist in etwa gleich und sollte nach der Designvorgabe bei 300 Hz liegen. Im Datenplot ist das im ISIT eingesetzte Koordinatensystem mit Bezug zum Waferflat (57 mm breite Abflachung an 150 mm Wafern zur Definition der Kristallorientierung) dargestellt. Jeder Sensor auf der Kappe mit einer individuellen XY Koordinate bezeichnet. Die X-

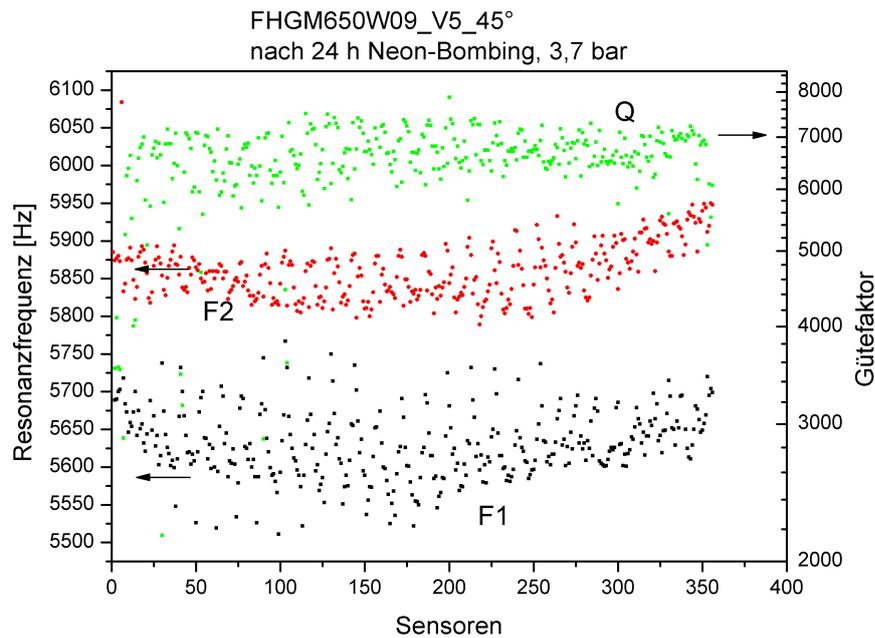


Abbildung 6.6. Variation der Resonanzfrequenzen F1 und F2 sowie der gemessenen Güte von verkappten Drehratensensoren über einen Wafer, der 24 Stunden in Neon ausgelagert wurde.

Koordinate verläuft parallel zum Flat und hat ihren Mittelpunkt zur Symmetrieachse des Wafers, die den Flat in der Mitte schneidet. Die Y-Achse ist mit dieser Symmetrieachse identisch. Aus den Sensorkoordinaten (auf der Kappe) kann leicht auf die jeweilige Position des Sensors im Waferverbund rückgeschlossen werden. Zu beachten ist, dass aufgrund der vielen Datenpunkte nicht alle Sensoren auf der X-Achse des Plots benannt sind. Die Benennung ist ein Auszug, um eine Zuordnung der Datenpunkte zur lateralen Anordnung der Sensoren auf dem Wafer zu ermöglichen. Aus der vertikalen Achse des Plots lässt sich die Schwankungsbreite der Frequenz über eine Messzeile auslesen und aus der horizontalen Achse die Schwankung über den Wafer, vom Flat nach oben. Die Resonanzfrequenz F2 zeigt in der Mitte des Wafers einen leichten Einbruch und unterliegt einer Schwankungsbreite über eine Zeile des Wafers. Die Resonanzfrequenz F1 nimmt zum oberen Ende des Wafers (große Y-Werte) zu und zeigt eine noch ausgeprägtere Schwankungsbreite über eine Messzeile.

Ein Verdacht, dass der Gütefaktor der Rotationsschwingung mit der Resonanzfrequenz F2 der Kippschwingung über eine Modenkopplung gekoppelt ist, wird durch die Abbildung 6.6 zerstreut. Aus dieser Darstellung der Messwerte ist keine charakteristische Abhängigkeit festzustellen.

Die Abbildung 6.7 stellt den Dämpfungsfaktor und den Q_{bias} über ca. 1000 gemessene Sensoren eines Wafers dar. Ziel dieser Darstellung ist eine höhere Auflösung durch Verringerung der Streuung. Die Bauteildämpfung schwankt nur im Bereich 0,4 bis 0,45. Eine Periodizität der Dämpfung über die Zeilenlängen ist insbesondere in der Ausschnittvergrößerung zu erkennen. Dies ist nur dann zu verstehen, wenn noch eine andere bisher unbekannte Abhängigkeit besteht. Die Messwerte des Q_{bias} haben eine charakteristische Kurvenform mit jeweils minimalen und maximalen Werten oben und unten am Rand des

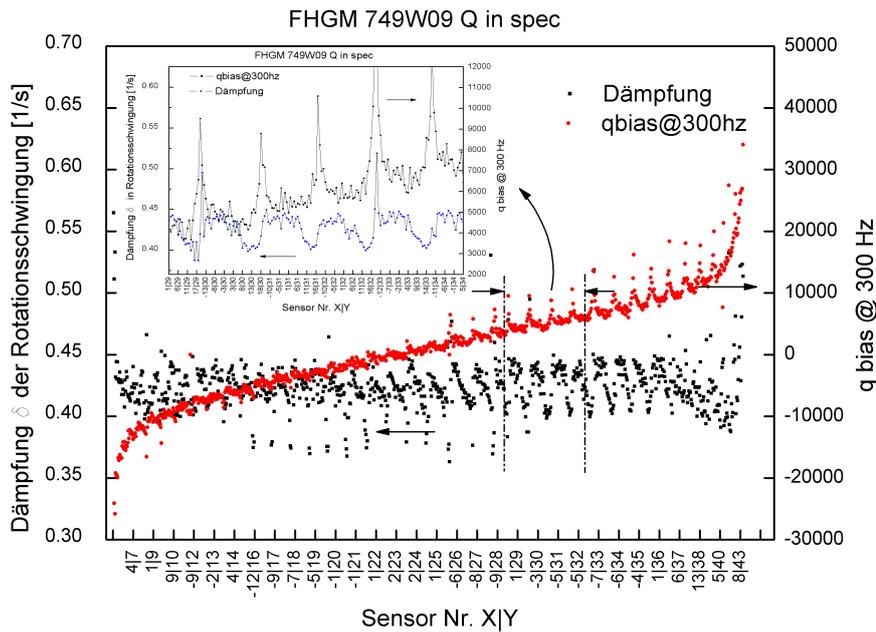


Abbildung 6.7. Dämpfung und Q_{bias} des Wafers FHGM749W09.

Wafers. Zusätzlich ist in der Ausschnittvergrößerung zu erkennen, dass eine Periodizität existiert, die genau in Phase ist mit der Dämpfung der Rotationsschwingung. Resonatoren mit hohem Q_{bias} verlieren demnach überproportional viel Schwingungsenergie durch Dämpfung, weil die Kippschwingung immer durch die Rotationsschwingung angeregt ist und durch eintretendes Gas beide Schwingungsmodi gleichzeitig stärker bedämpft werden. Hierdurch werden im Neon Ultra-Feinlecktest zu hohe Leckraten gemessen.

Dieser Zusammenhang spiegelt sich in Abbildung 6.8 jedoch nicht wieder. Die Auftragung von Gütefaktor und Dämpfung gegen Q_{bias} zeigt keine Abhängigkeit. Wie der Effekt der gemeinsamen Periodizität in Abbildung 6.7 zu erklären ist bleibt weiterhin unklar.

Trägt man die Resonanzfrequenz F2 und den Gütefaktor gegen F1 auf, so wird deutlich, dass der Gütefaktor von der Resonanzfrequenz F1 und wegen der fehlenden Steigung unabhängig von F2 ist, siehe Abbildung 6.9. Die Resonanzfrequenz F2 hat eine gewisse Steigung bezüglich der Frequenz F1, was durch den gewünschten Frequenzunterschied von ca. 300 Hz hervorgerufen wird. Es wird aber auch deutlich, dass die Schwankungsbreite der Resonanzfrequenz F2 mit steigender Frequenz F1 zunimmt. Prozesstoleranzen wirken sich in diesem Bereich stärker aus.

Um diesen Zusammenhang besser zu verstehen ist eine ausschnittsweise Darstellung gut geeignet. Die Abbildung 6.10 zeigt in drei Datenplots übereinander typische, in einer Messreihe nacheinander aufgenommene Messwerte der Resonanzfrequenz F1, des berechneten Gütefaktors Q und der Dämpfung δ . Alle Datenpunkte übereinander stammen von den selben benannten Sensoren. Gemessen wurden auf dem Wafer FHGM 650W22 nur Sensoren von jeweils gleichem Typ (Design V5 45°). Die Messung läuft zeilenweise, in mäanderförmiger Reihenfolge über einen Wafer ab. Die gemessenen Frequenzen zeigen eine charakteristische Schwankungsamplitude von ca. 130 Hz über eine Zeile des Wafers, mit niedrigen Frequenzen jeweils am Anfang und Ende der Zeile. Diese Schwankung wird durch prozessbedingte Dicken- und Breitenschwankungen im Polierprozess des dicken Epi-

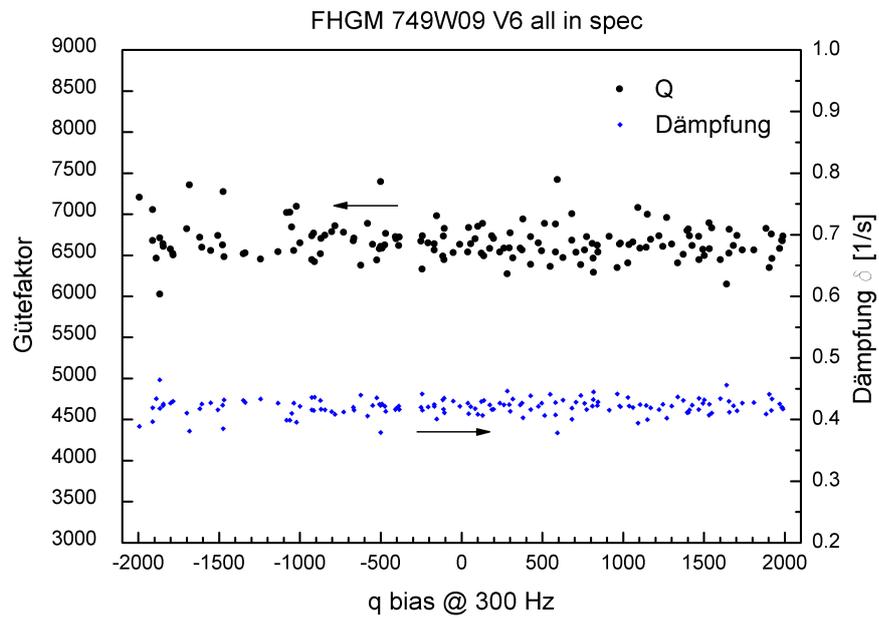


Abbildung 6.8. Dämpfung und Gütefaktor sind unabhängig von Q_{bias} .

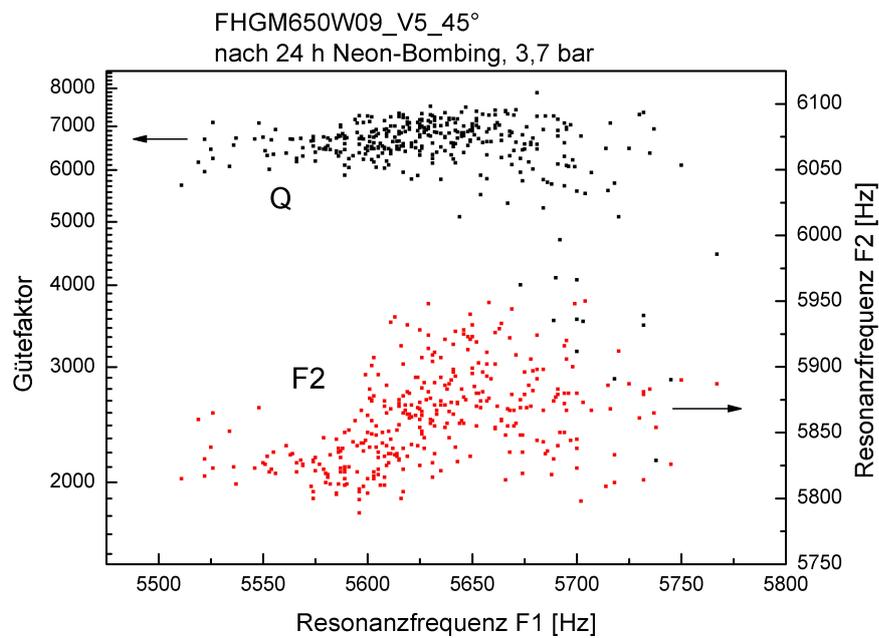


Abbildung 6.9. Abhängigkeit der Resonanzfrequenz F2 und Gütefaktors Q von F1.

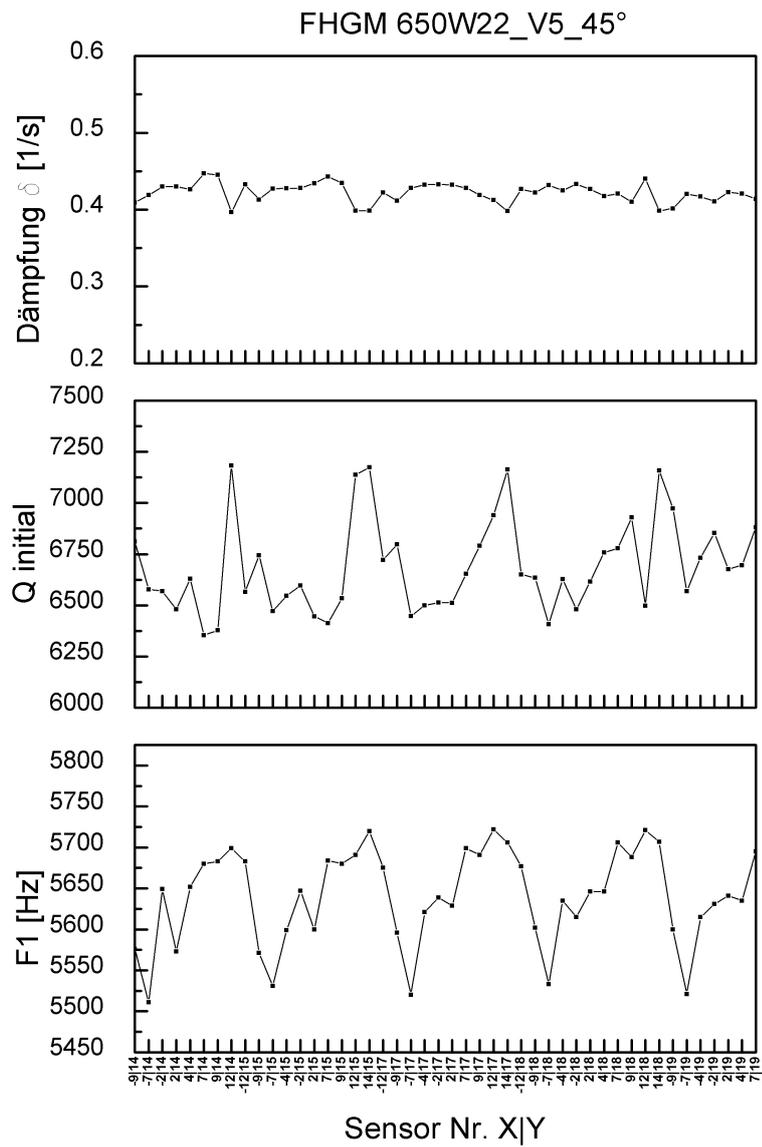


Abbildung 6.10. Frequenzabhängigkeit des Gütefaktors Q .

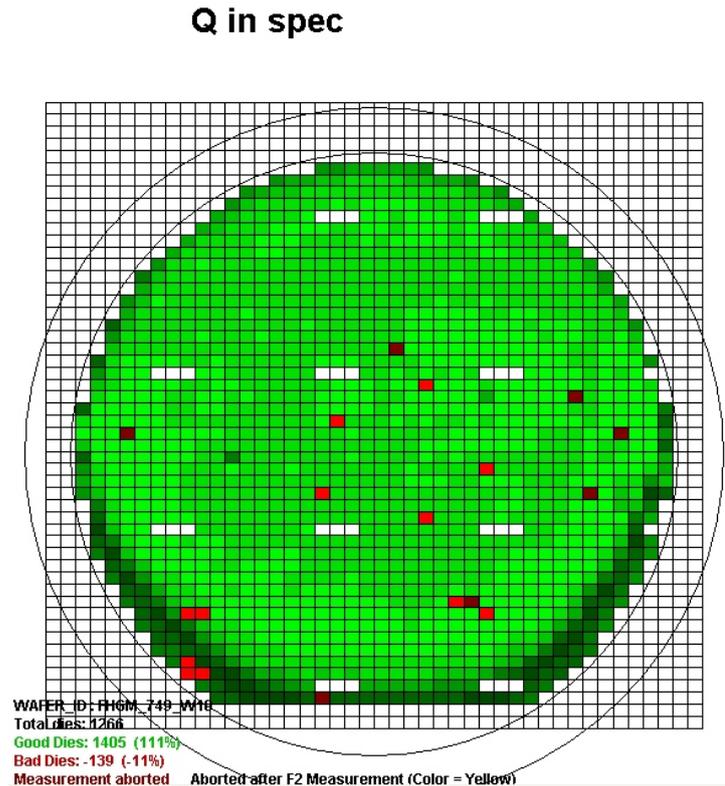


Abbildung 6.11. Wafermap der Güteverteilung $1000 \leq Q \leq 15000$ des Wafers FHGM749W10.

Polysiliziums (CMP) und zum anderen durch Plasmainhomogenitäten hervorgerufen. Beide Effekte beeinflussen die Frequenzverteilung radialsymmetrisch zum Waferzentrum. Der Gütefaktor folgt im wesentlichen bis auf Messausreißer der Kurvenform des Frequenzplots. Die durch mit der individuellen Resonanzfrequenz eines Sensors normierte Dämpfung zeigt diese Abhängigkeit nicht. Damit ist die Dämpfung unabhängiger von Prozessfehlern und weniger irreführend als der Gütefaktor bei der Bewertung der Wafer Bondprozess Qualität, der Homogenität der Rückbefüllung und der Bestimmung der Bauteildichtigkeit.

Die Abbildung 6.11 zeigt ein so genanntes Wafermap des Gütefaktors als Übersicht zur schnellen Beurteilung der Prozessausbeute. In diesem Beispiel werden alle Sensoren mit einem Gütefaktor zwischen 1.000 bis 15.000 als grün markiert, wobei die Grünfärbung vom Wert des Gütefaktors abhängt. Hierdurch kann eine laterale Verteilung von Sensoren mit niedriger Güte schnell bemerkt werden. Im Bild z.B. ist am unteren Waferrand ein solcher saumförmiger Bereich zu erkennen.

