

Realisierung eines piezo-resistiven Niederdruck-Sensors in der SOI-Technologie zum Einsatz in Hochtemperatur- und aggressiver Umgebung

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Biswajit Mukhopadhyay

geboren in Maheshtala, Kolkata/ Indien

von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende:	Prof. Dr.-Ing. Sibylle Dieckerhoff
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karlheinz Bock
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowotnick
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. E.h. Herbert Reichl

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13. April 2018

Berlin 2019

Inhalt

Zusammenfassung	7
1 Einleitung	11
2 Stand der Technik	15
2.1 Drucksensorprinzipien	15
2.1.1 Piezoelektrische Mikrodrucksensoren	15
2.1.2 Kapazitive Mikrodrucksensoren	16
2.1.3 Resonante Mikrodrucksensoren	17
2.1.4 Optische Mikrodrucksensoren	17
2.1.5 Piezoresistive Mikrodrucksensoren	17
2.2 Technologische Realisierung von piezoresistiven Mikrodrucksensoren	20
2.2.1 Dickschicht-Technik	20
2.2.2 Dünnschicht-Technik	21
2.2.3 Oberflächenmikromechanik	22
2.2.4 Bulk-Mikromechanik	23
2.2.5 SOI (Silicon-on-Insulator)-Technologien	26
2.2.6 SOS-Technologie	33
2.2.7 SiC- und SiCOI-Technologie	34
2.3 Hochtemperatur-Drucksensoren – State-of-the-Art	35
2.4 Abschließende Bewertung der State-of-the-Art-Drucksensoren	42
2.5 Zielstellung der Untersuchungen	44
3 Sensordesign und -simulation	47
3.1 Sensorkonzept	47
3.2 FEM-Simulation	53
3.2.1 Zusammenwirken von Stahlmembran und Chip	58
3.2.2 Membranhülse ohne Chip	59
3.2.3 Membranhülse mit Chip	59

3.2.4	Membranhülse mit vorgespanntem Chip	60
3.2.5	Thermomechanische Spannungen im Sensorchip	63
3.2.6	Ausgangssignal	64
3.2.7	Bruchweg.....	66
3.3	Frequenzanalyse.....	70
3.4	Auswahl der optimierten Sensoren.....	73
4	Herstellung der piezoresistiven Drucksensoren	75
4.1	Herstellung der Piezowiderstände.....	78
4.2	Hochtemperatur- Metallisierung	81
4.3	Herstellung der Membran mit Center-Boss	91
5	Gehäusung von Sensoren.....	97
5.1	Allgemein	97
5.2	Gehäusung beim Biegebalken/Hochtemperatur Sensor	101
6	Messungen und Untersuchungen.....	105
6.1	Messaufbau.....	105
6.2	Messungen am unbelasteten Chip	109
6.2.1	Messungen auf Wafer Ebene (auf dem Waferprober).....	109
6.2.2	Messungen an Einzelchips	113
6.3	Messung der Weg-Empfindlichkeit.....	123
6.4	Messung des Bruchverhaltens	126
6.5	Praxistest des Sensors.....	130
6.6	Ergebnisse	135
6.6.1	Vergleich mit der Simulation	137
7	Diskussion und Ausblick.....	139
	Literatur	141
	Abkürzungen und Formelzeichen.....	146

Danksagung

Am Anfang stand die Anregung von Prof. Dr.-Ing. Dr. E.h. Reichl aus dem unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. E. Obermeier begonnenen Arbeiten eine Promotionsarbeit zu machen. Dafür möchte ich ihm danken, sowie für die guten Arbeitsbedingungen an dem von ihm gegründeten Institut, die stetige Unterstützung und die Übernahme eines Gutachtens.

Besonders gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. K.-D. Lang, der sofort bereit war, die Betreuung der Arbeit in diesem Sinne fortzusetzen und das Erstgutachten zu übernehmen, und dessen Geduld auf eine lange Probe gestellt wurde.

Ich bin Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. Ing h.c. K. Bock und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. M. Nowotnick für die Erstellung der Gutachten und Frau Prof. Dr.-Ing. S. Dieckerhoff für die Übernahme des Vorsitzes zu Dank verpflichtet.

Ebenfalls zu großem Dank bin ich Herrn Dipl. Phys. Oswin Ehrmann verpflichtet, der mich in einer kritischen Situation in seine Abteilung aufgenommen hat und die Vollendung der Arbeit tatkräftig unterstützt hat.

Ich danke den Herrn Dr. J. v. Berg und Dr. C. Cavalloni (Fa. Kistler) für die messtechnische Charakterisierung unter realistischen Bedingungen, sowie die wertvollen Diskussionen und Anregungen.

Weiter danke ich allen Mitarbeitern des IZM und der TUB, die an der Entstehung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Insbesondere gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing H.-D. Ngo für die fachliche Unterstützung im Entstehungsprozess der Arbeit. Herr Dr. G. Engelmann und Herrn Dipl.-Ing. P. Mackowiak danke ich für das Korrekturlesen und für die Unterstützung bei der Abfassung des endgültigen Manuskripts.

Meiner Frau M. Bose-Mukhopadhyay möchte ich für die aufgebrauchte Geduld, Energie und Verständnis in Hinblick auf diese Arbeit danken.

Zusammenfassung

Es besteht seitens der Automobil- und Kunststoffindustrie seit geraumer Zeit ein großer Bedarf an hochtemperaturtauglichen Drucksensorsystemen, welche z.B. im Motoreinlass und –auslass sowie RIM (Reaction Injection Moulding) eingesetzt werden können. Solche Hochtemperaturdrucksensoren können z.B. helfen, die Schadstoffemission und den Verbrauch von Verbrennungsmotoren zu reduzieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein piezoresistiver Hochtemperatursensor für den Einsatz in aggressiven Umgebungen entwickelt und in der Funktionsweise untersucht. Der Sensor verfügt über eine robuste Stahlmembran, welche im Zentrum einen sogenannten „Center-Boss“ besitzt. Die Stahlmembran fungiert als Druck-Weg-Umformer. Der Center-Boss der Stahlmembran drückt auf den im piezoresistiven Sensorchip integrierten Silizium-Center-Boss und lenkt diesen proportional zur Druckbelastung aus. Der eigentliche Sensorchip dient dann als Weg-Sensor. Die Kopplung zwischen Stahlmembran und Sensorchip erfolgt also nicht wie bei „Standard-Sensoren“ über eine Flüssigkeit (wie z.B. Silikonöl) sondern mittels eines direkten mechanischen Kontakts. Da der Silizium-Center-Boss auf der Chip-Rückseite angeordnet ist, werden die Chip-Pads nicht mittels Drahtbondtechnik mit den elektrischen Durchführungen verbunden, sondern mittels Flip-Chip-Technik. Die Druckbereichseinstellung geschieht bei diesem Biegebalken-Drucksensor ausschließlich über die Variation der Dicke der Stahlmembran. Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass unabhängig vom Druckbereich immer der gleiche Chip verwendet werden kann. Die Dicke der Stahlmembran wird so gewählt, dass für jeden Druckbereich immer eine Auslenkung von 12 µm erzielt wird, wenn der spezifizierte Maximaldruck anliegt.

Der piezoresistive Chip wird in SOI (Silicon On Insulator)-Technologie gefertigt, um den Einsatz bei hohen Temperaturen zu gewährleisten. Die SOI-Technologie hat den entscheidenden Vorteil, dass die Piezowiderstände nicht über einen p-n-Übergang vom Substrat isoliert sind, sondern dielektrisch über eine vergrabene Oxidschicht. In Verbindung mit einem hochtemperaturstabilen Metallisierungssystem mit Gold-Endschicht werden so Einsatztemperaturen von 300 °C und höher erzielt. Der Chip verfügt über vier Piezowiderstände, welche jeweils paarweise longitudinal und transversal angeordnet sind und sowohl bei Vorspannung als auch Druckbelastung gestaucht werden. Die vier

Piezowiderstände werden über die Leiterbahnen in einer offenen Vollbrücke verschaltet. Ein Optimum für die spezifizierten Anforderungen erhält man für einen Center-Boss von $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ Fläche und eine Balkendicke von $25\text{ }\mu\text{m}$. Der Biegebalken hat für die spezifizierten Anforderungen eine akzeptable Eigenfrequenz von ca. 20 kHz.

Das hochtemperaturstabile Metallisierungssystem besteht aus einer gesputterten Ti/TiWN-Schicht. Nach einem speziellen Temperprozess (RTA = Rapid Thermal Annealing) und Entfernen der verunreinigten Deckschicht wird eine Schicht TiWN sowie Gold gesputtert, gefolgt von einer galvanischen Gold-Verstärkung. Diese galvanische Gold-Verstärkung ist für eine stabile Flip-Chip-Kontaktierung notwendig. Die Titan-Silicid-Bildung (Dicke von TiSi_2 ca. 100 nm) ist ein anspruchsvoller Prozess, welcher sehr sorgfältig ausgeführt werden muss, um stabile ohmsche Kontakte zu garantieren.

Die realisierten Sensorchips haben eine besonders hohe Weg-Empfindlichkeit von ca. $18\text{ mV}/\mu\text{m}$ bei einem Brückenstrom von 1 mA. Die Sensoren verfügen somit über eine Spanne von über 200 mV und einen geringen Offset von $< 10\text{ mV}$. Dies bedeutet zum einen, dass der Brücken-Offset sehr gering ist und zum anderen, dass der bei hohen Temperaturen durchgeführte Thermokompressionsbond keine nennenswerten thermisch-induzierten Spannungen im Chip erzeugt. Damit sind die thermischen Ausdehnungen von elektrischer Durchführung und Chip gut aneinander angepasst, und /oder die Entkopplung über die spezielle Chipstrukturierung ist ausreichend. Dies wird auch anhand des geringen TKO's belegt (TKO=Temperaturkoeffizient des Offsets). Der TKO beträgt ca. $7\text{ mV}/100\text{K}$ was einem Wert von ca. $3\text{ \%FSO}/100\text{K}$ (vergleichbar mit Standarddrucksensoren) entspricht. Der Bruchweg für den entwickelten Chip beträgt ca. $50\text{ }\mu\text{m}$, wobei aufgrund des statistischen Charakters dieser Eigenschaft auch deutlich höhere Werte ($> 100\text{ }\mu\text{m}$) gemessen wurden. Der Linearitätsfehler beträgt im Arbeitsbereich ca. -1 \%FSO und der TKE ist wie gefordert positiv ($+6\text{ \%}/100\text{K}$).

Der Sensor vereint erstmalig integrativ Hochtemperaturfestigkeit, hohe Empfindlichkeit im Niederdruckbereich und die Stabilität gegenüber aggressiven Medien. Das Konzept der mechanischen Kopplung zwischen dem Sensorchip und der druckaufnehmenden Stahlmembran ermöglicht den Verzicht auf eine Ölfüllung zur Druckübertragung und reduziert die Sensorgröße in Kombination mit dem Einsatz der Flip Chip Technologie erheblich. Der Einsatz eines Biegebalkenkonzeptes ermöglicht aufgrund seiner niedrigeren Steifigkeit einen deutlich größeren Bruchweg im Vergleich zum Membrankonzept. Die bei

Zusammenfassung

hohen Temperaturen auftretenden und durch die Glasdurchführung induzierten thermischen Spannungen werden durch die Integration von Langlöchern im Sensorchip reduziert. Dies wird dadurch erreicht, dass die Langlöcher zu einer weitgehenden Entkopplung zwischen Einspannbereich und Piezowiderstandsbereich führen.

Da die mechanische Ankopplung des Sensorchips an die Stahlmembran über die Chip-Rückseite stattfindet, wird die Gefahr einer Beschädigung der Leiterbahnen und der Sensorpassivierung ausgeschlossen. Der in dieser Arbeit entwickelte Drucksensor wurde ausführlich in verschiedenen Hochtemperatur- und aggressiven Umgebungen, wie im Motoreinlass und –auslass sowie RIM (Reactive Injection Molding) eingesetzt. Alle Anforderungen an einen Niederdrucksensor für die Gaswechselanalyse wurden erfüllt. Die Ergebnisse haben hohe Praxisrelevanz und demonstrieren die exzellente Eignung des entwickelten Sensors für einen Einsatz in extrem rauen Umgebungen. Der Sensor und die für seine Herstellung entwickelten Prozesse erfüllen die besonderen Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit für eine Massenproduktion und den Serieneinsatz.

1 Einleitung

Der Bedarf an Sensorsystemen zur Zustandsanalyse und Überwachung ist, z.B. in Hinblick auf die Industrie 4.0, in den letzten Jahren stark angewachsen. Eine der besonderen Herausforderungen ist die zuverlässige Überwachung des Drucks in Hochtemperaturanwendungen unter rauen Umgebungsbedingungen [1].

Zu nennen sind Anwendungen in der Kfz-Industrie, Kraftwerktechnik, Bohrtechnik, Kernkraftwerkstechnik, Stahl-, Glas- und Kunststoffindustrie. Besonders die Automobil- und Kunststoffindustrie weisen ein großes Anwendungspotential für Hochtemperaturmikrodrucksensoren auf. Bisher standen z.B. keine geeigneten Druckmesssensoren für Urformverfahren von Polyurethanschaum (PUR-Schaum) zu Verfügung. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Sensor konnte gezeigt werden, dass er zur Optimierung des RIM-Prozesses (Reaction Injection Moulding) eingesetzt werden kann [2]. Bei der Entwicklung zukünftiger Kraftfahrzeuge ist die Verringerung des Verbrauchs und des Schadstoffausstoßes von überragender Bedeutung. Die fortschreitenden Grenzwertverschärfungen der Abgasnormen und des CO₂-Ausstoßes führt zu einer fortschreitenden Perfektionierung des elektronischen Motormanagements, die perspektivisch eine komplette Erfassung aller relevanten Parameter der Einzelverbrennung individuell für jeden Zylinder und Zyklus auch in Hinblick auf die Beherrschung hochdynamischer Arbeitszustände notwendig erscheinen lassen. In die Echtzeitsteuerung von Kraftstoffzuführung, Zündzeitpunkt, Ventilsteuerzeiten und Ventilhubverläufe in Abhängigkeit des Kurbelwinkels geht eine kontinuierliche Druckerfassung maßgeblich ein. Für eine optimale Druckinformation sind bis zu drei Drucksensoren pro Zylinderkopf erforderlich, zur Messung des Ansaug-, Zylinder- und Abgasdrucks. Zur bestmöglichen Annäherung aller Triebwerke der Pkw-Flotte an den Carnot-Wirkungsgrad bei minimalem Schadstoffausstoß besteht also ein riesiger Bedarf (3 Sensoren pro Zylinder) an preiswerten, miniaturisierten, hochgenauen Hochtemperaturdrucksensoren, die für raue Umgebung geeignet sind [5], [6], [3].

Je nach Anwendungsfall wird dabei unter dem Begriff „raue Umgebungsbedingung“ etwas anderes verstanden. Bei Verbrennungsmotorapplikationen (wie z.B. der Ein- und Auslassdruckmessung) steht beispielsweise die hohe Einsatztemperatur, Messdynamik und Resistenz gegenüber den zahlreichen zu messenden Medien im Mittelpunkt [2].

Anwendungen in der kunststoffverarbeitenden Industrie (z.B. beim reaktiven Spritzgießen, Extrusionsdruck, Düsendruck ...) fordern neben der hohen Betriebstemperatur (bis 500 °C) insbesondere eine effektive Medientrennung (z.B. robuste Stahlmembranen für die Messung von viskosen, abrasiven und aggressiven Medien [7]). Außerdem soll der Sensor so klein wie möglich sein, da einerseits immer weniger Bauraum zur Verfügung steht und andererseits der Messvorgang nur geringfügig gestört werden soll. Vor diesem Hintergrund werden anwendungsseitig Kompromisse in Bezug auf Präzision und Preis akzeptiert.

Drucksensoren nutzen zur Umformung des zu messenden Drucks in ein elektrisches Ausgangssignal verschiedene physikalische Effekte (piezoresistiv, kapazitiv, piezoelektrisch, optisch und resonant). Dabei wird in der Regel der zu messende Druck zunächst in eine mechanische Zwischengröße umgeformt. Hierfür dienen meist Membranstrukturen, welche bei Druckeinwirkung ausgelenkt werden und eine mechanische Spannung bzw. eine Dehnung auf das Sensorelement übertragen. Zur Erfassung und Umwandlung dieser Kraft bzw. Auslenkung in ein elektrisches Ausgangssignal werden verschiedene Sensorstrukturen verwendet.

Es soll hier nur auf die Si-Drucksensorchipkonzepte mit integrierten Piezowiderständen eingegangen werden. Für den kostengünstigen Serieneinsatz in rauen Umgebungen sind die anderen Druckmesssysteme nicht geeignet. Sie sind entweder zu teuer wie piezoelektrische Druckaufnehmer oder nicht adaptierbar aufgrund von aufwendiger Elektronik oder Kühlung.

Die fortgeschrittene Siliziumtechnologie der Mikrosystemtechnik erlaubt die Massenfertigung von präzisen Sensoren mit einer hohen Kosteneffizienz. Drucksensoren dieses Typs haben als zentrales Funktionselement eine durch anisotropes oder isotropes Ätzen hergestellte Siliziummembran, in welche vier Piezowiderstände integriert sind, die durch Diffusion oder Ionenimplantation erzeugt werden [8].

Das Gesamtkonzept eines Drucksensors besteht aus dem Sensorchip und dem Packaging (Aufbau- und Verbindungstechnik). Das Packaging muss mehrere Funktionen erfüllen, wie z.B. den Schutz des Siliziumchips, dessen Fixierung und die Signalübertragung an die Auswerteelektronik.

Wird ein konventioneller piezoresistiver Drucksensor für Standardapplikationen aufgebaut, wirkt der Druck direkt auf die Membran. Die Schutzhülle (Screen) schützt den Chip lediglich vor unerwünschten mechanischen Einflüssen (Abbildung 26).

Der Nachteil dieses Prinzips liegt darin, dass der Chip nicht vor den Umgebungsmedien geschützt ist. Damit ist eine gute, sowie langzeitstabile Medienverträglichkeit gegenüber viskosen, abrasiven und aggressiven Medien wie z.B. Meerwasser, Benzin, Hydrauliköl etc. schwer zu erreichen. In der Praxis häufig eingesetzte Beschichtung zum Schutz der Chipoberfläche verschlechtern in der Regel die Sensor-Eigenschaften massiv.

Um den Sensorchip vor den reaktiven bzw. aggressiven Gasen und Flüssigkeiten wirklich effektiv zu schützen, muss der Sensor-Aufbau modifiziert werden. Dabei wird der Sensorchip mittels einer dünnen Stahlmembran vom Messmedium getrennt (Abbildung 27). Eine Flüssigkeit (z.B. Silikonöl) wird eingesetzt, um den Druck, der auf die Stahlmembran wirkt, auf den Sensorchip zu übertragen. Aufgrund der Konstruktion solcher Sensoren muss die Stahlmembran möglichst flexibel sein (großer Durchmesser, geringe Dicke, geringes Elastizitätsmodul), um gute Resultate zu erzielen und die Funktion des Sensorchips möglichst wenig negativ zu beeinträchtigen.

Verglichen mit der Beschichtung des Sensorchips bietet dieses Drucksensorkonzept eine hohe Genauigkeit neben der exzellenten Medienverträglichkeit. Die Genauigkeit ist nur unwesentlich schlechter als beim Aufbau ohne Stahlmembran. Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung eines Siliziumchipdesigns, welches auch bei Standarddrucksensorkonzepten Anwendung findet.

Hauptnachteil dieses Konzeptes ist allerdings die begrenzte Eignung für Hochtemperatur-(HT-) Anwendungen. Selbst bei Verwendung eines HT-tauglichen Sensorchips aus SOI Wafern sind dem Einsatz bei höheren Temperaturen enge Grenzen gesetzt, da einerseits das flüssige Übertragungsmedium temperaturlimitierend ist (Öle neigen unter dem Einfluss von Wärme zur Oxidation). Dieser Zersetzungsprozess wird durch saure Reaktionsprodukte aus der Verbrennung (abrasiv oder korrosiv) beschleunigt. So liegt die maximale Einsatztemperatur für Silikonöl bei 200°C. Andererseits sind Fehlerinflüsse durch die thermische Ausdehnung des flüssigen Übertragungsmediums zu berücksichtigen. Die thermische Volumenänderung des Silikonöls liegt bei 9,8%/100°C und die Kompressibilität bei 0,8%/100°C. Bei höheren Temperaturen nimmt das Volumen überproportional zu (Nichtlinearität und Offset), so dass es sogar zur Zerstörung des

Sensors führen kann. Die Messung von hochviskosen und abrasiven Medien (z.B. in der Nahrungsmittel- und Kunststoffindustrie) ist auch nicht möglich, da die dünne Stahlmembran bei diesem Sensorprinzip hierfür nicht geeignet ist. Sie wird normalerweise ohne Spanabtrag durch Prägen hergestellt und nicht spanabtragend aus dem Vollen gedreht. Zusätzlich ist das Miniaturisierungspotenzial durch den Einsatz dieser dünnen, großflächigen flexiblen Stahlmembran und durch das Volumen des Übertragungsmediums eingeschränkt.

Die oben beschriebenen Anforderungen und Einsatzbedingungen erfordern die Entwicklung eines neuartigen Drucksensorkonzeptes für raue Messumgebungen. Um diesen zu genügen, müssen die Hochtemperaturtauglichkeit des Sensorchips und dessen Packaging gewährleistet sein. Zusätzlich muss der Sensoraufbau unempfindlich gegen mechanische, chemische und andere Umwelteinflüsse sein. Dies erfordert die Verwendung einer robusten Membran und den Verzicht auf Öl als Übertragungsmedium.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ein neues Sensorkonzept sowie die Dimensionierung des hochtemperaturtauglichen Sensorelements beschrieben und untersucht, das Regelungsaufgaben in Verbrennungsmotoren und Spritzgussdosen ermöglicht und den besonderen Anforderungen eines Serieneinsatzes genügt.

Im Folgenden wird zunächst der Stand der Technik dargestellt, wobei die existierenden Hochtemperaturdrucksensoren analysiert und diskutiert werden. Aus dieser Diskussion ergibt sich das oben skizzierte Sensorkonzept. Dann werden mittels FEM-Simulationen die Dimensionen der Sensorstruktur hinsichtlich Empfindlichkeit und Überlastverhalten sowie einem stabilen Verhalten optimiert und für die technologische Realisierung festgelegt. Aufbauend auf Anforderungen und FEM-Analysen wird der Sensor dimensioniert und hergestellt. Die AVT (Aufbau- und Verbindungstechnik) ist ein wichtiger Teil dieser Arbeit. Nach der Gehäusung wird der Sensor ausführlich charakterisiert. Die Ergebnisse werden dann mit den berechneten Sensorkenngrößen verglichen. Anschließend wird der Sensor in den Zylinderkopf eines Verbrennungsmotors sowie in ein RIM-Werkzeug eingebaut und dessen Leistungsfähigkeit mit einem Referenzdruckaufnehmer verglichen.

2 Stand der Technik

2.1 Drucksensorprinzipien

Drucksensoren nutzen zur Umwandlung des zu messenden Drucks, in ein elektrisches Ausgangssignal, verschiedenste physikalische Effekte. Dabei wird in allen Fällen der zu messende Druck zunächst in eine mechanische Zwischengröße umgeformt. Hierfür dienen in der Regel Membranstrukturen, welche bei Druckeinwirkung ausgelenkt werden. Zur Erfassung und Umwandlung dieser Auslenkung in ein elektrisches Ausgangssignal können verschiedene Sensorprinzipien verwendet werden [1], [13].

2.1.1 Piezoelektrische Mikrodrucksensoren

Beim piezoelektrischen Effekt werden durch das Einwirken einer äußeren Kraft Ladungsschwerpunkte getrennt. Diese elastische Verformung induziert ein elektrisches Potential, das über Oberflächenladungen messbar ist. Die Realisierung piezoelektrischer Drucksensoren ist nicht nur auf den Einsatz von Quarzkristallen beschränkt [14]. Neben Quarz gibt es noch weitere Piezokristalle, die technisch bedeutsam sind, z.B. Turmalin [14], [15]. Drucksensoren mit Quarz zeigen in einer Richtung (genannt Messrichtung) eine hohe Empfindlichkeit auf. Im Gegensatz zu Quarz weist Turmalin in allen Richtungen die gleiche Empfindlichkeit auf. Die Besonderheiten der Funktionsmaterialien wirken sich auf den Aufbau der Sensoren aus.

Vorteile piezoelektrischer Sensoren:

- Durch den starren Sensoraufbau findet nur eine geringe Membranauslenkung statt. Dieses reduziert mechanische Eigenschwingungen und Nachschwingeffekte bei kurzzeitiger Belastung.
- Die mechanisch stabile Konstruktion minimiert Hystereseeffekte.
- Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung von mechanischer in elektrische Energie ist sehr hoch.
- Der piezoelektrische Effekt besitzt einen niedrigen Temperaturkoeffizienten.
- Piezoelektrische Sensoren benötigen keine Spannungsversorgung.

Nachteile:

- Die Weiterverarbeitung des Signals erfordert eine sehr empfindliche Elektronik.
- Die an den Oberflächen messbaren Ladungen bauen sich je nach Sensor-material nach einer gewissen Zeit von alleine ab. Deshalb sind piezoelektrische Sensoren für das Messen statischer Drücke ungeeignet.

2.1.2 Kapazitive Mikrodrucksensoren

Bei diesen Sensoren wird durch den zu messenden Druck der Elektrodenabstand eines Plattenkondensators geändert. Dadurch wird der Druck in eine Kapazitätsänderung umgeformt. Der Plattenkondensator besteht aus einer feststehenden Elektrode und einer auslenkbaren Elektrode. Die Membran bildet die durch den Druck auslenkbare Elektrode.

Kapazitive Drucksensoren dieser Ausführungsform weisen eine hohe Empfindlichkeit auf [17], [18], ihre Kennlinie ist prinzipbedingt nichtlinear. Werden zwei Kondensatoren in Differenz betrieben, so lässt sich damit eine weitgehend lineare Kennlinie und eine Temperaturkompensation erreichen. Messbereich und Empfindlichkeit können über die Membranabmessungen variiert werden.

Kapazitive Drucksensoren haben gegenüber piezoresistiven Sensoren einige wesentliche Vorzüge:

- keine pn-Übergänge (größerer Betriebstemperaturbereich, geringere Drift),
- höhere Empfindlichkeit,
- geringere Temperaturabhängigkeit des Nullpunktoffsets und der Empfindlichkeit,
- geringer Energieverbrauch.

Nachteile der kapazitiven Drucksensoren sind:

- die kleinen Grundkapazitäten (einige pF bis einige zig pF),
- der größere Schaltungsaufwand für die Signalverarbeitung (Auflösung von fF)
- die erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Störfeldern

Diese Probleme erfordern besondere Maßnahmen wie:

- Erhöhung der Grundkapazität,
- kurze Leitungslängen (Signalverarbeitung vor Ort bzw. on Chip),
- Abschirmung des Sensors gegenüber Störfeldern (Abschirmelektroden, geeignete Montage und Gehäusung)

2.1.3 Resonante Mikrodrucksensoren

Drucksensoren dieses Typs liefern an ihrem Ausgang ein druckproportionales Frequenzsignal [1], [13]. Erreicht wird diese Druck/Frequenzwandlung durch eine mikromechanische Resonatorstruktur, welche auf der Sensormembran angeordnet ist und elektromagnetisch oder elektrostatisch angeregt wird [18], [19]. Bei Membranauslenkung durch den anliegenden Druck, wird in der Resonatorstruktur eine mechanische Spannung induziert. Dieses bewirkt eine druckabhängige Änderung der Resonanzfrequenz.

Der Druckbereich eines solchen Sensors kann ebenfalls über die Membranabmessungen eingestellt werden, während die Empfindlichkeit sowohl von der Auslegung der Membran als auch von der Resonatorstruktur abhängt [18], [19], [20].

2.1.4 Optische Mikrodrucksensoren

Die bisher bekannt gewordenen optischen MST-Drucksensoren basieren auf der Änderung der Intensität oder Reflexion eines Lichtbündels durch die druckabhängige Auslenkung einer Membran. Zur Lichtein- bzw. -auskopplung werden Lichtleitfasern verwendet (Fa. Optrand oder FOS) [22], [23], [24], [25]. Dieses Prinzip erlaubt sehr kleine Baugrößen, wie sie auf andere Weise bisher nicht erreicht wurden.

Der Messbereich und die Empfindlichkeit werden im Wesentlichen durch die Membranabmessungen bestimmt.

2.1.5 Piezoresistive Mikrodrucksensoren

Durch den wirkenden Druck stellt sich in der Membran eines Drucksensors ein druckabhängiger zweiachsiger mechanischer Spannungs- bzw. Dehnungszustand ein. Bei piezoresistiven Drucksensoren wird dieser Zustand durch Dickfilm-, Dünnschicht- oder in Silizium realisierten Piezowiderständen gemessen. Die Widerstände werden in den Zonen (Bereichen) maximaler Spannung bzw. Dehnung angeordnet, um ein möglichst hohes Ausgangssignal zu erhalten [1], [8], [13]. Dickschicht-, Metall- und Dünnschichtwiderstände liefern ein ca. fünf- bis zehnmal so hohes Ausgangssignal wie herkömmliche

Folien-DMS (Dehnungsmessstreifen), während polykristalline Siliziumwiderstände ca. 20mal [1], [13] und einkristalline Siliziumwiderstände ca. 50mal empfindlicher sind. Bei einkristallinen Silizium-Piezowiderständen hängt die Empfindlichkeit (k-Faktor) vom Leitungstyp (Dotierungsart), der Dotierungsdichte und der kristallografischen Orientierung der Widerstände ab. Bei monokristallinem Silizium unterscheidet man zudem, abhängig von der relativen Richtung der Stromdichte, der elektrischen Feldstärke und der mechanischen Spannung, zwischen Longitudinal-, Transversal- und Schereffekten.

Piezoresistive Silizium-Drucksensoren existieren in verschiedensten Varianten: In monolithisch integrierter Form, in SOI- [7], [26], [27], [28], [29] und SOS-Technologie [30] sowie als Dünnschichtausführungen auf Metall- und Siliziummembranen mit Polysilizium-Piezowiderständen [30], [31], [32].

Die Dehnungsmesswiderstände auf der Druckmembran sind in der Regel zu einer Vollbrücke verschaltet, so dass sich bei Druckeinwirkung und Speisung der Brücke mit Spannung oder Strom, am Sensorausgang ein weitgehend lineares Ausgangssignal (Spannung) einstellt.

Der Messbereich und die Empfindlichkeit der Sensoren werden in der Praxis über die Größe und Dicke der Membran eingestellt.

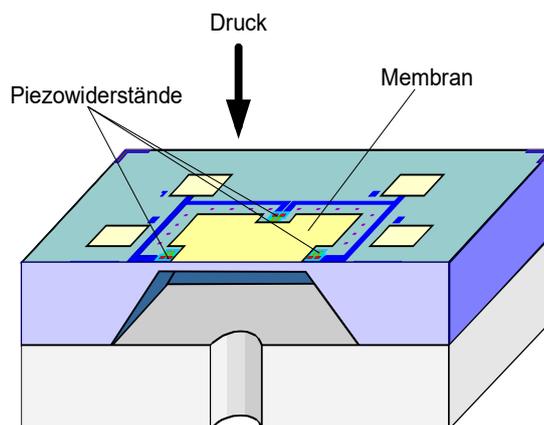


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines piezoresistiven Siliziumdrucksensors (Querschnittbild) [8]

In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachteile der Messprinzipien zusammenfassend gegenüber gestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Messprinzipien.

Messprinzip	Vorteil	Nachteil
piezoelektrisch	<ul style="list-style-type: none"> • Empfindlichkeit • Robustheit • Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Preis (LV notwendig) • nicht geeignet für statische Messung
optisch	<ul style="list-style-type: none"> • kleine Drift • kleine Querempfindlichkeit • kleine Leistungsaufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexer Aufbau • hoher Preis
kapazitiv	<ul style="list-style-type: none"> • keine ppn-Übergänge • höhere Empfindlichkeit • einfachere technologische Realisierung • geringere Temperaturabhängigkeit von Offset und Empfindlichkeit • geringer Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Linearitätsfehler • kleine Grundkapazität • hoher Schaltungsaufwand
DMS	<ul style="list-style-type: none"> • einfacher Aufbau • sehr niedriger Preis • Robustheit 	<ul style="list-style-type: none"> • kleine Empfindlichkeit • keine Batchmöglichkeit
Resonanz	<ul style="list-style-type: none"> • kleine Drift • Robustheit • gute Empfindlichkeit • kleine Leistungsaufnahme • kleine Querempfindlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexe Elektronik • aufwendige Signalverarbeitung
piezoresistiv	<ul style="list-style-type: none"> • niedriger Preis • hochgenau • einfache Elektronik • maximale Temperaturbelastung 400°C 	<ul style="list-style-type: none"> • pn-Übergang

2.2 Technologische Realisierung von piezoresistiven Mikrodrucksensoren

2.2.1 Dickschicht-Technik

Zur Realisierung derartiger Drucksensoren werden auf eine Membran aus Al_2O_3 -Keramik mittels Siebdruck und spezieller Pasten Dickschicht-Dehnungsmesswiderstände aufgebracht [1], [33]. Die Leiterbahnen und Kontakte, zur Verbindung der Widerstände zu einer Vollbrücke, werden ebenfalls durch Siebdruck erzeugt. Die Membran wird anschließend mittels einer niedrig schmelzenden Sealing-Paste mit einem Keramik-Träger zur eigentlichen Messzelle verbunden (Abbildung 2 und Abbildung 3). Bei dem hier gezeigten Design sind die Widerstände paarweise in Zonen mit Druck- (\rightarrow Membranzentrum) und Zugspannungen (\rightarrow Membranrand) angeordnet. Auf diese Weise werden paarweise entgegengesetzt, annähernd gleichgroße Widerstandsänderungen erreicht, eine Voraussetzung, um ein möglichst großes Ausgangssignal zu erzielen.

Dickschicht-Drucksensoren werden von verschiedenen Firmen wie Bourdon Sedeme, Bricon, Gefran, Huba Control, Kistler, BOSCH, Sensit und Transbar hergestellt.

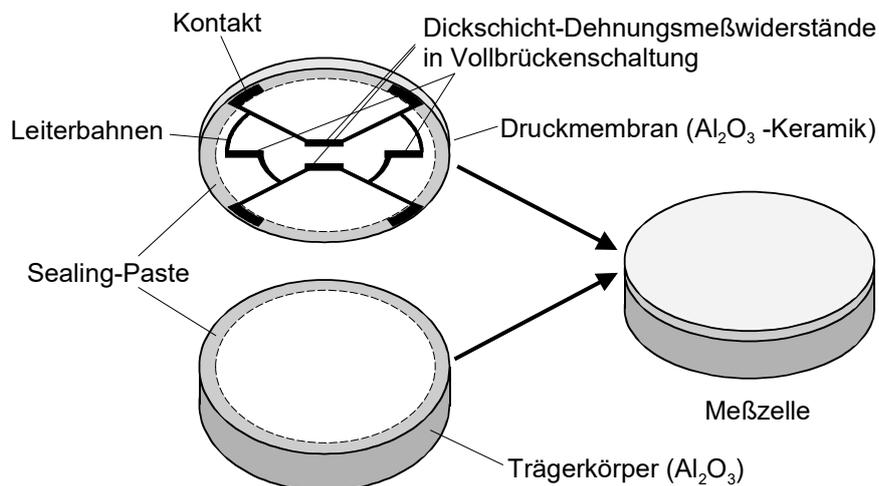


Abbildung 2: Aufbau eines Drucksensors (Messzelle) mit Dickschicht-Dehnungsmesswiderständen [9]



Abbildung 3: Piezoresistive Dickschicht-Druckmesszellen [10]

2.2.2 Dünnschicht-Technik

Bei Dünnschicht-Drucksensoren werden auf der Membran, die meist aus einem Spezialstahl besteht, mittels PVD (Vakuumbeschichtung, Sputtern) oder Plasma-CVD und unter Verwendung von Lochmasken oder photoätztechnischer Prozesse die Dünnschichtwiderstände sowie Leiterbahnen und Kontakte hergestellt [1], [8], [13], [34]. Um die Strukturen gegenüber dem Substrat zu isolieren, wird vorher mittels PVD oder Plasma-CVD eine dünne Isolierschicht (1 bis 3 μm , z.B. SiO_2 , SiO_xN_y) auf die hochglanzpolierte Membranoberseite abgeschieden. Als Materialien für die Dehnungsmesswiderstände finden beispielsweise NiCr-, CrSi-, TaO $_x$ N $_y$ - und polykristalline Siliziumschichten Anwendung.

Zur Erzielung eines möglichst hohen Ausgangssignals sind die Dehnungsmesswiderstände zu einer Vollbrücke verschaltet und am Membranrand und -mitte angeordnet (Abbildung 4).

Hersteller von Metall-Dünnschicht- und Si-Dünnschicht-Drucksensoren sind z.B. Ashcroft, Baumer Electric, Bosch, Bourdon Sedeme, Gefran und GEMS.

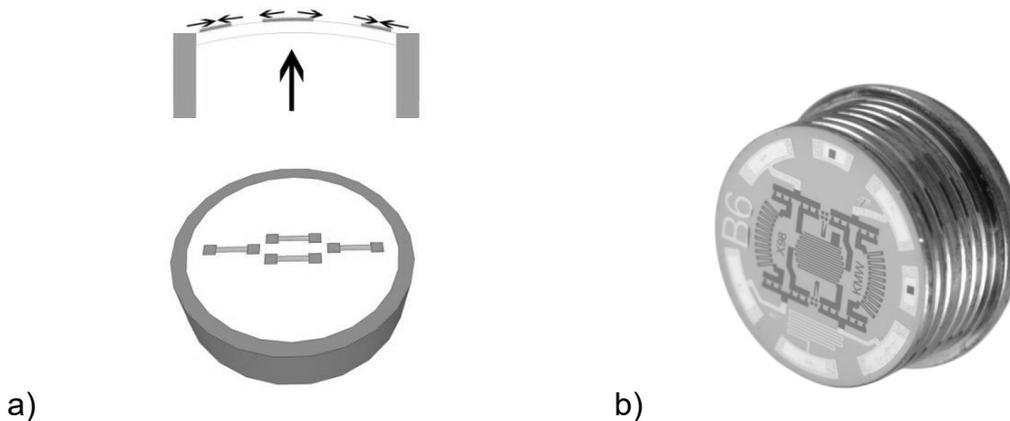


Abbildung 4: Drucksensor mit Dünnschicht-Dehnungsmesswiderständen
 a) Anordnung der Widerstände auf der Membran
 b) Membrankörper mit Dünnschicht-Dehnungsmesswiderständen [11]

2.2.3 Oberflächenmikromechanik

Mittels der Si-Oberflächen-Mikromechanik können sehr kleine Membranstrukturen erzeugt werden, die dann nicht mehr aus einkristallinem Silizium, sondern aus stressoptimiertem Si_3N_4 oder Polysilizium gefertigt werden [1], [8], [13], [34].

Abbildung 5 zeigt einen Mikromembran-Drucksensor in Oberflächenmikromechanik-Technologie mit einer 100 nm dicken Si_3N_4 -Membran ($\varnothing 100 \mu\text{m}$) [36], auf der sich vier Polysilizium-Piezowiderstände befinden, die die druckinduzierte Membranverformung in eine Widerstandsänderung bzw. eine elektrische Spannung umformen.

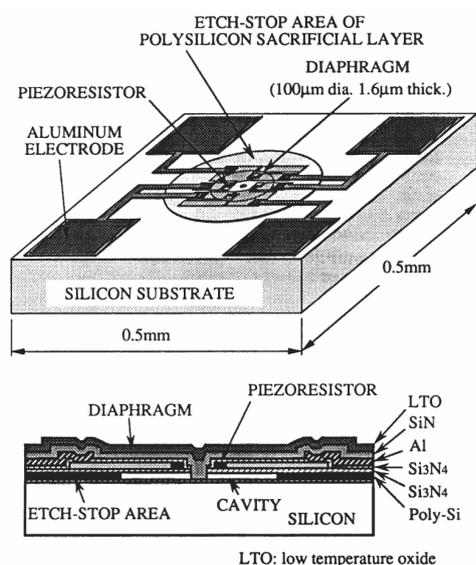


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Mikromembran-Drucksensors mit Polysilizium-Piezowiderständen [12]

2.2.4 Bulk-Mikromechanik

Drucksensoren, hergestellt unter Zuhilfenahme der Prozesse der Si-Bulk-Mikromechanik, existieren in verschiedenen Varianten [1], [8]. Es soll hier zunächst auf die Si-Drucksensoren mit integrierten Piezowiderständen eingegangen werden. Drucksensoren dieses Typs haben als zentrales Funktionselement eine durch anisotropes oder isotropes Ätzen hergestellte Siliziummembran, in welche vier Piezowiderstände integriert sind, die durch Diffusion oder Ionenimplantation erzeugt werden.

Die Piezowiderstände sind durch eine geeignete Metallisierung zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet.

Betragsmäßig gleiche Widerstandsänderungen $\Delta R(p)$ mit unterschiedlichem Vorzeichen lassen sich durch Nutzung des Longitudinal- und des Transversaleffektes erzielen (Abbildung 6 und Abbildung 7).

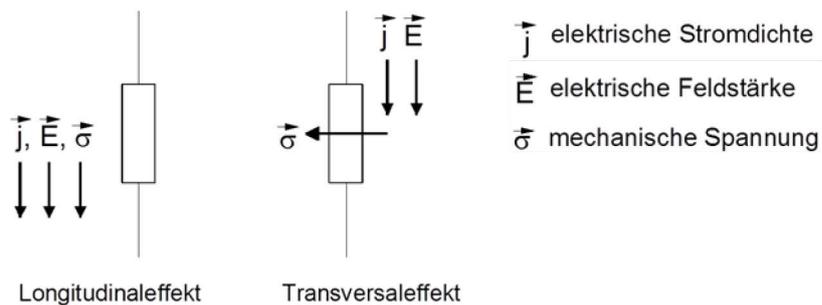


Abbildung 6: Richtungsanordnung von Stromdichte, elektrischer Feldstärke und mechanischer Spannung beim piezoresistiven Longitudinal- und Transversaleffekt

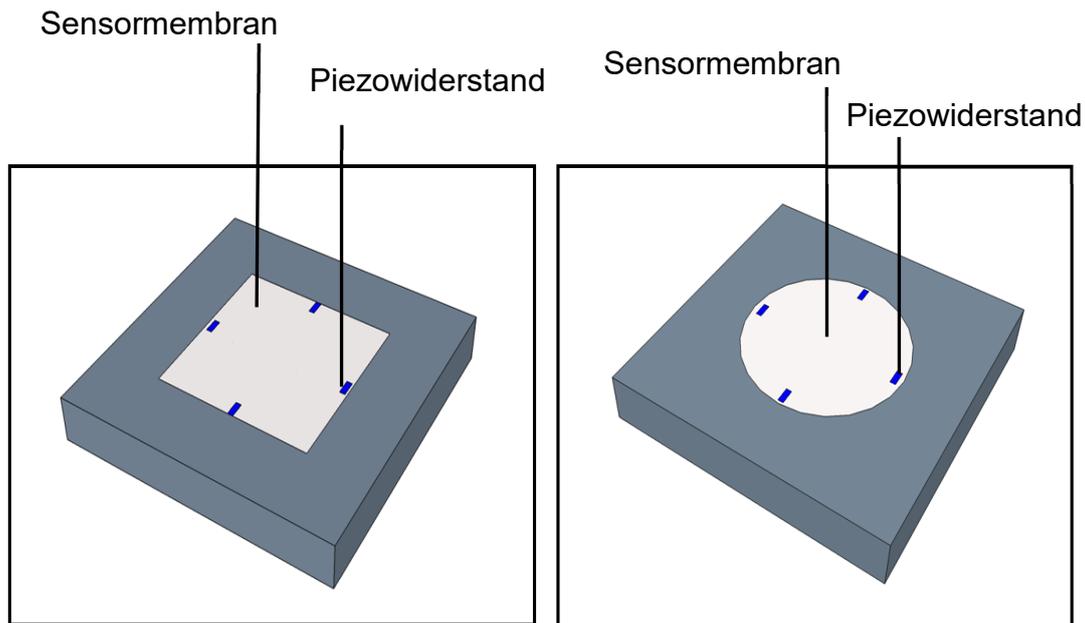


Abbildung 7: Übliche Designvarianten bei Si-Drucksensoren. Beide Varianten nutzen sowohl den Longitudinal- als auch den Transversaleffekt

Siliziumdrucksensoren mit monolithisch integrierten Piezowiderständen verfügen meist über eine quadratische oder (seltener) kreisförmige Membran. Bei Niederdrucksensoren (Nenndruck < 100 mbar) finden zudem Membranstrukturen mit mittiger Versteifung (Center-Boss) Anwendung, um die druckbedingte Membranauslenkung und damit den Linearitätsfehler zu verringern.

Abbildung 8 zeigt die Aufsicht und den Querschnitt eines piezoresistiven Siliziumdrucksensors in (100)-Silizium mit quadratischer Membran der Seitenlänge 1,2 mm. In der Querschnittaufnahme sind die beim anisotropen Ätzen auftretenden {111}-Kristallebenen zu erkennen, die mit der (100)-Ebene einen Winkel von $54,74^\circ$ bilden.

Piezoresistive Si-Drucksensoren werden weltweit von einer großen Anzahl von Firmen hergestellt (z.B. Endevco, Entran, Fujikura, Gefran, Honeywell, IC-Sensors, ICT Foxboro, Keller, Kistler, Kulite, Lucas Novasensor, Motorola, NeXtSensor, Sensym, Siemens, Texas Instruments).

Eine neue Herstellungsvariante, die auf der Verbindung von zwei Siliziumscheiben durch Silizium-Direktbonden basiert, ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Ätzen einer Vertiefung in die Trägerscheibe, die danach durch Silizium-Direktbonden mit einer zweiten Siliziumscheibe verbunden wird.

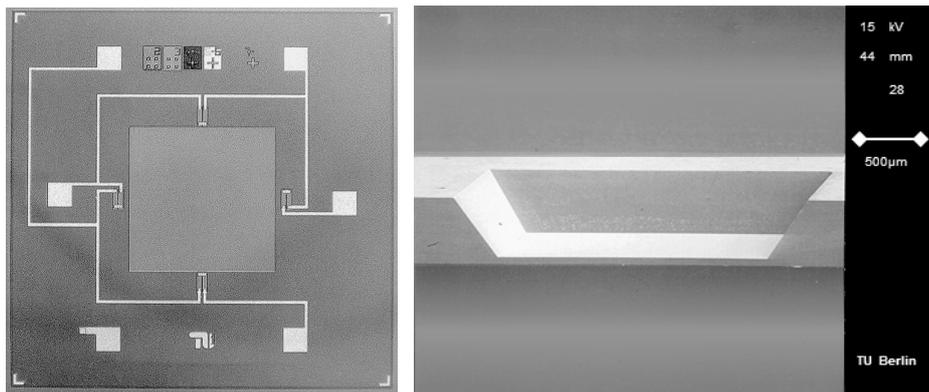


Abbildung 8: Draufsicht und Querschnitt eines piezoresistiven Siliziumdrucksensors mit vier integrierten Piezowiderständen in (100)-Silizium [46]

Anschließend wird diese Scheibe durch Schleifen, Polieren oder Ätzen bis zur gewünschten Membrandicke gedünnt und so die eigentliche Druckmembran hergestellt. Die Realisierung der Piezowiderstände wird danach in der bekannten Weise vorgenommen.

Der Vorteil dieser Prozessvariante gegenüber herkömmlichen Si-Drucksensoren besteht darin, dass Membran und Träger aus Silizium sind, wodurch eine mechanische Verspannung bei dünnen Membranen durch thermische Ausdehnungsunterschiede vermieden wird. Hinzu kommt, dass durch den Wegfall der anisotropen Strukturierung der Druckmembran von der Waferrückseite die Chipgröße wesentlich reduziert werden kann.

Ein Drucksensor dieser Bauart wurde von der Firma Lucas Novasensors auf den Markt gebracht.

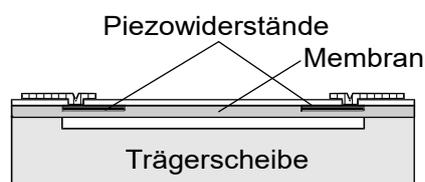


Abbildung 9: Piezoresistiver Drucksensor basierend auf der Verbindung zweier Siliziumscheiben mittels Silizium-Direktbonden

Bei den sogenannten „Four Terminal Gauge“ Drucksensoren wird nur ein Piezowiderstand als Hallelement ausgeführt. Dieser besitzt vier elektrische Kontakte.

Eine andere kommerziell verfügbare Variante piezoresistiver Silizium-Drucksensoren bilden die Sensoren, die anstelle von vier Piezowiderständen nur ein piezoresistives

Dehnungselement verwenden. Auf der Membran dieser Drucksensoren ist eine integrierte „Hallelement“-ähnliche Struktur mit vier Anschlüssen (four terminal gauge) angeordnet (Abbildung 10), die durch Ionenimplantation erzeugt wird.

Die Drucksensormembran ist quadratisch und wird durch anisotropes Ätzen hergestellt.

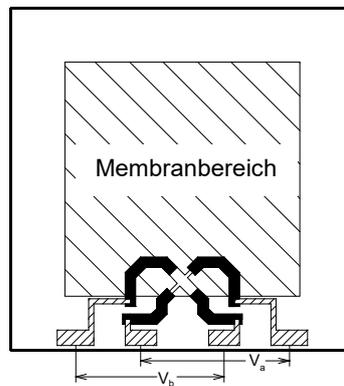


Abbildung 10: Si-Drucksensor mit „four terminal gauge“ (V_b : Betriebsspannung; V_a : Ausgangsspannung) [40]

2.2.5 SOI (Silicon-on-Insulator)-Technologien

Die voranstehend besprochenen Si-Drucksensoren sind aufgrund der pn-Isolation der Piezowiderstände (gilt auch für „four terminal gauge“) für „Hochtemperatur“-Anwendungen nicht einsetzbar (max. Betriebstemperatur ca. 120 °C). Es wurden deshalb piezoresistive SOI-Silizium-Drucksensoren entwickelt, bei denen die Piezowiderstände gegenüber dem Substrat durch eine SiO_2 -Schicht isoliert sind (Abbildung 11).

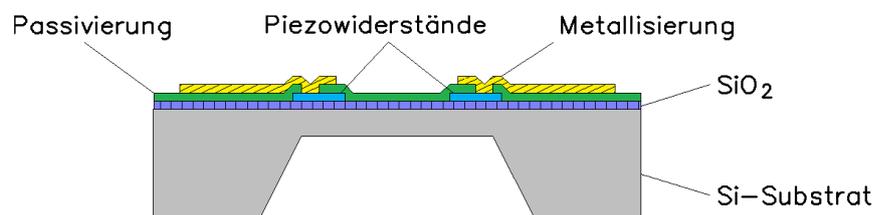


Abbildung 11: Silizium-Drucksensor mit dielektrisch isolierten Piezowiderständen für Hochtemperaturanwendungen

Die Piezowiderstände sind aus einkristallinem oder polykristallinem Silizium hergestellt. Im ersten Fall dienen als Ausgangsmaterial SOI (Silicon-on-Insulator)-Wafer. Die Herstellung dieser Wafer geschieht unter Anwendung der SIMOX (Separation by Implanted Oxygen)-Technik [36], [37], dem BESOI (Bond-and-Etch-Back SOI)-Prozess [36], [37], dem ELTRAN (Epitaxial Layer Transfer)-Prozess oder dem SmartCut-Prozess [36]. Die Abscheidung der polykristallinen Siliziumschichten erfolgt durch LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition) auf thermisch oxidierten Siliziumwafern → PSOI (Polysilicon-on-Insulator). Polysilizium-Piezowiderstände haben gegenüber einkristallinen Piezowiderständen eine um den Faktor 2 bis 3 niedrigere Empfindlichkeit.

Der technologische Herstellungsprozess unterscheidet sich von herkömmlichen piezoresistiven Drucksensoren nur durch die Art und Weise in der die Piezowiderstände hergestellt werden. Abbildung 12 zeigt schematisch einen in SOI-Technologie realisierten piezoresistiven Mikrodrucksensor.

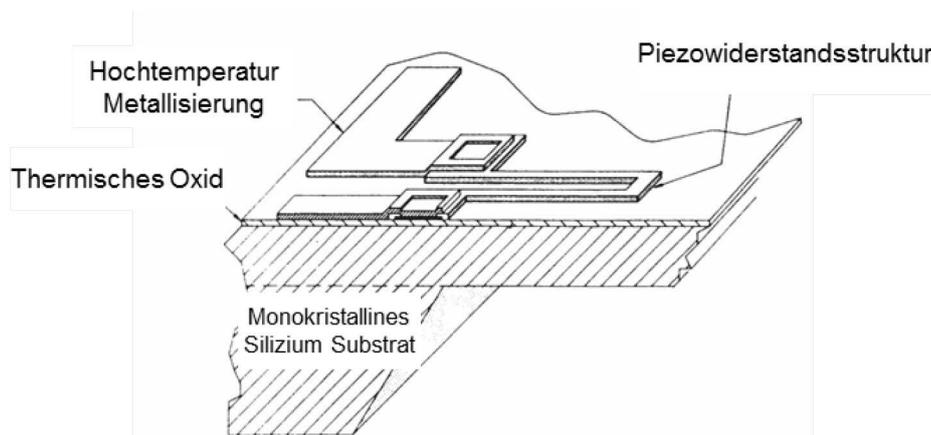


Abbildung 12: Piezowiderstand eines Drucksensors auf SOI-Basis: Thermisches Oxid trennt die Piezoresistive Si-Einkristallschicht von einkristallinem Silizium –Substrat. Die Kontaktierung erfolgt über eine Hochtemperatur Metallisierung.

Smart Cut (Unibond)

Für dieses Verfahren werden zwei Si-Wafer benötigt. Der erste Wafer wird Seedwafer genannt, der zweite Wafer ist ein (100)-Wafer, welcher im Endergebnis die BOX (Burried-Oxide)-Schicht trägt.

Das Herstellungsverfahren für Smart Cut gliedert sich in folgende Schritte (siehe Abbildung 13):

1. Thermische Oxidation des Seed-Wafers, um die spätere BOX-Schicht zu erhalten

2. Wasserstoff-Implantation in diesen Wafer, um die Sollbruchstelle für die spätere Wafertrennung zu definieren
3. Reinigung der zwei Wafer in modifizierter Piranha-Lösung (RCA). Die Oxidoberflächen werden dadurch hydrophil.
4. Beide Wafer werden mittels Silizium-Direktbonden verbunden.
5. Spalten der Wafer im Sollbruchbereich (implantierte Wasserstoff-Ionen) mittels Temperung bei niedriger Temperatur.
6. Zweite Temperung des SOI-Wafers bei Hochtemperatur, um das Bond-Interface zu stabilisieren.
7. Reduzierung der Oberflächenrauigkeit durch Polieren des SOI-Wafers

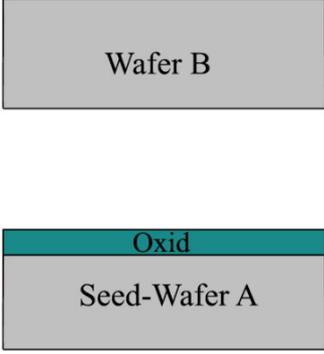
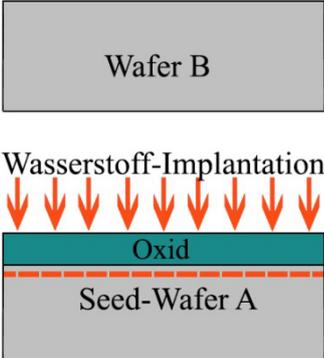
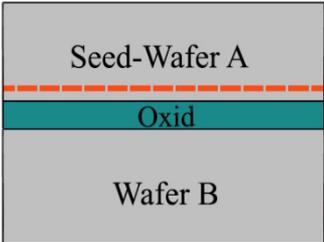
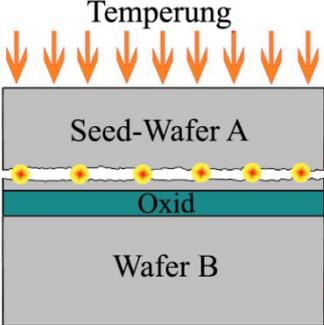
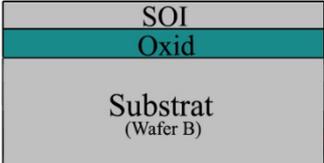
 <p>Wafer B</p> <p>Oxid</p> <p>Seed-Wafer A</p>	<p>A1</p> <p>Thermische Oxidation</p>
 <p>Wafer B</p> <p>Wasserstoff-Implantation</p> <p>Oxid</p> <p>Seed-Wafer A</p>	<p>A2</p> <p>Wasserstoffimplantation um die Sollbruchstelle zu definieren</p>
 <p>Seed-Wafer A</p> <p>Oxid</p> <p>Wafer B</p>	<p>A3</p> <p>Si-Si Bonden mittels Silicon Fusion Bonding</p>
 <p>Temperung</p> <p>Seed-Wafer A</p> <p>Oxid</p> <p>Wafer B</p>	<p>A4</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Wafertrennung mittels Temperung (niedrige Temperatur) b) Stabilisierung des Bondinterfaces mittels Temperung (hohe Temperatur)
 <p>SOI</p> <p>Oxid</p> <p>Substrat (Wafer B)</p>	<p>A5</p> <p>Reduzierung der Oberflächen Rauigkeit mittels Polieren</p>

Abbildung 13: Smart-Cut-Prozess [35]: Die vergrabene Oxidschicht wird durch Waferbonden erzeugt. Die obere Si-Schicht wird durch Implantation und Tempern gedünnt, (Spalten des Wafers durch Spannungen in der Schnittstelle von implantierten zu nicht implantierten Bereich)

SIMOX (Separation by Ion Implantation of Oxygen)

Bei diesem Verfahren wird mittels einer Hochdosisimplantation von Sauerstoff und einem nachfolgenden Hochtemperatur-Temperprozess eine vergrabene Oxidschicht erzeugt. Die Implantationsdosis liegt bei über 10^{18} Atome/cm² bei einer Energie von 200 – 300 keV, zusätzlich werden die Si-Wafer auf 500 °C bis 650 °C aufgeheizt, um die Bildung amorpher Schichten zu verhindern (Abbildung 14).

Während des anschließenden Temperprozesses liegt die Temperatur zwischen 1250°C und 1400°C. Hierbei bildet sich die vergrabene SiO₂-Schicht. Die darüber liegende Schicht behält ihre einkristallinen Eigenschaften und ursprüngliche kristallografische Orientierung bei.

Die obere Silizium-Schichtdicke kann durch einen nachfolgenden Expitaxieprozess (je nach Anforderung) erhöht werden.

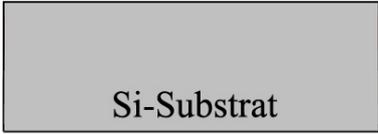
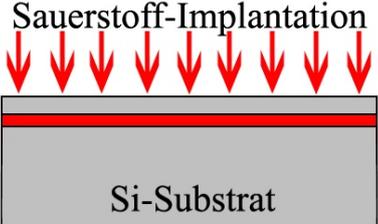
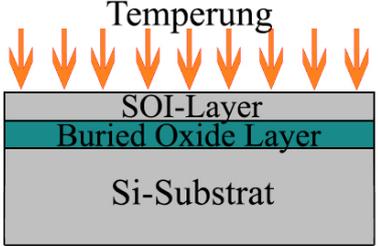
	<p>B1</p> <p>Doppelseitig polierte Silizium Wafer (n/p Typ)</p>
<p>Sauerstoff-Implantation</p> 	<p>B2</p> <p>Hochdosis Sauerstoffimplantation bei einer hohen Energie bei einer Temperatur zw. 500 °C – 600 °C</p>
<p>Temperung</p> 	<p>B3</p> <p>Temperung beim Temperatur zw. 1250 °C – 1400 °C um die vergrabene Oxidschicht zu bilden</p>

Abbildung 14: SIMOX Prozess: Die vergrabene Oxidschicht entsteht durch Sauerstoffimplantation und thermische Oxidation der selbigen.

BESOI (Bonded and Etched-back Silicon-On-Insulator)

Ein Si-Wafer und ein oxidierter Wafer werden mittels Silizium-Direktbonds miteinander verbunden. Der Si-Wafer wird anschließend auf die gewünschte Dicke chemisch heruntergeätzt und danach poliert. Für dünne SOI-Schichten kann mittels Hochdosisimplantation im Si-Wafer ein Ätzstop erzeugt werden.

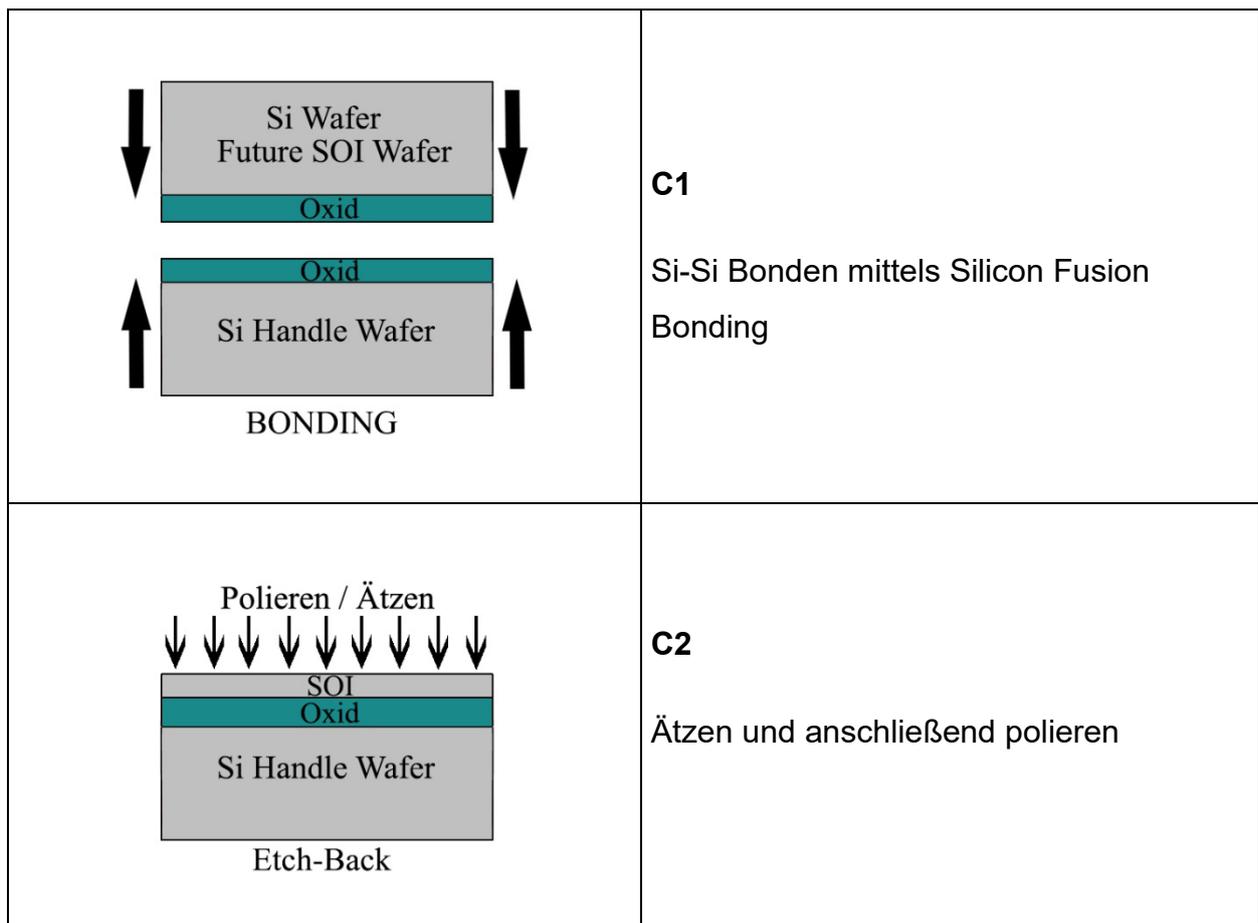


Abbildung 15: BESOI Prozess: Die vergrabene Oxidschicht wird durch Waferbonden erzeugt. Die obere Si-Schicht wird durch chemisches Ätzen gedünnt.

ELTRAN (Epitaxial Layer Transfer)

Ein Si-Wafer erhält mittels Anodisierung eine raue Oberfläche. Diese Oberfläche besteht aus zwei übereinander liegenden porösen Schichten. Anschließend wird auf die poröse Waferseite eine Epi-Schicht aufgewachsen. Danach wird der Wafer thermisch oxidiert. Ein Handle-Wafer wird mittels Silizium-Direktbonden auf den anderen Wafer gebondet. Das Spalten der Wafer erfolgt mit Hilfe eines feinen und scharfen Wasserstrahls. Die poröse Oberfläche wird weggeätzt. Der Wafer wird poliert und getempert. Der gebrauchte Si-Seed-Wafer kann danach gereinigt und wieder verwendet werden.

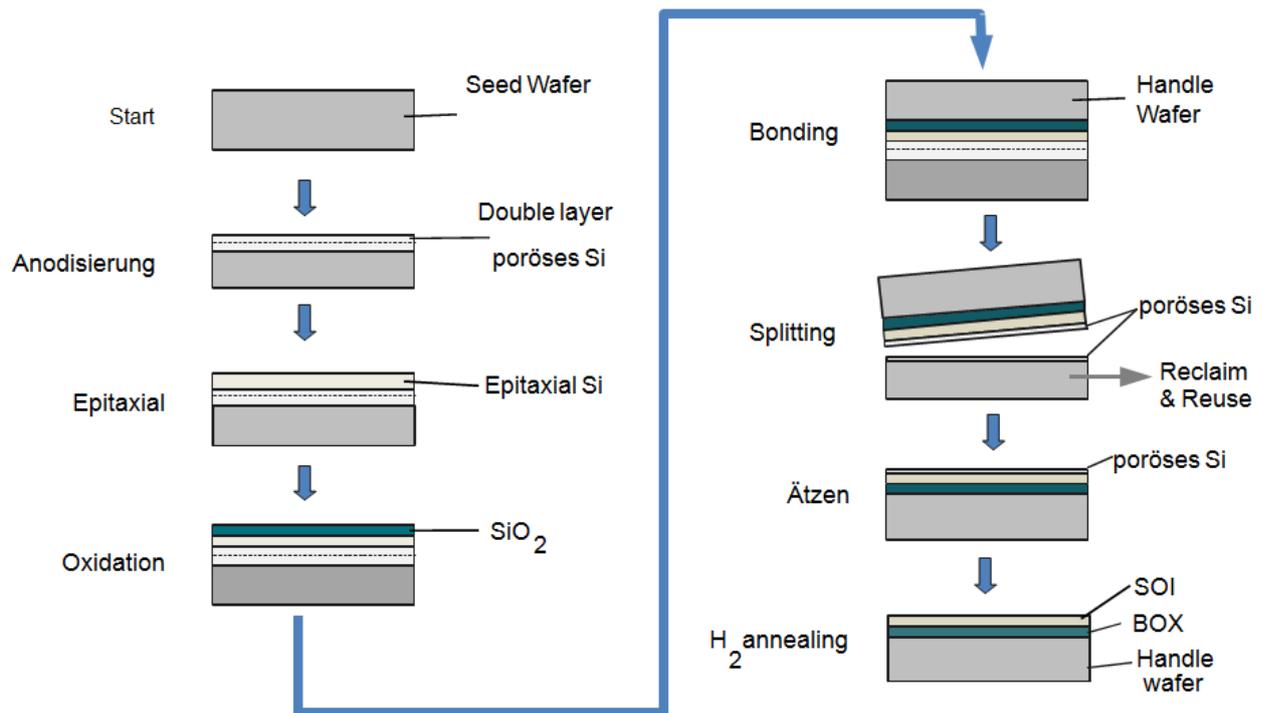


Abbildung 16: ELTRAN Technologie: Die vergrabene Oxidschicht wird durch Waferbonden erzeugt. Ein Wafer wird vorher mit einer porösen Si-Schicht durch Anodisierung und einer epitaxialen Si-Schicht versehen. Durch Spaltung in der porösen Schicht verbleibt nur die dünne Epi-Schicht auf dem Trägerwafer.

2.2.6 SOS-Technologie

Die SOS-Technologie (Silicon on Sapphire) bietet ebenfalls die Möglichkeit, piezoresistive Silizium-Drucksensoren (speziell für hohe Betriebstemperaturen) zu realisieren (Abbildung 17).

Um die Piezowiderstände herzustellen, wird zunächst auf ein Saphir-Substrat epitaktisch eine dünne Siliziumschicht aufgewachsen (SOS-Substrate mit Siliziumschicht und Durchmessern bis 150 mm sind kommerziell verfügbar). Die Herstellung der Mesa-Piezowiderstände erfolgt dann analog zur SOI-Technologie.

Saphir ist chemisch äußerst resistent, so dass eine ätztechnische Strukturierung äußerst schwierig ist. Für die dreidimensionale Strukturierung von Saphir wird deshalb Ultraschall-Erodieren eingesetzt.

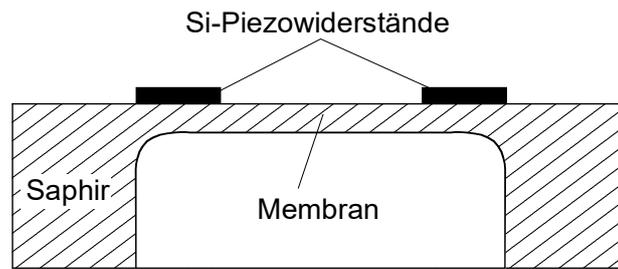


Abbildung 17: SOS-Drucksensorelement (schematisch)

Drucksensoren in SOS-Technologie werden von ASM, Bourns, isi, Patriot und Sensotron angeboten.

2.2.7 SiC- und SiCOI-Technologie

Diese Technologien sind insbesondere für Höchsttemperaturanwendungen (bis ca. 600°C) von Interesse [38], [39].

Bulk-SiC-Drucksensoren nutzen als Ausgangsmaterial n-dotiertes 6H-Material. Die Piezowiderstände sind als Mesostrukturen in einer n-Epitaxieschicht realisiert. Die Strukturierung der Membran erfolgt durch elektrochemisches Ätzen in einem HF/H₂O-Elektrolyt (Abbildung 18). Entwicklungen dieser Art wurden bisher von der Fa. Kulite und von TU Berlin/Fa. Gefran bekannt.

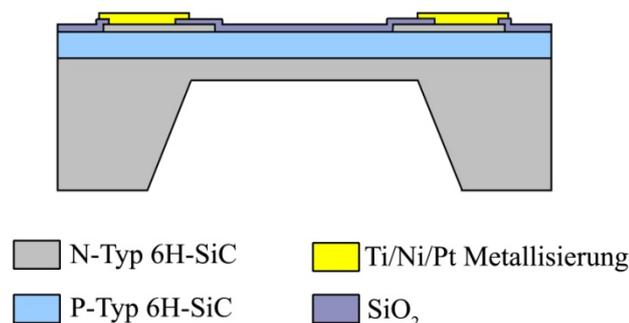


Abbildung 18: Schichtaufbau eines 6H-SiC-Drucksensors

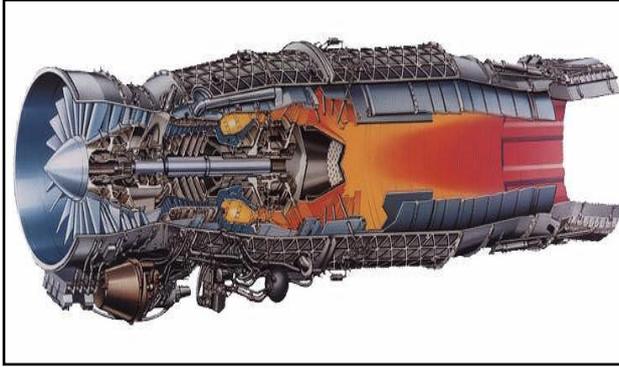
Im Falle von SiCOI- (SiC on Insulator) wird auf ein SOI-Substrat eine einkristalline 3C-SiC-Schicht mit einer Dicke von wenigen µm aufgewachsen. Die Piezowiderstände sind ebenfalls als Mesostrukturen ausgeführt. Da das Substrat aus Silizium besteht, kann die Membran mit den üblichen Prozessen der Si-Mikromechanik strukturiert werden.

2.3 Hochtemperatur-Drucksensoren – State-of-the-Art

Trotz des großen Marktpotenzials für Hochtemperatur-Drucksensoren, das derzeit durch den Übergang von Forschungs- und Entwicklungsanwendungen zu Produktanwendungen gekennzeichnet ist, ist das gegenwärtige Marktvolumen noch relativ niedrig. Deswegen ist die Anzahl der kommerziellen Anbieter von Hochtemperatur-Drucksensoren derzeit noch sehr überschaubar. In dieser Arbeit werden nur Firmen berücksichtigt, welche HT-Drucksensoren auf Basis des piezoresistiven Prinzips herstellen. Diverse Aktivitäten werden bei dieser Zusammenstellung ebenso außer Acht gelassen wie andersartige Messprinzipien, wie z.B. das piezoelektrische oder das optische Prinzip.

Bei den piezoresistiven HT-Messprinzipien auf Halbleiter-Basis hat sich in den letzten Jahren ganz klar das Material SOI (Silicon-On-Insulator) durchgesetzt. Die in den 90er-Jahren begonnene und bis ins Jahr 2000 hineinreichende Euphorie um das Materialsystem Siliziumkarbid (SiC) hat sich aufgrund von Problemen bei der Materialherstellung und Technologie weitestgehend gelegt. Bis zum heutigen Tag gibt es keinen kommerziell erhältlichen Drucksensor auf SiC-Basis. Ebenso haben die noch früher begonnenen Aktivitäten mit Diamant und SOS (Silicon On Saphir) zu keinem nennenswerten Durchbruch geführt. Die in neuerer Zeit aufgekommenen III-V-Halbleiter wie GaN sind ebenfalls noch weit von der Anwendung entfernt.

Somit ist SOI das einzige Halbleitermaterial, welches in kommerziell erhältlichen HT-Drucksensoren in größerer Stückzahl zum Einsatz kommt. Anwendungen solcher HT-Drucksensoren liegen in der Motorenforschung (Automobilindustrie) [26], [27], [28], Turbinenentwicklung (Luft- und Raumfahrt) [38], in der Kunststoffindustrie sowie Downhole-Industrie [14], [26], [27], [28], [38]. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht von typischen Anwendungen für piezoresistive HT-Drucksensoren. Die bekanntesten Hersteller, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird, sind die Firmen Kulite, Kistler, Endevco, Druck, Gefran, First Sensor AG und Presens.



Turbinenforschung [71]



Motorenentwicklung [72]



Kunststoffindustrie [7]



Downhole [70]

Abbildung 19: Typische Anwendungsfelder von piezoresistiven HT-Drucksensoren

KULITE

Die Abbildung 20 unten zeigt das SOI-Hochtemperaturdrucksensorkonzept (Leadless-Konzept) der Firma Kulite. Eine Besonderheit dieses Konzepts ist der Verzicht auf das Drahtbonds. Das SOI-Sensorelement ist auf einem Träger (Si oder Glas) Face-down montiert. Die elektrische Kontaktierung des Sensorelements ist über integrierte Kovar-Stifte in dem Trägerchip realisiert. Das Sensorelement, der Träger und das Gehäuse sind durch nicht leitende Glassfritte miteinander verbunden, so dass die sensitiven Strukturen hermetisch gekapselt sind. Nach Angaben von Kulite funktionieren die Sensoren bis 600 °C.

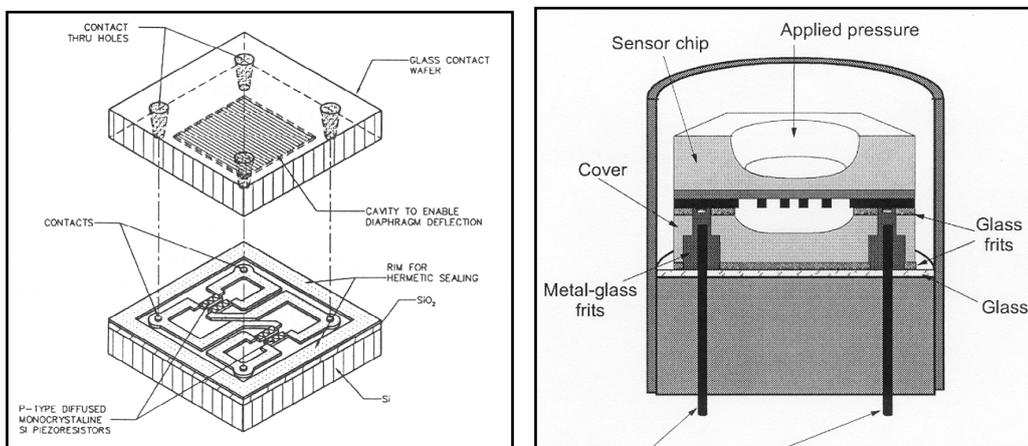


Abbildung 20: Leadless-Technologie von Kulite mit SOI-Drucksensorchip [28] [38] – die Explosionsdarstellung von Träger und Sensorchip (links) der Gesamtaufbau im Schnitt (rechts)

Kistler

Im Gegensatz zu Kulite verfügen die Sensoren von Kistler gewöhnlich über eine frontbündige Stahlmembran (Abbildung 21), welche den Einsatz nicht nur bei hohen Temperaturen, sondern darüber hinaus auch unter rauen Umgebungsbedingungen (aggressive, viskose Medien) ermöglicht [14], [26]. Der Sensoraufbau ist jedoch nur für Hochdruckanwendungen über 100 bar geeignet.

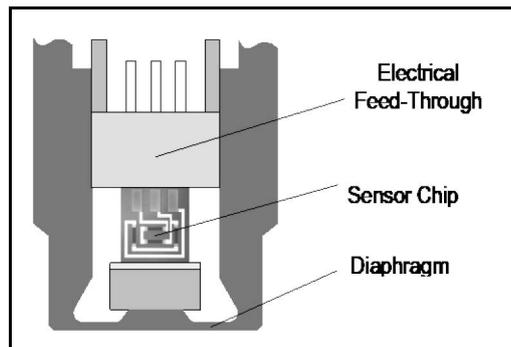


Abbildung 21: Harsh Environment-Drucksensoren von Kistler mit SOI-Drucksensorchip [16]

Endevco

Die Abbildung 22 zeigt schematisch den Sensoraufbau und einen realisierten Drucksensor für den Temperaturbereich bis 350 °C von Endevco [41]. Das Konzept des Sensors ist sehr einfach. Der zu messende Druck wird durch eine Stahlmembran auf eine Siliziummembran übertragen. Die Dehnungsmessstreifen aus Silizium sind auf der Siliziummembran gebondet.

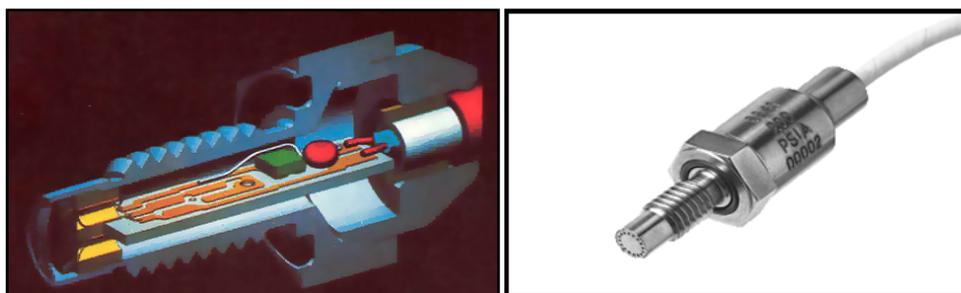


Abbildung 22: Hochtemperatur Drucksensor von Endevco mit BCE-SOI-Chip.
Links: schematischer Aufbau des Sensors und rechts – realisierter Sensor [41].

Presens

PRESENS hat einen schon aus mehreren Publikationen bekannten, interessanten Drucksensor mit einem einseitig eingespannten rohrförmigen Silizium-Chip im Angebot [42], [43]. Das Hochtemperatur-Sensorkonzept ist in Abbildung 23a dargestellt. Das Sensorelement wurde in PSOI-Material (Polysilicon-on-Insulator) hergestellt (Abbildung 23 b).

Die spezielle Hochtemperaturmetallisierung ($\text{TiSi}_2/\text{TiWN}/\text{Au}$) wurde eigens für den Sensor an der Technischen Universität Berlin (FSP – Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik) entwickelt. Dieser Chip ist in einem ölgefüllten Aufnehmer verpackt. Das Sensorsystem ist für 3000 bar und 180°C vorgesehen und zeichnet sich durch eine hohe Stabilität aus. Die Genauigkeit des Sensors für den Temperaturbereich bis 175°C ist besser als 0,01 % FS (Full Scale). Die Hysterese und Wiederholbarkeit des Sensorausgangssignals sind ± 25 ppm FS und ± 10 ppm FS. Der Chip wurde im Prototypenstadium von LETI (Grenoble) hergestellt [41].

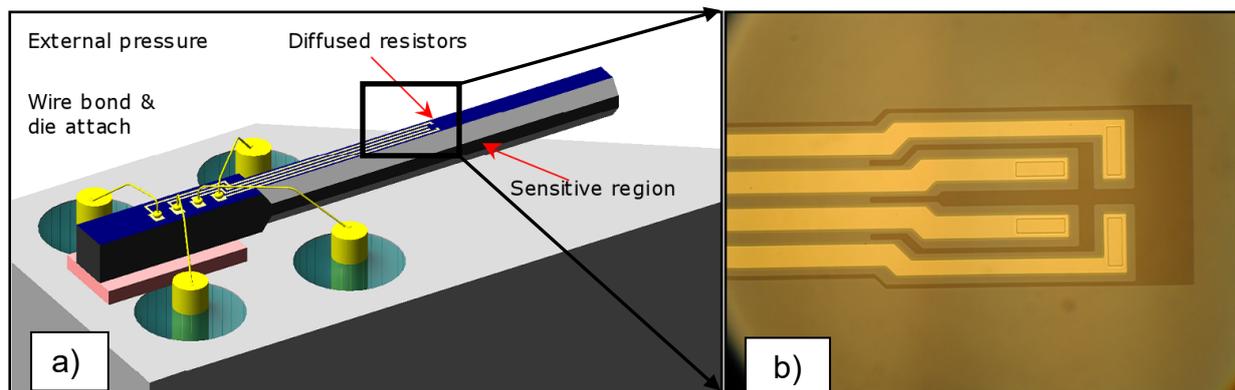


Abbildung 23: Hochtemperatur-Drucksensor-Konzept der Firma Presens (links) und rechts: Vergrößerung der empfindlichen Region eines Sensorelements in PSOI-Material (Polysilicon-on-Insulator) [43]

Gefran

Die Firma Gefran Sensori mit Hauptsitz in Italien entwickelt und produziert Sensoren für die Messung von Temperatur, Druck, Position, Kraft und Feuchtigkeit. Ein wichtiger Teil der Produktpalette ist der IMPACT-SOI-Schmelzdrucksensor für Temperaturen bis 350 °C. Dieser Drucksensor ist speziell für Anwendungen in der Kunststoffverarbeitendenindustrie entwickelt worden. Ein besonderes Merkmal dieses Sensors besteht darin, dass er ohne Füllmedium (fluid free) auskommt. Der prinzipielle Aufbau des SOI-basierten Sensors ist in Abbildung 24 dargestellt. Der Sensorchip sitzt „floated“ in einem Keramikträger mit integrierten elektrischen Durchkontaktierungen. Die Druckübertragung wird durch eine Stahlmembran und einen Stößel (pushrod) realisiert [27], [44]. Für die Realisierung des Sensorchips (Abbildung 24 rechts) wurde Smart-Cut-SOI-Material verwendet. Die kleine und kompakte Siliziummembran mit Center-Boss wurde mit dem Bosch-Prozess strukturiert. Die IMPACT-Drucksensoren sind mit Performance Level „c“ zertifiziert und für Drücke bis 3000 bar ausgelegt und haben eine Genauigkeit von ± 0.25 FSO (Full Scale Output).

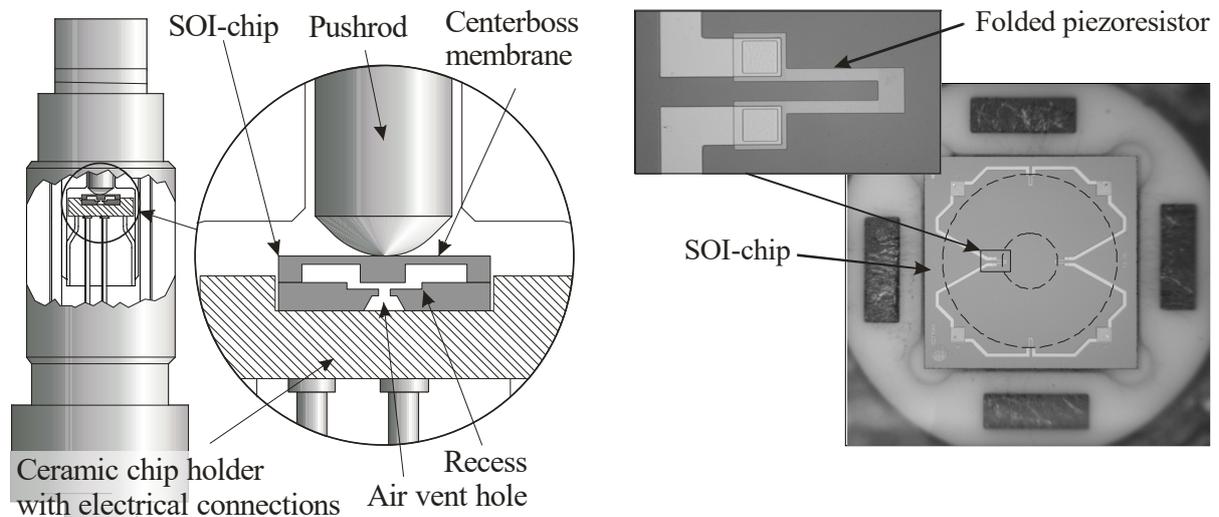


Abbildung 24: GEFRAN's Impact Sensor. Links – prinzipieller Aufbau des Sensors, rechts – realisierter SOI-Sensorchip [27]

First Sensor AG

Ein Teil der Produktpalette der Firma First Sensor AG stellt die so genannte HT-Line dar. Sie besteht aus acht Typen piezoresistiver Drucksensorchips, die sich vor allem in ihrer Empfindlichkeit unterscheiden. Diese reicht von $5 \mu\text{V}/(\text{V}\cdot\text{KPa})$ bis $570 \mu\text{V}/(\text{V}\cdot\text{KPa})$. Die Chips werden aus SOI-Material hergestellt. Sie verfügen über eine Membran, auf der eine Wheatstone-Brücke aus piezoresistiven Widerständen angebracht ist. Die Widerstände sind aus der Siliziumschicht des SOI-Materials hergestellt. FS AG spezifiziert den Temperaturbereich mit -40°C bis 225°C . Über das verwendete Metallisierungssystem werden keine Angaben gemacht.

Neben Hochtemperaturanwendungen wird auch die so genannte Harsh Environmental Line vertrieben, die für Anwendungen in aggressiven Medien entwickelt wurde. Auch diese Sensoren basieren auf einer Siliziummembran mit integrierter Wheatstone-Brücke. Oberhalb der Membran ist eine Glaskappe durch anodisches Bonden aufgebracht. Das Volumen ist auf einen Druck von $< 1 \text{ kPa}$ evakuiert, der als Referenzdruck fungiert. Aggressive Medien berühren daher nur die reine Siliziumoberfläche, die durch ihr natürliches Oxid die gleiche Medienresistenz hat wie Glas.

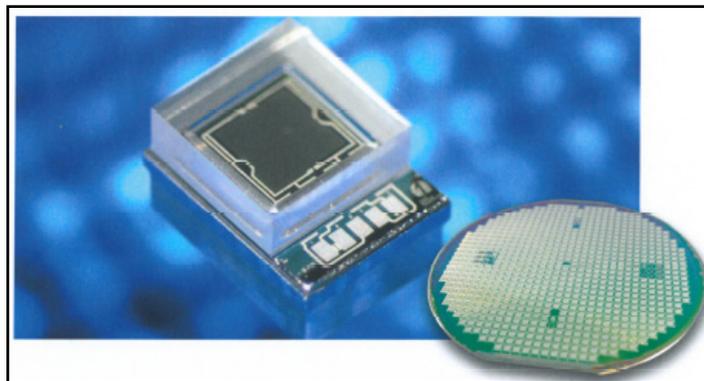


Abbildung 25: Drucksensorchip der Firma First Sensor, Vorder- und Rückseite geschützt durch Glasdeckel für den direkten Einsatz in Harsh Environments [45]

2.4 Abschließende Bewertung der State-of-the-Art-Drucksensoren

Die auf dem Markt verfügbaren Sensoren sind in ihrem Einsatz eingeschränkt. Der Sensor der Firma Gefran erfährt seine Auslenkung über einen Stempel, welcher auf die empfindliche Sensormembran drückt. Eine Schädigung der Passivierung auf der Sensorchipoberseite kann nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin muss für die Anpassung des Druckbereiches ein neuer Sensorchip hergestellt werden. Der Einsatz von Drahtbondtechnik verhindert des Weiteren das Verkleinern des Sensorgehäuses und wirkt sich negativ in Umgebungen mit hochfrequenten Vibrationsbelastungen aus. Der Sensor der Firma Presens löst das Problem des eingeschränkten Druckbereiches, doch ist er u.a. aufgrund seiner Ölfüllung lediglich für Temperaturen bis 180 C spezifiziert. Das Package des Sensors der Firma Kulite und der Firma First Sensor AG ist in rauen Umgebungen nicht anwendbar. Der Sensorchip der Firma First Sensor AG schützt die Membranoberseite mit einer Glascapping jedoch werden die Bondkontakte der rauen Umgebung ausgesetzt. Das Sensorkonzept der Firma Kistler ist ausschließlich für hohe Drücke anwendbar und aufgrund der notwendigen geringen Fertigungstoleranzen sehr teuer in der Herstellung.

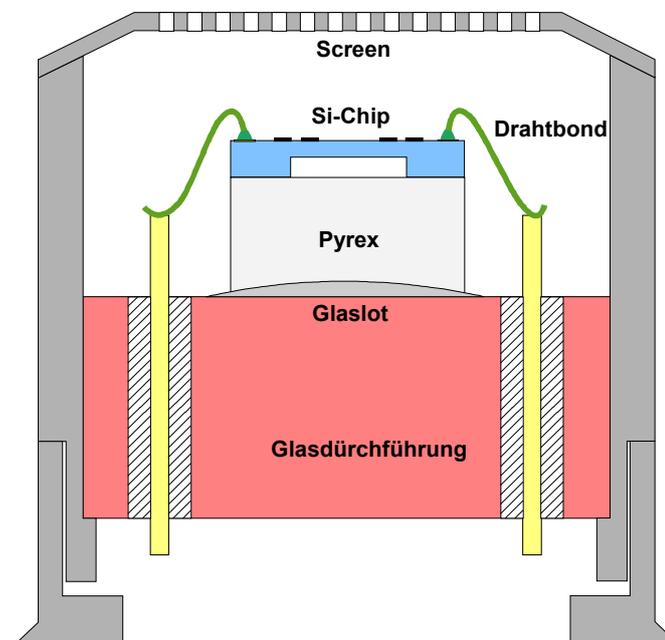


Abbildung 26: Schematische Darstellung eines Sensorprinzips ohne Stahlmembran. Die Sensorkontaktierung erfolgt mittels einer Drahtbondverbindung. Sensor und Bondverbindungen sind gegenüber aggressiven Medien nicht geschützt. Der Druck wirkt direkt auf den piezoresistiven Sensorchip.

Auch bei den übrigen auf dem Markt verfügbaren Sensoren finden sich vorwiegend Merkmale, die an Hand zweier exemplarischer Konzepte zusammengefasst werden können:

Abbildung 26 zeigt einen schematischen Aufbau eines konventionellen piezoresistiven Drucksensors für Standardapplikationen. Der Druck wirkt hierbei direkt auf die Membran. Der Schutzschirm (Screen) schützt den Chip lediglich vor unerwünschten mechanischen Einflüssen. Schutz vor dem Umgebungsmedium ist weitestgehend nicht gegeben.