Das es sich hierbei jedoch nicht um schlecht rückbefüllte Sensoren oder gar undichte Sensoren handelt kann aus einer zeilenweisen Darstellung mit Einbeziehung der beiden Resonanzfrequenzen besser erkannt werden. Die Abbildung 6.12 zeigt die Daten quasi im Schnitt durch den Wafer, einmal entlang der Äquatorachse und einmal entlang der vertikalen Symmetrieachse. Die Schwankung von F1 und F2 über den Wafer ist deutlich zu sehen. Die Resonanzfrequenzen F1 nehmen zum Rand des Wafers hin zu, während die Frequenzen F2 abnehmen. Viel deutlicher variiert in der gleichen Achsenskalierung der Gütefaktor Q . Insbesondere am unteren Saum ist ein deutlicher Abfall zu bemerken, der sich außen bis kurz unter den Äquator des Wafers hinzieht. Bisher konnte der etwas weiter innenliegende um das Waferzentrum rotationssymmetrische Bereich mit deutlich höheren Gütefaktoren noch nicht erklärt werden.

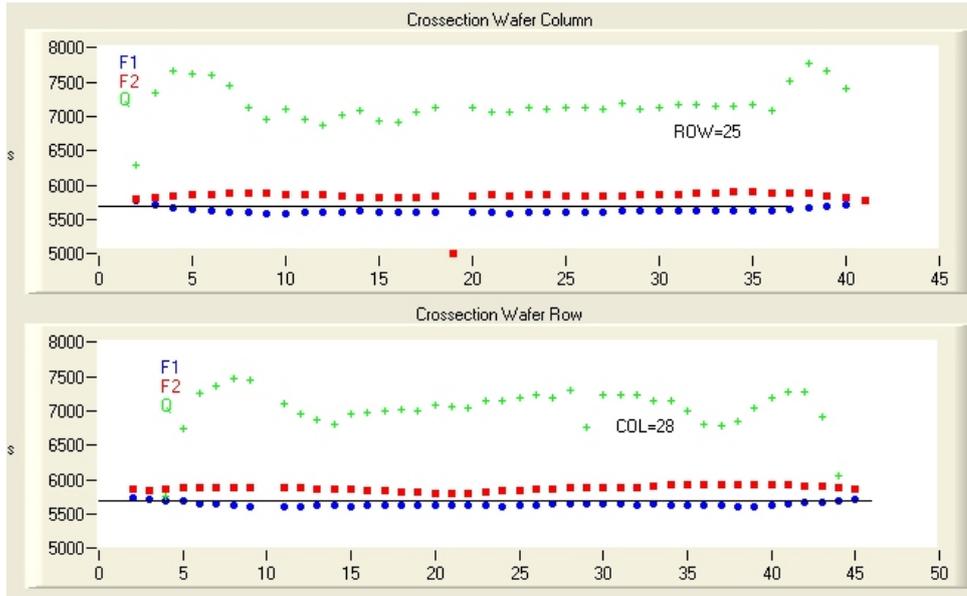


Abbildung 6.12. Verteilung der Resonanzfrequenzen F_1 , F_2 und Gütefaktor Q in Zeile 25 und Spalte 28 des Wafers FHGM749W10, gezählt von links unten. Die Y-Achse wird sowohl für die Frequenzauftragung wie auch für den Gütefaktor verwendet.

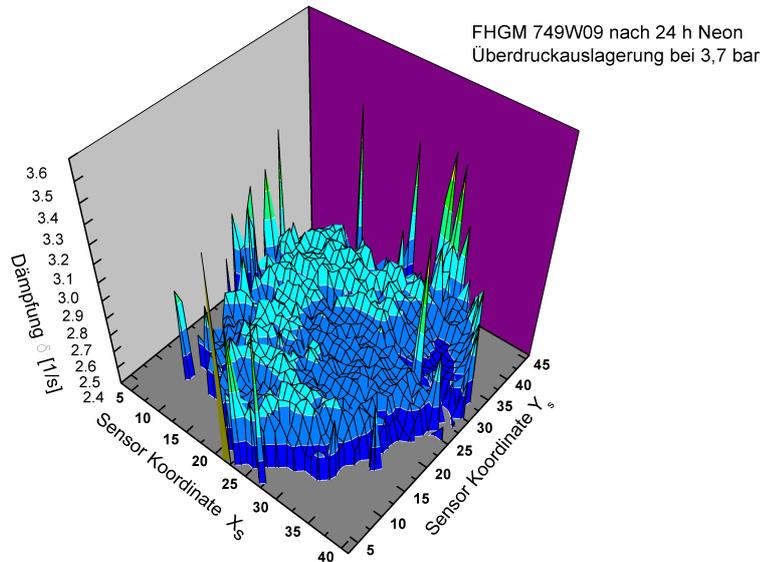


Abbildung 6.13. Lokalisierung von Sensoren mit überhöhter Dämpfung auf dem Wafer.

Die zweidimensionale Darstellung der Gütefaktorverteilung hilft beim Verständnis von eventuellen Prozessfehlern. Eine Darstellung der Dämpfung in gleicher Form ist mittelfristig als Erweiterung des von meinem Kollegen Oliver Schwarzelbach entwickelten Auswerteprogramms vorgesehen.

Zur Lokalisierung einzelner Sensoren mit überhöhter Dämpfung nach der Neonauslagerung oder zu hoher gemessener Leckrate kann auch eine dreidimensionale Darstellung

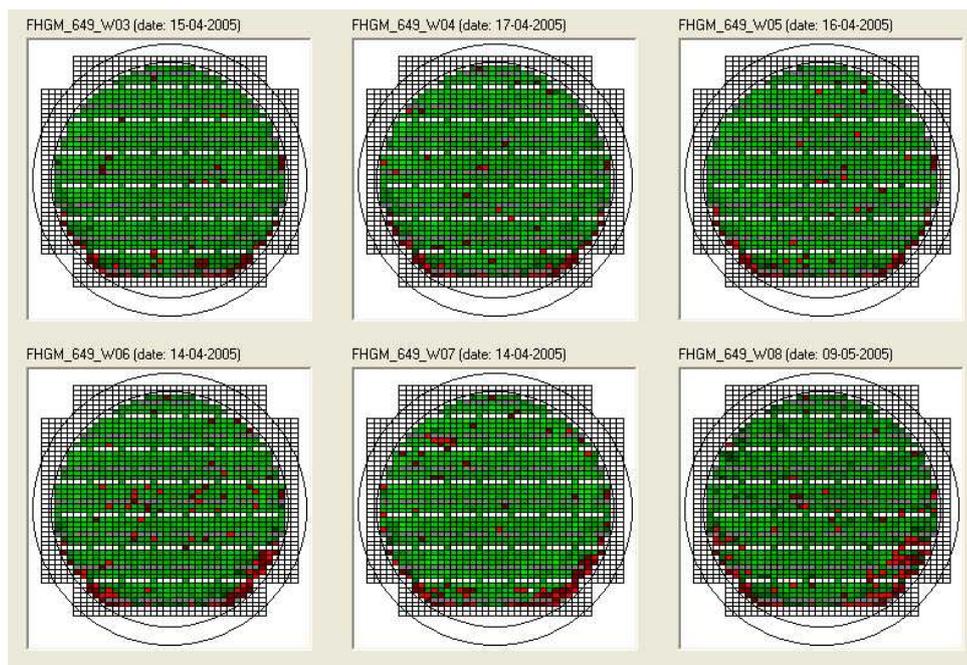


Abbildung 6.14. Wafermaps mit Gütefaktorverteilung über 6 verkapselte Sensorwafer mit Mischgasrückfüllung.

geeignet sein, siehe Abbildung 6.13.

6.2 Prozesssicherheit der Gütefaktoreinstellung

Der im ISIT industrialisierte Vakuum Verkappungsprozess auf Waferebene definiert eine Bedämpfungsatmosphäre durch eine Mischgasrückbefüllung.

Die Abbildung 6.14 gibt Aufschluss über die Prozessstabilität der Mischgasrückbefüllung. Es ist eine Sequenz von hintereinander prozessierten Wafern mit sehr homogener Güteverteilung in den jeweiligen Wafermaps zu sehen.

Die Abbildung 6.15 gibt einen Einblick in die Stabilität der Verkappungstechnologie und der Rückbefüllung, in einer Form, die einer Prozessregelkarte ähnelt. Trotz der zusätzlich durchgeführten Neonauslagerung ist keine Verschiebung der Güteverteilung festzustellen. Das bedeutet jedoch nicht, dass keinerlei undichte Sensoren vorhanden sind. Um einzelne undichte Sensoren zu indentifizieren müssen die Messwerte auch individuell und nicht statistisch behandelt werden.

6.3 Einfluss der Gastemperatur

Um undichte Bauteile sicher identifizieren zu können, muss sehr sorgfältig auf die Messbedingungen geachtet werden. Aus den Gleichungen ergeben sich zwei Einflüsse einer Temperaturverschiebung auf die Genauigkeit der Messung. Die Güte ist im Unterdruckbereich stark vom eingeschlossenen Druck in der Sensorkavität abhängig, der sich mit der Temperatur ändert. Zudem können prozessbedingt schon während der Verkapselung verschiedene Drücke in benachbarten Sensoren eingeschlossen werden (Wafer Verbiegung, ungünstige Gasströmung beim Rückbefüllen).

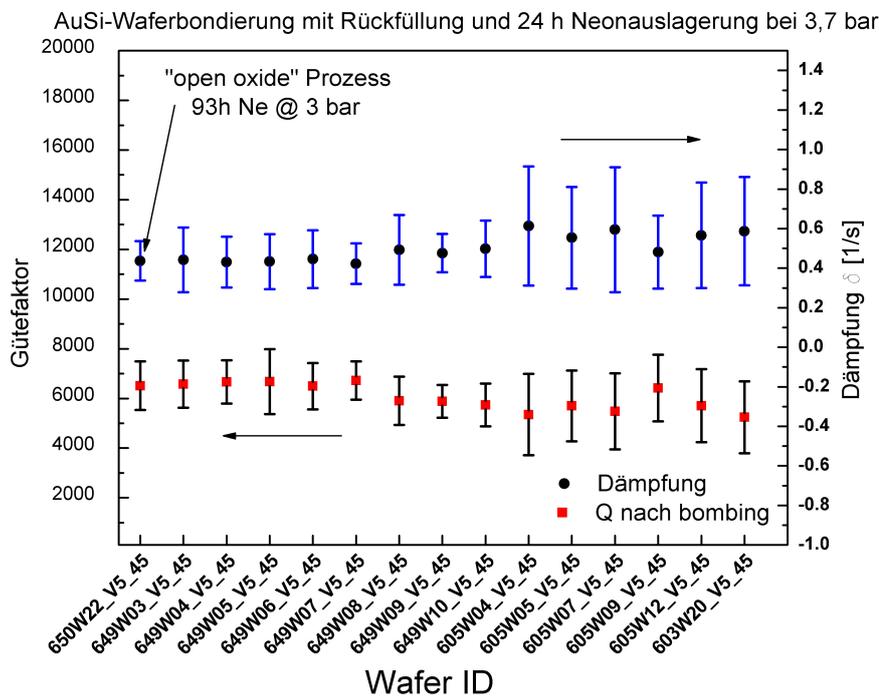


Abbildung 6.15. Prozesskarte der Gütefaktorverteilung über 15 verkappte Sensorwafer mit Mischgasrückfüllung und 24 h Neonbombing. Die Zielgüte von 12.000 wurde später reduziert. Die Wafer zeigen im gesamten keine Undichtigkeit der Fügeverbindung auf.

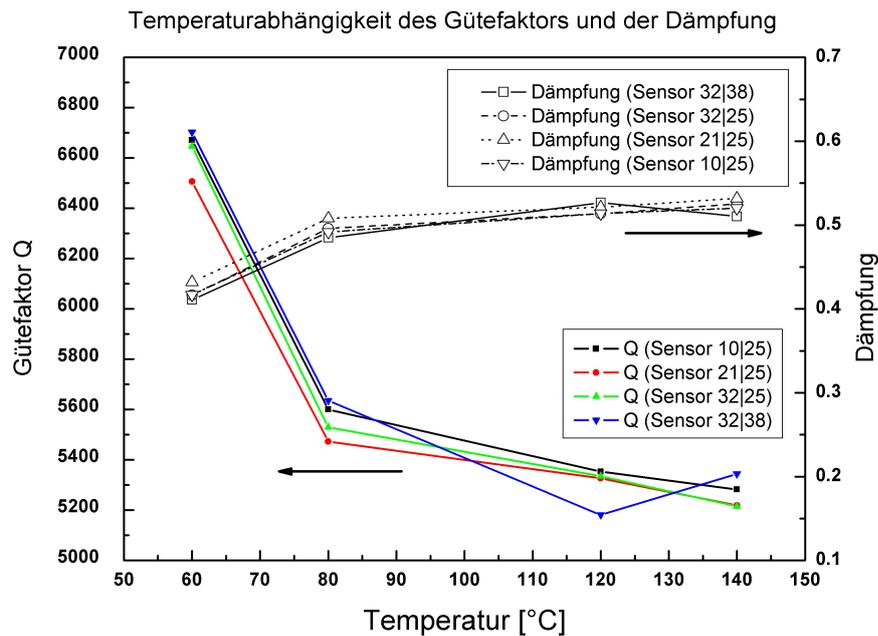


Abbildung 6.16. Der Gütefaktor ist stark temperaturabhängig, die Dämpfung weniger.

Den zweiten Einfluss bewirkt die vorher beschriebene, temperaturbedingte Frequenzverschiebung, die sich jedoch nicht auf den frequenzunabhängigen Dämpfungsfaktor auswirkt, siehe Abbildung 6.16.

6.4 Einfluss der Bedämpfungsatmosphäre

Um die Bestimmung einer Eichkurve vorzubereiten wurde ein Gasreibungviskosimeter der Fa. Leybold an den im ISIT vorhandenen Vakuum-Wafermessplatz angebaut. Die Messzelle wurde vorher im Werk neu kalibriert. Während der Messungen wurde die Temperatur im Raum durch eine Klimaanlage im Bereich $\pm 0,15$ °C stabilisiert. Es wurde immer der gleiche Sensor kontaktiert gehalten und der Umgebungsdruck durch Fluten der evakuierten Kammer mit Argon stetig erhöht. Das Pumpventil und das Flutventil der Kammer waren während der Messungen bei einem eingestellten Druck geschlossen. Jede Messung wurde 5 mal wiederholt. Die jeweiligen Standardabweichungen sind eingezeichnet. Sie sind teilweise jedoch für diese Skalierung zu klein um ablesbar zu sein.

Die Abbildung 6.17 zeigt die aufgenommenen Messwerte als Dämpfungskoeffizient für zwei unterschiedliche Kalibriereinstellungen des Steuergerätes vom Gasreibungviskosimeter. Eine Messreihe wurde mit der Einstellung für die Argon-Gasviskosität durchgeführt, eine zweite Messreihe mit der versuchsweisen Einstellung für die Stickstoff-Gasviskosität. Wie aus dem Handbuch des Gasreibungviskosimeter zu entnehmen, sind die Unterschiede im Bereich kleiner 1 Pa Umgebungsdruck zu vernachlässigen [156][109]. Für höhere Drücke liegen die Kurven auseinander und die Gasviskosität muss exakt auf das vorherrschende Bedämpfungsgas eingestellt werden.

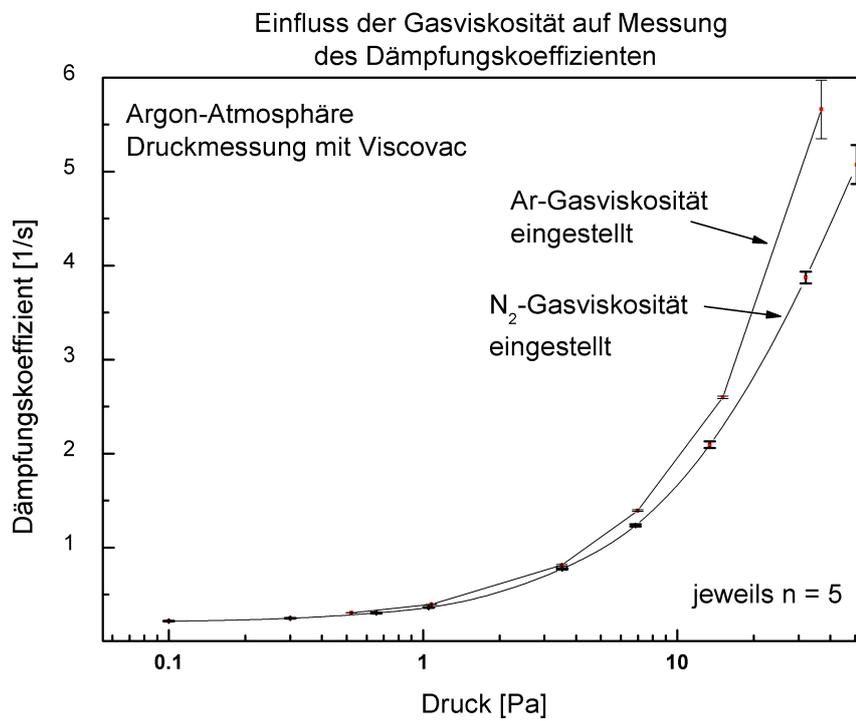


Abbildung 6.17. Messung des Dämpfungskoeffizienten δ von Drehratensensoren V5-Design ($f = 5542$ Hz) in Argon bei $T = 23,7 \pm 0,15$ °C. Der angezeigte Kammerdruck hängt im höheren Druckbereich von der im Ansteuergerät des Gasreibungsviskosimeters (Viscovac) eingestellten Gasviskosität ab.

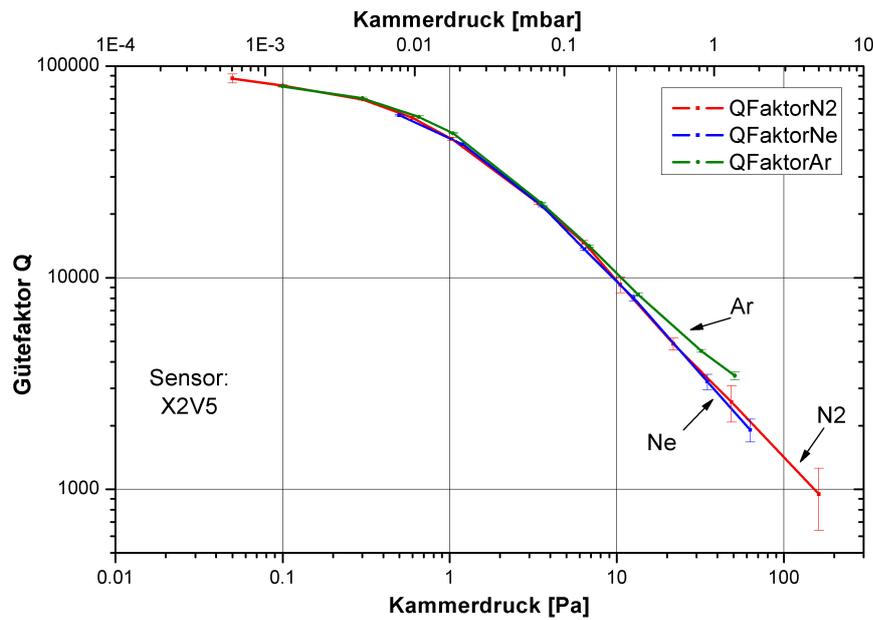


Abbildung 6.18. Eichkurve über großen Unterdruckbereich für Sensoren des Typs X2V5, gemessen mit Stickstoff, Neon und Argon.

Nach den vorbereitenden Untersuchungen wurde eine Eichkurve für V5 Sensoren mit Stickstoff, Neon und Argon aufgenommen. Hierbei wurde der Gütefaktor im ganzen erreichbaren Druckbereich bestimmt. Jede Messung wurde 10 mal durchgeführt. Bei allen drei Messungreihen wurde jeweils die Gasviskosität des Testgases am Steuergerät des Gasviskosimeters eingestellt.