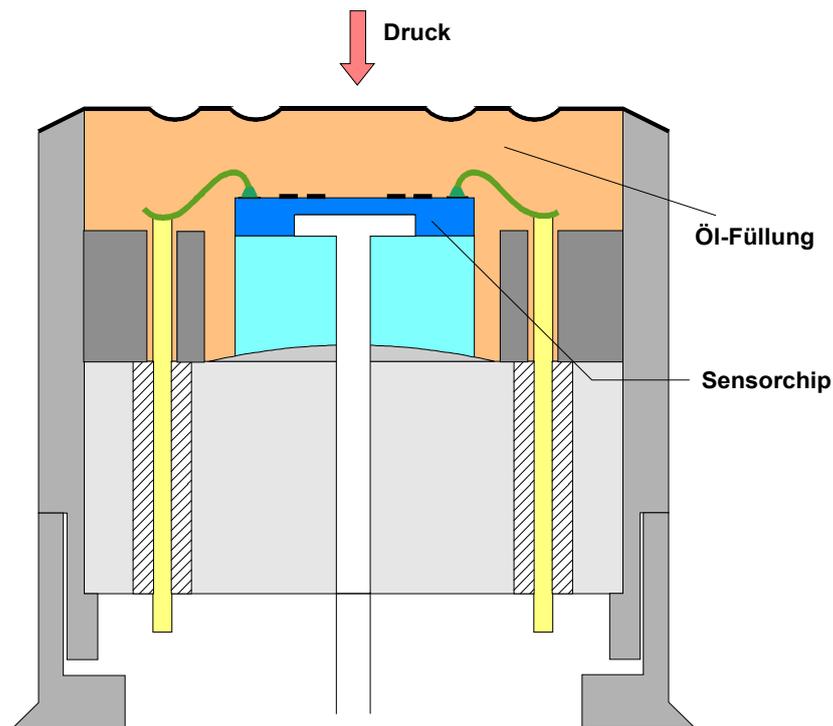


Abbildung 27: Schematische Darstellung eines Sensorprinzips mit Stahlmembran und flüssigem Druckübermittler. Die Kontaktierung des Sensorchips erfolgt mittels Drahtbondtechnik. Die empfindliche Chipvorderseite und die Bonddrähte sind vor aggressiver Umgebung geschützt.

Abbildung 27 zeigt einen Aufbau, der den Sensorchip vor den reaktiven bzw. aggressiven Gasen und Flüssigkeiten wirklich effektiv schützt. Der Sensorchip ist mittels einer dünnen Stahlmembran vom Messmedium getrennt. Eine Flüssigkeit (z.B. Silikonöl) überträgt den Druck von der Stahlmembran auf den Sensorchip. Das temperaturbegrenzende flüssige Übertragungsmedium ist hier der Hauptnachteil. Außerdem sind der Miniaturisierung enge Grenzen gesetzt. Typischerweise beträgt der Außendurchmesser solcher Sensoren 19 mm, nur in sehr seltenen Fällen und bei eingeschränkten Einsatzbedingungen

beziehungsweise eingeschränkten Spezifikationen sind Durchmesser zwischen 10 und 15 mm anzutreffen.

Die oben beschriebenen Sensoren sind in ihrem Einsatz eingeschränkt. Deswegen muss das Konzept des neuen Sensors die positiven Eigenschaften der vorhandenen Sensorkonzepte vereinen und die bestehenden Limitierungen beheben. Der neue Sensor soll hochoberflächenfest, niederdrucktauglich, resistent gegenüber aggressiven Medien und kompakt sein, ohne Empfindlichkeit und Stabilität einbüßen zu müssen.

2.5 Zielstellung der Untersuchungen

Die Präzisierung der Aufgabenstellung ergibt sich aus der kritischen Bewertung der Sensoren weiter oben. Die Untersuchungen in dieser Arbeit zielen auf ein Sensorprinzip, das optimalen Schutz des Sensorchips vor mechanischer und chemischer Belastung gewährleistet. Darüber hinaus wird Hochoberflächenfestigkeit angestrebt. Einfache Messbereichsanpassung und eine möglichst kompakte Bauweise sind weitere anzustrebende Ziele. Aus der Verwirklichung dieser Zielvorgaben ergibt sich eine erhebliche Verbesserung der Funktionalität des zu realisierenden Sensors.

Die wissenschaftliche Herausforderung liegt daher in der Entwicklung eines neuartigen Drucksensorkonzeptes, das gegenüber den bestehenden Konzepten einen weitreichenden Einsatz in "rauen" Messmedien bei hohen Temperaturen erlaubt. Diese Forderungen können nur mit einem Konstruktionsprinzip erfüllt werden, bei dem folgendes gilt [1], [2], [3], [4]:

1. Der Sensorchip muss hochoberflächenfest sein (z.B. durch Verwendung von SOI).
2. Der Aufbau muss widerstandsfähig sein und abrasiven Medien standhalten. Die robuste Membran sollte aus massivem Metall gedreht sein und damit das steifste Element in der Konstruktion darstellen, so dass allein sie den messbaren Druckbereich bestimmt.
3. Um die Hochoberflächenfestigkeit zu gewährleisten muss ein ölfreies Konstruktionsprinzip verfolgt werden. Die Kopplung von Membran und Sensorchip wird daher nicht über eine Flüssigkeit realisiert, sondern über einen mechanischen Kontakt.

Abbildung 28 zeigt den schematischen Aufbau eines piezoresistiven Drucksensors, der den oben aufgestellten Prinzipien genügt. Das Gehäuse schließt den Sensor zuverlässig

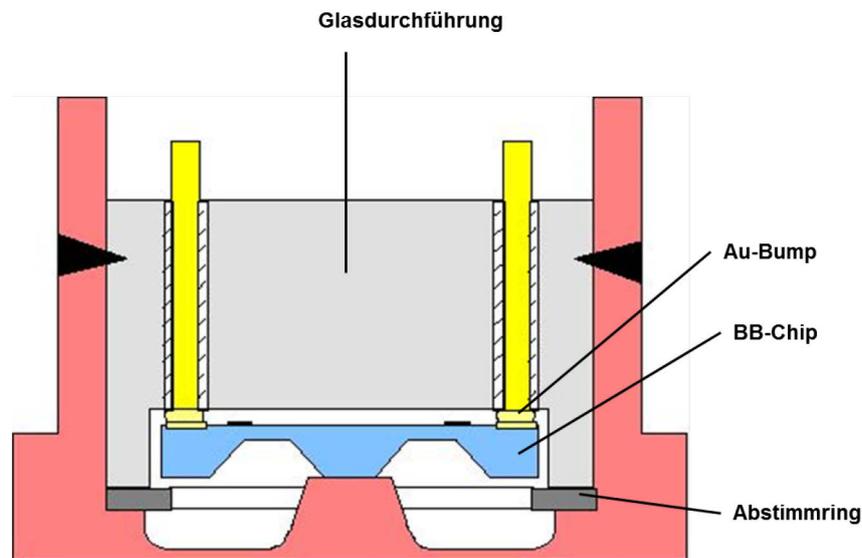


Abbildung 28: Schematische Darstellung eines ölfreien Sensorprinzips mit robuster Stahlmembran und mechanischer Kopplung zum Sensorchip. Die Kontaktierung des Sensors erfolgt mit Goldstiften auf die Sensorvorderseite. Der Druck wirkt über die Stahlmembran auf die Sensorunterseite.

sig von der Umgebung ab. Der Druck überträgt sich von der stabilen, den Druckbereich bestimmenden Stahlmembran über zwei mittige Versteifungen auf die Rückseite des Balkens des Sensorchips. Die Kontaktierung erfolgt über vergoldete NiFe-Metallstifte in einer dichten Glasdurchführung auf die Vorderseite des Chips. Aufgabe dieser Arbeit ist es, das neuartige Sensorkonzept zu konstruieren, durch FEM-Simulation zu dimensionieren, technologisch auszuführen und die postulierten Eigenschaften zu verifizieren. Weiterhin ist es notwendig ein Metallisierungssystem für den Sensorchip zu entwickeln, welches für den hohen Temperaturbereich geeignet ist. Ein heuristisches Modell des Sensors wird später im Kapitel 3 vorgestellt.

3 Sensordesign und -simulation

Das Konstruktionsprinzip des zu entwickelnden Sensors wurde in vorangehenden Abschnitt 2.4 vorgestellt. Die Kopplung soll diesem zufolge mechanisch ohne Verwendung von Öl als Übertragungsmedium erfolgen, da Öl aufgrund seines hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten das Ergebnis verfälschen würde. Diese Verfälschung des Ergebnisses ist im Niederdruckbereich besonders problematisch, da hier aufgrund der geringen Drücke oft mit geringeren Ausgangssignalen gearbeitet werden muss. Aufgrund des Einsatzes im Niederdruckbereich, besteht nicht die Möglichkeit einen Sensor vom Stabtyp (Firma Kistler) einzusetzen, da dieser aufgrund der geringeren Chipstauchung unterhalb von 200 bar ein zu geringes Ausgangssignal liefert. Für die Realisierung sollte kein Membranchip ohne Center-Boss verwendet werden, da hier die Vorderseite des Sensors dem Druck ausgesetzt ist, wo sich die Piezowiderstände und die Metallisierung befinden. Des Weiteren ist eine Beschädigung der Sensormembranpassivierung möglich. Das Einprägen der Last auf die Rückseite ist hier von Vorteil. Jedoch ist die Kontaktierung mittels Drahtbondtechnologie nicht mehr möglich.

Als Drucksensorprinzip wurde der piezoresistive Effekt gewählt aus den Gründen, wie sie in Tabelle 1 dargestellt wurden. Sensoren, welche den piezoresistiven Effekt nutzen, bieten eine große konzeptionelle Freiheit. So kann beispielsweise zwischen allseitig eingespannten Membranen, zweiseitig eingespannten Balken und einseitig eingespannten Balken gewählt werden. Es kann auf eine Vielzahl von Herstellungstechniken zurückgegriffen werden, die Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Anwendung zulassen. Piezoresistive Chips können auch in hohen Stückzahlen kostengünstig gefertigt werden. Weiterhin kann durch das Verschalten der implantierten Widerstände zu einer Wheatstonebrücke eine hohe Empfindlichkeit und eine gute Linearität zwischen Druckbeaufschlagung und Ausgangssignal erreicht werden. Es bedarf keiner zusätzlichen Ausleseelektronik, wie sie beispielsweise bei kapazitiven, optischen, piezoelektrischen oder resonanten Drucksensoren notwendig ist.

3.1 Sensorkonzept

Das Grundkonzept des Sensors basiert auf einer Stahlmembran, die unter Druckbeaufschlagung eine definierte Auslenkung erfährt. Diese Auslenkung soll über einen Center-Boss, eine Art Stempel in der Membranmitte, auf einen Siliziumchip übertragen werden.

Dieser Chip misst die Auslenkung über eine Anordnung von vier in Form einer Wheatstone-Brücke verschalteten piezoresistiven Widerständen. Zwei sind longitudinal und zwei transversal angeordnet. Diese sind dort positioniert, wo der Chip durch die Auslenkung die höchste mechanische Verspannung erfährt. Die Befestigung des Chips erfolgt ausschließlich durch Flip-Chip-Bonden an das Substrat. Eine Klebung wird damit vermieden. Diese Flip-Chip-Verbindung garantiert aber nicht nur die mechanische Verbindung von Chip und Substrat, sondern ist gleichzeitig für die elektrische Kontaktierung des

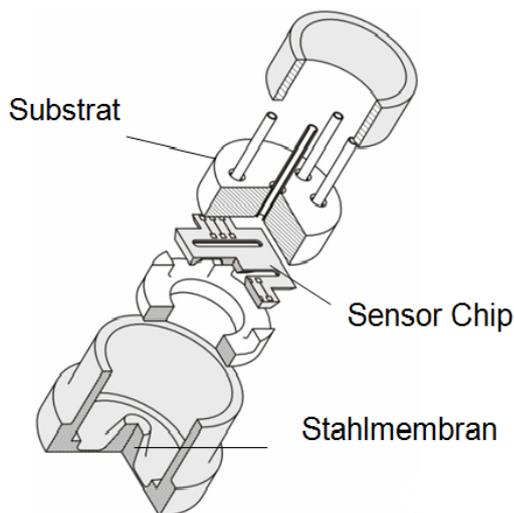


Abbildung 29: Grundkonzept des Drucksensors mit Gehäusung. Die Auslenkung der Stahlmembrane wird auf die Silizium-Membrane übertragen. Die Befestigung des Silizium-Chips erfolgt durch Flip-Chip-Bonden an das Substrat. Diese Flip-Chip-Verbindung garantiert aber nicht

Chips verantwortlich. Durch eine an die Positionen der Chip-Pads angepasste Metallisierung des Substrats wird erreicht, dass der Chip elektrisch kontaktiert und die Signale über die in das Substrat integrierten Pins einer externen Elektronik zugeführt werden. Die ständige mechanische Verbindung zwischen den beiden mittigen Versteifungen (Center-Bosses) wird durch eine entsprechende Vorspannung des Silizium-Chips erreicht. Ein flüssiges Druckübertragungsmedium, wie es bei anderen Drucksensortypen häufig zur Anwendung kommt, ist nicht erforderlich. Dem Druckmedium zugewandt ist nur die Stahlmembran, die in Form einer Membranhülse die übrigen Sensorkomponenten umfasst. Dadurch wird ein hohes Maß an Medienkompatibilität erreicht. Eine vollständige Darstellung des Sensors ist in Abbildung 29 gegeben.

Die Steifigkeit der Stahlmembran ist deutlich größer als die des Silizium-Biegebalkens. Daraus ergibt sich, dass die druckbedingte Auslenkung weitgehend durch die Dimensionierung der Stahlmembran bestimmt wird (vgl. Kap. 3.2). Die Stahlmembran dient als Druck-Weg-Umformer. Der Siliziumchip hat allein die Aufgabe, diesen Weg - die Auslenkung - zu messen. Er ist folglich kein Drucksensorchip, sondern ein Wegmesschip, ein elastischer Weg-Spannungs-Umformer. Die mechanischen Spannungen in der Stahlmembran liegen bei der maximalen Druckbelastung weit unterhalb des Übergangs zur plastischen Deformation. Durch diese Konstruktion ergibt sich der Vorteil, dass Druckbereichsanpassungen ausschließlich über die Veränderung der StahlmembranstEIFigkeit (Dicke, effektiver Membrandurchmesser) vorgenommen werden können und unabhängig vom Druckbereich immer der gleiche Chip eingesetzt werden kann.

Im Gegensatz zur Verwendung üblicher Druckübertragungsmittel wie Silikonöl oder Quecksilber bestehen weitere wichtige Vorteile dieser direkten mechanischen Verbindung zwischen Stahlmembran und Siliziumchip in der einfachen Montage, der hohen Dynamik (kurze Ansprechzeit) sowie im Potenzial für Hochtemperaturanwendungen.

Aus der Literatur ist bekannt, dass das Ausgangssignal von piezoresistiven Sensoren mit Vollbrücke mit der Formel berechnet werden kann:

$$U_{out} = U_b \cdot K \cdot \varepsilon = I_b \cdot R_b \cdot K \cdot \varepsilon \quad \text{(Gleichung: 1)}$$

Wobei U_b die Betriebsspannung, K der K-Faktor, I_b der Betriebsstrom, R_b der Brückenwiderstand und ε die Dehnung sind.

Die wichtigsten Kriterien bei der Sensorentwicklung für Hochtemperaturanwendungen sind:

- Geringer Einfluss der thermischen Spannung auf das Ausgangssignal: Dieses Kriterium kann erreicht werden, wenn die aktive Struktur, auf welcher die Piezowiderstände platziert sind, von dem gesamten Sensorgehäuse entkoppelt werden kann, z.B. durch Schlitze.
- Empfindlichkeit: Bei piezoresistiven Sensoren ist die Empfindlichkeit abhängig von dem K-Faktor und der mechanischen Dehnung, insbesondere von der Stelle wo die Piezowiderstände integriert sind. Der K-Faktor ist von Material und Dotierung abhängig. In diesem Fall ist der K-Faktor eine Konstante. Die Dehnung ist von der Geometrie und den Randbedingungen abhängig. Ein Ziel der Optimierung muss es sein, eine maximale Dehnung zu erreichen (kleiner als die Bruchdehnung von Silizium).
- Linearität: Die Linearität der Sensoren ist von der Kennlinie der mechanischen Spannung abhängig. Es ist in der technischen Mechanik bekannt, dass Federstrukturen (Biegebalken mit Versteifung) eine viel bessere Linearität aufweisen als Membranen.

Für das Design des Siliziumchips wurde die Struktur eines Biegebalkens ausgewählt, da bei solch einem Design eine deutlich bessere Entkopplung zwischen aktiver Struktur und Einspannung erzielt wird als bei einer Membranstruktur (Abbildung 30). Diese besteht aus einem länglichen Balken, der in der Mitte durch eine sogenannte Center-Boss-Struktur verdickt ist. Der Balken ist an den beiden kurzen Seiten fixiert, die beiden langen Seiten sind weitgehend frei, da sie über zwei Schlitze von der Einspannung mechanisch entkoppelt sind. Die Weg-Übertragung erfolgt durch den Center-Boss. Bei einer Auslenkung entsteht im Balken ein mechanisches Spannungsprofil, welches durch die Messbrücke aus piezoresistiven Widerständen gemessen, d.h. in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Der umliegende Chipbereich dient der Fixierung des Balkens, dem Einbau des Chips ins Gehäuse sowie der elektrischen Kontaktierung durch Flip-Chip-Bonden. Durch die freiliegenden langen Seiten des Balkens wird eine weitgehende mechanische Entkopplung der Balkenstruktur vom umliegenden Chiprahmen erreicht. Das System ist somit unempfindlich gegen äußere Einflüsse, vor allem gegen thermische Verspannungen. Das FE-Modell wurde so aufgebaut, dass die Y-Achse senkrecht zur Chipoberfläche steht.

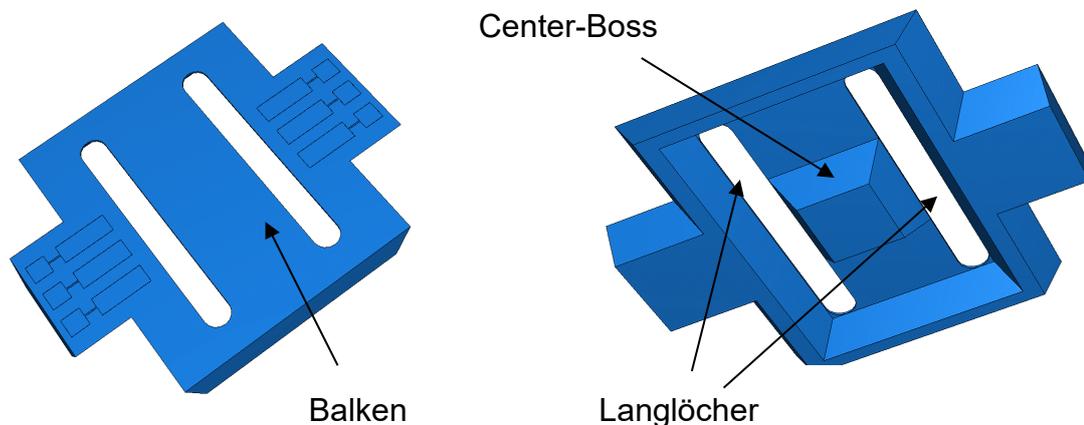


Abbildung 30: FE-Modell des Biegebalkenchips (links: Oberseite, rechts: Unterseite). Diese Balkenstruktur besteht aus einer länglichen Balken, die in der Mitte durch eine so genannte Center-Boss-Struktur verdickt ist. Die Platte ist an den beiden kurzen Seiten fixiert, die beiden langen Seiten sind weitgehend frei, da sie über zwei Schlitze von der Einspannung mechanisch entkoppelt sind. Die Weg-Übertragung erfolgt durch den Center-Boss.

Für die Optimierung des Designs waren die folgenden Anforderungen maßgeblich:

1. Eine gängige Designregel bei der Auslegung von piezoresistiven Drucksensoren ist eine Piezodehnung zwischen $0,5 \cdot 10^{-3}$ und $0,8 \cdot 10^{-3}$ bei maximaler Belastung, nachfolgend FS-Belastung (Full Scale Belastung) genannt. Bei einem Brückenwiderstand von ca. $3,3 \text{ K}\Omega$ (üblich in der Halbleitertechnologie) entspricht dies einem Ausgangssignal im Bereich von 200 mV bei einer Konstantstromspeisung mit 1 mA .
2. Die Stahlmembran soll eine möglichst hohe Eigenfrequenz besitzen, um bei der Anwendung Resonanzeffekte zu vermeiden. Hierzu muss die Stahlmembran eine hohe Steifigkeit besitzen. Eine steife Membran hat in der Anwendung eine geringe Auslenkung, was sich positiv auf die Nichtlinearität auswirkt. Nachteilig an einer steifen Membran ist, dass vom Chip eine hohe Wegempfindlichkeit gefordert werden muss. Dies stellt hohe Anforderungen an die Bauteiltoleranz in der Fertigung. Auch die Abstimmung des Chips wird erschwert. Die Offset-Werte der Messbrücke liegen allein durch die Vorspannung des Chipeinbaus im Bereich des Ausgangssignals bei FS-Belastung. In der Praxis wird die Stahlmembran so ausgelegt, dass sie beim spezifizierten Maximaldruck um 10 bis $12 \text{ }\mu\text{m}$ ausgelenkt wird und dies auf den Chip überträgt. Die Geometrie des Chips (siehe Punkt 4) ist dann dafür

verantwortlich, dass aus dieser Auslenkung das geforderte Ausgangssignal von ca. 200 mV bei 1 mA generiert wird (siehe Punkt 1).

3. Die Druckbereichsanpassung soll ausschließlich über die Anpassung der Stahlmembran erfolgen. Das bedeutet in der Umsetzung, dass die Steifigkeit des Chips gegenüber der Steifigkeit der Stahlmembran vernachlässigbar ist.
4. Die Geometrie des Siliziumchips wurde maßgeblich durch das vorgegebene Gehäuse bestimmt. Die Geometrie ist in Abbildung 48 dargestellt.

Die Geometrievorgaben entstehen über die Definition der Center-Boss Struktur. So wurde bereits der Stempel der Stahlmembran auf das Minimum von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ festgelegt. Durch die Verwendung von KOH zur Herstellung der Center-Boss Struktur kann man über die Balkendicke und den KOH Ätzwinkel von $54,74^\circ$ die minimale Breite des Balkens festlegen. Technologisch bedingt sind Membrandicken nur über $20 \mu\text{m}$ sinnvoll. Inhomogenitäten der Ätztiefe bei der Membranätzung sowie der Dicke des Ausgangsmaterials würden ansonsten eine zu große Streuung der Parameter, insbesondere der Empfindlichkeit zur Folge haben.

Drückt der Stempel der Stahlmembran auf den Center-Boss, so wird die Balkenstruktur gemeinsam mit dem Center-Boss ausgelenkt. Je kürzer der Balken gewählt wird, desto höher ist die mechanische Spannung im Piezowiderstandsbereich, wenn der zurückgelegte Weg bei Maximaldruck ca. $12 \mu\text{m}$ betragen soll. Die Balkenlänge muss so gewählt werden, dass die mechanische Spannung bei diesen $12 \mu\text{m}$ Auslenkung der Center-Boss Struktur plus der Vorspannung plus einer ausreichenden Überlast die Bruchspannung von Silizium nicht überschreitet (Details hierzu siehe Kapitel 3.2). Um eine mechanische Entkopplung des Balkens zu erreichen, wird dieser durch Langlöcher vom Einspannbereich getrennt. Für eine gute technologische Realisierung wird die Breite der Langlöcher auf $400 \mu\text{m}$ festgelegt. Die Padgröße für die mechanische und elektrische Kontaktierung wurde auf $300 \mu\text{m}$ festgelegt. Die Padgröße wurde so gewählt, damit für die mechanische und elektrische Kontaktierung von bis zu 7 Studbumps pro Pad ausreichend Platz ist und der Abstand von den einzelnen Pads groß genug ist, dass ein möglicher Kurzschluss vermieden wird. In Abbildung 48 ist eine Konstruktionsdarstellung des Sensorchips wiedergegeben. Die Gesamtabmessungen des Sensorchips erlauben

es, eine Stahlmembran von lediglich 9,5 mm Durchmesser zu realisieren und ermöglichen eine gute Montage, Schweissbarkeit und eine Anti-Strain Konstruktion sowie den Einbau in ein M12 Gehäuse.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden die nachfolgend dargestellten Simulationen durchgeführt, in welchen anhand von Parameterstudien die Einflüsse und Auswirkungen von Geometrieänderungen auf die Sensoreigenschaften wie Bruchlast und Empfindlichkeit ersichtlich werden.

3.2 FEM-Simulation

Die mechanischen Eigenschaften des Sensors bzw. seiner Komponenten wurden durch FEM-Simulationen ermittelt. FEM steht für „Finite Elemente Methode“. Dadurch konnten einerseits optimierte Konstruktionsparameter ermittelt werden, andererseits resultierende Sensoreigenschaften bereits im Vorfeld bestimmt werden. In dieser Arbeit wurde das Softwarepaket ABAQUS verwendet.

Zur Simulation werden im Computer Volumina definiert und verknüpft. Dadurch wird ein virtuelles Modell des zu untersuchenden Systems erstellt. Je nach Untersuchung und unter Ausnutzung von Symmetrien reicht die Modellierung eines Teilsystems bzw. einer zweidimensionalen Projektion aus. Zur Darstellung kann das Teilsystem dann wieder zum Gesamtsystem bildlich ergänzt werden.

Den einzelnen Volumina werden verschiedene Materialeigenschaften zugewiesen, soweit sie für die Simulation relevant sind. Im vorliegenden Fall wurden für die mechanischen Simulationen im Silizium die drei unabhängigen elastischen Konstanten vorgegeben. Die übrigen, mechanisch isotropen Materialien wurden durch den E-Modul und die Querkontraktionszahl (Poissonverhältnis) beschrieben. Für die thermomechanischen Simulationen war zusätzlich der thermische Ausdehnungskoeffizient α für die verwendeten Materialien vorzugeben.

Die erzeugten Volumina des Modells werden mit einem System aus sogenannten finiten Elementen vernetzt. Unter Vorgabe zu verwendender Elementtypen sowie einer minimalen Vernetzungsdichte erzeugt die Software das Netz der finiten Elemente automatisch. Für die dargestellten Simulationen des Siliziumchips wurden tetraedrische Elemente gewählt, die eine maximale Flexibilität bzgl. des Simulationsmodells erlauben. Die

Stahlmembran wurde mit kubischen Elementen vernetzt. Die Verbindungspunkte der verschiedenen Elemente werden als Knoten bezeichnet. Ihnen werden, neben der geometrischen Position, physikalische Eigenschaften als variable Freiheitsgrade zugeordnet. Dabei kann es sich um mechanische Spannungen, Verschiebungen oder Temperaturen handeln.

Nach Anlegen spezieller Randbedingungen (Temperatur, Druck oder Verschiebung) an das Modell ermittelt der Computer die resultierenden Daten für die Knoten der Elemente, z.B. Temperaturverteilung, Spannung etc.

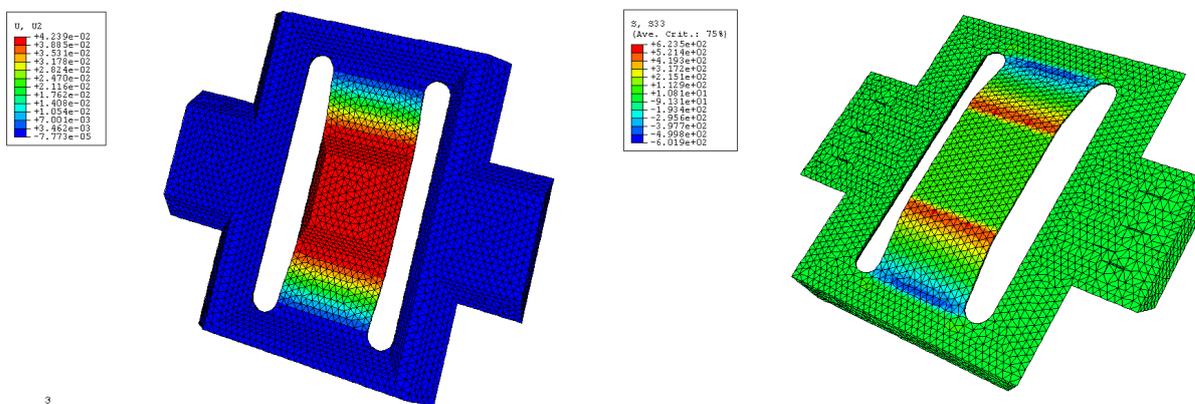


Abbildung 31: Auslenkung (links) und Spannungsverteilung (rechts) im Sensorchip. Die Bilder zeigen die Ergebnisse einer FEM-Simulation. Dargestellt ist das Modell, die Vernetzung mit finiten Elementen sowie das Ergebnis durch Farbuordnung. Der Simulation vorgegeben war ein Weingeitrag von der Rückseite auf den Center-Boss in der Mitte des Biegebalkens.

Abbildung 31 zeigt das Modell des Siliziumchips. Dargestellt ist gleichzeitig das Netz aus Elementen. In der Abbildung sind die Ergebnisse für die Auslenkung und Spannungsverteilung farbig dargestellt. Die farbige Darstellung erlaubt eine schnelle Interpretation der Ergebnisse. Zur exakten Auswertung werden die Daten als Zahlenwerte positionsabhängig ausgelesen. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Optimierung der Chipgeometrie: Balkendicke und Center-Boss

Für Balkendicken von 20, 35 und 50 μm wurde die Materialdehnung ε im Chip ermittelt. Vorgegeben war stets eine Auslenkung des Center-Bosses um zwei Mikrometer. Durch

das weitgehend lineare elastisch-mechanische Verhalten des Siliziums lassen sich die ermittelten Werte auf andere Auslenkungen direkt proportional übertragen. Die Materialdehnung ist für zwei Sensoreigenschaften entscheidend: die Empfindlichkeit und das Bruchverhalten.

Die Geometrieparameter des Chips sind in Abbildung 48 dargestellt. Zur Ableitung der Empfindlichkeit ist die maximale Dehnung auf der Oberseite des Balkens relevant, da hier die Piezowiderstände platziert werden. Die longitudinale Dehnung ist als Funktion des Ortes in Abbildung 32 dargestellt. Die Größe des Center-Bosses wurde hier mit $1 \times 1 \text{ mm}^2$ vorgegeben. Eine nennenswerte Materialdehnung ist auf den Bereich des dünnen Balkens beschränkt. In den dicken Bereichen des Chiprahmens und des Center-Bosses ist die Dehnung vernachlässigbar. Die maximale positive Dehnung findet sich über der inneren Kante des Center-Boss, die relevante maximale negative Dehnung (Stauchung) ergibt sich über der äußeren Kante des Chiprahmens. Mit zunehmender Balkendicke nimmt die jeweilige Materialdehnung an der Oberseite des Balkens zu. Der qualitative Verlauf der Dehnung bleibt hingegen gleich.

Im zweiten Schritt wurden für drei Center-Boss-Größen von 1, 1,2 und 1,4 Millimeter die Dehnungswerte bestimmt. Die Ergebnisse für eine Balkendicke von 35 Mikrometern sind in Abbildung 33 aufgetragen. Natürlich unterscheidet sich der Verlauf der Materialdehnung im Bereich des Center-Bosses. Die maximale Dehnung bleibt über der Innenkante des Center-Boss, wandert folglich bei steigender Größe desselben weiter weg vom Zentrum. Der dehnungsarme Bereich ist bei einem großen Center-Boss größer.

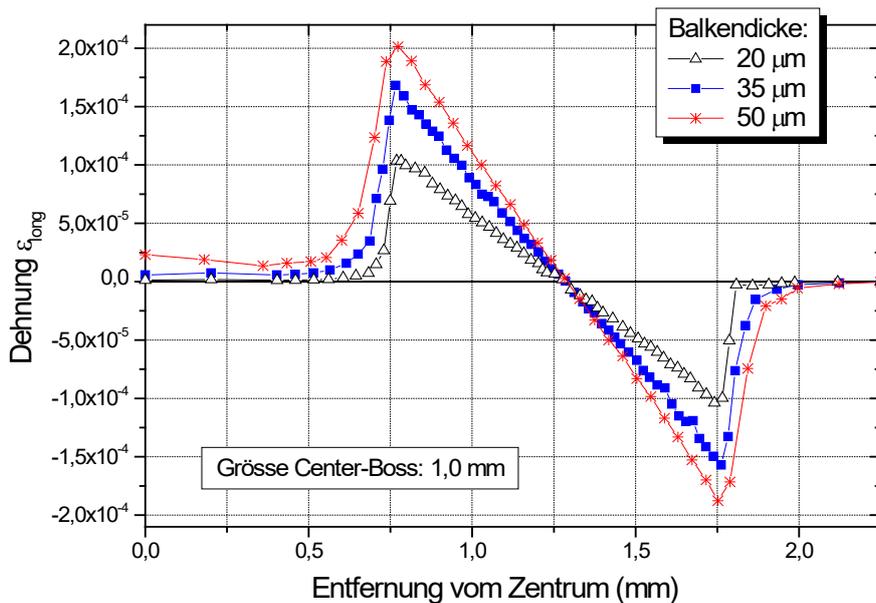


Abbildung 32: Simulationsergebnis - Verlauf der longitudinalen Dehnung auf der Oberfläche des Chips (Schnitt A-A, vgl. Abbildung 48). Die Rechnungen wurden in Abhängigkeit der Balkendicke durchgeführt. Die Center-Boss-Größe ist konstant 1 mm.

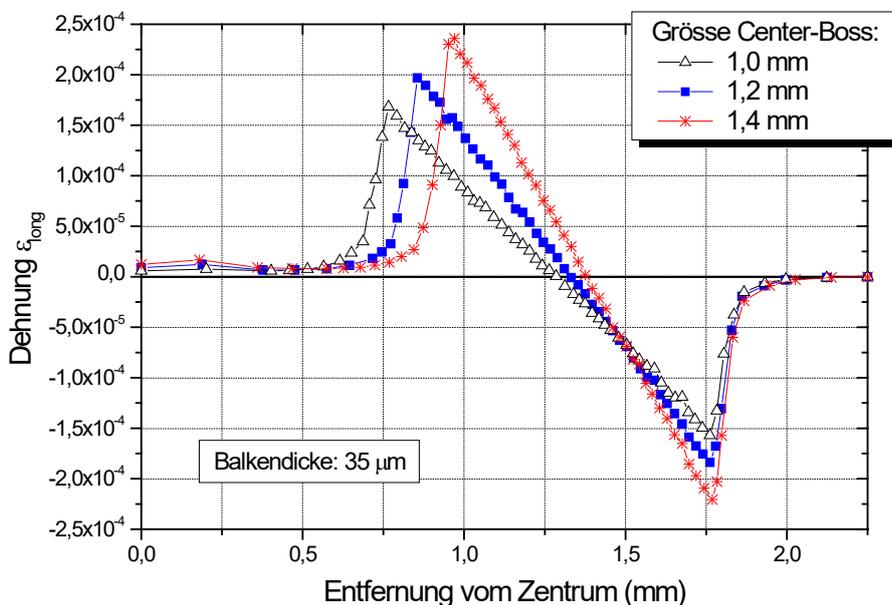


Abbildung 33: Simulationsergebnis - Verlauf der longitudinalen Dehnung auf der Oberfläche (Schnitt A-A, vgl. Abbildung 48) in Abhängigkeit der Größe des Center-Boss. Die Balkendicke beträgt 35 μm .

Weiterhin ist zu erkennen, dass die maximale Dehnung mit der Größe des Center-Bosses zunimmt.

Für die Auswertung ist vor allem die Dehnung im Bereich der Piezowiderstände von Bedeutung. Diese werden im Bereich der maximalen Stauchung über der äußeren Kante des Chiprahmens (also in einer Entfernung von ca. 1,75 mm vom Chip-Zentrum) platziert. Für die neun durchgeführten Simulationen sind die Ergebnisse in Abbildung 34 aufgetragen. Wie oben beschrieben, nimmt die Dehnung sowohl mit der Balkendicke als auch mit der Center-Boss-Größe zu. Legt man klassische Annahmen zugrunde, so ergibt die Balkentheorie I. Ordnung (statische Bestimmtheit) $\varepsilon \sim a_0 d/L^2$. Wobei ε die Dehnung, a_0 die konstante Auslenkung (hier 2 μm), d die Balkendicke und L die Balkenlänge sind. Da die Balkenlänge mit der Größe des Center-Boss abnimmt, sind die Abstände zwischen den 3 Kurven unmittelbar nachvollziehbar. Hingegen findet man keinen linearen Verlauf bzgl. der Balkendicke. Berücksichtigt man jedoch, dass es sich bei den Werten in Abbildung 34 um die Höhe der Maxima in Abbildung 32 handelt, die kein gutes Maß für die Fläche unter der Kurve darstellen, weil auch die Breite der Verteilung um das Maximum mit der Balkenlänge zunimmt, so kann man keinen linearen Verlauf der Maxima erwarten. Hier spiegelt sich die Tatsache, dass das Model keinen idealen homogenen Balken darstellt, der den klassischen Annahmen genügt. Die Punkte folgen qualitativ einer Wurzelfunktion. Da der Achsenabschnitt unter der Kurve (Abb. 33) sich nicht so stark wie das Maximum vergrößert, handelt es sich nicht um eine gewöhnlich Quadratwurzel, sondern um eine Wurzel deren Exponent zwischen 1 und 2 liegt ($\sim d^{1/n}$; $1 < n < 2$).

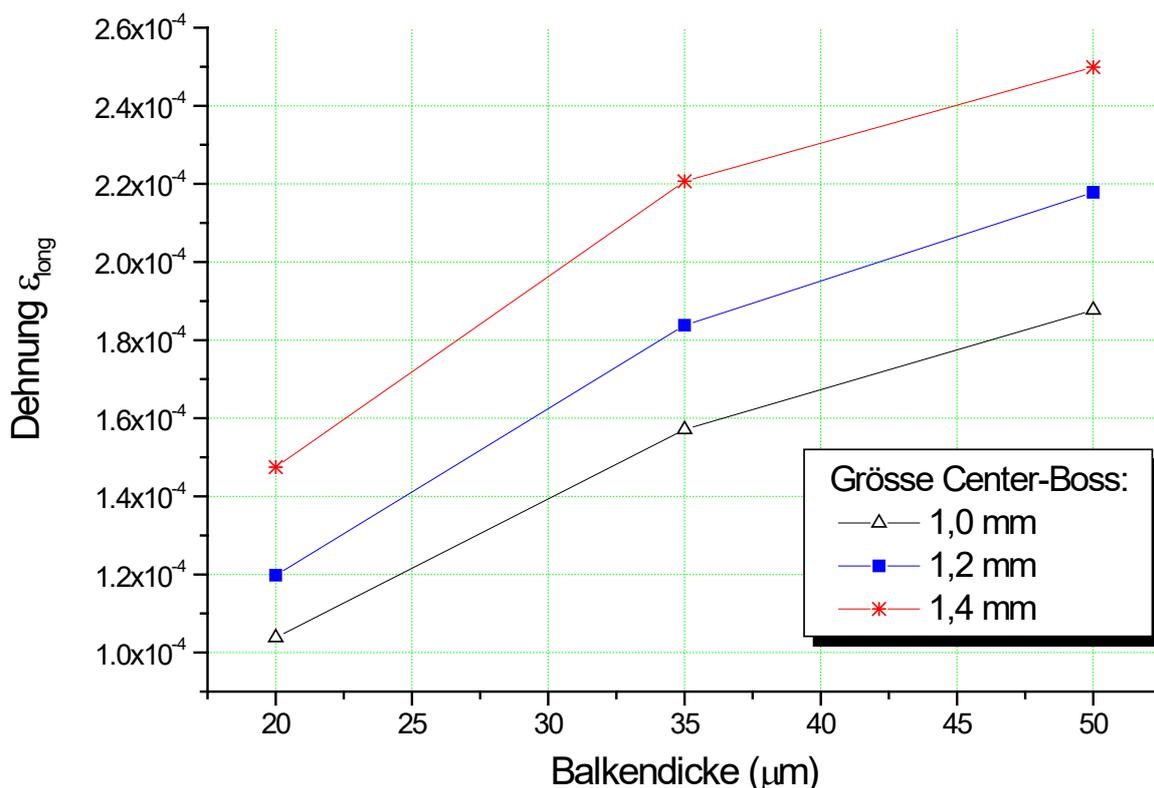


Abbildung 34: Simulationsergebnis - maximale longitudinale Dehnung an den piezoresistiven Widerständen als Funktion von Balkendicke (X-Achse) und Größe des Center-Boss. Die Verbindungslinien beschreiben keinen physikalischen Zusammenhang. Sie dienen nur dazu das Auge zu lenken.

3.2.1 Zusammenwirken von Stahlmembran und Chip

Wie zu Beginn des Kapitels bereits erwähnt, erfüllen die Stahlmembran und der Siliziumchip verschiedene Funktionen. Während der Siliziumchip die Aufgabe besitzt, eine geometrische Verschiebung zu messen, ohne diese selber durch seine eigene Elastizität wesentlich zu beeinflussen, muss die Stahlmembran ein äußeres Drucksignal in eine solche geometrische Verschiebung umwandeln. Gewährleistet wird diese Unabhängigkeit der Funktionen durch eine deutlich höhere Steifigkeit der Stahlmembran gegenüber dem Siliziumchip. Inwieweit diese Forderung erfüllt wird, sollen die nachfolgend beschriebenen Simulationen zeigen.

Um herauszufinden, ob der Biegebalkenchip die Membranauslenkung behindert, wurden Simulationen der Membranhülse ohne Chip, mit Chip und mit vorgespanntem Chip durchgeführt. Als Chip wurde die Variante mit 1 × 1 mm² Center-Boss und 25 μm Balkendicke verwendet. Die Membranhülse wurde mit 2 bar beaufschlagt.

3.2.2 Membranhülse ohne Chip

Abbildung 35 zeigt die Membranhülse ohne Chip als kubisch vernetztes Modell sowie das Ergebnis der Simulation bei einer Belastung mit einem Außendruck von 2 bar. Eine nennenswerte Auslenkung ist nur im Membranbereich zu beobachten. Sie erreicht ihr Maximum am Center-Boss der Stahlmembran und beträgt dort 11,98 μm .

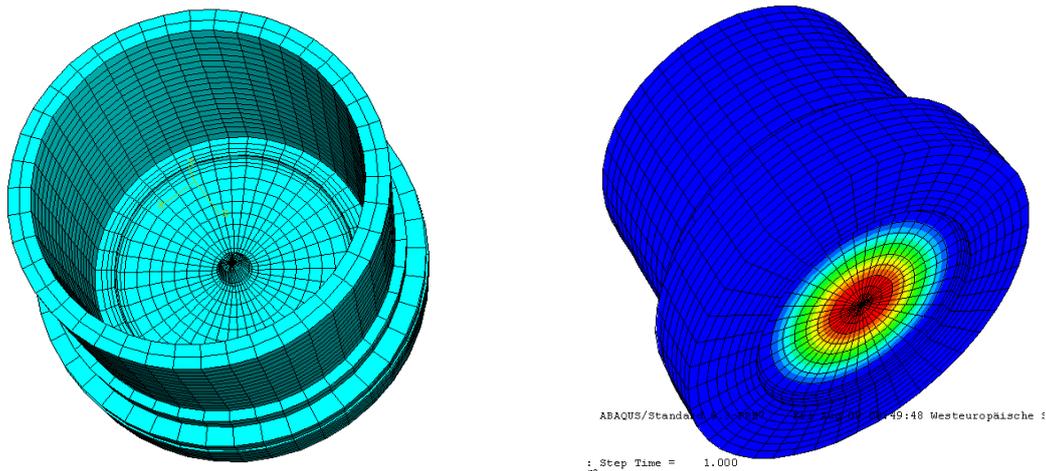
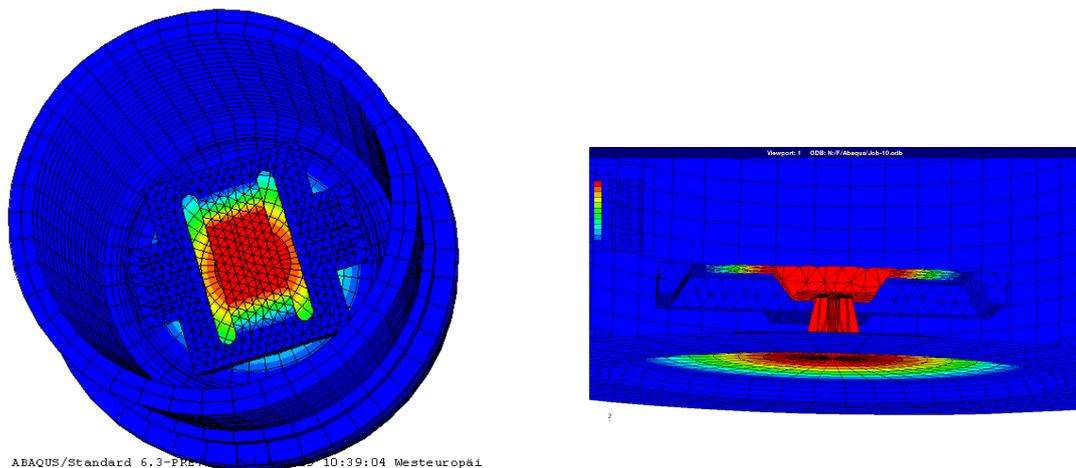


Abbildung 35: Ergebnis der Simulation bei einer Belastung mit einem Außendruck von 2 bar. Eine nennenswerte Auslenkung ist nur im Membranbereich zu beobachten. Membranhülsen-Modell: (links: Mesh, rechts: Auslenkung bei 2 bar): Die maximale Auslenkung beträgt 11,98 μm .

3.2.3 Membranhülse mit Chip

Im nächsten Schritt wurde die Membranhülse mit Chip ohne Berücksichtigung der Vorspannung simuliert, die beim realen Aufbau verwendet wird (Abbildung 37). Der Chip wird im Bereich der Bondpads (siehe Abbildung 30) fixiert. Die Auslenkung der Stahlmembran beträgt nun 11,14 μm . Die zusätzliche Steifigkeit des Chips vermindert die Gesamtauslenkung also um 7 %. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 dargestellt.



**Abbildung 36: FEM Simulationsergebnis - Auslenkung von Membranhülse mit K4-Chip bei 2 bar:
Die Auslenkung beträgt 11,14 μm .**

3.2.4 Membranhülse mit vorgespanntem Chip

Im Gesamtaufbau von Membranhülse mit Chip wurde nun am Chip eine Vorauslenkung von 20 μm eingestellt. Zunächst wurde auf die Stahlmembran kein Druck aufgebracht. Durch den Kraftübertrag lenkt sich die Stahlmembran nun nach außen aus. Das Ergebnis der Simulation ergibt eine Auslenkung von $-1,44 \mu\text{m}$. Es fällt folglich bei einer Vorspannung von 20 μm eine Differenzauslenkung von 18,56 μm über dem Chip ab. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt.