Im Hochvakuumbereich war die Messung limitiert durch den Pumpstand am Vakuum Waferprober, der Übergangsbereich zur intrinsischen Dämpfung im Resonator ist jedoch zu erkennen, siehe Abbildung 6.18. Im Bereich des Grobvakuum wurde die Messung abgebrochen, weil die Messparameter nicht für eine Anregung des stark bedämpften Sensors geeignet waren. Alle Messungen wurden mit den gleichen Anregungs- und Messparametern durchgeführt. Auffallend ist der nahezu identische Dämpfungsverlauf für Stickstoff und Neon, während Argon deutlicher abweicht. Sicherlich sind die einzugebenden Gasviskositäten im Handbuch des Gasreibungviskosimeters kritisch auf Richtigkeit zu hinterfragen. In einer weiter verfeinerten Messreihe mit automatischer Parameteranpassung an die Systembedämpfung kann zudem der Druckbereich weiter ausgedehnt und die Messfehler im Grobvakuumbereich verringert werden. Der Ausbau der Messalgorithmen ist mittelfristig geplant, aber derzeit nicht verfügbar.

Die Abbildung 6.19 stellt nur einen begrenzten Druckbereich der beiden Messreihen dar. Zusätzlich ist der Dämpfungskoeffizient mit eingezeichnet.

Gas	Fitparameter A	Fitparameter B
Stickstoff	$-0,52278 \pm 0,01557$	$0,76899 \pm 0,02325$
Neon	$-0,54818 \pm 0,00984$	$0,81556 \pm 0,01567$
Argon	$-0,53099 \pm 0,00667$	$0,80162 \pm 0,00688$

Tabelle 6.1: Fitparameter für Druckberechnung

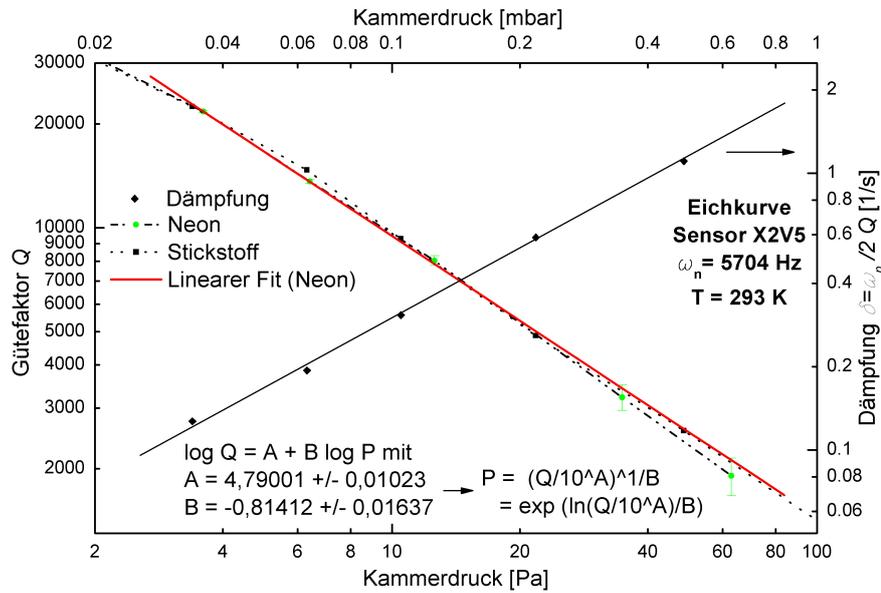


Abbildung 6.19. Eichkurve mit linearem Fit für Sensoren des Typs X2V5, gemessen mit Stickstoff und Neon.

Aus den Eichmessungen für die drei untersuchten Dämpfungsatmosphären ergeben sich die Fitparameter der Dämpfungskurve im Dämpfungsbereich von 0,1 bis 2, siehe Tabelle 6.1. Die Umrechnungsformel 6.1 für die Umrechnung der Dämpfung in den Gehäuseinnendruck lautet:

$$P = e^{\left(\frac{\ln(\delta/10^A)}{B}\right)} \quad (6.1)$$

6.5 Neonauslagerungen

Nach den Voruntersuchungen wurden Langzeitauslagerungen in Neon durchgeführt, um die Leckraten besonders genau zu bestimmen. Hierzu wurde ein Wafer aus der laufenden Vorserienproduktion benutzt. Der Wafer FHGM802-W01 verfügt nach dem Freisägen der Kontaktpads über mehr als 1000 messfähige Sensoren im aktuellen Design V6. Nach einer Erstvermessung wurde der Wafer für 20 h in Neon ausgelagert. Hierbei betrug der Gasdruck 4 bar. Danach wurde der Wafer wieder vermessen und nochmal für weitere 227 h in Neon bei 4 bar ausgelagert. Alle Auslagerungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Die Abbildung 6.20 zeigt die berechneten Leckraten der Sensoren nach 20 h und nach insgesamt 247 h Auslagerung in Neon. Die Leckraten der Sensoren mit 247 h Auslagerungszeit liegen um ca. einen Faktor 10 niedriger als bei einer Auslagerungszeit von 20 h. Bis auf einzelne Sensoren liegen die Leckraten im Bereich kleiner 10^{-15} mbar·l/s. Daraus läßt sich schließen, dass die Leckraten der meisten Sensoren sehr klein und während der abgeprüften Auslagerungszeiten stabil sind. Sensor 387 fällt mit einer gemessenen Leckrate von $4 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s auf. Die Messergebnisse weisen jedoch auch eine gewisse Streuung insbesondere zu noch kleineren Leckraten auf.

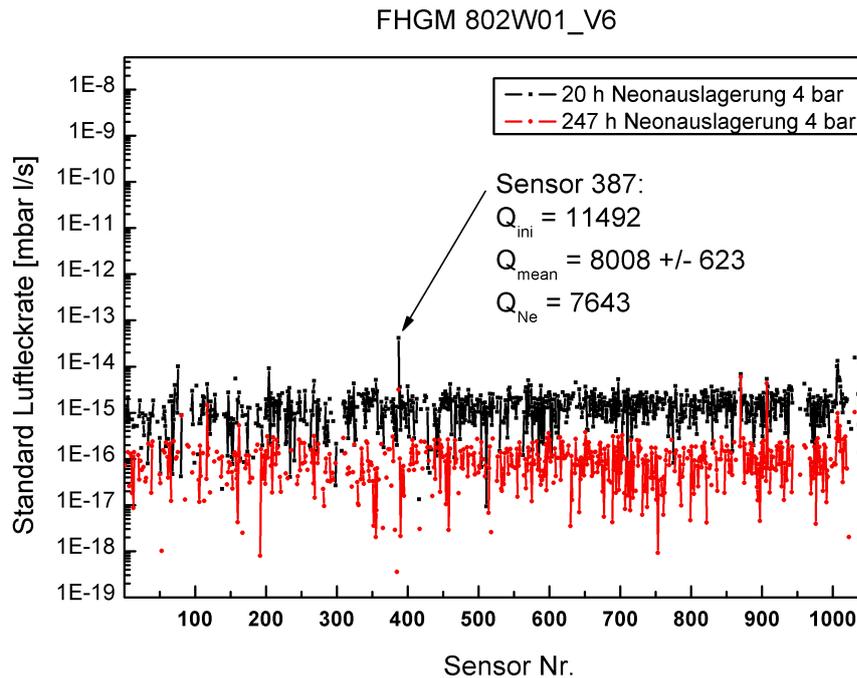


Abbildung 6.20. Standard Luftleckraten an über 1000 Drehratensensoren (Design V6) nach 20 h und insgesamt 247 h Neonauslagerung bei 4 bar Absolutdruck.

Die Abbildung 6.21 hilft zu verstehen woher diese Werte stammen. Durch die Auftragung der Änderung der Dämpfung sieht man sehr schnell undichte Sensoren. Auffallend ist dabei jedoch, dass es auch negative Änderungswerte gibt, also Sensoren die nach der Auslagerung ein leicht verbessertes Vakuum aufweisen. Physikalisch ist das nicht möglich, es sei denn der Getter könnte Argon absorbieren. Die extrem gespreizte Ausschnittvergrößerung der Messwerte der Sensoren 400 bis 850 zeigt durch Verschiebung des Verteilungsmittelpunktes eine leichte Zunahme der Dämpfung. In dieser Abbildung wird die Grenze der Messauflösung deutlich. Die Sensoren sind alle bis auf einige Ausnahmen sehr dicht und die Streuung der Dämpfung beruht auf der Messunsicherheit der Frequenzbestimmung und Gütefaktormessung.

Bei einem noch genaueren Blick auf den Datenbereich, von Sensor 350 bis 460, fallen fehlende Messpunkte bei der Vermessung nach 247 h Neonauslagerung auf, siehe Abbildung 6.22. Diese Sensoren sind nach der Neonauslagerung nicht mehr resonant anzuregen und eine Leckrate kann nicht berechnet werden.

Der Verdacht, dass auffällig niedrige Leckraten Ergebnisse (Messausreißer) mit gelegentlichen Fehlmessungen der Resonanzfrequenz F2 zusammenhängen könnten, wird durch die Auswertung in Abbildung 6.23 nicht bestätigt. Die Gegenüberstellung der Frequenzabweichungen in F1 und F2 zeigt eine sehr reproduzierbare Messung der Frequenz F1 und negative Ausreißer bei der Bestimmung der Frequenz F2. Der Vergleich dieser Ausreißer mit der berechneten Luftleckrate zeigt zwar eine Übereinstimmung bei Sensor 136, für den Rest der Frequenzabweichungen gibt es jedoch keine entsprechende Auffälligkeit in der Leckrate. Eine Verbesserungsmöglichkeit der Messmethodik könnte die automatische Plausibilitätsbewertung der Messungen sein, durch die Wiederholungsmessungen des Bauteils automatisch ausgelöst werden. Hierbei könnten Mittelwerte aus bereits gemess-

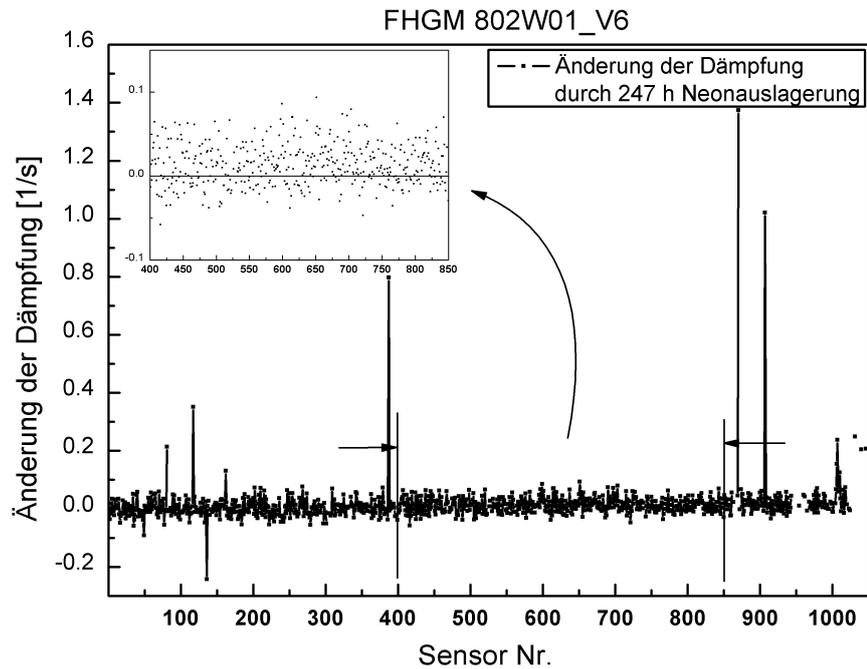


Abbildung 6.21. Änderung der Dämpfung an über 1000 Drehratensensoren (Design V6) nach 247 h Neonauslagerung bei 4 bar Absolutdruck.

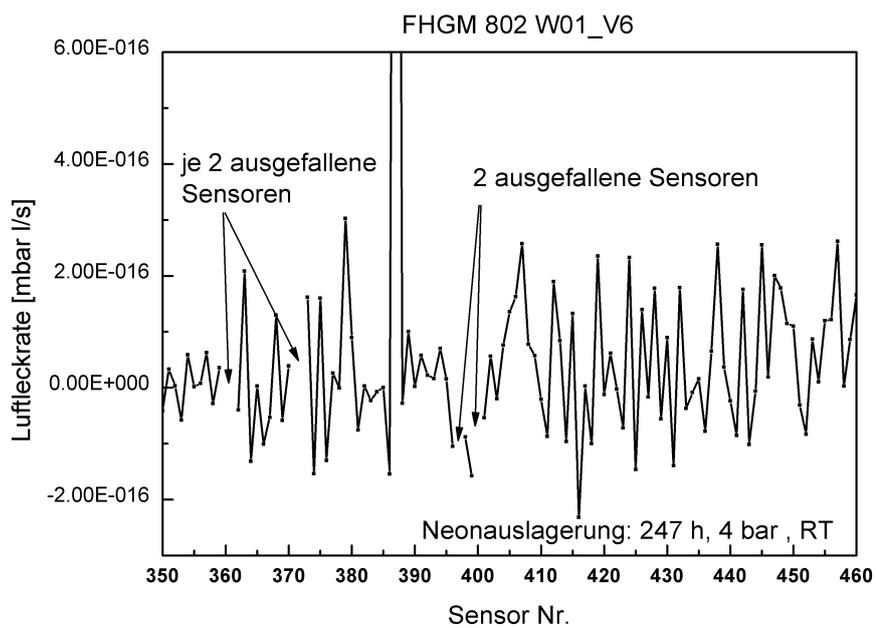


Abbildung 6.22. Resonanzausfälle undichter Sensoren nach 247 h Neonauslagerung.

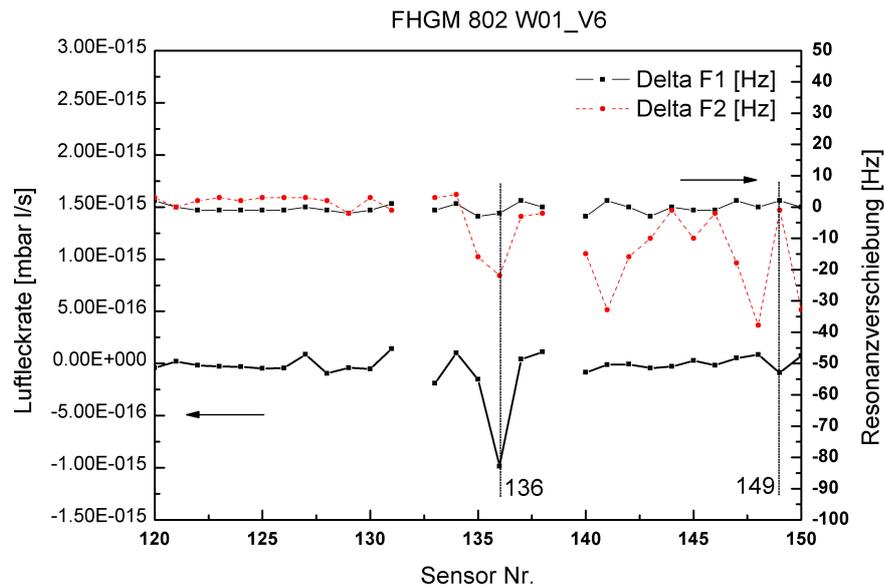


Abbildung 6.23. Es gibt keine Abhängigkeit von Fehlmessungen der Resonanzfrequenz F2 der Kippschwingung und negativen Leckraten.

senen Nachbarbauteilen und Vorgängermessungen als Entscheidungsgrundlage verwendet werden.

Die vorherige Untersuchung wurde mit einem anderen Wafer reproduziert. Der Wafer FHGM650W22 wurde mit einem anderen Verkappungsprozess hergestellt und für 93 h bei 3 bar in Neon ausgelagert. Abbildung 6.24 zeigt in zwei Datenauswertungen die Verschiebung der Resonanzfrequenzen F1 und F2 und die gemessene Änderung der Gütefaktoren von ca. 350 Sensoren. Während die Frequenzverschiebung von F1 nur $+0,0796 \pm 0,361$ Hz ausmacht beträgt sie bei der Frequenz F2 schon $+1,882 \pm 26,409$ Hz. Die Sensoren haben im Mittel einen Gütefaktorverlust von 35,5 erlitten, der jedoch deutlich unter der aktuellen Messauflösung liegt.

Die Abbildung 6.25 zeigt die Druckverteilung vor und nach der 93 stündigen Neonauslagerung und die Druckänderung. Durch das geringe Messsignal ist die Verteilung symmetrischer als erwartet. Auffallend ist der Verteilungsanteil im Bereich der Druckabnahme. Aus der Druckänderung wurden die entsprechenden Leckraten für die Sensoren auf dem Wafer FHGM650W22 berechnet. Die Abbildung 6.26 zeigt die Verteilung der Leckraten. Die Auslagerung wurde in Neon bei 3 bar und bei Raumtemperatur für 93 h durchgeführt. Zusätzlich zu den Messdaten sind die kritische Luftleckrate von $3 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s für Sensoren mit Getter und die kritische Luftleckrate von $8 \cdot 10^{-15}$ mbar·l/s für Sensoren ohne Getter eingezeichnet. Das Ergebnis ist typisch für den gegenwärtigen Entwicklungsstand sowohl der Vakuum Verkappungstechnologie im ISIT also auch für die erreichte Messauflösung des Neon-Ultra Feinlecktests.

Die Abbildung 6.27 zeigt den Druckanstieg von vier selektierten Sensoren in nacheinander durchgeführten Auslagerungen auf. Die Sensoren wiesen laut einer Erstvermessung Standard Luftleckrate im Bereich $1,8 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s bis $3,7 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s auf. Der schnelle Druckanstieg in Neon Testgas ist gut zu erkennen, ausgehend von eine Vordruck bei ca. 0,12 mbar. Im Vergleich zum schnellen Druckanstieg im Neon Testgas bewirkt normale Umgebungsluft keinen signifikanten Druckanstieg, selbst nicht bei langen Auslagerungs-

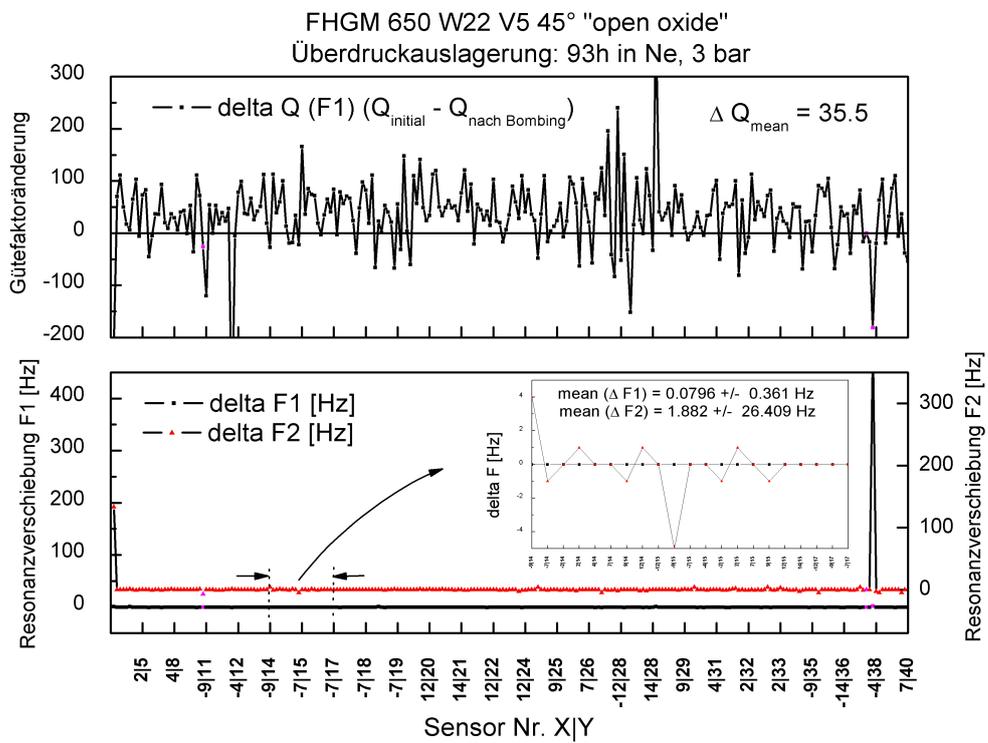


Abbildung 6.24. Stabilität der Resonanzfrequenzen und Gütefaktoren nach 93h Neonauslagerung.

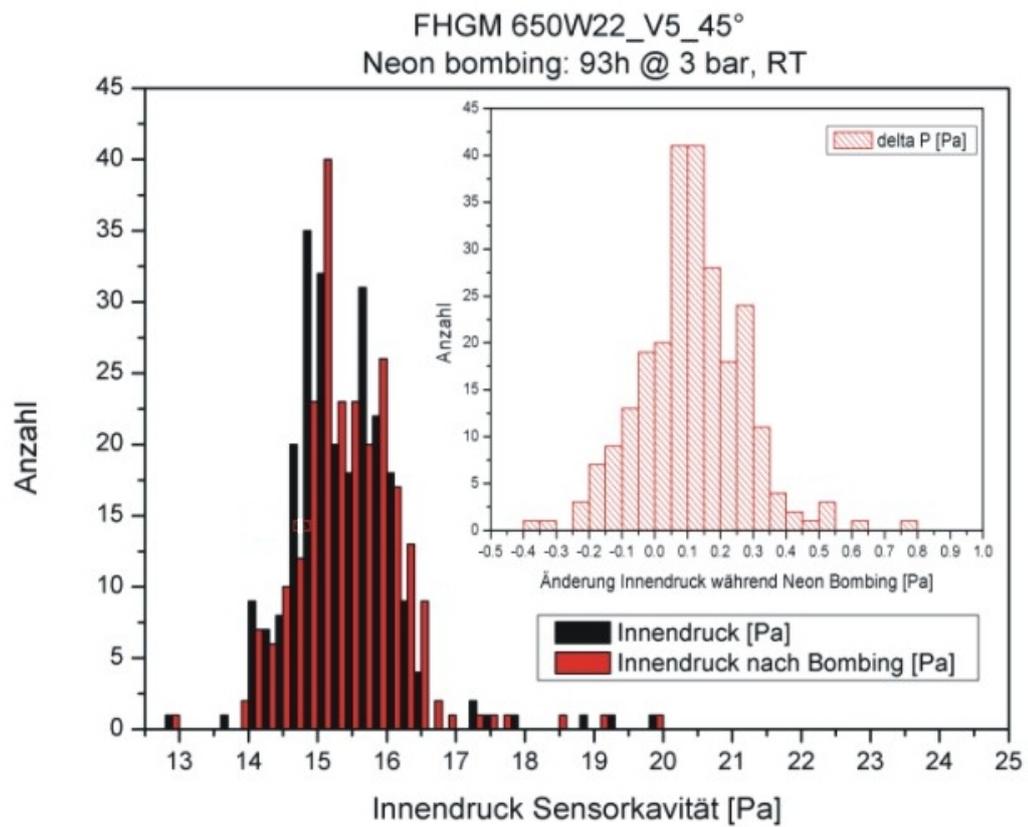


Abbildung 6.25. Druckänderung nach 93h Neonauslagerung berechnet über die Eichkurve des Gütefaktors.

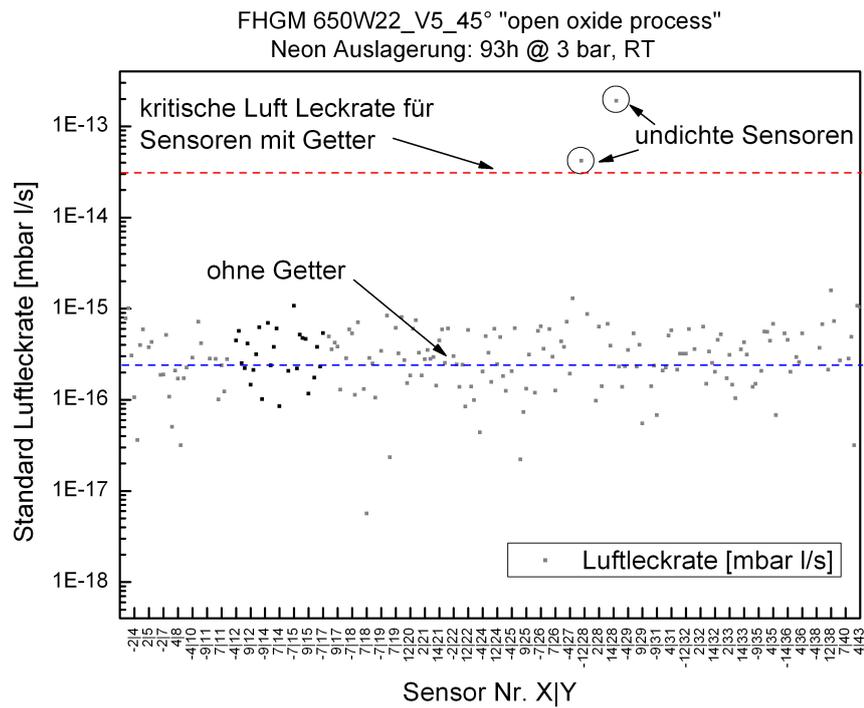


Abbildung 6.26. Auf dem Wafer FHGM650W22 werden zwei Sensoren mit zu hoher Leckrate identifiziert.

zeiten. Wie im Kapitel 2 bewirkt bei Exposition an Luft nur der Edelgasanteil der Luft, überwiegend Argon, eine Druckänderung und zwar so lange bis der Getter gesättigt ist und weiter einströmende Luftgase nicht mehr gebunden werden können. In der Anfangszeit in Luft ist demnach der Testgasdruck kleiner 10 mbar, im Vergleich zur Neonauslagerung bei 3,5 bar also 350 mal geringer. Dazu kommt noch die größere Atommasse von Argon was insgesamt einen Beschleunigungsfaktor für Neon von rund 500 ergibt.

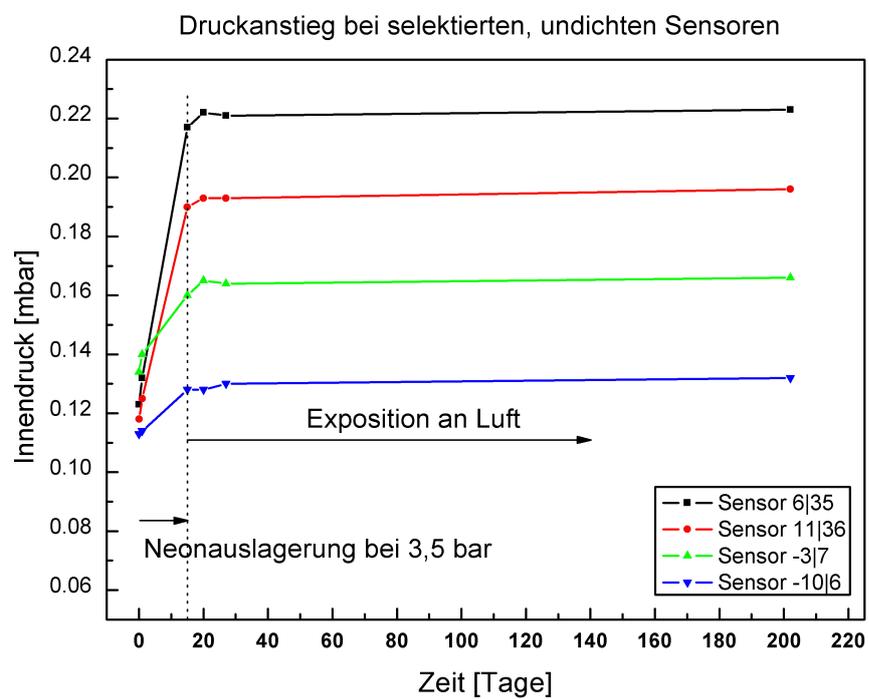


Abbildung 6.27. Druckanstieg von selektierten Sensoren in wiederholter Neonauslagerung und Langzeitauslagerung in Luft. Durch die Neonauslagerung kann schnell eine Undichtigkeit aufgedeckt werden, die ansonsten durch die Gasabsorption des Getters unentdeckt bleibt (Beschleunigungsfaktor gegenüber Luft ca. 500 fach).

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der rasante Fortschritt in der Automobilelektronik basiert auch auf dem breiten Einsatz unterschiedlichster Sensoren. Erst durch diese werden neuartige Drive-by-Wire Konzepte in Fahrzeugen aber auch Flugzeugen etc. umsetzbar. An die Sensoren werden höchste Anforderungen hinsichtlich hoher Messempfindlichkeit bei geringstem Stromverbrauch und Baumaß, hoher Robustheit und Langlebigkeit und geringer Kosten gestellt. Die Mikrosystemtechnik bietet die technologischen Grundvoraussetzungen, um diese Anforderungen weitestgehend abzudecken. Um das Risiko von Rückrufaktionen zu reduzieren ist eine möglichst vollständige Testabdeckung durch charakterisierende Bauteiltests notwendig. Diese frühzeitige Qualitätsbewertung ermöglicht zudem eine Kosteneinsparung im Verpackungsprozess, weil Verpackungskosten von defekten Bauteilen und unnötige Belastung der Packaginglinien vermieden werden. Gleichzeitig kann durch die schnelle Verfügbarkeit von Testdaten eine verbesserte Prozessstabilisierung im Herstellungsprozess der Bauelemente erreicht werden. Aus diesen Gründen ist die prozessbegleitende Bauteilcharakterisierung von Mikrosystem Bauelementen aktuell Gegenstand der angewandten Forschung. Was die Eigenschaften der Bauteilversiegelung angeht war in der Ausgangssituation um das Jahr 2004 kein wirtschaftlich und technologisch sinnvoller Lecktest verfügbar.

Die vorliegende Arbeit hat dieses Defizit aufgegriffen und leistet hierzu einen Beitrag durch die Entwicklung eines neuartigen ultra hochauflösenden Hermetizitätstests für resonante Mikrosensoren, der die Empfindlichkeit des bekannten Helium-Lecktests im Mil-Standard 883G um einen Faktor 10^6 übertrifft. Das zugrunde liegende Konzept ist eine Güteüberwachung vor und nach einer Neon-Überdruckauslagerung, wobei der Sensor selbst als Messsystem für den Innendruck eingesetzt wird. Aus der Differenzmessung kann der Neon-Leitwert eventuell vorhandener Gaslecks an resonanten Mikrosensoren auf Grundlage der Molekularströmung ermittelt werden. Der Neon-Leitwert ist eine integrale Größe für ein effektives Gasleck unabhängig von dessen genauer Geometrie (Anzahl, Länge, Verwinkelungen, Öffnungs- und Kapillarquerschnitt). Der Neon-Leitwert des unbekannt effektiven Gaslecks wird über die Druckzunahme in der Sensorkavität durch einströmendes Neon exakt bestimmt. Durch das gleiche Leck treten auch alle anderen Luftgase in die Kavität ein. Zwischen dem Moleküldurchmesser der Luftgase (z.B. CO: $d_{Stoss} = 3,92 \text{ \AA}$ [2]) und den hier relevanten Kapillardurchmessern liegen immer noch mindestens 2 Dekaden. Voraussetzung ist allerdings, dass die einströmenden Gase nicht chemisch mit den Kapillarwänden reagieren und diffus an den Wänden gestreut werden.

Aus dem Neon Leitwert kann unmittelbar die Standard Luftleckrate berechnet werden. Das Messkonzept wurde durch zerstörende Restgasanalysen und beschleunigte Alterung verifiziert. Aus prozesstechnologischer Sicht ist nun weltweit erstmalig ein hochauflösender

100 % Screeningtest der Leckrate auf Wafer Ebene für resonante Mikrosensoren unterschiedlichen Designs und unabhängig von der gewählten Wafer Verkappungstechnik verfügbar.

Wie beschrieben kann der Neon Ultra-Feinlecktest verwendet werden, um undichte Bauteile mit einer überkritischen Luftleckrate schon im Herstellungsprozess auf Wafer Ebene zu identifizieren. Für Bauteile mit zulässiger Leckrate können aus den Messergebnissen Hinweise auf den zu erwartenden Vakuumverlust in der Gehäusekavität abgeleitet werden. Die Prognose beruht auf der aktuell bestimmten Initialleckrate für Luft.

Die weiteren Gehäusungsschritte des Bauteils (z.B. Transfermolding) üben verschiedene Beanspruchungen und Alterungseinflüsse aus, die den Leitwert des Leckpfades durch Querschnittsveränderung (durch mechanischen Stress oder eingelagertes Material) beeinflussen können. Eine Prognose der Vakuumlebensdauer mit Einbeziehung dieser Alterungseffekte ist möglich, bedarf aber einer solide abgesicherten Datenbasis. Hierzu sind unterschiedliche beschleunigte Alterungsuntersuchungen an einer Vielzahl genau bekannter Proben durchzuführen. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

7.2 Schlussfolgerungen

Während der Dauer der Bearbeitung dieses Themas wurden im Fraunhofer ISIT mehrere oberflächen-mikromechanische Sensortypen entworfen und hergestellt. Bei allen diesen Sensoren kam dem Verkappen der Bauelemente auf Waferebene mittels eutektischem AuSi-Bonden eine zentral wichtige Aufgabe zu. Mit dieser Verkappungstechnologie können die sehr empfindlichen resonanten Strukturen nach dem Freiätzprozess vor zerstörenden Einflüssen bei der weiteren Verarbeitung in Standardprozessen geschützt werden. Neben der Schutzfunktion schließt die Verkappung eine für die Bauteilfunktion geeignete Dämpfungsatmosphäre dauerhaft ein. Das Gesamtgehäusungskonzept, z.B. als SMD-Komponente, ist ein wichtiger Faktor für den wirtschaftlichen Erfolg eines Sensors, genau so wichtig wie die Sensorfunktionalität. Die am ISIT entwickelte eutektische Bondierung mit integriertem Getter hat sich in vielen Qualitätsprüfungen bewährt und lässt eine hohe Belegungsdichte der Sensoren auf einem Wafer zu. Die so hergestellten sehr kompakten Sensoren können in klassischen Halbleiterverarbeitungsprozessen (Transfermolding) bei einem Druck von rund 90 bar mit Plastik umspritzt werden. Diese Standardgehäuseformen lassen sich in etablierten Technologien weiterverarbeiten.

Durch die metallische Fügezone wird die Kappe gezielt elektrisch leitend mit dem Sensorwafer verbunden. Aufladungseffekte werden damit ausgeschlossen. Die Einbringung der notwendigen Metallisierungen inklusive Getter geschieht alleine auf dem Kappenwafer, ohne die Verwendung von Argon als Arbeitsgas. Hierdurch sind eingeschlossene Dämpfungsatmosphären bis mindestens 10^{-3} mbar sicher für alle Bauelemente auf einem Wafer zu erreichen. Durch die im ISIT entwickelte und patentierte Mischgasrückbefüllung wird ein definierter Innendruck in jeder Sensorkavität eingestellt. Gleichzeitig wird die Getterkapazität nach Aktivierung durch gestufte Getterfelder überprüft. Diese zum Patent angemeldete Technik vermeidet Überraschungen durch verschlechterte Gettereigenschaften, die z.B. durch falsch durchgeführte Waferreinigungen hervorgerufen werden können.

Der Neon Ultra-Feinlecktest hat sich bei der Entwicklung und Feinoptimierung des eutektischen Wafer Bondprozesses sehr bewährt. Durch Einsatz dieses Tests konnten kurze Rückkopplungsschleifen geschaffen werden, um sehr feine Parameteroptimierungen des Vakuum Waferbond Prozesses hinsichtlich Bondrahmenbreite und Dicke, Kappenwafermetallisierung, Fügetemperatur, Ausgasung, Verweilzeiten, Getteraktivierung, Anpressdruck, Abkühlung und Rückbefüllung durchzuführen. Alle diese Parameter haben letztlich großen Einfluss auf die Stabilität der Bondierung in feuchter Atmosphäre, was wir leider schmerzlich lernen mussten. Dieser Prozessoptimierung ist es zu verdanken, dass eutektisch verkappte Sensoren (ohne zusätzliches Gehäuse) eine Überdruckauslagerung in gesättigter Feuchte bei 121 °C und 2 bar Umgebungsdruck ohne Vakuumdegradation für mindestens 240 h aushalten.

Durch verlängerte Auslagerungszeiten von einigen Tagen kann die Nachweisempfindlichkeit des Neon Ultra-Feinlecktests leicht bis in den Bereich 10^{-18} mbar · l/s Standard Luftleckrate gesteigert werden. Die hohe Nachweisempfindlichkeit hängt letztlich mit der schnellen Akkumulation des Testgases in undichten Nano-Liter Gehäusen zusammen, wodurch der Resonator viele Wechselwirkungen mit dem Testgas erfährt. Die schmalbandige Auswertung der Amplitudenabnahme genau in der Resonanzfrequenz zur Bestimmung des Gütefaktors unterdrückt zudem Störungen. Im Vergleich dazu wird beim Helium Lecktest

das austretende Testgas in ein sehr großes Vakuumgefäß überführt und permanent abgepumpt. Nur ein geringer Teil wird im Massenspektrometer trennscharf nachgewiesen, pro Atom jedoch genau nur einmal. Beim Kr^{85} -Radioisotopentest beruht die hohe Messempfindlichkeit auf der guten Nachweisempfindlichkeit austretender Gammastrahlung (schon ab einem Zerfallsprozess), sofern sie in einen Detektor trifft.