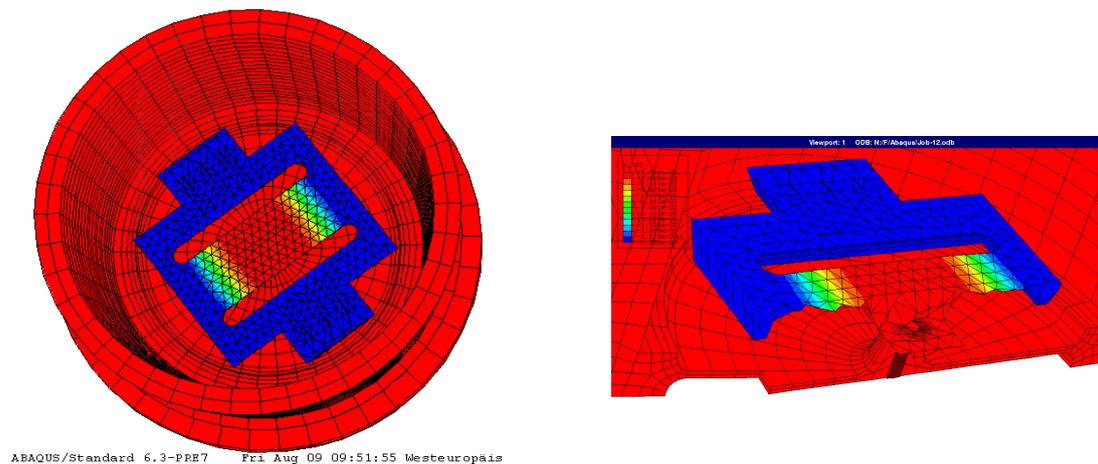


Abbildung 37: FEM-Simulationsergebnisse - Membranhülse mit dem Modell mit einer Membrandicke von 25 μm und einem Center-Boss von 1 mm Breite bei 20 μm Vorspannung: Die maximale Auslenkung beträgt -1,44 μm .

Abschließend wurde eine Druckbeaufschlagung von 2 bar im vorgespannten System integriert. Diese Simulation beschreibt den Anwendungsfall. Die resultierende Auslenkung beträgt 9,49 μm . Berücksichtigt man, dass die Auslenkung allein durch die Vorspannung -1,44 μm betrug, so ergibt sich, dass die Druckbeaufschlagung selbst eine Auslenkung von 10,93 μm erzeugt. Diese liegt um 0,21 μm unter der Auslenkung des Systems ohne Vorspannung. Die Differenz wird durch die Versteifung des Chips durch die Vorspannung bewirkt. Die Simulationsergebnisse werden grafisch in Abbildung 38 gezeigt.

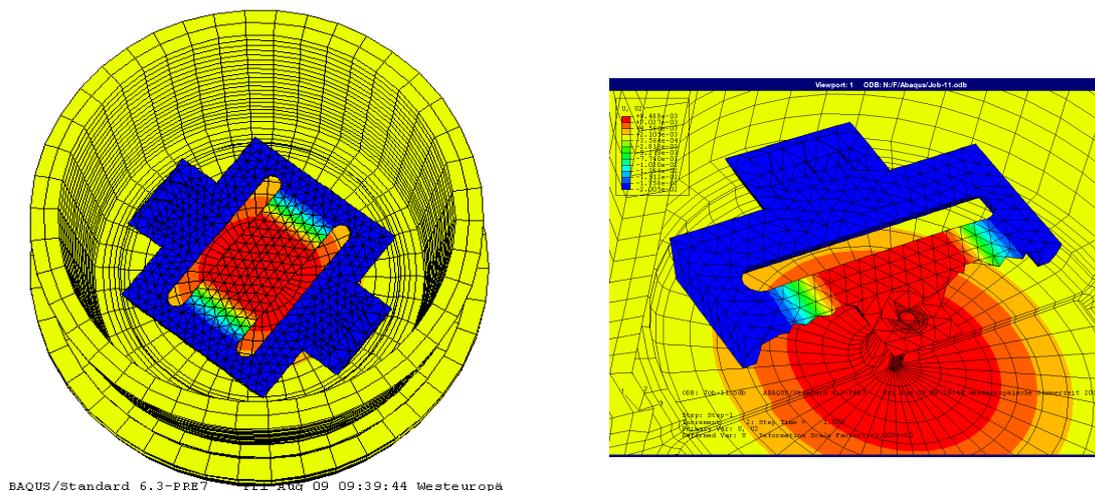


Abbildung 38: Membranhülse mit K4-Chip bei 20 µm Vorspannung und 2 bar: Die Auslenkung beträgt insgesamt 9,49 µm (also ist die Auslenkung 10,93 µm durch die Druckbeaufschlagung).

Tabelle 2 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse:

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse

Modell	Randbedingung	resultierende Auslenkung der Stahlmembran
Membranhülse ohne Chip	2 bar	11,98 µm
Membranhülse mit Chip	2 bar	11,14 µm
Membranhülse mit vorgespanntem Chip	0 bar, 20 µm Vorspannung	-1,44 µm
Membranhülse mit vorgespanntem Chip	2 bar, 20 µm Vorspannung	9,49 µm, d.h. 10,93 µm durch Druckbeaufschlagung

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Auslenkung der Stahlmembran durch den vorgespannten Siliziumchip um 9 % reduziert wird. Die Empfindlichkeit wird, wie bereits in Kapitel 3.1 diskutiert, maßgeblich durch die Stahlmembran bestimmt.

3.2.5 Thermomechanische Spannungen im Sensorchip

Ein wesentlicher Aspekt ist das Verhalten des Sensors bei hohen Temperaturen. Kritisch ist hier insbesondere das Entstehen thermisch induzierter Spannungen durch die verschiedenen Materialien und deren individuellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Aufbaubedingt sind für das Entstehen thermischer Spannungen hauptsächlich die mechanische Verbindung von Chip und Durchführung im äußeren Chipbereich (Bondpads) und daneben die mechanische Ankopplung der Stahlmembran im Chip-Zentrum von Bedeutung.

Simuliert wurde das System aus Chip und Durchführung (aus dem Material Aluminiumoxid) in einem Aufheizvorgang von 25°C (System ist spannungsfrei) auf 300°C. Variiert wurde die Stelle der Flip-Chip-Bonds, welche einmal die inneren und einmal die äußeren Bondpads fixierten. Zum Vergleich ist außerdem die druckinduzierte Dehnung bei einer Belastung von 1 bar dargestellt (siehe vorheriges Kapitel).

Abbildung 39 zeigt die Dehnung auf der Balkenoberfläche in Abhängigkeit der Entfernung vom Chipzentrum.

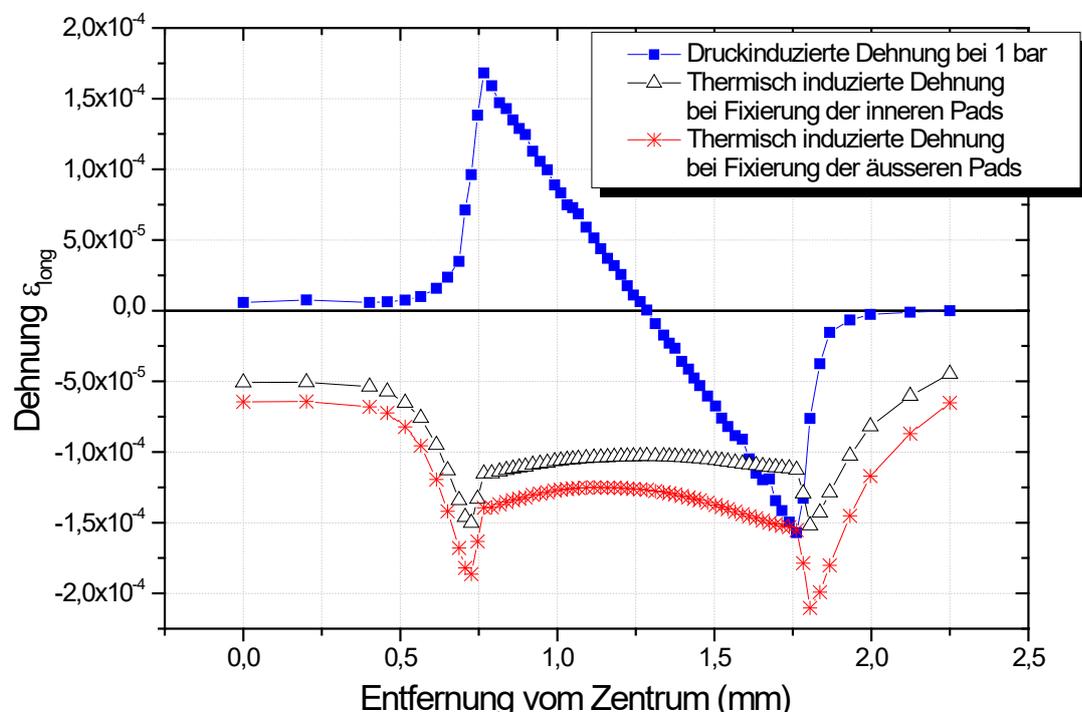


Abbildung 39: Thermisch induzierte Dehnung bei Fixierung des Chips im äußeren und inneren Padbereich.

3.2.6 Ausgangssignal

Zusammen mit den Materialdaten für Silizium [47] sowie der beschriebenen Signalentstehung lässt sich aus den gewonnenen Simulationsdaten für die Materialverzerrung ε am Ort der Piezowiderstände das jeweilige Ausgangssignal wie folgt ableiten:

$$U_{out} = U_b \cdot K \cdot \varepsilon = I_b \cdot R_b \cdot K \cdot \varepsilon = 264 \cdot \varepsilon \quad (\text{Gleichung: 2})$$

wenn die Brückenspeisung I_b mit 1 mA, der Brückenwiderstand R_b mit 3,3 k Ω und der K-Faktor mit 80 angesetzt werden. Für die Piezodehnung ε wird die mittels FEM berechnete longitudinale Dehnung (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33), welche über dem Piezowiderstand abfällt (welcher sich im Bereich um die 1,75 mm Entfernung vom Zentrum befindet), über die Länge bzw. Breite des Piezowiderstandes integriert. Die Empfindlichkeit der Chips, die für einen Wegmesser als Änderung der Ausgangsspannung je Wegeinheit definiert ist, wird hier sinnvollerweise in mV/ μ m angegeben. Aus den Simulationsergebnissen ergeben sich somit die nachfolgend dargestellten Empfindlichkeiten.

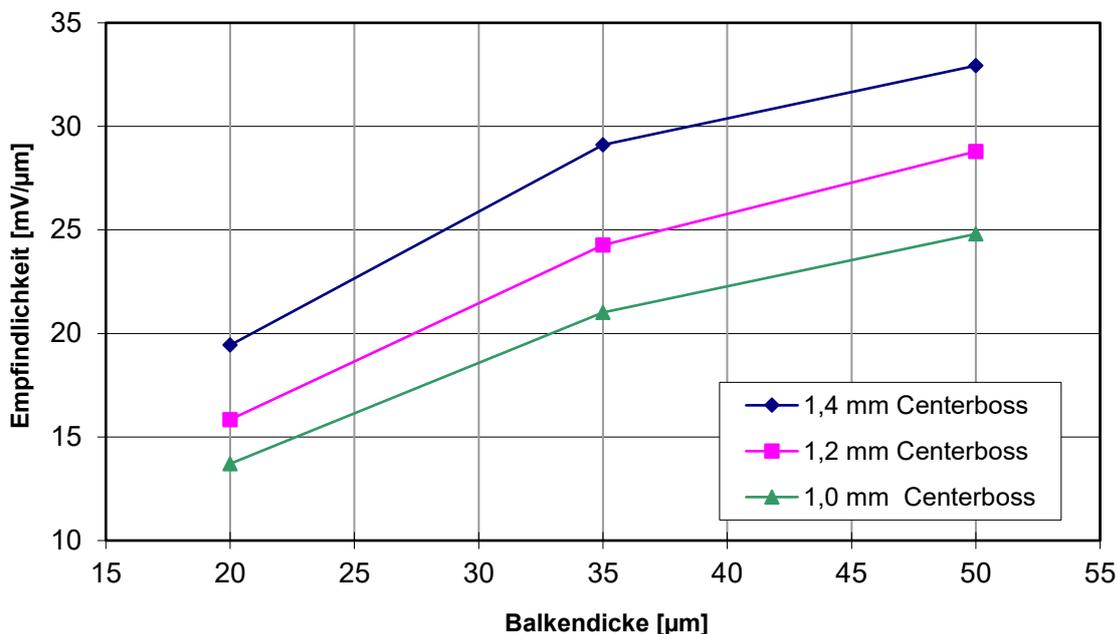


Abbildung 40: Simulierte Empfindlichkeiten der unterschiedlichen Chips (bei Konstantstromspeisung mit 1 mA)

Wie die Simulation des Systems bestehend aus Membranhülse und vorgespanntem Chip ergab, ist die beim Nenndruck von 2 bar entstehende Auslenkung jedoch $10,9 \mu\text{m}$. Die für das Ausgangssignal bei 2 bar relevante Materialverzerrung ist daher proportional zu erhöhen. Sie lässt sich nun in der folgenden Formel einsetzen:

$$U_{out(2bar)} = U_{out(10,9\mu\text{m Auslenkung})} = U_{out(2\mu\text{m Auslenkung})} \cdot \frac{10,9}{2} = 264 \cdot \epsilon_{(2\mu\text{m Auslenkung})} \cdot \frac{10,9}{2} \quad \text{(Gleichung: 3)}$$

Vernachlässigt wird hierbei, dass verschiedene Chiplayouts auch verschieden auf die Auslenkung der Stahlmembran rückwirken können. Da diese jedoch nicht wesentlich vom Chip beeinflusst wird, lassen sich diese unterschiedlichen Rückwirkungen näherungsweise vernachlässigen. Außerdem nimmt der Einfluss der Chip-Steifigkeit auf die Steifigkeit des Gesamtsystems mit zunehmendem Druckbereich des Sensors (also zunehmender Steifigkeit bzw. Dicke der Stahlmembran) noch weiter ab. D.h. der Anteil der Chip-Steifigkeit, welcher beim niedrigsten Druckbereich (2 bar) bereits bei unter 10 % liegt, verliert bei höheren Druckbereichen schnell noch weiter an Einfluss.

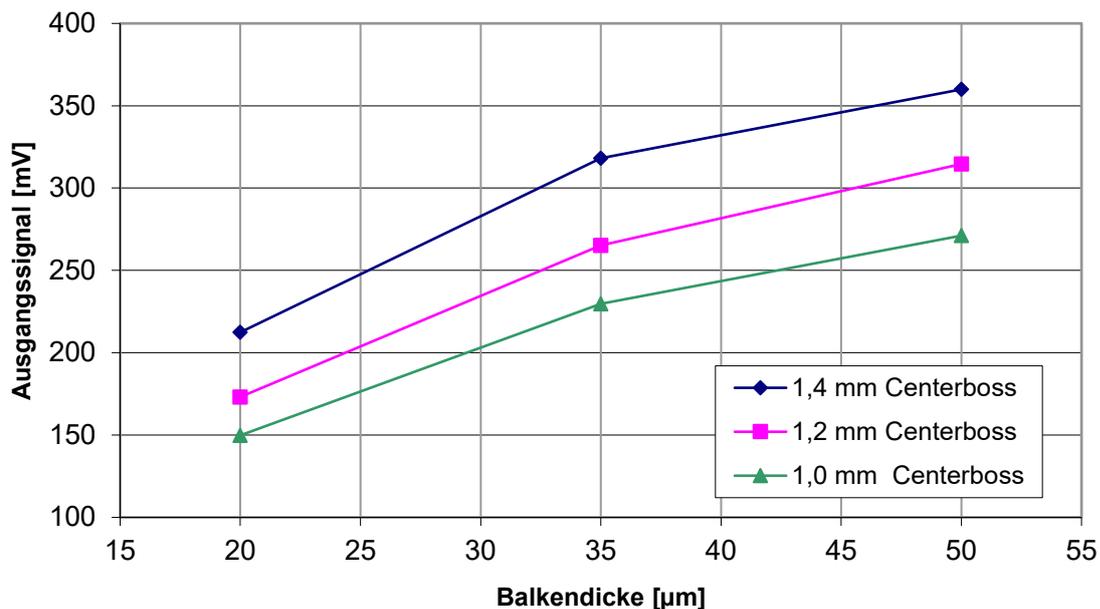


Abbildung 41: Ausgangssignal der Sensoren bei einer druckinduzierten Auslenkung von ca. $11 \mu\text{m}$ bei unterschiedlichen Chips (bei Konstantstromspeisung mit 1 mA). Dieses Signal ist annähernd unabhängig vom Druckbereich des Sensors, da die Stahlmembran entsprechend ausgelegt wird.

Damit ergeben sich für die Chiplayouts die nachfolgend in Abbildung 41 dargestellten Spannsignale. Diese Ausgangssignale sind in erster Näherung unabhängig vom

Druckbereich des Sensors, da die Stahlmembran jeweils so ausgelegt wird, dass unabhängig vom Druckbereich immer eine Maximalauslenkung von 10...12 μm generiert wird. D.h. die Stahlmembran des 100 bar-Sensors generiert bei 100 bar ebenso eine Auslenkung von 10...12 μm wie die Stahlmembran des 2 bar-Sensors bei einer Druckbelastung von 2 bar.

3.2.7 Bruchweg

Der Bruchweg des Sensorchips bezeichnet die Auslenkung des Center-Boss, bei der es zur mechanischen Zerstörung des Chips kommt. Er bestimmt damit wesentlich die Belastbarkeit des gesamten Sensors. Zur Betrachtung des Bruchwegs soll zunächst das Bruchverhalten von Silizium beschrieben werden. Anschließend werden die Konsequenzen für den Biegebalkenchip dargestellt.

Silizium ist ein spröder Werkstoff. Unter Anlegen einer mechanischen Spannung verhält sich Silizium gemäß des Hook'schen Gesetzes elastisch bis zum Erreichen der sogenannten Streckgrenze. Oberhalb dieser Grenze kommt es zum Materialbruch. Ein plastisches Verhalten, also das Auftreten einer irreversiblen Verformung, kommt innerhalb des Arbeitstemperatur-Bereichs des Sensors nicht vor. Für das Auftreten von Sprödbrech ist die Streckgrenze abhängig von der Richtung der Spannung. Bei Zugspannungen ist die Streckgrenze deutlich niedriger als bei Druckspannungen.

Der Mechanismus des Sprödbrechens ist atomarer Natur. Im Kristallgitter müssen lokal Kräfte auftreten, welche die atomaren Bindungskräfte übersteigen. Dadurch kommt es zur Trennung der Atombindungen. Eine makroskopisch wirkende mechanische Belastung kann mikroskopisch auf atomarer Ebene zu sehr unterschiedlichen Spannungsverteilungen führen. Verantwortlich hierfür sind die Kristallorientierung, die Beschaffenheit der Oberfläche sowie Defekte im Material selbst, wie z.B. Mikrorisse, Poren, Versetzungen oder andere Kristallfehler. Diese können durch lokale Spannungskonzentration als Risskeime wirken. Ist es durch solche Effekte zu einem mikroskopischen Riss gekommen, pflanzt sich dieser in der Regel über große Distanzen fort und wird damit auch makroskopisch wirksam.

Sowohl das Auftreten als auch die Anfälligkeit von Risskeimen unterliegt großen Streuungen, so dass in der Praxis auch das Bruchverhalten siliziumbasierter mikromechanischer Bauelemente eine gewisse Streuung aufweist. Bei piezoresistiven Silizium-Drucksensoren wurden Bruchdehnungen von $3 \cdot 10^{-3}$ bis $6 \cdot 10^{-3}$ beobachtet, die Bruch-

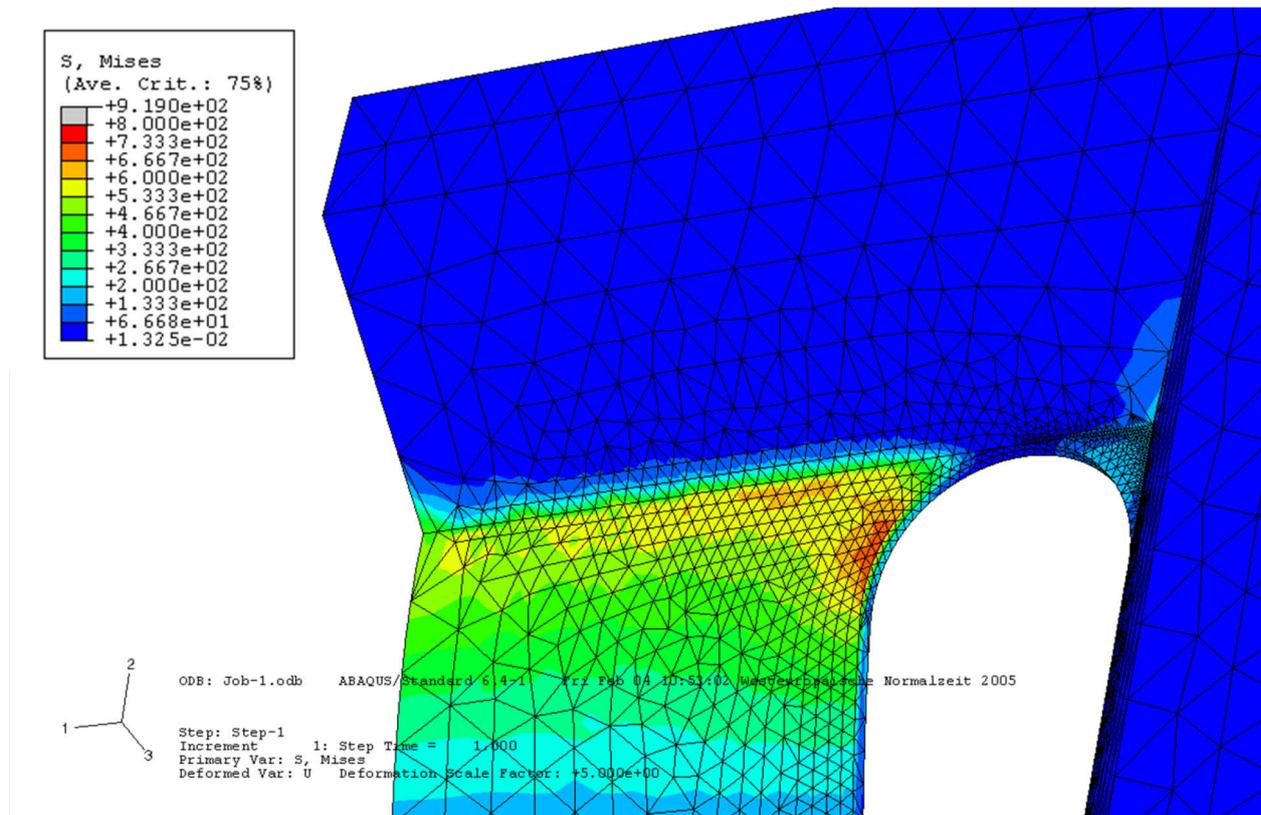


Abbildung 42: Stressmaximierung an der Innenkante eines Langloches. Dargestellt ist die von-Mises-Spannung als Maß für die Gesamtspannung. Die Stelle maximaler Zugspannung erscheint rot.

spannungen von 450 - 900 MPa entsprechen. Da diese Drucksensoren bzgl. Ausgangsmaterial und Prozessfolge dem Balkenchip am nächsten kommen, werden diese Werte auch für die Betrachtung der zu erwartenden Bruchspannung herangezogen.

Zunächst war zu klären, an welcher Stelle der Chip in der Anwendung eine maximale Dehnung erfährt, da hier die Wahrscheinlichkeit der Rissentstehung am höchsten ist. Die FEM-Simulation ergibt, dass an der Innenkante der Langlöcher der Stress, der durch die Auslenkung erzeugt wird, sein Maximum erreicht. Abbildung 42 zeigt grafisch diese Stressverteilung.

An dieser Stelle, der Innenseite der Langlöcher, ist die Bruchentstehung am wahrscheinlichsten.

Weiterhin ergibt die Simulation, dass die Maximalspannung etwa 50 % höher ist als die mechanische Spannung an den Piezowiderständen.

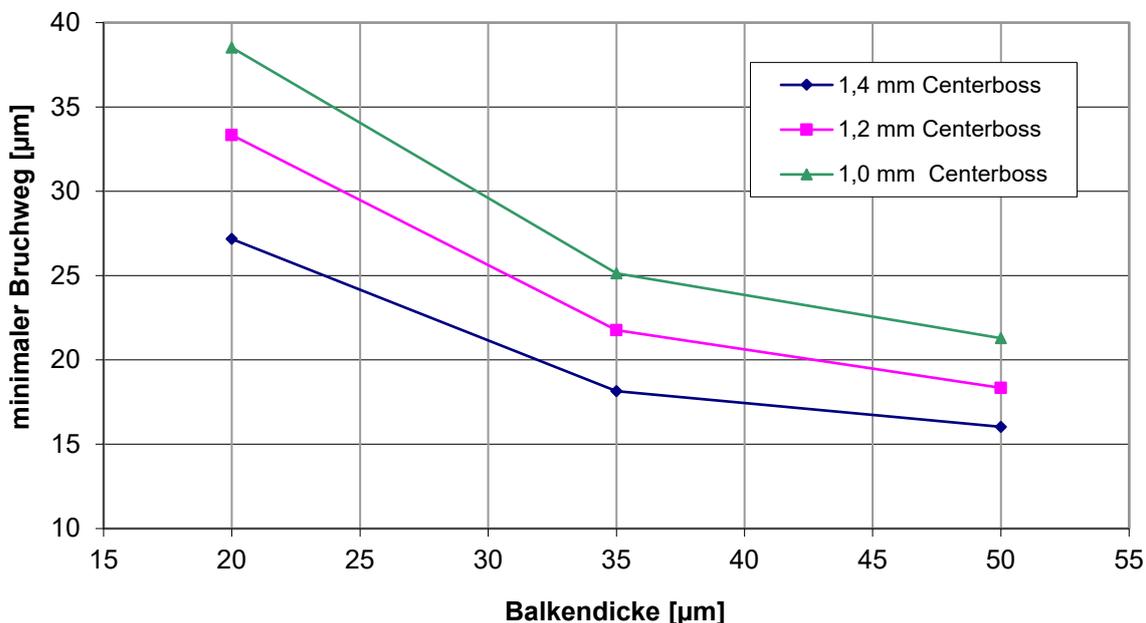


Abbildung 43: Bruchweg der verschiedenen Chips. Zugrunde gelegt wurde eine Bruchdehnung von $3 \cdot 10^{-3}$. Die Verbindungslinien beschreiben keinen physikalischen Zusammenhang. Sie dienen nur dazu das Auge zu lenken.

Mit der pessimistischen Annahme einer minimalen Bruchdehnung von $3 \cdot 10^{-3}$ lassen sich nun basierend auf den Simulationsergebnissen für die verschiedenen Chiptypen die minimalen Bruchwege berechnen, also die Auslenkung, bei der es im ungünstigsten Fall zum Bruch des Sensorchips kommt. Diese sind in Abbildung 43 grafisch dargestellt. So errechnet sich beispielsweise für einen Chip mit 35 µm Balkendicke und einem Center-Boss mit 1 mm Kantenlänge ein minimaler Bruchweg von 25 µm. Auch hier ist das Verhalten nicht linear. Da der Bruchweg a_{max} mit der minimalen Bruchdehnung ϵ_{min} verknüpft ist ($a_{max} \sim \epsilon_{min} L^2/d$), entsprechen die Daten in Abb. 44 dem Simulationsergebnis in Abb. 35 ($\sim d^{-1/n}$; $1 < n < 2$).

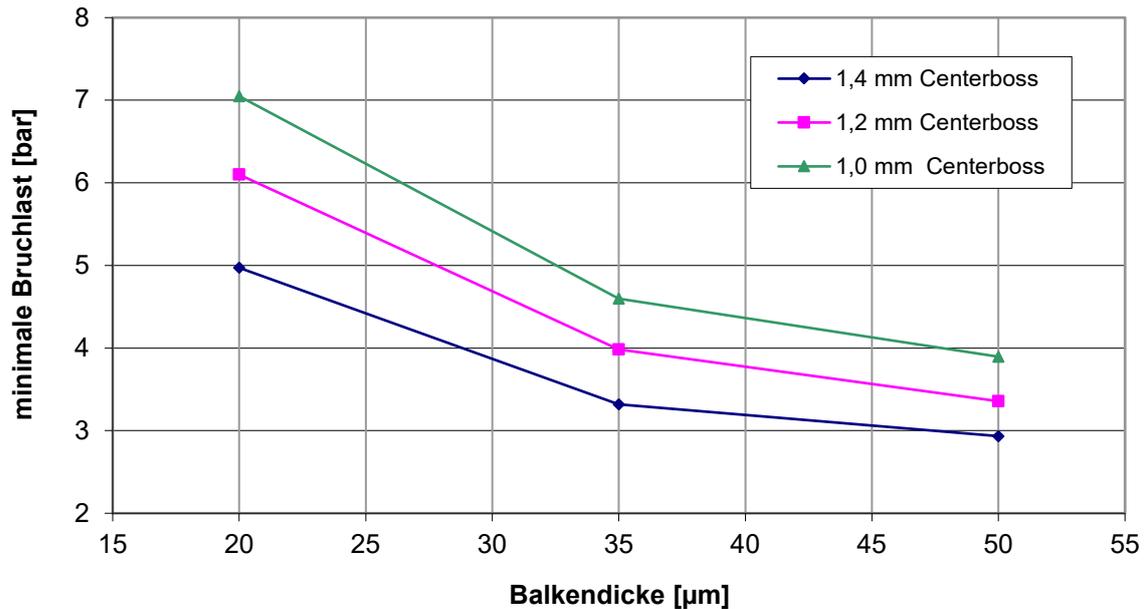


Abbildung 44: Überlastverlauf in Abhängigkeit von der Balkendicke des 2 bar-Sensors

Abbildung 44 zeigt die aus dem minimalen Bruchweg berechnete minimale Bruchlast in bar. Zugrunde gelegt wurde hierbei, dass sich der Center-Boss des Chips um knapp $11 \mu\text{m}$ auslenkt, wenn der Sensor mit 2 bar belastet wird. Für den Chip mit $35 \mu\text{m}$ Balkendicke, einer Center-Boss-Kantenlänge von 1 mm und einem minimalen Bruchweg von $25 \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 43) ergibt sich so eine minimale Bruchlast von ca. 4,5 bar. Eine Wegvorspannung des Chips reduziert diesen Wert weiter.

Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass für sämtliche betrachteten Parameter der Bruchweg deutlich unter $100 \mu\text{m}$ liegt. Immerhin liegt er oberhalb einer Membranauslenkung von ca. $11 \mu\text{m}$, wie sie bei einer Nennbelastung mit 2 bar auftritt. Außerdem ist noch der Vorspannweg zu berücksichtigen. Es ist also zu erwarten, dass der Sensor im Arbeitsbereich unbeschadet funktioniert, jedoch nur eine geringe Überlast aufweist.

Da erfahrungsgemäß das Bruchverhalten großen Streuungen unterliegt und stark von Effekten bestimmt wird, welche nicht in der FEM berücksichtigt werden können, sind die Möglichkeiten der Simulation hier begrenzt. Diesbezüglich ist es daher sinnvoller, die endgültige Optimierung anhand von Messergebnissen realer Chips durchzuführen.

3.3 Frequenzanalyse

Durch den Aufbau des gesamten Sensors mit vorgespanntem Chip ist die Eigenfrequenz des Sensorchips bei Druckmessungen von untergeordneter Bedeutung. Für die Möglichkeit, den Chip auch für andere Kenngrößen einzusetzen, insbesondere als Beschleunigungssensor, ist diese Eigenschaft jedoch von großer Bedeutung, da das Sensorelement im Einsatz nur Anregungen erfahren sollte, die deutlich unter der Eigenfrequenz liegen. Andernfalls wird das Messsignal verfälscht und es kann sogar zur Zerstörung des Elements kommen.

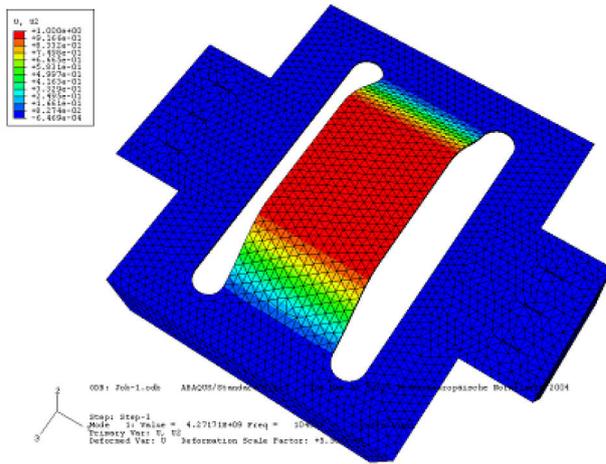
Die Simulation bietet die Möglichkeit einer Modalanalyse, was bedeutet, dass die verschiedenen Modi der Eigenfrequenzen bestimmt werden. Als Abschätzung wurde ein Modell mit einer Membrandicke von 25 μm und einem Center-Boss von 1 mm Breite gewählt. Der Chip mit dieser Dimension wird K4-Chip genannt.

Für die erste Eigenmode wurde eine Frequenz von 10,4 kHz berechnet, die zweite Eigenmode liegt bei 15,6 kHz. Die Darstellung der jeweiligen Mode in Form der zugehörigen Auslenkung wird nachfolgend in Abbildung 45 dargestellt.

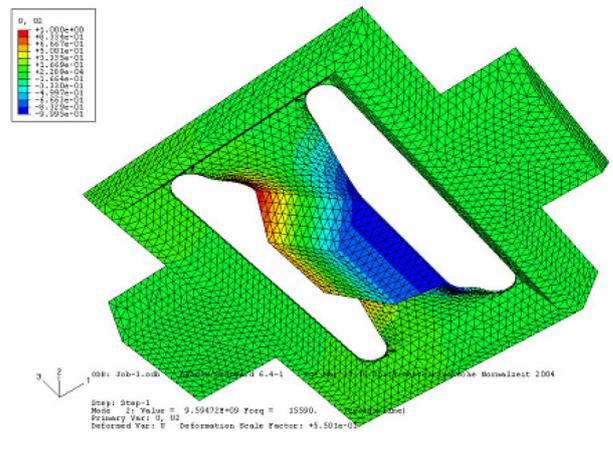
Für die Anwendung als Drucksensor ist diese ermittelte Eigenfrequenz ausreichend (vgl. Tabelle 6).

Um die Beschleunigungsempfindlichkeit zu simulieren, wurde der Sensorchip mit 2000 g beaufschlagt. Wie bei der modalen Frequenzanalyse des Chips zur Ermittlung der Resonanzfrequenz dient dieser Kennwert nicht primär der Ermittlung des Drucksensorverhaltens (da hierfür die Kopplung mit der Stahlmembran einen wesentlichen Einfluss hat), sondern der Ermittlung der Spezifikation, wenn das Modul als Beschleunigungssensor (d.h. ohne zusätzliche Stahlmembran) zum Einsatz kommt.

Es errechnet sich eine Beschleunigungsempfindlichkeit von 0,045 mV/g, wenn die Beschleunigung in Richtung der y-Achse (also senkrecht zur Chip-Oberfläche) appliziert wird. Die Querempfindlichkeit auf Beschleunigungen in x- bzw. z-Richtung sind sehr gering (vgl. Abbildung 47). Das FE-Modell wurde so aufgebaut, dass die Y-Achse senkrecht zur Chipoberfläche steht.

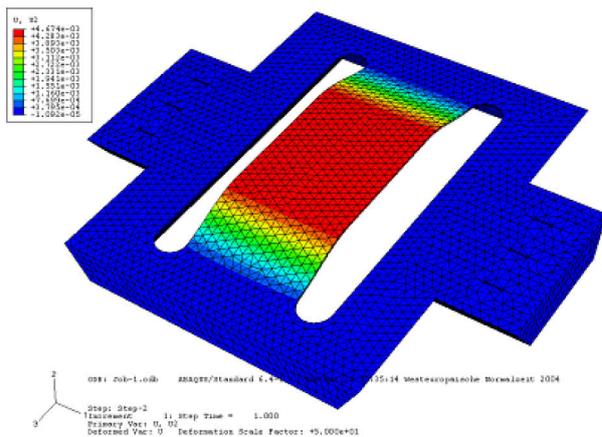


1. Mode: $f_1 = 10,4$ kHz

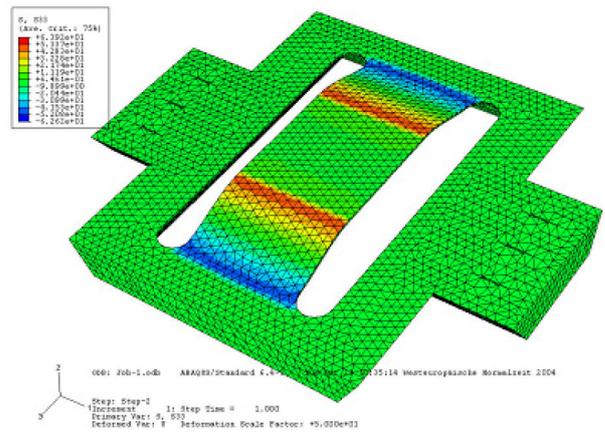


2. Mode: $f_2 = 15,6$ kHz

Abbildung 45: Eigenfrequenz-Modi des K4-Chips mit Darstellung der entsprechenden Membranauslenkungen

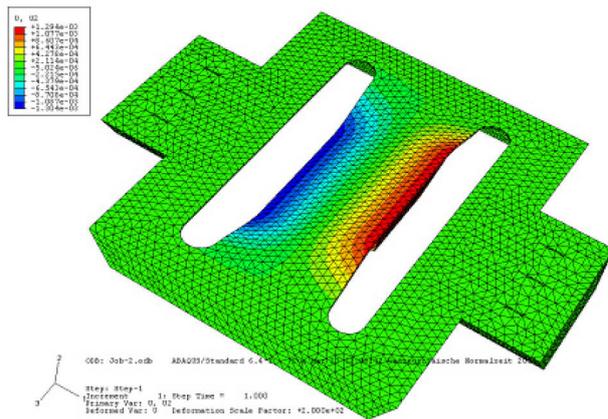


$U_y = 4,7$ µm

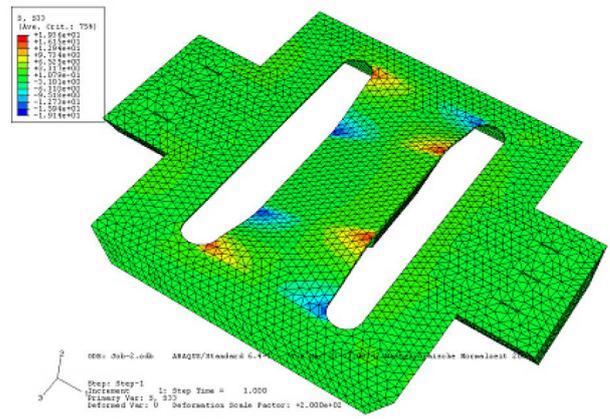


$S_z = 63$ MPa / entspr. ca. 90 mV@ 1 mA

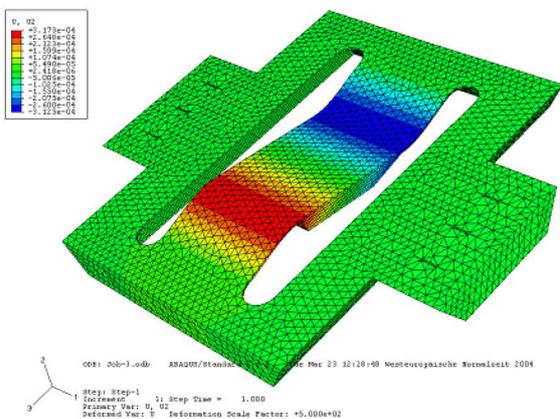
Abbildung 46: Auslenkung U_y und Spannung S_z bei einer Beschleunigung von 2000 g in y-Richtung



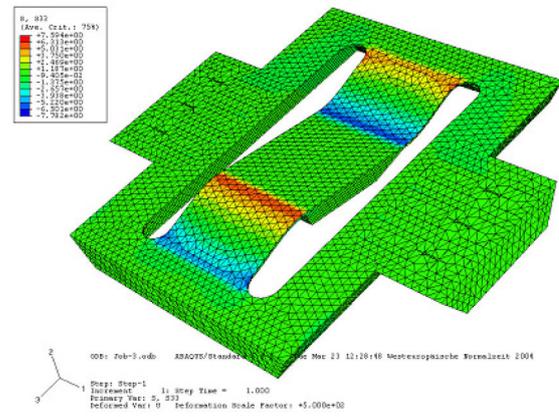
$U_y = 1,3 \mu\text{m}$



$S_z = 0 \text{ MPa}$



$U_y = 0,3 \mu\text{m}$



$S_z \text{ ca} \pm 4 \text{ MPa}$ Signal hebt sich auf

Abbildung 47: Auslenkung U_y und Spannung S_z bei einer Beschleunigung von 2000 g in x-Richtung (oben), Auslenkung U_y und Spannung S_z bei einer Beschleunigung von 2000 g in z-Richtung (unten).

Tabelle 3: Simulationsergebnisse

@ 1 mA	Modell	Sensor (2 bar)
Empfindlichkeit	16 mV/ μm	85 mV/bar
Bruchgrenze	35 μm ($\epsilon=3,0 \cdot 10^{-3}$)	6,5 bar
Eigenfrequenz	10,4 kHz	--

Beschleunigungsempfindlichkeit	0,045 mV/g	--
--------------------------------	------------	----

3.4 Auswahl der optimierten Sensoren

Für die Auswahl der zu untersuchenden Sensoren galt es, die verschiedenen Zielparame-ter möglichst gut durch die vorgegebenen Chipgeometrien zu erreichen. Die verbes-serte Empfindlichkeit wird hierbei von allen simulierten Varianten gewährleistet. Allein der Bruchweg erscheint beachtenswert; die simulierten Werte lagen alle unter 100 μm , allerdings auch als Ergebnis einer pessimistischen Abschätzung der Bruchdehnung.

Für die Realisierung wurde daher eine Geometriekombination gewählt, welche einen primären Fokus auf einen großen Bruchweg bzw. eine hohe Überlast legt. Es wurde eine Membrandicke von 25 μm und eine Center-Boss Breite von 1,0 mm festgelegt (K4-Chip), die einen guten Kompromiss zwischen hoher Empfindlichkeit und möglichst großem Bruchweg gewährleistet.

Weitere Geometrieadjustierungen können nur im Rahmen von realen Messergebnissen durchgeführt werden.

Linearität, Hysterese und Reproduzierbarkeit sind schwierig einzustellen, da bei einem solch komplizierten Design das Zusammenspiel von Silizium-Chip, Piezodesign- und Anordnung, Chip-Stahlmembrankopplung, Stahlmembranverhalten, Flip-Chip-Kontaktie-rung und Reibungseffekte Einfluss nehmen.

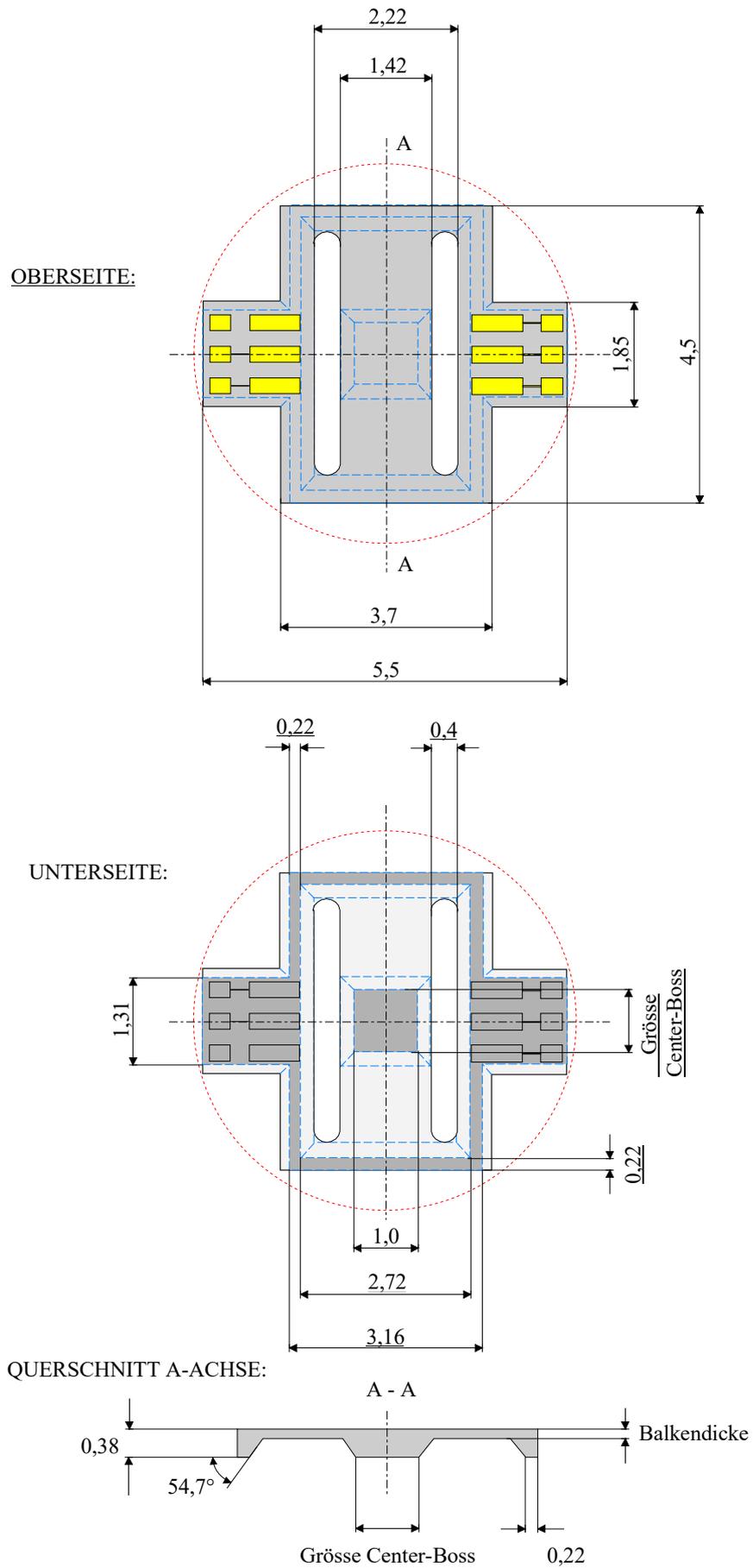


Abbildung 48: Konstruktionsdarstellung/Geometrie des Drucksensor-Chips

4 Herstellung der piezoresistiven Drucksensoren

Die zur Herstellung der Sensoren verwendete Halbleitertechnologie basiert zum einen auf standardisierten Prozessschritten, die bereits seit vielen Jahren etabliert sind, zum anderen wurden Prozesse verwendet, die speziell für das Sensorelement angepasst und optimiert werden mussten. Hierzu zählen insbesondere die für das Bulk-Micromachining genutzte KOH-Ätztechnik, die Prozessanpassung an das SOI-Material sowie die Prozessschritte zur Herstellung der hochtemperaturtauglichen Metallisierung.

In diesem Kapitel werden die technologische Realisierung der hochtemperaturtauglichen piezoresistiven Drucksensoren und ihre Optimierung beschrieben. Wie bereits in Kapitel 3 (Stand der Technik) erläutert, kommt für Hochtemperaturanwendungen siliziumbasierter Sensoren nur SOI (Silicon-On-Insulator)-Material in Frage. Die Piezowiderstände sind durch eine isolierende Siliziumoxidschicht und nicht durch einen pn-Übergang wie bei den herkömmlichen piezoresistiven Sensoren von Bulk-Material getrennt. Diese Isolation erlaubt eine viel höhere Arbeitstemperatur der Sensoren. Die SOI-Wafer bestehen aus einem einkristallinen Siliziumsubstrat mit einer isolierenden Siliziumoxidschicht und einem dünnen, ebenfalls einkristallinen Silizium-Overlayer. Bei der Auswahl des richtigen SOI-Ausgangsmaterials für die Fertigung des hier beschriebenen Sensors spielen vor allem die Parameter Oxiddicke und Overlayer-Dicke eine wichtige Rolle. Die Dicke der isolierenden Oxidschicht sollte groß genug sein, um eine sichere elektrische Isolierung auch bei Temperaturen bis 350 °C zu gewährleisten. Andererseits würde eine zu große Schichtdicke thermische Verspannungen generieren, die zu einer Signalverfälschung führen würden. Zudem würde ein dickeres Oxid nachfolgende Prozessschritte unnötig erschweren.

Die Dicke des Si-Overlayers sollte prozessbedingt möglichst gering sein, um eine sichere elektrische Kontaktierung durch die Metall-Leiterbahnen nicht durch eine zu große Stufe an der Kontaktlochöffnung zu gefährden. Die Herstellung von homogenem SOI-Material wird andererseits mit abnehmender Dicke des Overlayers zunehmend schwieriger.

Herstellung der piezoresistiven Drucksensoren

In einer Reihe von früheren Arbeiten mit SOI-Material hat sich eine Kombination aus 600 nm Si-Overlayer auf einer 400 nm dicken vergrabenen Oxidschicht als optimal erwiesen [1], [48] und wurde daher auch für diese Arbeit ausgewählt.

Bedingt durch die beschriebenen technologischen Voraussetzungen wurden im Rahmen dieser Arbeit beidseitig polierte UNIBOND Wafer mit 100 mm Durchmesser und einer Dicke von 381 μm verwendet (Firma SOITEC).

Die genauen Spezifikationen der SOI Wafer sind Tabelle 4 zu entnehmen.

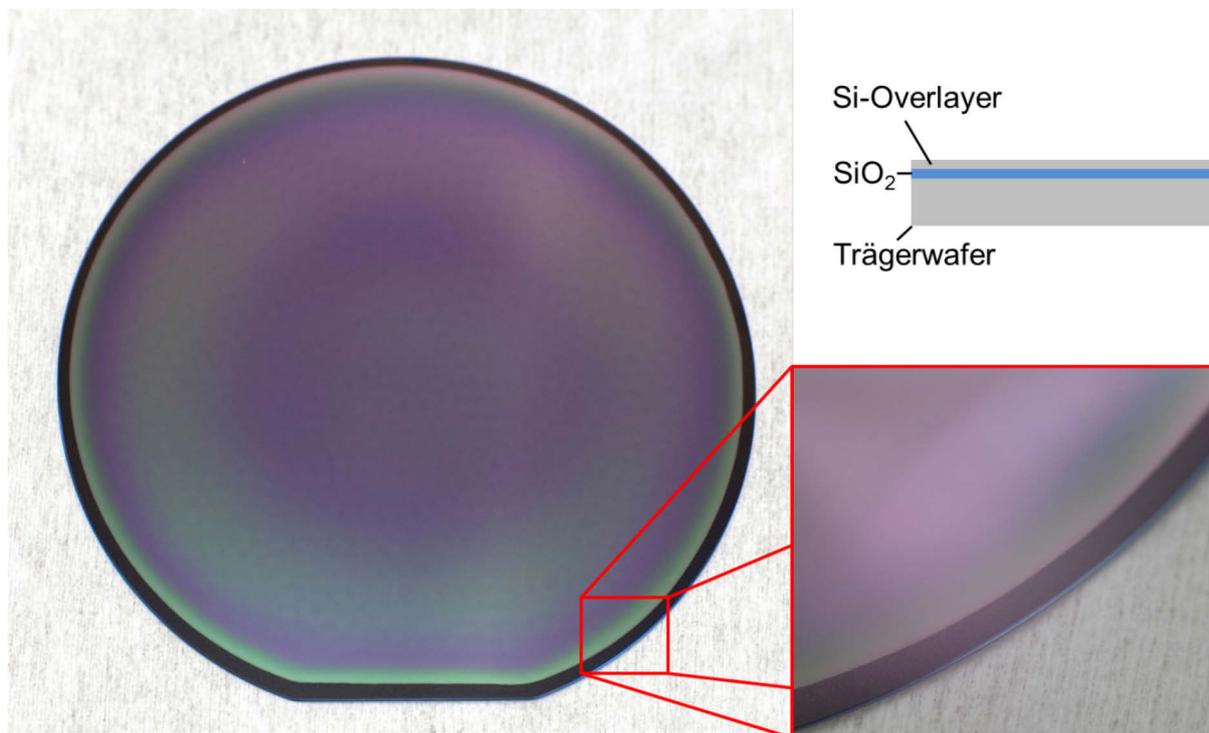


Abbildung 49: SOI Wafer der Firma SOITEC

Tabelle 4: Übersicht der SOI-Waferspezifikationen (Angaben der Firma SOITEC)

Parameter	Spezifikationen
Bulk – Material	
Dicke	381 μm
Durchmesser	100 \pm 0,5 mm
Orientierung	<100>
Herstellungsmethode	Czochralski Verfahren
Dotierung Typ/ Spezies	p-Typ/ Bor
Spezifischer Widerstand	14-22 Ωcm
Total Thickness Variation (TTV)	\pm 2 μm
Oberflächenbeschaffenheit	beidseitig poliert
Si - Overlayer	
Dicke	600 \pm 6 nm
Orientierung	<100>
Dotierung Typ/ Spezies	p-Typ/ Bor
Herstellungsmethode	Czochralski Verfahren
Spezifischer Widerstand	14-22 Ωcm
Oberflächenbeschaffenheit	poliert
Buried Oxide	
Oxidationstyp	thermisch
Oxiddicke	400 \pm 10 nm

4.1 Herstellung der Piezowiderstände

Die Herstellung der Piezowiderstände ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

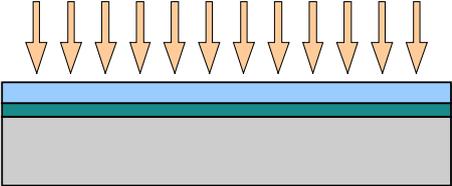
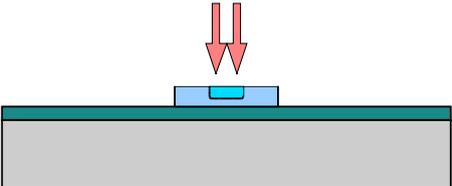
	<p>A-1 Ausgangsmaterial SOI,</p>
<p>Ganzflächige p⁺-Implantation</p> 	<p>A-2 Ganzflächige p⁺-Implantation</p>
<p>Waferstrukturierung (RIE)</p> 	<p>A-3 Widerstandsstrukturierung (RIE)</p>
<p>Kontaktstelle p⁺⁺-Implantation</p> 	<p>A-4 Kontaktstelle p⁺⁺-Implantation</p>

Abbildung 50: Prozess-Schritte A-1 bis A-4: Herstellung der Piezowiderstände

In einem ersten Prozessschritt wird der Overlayer ganzflächig implantiert (A-2). Die Implantationsdosis beträgt $4 \cdot 10^{13} \text{ At/cm}^2$ und die Implantationsenergie beträgt 90 keV. Mittels Reaktivem Ionen Ätzen (RIE/Tegal 902) werden die Widerstände aus der p-dotierten Si-Overlayer strukturiert (A-3).

Die Wahl der Implantationsdosis ist ein kritischer Parameter, welcher bereits in der Designphase des Sensors einfließt. Die Dosis und das Verhältnis von der Länge zur

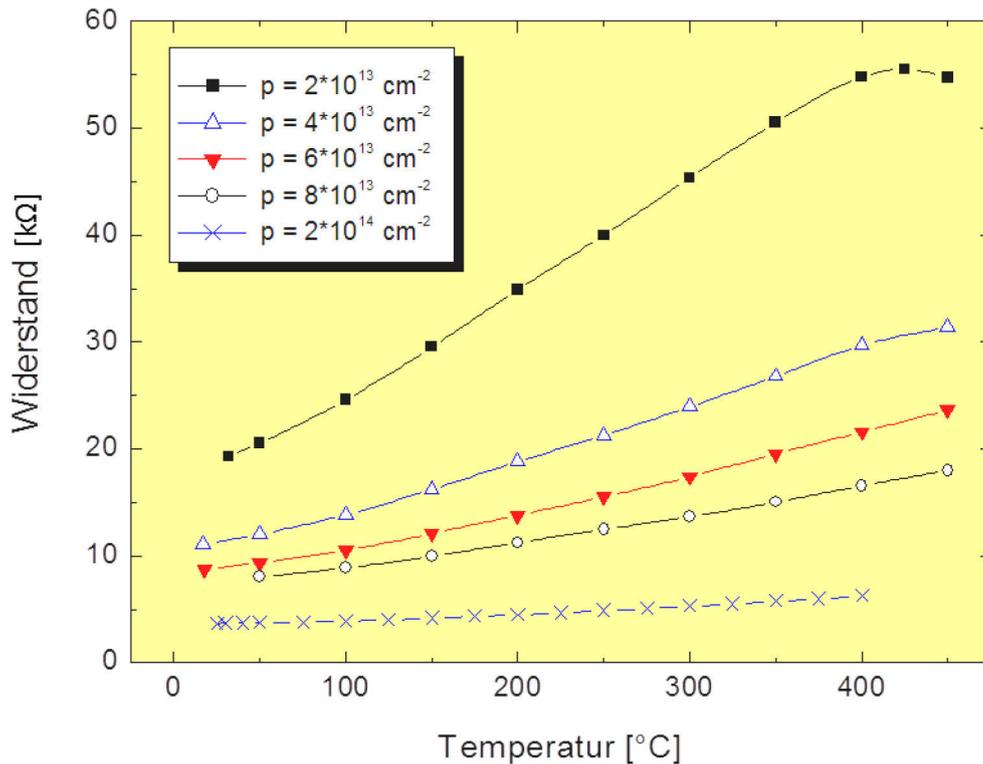


Abbildung 51: R(T) bei verschiedenen Implantationsdosen

Breite (L/B) des Piezowiderstands sind entscheidend für den resultierenden Widerstandswert der Piezowiderstände. In Abbildung 51 ist die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur bei einer L/B Verhältnis von 10 dargestellt, wobei die Dosis [p] der variierte Parameter ist. Die Wahl von L/B zu drei und der Wunsch einen Widerstandswert von rd. 3 kΩ zu erreichen, mündet in einer Implantationsdosis von $4 \cdot 10^{13} \text{ At/cm}^2$.

Für das anschließende RIE-Ätzen wurde ein spezieller Ätzprozess entwickelt, welcher sich durch eine geringere Si-Ätzrate und höhere Selektivität bezüglich der unter dem Si-Overlayer liegenden Oxidschicht auszeichnet. Dieser kontrollierte Ätzangriff wird durch ein genau abgestimmtes Prozessgasgemisch aus SF₆ und O₂ ermöglicht. Eine Überätzung bis in die vergrabene Oxidschicht wird dadurch weitgehend vermieden. Die Abbildung 52 zeigt einen fertig strukturierten Piezowiderstand.

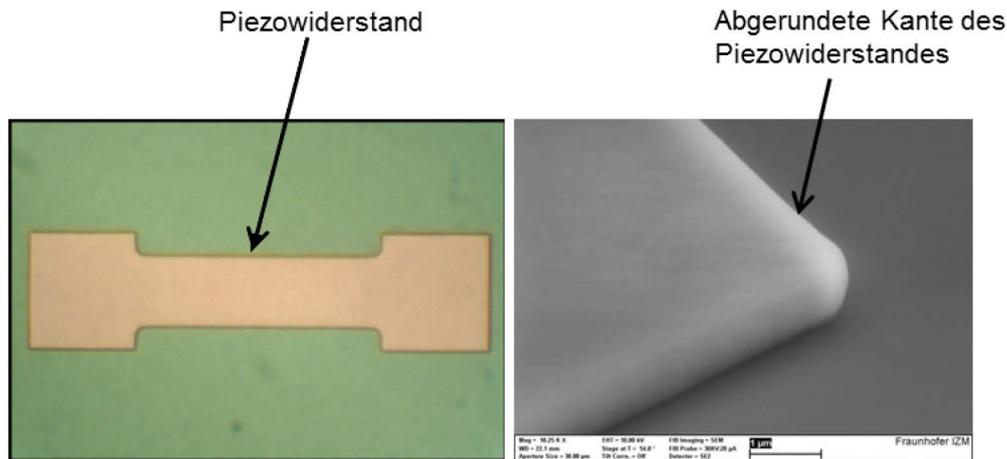


Abbildung 52: Piezowiderstand nach der RIE-Strukturierung (links) REM Abbildung der abgerundeten Piezowiderstandskante (rechts)

Im Folgenden werden die Kontaktbereiche der Piezowiderstände p^{++} (A-4) implantiert. Die Implantationsdosis beträgt $5 \cdot 10^{15}$ At/cm² und die Implantationsenergie 90 keV. Die hochdosierte Kontaktimplantation ermöglicht in Verbindung mit der späteren Metallisierung niederohmige Kontakte und ohmsches Verhalten.

Um die Piezowiderstände elektrisch zu isolieren und zu passivieren, werden Siliziumoxid und Siliziumnitrid abgeschieden (Abbildung 53). Durch thermische Oxidation bei 1000°C werden die strukturierten und implantierten Piezowiderstände mit ca. 100 nm SiO₂ bedeckt und damit geschützt. Die thermische Oxidation kann in einer trockenen oder feuchten Sauerstoffumgebung durchgeführt werden. In diesem Fall wurde ein Trockenoxidationsprozess für die SiO₂-Herstellung verwendet. Dieser Prozess dient gleichzeitig der Oxidation der Waferrückseite und der Aktivierung der implantierten Störtellenatome. Die während dieses Hochtemperaturschrittes ablaufenden Diffusionsprozesse führen zur Ausbildung der endgültigen Dotierungsprofile und zur Ausheilung von implantationsbedingten Kristalldefekten.

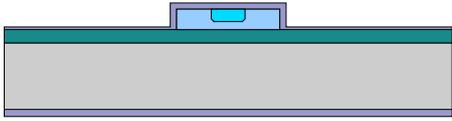
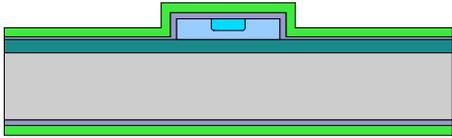
<p style="text-align: center;">SiO_2</p> 	<p>B-1</p> <p>Thermische Oxidation auf Vorder- und Rückseite</p>
<p style="text-align: center;">Si_3N_4</p> 	<p>B-2</p> <p>LPCVD-Nitrid-Abscheidung, ebenfalls beidseitig</p>

Abbildung 53: Prozess-Schritte B-1 und B-2: Aufbringen der Passivierung

Anschließend wird ganzflächig auf der Vorder- und Rückseite des Wafers eine ca. 180 ± 3 nm dicke LPCVD- Si_3N_4 -Schicht (Low Pressure Chemical Vapour Deposition) abgeschieden. Diese dient auf der Vorderseite zur Passivierung der Piezowiderstände und auf der Rückseite als Ätzmaske für den späteren KOH- Ätzprozess.

4.2 Hochtemperatur- Metallisierung

Für die Hochtemperaturmetallisierung ergaben sich besondere Anforderungen. Im Einzelnen sind dies:

- 1) Geringe spezifische Kontaktwiderstände und ohmsches Kontaktverhalten
- 2) Langzeitstabilität bei Temperaturen bis zu $350\text{ }^\circ\text{C}$
- 3) Beständigkeit gegen thermische Diffusion, Elektromigration und Korrosion
- 4) Gute Haftung
- 5) Kompatibilität zum Flip-Chip-Bonden mit Goldbumps

Zur Realisierung von niederohmigen, langzeitstabilen Kontakten hat es sich bewährt Metalle zu verwenden, die mit dem Siliziumsubstrat Silizide bilden [49],[50]. Als Silizid bildendes Metall wurde Titan verwendet, welches in Kombination mit TiWN eine sehr gute Haftfestigkeit sowohl auf Silizium als auch in der Metallfolge selber besitzt.

Zur Anpassung an die Aufbauform (Flip-Chip-Bonden mit Goldbumps) ist es sinnvoll, ebenfalls Gold als Abschluss-Metallisierung zu verwenden. Zum Bonden erforderliche Metallisierungsdicken liegen bei ca. einem Mikrometer. Da sich diese Dicke wirtschaftlich nicht durch Sputtern realisieren lässt, muss eine Kombination aus Sputtern und galvanischer Verstärkung verwendet werden.

Da Gold bei erhöhten Temperaturen stark ins Silizium diffundiert, ist eine hochtemperaturbeständige Diffusionsbarriere erforderlich. Sinnvoll ist hier Titan-Wolfram-Nitrid (TiWN), welches einen hinreichenden Diffusionsschutz bis 350°C gewährleistet [50].

Der Prozessablauf für das Metallisierungssystem lautet damit wie folgt:

- Metallabscheidung (Ti / TiWN)
- Strukturierung für die Temperung
- Temperung zur Silizidbildung
- Ätzen des TiWN Capping Layers
- Metallabscheidung (TiWN/Au) für Galvanik
- Galvanische Verstärkung
- Entgültige Strukturierung.

Die Übersicht über die Prozessfolge zur Herstellung der Ti/TiWN/Au-Hochtemperaturmetallisierung wird in Abbildung 54 gegeben.

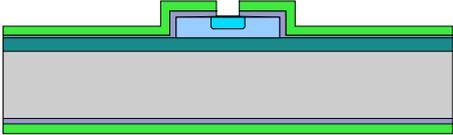
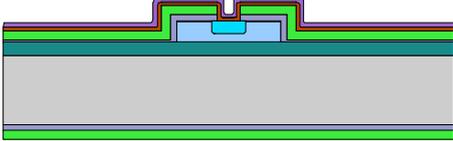
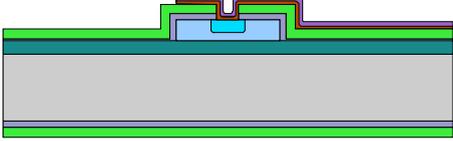
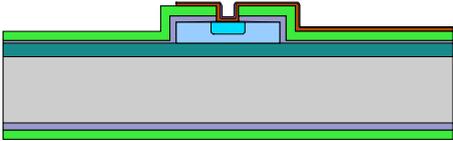
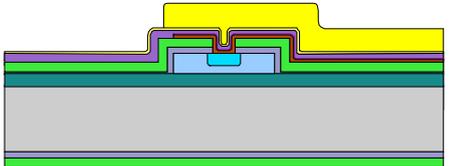
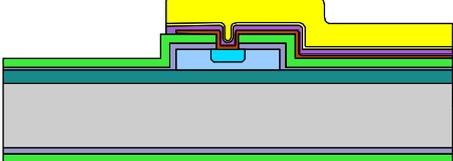
<p>Kontaktloch öffnen</p> 	<p>C-1 RIE und nasschemisches Ätzen zur Kontaktlochöffnung</p>
<p>Ti / TiWN sputtern</p> 	<p>C-2 Ti/TiWN-Abscheidung durch Sputtern</p>
<p>Metall strukturieren und Tempern</p> 	<p>C-3 Metall-Strukturierung und Tempern</p>
<p>Wegätzen der Capping-Layers (80%)</p> 	<p>C-4 Entfernen der TiWN- Capping-Layers (80%)</p>
<p>TiWN und Au sputtern</p> 	<p>C-5 TiWN- und Au- Abscheidung durch Sputtern</p>
<p>Galvanische Verstärkung der Leiterbahnen</p> 	<p>C-6 Galvanische Verstärkung</p>
<p>Au- und TiWN- Strukturierung</p> 	<p>C-7 Nach galv. Abscheidung: Au und TiWN-Strukturierung</p>

Abbildung 54: Prozess-Schritte C-1 bis C-7: Aufbringen des Hochtemperatur- Metallisierungssystems

Herstellung der piezoresistiven Drucksensoren

Zur Kontaktlochöffnung (Abbildung 55 C-1) wird das Siliziumnitrid (Si_3N_4) an den entsprechenden Stellen durch RIE-Ätzen entfernt. Das darunter liegende Siliziumoxid (SiO_2) wird durch Ätzen in Ammoniumfluorid-Ätzmischung (NH_4F) entfernt. Letzteres muss unmittelbar vor dem Metallisierungsschritt erfolgen, damit die Bildung einer natürlichen Oxidschicht in den Kontaktlöchern verhindert wird. Andernfalls würde das Vorhandensein von Sauerstoff am Interface die spätere Silizid-Bildung zwischen Silizium und Titan verhindern.

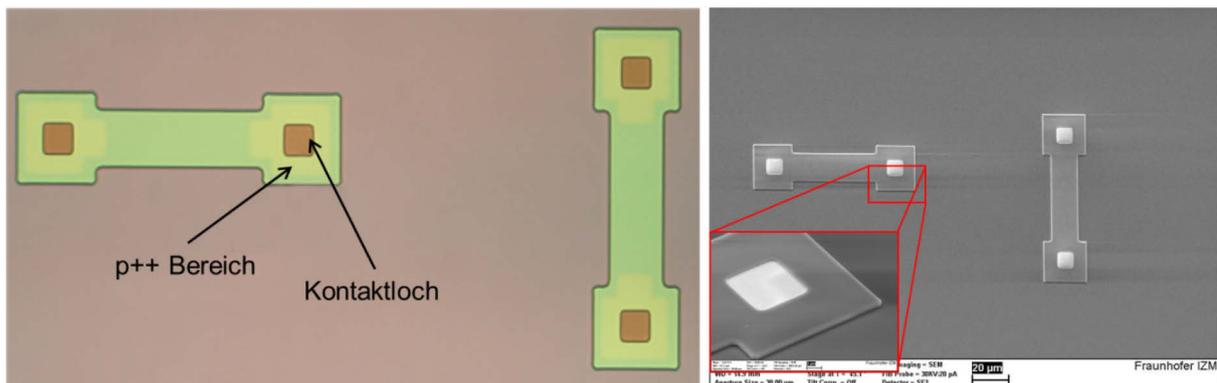


Abbildung 55: Piezowiderstände mit geöffneten Kontaktlöchern (links), REM Aufnahme der Piezowiderstände mit Vergrößerung im Kontaktbereich (rechts)

Die obige Abbildung 55 zeigt zwei Piezowiderstände mit geöffneten Kontaktlöchern (dunkle, orange Bereiche). Die hellen, gelben Gebiete um die Kontaktstelle lassen die p^{++} implantierten Bereiche erkennen. Auf der rechten Seite ist eine REM Aufnahme des Piezowiderstandes mit Detailvergrößerung im Kontaktbereich dargestellt.

Im ersten Prozessschritt wird eine Ti/TiWN -Doppelschicht auf die Vorderseite der Wafer aufgebracht (Abbildung 54 C-2). Die Abscheidung beider Schichten erfolgt ohne Unterbrechung des Vakuums durch RF-Sputtern in einer Leybold Z660 Kathodenzerstäubungsanlage mit Doppelschleusensystem. Vor der Ti-Abscheidung werden die Kontaktlöcher noch einmal durch einen kurzen Sputterätzschritt gereinigt.

Die Schichtdicke beträgt 55 nm für die Titan- und 180 nm für die TiWN-Schicht.

Die TiWN -Schicht wird zunächst mittels RIE trocken geätzt wobei ca. 80 % der Schicht entfernt wird (Abbildung 54 C-3). Anschließend wird die verbliebene TiWN -Schicht und die darunter liegende Ti-Schicht mit entsprechenden Ätzlösungen (Na_2CO_3 , 60 ml H_2O_2 (50%) und 920 ml H_2O für TiWN und $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ für Ti) nass-

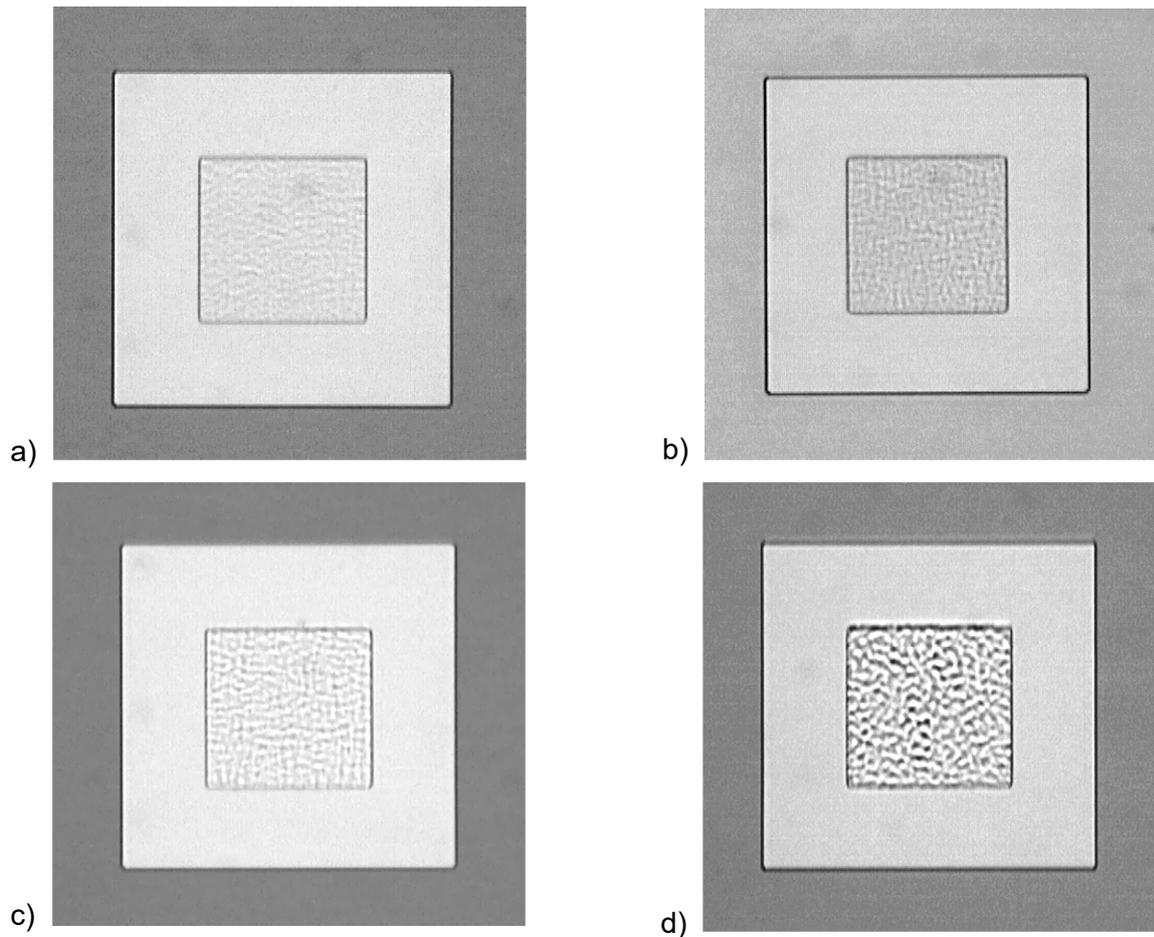


Abbildung 56: Bildung einer rauen Oberflächenstruktur bei der TiSi_2 -Bildung. Das mittlere Quadrat in jedem dieser Fotos zeigt eine Kontaktstelle, an der Ti und Si reagiert haben. Dabei wurde zwischen a), b), c) und d) jeweils die Temperatur des zweiten Temperungsschrittes variiert. [50]

- a) Temperung: $780^\circ\text{C}/75\text{ s}$
- b) Temperung: $780^\circ\text{C}/150\text{ s}$
- c) Temperung: $840^\circ\text{C}/75\text{ s}$
- d) Temperung: $840^\circ\text{C}/150\text{ s}$

chemisch strukturiert (Abbildung 54 C-3). Danach folgt das Rapid Thermal Annealing (RTA) in zwei Schritten bei 660°C und 840°C (Abbildung 54 C-3), wobei zunächst die Silizidbildung zwischen Titan und Siliziumsubstrat erfolgt und das gebildete Titansilizid nachfolgend in die niederohmige C54-Phase umgewandelt wird. Abbildung 56 zeigt die Bildung der rauen Oberflächenstruktur bei der TiSi_2 -Bildung. Dabei ist das mittlere Quadrat die Kontaktstelle an der die Reaktion von Titan und Silizium stattgefunden hat. Mit zunehmender Temperatur und Dauer der zweiten RTA Phase wird die Struktur rauer.

In Abbildung 57 ist eine Auger Elektronen Spektroskopie Analyse (Tiefenprofil) des Kontaktbereiches der Piezowiderstände dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die obere Sperrschicht aus TiWN noch intakt geblieben ist. Mit zunehmender Sputterätzdauer verschwindet der Wolframanteil aus dem Tiefenprofil und es ist Titan und Silizium zu erkennen. Nach einer Sputterätzzeit von über 30 Minuten ist nur reines Silizium zu sehen. Dabei handelt es sich um die Si-Overlayer des SOI Wafers.

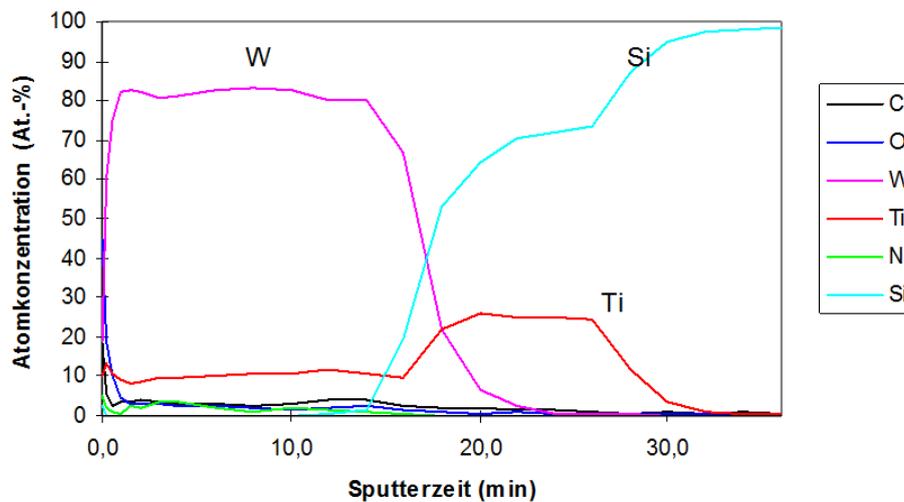


Abbildung 57: AES-Analyse einer Probe mit den Temperparametern 660°C/75 s und 780°C/75 s. Konzentration der vorhandenen Elemente in Atomprozent. Einer ausgeprägten TiWN-Schicht (mit sehr geringem Stickstoffanteil) folgt deutlich eine TiSi₂-Schicht. [50]

Im folgenden Prozessschritt wird die TiWN - Schicht um 80 bis 90 Prozent ihrer ursprünglichen Dicke nasschemisch verringert (Abbildung 54 C-4). Dies ist nötig, da beim Handling und Annealing entstandene Verunreinigungen die Qualität der TiWN-Schicht als spätere hochtemperaturstabile Diffusionsbarriere nachhaltig beeinträchtigen können.

Im nächsten Prozessschritt werden die Ti:W(N)-Diffusionsbarriere und die Au - Abschlussmetallisierung (Abbildung 54 C-5) durch Kathodenzerstäubung ohne Unterbrechung des Vakuums abgeschieden. Die Schichtdicken betragen 150 nm TiWN und 200 nm Gold. Das TiWN wirkt als Halftvermittler und verhindert wegen seiner ausgezeichneten Barriereigenschaften die Ausbildung von intermetallischen Gold-

Phasen. Die Goldschicht stellt die Galvanikstartschicht dar und schützt das darunterliegende TiWN vor Oxidation.

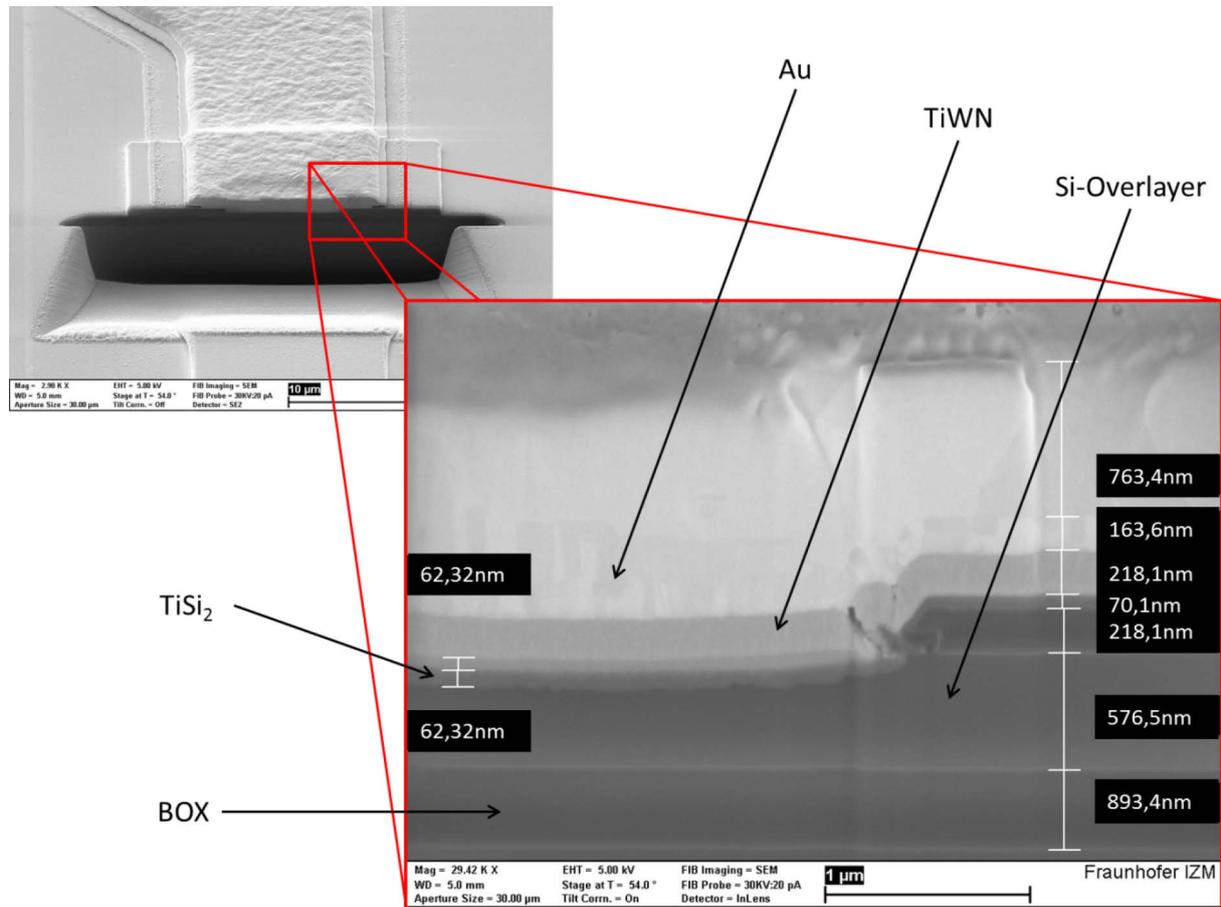


Abbildung 58: FIB Aufnahme des Kontaktbereiches des Piezowiderstandes.

In Abbildung 58 ist eine Focus Ion Beam Probe des Kontaktbereiches des Piezowiderstandes abgebildet. Es sind deutlich die unterschiedlichen Schichten zu erkennen.

Im Allgemeinen werden folgende Forderungen an das Schichtsystem gestellt:

- hermetische Abdichtung des Bondpads gegen äußere chemische Einflüsse
- Vermeidung von intermetallischer Phasenbildung zwischen Pad- und Bumpmetall infolge von Diffusionsprozessen
- gute Hafteigenschaften des Schichtsystems an den Grenzflächen
- hohe thermodynamische Stabilität der Diffusionssperrschicht
- hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit

- geringer Kontaktwiderstand zu den Nachbarschichten
- Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanisch und thermisch induzierten Spannungen
- homogene Schichtdickenverteilung auf der gesamten Waferfläche
- keine Schädigung oder Funktionsbeeinträchtigung von Halbleiterbauelementen wie z. B. Piezowiderständen durch den Sputterprozeß

Für die Metallisierung von kleinen Anschlussflächen zur Realisierung hoher Kontaktdichten hat sich die galvanische Abformung in strukturiertem Fotoresist etabliert. Hierzu kam der an der TUB entwickelte und zur Verfügung stehende Bumping-Prozess zur Anwendung. Das Verfahren wird auf Waferebene eingesetzt und ist für die Massenproduktion von metallisierten Sensoren hervorragend geeignet. Zur Abscheidung der Feingoldmetallisierung mit vier Neunern (9999) wird der Elektrolyt MICROFAB Au 660 von Enthone eingesetzt. Es handelt sich um ein schwach alkalisches cyanfreies Bad mit einem Goldgehalt von ca. 16 g/l. Die Badtemperatur beträgt 50°C, der Abscheidungsstrom 3 mA und die Galvanikfläche 1 cm² pro Wafer. So werden die Leiterbahnen und Bondpads um eine Schichtdicke von $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$ verstärkt (Abbildung 54 C-6). Hier wird die galvanische Verstärkung auch bei den Leiterbahnen bis zu den Piezowiderstand-Kontaktstellen durchgeführt, damit die Leiterbahnen an den Stufen nahe der Kontaktstelle nicht unterbrochen werden.

Die hohen Erwartungen an Bumpgeometrie, Höhenverteilung und Defektrate können nur unter definierten Elektrolysebedingungen erfüllt werden. Die Qualität der Abformung hängt in hohem Maße von folgenden Einflussgrößen ab:

- Zusammensetzung und Reinheit der Badchemie
- Stromdichte
- Strömungsverhältnisse an der Waferoberfläche
- Badtemperatur
- Belastung des Elektrolyten durch Verunreinigungen
- Ausblutung von Resistbestandteilen während der Elektrolyse

Die Duktilität galvanisch abgeschiedener Golddepots ist für das Thermokompressionsbonds in vielen Fällen nicht ausreichend und kann durch thermische Auslagerung erhöht werden. So kann die Härte der Abscheidung aus sulfidischen Bädern von

typ. 130 HV_{0,025} (Mikrohärte nach Vickers mit 25 mN Eindruckkraft) durch Rekristallisations- und Diffusionsvorgänge bei 200°C innerhalb weniger Minuten auf etwa 50 HV_{0,025} gesenkt werden. Spuren von eingebauten Fremdelementen wie beispielsweise Arsen können das Weichwerden der Abscheidung durch Tempern verhindern.

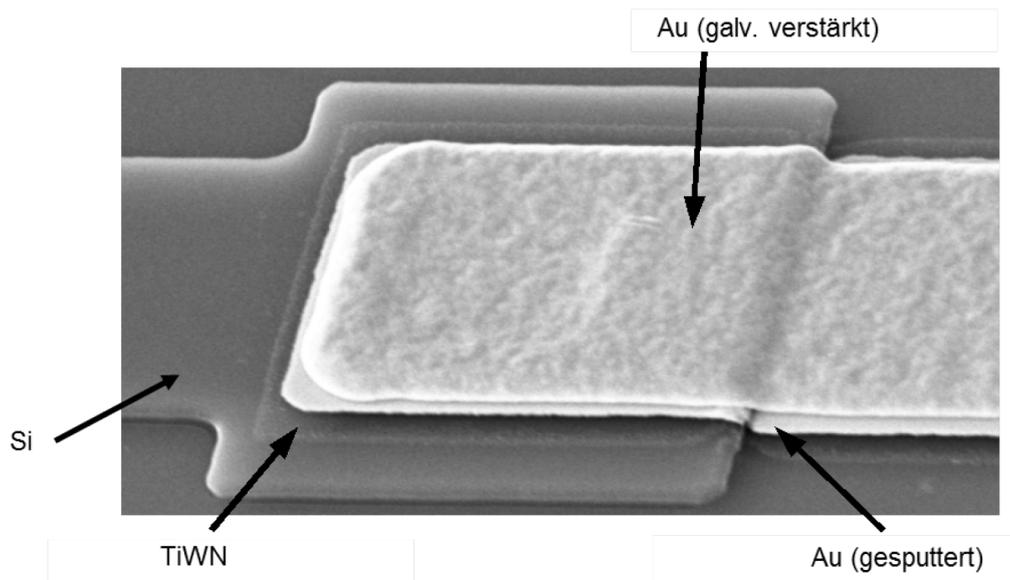


Abbildung 59: Leiterbahn nach der galvanischen Verstärkung und das Entfernen der Galvanikstartschicht. Die abgestufte Flächenbedeckung ergibt sich durch die Photolackmaskierung und die unterschiedliche Unterätzung bei den verschiedenen Ätzprozessen.

Die Bumphöhenverteilung auf dem Wafer ist in erster Linie von den in jedem beliebigen Flächenelement herrschenden Stromdichte- und Strömungsverhältnissen bestimmt. Weitergehend heißt dies, daß die Höhenverteilung auch von den Strukturmaßen (Grundfläche und Höhe der Resistöffnungen) und der Strukturanordnung (Gleichmäßigkeit der Waferbelegung) beeinflusst werden. Unter realen Umständen sind bei einer typ. Strukturhöhe von 1 µm auf der Fläche eines 4“-Substrates Toleranzen von ± 0,05 µm erzielbar.

Nach der galvanischen Verstärkung wird zunächst die gesputterte Au-Schicht nasschemisch strukturiert. Die darunterliegende TiWN-Schicht wird zuerst trocken und dann nasschemisch strukturiert (Abbildung 54 C-7). Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, die aufgesputterten Metallfilme zu entfernen. Sie können nasschemisch in einer wässrigen Lösung geätzt oder durch Ionenwechselwirkung

abgetragen werden. Die Wahl der geeigneten Methode richtet sich nach der Art des Metallisierungssystems, den Schichtdicken und Strukturgrößen, der Flächenbelegung und nicht zuletzt nach der Kosteneffizienz des Prozesses.

Beim verwendeten Prozess wurde das Gold nach Strukturierung einer Lackmaske in einer wässrigen KJ/J_2 -Lösung geätzt [53],[54]. Die metallisierte Waferoberfläche wird durch eine Oxidationsreaktion gelöst, während simultan hierzu eine Reduktion von Lösungsbestandteilen stattfindet.

Art und Geschwindigkeit der Stofftransportvorgänge und die Kinetik des Reaktionsmechanismus bestimmen zusammen die Abtragsrate und die Güte des resultierenden Ätzbildes. Unter praktischen Überlegungen sind folgende Einflussfaktoren für die Qualität und Reproduzierbarkeit eines Ätzprozesses entscheidend:

- Konzentration des Ätzmittels
- pH-Wert und Redoxpotential der Ätzlösung
- Temperatur der Ätzlösung
- Oberflächenspannung und Viskosität der Ätzlösung
- Relativbewegung von Substrat und Lösung (Konvektion)
- Zusammensetzung, Kristallstruktur und Schichtdicke des abzutragenden Metalls
- Geometrie des Substrates

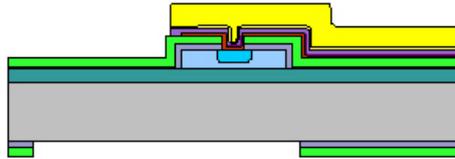
Nach dem Entfernen der Goldschicht wird die darunter liegenden Ti:W(N)-Schicht wie oben beschrieben zuerst mittels Ionenstrahlätzen und anschließend nasschemisch in einer Wasserstoffperoxid-Lösung strukturiert

Wie die galvanischen Elektrolyte unterliegen auch die Ätzlösungen im Gebrauch einer permanenten Veränderung ihrer Zusammensetzung. Sie reichern sich mit dem gelösten Metall an und verarmen gleichzeitig an der aktiven Ätzkomponente. Infolgedessen kommt es zu einer stetigen Verringerung der Ätzgeschwindigkeit und somit zu verlängerten Ätzzeiten. Die Alterung des Ätzmediums kann in einem gewissen Maße durch regenerative Maßnahmen wie beispielsweise einer Nachdosierung des Ätzmittels oder Ausfällen des gelösten Metalls aufgefangen werden, ansonsten muss die Lösung ausgetauscht werden.

4.3 Herstellung der Membran mit Center-Boss

Ziel der Prozessschritte ist die Herstellung einer 25 μm dicken Membran mit einer Center-Boss-Struktur von 1 mm \times 1 mm Grundfläche (s. Abschn. 3.4, S. 76).

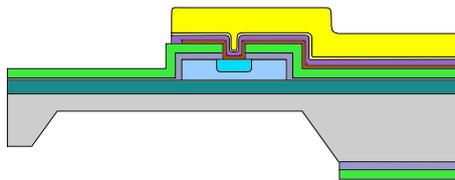
Öffnen der Si_3N_4 / SiO_2 - Ätzmaske



D-1

Öffnen der Si_3N_4 / SiO_2 -
Ätzmaske

KOH-Ätzen



D-2

KOH-Ätzen

Abbildung 60: Prozess-Schritte D-1 und D-2: Membranherstellung durch KOH- Ätzen der Waferrückseite

Abbildung 60 zeigt die Prozessfolge für das Herstellen der Membran mit einer Center-Boss Struktur. Aus der Si_3N_4 - SiO_2 -Doppelschicht auf der Rückseite entsteht durch RIE-Ätzen des Si_3N_4 und nasschemisches Ätzen des SiO_2 mit Ammoniumfluorid die Ätzmaske für das anisotrope KOH-Ätzen (Abbildung 60 D-1).

Die gewünschte konvexe Struktur des Center-Boss kann nicht einfach mit einer entsprechenden quadratischen Maske erzeugt werden, da die KOH konvexe Strukturen angreift und somit den Center-Boss über die Prozesszeit zu stark seitlich ätzen würde. Das Abbildung 61 zeigt eine quadratische Ätzmaske und die resultierende Struktur mit Unterätzung in KOH (33 %, 80 °C) nach 90 Minuten, bzw. 255 Minuten Ätzzeit. Als Lösung für dieses Problem werden Kompensations- oder Opferstrukturen verwendet [73].