Obwohl der Neon Ultra-Feinlecktest bei resonanten Mikrobauteilen sehr universell einsetzbar ist, wird er nicht die bisherigen etablierten Hermetizitätstests verdrängen. Für die Überprüfung hermetischer Gehäuse (z.B. geschweißter Metallgehäuse) mit Innenvolumen im μl bis ml-Bereich eignen sich der Helium Lecktest, der Kr^{85} -Radioisotopentest und bei geringen Dichtigkeitsanforderungen ggfs. der optische Verformungstest am besten. Makroskopische Gehäuse werden oft mit nur leichtem Unterdruck von einigen 100 mbar verschlossen. Auf der Gütefaktorüberwachung basierende Lecktestverfahren können deshalb nicht eingesetzt werden. Aber auch bei makroskopischen Gehäusen mit eingeschlossenem Hochvakuum im Bereich 10^{-6} bis 10^{-9} mbar, z.B. Bolometer, IR-Nachtsichtgeräte, eignet sich der Neon Ultra-Feinlecktest nicht so gut. Das relativ große Gehäusevolumen und die überwiegend intrinsische Dämpfung der Mikroresonatoren bei Umgebungsdrücken unterhalb 10^{-3} mbar führen zu längeren Auslagerungszeiten. Im Bereich der Nano-Liter Gehäuse mit Vakuumanforderung konkurriert die Innendruckmessung mit μ -Piransensoren, die eine höherer Messauflösung im Grobvakuumbereich bei einigen mbar bieten. Für besonders konstruierte Bauteile kann noch der in der Arbeit beschriebene Lecktest mit reaktiven Testgasen eingesetzt werden. Dieser Dichtigkeitstest nutzt z.B. die Änderung der IR-Transmissionseigenschaften oxidierender metallischer Dünnschichten. Der Test ist aber nicht kompatibel mit integrierten Getterschichten. Für nichtresonante, sehr kleine Bauelemente mit hohen Anforderungen an die Leckdichtigkeit und ohne integrierten Getter bietet dieses Verfahren gute Eigenschaften.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem Neon Ultra-Feinlecktest eine sehr sichere universell einsetzbare Technologie zur Überprüfung der Hermetizität resonanter Mikrosensoren in Nano Liter Gehäusen gefunden und beschrieben werden konnte, die inzwischen Eingang in die Pilotserienfertigung des Fraunhofer Instituts für Siliziumtechnologie gefunden hat.

7.3 Ausblick

Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit der Neon Ultra-Feinlecktest bis zur Einsatzreife entwickelt werden konnte und die Einflussfaktoren auf die Vakuumerhaltung weitestgehend untersucht wurden stehen doch noch folgende Untersuchungen und Optimierungen für die Zukunft aus:

- Erweiterung des Druckmessbereichs bis 10^{-6} mbar durch speziell ausgebildete Resonatoren mit geringer intrinsischer Dämpfung und neuartige Messkonzepte.
- Anwendung des Verfahrens auf unterschiedlich gefügte und unterschiedlich konstruierte resonante Sensoren.
- Korrelationsmessung mit einem μ -Pirani Sensor und einem resonanten Sensor in einer Gehäusekavität.

- Verbesserung der Wiederholgenauigkeit und Verringerung der Messtoleranzen der Gütemessungen.
- Optimierung und Beschleunigung der Gütemessung mit automatischer Anpassung der Messparameter.
- Anwendung des Verfahrens zur Entwicklung von Dichtungsmethoden als Reparaturstrategie für Gehäuse mit Feinleck.
- Weitere Untersuchungen zur Heißgasrückbefüllung mit Neon zur Beschleunigung des Wafer Bondprozesses durch eine nachgelagerte Getteraktivierung bei gleichzeitiger Leckprüfung (breits vom ISIT zum Patent angemeldet).
- Verbesserung des Vakuum-Lebensdauermodells zur Parametrisierung des Screening Tests auch hinsichtlich einer Kommentierung der Ergebnisse.
- Weitere Untersuchungen zum Gastransportmechanismus von reaktiven Gasen und Wassermolekülen durch kleinste Kapillaren. Hierbei wäre insbesondere die Frage nach dem kleinsten Leckdurchmesser interessant und ob eine Molekularströmung in eine Oberflächendiffusion entlang der Kapillärwände übergeht sobald die freie Weglänge kleiner als ein bestimmtes Verhältnis zum Kappillardurchmesser wird. Sofern ein Verfahren zum gezielten Einbringen von Leckkanälen mit Nano Meter Durchmesser zur Verfügung stände, könnte diese Fragestellung gut mit resonanten Sensoren untersucht werden.
- Verifizierung der Vakuumerhaltung über längere Realzeitalterung (kleiner 5 Jahre).
- Untersuchung der Einflüsse von polymeren Gehäusungsmaterialien auf die Leckrate unter Einbeziehung der Erkenntnisse in [70].
- Weitere Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Leckrate während der Bauteilalterung.

Der Einsatz eines hochauflösenden 100% Screens der Initial Luftleckrate von resonanten Mikrosensoren im Fraunhofer Institut für Siliziumtechnik hat weltweit für Aufmerksamkeit gesorgt. Nach den Anfragen zu schließen, könnte der Neon Ultra-Feinlecktest auf Waferebene in den nächsten Jahren verstärkt Eingang in die Produktion diverser Mikrobauteile finden. Somit ist die praktische Nutzung der Hauptergebnisse dieser Arbeit und die Weiterentwicklung des Verfahrens gesichert.

A Sensoraufbau und Prozessabfolge

A.1 Funktionsweise des Sensors

Die Funktionsweise des Drehratensensors (auch Gyroskop) beruht auf dem Coriolis Effekt. Mikromechanisch hergestellte Drehratensensoren basieren auf linear oder rotatorisch schwingenden Massen. Der am ISIT entwickelte Drehratensensor basiert auf dem zuletzt genannten Prinzip. Hierbei wirkt auf eine Masse m , die sich in einem mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$ rotierendem Bezugssystem befindet und sich selbst mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt (Abb. A.1), eine Scheinkraft, die sogenannte Corioliskraft

$$\vec{F}_{coriolis} = 2m \cdot (\vec{v} \times \vec{\Omega}) \quad (\text{A.1})$$

Der Sensor besitzt zwei schwingende Massen, bestehend aus einem äußeren Ring und einer inneren durch Federn mechanisch gekoppelten Platte (Abb. 1.1). Die innere Platte und die darunter liegenden Elektroden bilden dabei eine variable Kapazität. Wird eine Dreh-Schwingung des äußeren Rings angeregt und der Sensor einer Drehrate um die Chipenebene ausgesetzt, erfährt der äußere Ring eine Kraft senkrecht zur Oszillation. Diese Corioliskraft bewirkt eine Auslenkung des Rings und auch der durch Federn verbundenen inneren Platte in Richtung der Elektroden, die wiederum eine Änderung der Kapazität im fF -Bereich zur Folge hat.

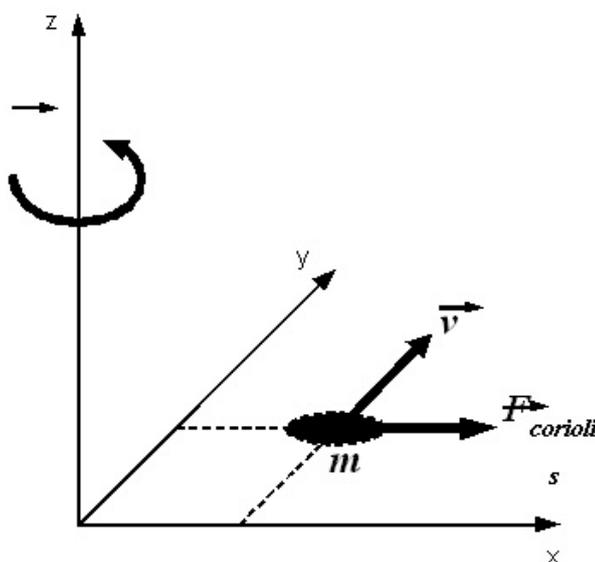


Abbildung A.1. Corioliseffekt

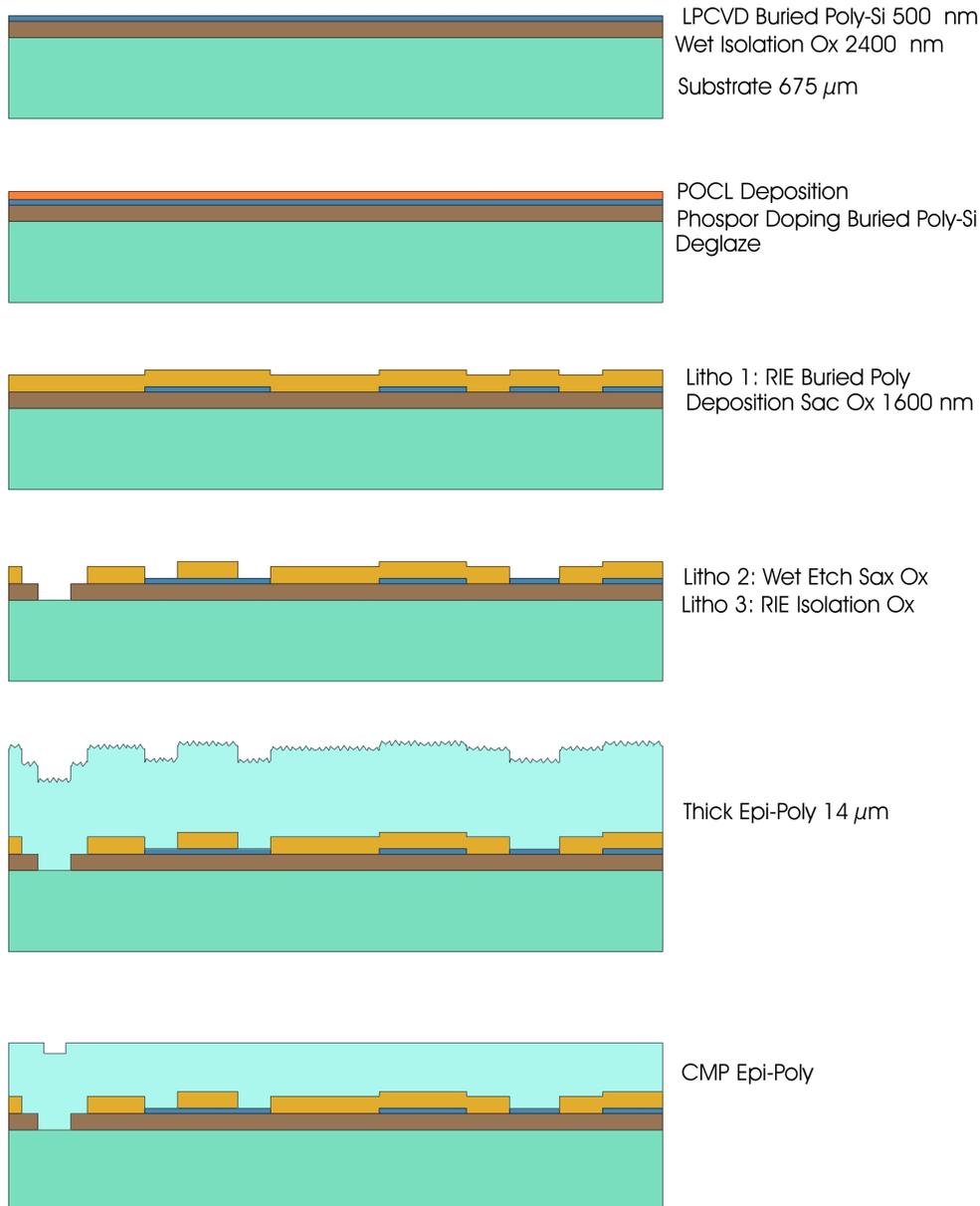


Abbildung A.2. Prozessablauf für Sensorwafer-Herstellung

A.2 Herstellung des Sensors

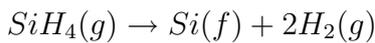
Die Herstellung des Sensorwafers basiert auf dem am ISIT etablierten oberflächenmikromechanischen PSM-X2-Prozess, dessen Grundzüge erstmalig von der Firma Bosch entwickelt wurden. Bei diesem Prozess wird auf einer Opferschicht (sacrificial oxide) Polysilizium abgeschieden und durch einen Trockenätzprozess strukturiert. Die Opferschicht wird weggeätzt und erzeugt so aus der strukturierten Polysiliziumschicht freistehende Strukturen.

In den Abbildungen A.2 und A.3 werden die nachfolgenden Ausführungen über die Herstellung des Sensorwafers näher erläutert.

Als Substratmaterial dient ein 675 μm 6 Zoll Siliziumwafer, der durch eine Phosphordotierung (n-Typ) einen spezifischen Widerstand von 1,5 Ωcm besitzt. In einem ersten

Prozessschritt wird in einem Vertikalofen ein 2,4 μm dickes thermisches Oxid aufgebracht, das als elektrische Isolation zum Substratwafer benutzt wird.

In einem LPCVD-Prozess (Low Pressure Chemical Vapour Deposition) wird eine 500 nm dicke Polysiliziumschicht (Buried Poly) abgeschieden, mit der vergrabene Leiterbahnen hergestellt werden. Beim LPCVD-Prozess wird ein Reaktionsgas, der sogenannte Precursor, in die Reaktionskammer eingelassen und durch thermische Einwirkung in Molekülbruchstücke aufgespalten. Ein Teil der Bruchstücke kondensiert auf der Substratoberfläche und bildet so die gewünschte Schicht. Zur Abscheidung von Polysilizium wird Silan (SiH_4) benutzt:



Diese Siliziumschicht muss, damit sie als Leiterbahn dienen kann, dotiert werden. Dieses geschieht in einem POCl_3 -Prozess. Das flüssige Phosphoroxichlorid wird in einem Trägergas (meist Argon) zum beheizten Wafer geführt. Dort bildet der Sauerstoff mit dem Silizium eine SiO_2 -Schicht, die stark phosphorhaltig ist. Durch einen weiteren Ofenschritt (800-900°C) werden die Phosphoratome in das LPCVD-Polysilizium eindiffundiert und es entsteht eine n-leitende Schicht. Das übriggebliebene SiO_2 wird in einem BOE-Bad (Buffered Oxide Etch: $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$) entfernt.

Nach der Strukturierung des Buried Poly durch einen Lithografieprozess und anschließendes Trockenätzen (RIE - reactive ion etching) wird eine 1,6 μm dicke Opferschicht in einem LPCVD-Prozess aus einer TEOS-Gasphase (Tetraethylorthosilicat) abgeschieden:



Die bei Raumtemperatur flüssige Verbindung geht im Vakuum in die Gasphase über und wird auf dem beheizten Substrat (650°C) in SiO_2 und andere Nebenprodukte aufgespalten, wobei sich das Oxid auf dem Wafer abscheidet. Die Opferschicht wird anschließend durch einen weiteren Lithografieprozess mit 2,5 μm dickem Lack und einem nasschemischen Ätzschritt (BOE Bad) strukturiert.

Eine dritter Lithografieschritt erzeugt mit 2,5 μm dickem Lack die Durchführungen für den Substratkontakt. Dafür wird das 2,4 μm dicke Isolationsoxid durch einen kombinierten Nass-/Trocken-Ätzschritt geöffnet.

Um auf diese unteren Sensorschichten eine 13,6 μm dicke Polysiliziumschicht abscheiden zu können, wird eine Startschicht (Seedlayer) benötigt. Deshalb wird eine 200 nm dicke LPCVD Siliziumschicht aufgebracht, auf der in einem Hochtemperaturschritt aus einer Dichlorsilan-Atmosphäre die dicke Epipolyschicht abgeschieden wird. Dabei wird das Prozessgas in einer Kammer bei 1050°C über die Wafer geleitet, wo es in niedermolekulare Bestandteile zerfällt und hochreines Silizium abgeschieden wird [141]:



Die notwendige Dotierung der Schicht erfolgt In-Situ mit Phosphin (PH_3). Bedingt durch die Konturen des Untergrunds der Polysiliziumschicht und der hohen Abscheiderate, weist die Schicht eine sehr starke Oberflächenrauigkeit auf. Deshalb schließt sich an die Epitaxie der Polysiliziumschicht ein chemisch-mechanischer Polierprozess (CMP) an, bei

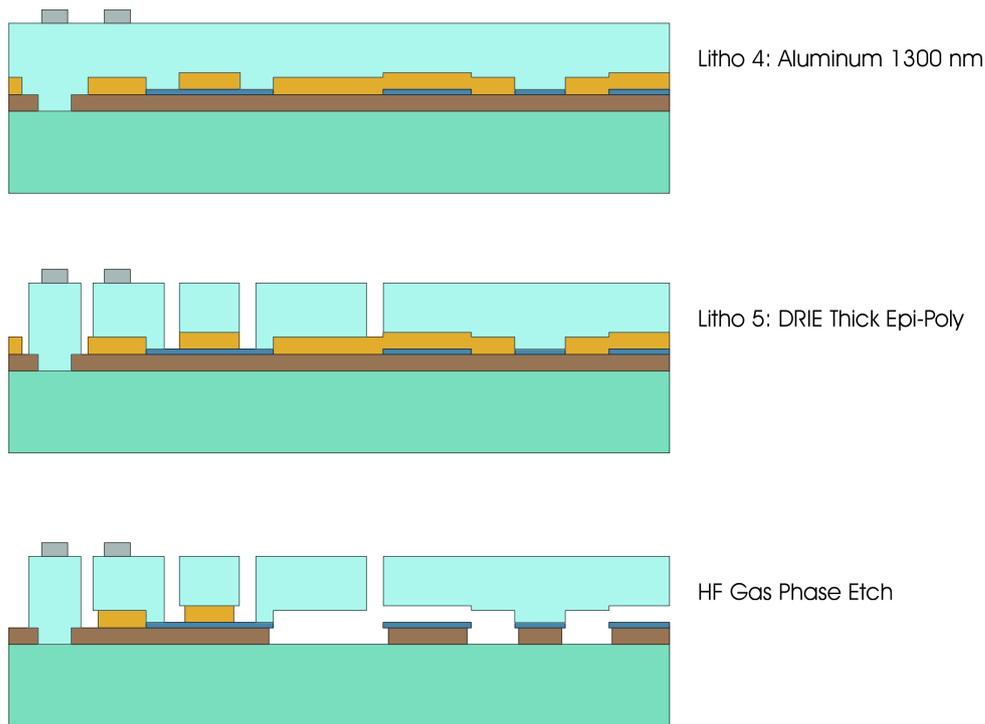


Abbildung A.3. Prozessablauf 2 des Sensorwafers

dem die $13,6 \mu\text{m}$ dicke Schicht auf $11 \mu\text{m}$ abgetragen wird, so dass die Oberflächenrauigkeit unterhalb von 2 nm (rms) liegt.

Da die Schicht einen mechanischen Stressgradienten von ca. $-6 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ besitzt, schließt sich an den Polierprozess ein Temperaturschritt in einer Sauerstoffatmosphäre an (Stress Anneal). Der Stressgradient wird dadurch auf Werte von unter $-0,1 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ reduziert. Ohne diesen Schritt würden sich die späteren freistehenden Strukturen stark verbiegen und so einen Ausfall des Bauteils erzeugen. Nach der Temperung wird das entstehende Oxid nasschemisch durch ein BOE-Bad entfernt.

Um den Sensor zu kontaktieren, werden Metallkontakte benötigt, die aus einer $1,3 \mu\text{m}$ dicken gesputterten Aluminiumschicht hergestellt werden. Das Aluminium wird nach dem Sputtern in einem vierten Lithografieschritt mit nachfolgender nasschemischer Ätzung strukturiert.

Anschließend erfolgt eine fünfte Lithografie, die die eigentlichen Sensorstrukturen erzeugt. Durch einen speziellen Hochratenätzprozess (DRIE - Deep Reactive Ion Etching) werden die Strukturen in die Polysiliziumschicht übertragen. Beim DRIE können Strukturen erzeugt werden, die ein sehr hohes Aspektverhältnis, d.h. das Verhältnis zwischen Breite und Tiefe der Struktur, aufweisen.

Der DRIE-Prozess besteht aus zwei Phasen, die in zeitlich kurzen Intervallen aufeinander folgen. In einer Ätzphase wird das Silizium mit einem Ätzgas (SF_6) entfernt, während es in einer Passivierungsphase mit einer Polymerschicht (C_4F_8) geschützt wird. In einem Plasma entstehen aus dem Ätzgas SF_6 reaktive Ionen, die gerichtet durch eine angelegte Spannung zum Substrat beschleunigt werden. Die Passivierungsschicht wird am Boden der Ätzgruben durch die Ionen abgetragen, an den vertikalen Seitenwänden fast unbeschädigt belassen [143]. Auf diese Weise können stark isotrope Ätzgruben erzeugt werden, wie sie in Abb. A.4 zu sehen sind.