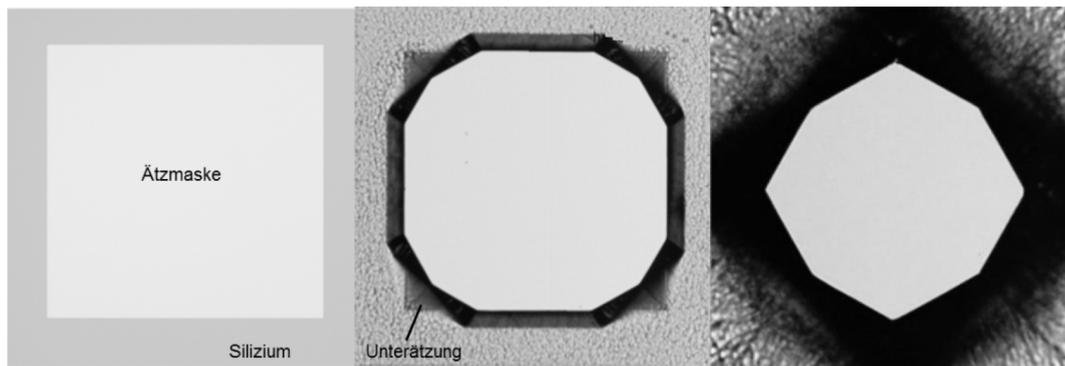


Abbildung 61: Maske (links) und geätzte Struktur nach 90 Minuten (mitte) und 255 Minuten (rechts)

Dabei handelt es sich um zusätzliche Stege, die von der gewünschten konvexen Struktur ausgehen und während des Strukturierungsprozesses weggeätzt werden, bevor die eigentliche Struktur angegriffen werden kann. Um die gewünschte Center-Boss Struktur ohne nennenswerte Unterätzung herstellen zu können, wurden speziell KOH-Ätzprozess (KOH+IPA) und Ätzmasken mit Kompensationsstrukturen entwickelt. Abbildung 62 zeigt eine Maske mit Kompensationstruktur und die resultierende Struktur mit Unterätzung in KOH (33%, 80°C) nach 90 Minuten, bzw. 255 Minuten Ätzzeit.

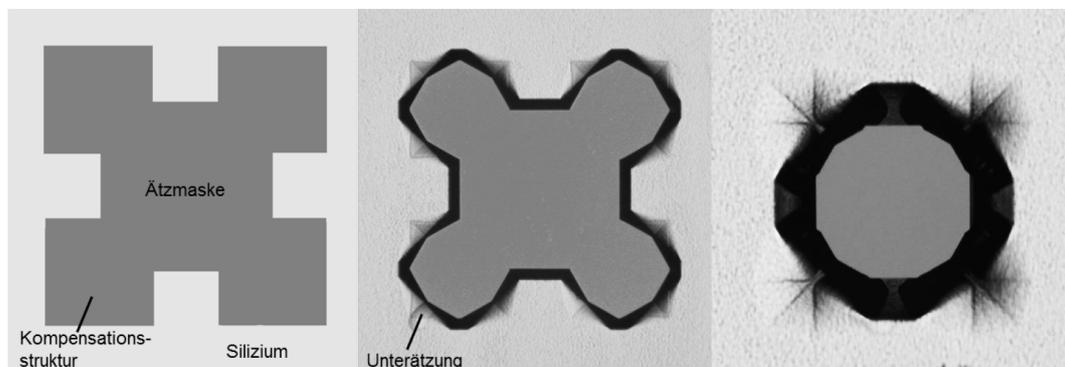


Abbildung 62: Maske mit Kompensationsstruktur (links) und geätzte Struktur nach 90 Minuten (mitte) und 255 Minuten (rechts)

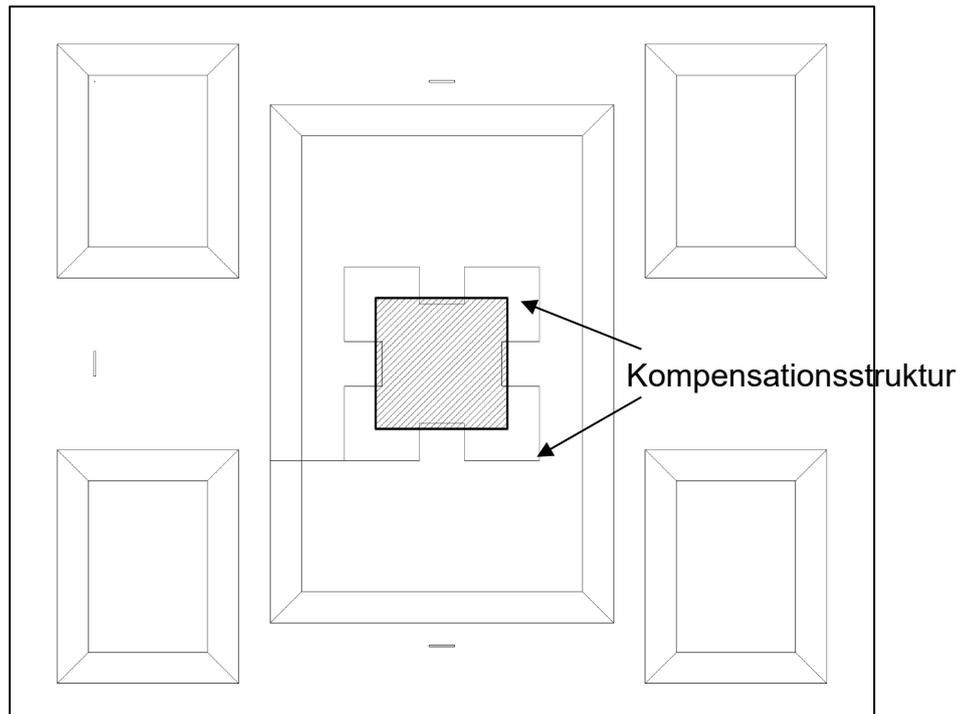


Abbildung 63: Maskenlayout für die Strukturierung der Membran und des Center-Boss mit Kompensationsstrukturen

Die quadratischen Kompensationsstrukturen dienen der Erhaltung der Ecken des Center-Boss. Die Kompensationsstrukturen müssen der gewünschten Ätztiefe entsprechend gewählt werden. Für die im vorliegenden Fall erforderlichen Ätztiefen von etwa $355\ \mu\text{m}$ wären die erforderlichen Kompensationsstrukturen jedoch größer als die Membran bis zu den Langlöchern. Die Geschwindigkeit, mit der konvexe Ecken in einer KOH-Lösung angegriffen werden, lässt sich durch Zugabe von Isopropanol reduzieren [52]. Durch einen Zwei-Stufen-Prozess, bei dem der erste Ätzschritt in mit IPA versetzter KOH und der zweite in reiner KOH-Lösung stattfindet, lässt sich nun allein durch Aufteilung der Prozesszeiten der beiden Ätzschritte eine optimale Ausprägung der konvexen Struktur erzeugen. Abbildung 64 zeigt die Rückseitenansicht eines Sensors mit strukturierter Membran und Center-Boss.

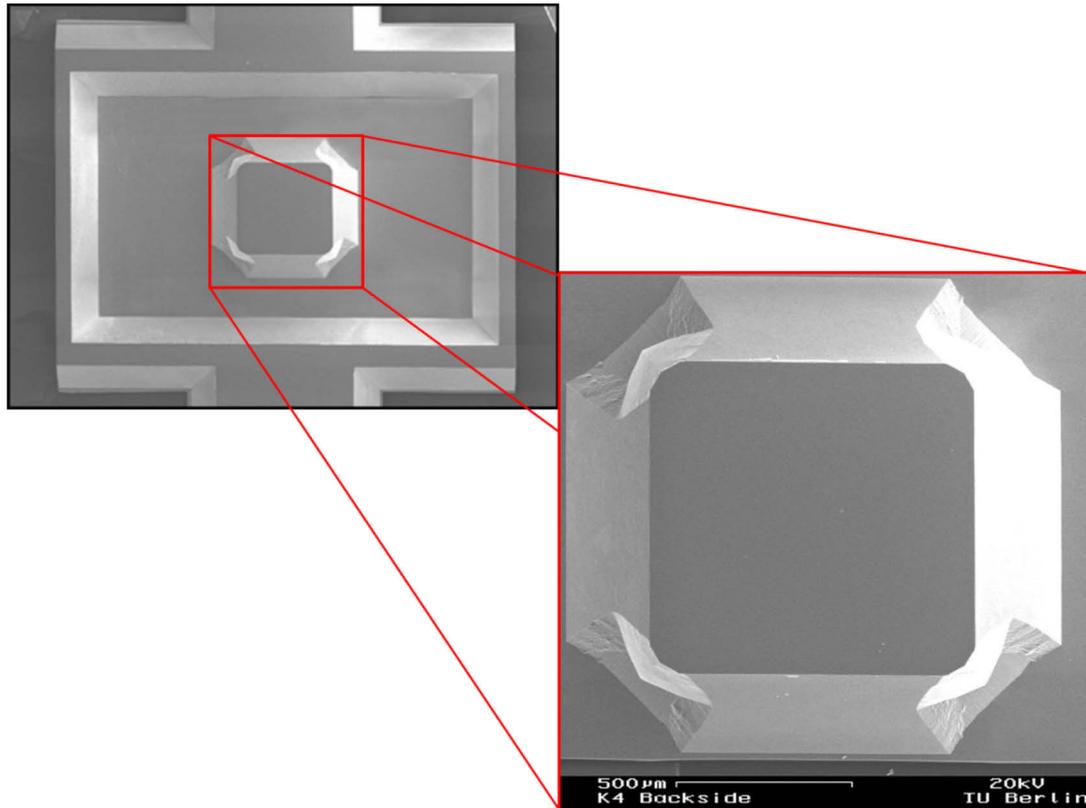
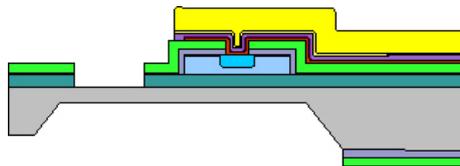


Abbildung 64: REM Aufnahme von einer fertig gestellten Membran mit Center-Boss. Die Herstellung erfolgte durch das Ätzen in mit IPA gesättigter KOH und reiner KOH

Die durch KOH-Ätzen erzeugte Membran wird mittels RIE-Ätzen von der Vorderseite her mit Langlöchern versehen (vgl. Abbildung 65 und 67)

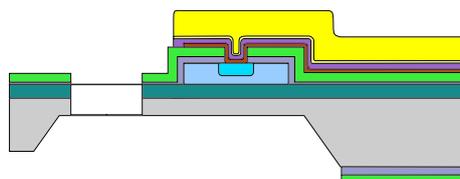
Öffnen der Si_3N_4 / SiO_2 - Ätzmaske



E-1

Öffnen der Si_3N_4 /
 SiO_2 - Ätzmaske

RIE Ätzen



E-2

RIE Ätzen

Abbildung 65: Prozess-Schritte E-1 und E-2: RIE- Strukturierung der Langlöcher

Abbildung 66 zeigt die Rückseitenansicht eines fertig strukturierten Sensors mit Langlöchern.

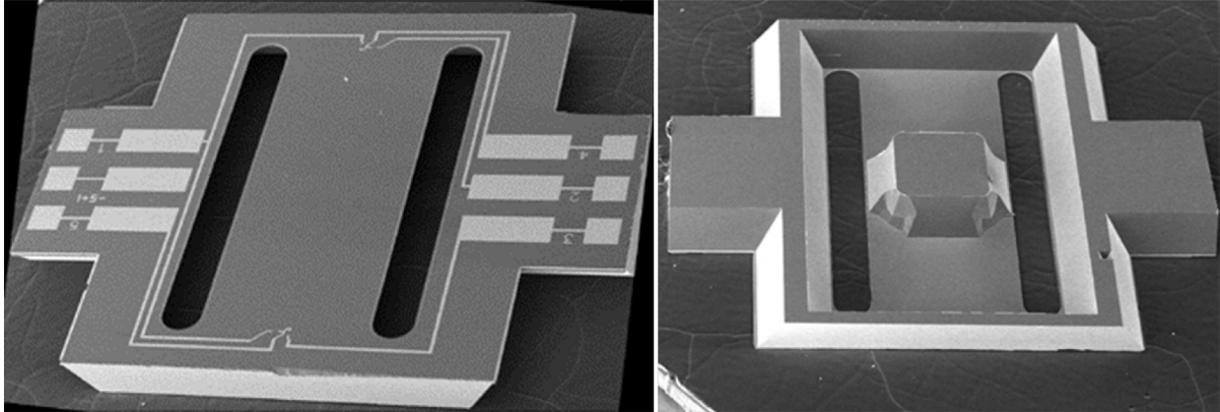


Abbildung 66: REM Aufnahme eines fertig gestellten Sensor von der Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)

5 Gehäusung von Sensoren

5.1 Allgemein

Das Gehäuse von Sensoren ist ein integraler Bestandteil der Sensorfunktion. Es dient nicht nur der Vereinfachung der Montage der Sensorchips, sondern ermöglicht auch den Betrieb unter definierten Bedingungen (Druck, Temperatur). In der Literatur hat sich hierfür der Name „Package“ etabliert. In der Elektronikindustrie müssen generell die Halbleiterbauelemente für ein mikroelektronisches System in ein geeignetes Package montiert werden. Dies dient zur elektrischen Kontaktierung und zu mechanischen bzw. eventuell thermischen Verbindung von Chip und Substrat. Darüber hinaus werden die hochempfindlichen Bauteile dadurch auch vor Umwelteinflüssen geschützt [58].

Für das Packaging von Sensoren gelten besondere Bedingungen, da diese auch in einer aggressiven Umgebung (d.h. hohe Temperatur, reaktive Gase, Medien) über die gesamte Betriebsdauer zuverlässig geschützt sein müssen. Eine Leckage im Package würde zu irreversiblen Änderungen der Eigenschaften oder zur Zerstörung des Chips und damit des gesamten Sensorsystems führen [58], [61].

Durchkontaktierte Metallgehäuse bzw. Glasdurchführungen haben sich für das Sensorpackaging aufgrund der hohen Zuverlässigkeit durchgesetzt [58]. Sie bestehen aus einem Metallplättchen, auf dem der Chip montiert und kontaktiert wird. Eine Metallkappe wird dann mit dem Metallplättchen verbunden und dichtet den Chip auf diese Weise ab. Eine dauerhafte und hochdichte Verbindung wird durch Laserschweißen oder mittels Löten erreicht. Die elektrische Verbindung des Sensors nach außen wird mittels kleiner Metallstifte (Pins) erreicht. Diese werden durch das Metallplättchen geführt und mittels Glaslot elektrisch isoliert hermetisch abgedichtet. Diese Metall-Glasmaterialkombination verbindet eine hohe zuverlässige Dichtigkeit mit der notwendigen elektrischen Isolation zum Metallplättchen. Lote auf der Basis von Metallen können nicht verwendet werden, da sonst alle Pins miteinander elektrisch verbunden wären. Diese Glas-Metall-Packages sind heute Standardgehäuse in der Automobilindustrie (Abbildung 67 und Abbildung 68)

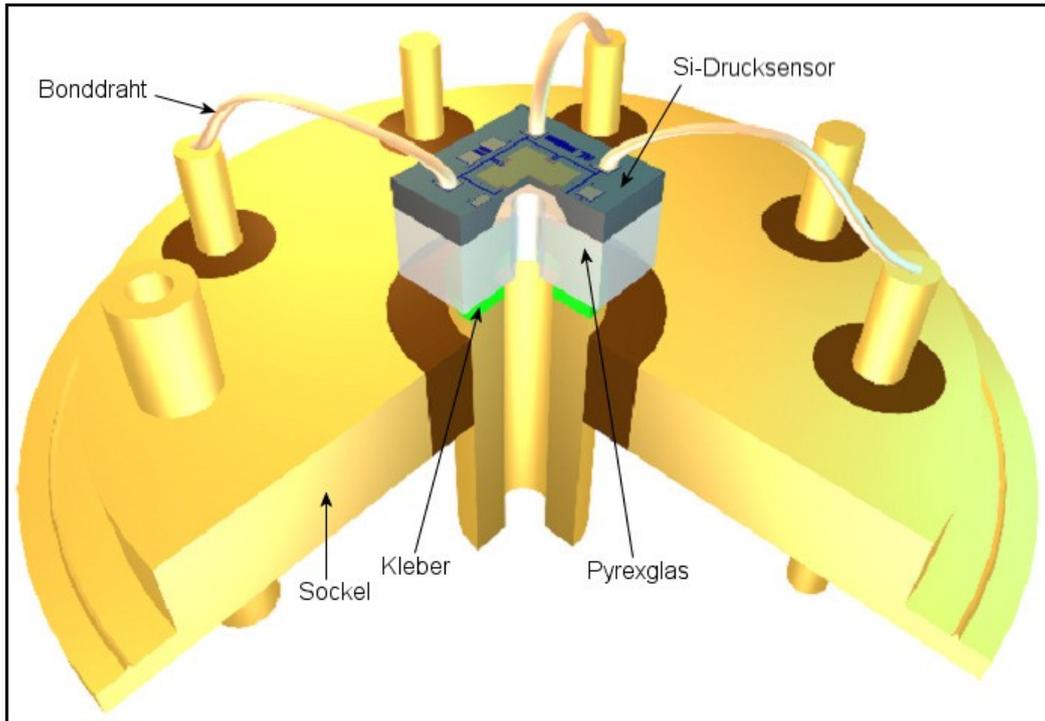


Abbildung 67: Bild eines auf einen TO8 Sockel montierten und drahtgebondeten Drucksensors [55]

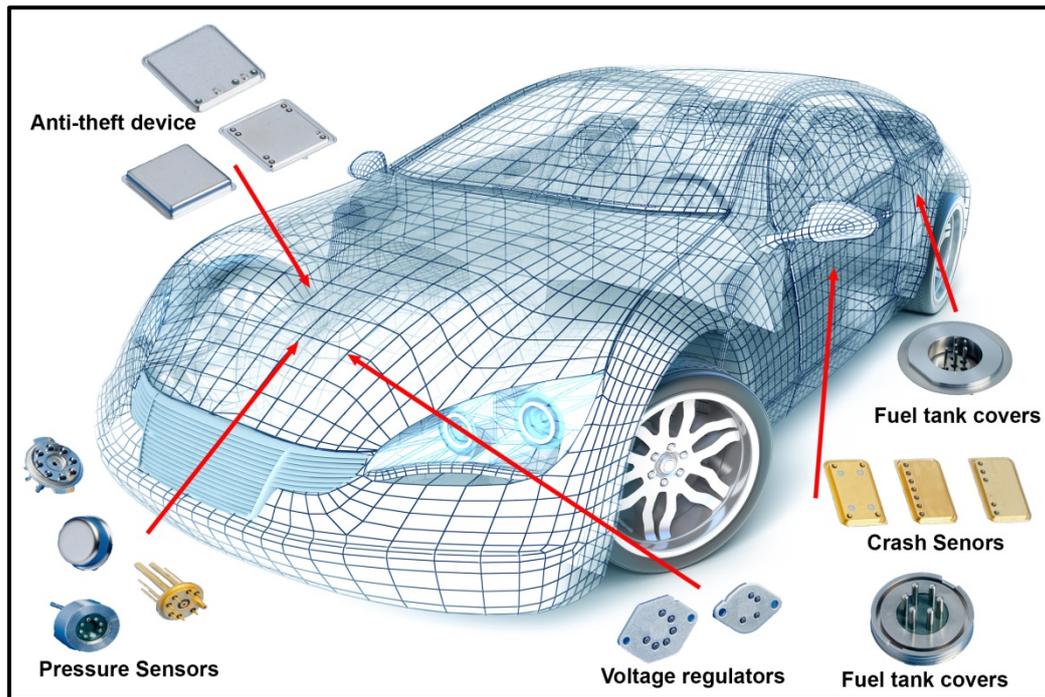


Abbildung 68: Beispiele hermetischer Glas-Metall-Packages [56]

Solche Packages werden als standardisierte Gehäuse von Firmen wie z.B. Schott und Electrovac angeboten.

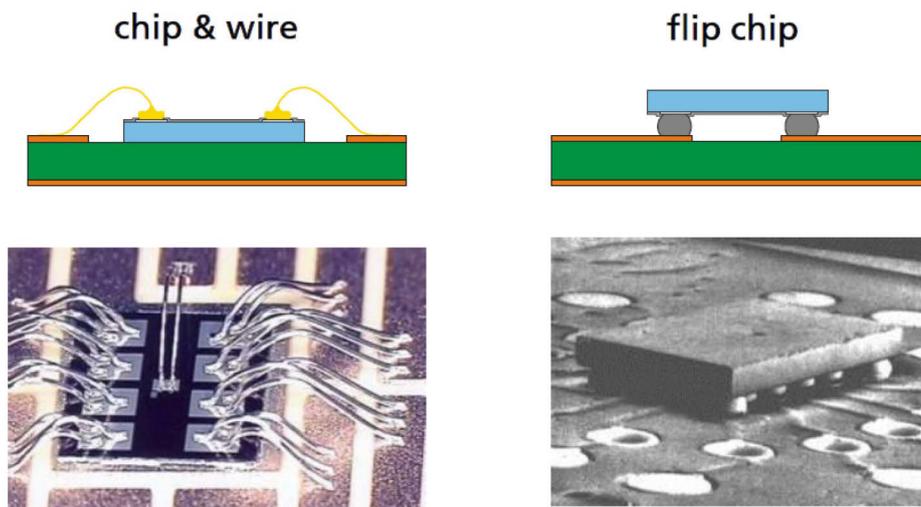


Abbildung 69: Prinzip der Drahtbond (links) und der Flip-Chip-Technik (rechts) [67]

Die Kontaktierung des Chips in ein solches Gehäuse kann mittels Drahtbondtechnik oder mittels der sogenannten Flip-Chip-Technik (FC) erfolgen (Abbildung 69)

Bei der Drahtbondkontaktierung wird der Chip mit der Rückseite auf einen Träger geklebt oder gelötet. Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels feiner Gold- oder Aluminiumdrähte [58], [59], [60], [62].

Der Chip wird bei der Flip-Chip-Montage mit der Vorderseite nach unten auf den Träger gelötet, geklebt oder mikroverschweißt. Der Chip wird bei dieser Kontaktierung gleichzeitig elektrisch, thermisch als auch mechanisch mit dem Substrat verbunden [58]. Die verschiedenen Varianten der FC-Montagetechnik sind in Abbildung 70 gezeigt.

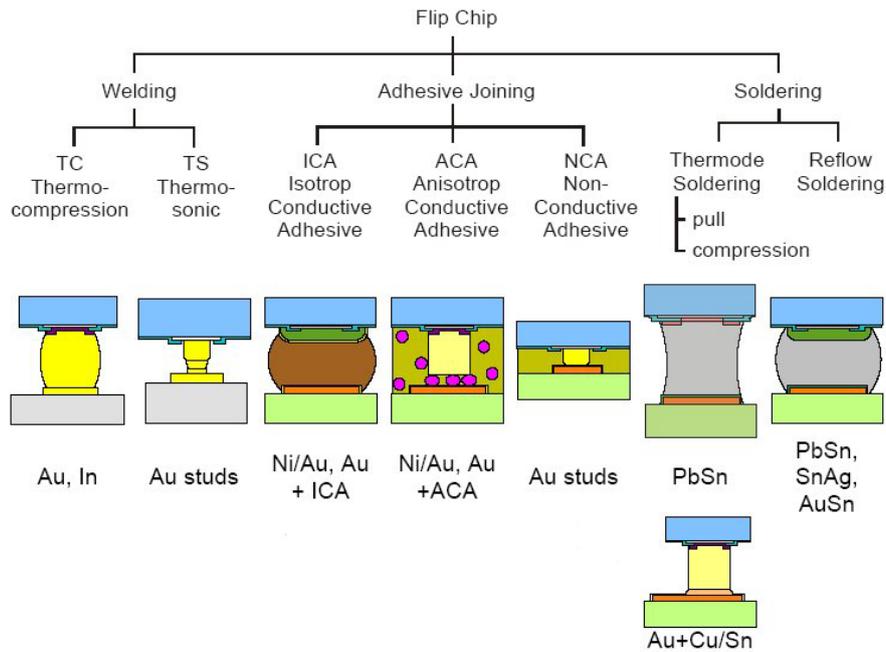


Abbildung 70: Verschiedene Varianten der FC-Montagetechnik: Schweißen (links), Kleben (mitte), Löten (rechts) [67]

Im Unterschied zum Drahtbonden müssen die Chipkontakte (Pads) vor der Kontaktierung modifiziert werden. In der Regel werden hierzu sogenannte Bumps auf dem Chip oder dem Träger abgeschieden. Beim Löten besteht diese letzte Schicht aus Mikrolotdepots (PbSn oder bleifreie Lote wie SnAg), beim Kleben aus Gold- oder Nickel-Goldbumps und beim Thermokompressionsbonden ebenfalls aus Goldbumps [58]. Insbesondere können Golddepots durch Stud-Bumping aufgebracht werden.

Das Stud-Bumping Verfahren bietet sich an, wenn die zu beschichtenden Substrate weder im Nutzen verarbeitet werden, noch mit den Mitteln der Planartechnologie bearbeitet werden können. Dies trifft auf die im folgenden verwendeten Glasdurchführungen zu.

5.2 Gehäusung beim Biegebalken/Hochtemperatur Sensor

Bei dem hier verfolgten Sensorkonzept ist es eine notwendige Forderung an das Gehäuse, die Übertragung der Auslenkung der Stahlmembran auf die Rückseite des Chips zu ermöglichen. Um die dafür passende Positionierung und geometrische Ausrichtung des Chips im Gehäuse zu erreichen, ist die Flip-Chip-Kontaktierung dem Drahtbonden vorzuziehen. Die einzige mechanische Verbindung und Kopplung vom Chip zum Substrat bzw. zur Glasdurchführung erfolgt über den Flip-Chip-Kontakt. Die Übertragung des Druckes von der äußeren Stahlmembran auf den Sensorchip ist daher ungehindert möglich.

Die Materialauswahl für die Verbindungstechnik ist durch die Hochtemperaturanwendung stark eingeschränkt [63], [64], [65], [66]. Klebstoffe auf Polymerbasis oder selbst hochschmelzende PbSn-Lote mit einer Schmelztemperatur von 350°C sind für die hier geforderte Temperatur von bis zu 400 °C nicht einsetzbar. Das Mikroverschweißverfahren basierend auf einer Thermokompressionsbondung von Gold auf Gold kann hierfür zuverlässig verwendet werden. Für diese Kontaktierung müssen auf den Bondpads des Chips Goldkontakte erzeugt werden. TiWN dient als zuverlässige Diffusionssperre zur Chipmetallisierung. Das Gold wird hierzu auf den Chippads auf eine Schichtdicke von etwa 1 µm galvanisch verstärkt.

Die auf den Pins in den Glasdurchführungen des Substrats erforderlichen Goldbumps werden durch Studbumping aufgebracht. Dieses Verfahren ist ideal, da es auf einer modifizierten Drahtbondtechnik basiert, die einen seriellen, potenziell sehr schnellen und automatischen Prozess darstellt, der sich in der Elektronik für das Single-Chip-Bumping und für Prototyping bzw. der Kontaktierung von Bauelementen mit geringer Kontaktzahl etabliert hat. Also überall dort, wo parallele (großer Nutzen) Planarprozesse mit Lithographie und Mikrogalvanik nicht oder nur sehr schwer durchführbar sind. Zudem liefert das Verfahren hoch reine, sehr weiche und duktile Goldbumps, die sich durch eine gute Bondbarkeit auszeichnen. Der Prozess unterscheidet sich hierbei nur unwesentlich vom Ball-Wedge-Bonden. Der Ball wird dabei mit der Abflammeinrichtung der Bondmaschine erzeugt. Nachdem der Ball auf den Pin gesetzt ist, wird der Golddraht abgerissen. Auf dem Pin verbleibt ein Bump. Durch die Wahl der Maschinenparameter kann die Form und die Höhe des Bumps beeinflusst werden. Ein Beispiel eines Studbumps ist in Abbildung 71 zu sehen.

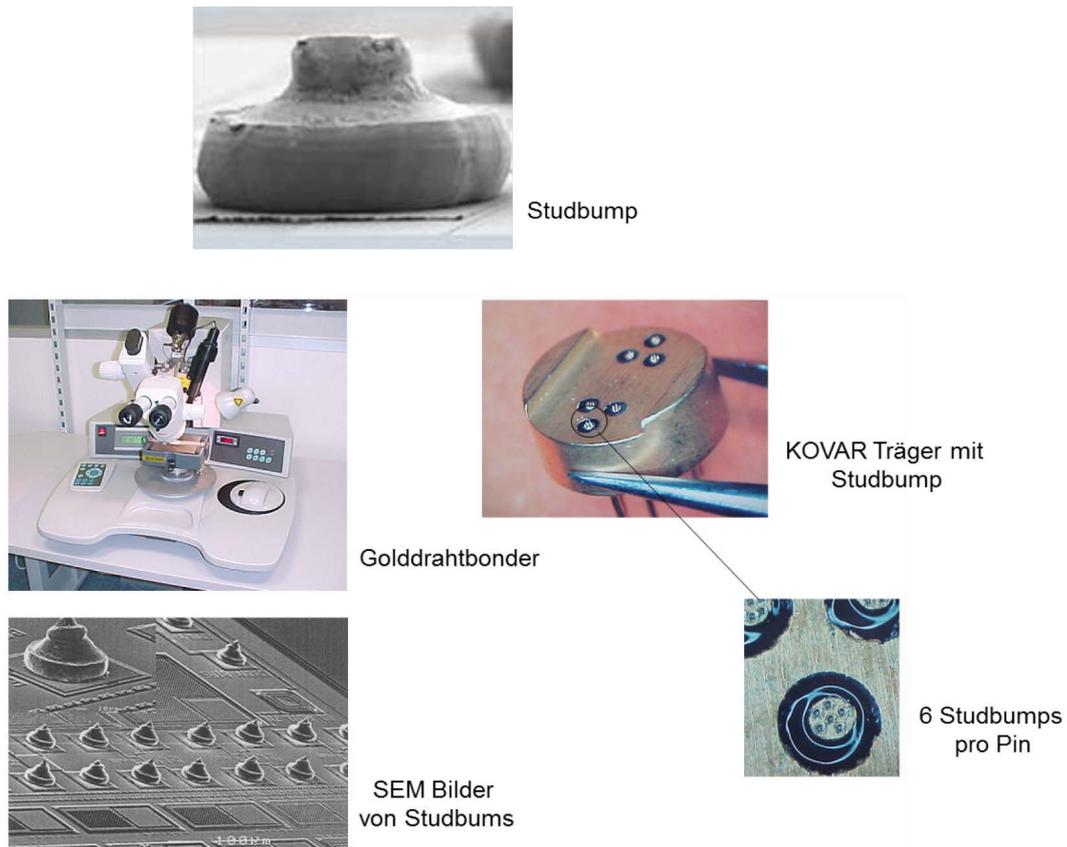


Abbildung 71: Beispiel einer Gold-Stud-Bump Anwendung (www.kns.com, Kulicke & Soffa): Einzelstudbump (oben), Drahtbonder (links oben), Studbumps auf Chip (links unten), Glasdurchführung mit sechs Pins mit je sechs Studbumps (rechts)

Das Studbumpingverfahren ermöglicht darüber hinaus die definierte Einstellung der Bumphöhe. Mittels des hier verwendeten Golddrahts mit einem Durchmesser von 25 μm konnte die Studbumphöhe auf 40 μm gebracht werden.

Die FC-Verbindung erfolgt mittels eines FC-Bonders der Fa. Finetech. Die Bondpads des Chips werden hierzu mit einer Split-Field-Optik zu den gebumpten Gehäusepins justiert. Unter Einsatz von Druck und Temperatur (15 Newton, 350°C, 30 Sekunden) werden dann mittels Thermokompressionsbonding alle Bumps (bis zu 40 pro Modul) deformiert und ein dauerhaft stabiler mechanischer und elektrischer Kontakt zwischen Chip und Substrat erzielt (Abbildung 72). Anschließend wird das so erzeugte Modul in ein Drucksensorgehäuse integriert. Dabei wird das Modul unter Vorspannung in der Art montiert, dass der Chip-Center-Boss und der Center-Boss der Stahlmembran aufeinandertreffen und einen definierten Druck aufeinander ausüben. Abschließend wird die Glasdurchführung mit dem Stahlgehäuse verschweißt (Abbildung 73).

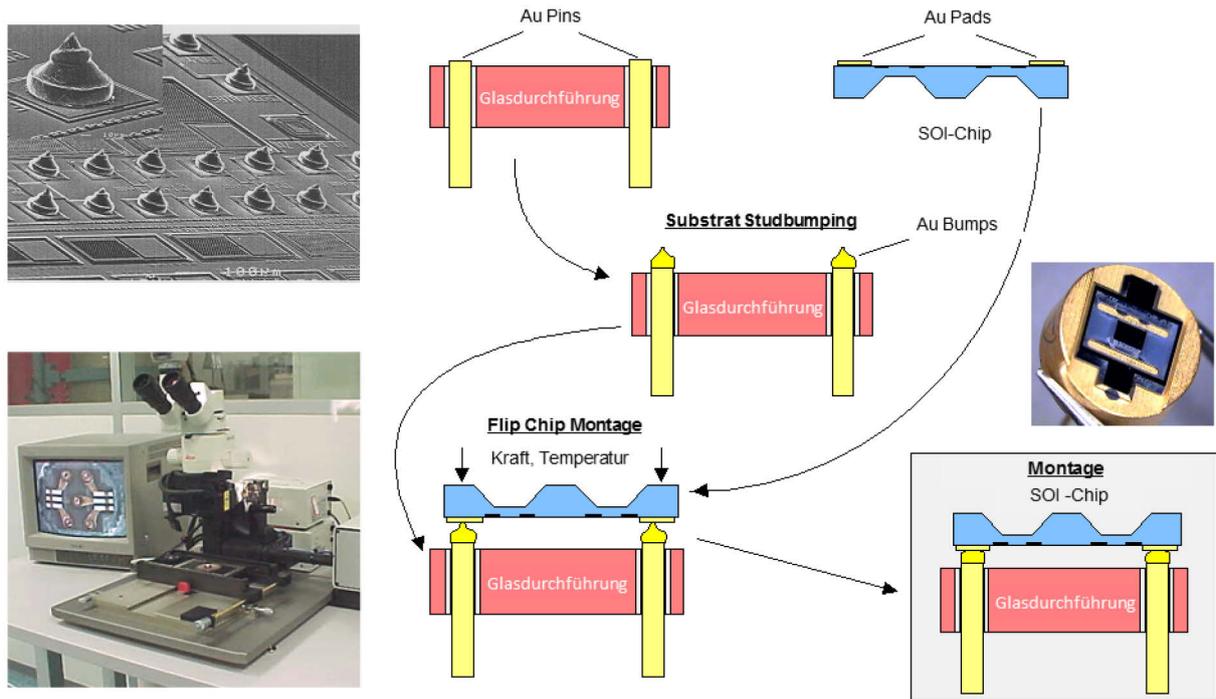


Abbildung 72: Flip-Chip-Prozess und Modul, Studbumps auf Chip (links oben), Flip-Chip-Bonder (links unten), Schematische Darstellung der Montage (rechts): Studbumping der Pins in der Glasdurchführung und Flip-Chip-Bonden des Sensorchips zum Modul

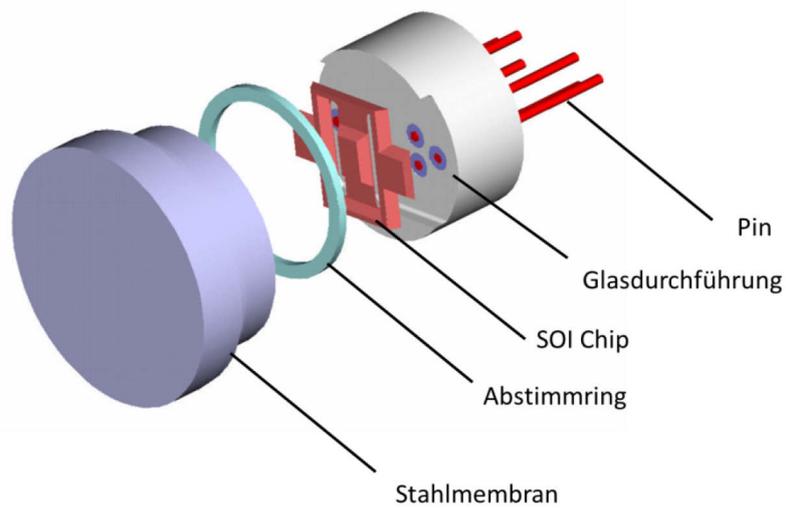


Abbildung 73: Packaging des Biegebalkenmoduls: Stahlmembran, Abstimmring, SOI-Sensorchipssocket mit Glasdurchführung

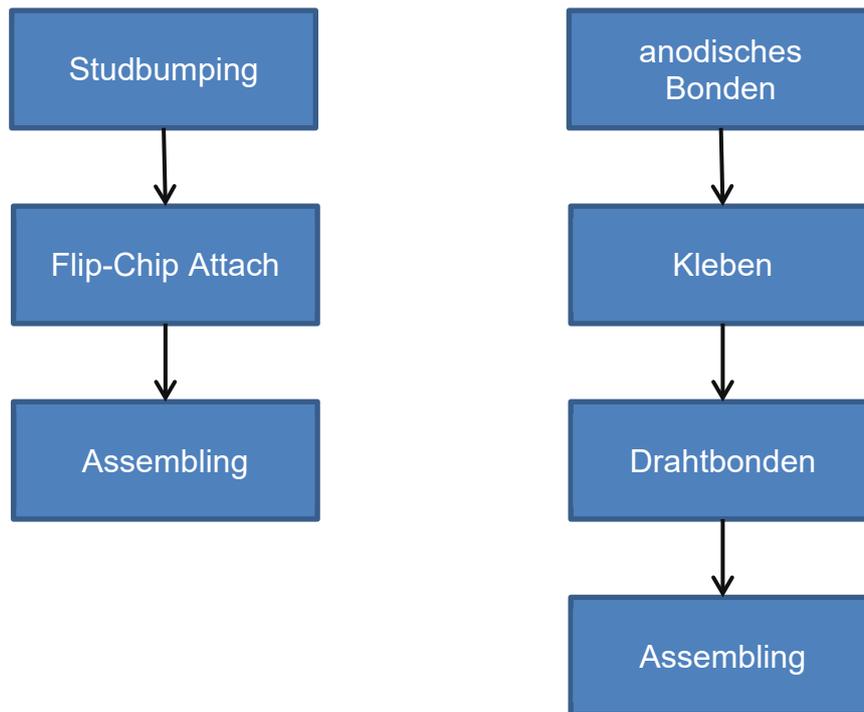


Abbildung 74: Gegenüberstellung des Prozessablaufes des neu entwickelten Sensors (links) im Vergleich zum konventionellen Ablauf (rechts)

Der oben beschriebene Aufbau unterscheidet sich somit deutlich von dem nach einem Sensorprinzip ohne Stahlmembran oder mit Stahlmembran und flüssigem Druckübermittler wie in der Einleitung beschrieben (Abbildung 26 und Abbildung 27).

6 Messungen und Untersuchungen

In Kapitel 6 werden die verschiedenen gefertigten Chiptypen vorgestellt. Diese Chips wurden jeweils einer messtechnischen Charakterisierung unterzogen. Anhand der Resultate konnte einerseits die Eignung der Chips für den Sensor-Einsatz geprüft werden und andererseits werden Grundlagen für die Weiterentwicklung und Optimierung der Chiptechnologie gewonnen.

Die Untersuchungen gliedern sich in Messungen am reinen Chip ohne Belastung, welche die Herstellungstechnologie charakterisieren und Messungen des Chipverhaltens bei Belastung, welche den Einsatz der Chips im Sensor untersuchen.

Der Sensor K4 (der Sensor mit den besten Charakteristiken) wurde als Inlet- und Outletsensor eines Verbrennungsmotors und bei einem Umformverfahren von Kunststoffteilen getestet.

6.1 Messaufbau

Die ersten Messungen finden auf Waferebene statt, wenn die Prozessierung bis auf das Vereinzeln der Wafer abgeschlossen ist (Abbildung 75)

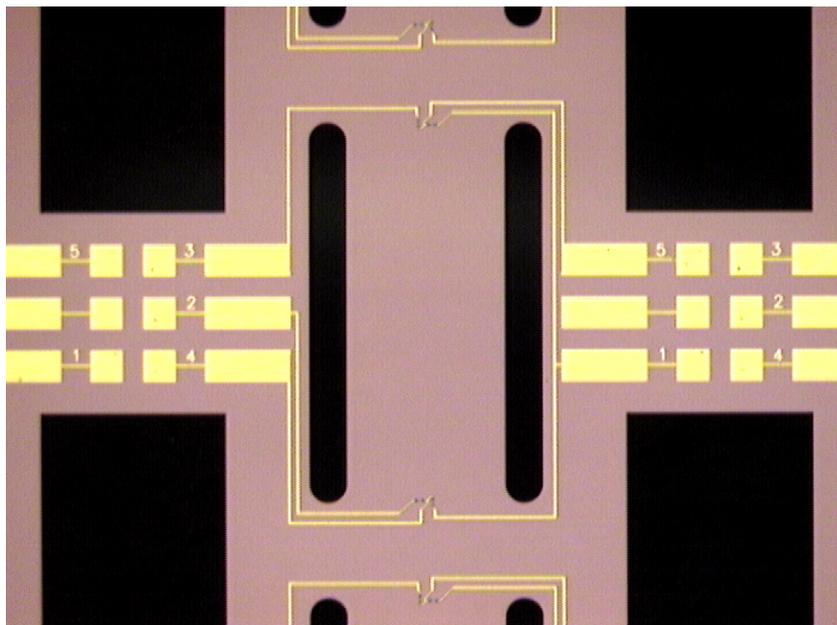


Abbildung 75: Aufsicht einer Waferteilfläche (entspricht einem Sensorchip) Die Messpads 1 bis 5 dienen der Kontaktierung auf Waferebene zur Bestimmung der Chipeigenschaften.

Diese Messungen werden im Reinraum an einem halbautomatischen Waferprober durchgeführt. Hier werden die reinen elektrischen Chip-Eigenschaften wie Exemplarstreuungen der Einzelwiderstände, des Brückenwiderstandes, des Offsets sowie jeweils deren Ohm'sches Verhalten charakterisiert. Stichprobenweise wird auch das Durchbruchverhalten (Leckstrom, also die Isolation der Piezowiderstände zum Substrat) gemessen, um die Güte des vergrabenen Oxids (BOX) zu beurteilen, welche insbesondere für Hochtemperatur-Anwendungen von essentieller Bedeutung ist. Durch die intensive Messung auf der Waferebene lassen sich Aussagen über die Prozesssicherheit bzgl. der elektrischen Basisdaten machen. Weiterhin dienen die Messungen als Prüfung vor der Auslieferung. Die zu erreichenden Chip-Spezifikationen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Liegen alle Chipdaten innerhalb dieser Toleranzen, wird der Chip als gut bewertet, liegen ein oder mehrere Werte außerhalb der Grenzen, ist der Chip als Ausschuss zu betrachten.

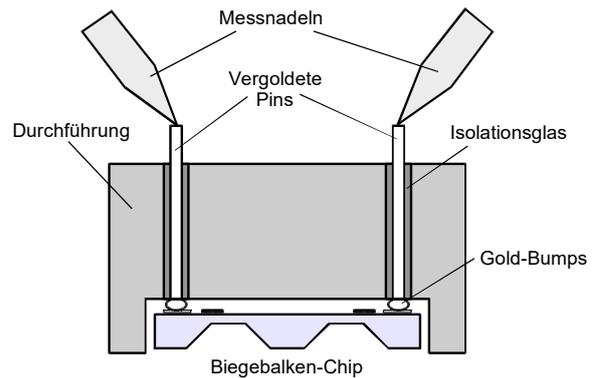
Tabelle 5: Spezifikationen für die Chips, Pin Anordnung, Messvorschriften

	Messgröße	Messpads	Speisepads	Speisung	Mess-Sollwert
1.	U_{14}	1 + 4	1 + 4	1 mA \pm 0,02 mA	3,25 V \pm 10%
2.	U_{15}	1 + 5	1 + 5	1 mA \pm 0,02 mA	3,25 V \pm 10%
3.	U_{24}	2 + 4	2 + 4	1 mA \pm 0,02 mA	3,25 V \pm 10%
4.	U_{35}	3 + 5	3 + 5	1 mA \pm 0,02 mA	3,25 V \pm 10%
5.	U_b	1 + 2/3	1 + 2/3	1 mA \pm 0,02 mA	3,25 V \pm 10%
6.	U_{off}	4 + 5	1 + 2/3	1 mA \pm 0,02 mA	0 \pm 20 mV
7.	Stichprobenweise Messung des Ohm'schen Verhaltens von $U_b(I)$ und $U_{off}(I)$		-2mA...+2 mA	linear	
8.	Stichprobenweise Messung des Leckstroms zwischen Pad 1 und Blindpad		100 V \pm 1 V	0 \pm 10 μ A	
9.	Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit		I = konstant	> 0	

Nach dem Vereinzeln der Wafer und dem Aussortieren der mangelhaften Chips werden aus den als gut bewerteten Chips mittels Flip-Chip-Technik sogenannte Biegebalkenmodule aufgebaut (Abbildung 76).



a)



b)

**Abbildung 76: a) Biegebalkenmodul (Chip mittels Flip-Chip-Technik auf ein Substrat gebondet)
b) Kontaktierung, schematisch dargestellt**

Nur so ist es möglich, auf Chipebene verlässliche elektrische Kenndaten zu ermitteln. Werden die Messnadeln des Probers direkt auf den Chip-Pads abgesetzt, so wird aufgrund des fragilen Chipdesigns schon allein durch diese Belastung der Chiprahmen geringfügig deformiert, was sich insbesondere bei der Messung des Offsets in instabilen Signalen äußert. Dies ist vor allem bei temperaturabhängigen Messungen kritisch, da sich Nadeldruck und/oder Nadelposition beim Aufheizen ändern. Auf einem entsprechenden Heizchuck wurden so einzelne Biegebalkenmodule bis 300°C messtechnisch charakterisiert.

Darüber hinaus ist natürlich nur an solchen Biegebalkenmodulen die Messung der Chip-Eigenschaften unter mechanischer Belastung möglich (Abbildung 77). So kann man verlässliche Aussagen über die Weg-Empfindlichkeit, Nichtlinearität sowie Überlastverhalten bzw. Bruchweg erhalten. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass der Chip durch seine spezielle Struktur ein reiner Weg- bzw. Kraftmesschip ist und erst später durch ein geeignetes Packaging als Drucksensor Anwendung findet.

Zur Bestimmung der Sensordaten unter Belastung wurde ein Piezoaktuator verwendet, der in Mikrometerschritten eine Auslenkung des Balkens bewirkt. Der Kontakt zum Center-Boss erfolgt über eine Keramikugel.

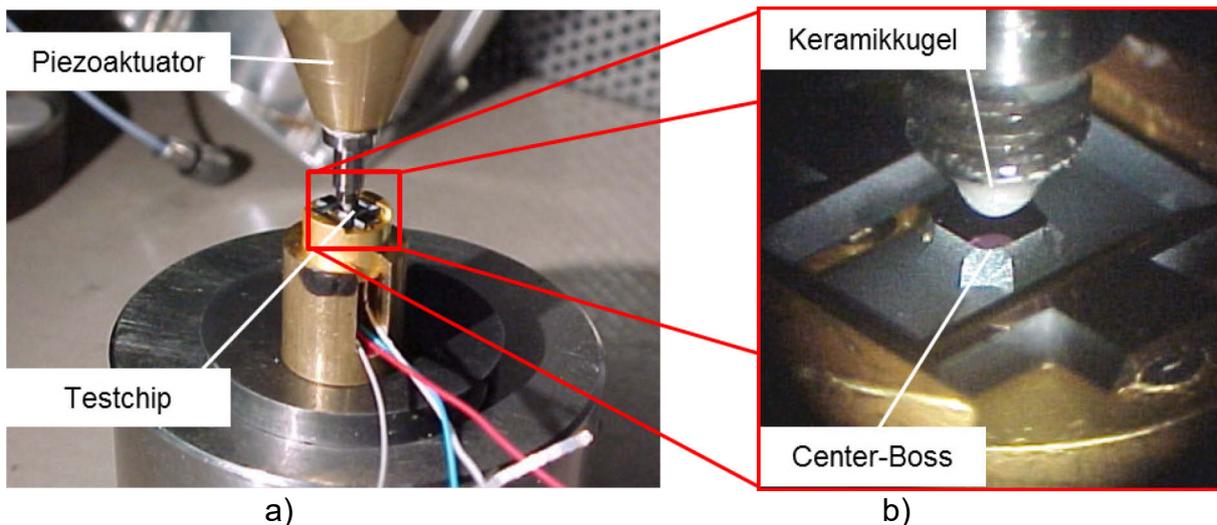


Abbildung 77: Charakterisierung auf Sensorebene
 a) Piezoaktuator zur definierten Auslenkung des Chips
 b) Detail aus a) Keramikugel des Piezoaktuators zur Übertragung der Kraft.

6.2 Messungen am unbelasteten Chip

6.2.1 Messungen auf Waferebene (auf dem Waferprober)

Eine erste Aussage über die elektrischen Eigenschaften der Sensorchips lässt sich nach der Strukturierung der Metallisierung machen. Das elektrische System aus implantiertem Silizium, Passivierung, Kontakten und Metallisierung ist vollständig hergestellt. Die nachfolgenden Schritte der Bulk-Strukturierung führen nicht mehr zu einer Veränderung der elektrischen Eigenschaften, können aber die Durchführung der elektrischen Messung erschweren. Die Messungen der prozessierten Wafer wurden an einem halbautomatischen Waferprober der Firma Elektroglass durchgeführt. Gemessen werden jeweils die vier Einzelwiderstände, der Brückenwiderstand sowie der Brückenoffset. Die so erhaltenen Rohdaten werden anschließend mit einem extra hierzu erstellten Programm ausgewertet, indem eine Übersicht („Mapping“) über den Wafer erstellt wird und die Messwerte in einem Histogramm dargestellt werden.

Abbildung 78 zeigt exemplarisch diese Auswertung des Brückenwiderstandes für einen Wafer. Die Messungen wurden bei einer Konstantstromspeisung mit 1 mA durchgeführt.

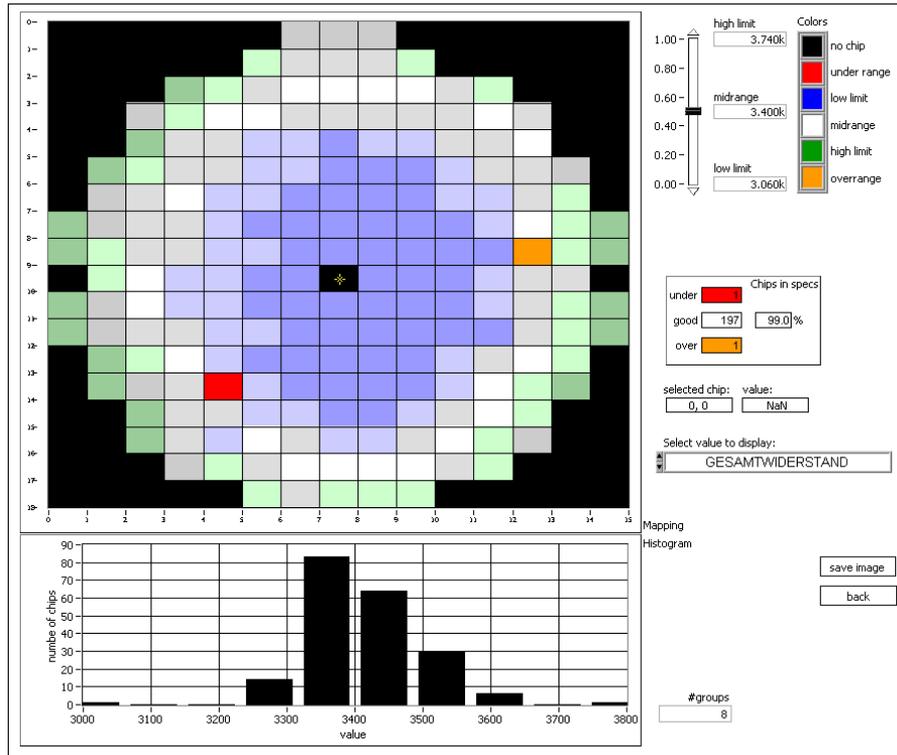


Abbildung 78: Mapping und Histogramm des Brückenwiderstandes eines typischen Wafers (Analysesoftware: MAT/TU Berlin)

Der Mittelwert des Brückenwiderstandes liegt bei $3408 \Omega \pm 87 \Omega$ und damit sehr gut innerhalb der geforderten Grenzen von $3250 \Omega \pm 325 \Omega$ (vgl. Tabelle 6). Abbildung 79 zeigt den Mittelwert des Brückenwiderstandes sowie dessen Standardabweichung für zehn prozessierte Wafer. Die durchschnittliche Ausbeute liegt bei 99 %.

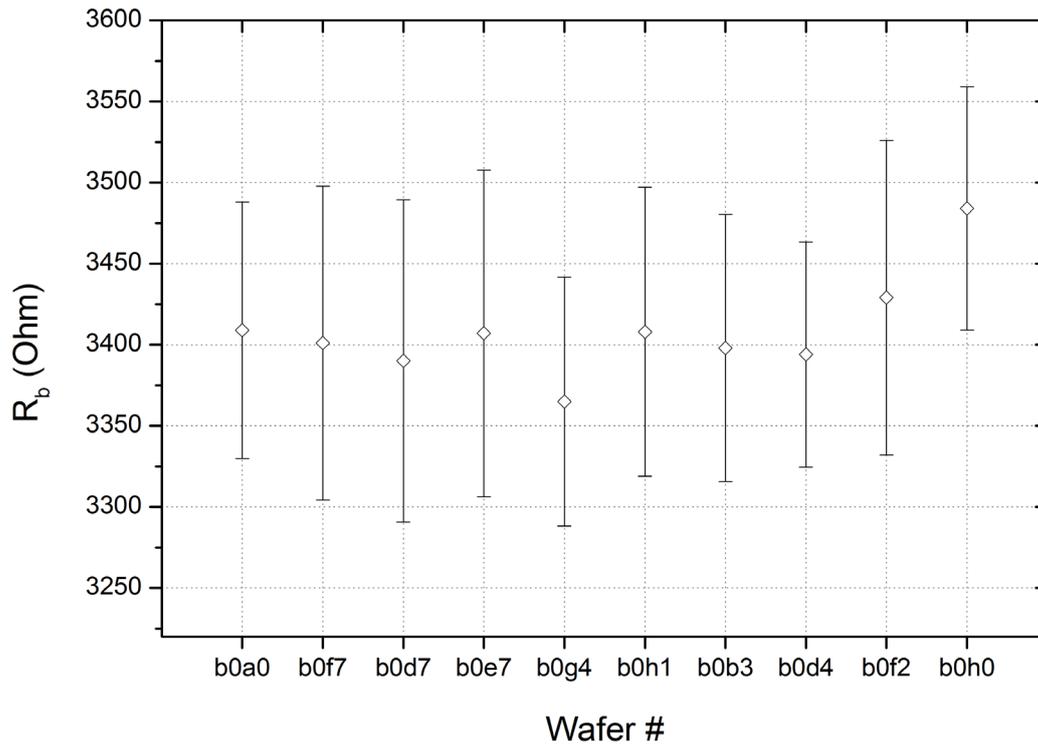


Abbildung 79: Mittelwerte und Standardabweichungen des Brückenwiderstandes für zehn prozessierte Wafer des K4 Sensors.

Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen eine entsprechende Waferauswertung bzgl. des Brückenoffsets.

Der Mittelwert liegt bei $2 \text{ mV} \pm 10 \text{ mV}$. Bzgl. des Offsets liegt die Ausbeute bei 96 % (Anforderung $-20 \text{ mV} \dots 20 \text{ mV}$; vgl. Tabelle 6).

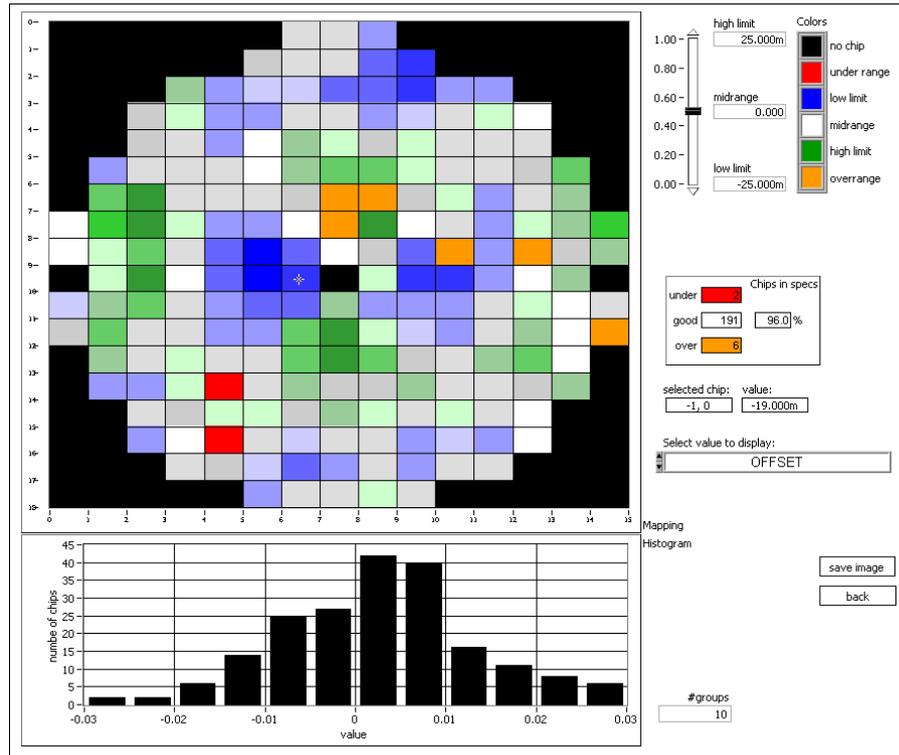


Abbildung 80: Mapping und Histogramm des Brückenoffsets eines typischen Wafers

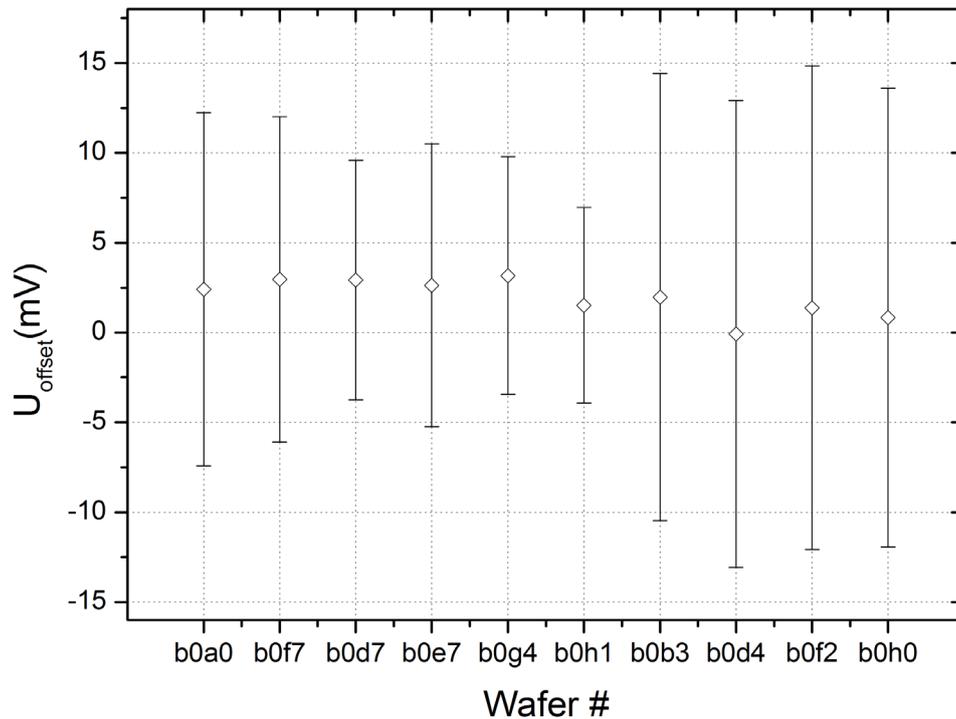


Abbildung 81: Mittelwerte und Standardabweichungen des Offsets für zehn prozessierte Wafer des K4-Sensors

6.2.2 Messungen an Einzelchips

Nach diesen Messungen auf Waferebene werden die Wafer vereinzelt und die „known good dies“-Chips aussortiert. Wie bereits erwähnt, wird die Bestimmung der elektrischen Chipdaten nicht an den Chips selber durchgeführt, da diese durch ihre fragile Struktur schon allein beim Aufsetzen der Messnadeln undefinierte Signale generieren, insbesondere bei temperaturabhängigen Messungen. Aus diesem Grund werden mittels Flip-Chip Technik (Thermokompressions-Verfahren) sogenannte Biegebalkenmodule hergestellt, an denen verlässliche Messungen durchgeführt werden können (Abbildung 76).

Ohm'sches Verhalten (K4)

Das ohmsche Verhalten wurde an den Biegebalkenmodulen mit Messfühlern bestimmt.

Abbildung 82 zeigt das Ergebnis für den Brückenwiderstand und das Offsetsignal in Abhängigkeit von Speiseströmen zwischen -1 mA und $+1\text{ mA}$. In der oberen Graphik ist der Brückenwiderstand R_b für zwei K4 Sensoren, E1 und E2, dargestellt. Der Widerstand der zwei Chips weicht um ca. $100\ \Omega$ (3%) voneinander ab. Die Abhängigkeit von R_b vom Speisestrom ist jedoch gering. Sie bewegt sich in einem Intervall von $20\ \Omega$ (0,6 %) und folgt für beide Sensoren qualitativ sehr ähnlichen Kurven. Dies drückt sich in einer maximalen Abweichung des Kurvenverlaufs in der Größenordnung von nur 0,15 % aus.

Die zweite Graphik zeigt das Offsetsignal für diese beiden Sensoren. Um die Abweichungen vom linearen Verhalten herauszustellen, wird das Offsetsignal durch den Speisestrom dividiert und der so berechnete Widerstand dargestellt. Er weicht für die zwei Chips um $2,25\ \Omega$ voneinander ab und liegt auch innerhalb des Offsetintervalls von $2\text{ mV} \pm 10\text{ mV}$ in Abbildung 82. Die Abhängigkeit des Offsetwiderstandes vom Speisestrom ist extrem gering. Sie bewegt sich in einem Intervall von 0,1 bzw. $0,2\ \Omega$ (4 %) und hat für beide Sensoren die gleiche Neigungsrichtung. Die damit bestimmte Linearität ist gut und wird von den Ungenauigkeiten der Stromquelle, der Messgeräte sowie den Einflüssen der Messfühler überlagert. Die verschiedenen Kontaktstellen in Serie (Leiterbahn – Piezowiderstand, Pad-Bump, Bump-GDF Pin) zeigen ein sehr gutes Ohmsches Verhalten. Sowohl Brückenwiderstand als auch der Offsetwiderstand sind quasi unabhängig vom angelegten Strom.

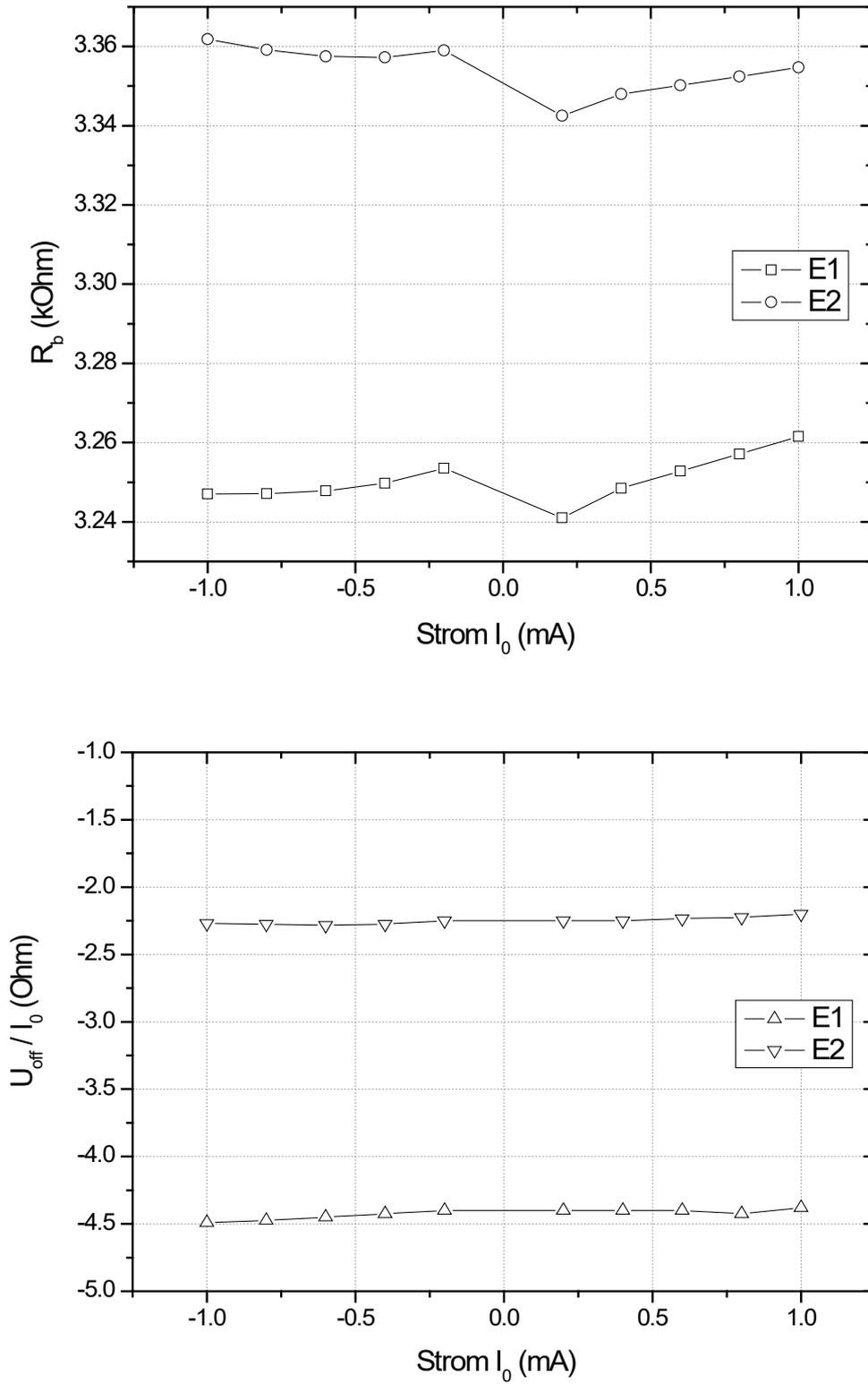


Abbildung 82: Brückenwiderstand (oben) und Offset (unten) als Funktion des Speisestroms

Temperaturkoeffizient des Widerstands (TKR) (K4)

Auf einem Heizchuck wurde an den Biegebalkenmodulen ebenfalls der Temperaturkoeffizient des Brückenwiderstandes (TKR) im Temperaturbereich zwischen 25°C und 200 °C für einen Speisestrom von 1 mA bestimmt. Die in Abbildung 83 an zwei exemplarischen Modulen gezeigte Kurve entspricht einem TKR von 31 % / 100 °C. Dieser Wert war anhand der dotierungsabhängig durchgeführten Messungen am SOI-Ausgangsmaterial zu erwarten. Dieser relativ hohe TKR ist von großer Bedeutung, da die Sensoren später mit Konstantstrom betrieben werden und der Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit (TKE) im gesamten Temperaturbereich positiv und gut analog kompensierbar sein muss. Aufbaubedingt konnte bei diesem Test nur eine Maximaltemperatur von 200°C angefahren werden. Im folgenden Kapitel werden aber auch Versuche bis 300°C und darüber vorgestellt.

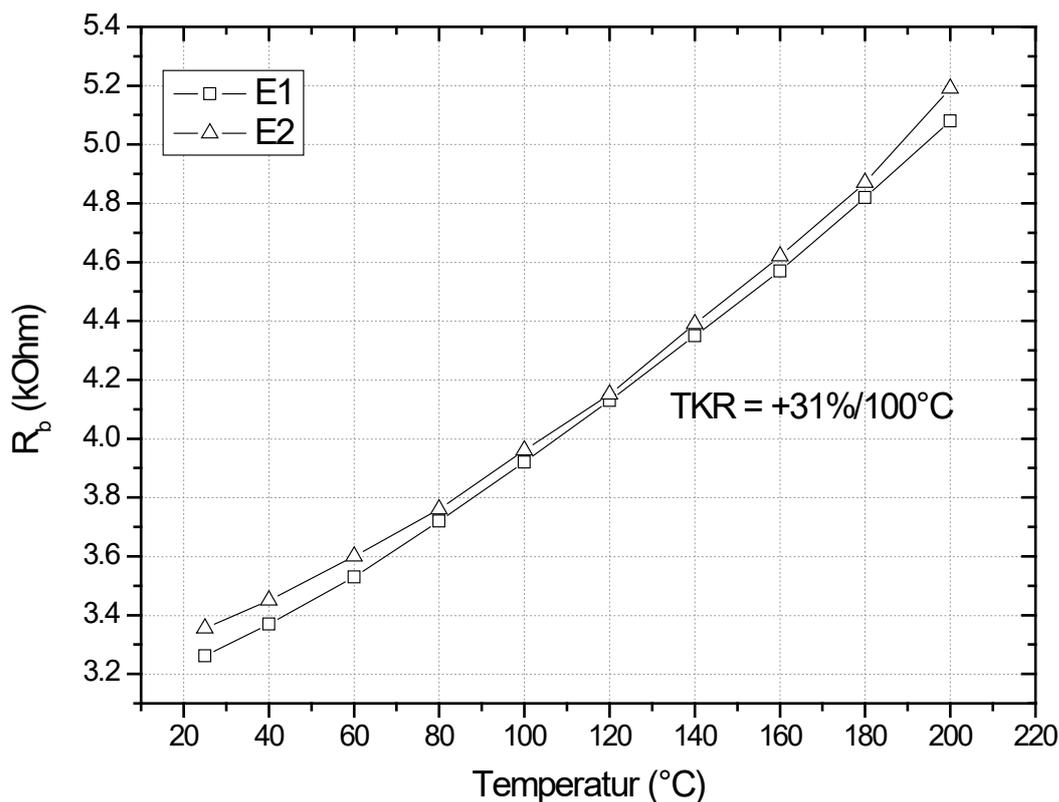


Abbildung 83: Temperaturverlauf des Brückenwiderstandes für Modul E₁ und E₂. Der TKR liegt bei +31 %/100 °C im Bereich zwischen 25°C und 200 °C.

Temperaturkoeffizient des Offsets (TKO)

Der Temperaturkoeffizient des Offsets (TKO) ist einer der am schwierigsten vorhersagbaren Parameter eines piezoresistiven Bauelements, insbesondere wenn dieses - wie in unserem Fall - bereits (teil-)verpackt ist. Der TKO wird in der Anwendung in der Regel von der Aufbau- und Verbindungstechnik dominiert, in unserem Fall also von dem verwendeten Substratmaterial der Durchführung. Neben den dominierenden Aufbaueinflüssen hat der Chip selber einen TKO. Dieser wurde, trotz der beschriebenen Schwierigkeiten mit den Einflüssen der Messnadeln, auf dem Heizchuck gemessen, wobei versucht wurde, die Einflüsse des Chucks und der Messnadeln zu minimieren. Die in Abbildung 84 dargestellten Ergebnisse ergeben für einen Konstantstrom von 1 mA einen TKO von 0,07 mV/K. Da die Temperaturgenauigkeit und -homogenität auf dem Heizchuck insbesondere für Messungen bei hohen Temperaturen recht ungenau ist, wurde gleichzeitig der Brückenwiderstand aufgenommen (welcher ein eindeutiges Maß für die tatsächliche Chiptemperatur und nicht die Chucktemperatur ist) und das Offsetsignal über dieser Brückenspannung aufgetragen. Der Offset steigt um ca. 7 mV/100K.

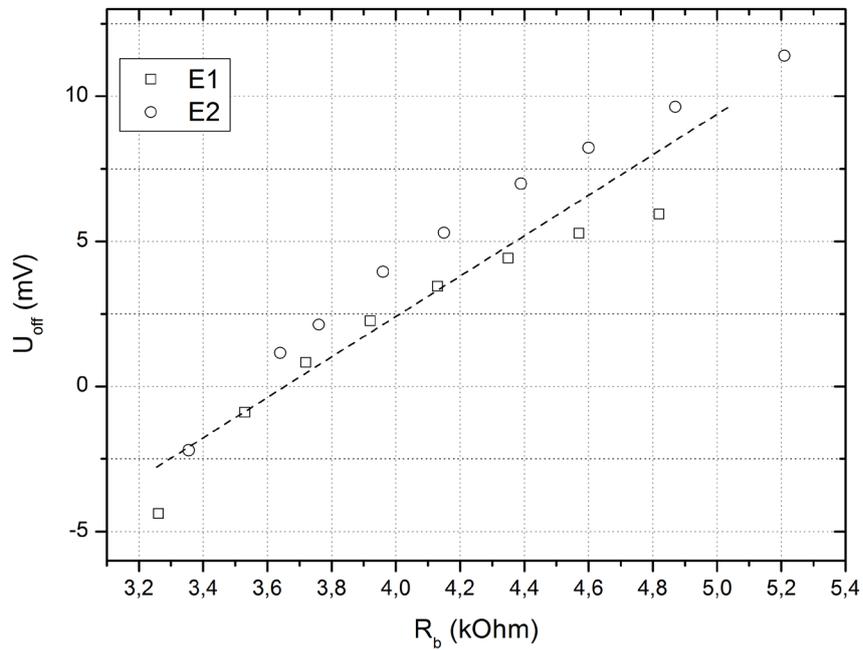
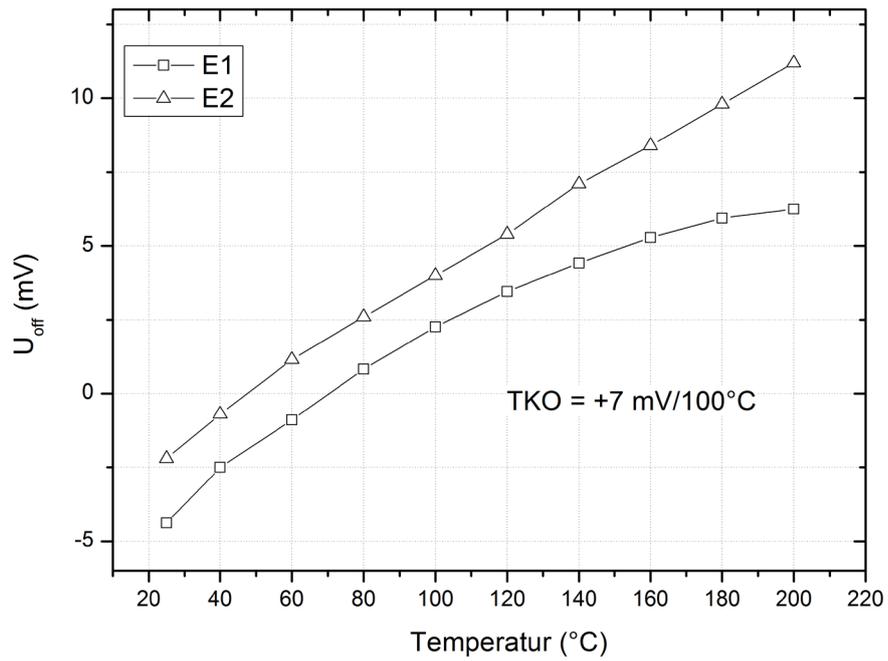


Abbildung 84: Temperaturabhängigkeit des Offsets. Dargestellt ist der Verlauf der Offsetspannung in Abhängigkeit der Chuck-Temperatur (oben) und als Funktion des jeweiligen Brückenwiderstandes (unten).

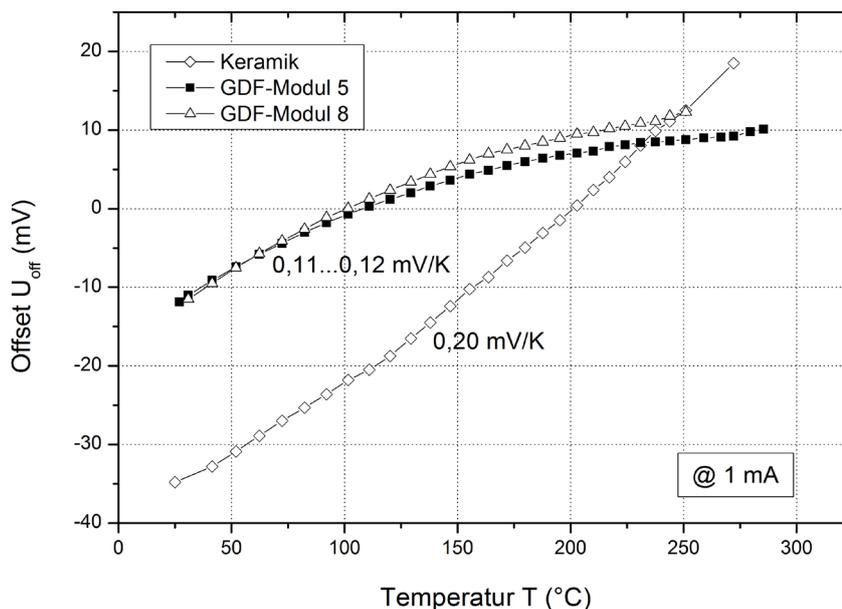


Abbildung 85: Abhängigkeit des Offsets vom Substratmaterial der Durchführung. Der temperaturabhängige Offset wird maßgeblich durch thermischen Stress induziert.

Unbeschadet der Tatsache, dass die Langlöcher (Schlitze) im Sensorchip die Balken mit den Piezowiderständen recht effektiv vom Chiprahmen mit den Anschluss pads entkoppeln, wurden zwei Materialvarianten für den Sensorsockel getestet. So konnte geprüft werden, ob eine Glasdurchführung (GDF) aus einer an das thermische Verhalten von Silizium angepassten Ausdehnungslegierung gegenüber einer Keramikdurchführung (Al_3O_2) eine signifikante Verbesserung der Temperaturstabilität der Offsetspannung bewirken könnte.

An der Gegenüberstellung der Temperaturabhängigkeit des Offsets für beide Materialien (Abb. 85) erkennt man den Einfluss der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Substratmaterialien deutlich. Die thermisch induzierten Spannungen erzeugen eine Temperaturabhängigkeit des Offsets, welche mehr oder weniger stark vom Verhalten des Chips allein abweicht. Für das Keramiksubstrat ergibt sich ein TKO von ca. $0,2 \text{ mV/K}$, während die Glasdurchführung nur einen TKO von $0,11$ bis $0,12 \text{ mV / K}$ aufweist. Als Konsequenz wurden für den Sensoraufbau nur Glasdurchführungen aus dem entsprechenden Substratmaterial verwendet. Verglichen mit dem „eigenen“ Offset des Chips von $0,07 \text{ mV/K}$ ist der TKO des Gesamtaufbaus mit der Glasdurchführung ($0,12 \text{ mV/K}$) nicht sehr viel größer, so dass man einen geringeren aufbaubedingte TKO in der gleichen Größenordnung

annehmen kann. Wenn berücksichtigt wird, dass die Sensoren später so ausgelegt werden, dass ein FSO (Full Scale Output) von ca. 150 mV resultiert, dann liegt der TKO für eine Temperaturänderung von 100°C unter 10 %FSO.

Stabilität

Eine für die Anwendung sehr wichtige Eigenschaft des Drucksensors ist die Signalstabilität. Alle bisher untersuchten Einflüsse auf das Ausgangssignal sind bereits vor dem Einsatz bestimmbar und können daher durch eine angepasste Elektronik kompensiert werden. Unterliegen einige dieser Faktoren jedoch einer Langzeitdrift, so bedeutet dies eine zunehmende Signalverfälschung, die nicht vorhersehbar und damit nicht kompensierbar ist.

Signaldriften sind das Ergebnis einer Vielzahl von Faktoren, die sich grob in elektrische und mechanische Faktoren unterscheiden lassen. Elektrische Driftursachen können z.B. aktive Störstellen im Halbleiter sein, die durch langfristiges Be- oder Entladen die Feldverteilung und damit den elektrischen Widerstand verändern. Wesentlicher sind zumeist mechanische Driftursachen. Durch die Veränderung von mechanischen Spannungen im Schichtsystem, insbesondere im Metallaufbau ändert sich die Spannungsverteilung im Chip und durch die piezoresistiven Eigenschaften der Silizium-Widerstände das Ausgangssignal des Sensorchips. Darüber hinaus tragen natürlich auch hier mechanische Spannungen, die über das Packaging (hier Glasdurchführung und Flip-Chip-Verbindung) auf den Chip übertragen werden und sich mit der Zeit ändern, zu einer Drift der Sensorsignale bei.

Es liegt im Wesen mechanischer Spannungen in Materialverbänden, dass sie stark temperaturabhängig sind, einerseits der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten wegen, andererseits aufgrund der zunehmenden Plastizität des Metalls.

Zur Untersuchung der Driften wurden an drei Biegebalkenmodulen der Typen K4, K3 und K4b Langzeituntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die Sensoren für unterschiedliche Zeitspannen verschieden hohen Temperaturen (maximal 320°C) ausgesetzt, und anschließend bei 23°C der Brückenwiderstand und der Offset kontrolliert. Diese Messung dient nicht nur der Untersuchung der Langzeitstabilität der Module, sondern gleichzeitig der Bestimmung der maximalen Betriebstemperatur. Die

Messung macht aber keine Aussage über die Stabilität bei hohen Temperaturen. Die Messungen werden immer bei Raumtemperatur durchgeführt.

Die Ergebnisse der Driftuntersuchung der Brückenspannung sind in Abbildung 86 dargestellt. Im Wesentlichen kehren die Messwerte nach der Temperaturbelastung in ausreichendem Maße zum Ausgangswert zurück. Der Sprung nach der 20 Minuten dauernden Temperaturbelastung bei 300°C ist als nicht reproduzierbarer Effekt zu betrachten, da er sich bei anderen Belastungsschritten nicht wiederholt. Die thermische Überlast von 320°C wurde am Ende des Alterungsprozesses zweimal (für je 2 h) angefahren, um erste Erfahrungen mit der thermischen Chipstabilität zu sammeln. Die leichte Steigerung des Brückensignals beim K3 scheint eine Systematik aufzuweisen. Dieser Chip besitzt eine Aluminium-Metallisierung, welche für diesen Effekt verantwortlich sein könnte. Zusammenfassend sind die Signale aber sehr stabil und erfüllen die Anforderung. Eine systematische Untersuchung mit einer großen Anzahl an Modulen wurde nicht durchgeführt, da Priorität auf den Praxistest gelegt wurde, bei welchem auch bei erhöhten Temperaturen gemessen wird.

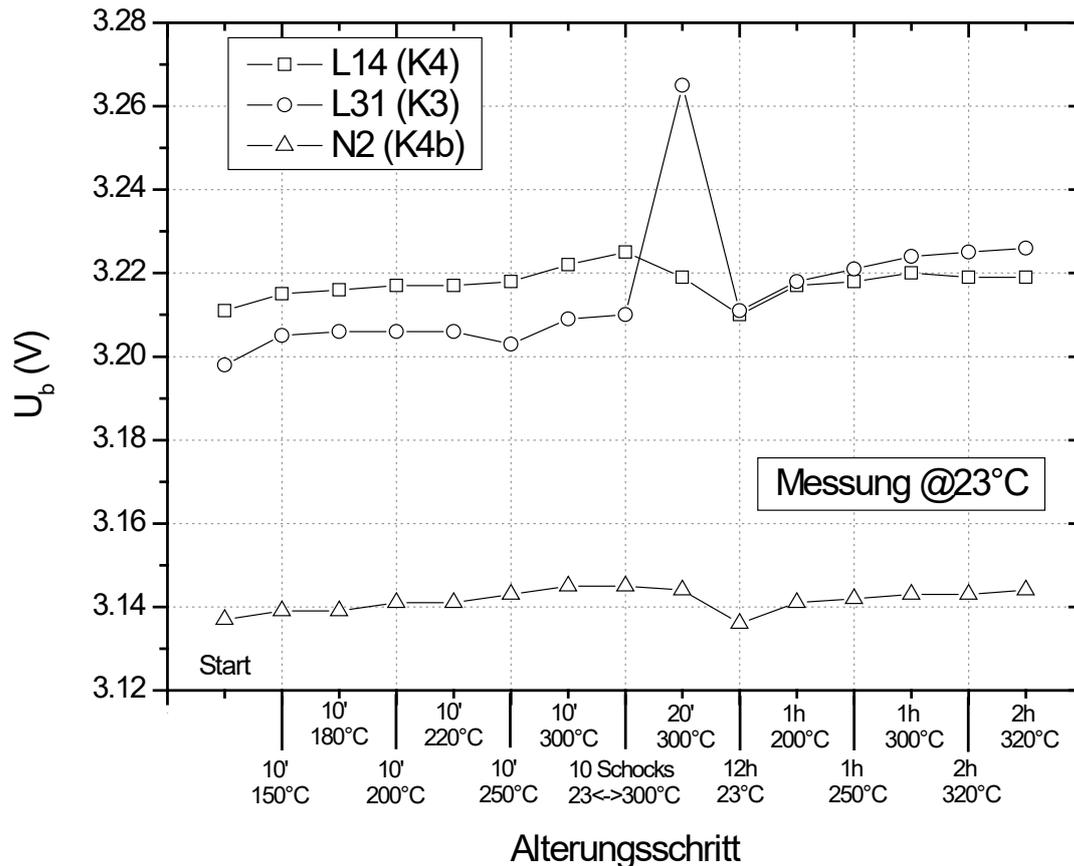


Abbildung 86: Stabilität der Brückenspannung. Durchgeführt wurde eine Reihe von anwendungsnahen Temperaturschritten.

Die Betrachtung der Offsetdrift ist für die Anwendung von größerer Bedeutung, da sie viel empfindlicher auf Instabilitäten reagiert und direkt in das Ausgangssignal einfließt. Diese Messungen sind in Abbildung 87 dargestellt. Innerhalb der Messgenauigkeit von ca. 1 – 2 mV können die Sensoren als hinreichend stabil betrachtet werden. Der Sensor des Typs K4 weist jedoch eine Drift von insgesamt etwa 2 mV auf. Der Unterschied der untersuchten Module besteht in der Metallisierung und Metallisierungsbehandlung. Der K3 Sensor hat eine „einfache“ Aluminium-Metallisierung, die beiden anderen Sensoren benutzen den Metallverbund aus TiWN und Gold, wobei der K4 noch nicht der RTA-Behandlung unterzogen wurde. Ob dieser Unterschied für die unterschiedlichen Driften der drei untersuchten Module verantwortlich ist, kann aufgrund der Messgenauigkeit des verwendeten Aufbaus nicht eindeutig geklärt werden. Als Resümee wurde für die nachfolgend hergestellten Module die sowohl hochtemperaturtaugliche als auch langzeitstabile Metallisierung des K4b mit RTA-Temperung verwendet.

Innerhalb des Anwendungstemperaturbereichs entspricht dieser Typ hinreichend gut den Anforderungen. Weitere Untersuchungen am Modul selber werden hier nicht durchgeführt, weil das Packaging einen großen Einfluss auf die Signaldriften hat und daher aussagekräftige Untersuchungen erst am kompletten Drucksensor sinnvoll sind. Zudem liegen für diese Untersuchungen standardisierte Testprozeduren vor, mit welchen nicht nur der Einfluss von Temperatur-, sondern auch Druckbelastungen simuliert werden können.

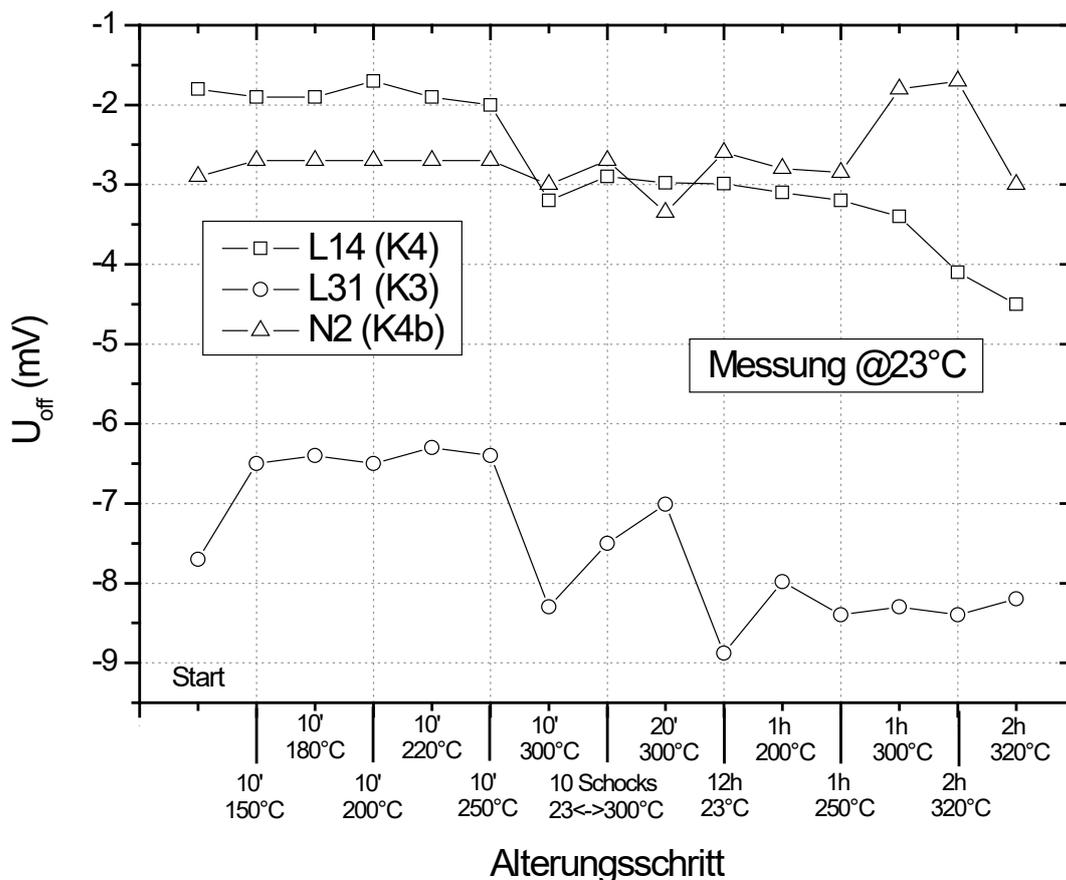


Abbildung 87: Stabilität des Brückenoffsets. Durchgeführt wurde die gleiche Abfolge von Temperaturschritten wie in Abbildung 87

6.3 Messung der Weg-Empfindlichkeit

Aufgrund der speziellen Chip-Struktur ist es nicht möglich eine Druck-Empfindlichkeit zu messen. Es kann lediglich eine Weg-Empfindlichkeit bzw. Kraft-Empfindlichkeit bestimmt werden. Erst durch die entsprechende Verpackung mit Stahlmembran kann ein Drucksensor hergestellt und dessen Eigenschaften unter Druckbelastung bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Weg-Empfindlichkeit wurden die anfangs beschriebenen Messungen mit dem Piezoaktuator durchgeführt (siehe Abbildung 77). Hierfür werden die Biegebalken-Module in eine geeignete Halterung eingebaut und die Signale über angelötete Litzen herausgeführt. Mit einer Keramikkugel wird in $2\ \mu\text{m}$ Schritten der Weg des Chip-Center-Boss erzwungen, und das Brückenspannungs- und Ausgangssignal werden in Abhängigkeit des Wegs aufgezeichnet. Die Steigung der so erhaltenen Gerade ist gleich der Wegempfindlichkeit des Chips (Abbildung 88). Für die verschiedenen hergestellten Chips wurden Wegempfindlichkeiten zwischen $12\ \text{mV}/\mu\text{m}$ und $30\ \text{mV}/\mu\text{m}$ gemessen (jeweils bei Speisung mit $1\ \text{mA}$). Diese Empfindlichkeiten können über die Größe des Center-Boss bzw. die Balkendicke eingestellt werden (siehe FEM-Kapitel). Die Abweichung vom idealen linearen Zusammenhang zwischen Signal und Weg wird durch die Nichtlinearität beschrieben. Diese wird mittels der End-Punkt-Methode [1] ausgewertet, die als die maximale Abweichung der Messwerte von der idealen Geraden durch den Nullpunkt und das Spannsignal bei Vollbelastung (FSO = Full Scale Output) bezogen auf den FSO definiert ist.