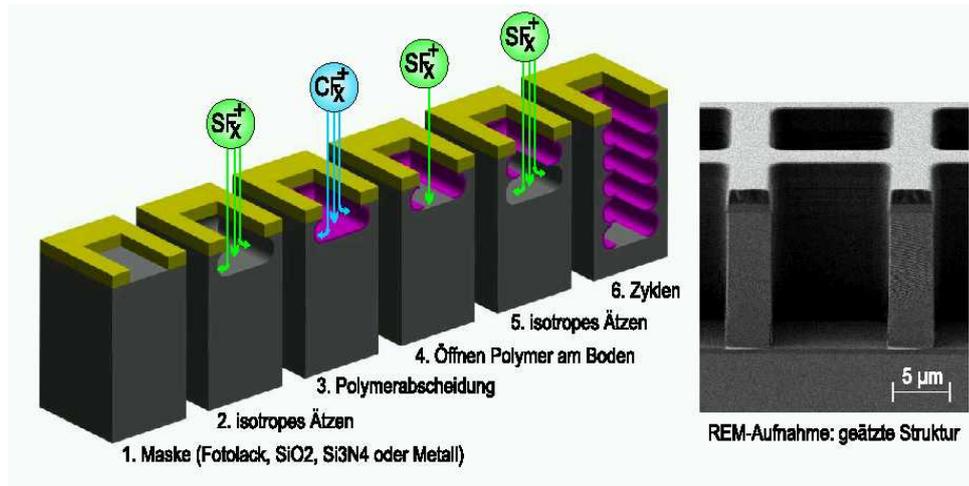


Abbildung A.4. Prinzip des anisotropen Hochratenätzprozesses zur Strukturierung des Poly-Siliziums und REM-Aufnahme einer mit DRIE strukturierten Schicht [139]

Das unterhalb des Siliziums liegende Opferoxid wird durch einen HF-Gasphasenätzprozess entfernt, so dass frei bewegliche Poly-Silizium Strukturen erzeugt werden. Die Entfernung des Oxid in der Gasphase ist nötig, da eine nasschemische Ätzung ein Verkleben der feinen Strukturen mit den angrenzenden Oberflächen zur Folge hätte.

A.3 Herstellung des Deckelwafers

Das Substratmaterial des Cap-Wafers ist ein 508 µm dicker, beidseitig polierter 6 Zoll Siliziumwafer. Der Wafer ist mit Bor dotiert (p-Typ) und weist einen spezifischen Widerstand von 1,5 Ωcm auf. Zu Anfang wird ein thermisches 650 nm dickes Siliziumoxid (initial oxide) aufgebracht, das später in zwei Lithografieschritten strukturiert wird. Auf der Waferrückseite werden Bond-Justagemarken und Sägemarken gesetzt und durch anschließendes Trockenätzen in das Oxid und das darunterliegende Silizium gebracht. Nach dem Wenden des Wafers wird, justiert auf die zuvor strukturierten Justagemarken, eine zweite Lithografie ausgeführt, um die Sensorkavitäten und Bondrahmen zu definieren. Diese werden ebenfalls durch einen Trockenätzprozess in das Substrat übertragen. Ein anisotroper Ätzprozess in einem KOH-Bad erzeugt die 60 µm tiefen Sensorkavitäten mit schrägen Flanken. Ein aufgedampftes Metallschichtsystem (Platingbase) dient einerseits als Haftvermittler, andererseits als Startschicht für die nachfolgende Goldgalvanik. Die Oxidmaskierung muss wegen der Unterätzung im KOH-Bad entfernt werden, da ansonsten keine definierte Kontaktierung des Bondrahmens erfolgt und die Goldgalvanik Defekte aufweist. Der Kappenwafer wird vor der Metallisierung erneut oxidiert um eine geschlossene Startschicht für eine galvanische Aufbringung von Goldrahmen zu garantieren.

Nach der dritten Lithografie auf der Wafer-Vorderseite, die die Bondrahmen definiert, wird auf die Platingbase eine 3 µm dicke Goldschicht im Galvanikbad aufgebracht. Bei einer Dicke der Goldgalvanikschicht von 3 µm hat sich eine Rahmenbreite im Bereich von 60 bis 80 µm als optimal herausgestellt, da bei stärkeren Rahmenbreiten (100 µm) nicht nur die Grubenwände durch das Eutektikum benetzt wurden, sondern ebenfalls die

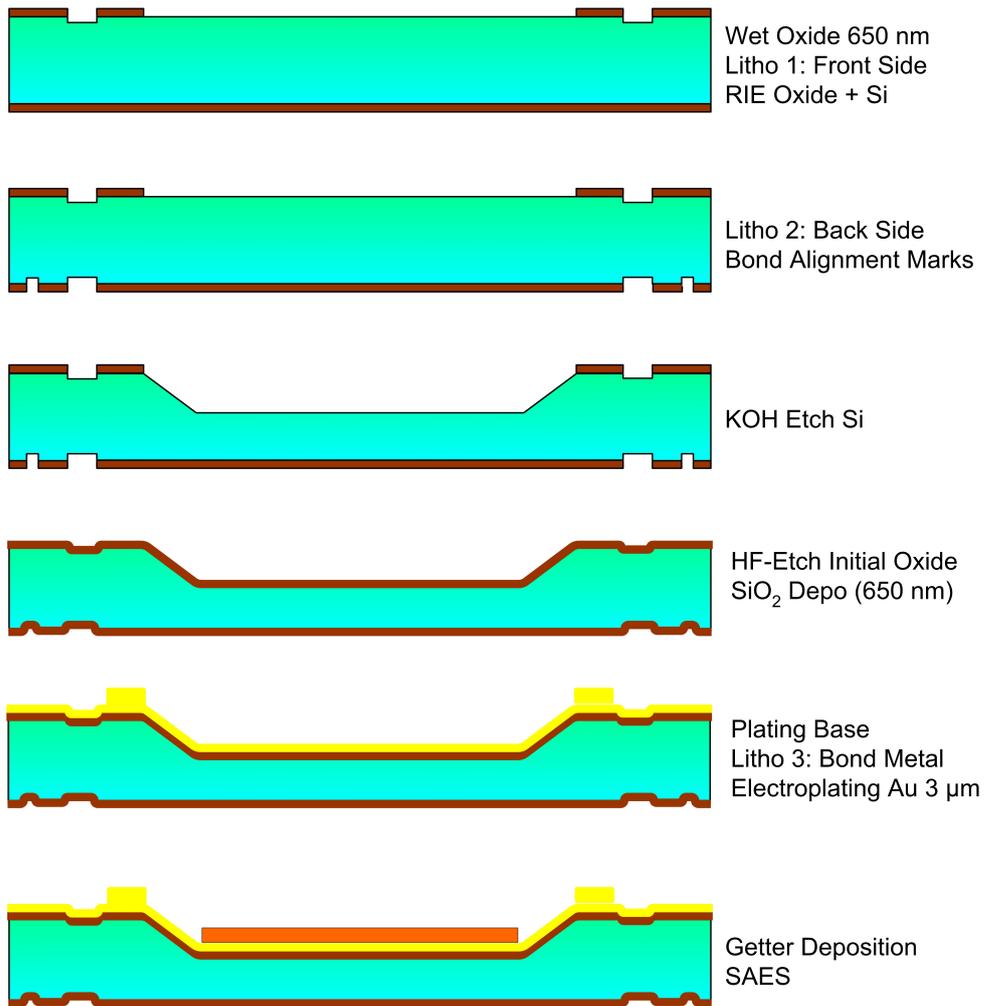


Abbildung A.5. Prozessablauf des Kapfenwafers

Decke der Grube, auf der sich der Getter befindet, welcher deswegen in seinem Absorptionsvermögen eingeschränkt werden würde. Wegen der besseren Feuchtebeständigkeit von Tantalschichten im Vergleich zu Titanschichten wird Tantal als haftvermittelnde Schicht im ISIT eingesetzt.

Im letzten Schritt wird der Wafer zur Partnerfirma SAES Getters geschickt, wo eine Getterschicht in die Sensorkavitäten gesputtert wird.

B Wafer Reinigungsprozeduren

Sowohl die Forderung, in den Sensorkavitäten einen gezielten Innendruck einzustellen und zu erhalten, als auch die Tatsache, dass der eutektische Verbindungsprozess auf der Diffusion von Gold- und Siliziumatomen an den Kontaktflächen der Wafer beruht, macht eine penible Vorbehandlung der Wafer mit adäquaten Reinigungsprozeduren unverzichtbar.

Die Reinigung am Sensorwafer soll eventuelle organische Kontaminationen, die durch das Hochratenätzen an den Seitenwänden der Sensorstrukturen aufgebracht wurden, entfernen. Diese C_nF_m -Verbindungen werden durch den Getter nicht chemisorbiert. Sie würden durch die relativ hohen Temperaturen beim Verbindungsprozess von den Seitenwänden ausgasen und so das Vakuum gefährden. Außerdem muss die Reinigung des Sensorwafers eine äußerst saubere und glatte Oberfläche für den eigentlichen Verbindungsprozess sicherstellen. Nicht nur organische Kontaminationen, hervorgerufen durch das Hochratenätzen und vorhergehende Lithografieschritte, sondern auch schon dünne Oxidschichten auf der Waferoberfläche würden die notwendige Diffusion des Siliziums stark behindern und so in einer inhomogenen und unzureichenden Verbindung resultieren. Allerdings ist die Auswahl der richtigen Reinigung durch das Vorhandensein der Anschlusskontakte aus Aluminium eingeschränkt (Kap. A), denn diese dürfen dabei nicht beschädigt werden. Zudem dürfen Nassreinigungsschritte nur vor dem HF-Gasphasenätzen erfolgen, da ansonsten die feinen Sensorstrukturen durch die Reinigungsflüssigkeit verkleben würden.

Die Reinigung des Deckelwafers bezweckt ähnlich wie beim Sensorwafer die Entfernung organischer Kontaminationen und kleiner Partikel, die eine einwandfreie Funktion des Sensor verhindern würden. Dabei muss die Reinigung mit dem Getterfilm kompatibel sein. Sie darf also die Getterleistung weder einschränken noch den Getterfilm selbst zerstören.

Im Folgenden werden die am ISIT verfügbaren Waferreinigungs-Prozeduren evaluiert und auf ihre Tauglichkeit bzw. Kompatibilität mit dem Prozess bewertet.

B.1 Verfahrensklassen

Die in Tabelle B.1 verfügbaren nasschemischen Reinigungsschritte können in drei Bereiche aufgeteilt werden. Zum einen gibt es oxidierende und komplexierende Verfahren, wie z.B. SC1, SC2 und Piranha sowie deren mannigfaltige Kombinationen (wie z.B. RCA), deren Reinigungswirkung unter anderem darauf beruht, dass durch die oxidierende Wirkung die Waferoberfläche hydrophiliert wird, wodurch die Benetzung durch Wasser gesteigert wird.

Weiter gibt es hydrophobierende Verfahren (HF-Bad, BOE), die für die Entfernung von Oxiden und Nitriden verwendet werden können. Das HF- bzw. BOE-Bad ist im eigentlichen Sinne keine Reinigungsprozedur, weil sie auch u.a. zur Strukturierung von SiO_2 -Schichten verwendet wird. Die Ätzgeschwindigkeit von einer BOE-Lösung liegt z.B. für

SiO₂ bei ca. 70 nm/min. Desweiteren stehen Lösungsmittel (RER,EKC) zur Verfügung,

Verfahren	Zusammensetzung	Anwendung
SC1 (Standard Clean 1)	NH ₄ OH/H ₂ O ₂ /H ₂ O im Verhältnis 1:1:10 bis 1:2:8 bei 70°C	Organische Kontaminationen Metallkonta- minationen (Cu-Gruppe)
SC2 (Standard Clean 2)	HCl/H ₂ O ₂ /H ₂ O im Verhältnis 1:1:10 bis 1:2:8 bei 70°C	metallische Kontaminationen und Partikel (Fe-Gruppe)
Piranha (Carosche Reinigung)	H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ im Verhältnis 4:1 bis 2:1 bei bis zu 110°C	insb. organische
RCA	Kombination aus Piranha/SC1/SC2	siehe SC1, SC2 und Piranha
HF-Bad	HF/H ₂ O im Verhältnis 1:2	Entfernung von Oxid- und Nitridschichten
BOE (Buffered Oxide Etch)	gepufferte HF-Lösung mit Ammoniumflourid als Puffersalz (9:1))	Entfernung von Oxid- und Nitridschichten
RER	55-60% Ethyllactat 40-45% Methylethyl- keton	1. Schritt der Lackentfernung
EKC	2-(2-Aminoethoxy-) Ethanol N-Methylpyrolidon (EKC830)	2. Schritt der Lackentfernung

Tabelle B.1: Verfügbare Reinigungsverfahren (Nasschemisch)

die insbesondere bei der Lackentfernung nach einem Lithografieschritt Anwendung finden. Außerdem gibt es rein physikalische Reinigungsverfahren, wie der O₂-Plasmastrahl und das Ar-Ionmilling. Diese sind in Tab. B.2 aufgeführt. Auch hier ist das Ionmilling keine eigentliche Reinigung. Durch den Beschuss mit hochenergetischen Argonionen werden, ähnlich dem Sputtern, Oberflächenatome herausgeschlagen. Durch den physikalischen Sputtereffekt ist das Ionmilling nicht selektiv.

B.2 Wirkprinzip der oxidierenden Verfahren

Die Reinigungsschritte SC1 und SC2 werden normalerweise sequenziell ausgeführt. Wasserunlösliche organische Kontaminationen können die Waferoberfläche hydrophobieren, so dass eine effektive Entfernung metallischer Partikel und Kontaminationen verhindert

Verfahren	Wirkprinzip	Anwendung
O ₂ -Plasmastrip (Veraschen)	reaktive Sauerstoffatome reagieren mit Organika und überführen sie in Gasphase [143]	Entfernung von Photolack und Organika
Ar-Ionmilling	Schichtabtrag durch in einem Plasma erzeugte auf das Substrat gerichtete Ar ⁺ -Ionen [143]	Si Oberflächen-Reinigung, Dünnschicht-abtrag (nicht selektiv)

Tabelle B.2: Verfügbare Reinigungsverfahren (Physikalisch)

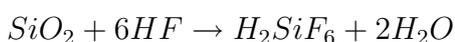
wird. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Entfernung der Organika vor der Entfernung von Metallen durchzuführen. Durch die lösende Wirkung des in der SC1-Lösung enthaltenen NH₄OH und der stark oxidierenden Wirkung des H₂O₂ bei einem hohen pH-Wert werden organische Kontaminationen zuverlässig entfernt [155]. Außerdem ist das NH₄OH ein starker Komplexbildner für einige Metalle der Gruppe Ib, IIb und VIIIb (Cu, Ag, Ni, Co und Cd). Es wird davon ausgegangen, dass die durch elektrostatische, van der Waals- und Kapillarkräfte nicht löslichen Partikel von der SC1-Lösung in ihrer Eigenschaft als Flüssigkeit von der Oberfläche separiert werden [155]. Der sogenannte isoelektrische Punkt einer SiO₂-Oberfläche liegt bei einem pH-Wert von 2, d.h. bei diesem pH-Wert ist die Oberfläche ungeladen. Durch ein basisches Ambiente, (hervorgerufen durch die SC1-Lösung) mit dem pH-Wert 13, ist die SiO₂-Oberfläche stark positiv geladen. Damit werden alle positiv geladenen Partikel abgestoßen. Die Wirkungsweise der Piranha-Reinigung ist in etwa gleich der SC1-Reinigung. Allerdings ist ihre hydrophilisierende Wirkung, beschrieben durch den Kontaktwinkel, den ein Wassertropfen mit der Waferoberfläche bildet, schlechter als die der SC1. Mit einer Piranha-Reinigung behandelte Flächen weisen einen Kontaktwinkel von ca. 8° auf, während der Kontaktwinkel nach einer SC1-Reinigung etwa 5° beträgt [155].

Nach dem SC1-Schritt wird die SC2-Lösung dazu benutzt, Metalle und alkalische Kontaminationen, wie Al, Fe, Mg, Au, Cu, Cr, Ni, Mn, W, Pb, Nb, Co und Na, zu entfernen. Dabei bildet das HCl in H₂O₂ durch Lösung und Komplexbildung lösliche Metallsalze.

Beide Lösungen wirken stark oxidierend, deshalb bildet sich auf der Waferoberfläche eine dünne natürliche Oxidschicht, die für eine hydrophile Oberfläche sorgt.

B.3 Wirkungsweise der HF-haltigen Lösungen

Bei der Behandlung von Wafern in einer HF-haltigen Lösung, z.B. in einem HF- oder BOE-Bad, wird eventuelles Oxid an der Oberfläche entfernt [143]:



Oft wird ein HF-Dip angewendet, um die auf den Wafern nach einer RCA-Reinigung entstandene natürliche dünne Oxidschicht zu entfernen. Außerdem werden mit HF-haltigen Lösungen Oxidschichten strukturiert.

B.4 Temperaturabhängigkeit der Gasviskosität

Viskosität verschiedener Gase [mbar·s]

Gas	Viskosität bei -50 °C	Viskosität bei 0 °C	Viskosität bei 25 °C	Viskosität 150 °C
Wasserstoff	$7,31 \cdot 10^{-8}$	$8,28 \cdot 10^{-8}$	$8,95 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$
Helium	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$1,87 \cdot 10^{-7}$	$1,99 \cdot 10^{-7}$	$2,55 \cdot 10^{-7}$
Stickstoff	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$
Sauerstoff	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$1,91 \cdot 10^{-7}$	$2,06 \cdot 10^{-7}$	$2,66 \cdot 10^{-7}$
Argon	$1,76 \cdot 10^{-7}$	$2,08 \cdot 10^{-7}$	$2,23 \cdot 10^{-7}$	$2,92 \cdot 10^{-7}$
Neon	$2,43 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-7}$	$3,21 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$
Krypton	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$
Xenon	$1,54 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-7}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$	$3,07 \cdot 10^{-7}$

Tabelle B.3: Temperaturabhängigkeit der Gasviskosität

Daten in Tabelle B.3 stammen von der Fa. Saes Getters, Italien.

Thesen

1. Die Oberflächenmikromechanik stellt eine Schlüsseltechnologie zur Herstellung präziser Mikrosensoren dar. Zu ihren Vorteilen gehört die einseitige Waferbearbeitung und günstige Gesamtprozesse mit wenigen Maskenebenen. Sehr kleine Sensoren können realisiert werden und es besteht die Möglichkeit zur monolithischen Integration mit elektronischen Auswerteschaltungen.
2. Die frei beweglichen Strukturen mikromechanischer Bauteile müssen direkt nach dem Freiätzen mit einem Deckel versehen werden, um die weitere Verarbeitung durch Trennschleifen und Aufbau- und Verbindungstechnik und letztlich den Verwendungseinsatz zu ermöglichen. Die Verkapselung wird vorzugsweise auf Waferebene durch den Einsatz von Wafer Bondtechnologien durchgeführt, wodurch die Verwendung von Standard SMT-Gehäusungstechnologien ermöglicht werden kann.
3. Oberflächenmikromechanische Bauteile stellen bedingt durch ihre Struktur und die Herstellungstechnologien besondere Anforderungen an den Verkappungsprozess (glatte Bondoberflächen, begrenzte Bondtemperatur, schmale Bondrahmen, begrenzte Aktivierungs- und Reinigungsmöglichkeiten, Vermeidung von Partikelgenerierung und Stiction, Zugang zu Bondpads, Leiterbahnführungen unterhalb der Bondebene, langfristige Gasdichtheit), die alle bei der Auswahl und Prozessoptimierung einer Bondtechnologie zu berücksichtigen sind.
4. Durch den Einsatz von Bondzwischen-schichten können viele Anforderungen erfüllt werden. Insbesondere Gold hat sich als geeignet herausgestellt, da das gebildete schmelzflüssige AuSi-Eutektikum vorhandene Kratzer im Bondrahmen ausfüllt, Partikel einschließt, hermetisch dicht und mechanisch sehr fest ist. Nach einer Prozessoptimierung wurde auch eine exzellente Alterungsbeständigkeit des Bondinterfaces gegenüber feuchter Wärme erreicht.
5. Die Bondparameter wurden experimentell optimiert und unter Verwendung des Neon Ultra-Feinlecktests bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass eine kurze Verweildauer zwischen Freiätzen der resonanten Strukturen und Waferbondung entscheidend ist um sehr gute Auslagerungsergebnisse in Feuchter Wärme (Pressure Cooker 121 °C, 2 bar 96 h, 100 % R.F.) zu realisieren. Der Aufpressdruck bestimmt die Dicke der eutektischen Fügezone und hat Einfluss auf den eingeschlossenen Rückfülldruck, die Dichtigkeit, den eingebrachten Stress in der Fügezone und die Lebensdauer in feuchter Umgebung.
6. Durch Kavitäten im metallisierten Kappenwafer kann das gebildete Eutektikum gezielt von den resonanten Strukturen weggeführt werden. Eine ungewollte Benetzung

der Strukturen oder eine Bildung von AuSi-Partikeln und Kugeln wird so vermieden. Diese für alle metallischen Bondverfahren sinnvolle Ausführungsform wurde zum Patent angemeldet.

7. Die Bondausbeute des eutektischen Bondens ist auch mit Gasrückfüllprozess sehr hoch. Ausbeuteverluste basieren primär auf Prozessdefekten in den resonanten Strukturen selbst.
8. Die Dicke der eutektischen Fügezone beträgt weniger als $0,5 \mu\text{m}$ und ist sehr gleichmäßig über den Wafer.
9. Die eutektische AuSi-Waferbondung kann auf unterschiedlichen Poly-Silizium Schichten, auf SOI-Wafern und auf Mono-Silizium Wafern durchgeführt werden. In Vorversuchen wurden unterschiedliche Festigkeiten der Fügeverbindungen registriert.
10. Unterschiedliche metallische Haftvermittler unter dem galvanisch verstärkten Goldring wurden untersucht. Mit allen Haftvermittlern kann eine hermetische, mechanisch belastbare Fügeverbindung erzielt werden. Nur mit Tantal als Haftvermittler konnten ausreichend lange Bauteil-Lebensdauern in Feuchter Wärme realisiert werden.
11. Die eutektisch gebondeten Drehratensensoren mit optimalem Metallisierungsaufbau überstehen alle ohne zusätzliche Gehäuse eine Auslagerung in einer gesättigten Wasserdampf-Atmosphäre bei $121 \text{ }^\circ\text{C}$ und 2 bar Absolutdruck für mehr als 96 h ohne Vakuumdegradation, einige Bauelemente haben 1500 h Auslagerung ohne Veränderung des eingeschlossenen Vakuums überstanden.
12. Das Waferbonden unter Vakuum ist möglich. Der minimal einschließbare Druck hängt stark von der Prozessierung der Wafer ab. Bei der Vorprozessierung ist insbesondere auf die Vermeidung der Einbringung von Argon in die Oberfläche der Wafer zu achten.
13. Zuverlässigkeitstests zeigen eine außerordentlich hohe thermische und Temperaturwechsel-Belastbarkeit der Fügezone.
14. Die Verwendung eines Dünnschichtgetters der Fa. Saes Getters hat sich als sehr erfolgreich erwiesen. Ohne Argon-Rückfüllung kann ein Kavitätäsvakuum im Bereich besser 10^{-3} mbar standardmäßig erreicht werden.
15. Die Einstellung der Dämpfungsatmosphäre kann durch eine definierte Einbringung von Argon als Reingas oder als Mischgas mit Stickstoff-Trägergas vor der Klemmung des Waferpaares im Bondprozess durchgeführt werden. Beim Einsatz der Mischgas-Rückfüllung wird der Getter bis zu 20 % vorgesättigt. Die Mischgas-Rückbefüllung mit der Möglichkeit zur Überprüfung der Getteraktivierung ist zum Patent angemeldet.
16. Der Neon Ultra-Feinlecktest wirkt nicht zerstörend und kann mehrmals hintereinander angewendet werden. Der Auslagerungsüberdruck muss an die geometrische Bauteilform und die mechanische Belastbarkeit der Kappe angepasst werden. Auslagerungsdrücke liegen typischerweise im Bereich bis 4 bar und können in unaufwendigen, evakuierbaren Druckbehältern erzeugt werden. Höhere Überdrücke bedingen spezielle Druckbehälter, sind aber ohne weiteres möglich.

17. Die Methode der Güteüberwachung zur Identifizierung von undichten Bauteilen konnte an über 40 Wafern mit jeweils ca. 1400 Bauteilen angewendet werden. Das Verfahren ist als Waferebene anwendbar und unabhängig von der Waferdicke, Wafermaterial und Waferdurchmesser.
18. Die Überdruckauslagerung kann im Batch an Wafern, gesägten Wafern auf Folie oder an Einzelbauteilen durchgeführt werden und verursacht geringen Handhabungsaufwand und geringe Kosten.
19. Die Messung ergibt den Initialleitwert für Neon, aus der sich die Initialleckrate für atmosphärische Luft berechnen lässt.
20. Die Messergebnisse sind weitestgehend unbeeinflusst von der Wartezeit zwischen Auslagerung und Messung des Gütefaktors.
21. Neon beschleunigt die Auslagerung um 40 % gegenüber Argon.
22. Neon als Prüfgas erzeugt bei Raumtemperatur keine messbaren Permeationseffekte.
23. Ein 100 % in-line Test aller Bauteile auf Waferebene ist auf einem Standard Waferprober möglich.
24. Die Leckratenmessung kann in die normale Bauteilcharakterisierung integriert werden. Für höchste Messempfindlichkeit muss eine Referenzmessung vor der Überdruckauslagerung durchgeführt werden.
25. Die Leckratenmessung kann gleichzeitig zur Überwachung der Gettereigenschaften benutzt werden, sofern eine Mischgasrückfüllung mit einem Anteil eines absorbierbaren Gases und einem Anteil Edelgas durchgeführt wird. Die hierzu notwendige Abstufung der Getterflächen in ausgewählten Sensorkavitäten wurde zum Patent angemeldet. Die zur Gettercharakterisierung benutzten Bauelemente werden als Prozess Kontrollmodule markiert.
26. Bei hochgütigen Sensoren ist der Nachweis von sehr kleinen Standard Luftleckraten im Bereich 10^{-17} mbar· l/s möglich.
27. Die Messempfindlichkeit nimmt mit abnehmendem Sensorkavitätswolumen zu, jedoch auch die Dichtigkeitsanforderungen. Beides hebt sich gegenseitig auf.
28. Die reproduzierbare Präzisionsmessung des Gütefaktors setzt einen gewissen messtechnischen Aufwand voraus. Die sogenannte Ring-Down Methode hat sich im ISIT zur Gütebestimmung bewährt. Gehäuste Referenzsensoren eignen sich zum Kallibrieren des Messaufbaus.
29. Der Gütefaktor ist bei gleichartigen Bauteilen geringfügig abhängig von der jeweiligen individuellen Resonanzfrequenz. Die Messempfindlichkeit hängt nicht von der über das Sensordesign eingestellten Resonanzfrequenz ab.
30. Die Gütemessung funktioniert auch nach der weiteren Verpackung des Sensors in Plastikgehäuse und nach einer beschleunigten Alterung, weil Neon hohe Permeationsraten in Kunststoffen aufweist. Die Auslagerungszeiten sind jedoch zu verlängern.

31. Optional können durch eine temperierte Ne-Überdruckauslagerung (600 K) Schwankungen im Gasbefüllungsdruck der Sensoren auf dem Wafer ausgeglichen werden und gleichzeitig Sensoren mit zu hoher Leckrate identifiziert werden. Das Verfahren wurde vom ISIT zum Patent angemeldet.
32. Der Neon Ultra-Feinlecktest ist auf viele unterschiedliche, resonant anregbare Mikrosensoren anwendbar, unabhängig von der eingesetzten Verkappungstechnologie. Der Neon Ultra-Feinlecktest ist weltweit zum Patent angemeldet.

Literaturverzeichnis

- [1] H. GREENHOUSE: *Hermeticity of Electronic Packages*. Noyes Publications, New Jersey, 1999.
- [2] HIRSCHFELDER, CURTIS, and BIRD: *Molecular theory of gases and liquids*. John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, 1964.
- [3] H. EMMERICH: *Oberflächenmikromechanische Sensoren für Drehbeschleunigung und magnetische Feldstärke*. Doktorarbeit, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-9786-9, 2002.
- [4] ERIK JUNG: *Packaging-Optionen für MEMS-Bausteine*. VTE, Dezember, 2002.
- [5] DAVID FORMAN: *Mems industry recognizes packaging can make or brake a product*, 2003.
- [6] KIERAN P. HARNEY: *Standard semiconductor packaging for high-reliability low-cost mems applications*. In *Proc.SPIE*, volume 5716 of *Proc. SPIE, Reliability, Packaging, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS IV*; Danelle M. Tanner, Rajeshuni Ramesham; Eds., pages 1–8, 2005.
- [7] SHARI N. FARRENS: *Packaging methods and techniques for moems and mems*. In *Proc.SPIE*, volume 5716 of *Proc. SPIE, Reliability, Packaging, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS IV*; Danelle M. Tanner, Rajeshuni Ramesham; Eds., pages 9–18, 2005.
- [8] L. OUELLET: *United states patent us 6,635,509 b1 wafer-level mems packaging*, 2003.
- [9] S. LIU: *Mems packaging and testing*. China-ER Forum on Nanosized Technology, Beijing, P.R. China Dec. 2002.
- [10] W. REINERT: *Vacuum wafer bonding technology*. In *IMAPS*, volume May of *Proc. MicroTech 2005*, Cambridge, 2005.
- [11] WWW.PIDEA.COM.FR: *WHITE BOOK, A strategic EUREKA cluster programme for interconnection and packaging in Europe*, April 2004.
- [12] MAIK WIEMER und THOMAS GESSNER: *Montage- und Kontaktierungstechnologien zur Waferlevelintegration*. VTE, Dezember, 2002.
- [13] H. HENMI, S. SHOJI, K. YOSHIMI, and M. ESASHI: *Vacuum packaging for micro-sensors by glass-silicon anodic bonding*. 7th int. conference on solid-state sensors and actuators, pages 584–587, 1994.

- [14] M. ESASHI, S. SUGIYAMA, K. IKEDA, and Y. WANG: *Vacuum-sealed silicon micromachined pressure sensors*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1627 ff., 1998.
- [15] G. WESTPHAL and M. WADSWORTH: *Bolometer array spectrometer*, 1998.
- [16] S. TOMINETTI and ANNA DELLA PORTA: *Moisture and impurities detection and removal in packaged mems*. Proc.of SPIE, 4558:215–225, 2001.
- [17] KEN GILLES and STEVE CORBETT: *Getters-molecular scavengers for packaging*. HDI, January 2001:26–29, 2001.
- [18] JET PROPULSION LABORATORY, PASADENA, CALIFORNIA: *MEMS reliability assurance guidelines for space applications*, JPL Publication 99-1, January 1999.
- [19] D. SPARKS, S.MASSOUD-ANSARI, and N. NAJAFI: *Chip-level vacuum packaging of micromachines using nanogetters*, 2003.
- [20] JPL: *Jpl, report no. smc97-0701: Hydrogen effects of gas microwave semiconductors*, 1997.
- [21] R.J. KNIZE and J.L. CECCHI: *Theory of bulk gettering*. Journal of Applied Physics, 54(6):3183–3189, 1983.
- [22] P. DANIELSON: *How to use getters and getter pumps*, 2001.
- [23] R. KULLBERG, H. FLORENCE, M. MORAJA, and R. PETERSEN: *Getters for microelectronic packages*. Advanced Packaging, qmags, 12/04:30–33, 2004.
- [24] A. CORAZZA and R.C. KULLBERG: *Vacuum maintenance in hermetically sealed mems packages*. Part of the SPIE Conference on Micromachined Devices and Components, 3514:82–89, 1998.
- [25] B. FERRARIO: *Getters and getter pumps, Foundations of Vacuum Science and Technology*, J.M.Lafferty Ed. John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [26] ULRICH MESCHEDER: *Mikrosystemtechnik - Konzepte und Anwendungen*. B.G.Teubner,Leipzig, 2000.
- [27] C. ALAIN, H. JEROMINEK, P. TOPART, T.D. POPE, F. PICARD, F. CAYER, C. LAROUCHE, S. LECLAIR, and B. TREMBLAY: *Microfabrication services at ino*, 2004.
- [28] M. AMIOTTI and M. MORAJA: *Presentation: Results of outgassing measurements at SAES Labs*. 2003.
- [29] M. ARITOMI, N. LI, H. ASANO, R. ASANO, and T. KAWA: *Evaluation method of gas leakage rate from transportation of radioactive materials: effect of kinds of gases on leakage rate*. ASME-JSME Nuclear Engineering Conference, 1(1):77–84, 1993.
- [30] ASTM: *Standard test method for measuring package and seal integrity using helium as the tracer gas*, 2005.

- [31] T. L. BAJENESCU: *Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten*. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1985.
- [32] BALZERS: *Pfeiffer / Balzers Vakuum Katalog*, 2000.
- [33] J.L. BARLETT: *Hermetic chip scale packaging means and method including self test*, 2003.
- [34] D. BAUMER, E. RIEDEL, J. BIERHALS, M. ESCHWEY, C. GÖKCEK, J. GREFER, R. HAMM, D. HEESCHEN, H. HILLER, D. KÜSTER, H. LUGMAYR, D. SCHMICKER und W. SCHRECKENBERG: *Gase-Handbuch*. In: E. RIEDEL D. BAUMER (Herausgeber): *Messer Griesheim Gase Handbuch*, Seite ff. Messer Griesheim GmbH, Düsseldorf, Frankfurt, 1990.
- [35] H. GOBRECHT: *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1, 9. Auflage, Mechanik, Akustik, Wärme*. Walter de Gruyter, Berlin, 1974.
- [36] D.S. BINDEL, E. QUEVY, T. KOYAMA, S. GOVINDJEE, J.W. DEMMEL, and R.T. HOWE: *Anchor loss simulation in resonators*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 133–136, Miami, Florida, 2005.
- [37] K. BIRKELUND, M. SÖRENSEN, S. CHIRIAEV, P. GRAVESEN, and P.B. RASMUSSEN: *High pressure sensor based on fusion bonding*, 2001.
- [38] F.R. BLOM, S. BOUWSTRA, M. ELWENSPOEK, and J.H.J. FLUITMAN: *Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry*. *Journal of VAcuum Science and Technology*, B10(01/02):19–26, 1992.
- [39] W.-D. HAECKER: *Hochporöses Silizium zerfällt wie Badeschaum*, 2003.
- [40] STUART B. BROWN: *A littel knowledge, uninvestigated factors govern the reliability of micro devices. what must be done to address them?* *Mechanical Engineering*, 4:8–12, 2003.
- [41] S. CAPLET, N. SILLON, M.T. DELAYE, and P. BERRUYER: *Vacuum wafer-level packaging for mems applications*. *Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII*, 4979(2003 SPIE):271–278, 2003.
- [42] JUNSEOK CHAE, BRIAN H. STARK, and KHALIL NAJAFI: *A micromachined pirani gauge for vacuum package characterization*, 2004.
- [43] Y.-T. CHENG, W.-T. HSU, K. NAJAFI, C.T.-C. NGUYEN, and L. LIN: *Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon-to-glass bonding*. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(5):556–565, 2002.
- [44] S.T. CHO and F.M. ERDMANN: *An on-chip hermetic packaging technology for micromechanical devices*. pages 229–232, 1998.
- [45] R.A. CLARKE and A. DERMARDEROSIAN: *Variable leak rate phenomena in glass to metal seals*. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, June:828–832, 1998.

- [46] C.A. CLAROTTI and D.V. LINDLEY: *Accelerated life testing and experts opinions in reliability*. In *Accelerated Life Testing and Experts Opinions in Reliability*, volume September 1988 of *International School of Physics Enrico Fermi*, page 236, North-Holland, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1988.
- [47] M.B. COHN, Y. LIANG, R.T. HOWE, and A.P. PISANO: *Wafer-to-wafer transfer of microstructures for vacuum packaging*. Solid State Sensor and Actuator Workshop, June 3-6(1967469):32–35, 1996.
- [48] M.M. MAHARBIZ, M.B. COHN, R.T. HOWE, R. HOROWITZ, and A.P. PISANO: *Batch micropackaging by compression-bonded wafer-wafer transfer*. IEEE International MEMS 99 Conference, 17.-21. January:482–489, 1999.
- [49] P.D.T. O’CONNOR: *Practical Reliability Engineering*. John Wiley Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1985.
- [50] T. CORMAN: *Vacuum-sealed and gas-filled micromachined devices*. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Department of signals, sensors and systems, Stockholm, Stockholm, 1999.
- [51] P. DANIELSON: *The effects of humidity on vacuum systems*, 2001.
- [52] J.G. DAVY: *Model calculations for maximum allowable leak rates of hermetic devices*. Journal of Vacuum Science and Technology, 12(1):423 ff., 1975.
- [53] J.G. DAVY: *Calculations for leak rates of hermetic packages*. IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging, PHP-11(3):177–189, 1975.
- [54] R. H. DOREMUS: *Glass Science*. John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1973.
- [55] G. ECKE: *Vorlesung Vakuumtechnologie in der Halbleiterindustrie*, 1999.
- [56] C. EDELMANN: *Vakuumphysik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1974.
- [57] DAOHENG SUN and DANE CHRISTENSEN: *Nano-getters for mems applications*, 2005.
- [58] T. CORMAN, P. ENOKSSON, and G. STEMME: *Gas damping of electrostatically excited resonators*. Sensors and Actuators, A(61):249–255, 1997.
- [59] S. FISCHER: *Mechanical resonator for hermeticity evaluation of RF MEMS wafer-level packages*. Master’s thesis, Royal Institute of Technology, Department of signals, sensors and systems, Stockholm, 2002.
- [60] J. GASPAR, T. ADREGA, V. CHU, and J.P. CONDE: *Thin-film paddle microresonators with high quality factors fabricated at temperatures below 110 c*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 125–128, Miami, Florida, 2005.
- [61] JUNSEOK CHAE, JOSEPH M GIACHINO, and KHALIL NAJAFI: *Wafer-level vacuum package with vertical feedthroughs*. In *Proc. MEMS 2005, Miami*, IEEE Proc., pages 548–551, 2005.

- [62] M.J. GIBNEY: *Predicting package defects: quantification of critical leak size*. Master's thesis, 2000.
- [63] A. DERMARDERSOSIAN and V. GIONET: *Water vapor penetration rate into enclosures with known air leak rates*. IEEE Transactions on Electron Devices, ED-26(1):83–90, 1978.
- [64] M.GOETZ: *Advanced saw packaging for modular integration*, 2004.
- [65] H. GUCKEL and D.W. BURNS: *Sealed cavity semiconductor pressure transducers and method of producing the same*, 1989.
- [66] F. GUEISSAZ: *Ultra low leak detection method for mems devices*. In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pages 524–527, 2005.
- [67] D.F. GUILLOU: *Packaging mems: new manufacturing methodology substantially reduces smart mems costs*, 2003.
- [68] W.-D. HAECKER: *Qualitätsurteil: Lebenslänglich*, 2003.
- [69] Ö. HALLBERG and D.S. PECK: *Recent humidity accelerations, a base for testing standards*. Quality and Reliability Engineering International, 7:169–180, 1991.
- [70] H. GEORGE HAMMON, KLAUS ERNST, and JOHN C. NEWTON: *Noble gas permeability of polymer films and coatings*. Journal of applied polymer science, 21:1989–1997, 1977.
- [71] Z. HAO and F. AYAZI: *Support loss in micromechanical disk resonators*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 137–141, Miami, Florida, 2005.
- [72] R. HORNING, W. HERB, and R. MARTIN: *First-level packaging of a resonant microbeam accelerometer using wafer bonding*. Electrochemical Society Proceedings, 36:106–113, 1997.
- [73] C. VAN HOOF: *Hybrid zero-level packaging of mems devices*, 2003.
- [74] ISOVAC: *How the radiflow process works*, 2004.
- [75] Z.D. JASTRZEBSKI: *The nature and properties of engineering materials*. John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1987.
- [76] J. JIN, Z. WANG, L. ZHAO, and P.C. LIM: *Zr/v/fe thick film for vacuum packaging of mems*, 2004.
- [77] A. JOURDAIN, K. VAESEN, J.M. SCHEER, J.W. WEEKAMP, J.T.M. VAN BEEK, and H.A.C. TILMANS: *From zero- to second-level packaging of rf-mems*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 36–39, Miami, Florida, 2005.
- [78] C. KITTEL und H. KRÖMER: *Physik der Wärme*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1989.
- [79] M. KNUDSEN. *Annalen der Physik*, 28:75 ff, 1909.
- [80] R.E. KONING: *Water and water movement*, 1994.

- [81] RICHARD C. KULLBERG: *Gettering it, connecting micro machines to the outside world with getters*. MicroTec, March(08/05), 2005.
- [82] A.H. KUMAR and B. OZMAT. In R.R. TUMMALA and E.J. RYMASZEWSKI (editors): *Microelectronics Packaging Handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- [83] VENKATARAMAN LAKSHMINARAYANAN: *Failure analysis is a useful feedback tool for system designers*. www.eetimes.com, 12/19/2000.
- [84] K.-D. LINSMEIER: *Sensorsysteme für das Auto: intelligente Messtechnik für Sicherheit und Fahrkomfort*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1998.
- [85] G. LONGONI, M. AMIOTTI, A. CONTE, M. MORAJA, and W. REINERT: *Q-factor enhancement for mems devices by the getter film at wafer level*. In *Micro System Technologies 2005, Munich*, Munich, 2005.
- [86] S.K. LOYALKA and S.A. HAMOODI: *Poiseuille flow of rarefied gas in a cylindrical tube: solution of linearized boltzmann equation*. Physics of Fluids, A2(11):2061 ff, 1990.
- [87] J. MACIEL, S. MAJUMDER, R. MORRISON, and J. LAMPEN: *Lifetime characteristics of ohmic mems switches*. Proc.SPIE 2004, 2004.
- [88] M. MADOU: *Fundamentals of microfabrication*. CRC Press, 1997.
- [89] JODY MAHAFFEY: *Merging mems and wafer-level packaging*, 2004.
- [90] A.P. MALSHE, C. O'NEAL, S.B. SINGH, W.D. BROWN, W.P. EATON, and W.M. MILLER: *Challenges in the packaging of mems*. The International Journal of Microcercuits and Electronic Packaging, 22(3):233–241, 1999.
- [91] A. MARGOMENOS and L.P.B. KATEHI: *Fabrication and accelerated hermeticity testing of an on-wafer package for rf-mems*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52(6):1626–1636, 2004.
- [92] ED. BY J.A. KING: *Materials Handbook for Hybrid Microelectronics*. Artech House, Boston, London, 1988.
- [93] L. SINGLETON, R. LEACH, A. LEWIS, and Z. CUI: *Report on the analysis of the memstand survey on standardisation for microsystems technology*, 2001.
- [94] MIL-STD-883G: *Mil-std-883g, method 1014.12 seal*, 2006.
- [95] J. MITCHELL, G.R. LAHIJI, and K. NAJAFI: *An improved performance poly si pirani vacuum gauge using heat distributing structural supports*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 291–294, Miami, Florida, 2005.
- [96] PEYMAN MONAJEMI, PAUL J. JOSEPH, PAUL A. KOHL, and FARROKH AYAZI: *A low cost wafer-level mems packaging technology*. In *Proc. MEMS 2005, Miami*, volume 30. January-3. February of *IEEE Proceedings*, pages 634–637, 2005.
- [97] M. MORAJA and M. AMIOTTI: *Getter films at wafer level for wafer to wafer bonded mems*. DTIP, Cannes-Mandelieu(5-7 May), 2003.

- [98] D.R.MORROW and G.BARET: *A package integrity primer*, 2005.
- [99] A.C.McNEIL: *A parametric method for linking mems package and device models*. Solid State Sensors and Actuators Workshop, pages 166–169, 1998.
- [100] L.T. NGUYEN: *Reliability of postmolded ic packages*. ASME Journal of Electronic Packaging, 115(December):346–355, 1993.
- [101] NORCOM SYSTEMS: *Optical leak testing*, 2005.
- [102] NORCOM SYSTEMS: *Optical leak testing*, 1995.
- [103] M. OLDSSEN: *Entwicklung eines eutektischen Au-Si Verbindungsprozesses auf Wafer Ebene*. Diplomarbeit, 2004.
- [104] A. OPITZ: *Nanotribologische Untersuchungen von ultradünnen Wasserfilmen auf hydrophoben und hydrophilen Siliziumoberflächen*. Doktorarbeit, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2002.
- [105] Y. OYA, A. OKUBORA, M.VAN SPENGEN, P. SOUSSAN, S. STOUKATCH, X. ROTTENBERG, P. RATCHEV, H. TILMANS, W. DE RAEDT, E. BEYNE, P. DEMOOR, I.DE WOLF, and K. BAERT: *A reliable and compact polymer-based package for capacitive rf-mems switches*. IEEE IEDM, conference of December(12), 2004.
- [106] W. PALOSZ: *Diffusive gas losses from silica glass ampoules at elevated temperatures*. Journal of Crystal Growth, 191:897–903, 1998.
- [107] J. PAN: *Mems and reliability*, 1999.
- [108] WOO-TAE PARK, ROB N. CANDLER, VIPIN AYANOR-VITIKKATE, MARKUS LUTZ, AARON PARTRIDGE, GARY YAMA, and THOMAS W. KENNY: *Fully encapsulated sub-millimeter accelerometers*. In *Proc. MEMS 2005, Miami*, IEEE Proc., pages 347–350, 2005.
- [109] G. REICH: *Das Gasreibungsvakuummeter VISCOVAC VM 210*. Vakuu-Technik, 6(31.Jahrgang):172–178, 1982.
- [110] W. REINERT: *Vacuum wafer bonding technology*. In *IMAPS Nordic*, IMAPS Nordic Conference, Helsingør-DK, 2004.
- [111] W. REINERT: *High vacuum wafer bonding technology, ausi eutectic wafer bonding with integrated getter thin film for long term stable high vacuum*. In *Spezialausgabe über Wafer Bond Technologie*, 2005.
- [112] K.-F. REINHART: *Erfolgsrezept Mikrosystemtechnik*, 2003.
- [113] RESONICS INC.: *Eximer lasers drill small holes in plastic packages and metal containers*, 2005.
- [114] SCHNEIDER: *Hermeticity testing and issues with rga*, 2002.
- [115] G.A. RILEY: *A survey of wafer level hermetic cavity chip scale packages for rf applications*, 2003.

- [116] G.A. RILEY: *Wafer-level hermetic cavity packaging*, 2004.
- [117] G.A. RILEY: *Hermeticity: much to do about nothing*, 2004.
- [118] DAVE RUBIN and YUEGANG ZHAO: *Wafer-level reliability testing becomes a critical device and process development step*. Semiconductor International, 2005(1):9, 2005.
- [119] P. RUFFIN: *Micro systems vacuum packaging*, 2002.
- [120] STANLEY RUTHBERG: *Graphical solution for the back pressurization method of hermetic test*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, CHMT-4(2):29–36, 1981.
- [121] NATIONAL BUREAU OF STANDARDS SPECIAL PUBLICATION 400-73: *Graphical solution for the helium leak detector and radioisotope methods of hermetic test, Master graphs and instructions*, November 1982.
- [122] J.E. SHELBY: *Helium, deuterium, and neon migration in a common borosilicate glass*. Journal of Applied Physics, 45(5):2146–2149, 1974.
- [123] J.E. SHELBY: *Molecular diffusion and solubility of hydrogen isotopes in vitreous silica*. Journal of Applied Physics, 48:3387 ff, 1977.
- [124] C. SHEN, J. FAN, and C. XIE: *Statistical simulation of rarefied gas flows in micro-channels*. Journal of Computational Physics, 189:512–526, 2003.
- [125] D. SPARKS, M. CHIA, and S. ZARABADI: *Reliability of resonant micromachined sensors and actuators*. SAE Technical Papers Series, 2001-01-0618(SP-1609), 2001.
- [126] D. SPARKS, S.MASSOUD-ANSARI, and N. NAJAFI: *Reliable vacuum packaging using nanogetters and glass frit bonding*, 2002.
- [127] BRIAN HAWKS STARK: *Thin-film technologies for hermetic and vacuum packaging of mems*, 2004.
- [128] B.H. STARK, J. CHAE, A. KUO, A. OLIVER, and K. NAJAFI: *A high-performance surface-micromachined pirani gauge in summit v*. In *MEMS 2005*, IEEE, pages 295–298, Miami, Florida, 2005.
- [129] D. STROEHLE: *On the penetration of gases and water vapour into packages with cavities and on maximum allowable leak rates*. Reliability Physics Symposium, 1977:101–106, 1977.
- [130] D.M. TANNER and W.M. MILLER ET AL.: *The effect of frequency on the lifetime of a surface micromachined microengine driving a load*. IEEE International Reliability Physics Proceedings, March(1998IEEE):26–35, 1998.
- [131] STEVEN M. THORNBERG, JAMES M. HOCHREIN, THERESE A. PADILLA, and ION C. ABRAHAM: *Nanoliter mems package gas sampling to determine hermeticity*. In *Proc. SPIE*, volume 5716 of *Reliability, Packaging, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS IV; Danelle M. Tanner, Rajeshuni Ramesham; Eds.*, pages 36–41, 2005.

- [132] S.A. TISON: *Experimental data and theoretical modeling of gas flow through metal capillary leaks*. Vacuum, 44(11/12):1171–1175, 1993.
- [133] M. WANG and Z. LI: *Micro- and nanoscale non-ideal gas poiseuille flows in a consistent boltzmann algorithm model*. Journal of Micromechanical Engineering, 14:1057–1063, 2004.
- [134] WARREN C. WELCH III and KHALIL NAJAFI: *Transfer of metal mems packages using a wafer-level solder sacrificial layer*. In *Proc. MEMS 2005, Miami*, IEEEProc., pages 584–587, 2005.
- [135] J. WHITE, H. MA, J. LANG, and A. SLOCUM: *An instrument of control parallel plate separation for nanoscale flow control*. Review of Scientific Instruments, 74(11):4869–4875, 2003.
- [136] W.M. REICHERT and S.S. SAAVEDRA: *Materials consideration in the selection, performance, and adhesion of polymeric encapsulants for implantable sensors*. In D.F. WILLIAMS (editor): *Materials Science and Technology: Medical and Dental Materials, Volume 14*, pages 324–328. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, New York, 1992.
- [137] WUTZ, ADAM und WALCHER: *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1988.
- [138] B. ZIAIE, J.A. VON ARX, M.R. DOKMECI, and K.N. NAJAFI: *A hermetic glass-silicon micropackage with high-density on-chip feedthroughs for sensor and actuator*. Journal of Micromechanical Systems, 5(3):166–179, 1996.
- [139] R. KNECHTEL: *Halbleiterwaferbondverbindungen mittels strukturierter Glaszwischen-schichten zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren auf Waferebene*. Doktorarbeit, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2004.
- [140] ROBERT BOSCH GMBH: *New inertial sensor cluster for vehicle dynamic systems*, Spring 2004.
- [141] CLAUS BENNINGHOFF: *Direkte Bestimmung von Eisenspuren in Dichlorsilan mit Hilfe der Graphitrohrofen-Atomabsorptionsspektrometrie (GF-AAS)*. Universität Duisburg, 2004.
- [142] PAUL A. TIPLER: *Physik*. Spektrum Akademischer Verlag, 1994.
- [143] MARC J. MADOU: *Fundamentals of Microfabrication*. CRC Press, 2002.
- [144] KHALIL NAJAFI: *Micropackaging technologies for integrated microsystems: Applications to mems, moems*. Sensors and Actuators, 2003.
- [145] YUHAI MEI, G. ROIENTAN LAHIJI, and KHALIL NAJAFI: *A robust gold-silicon eutectic wafer bonding technology for vacuum packaging*. Solid-State Sensor and Actuator, Microsystems Workshop, 2002.
- [146] DOUGLAS R. SPARKS, S. MASSOUD-ANSARI, and NADER NAJAFI: *Chip-level vacuum packaging of micromachines using nanogetters*. IEEE Transactions On Advanced Packaging, No. 3, August 2002.

- [147] MARTIN A. SCHMIDT: *Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation*. Proceedings of the IEEE, Vol 86, August 1998.
- [148] R.F.WOLFENBÜTTTEL: *Low-temperature intermediate au-si wafer bonding; eutectic or silicide bond*. Sensors and Actuators A62, 1997.
- [149] K.D.WISE R.F.WOLFENBÜTTTEL: *Low-temperature silicon wafer-to-wafer bonding using gold at eutectic temperature*. Sensors and Actuators A43, 1994.
- [150] Y.T.CHENG, LIWEI LIN, and KHALIL NAJAFI: *Localized silicon fusion and eutectic bonding for mems fabrication and packaging*. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, March 2000.
- [151] BARGEL and SCHULZE: *Werkstoffkunde*. VDI Verlag, 1994.
- [152] DOUGLAS R. SPARKS, S. MASSOUD-ANSARI, and NADER NAJAFI: *Reliable vacuum packaging using nanogetters and glass frit bonding*. Proc. SPIE, Vol 5343, Jan 2004.
- [153] THADDEUS. B. MASSALSKI: *Binary Alloy Phase Diagrams*. ASM International, 1990.
- [154] CHRISTIAN EDELMANN: *Vakuumphysik*. Spektrum Akademischer Verlag, 1998.
- [155] Q.-Y. TONG and U. GÖSELE: *Semiconductor Wafer Bonding - Science and Technology*. The Electrochemical Society Series, 1999.
- [156] B.E. LINDENAU and J.K. FREMEREY: *Linearization and temperature compensation up to one atmosphere for the spinning rotor gauge*. Journal of Vacuum Science and Technology, pages 2737–2742, 1991.
- [157] J. THURAU: *Realisation of fail-safe, cost competitive sensor systems with advanced 3d-mems elements*. AMAA-Buch 2005, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2005, pages 473–484, 2005.
- [158] M. REZE and J. HAMMOND: *Low g inertial sensor based on high aspect ration mems*. AMAA-Buch 2005, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2005, pages 459–471, 2005.
- [159] A.L. TIENSUU ET AL.: *Assembling three-dimensional microstructures using gold-silicon eutectic bonding*. Sensors and Actuators A45, 1994.
- [160] V.L. SPIERING, S. BOUWSTRA, and R.M.E.J. SPIERING: *On-chip decoupling zone for package-stress reduction*. Sensors and Actuators A39, 1993.
- [161] G. STEMME: *Resonant silicon sensors*. Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol1(2), 1991.
- [162] HORST STÖCKER: *Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten*. Verlag Harry Deutsch, 1998.
- [163] W.T. THOMSON: *Theory of vibration with applications*. 2. ed. London, Unwin Hyman, 1998.

Lebenslauf

Wolfgang Reinert, geboren am 14.02.1967 in Trier.

Schulbildung:

- 1973 – 1977 Grundschule in Irsch bei Trier
1977 – 1986 Gymnasium in Trier
Jun. 1986 Abitur am Auguste-Viktoria Gymnasium in Trier

Militärdienst:

- Jun. 1986 – Wehrdienst abgeleistet beim 101. Instandsetzungsbataillon in Koblenz
Sep. 1987
Okt. 1994 Ausgeschieden aus der Reserve

Studium:

- Okt. 1987 Immatrikulation im Studiengang Physik Diplom der Rheinischen
Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Okt. 1989 Vordiplom
Nov. 1991 – Diplomarbeit im Institut für Grenzflächenforschung und Vakuumphysik
Dez. 1992 des Forschungszentrums Jülich mit dem Titel „Erzeugung und
Charakterisierung eines Strahls von atomarem Wasserstoff“
Referent Prof. Dr. G. Cormsa
Korreferent Prof. Dr. J. Hormes
Dez. 1992 Abschluss der Diplomprüfungen mit der Gesamtnote: *gut*

Auslandsaufenthalte:

- 1990 DAAD-Stipendiat an der Universität Campinas, Brasilien:
Ausarbeitung und Durchführung eines Seminars ‘Computer Interfacing’
am Lehrstuhl für Lebensmitteltechnologie
1993 Post-Doc Stipendiat des Königlich Norwegischen Forschungsrates an
der Technischen Hochschule Trondheim, Norwegen: Entwicklung
ohmscher Kontaktanschlüsse an YBCO-Hochtemperatur-Supraleitern

Arbeit:

- Juni 1993 – Wissenschaftlicher Angestellter im Centrum für
März 1998 Mikroverbindungstechnik, Forschung und Entwicklung GmbH,
Neumünster: Tätigkeitsschwerpunkt Qualitäts- und
Zuverlässigkeitsbewertung in der elektronischen Aufbau- und
Verbindungstechnik
- seit April Wissenschaftlicher Angestellter im Fraunhofer Institut für
1998 Siliziumtechnologie, Itzehoe: Experte für fortschrittliche Aufbau- und
Verbindungstechnologie, seit September 2004 Leiter der Arbeitsgruppe
- seit April Sprecher des Arbeitskreises Wafer Level Packaging vom ZVEI
2004

Promotion:

- Jan. 2004 – Bearbeitung der Promotion an der Technischen Fakultät der
Juli 2006 Christian-Albrechts-Universität Kiel und im Fraunhofer Institut für
Siliziumtechnologie, Itzehoe: „Neon Ultra-Feinlecktest zur Vorhersage
der Vakuumerhaltung resonanter Mikrosensoren“
- 18.04.2007 Promotion mit *Magna Cum Laude* abgeschlossen