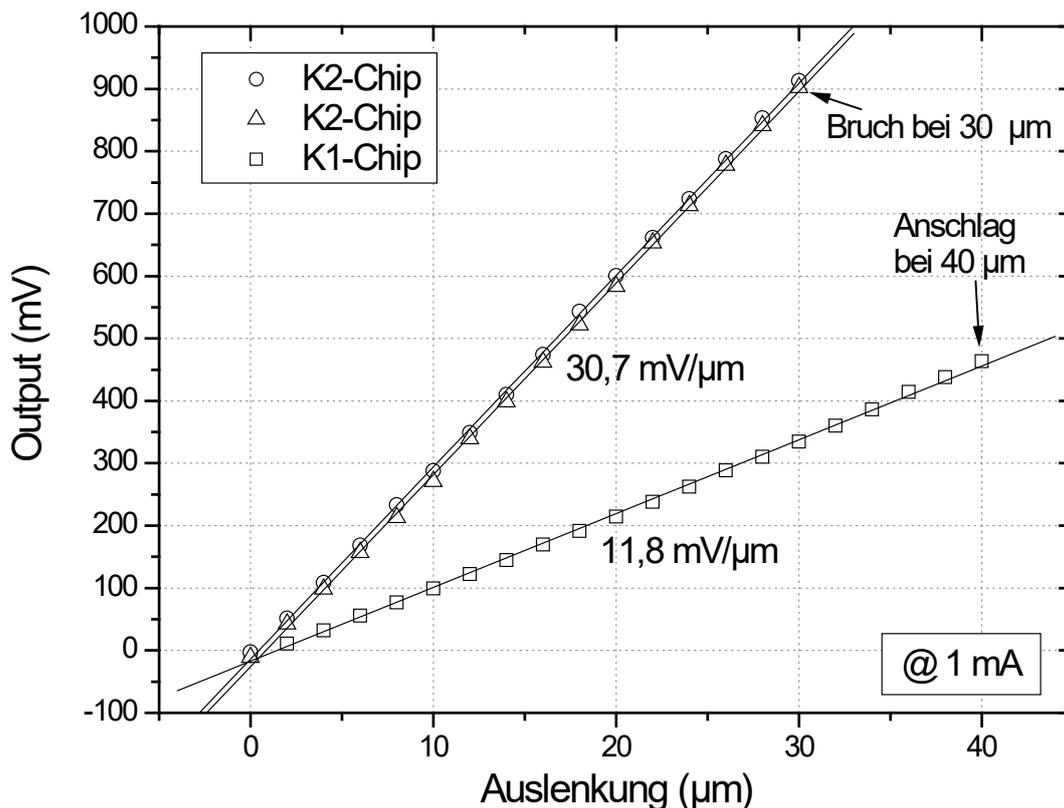


Abbildung 88: Abhängigkeit des Ausgangssignals verschiedener Chips von der Auslenkung, die zwei K2-Chips brechen bei 30 µm Auslenkung, K1 ist bei 40 µm am Anschlag

Der beim K2-Chip gemessene Bruchweg von nur 30 µm ist zu gering, da die Gefahr der Zerstörung bei der komplizierten Montage besteht. Zusätzlich ist die Weg-Empfindlichkeit beim K1-Chip mit knapp 12 mV/µm zu gering für ein ausreichend hohes FSO. Aus diesem Grund wird mit dem K4-Chip ein Kompromiss zwischen großem Bruchweg und hoher Empfindlichkeit gewählt. Durch entsprechende Geometrieanpassungen wird mit dem K4-Chip bei einer Weg-Empfindlichkeit von ca. 18 mV/µm ein Bruchweg von ca. 70 µm erzielt (siehe Abbildung 89). Der negative Linearitätsfehler beträgt ca. -1 %FSO, wenn man davon ausgeht, dass der Chip um 10 µm vorgespannt wird und der Arbeitsbereich zwischen 10...25 µm liegt.

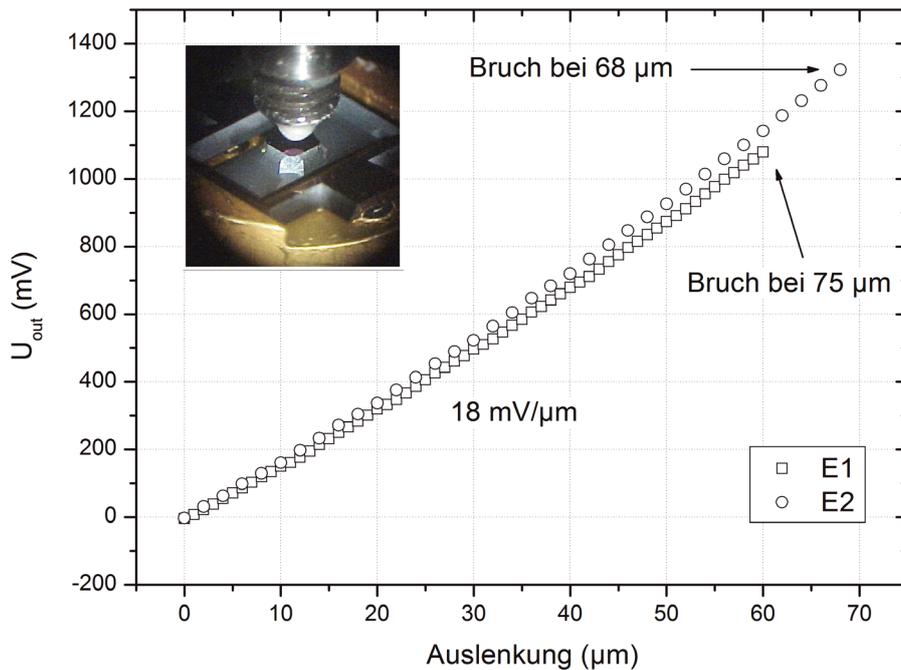


Abbildung 89: Weg-Empfindlichkeit und Bruchweg des K4-Chips in $\text{mV}/\mu\text{m}$

Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Temperatur ist in Abbildung 90 dargestellt. Der TKE beträgt ca. $+11\%/100^\circ\text{C}$. Der TKE wird mit der folgenden Formel berechnet.

$$TKE = \frac{E(300^\circ\text{C}) - E(25^\circ\text{C})}{E(25^\circ\text{C}) \cdot \Delta T} \cdot 100\% \quad (\text{Gleichung: 4})$$

Wie gefordert ist der TKE bei Konstantstromspeisung über den ganzen Temperaturbereich positiv und annähernd linear, so dass er gut analog kompensierbar ist.

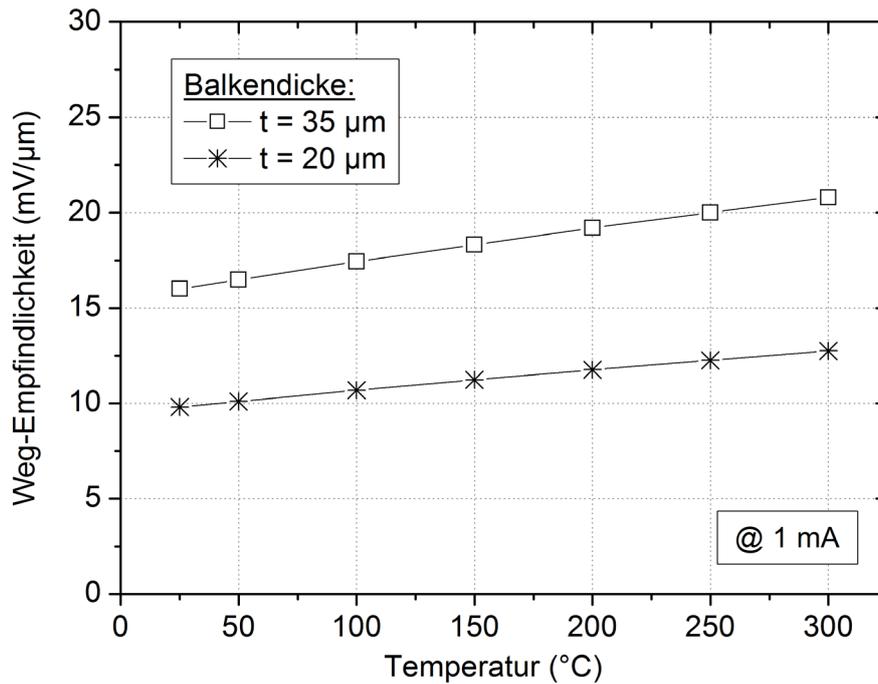


Abbildung 90: Temperaturabhängigkeit der Weg-Empfindlichkeit bei zwei verschiedenen Membrandicken

6.4 Messung des Bruchverhaltens

Für die Bestimmung der Bruchdehnung wurde die Auslenkung schrittweise gesteigert, bis der Chip zerstört wurde (siehe Abbildung 89 und Abbildung 88). Dies geschieht in der Regel durch Rissbildung an der Membrankante, wie es anhand der FEM-Simulationen zu erwarten war. Abbildung 91 zeigt beispielhaft einen solchen Riss.

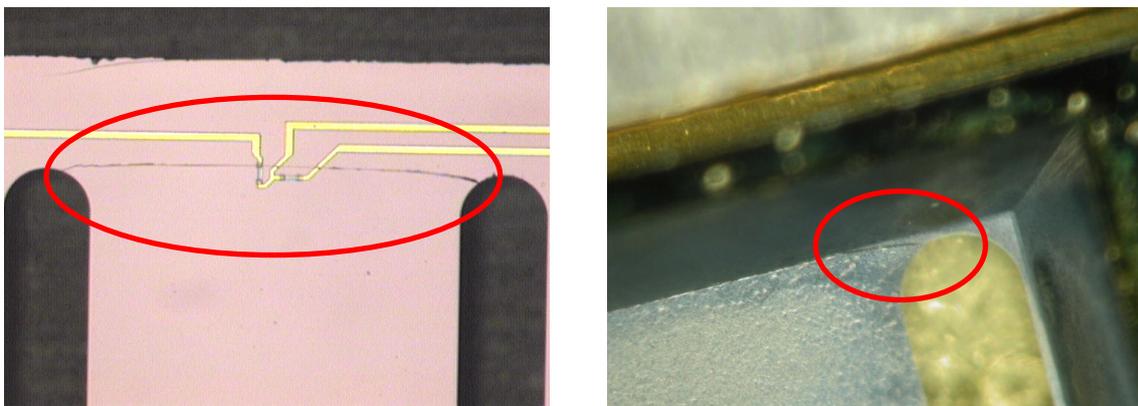


Abbildung 91: Rissbildung an der Membrankante bei Überlast (links: Ansicht von der Oberseite, rechts: Ansicht von der Unterseite)

Bezüglich der Überlastfähigkeit wird vom Gesamtsystem gefordert, dass es eine Belastung mit dreifachem Nenndruck übersteht. Entsprechend bedeutet dies für den Chip, der beim spezifizierten Maximaldruck eine Wegauslenkung von 10...15 μm erfährt, dass er Auslenkungen von mindestens 60 μm überstehen muss, wobei eine maximale Auslenkung von 10 μm durch die Vorspannung berücksichtigt wurde. Aus diesem Grund wurde der K2-Chip (siehe Abbildung 88) trotz hoher Weg-Empfindlichkeit als nicht geeignet beurteilt und es wurde der neue K4-Chip mit Bruchwegen von ca. 70 μm entwickelt (siehe Abbildung 89).

Dieser Wert, der etwas höher ist als gefordert, ist insbesondere deshalb von Bedeutung, weil das Bruchverhalten (vergl. Kap. 3) von spröden Bauteilen eine Eigenschaft ist, die erfahrungsgemäß großen Streuungen unterliegt. Dies hat sich auch in den durchgeführten Messungen bestätigt. Abbildung 92 zeigt die Signal/Weg-Kurven für verschiedene Sensorchips, die zu verschiedenen Zeiten, (aber mit gleicher Geometrievorgabe) hergestellt wurden. Die ermittelten Werte für den Bruchweg liegen zwischen 44 μm und 92 μm . Geometrieschwankungen, wie sie z.B. bezüglich der Membrandicke denkbar wären, scheiden als Erklärung für diese großen Unterschiede aus. Die Ursache ist viel mehr in dem speziellen Zwei-Stufen-Ätzprozess zu suchen (s. Abschn. 4.3), der dem Erhalt der Ecken des Center-Boss und dessen Referenzgröße von 1 mm \times 1 mm dient. Die K4 und K5-Module (Abbildung 93), die aus diesem Grund so geätzt wurden, weisen im Gegensatz zu den K1-Modulen (Abbildung 93) wesentlich rauere Ätzflächen auf, die an der Membrankante Risskeime bilden können, so dass sich eine stärkere Streuung des Bruchweges ergibt.

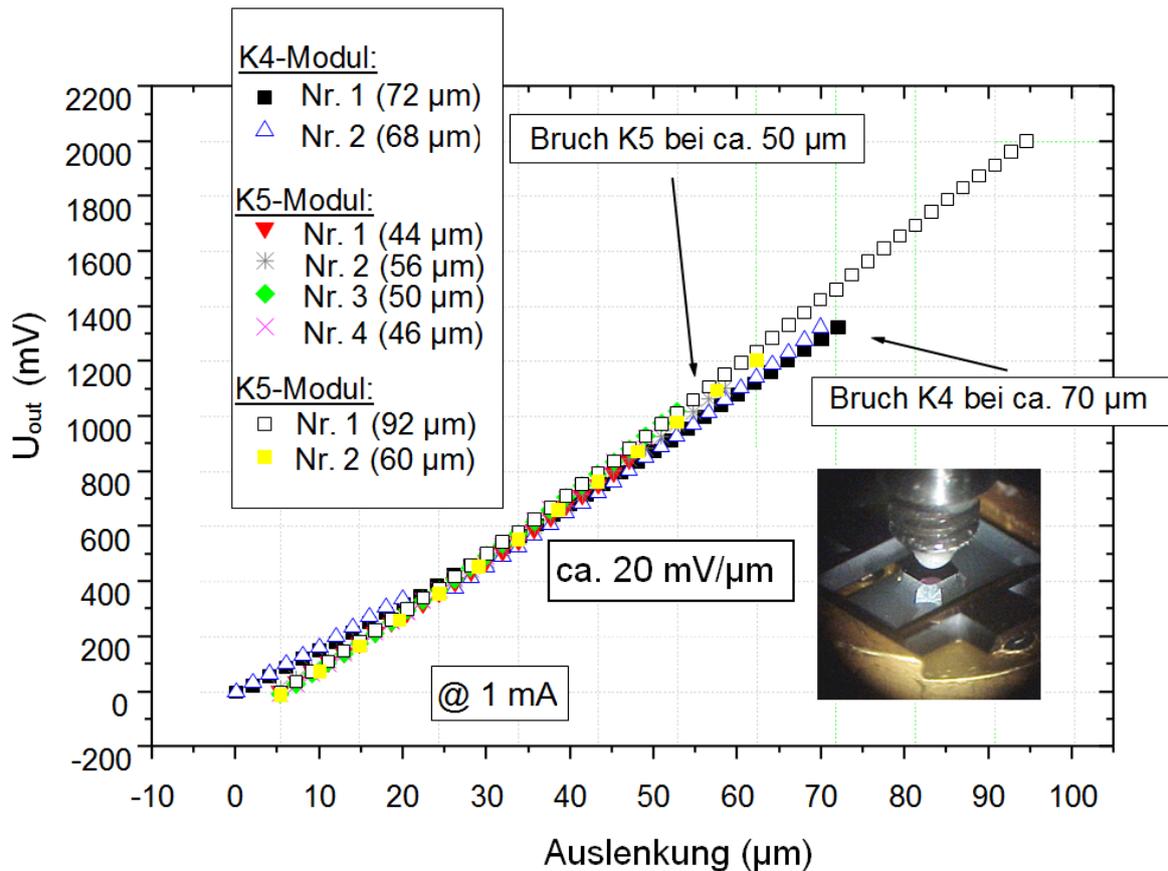


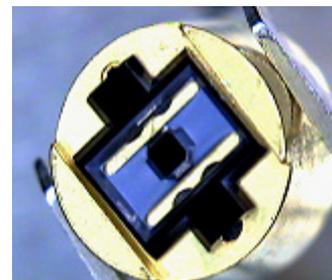
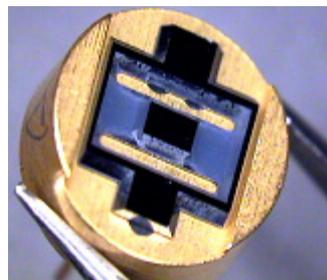
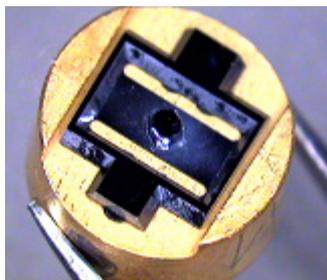
Abbildung 92: Messung des Ausgangssignals der Brücke bis zum Bruch des Sensorchips.

Im Laufe der Entwicklung wurden verschiedene Geometrievarianten hergestellt und charakterisiert. Die Ergebnisse dienten jeweils als Grundlage für die nächste Anpassung. Eine Übersicht über die Varianten wurde bereits in Kapitel 4 gegeben.

Maßgeblich für die Optimierung waren die Parameter Empfindlichkeit und Bruchweg. Die anderen, in diesem Kapitel bereits beschriebenen Kenngrößen, sind im Wesentlichen unabhängig von Geometrievariationen, wie sie in dieser Arbeit betrachtet und realisiert wurden. Für den Vergleich der Varianten stehen daher Empfindlichkeit und Bruchweg im Vordergrund.

Entsprechend der Simulationsergebnisse wurde die als „K1“ bezeichnete erste Variante mit einer Membrandicke von 20 μm und einem Center-Boss von 1 mm^2 Größe realisiert. Die simulierte Empfindlichkeit sollte bei 14 $\text{mV}/\mu\text{m}$, der erwartete Bruchweg bei mindestens 100 μm liegen. Die nächste, „K2“ genannte Variante sollte mit einer Membrandicke von 35 μm und einem Center-Boss von 1 x 1,5 mm^2 Größe eine mehr

als doppelt so große Wegempfindlichkeit aber auch ein sehr viel kürzeren Bruchweg aufweisen. In beiden Fällen stimmen die Messergebnisse gut mit den simulierten Ergebnissen überein, besonders, wenn man bedenkt, dass das Simulationsmodell geometrische Idealisierungen beinhaltet, die dem realen, geätzten Modell nicht exakt entsprechen. Die Übersicht der Ergebnisse wird in Abbildung 93 gegeben. Aus den mit K1 und K2 gefundenen Ergebnissen wurde als sinnvolle Geometrie für den sogenannten K4-Chip eine Membrandicke von 25 μm und ein Center-Boss von 1 mm^2 Größe festgelegt auch wenn diese Geometrie nicht simuliert wurde. Simulationsergebnisse für den K4-Chip werden daher stets aus der Interpolation zwischen den simulierten Werten für 20 μm und 35 μm Balkendicke erhalten (bei einer Center-Boss-Größe von 1 x 1 mm^2). Die Weg-Empfindlichkeit ist ausreichend groß und der Bruchweg (zumindest meistens) deutlich über 50 μm . Auf diese Weise wurde der Biegebalken (Membran mit Langlöchern) mit seiner deutlich geringeren Steifigkeit, aber seinem größeren Bruchweg im Vergleich zur gewöhnlichen Sensormembran an die Aufgabe als Weglängensensor für die Stahlmembran angepasst.



K1- Modul	K2-Modul	K4-Modul
Wegempfindlichkeit: 12 mV/ μm	Wegempfindlichkeit: 30 mV/ μm	Wegempfindlichkeit: 18 mV/ μm
Weg zum Bruch: ca. 100 μm	Weg zum Bruch: ca. 30 μm	Weg zum Bruch: ca. 70 μm

Abbildung 93: Weg-Empfindlichkeiten und Bruchweg der unterschiedlichen Chips im Vergleich

6.5 Praxistest des Sensors

Der Sensor wurde in zwei verschiedenen Anwendungen getestet. Es wurde eine Charakterisierung des Sensors im Gasein- und -auslass eines Verbrennungsmotors sowie in einem Umformverfahren (RIM = Reactive Injection Moulding) zur Herstellung von Kunststoffformteilen durchgeführt.

Die Charakterisierung im 4-Takt Ottomotor wurde bei der Fa. Kistler Instrumente AG an einem 1-Zylinder Forschungsmotor mit einem Hubraum von 500 cm^3 durchgeführt. Für die Druckmessung wurde der K4-Sensor montiert. Abbildung 94 zeigt die prinzipielle Montage des Sensors im Gaseinlass und Gasauslass (links) und ein Foto

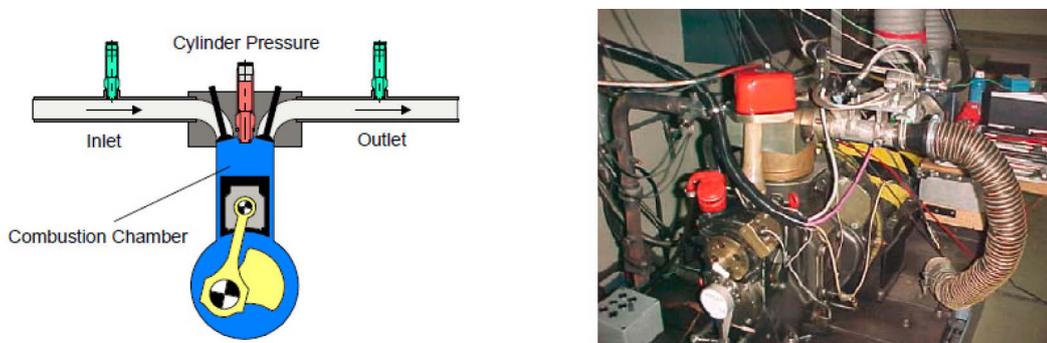


Abbildung 94: Der prinzipielle Messaufbau des Verbrennungsmotors mit den zwei Hochtemperatursensoren im Gaseinlass und Gasauslass (links) und der reale Messaufbau (rechts)

des Forschungsmotors (rechts). Abbildung 95 zeigt den aufgebauten Sensor mit Elektronik und Gewinde für den Einsatz im Ansaug- und Abgasbereich am Zylinderkopf, d.h. in Ventilnähe. Ergänzend wurde ein piezoelektrischer Quarzkristall-Präzisionsdruckaufnehmer der Fa. Kistler AG verwendet, welcher den hohen Zylinderdruck im Brennraum misst.

Abbildung 96 zeigt die aufgenommenen Kennlinien der beiden Niederdrucksensoren und des Hochdrucksensors im Brennraum, wobei die schwarze Kurve den Verlauf des Brennraumdrucks, die rote Kurve den des Drucks am Einlassventil und die blaue Kurve den des Drucks am Auslassventil anzeigt. Die Abszisse zeigt ein Intervall von 720° , das einem vollständigen 4-Takt-Zyklus entspricht, wobei letzterer im Ursprung (0°) mit dem „oberen Ladungswechselpunkt“ (LWOT) beginnt, auf halbem Wege (360°) den „oberen Zündtotpunkt“ (ZOT) erreicht und bei 720° wieder am LWOT endet. Die Ordinate überstreicht ein Druckintervall von 0,5 bis 2,0 bar.

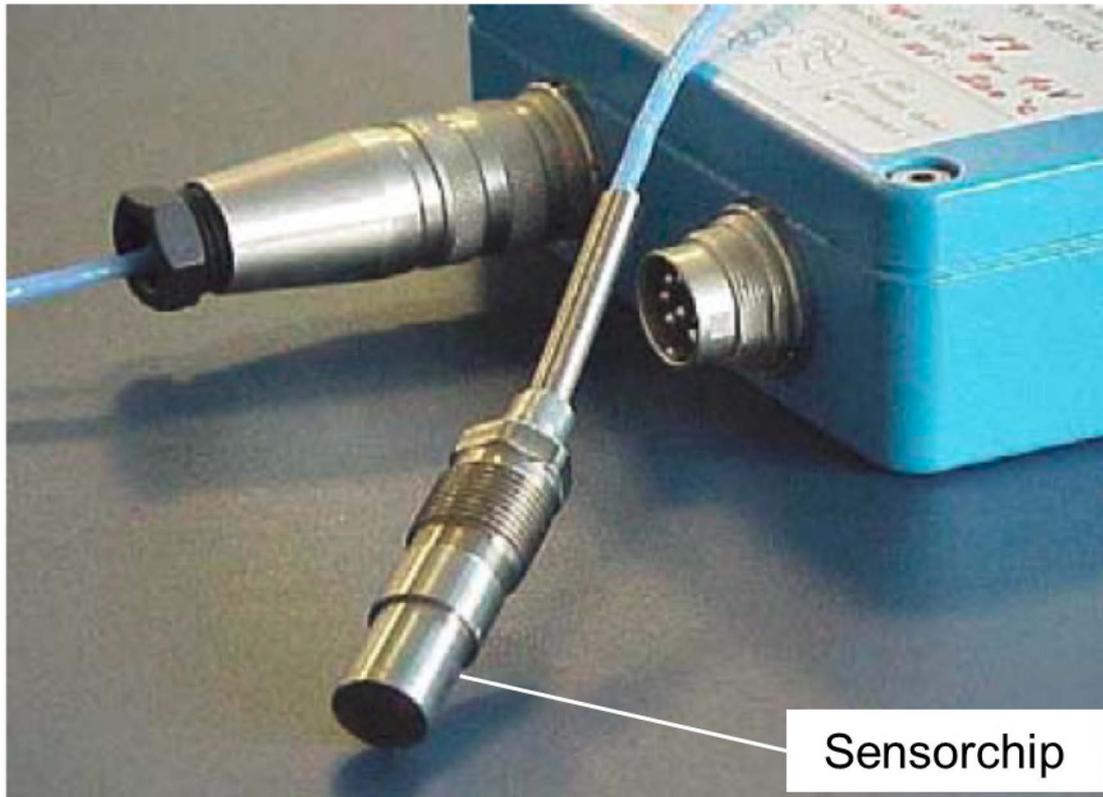


Abbildung 95: Der Hoch-Temperatur-Sensor mit Gehäuse und Elektronik

Der Zyklus beginnt mit dem Ansaugtakt bei geöffnetem Einlassventil, so dass sich im Einlasskrümmer und im Brennraum ein Unterdruck einstellt, der kurz vor Erreichen des „unteren Totpunktes“ (UT; 180°KW) wieder abnimmt. Im nun beginnenden Verdichtungstakt wird an allen drei Messpunkten annähernd der gleiche Druck angezeigt bis das Einlassventil schließt, und die Verdichtung sich nur im Brennraum bis zum ZOT (360°KW) fortsetzt. Im Arbeitstakt verbrennt das Gasgemisch explosionsartig, erreicht so seinen Maximaldruck, dehnt sich aus und überträgt so die Arbeit auf den Kolben. Mit dem Öffnen des Auslassventils läuft ein Verdichtungsstoß vom hohen Zylinderdruck über den Auslasskrümmer in die Abgasanlage. Dieser Stoß regt eine stehende Welle im Abgas an, das nach Erreichen des UT (540°KW) bei abnehmendem Druck vom Kolben aus dem Zylinder gedrückt wird. Diese stehende Welle bleibt über den gesamten Taktzyklus im Druckverlauf des Abgases mit abnehmender Amplitude (Dämpfung) sichtbar. Die Temperatur im Zylinderkopf beträgt bei diesem Lastfall knapp 200°C . Hinter dem Auslassventil ist die Temperatur mit ca. 150°C deutlich geringer. Ohne Abgasrückführung hat das angesaugte Gas Raumtemperatur. Da der

Sensorchip zurückversetzt ist, ist die Chiptemperatur relativ konstant über das Arbeitsspiel (nur wenige Grad Schwankung über 720°KW).

Die im Intervall 180°KW bis 225°KW gleichen Druckverläufe ermöglichen die Kalibrierung des Quarzkristalldruckaufnehmers (Brennraumdruck) einmal pro Taktzyklus. Das ist notwendig, da dieser auf Grund der großen Temperaturbelastung keine Abso-

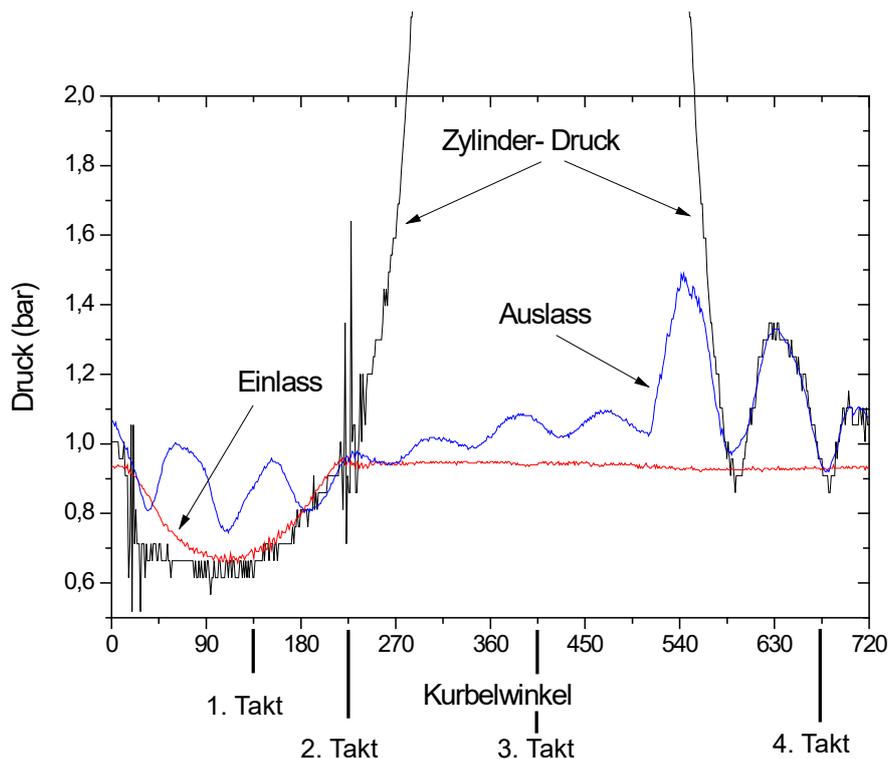


Abbildung 96: Aufgenommene Druckverläufe mit den entwickelten Sensoren und dem Zylinderdrucksensor von Kistler (1500rpm und Vollast)

lutdruckmessung zulässt. Als Referenzsignal bietet sich das des K4-Sensors am Einlassventil an, der den geringsten Temperaturschwankungen ausgesetzt ist. Sollte die absolute Messgenauigkeit des K4-Sensors trotz mäßiger Temperaturbelastung und eines kleinen Empfindlichkeitstemperaturkoeffizienten nicht ausreichen, ist eine zusätzliche Korrektur über die Temperaturmessung des Sensors möglich. Hierfür werden die Piezowiderstände in Brückenschaltung genutzt [1].

Es ist deutlich zu sehen, dass die neu entwickelten Niederdrucksensoren, die für einen Druckbereich von typisch 5 bar ausgelegt sind, im Gasein- und -auslass in der

Gaswechselphase eine bessere Dynamik und Auflösung aufweisen als der Hochdrucksensor im Zylinder, der für 200 bar ausgelegt ist und daher keine Auflösung im mbar-Bereich ermöglicht.

Mittels einer präzisen Gaswechselanalyse kann der Verbrennungsprozess optimiert werden, so dass die Emission reduziert und der Wirkungsgrad erhöht werden kann.

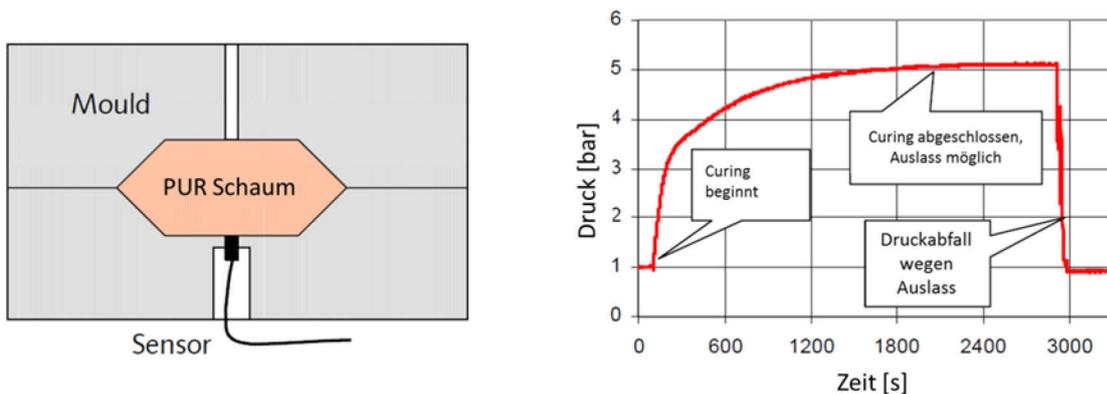


Abbildung 97: Schematische Darstellung eines Testbauteils mit Sensor für Reactive Injection Molding (RIM) mit PUR-Schaum (links). Druck-Zeit-Kennlinie aufgenommen mit dem neuen K4-Sensor (rechts)

Eine weitere Anwendung, in der der Sensor getestet wurde, ist das Reactive Injection Molding (RIM). Bei diesem Umformverfahren zur Herstellung von Kunststoffteilen werden zwei Komponenten vermischt. Anschließend wird die Reaktionsmasse unter hohem Druck in ein formgebendes Werkzeug gespritzt. Die Komponenten reagieren exotherm und es entsteht der duroplastische Kunststoff Polyurethan. In Abbildung 97 ist die Druck-Zeit-Kennlinie für ein Testbauteil mit RIM mit PUR-Schaum dargestellt, die mit dem neuen K4-Sensor aufgenommen wurde. Die Temperatur des PUR-Schaums nach der Befüllung der Form beträgt in diesem Beispiel ca. 220°C und sinkt während des Aushärteprozesses über eine knappe Stunde auf nur wenig mehr als Raumtemperatur. Da momentan keine für diese Anwendung geeigneten Drucksensoren kommerziell verfügbar sind, kann dieser Prozess derzeit nicht mittels Druckmessung überwacht und geregelt werden. Durch eine In-situ-Überwachung des Aushärteprozesses in Echtzeit könnte die Qualität der Bauteile optimiert und der Ausschuss durch frühzeitiges Erkennen von Unregelmäßigkeiten in der Druck- und Temperatur-Zeit-Kennlinie reduziert werden. Der Druck- und Temperaturanstieg kann als Indikator für die Formfüllung und der maximale Druck bzw. dessen zeitlicher

Verlauf für die Bestimmung des Bauteilgewichtes genutzt werden. So kann der Aushärtprozess optimiert und die Zykluszeit reduziert werden.

6.6 Ergebnisse

Zur Übersicht sind die gemessenen Werte des K4-Biegebalkenmoduls im Vergleich zur geforderten Spezifikation in Tabelle 6 dargestellt. Alle Messungen wurden bei Konstantstromspeisung mit 1 mA durchgeführt. Wie im Einzelnen bereits erläutert, entspricht der K4-Chip im Wesentlichen den Anforderungen. Allein der Bruchweg unterliegt einer zu starken Streuung, als dass das Ergebnis als befriedigend bezeichnet werden könnte.

Tabelle 6 Gegenüberstellung der geforderten und der gemessenen Kenngrößen des K4- Biegebalkenmoduls

Kenngröße	Soll / Ziel	Ist (Messwert)	Bemerkung
Brückenwiderstand R_b	$3,25 \text{ k}\Omega \pm 10\%$	$3,4 \pm 0,09 \text{ k}\Omega$	
Einzelwiderstände R_i	$3,25 \text{ k}\Omega \pm 10\%$	$3,3 \pm 0,1 \text{ k}\Omega$	
Offset U_{off}	$0 \pm 20 \text{ mV}$	-2 mV bzw. -4 mV	
Ohm'sches Verhalten	OK	OK	
TKR	$30 \pm 5 \text{ \%}/100^\circ\text{K}$	+31%/100°K	Im Bereich 25°C...200°C
TKO ¹⁾	klein	+7 mV/100°K	entspr. ca. DNP/E = +3%FSO/100°K
Weg-Empfindlichkeit	> 10 mV/ μm	$18 \pm 2 \text{ mV}/\mu\text{m}$	vgl. K1 (12 mV/ μm) und K2 (30 mV/ μm)
FSO ²⁾	> 100 mV	$250 \pm 50 \text{ mV}$	bei 12...15 μm Membranauslenkung
Linearitätsfehler ²⁾	-2 ... 2 %FSO (möglichst temperaturunabhängig)	$-1 \pm 0,5 \text{ \%FSO}$	bis 30 μm Auslenkung
TKS	> 0 (möglichst linear; gut analog kompensierbar)	+11 %/100°K	bei Konstantstromspeisung
Bruchweg	> 100 μm	40...>100 μm	große Streuung
Kraft-Empfindlichkeit	nicht relevant	2,5 mV/mN	
Bruchkraft	nicht relevant	0,7 N	
Eigenfrequenz	> 10 kHz	13 kHz	Für Accelerometer-Anwendung ist eine Eigenfrequenz von >50 kHz wünschenswert
Beschleunigungs-empfindlichkeit	<0,05 mV/g	0,03 mV/g	Für Druckerzeugung ist eine kleine und für Accelerometer-Anwendung eine hohe Beschleunigungs-empfindlichkeit wünschenswert

¹⁾ gemessen am FlipChip-gebondeten Modul

²⁾ gemessen am kompletten Sensor

6.6.1 Vergleich mit der Simulation

In der Entwurfsphase wurde auf das Mittel der FEM Simulation zurückgegriffen, um eine Abschätzung des Ausgangssignals und der auftretenden mechanischen Spannungen zu erhalten. Hierauf aufbauend wurden Sensoren realisiert und messtechnisch charakterisiert. In diesem Kapitel werden die gemessenen und simulierten Empfindlichkeiten bzw. Ausgangssignale verglichen. Daneben lassen sich auch die experimentellen und simulierten Ergebnisse des Bruchweges miteinander vergleichen (siehe Abbildung 42, Abbildung 92).

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der messtechnischen Charakterisierung des Sensors den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Die simulierte Wegempfindlichkeit des Sensors beträgt $16 \text{ mV}/\mu\text{m}$ (Vgl. Abbildung 40). Die gemessene Empfindlichkeit normiert auf $1 \mu\text{m}$ Auslenkung beträgt 18 mV (Vgl. Abbildung 88). Die Ergebnisse beziehen sich auf die realisierte $25 \mu\text{m}$ dicke Balkenstruktur mit $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ Center-Boss.

Tabelle 7: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Sensorcharakterisierung für einen Sensorchip mit $25 \mu\text{m}$ Balken und einem Center-Boss mit 1 mm^2

@ 1 mA	Simulation	Messung
Empfindlichkeit	$16 \text{ mV}/\mu\text{m}$	$18 \text{ mV}/\mu\text{m}$
Sensorsignal bei 2 bar (Auslenkung $11,14 \mu\text{m}$, siehe Abbildung 35)	178 mV	200 mV
Bruchweg	$34 \mu\text{m}$	$70 \mu\text{m}$
Überlast	6 bar	12 bar

Der Unterschied zwischen der Messung und der Simulation beträgt gut 10 %. Um eine hohe Übereinstimmung zwischen dem Modell und der realen Messung zu erhalten, muss auch zwischen dem realen Chip und dem Modell eine hohe Übereinstimmung erzielt werden. So kann bereits die kleinste Ungenauigkeit bei der Herstellung der Balkendicke des Sensor-Chips einen großen Unterschied in der Empfindlichkeit

bewirken. Daneben können auch Ungenauigkeiten im Modell solche Fehler verursachen. Die Materialparameter, die in der Simulation verwendet wurden, können sich vom realen Silizium unterscheiden, sodass es auch an dieser Stelle zu einer Abweichung kommen kann. Betrachtet man in der Summe der möglichen Fehler auch die bei der Montage des Chips mögliche ungenaue Vorspannung des Sensorchips, so ist die Differenz von gut 10 % als hinreichend gut zu bewerten.

Vergleicht man den gemessenen und simulierten Bruchweg bzw. die Überlast des Sensorchips, so ergibt sich eine Differenz in der Größenordnung um den Faktor zwei. Während bei der Simulation ein Bruchweg von $34\ \mu\text{m}$ für das Sensormodell mit $25\ \mu\text{m}$ Balkendicke und $1\ \text{mm}^2$ Center-Boss bestimmt wurde, ist der Abbildung 92 ein Bruchweg von $70\ \mu\text{m}$ zu entnehmen. Berücksichtigt man die pessimistische Annahme der Bruchdehnung von $3 \cdot 10^{-3}$ aus Kapitel 3.2.7 und wendet den oberen Wert $6 \cdot 10^{-3}$ (Vgl. Kapitel 3.2.7) an, so verschwindet die Diskrepanz zwischen Simulation und Messung fast gänzlich. Das verwendete Sensormodell sagt die Ergebnisse des realen Sensors gut voraus.

7 Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es einen piezoresistiven Hochtemperaturdrucksensor für den Einsatz in aggressiven Umgebungen zu entwickeln, der über einen weiten Druckbereich (einige 100 mbar bis einige 1000 bar) mit hoher Auflösung mit dem gleichen Sensorchip eingesetzt werden kann. Ferner wurde auf einen möglichst großen Bruchweg, eine geringe Steifigkeit und eine geringe Empfindlichkeit auf mechanische Störsignale (thermische Ausdehnung, Erschütterungen, Schwingungen) bei dem Si-Sensorbasiselement, sowie auf kleine Abmessungen ($d = 19 \text{ mm}$) des gesamten Sensors Wert gelegt.

Erreicht wurden diese Ziele durch eine aus massivem Metall gedrehten Stahlsensorhülse mit integrierter Membran als Druck-Weg-Umformer, die den piezoresistiven Sensorchip optimal schützt. Der Druckbereich wird durch die Auslegung der Stahlmembran eingestellt. Der Si-Wegesensor ist durch zwei Langlöcher als Biegebalken ausgebildet, dessen Steifigkeit vernachlässigbar ist und der an beiden Enden an einem Si-Rahmen aufgehängt ist. Dieser ist nur im querachsennahen Bereich des Balkens mit einem thermisch angepassten Substrat (GDF) verbunden, um entsprechende Einflüsse zu minimieren. Diese Flip-Chip-Verbindung erfolgt durch Thermokompressionsbonden mit Gold-Studbumps, die bis 400°C eine mechanisch stabile Verbindung darstellen. Entsprechend ist der piezoresistive Sensorchip in SOI-Technologie mit HT-Metallisierung ausgeführt, so dass Betriebstemperaturen über 250°C möglich sind. Die mechanische Kopplung zwischen Si-Biegebalken und Stahlmembran erfolgt folglich direkt an den Rückseiten von Chip und Stahlmembran über jeweils eine Center-Boss Struktur.

Durch Variation und Optimierung von Balkendicke und Center-Boss-Größe zeigte der realisierte Sensor bei einem Brückenstrom von 1 mA eine hohe Weg-Empfindlichkeit von $18 \text{ mV}/\mu\text{m}$.

In dieser Arbeit wurde erstmals ein piezoresistiver Sensor für den Einsatz bei hohen Temperaturen (bis 320°C) und in rauher Umgebung (z.B. im Auslass von Verbrennungsmotoren oder beim Reactive Injection Molding) realisiert, welcher auch für Niederdruckanwendungen (bis 2 bar) geeignet ist.

Aufgrund der bei der Herstellung genutzten SOI Wafer konnten die Balkenstrukturen mit einer hohen Dickenhomogenität hergestellt werden. Trotz der geringen Dicke von 25 μm konnte eine hohe Ausbeute bei der Prozessierung erreicht werden. Bei der Messung des Bruchverhaltens konnten im „Einspannungsbereich“ jedoch wiederholt Rissbildung beobachtet werden (vgl. Abbildung 91). Dieser Defekt lässt sich durch die starke mechanische Beanspruchung durch den Chipvereinzlungsprozess erklären. So wird der Chip neben der mechanischen Vibrationsbeanspruchung auch beim manuellen Pick and Place von der Sägefolie beansprucht. Um die Metallisierung vor dem Sägestaub zu schützen, wurde auf der Vorderseite eine Lackschicht aufgetragen. Dieser Lack muss nach dem Sägeprozess entfernt werden. Dazu werden die Chips in Lösungsmittelbäder getaucht. Dies ist ein manueller Prozess, der trotz größter Vorsicht Gefahren für den Chip birgt.

Die Anforderungen an die Temperaturbelastbarkeit der Sensoren steigen. Um den Temperaturbereich der Sensoren nach oben zu erweitern, müssen veränderte Substratmaterialien eingesetzt werden. So können für Temperaturen bis 400°C Sensoren aus SOI Wafermaterial hergestellt werden. Wie in [27] gezeigt wurde können auch langzeitstabile Sensoren auf Basis von SOI Material mit der in dieser Arbeit verwendeten Metallisierung hergestellt werden.

Für eine weitere Temperatursteigerung können Siliziumcarbit (SiC) oder Galliumnitrid als Wafermaterial eingesetzt werden. In [68], [69] konnte gezeigt werden, dass es mit SiC als Wafermaterial möglich ist, Sensoren, bis zu einer Betriebstemperatur von 650°C herzustellen. Dabei können die SiC Wafer sowohl nur mit einer SiC Overlayer und isoliertem Silizium Bulk Material als auch mit SiC Overlayer und SiC als Bulkmaterial hergestellt werden [68]. Der Einsatz von SiC Wafermaterial ist jedoch schwierig. So sind SiC Wafer zum einen schwer in der für Hochtemperaturanwendungen hinreichend guter Qualität zu bekommen und zum anderen sind sie u.a. aufgrund der geringen Nachfrage sehr teuer.

Da die SOI Prozesse nicht auf SiC übertragbar sind, müssen für die Herstellung von SiC Sensorchips neue Prozesse entwickelt werden [68], [69].

Literatur

- [1] J. von Berg, M. Gnielka, C. Cavalloni, T. Boltshauser, T. Diepold, B. Mukhopadhyay, E. Obermeier, "*A Piezoresistive Low-Pressure Sensor Fabricated Using Silicon-On-Insulator (SOI) for Harsh Environment Applications*", Transducers 2001, Munich, Vol. 1, 482-485
- [2] J. von Berg, M. Gnielka, C. Sonderegger, G. Kaden, C. Cavalloni, B. Mukhopadhyay, E. Obermeier, "*Piezoresistive Low-Pressure Sensor for Harsh Environment Applications*", Sensor 2003, Vol. 2, 219-224.
- [3] J. von Berg, M. Gnielka, C. Cavalloni, T. Boltshauser, T. Diepold, B. Mukhopadhyay, E. Obermeier, "*An Advanced MEMS Sensor Packaging Concept for Use in Harsh Environments*", EPTC, Singapur, 2013
- [4] H.-D. Ngo, B. Mukhopadhyay, O. Ehrmann, K.-D. Lang, "*Advanced Liquid-Free, Piezoresistive, SOI-Based Pressure Sensor Concepts for Measurements in Harsh Environments*", Sensors 2015, Vol. 15 doi: 10.3390/s150820305, Busan, 2015
- [5] M. Gnielka, C. Gossweiler, D. Karst, M. Schnepf, J. von Berg, P. Wolfer, "*Ladungswechseleoptimierung durch die geeignete Kombination von Indiziermesstechnik, Analyse und Simulation*", 9.Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz 2003.
- [6] V. Grajewski, "*Zylinderdruck-basierte Modellierung des Start-Warmlaufverhaltens von Ottomotoren*", Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation 2006
- [7] J. von Berg, Ch. Sonderegger, S. Bollhalder, C. Cavalloni, "*Piezoresistive SOI-Pressure Sensor for High Pressure and High Temperature Applications*", Sensor 2005.
- [8] H. Reichl, "*Halbleitersensoren: Prinzipien, Entwicklungsstand, Technologien, Anwendungsmöglichkeiten*", Band 251, Expert Verlag, 1989.
- [9] H-R. Tränkler, L. Reindl (Hrsg.), "*Sensortechnik*", Springer Verlag (2013)
- [10] Datenblatt der Firma Wika Alexander Wiegand SE & Co. KG, Typ SCT-1, Datenblatt PE 81.40
- [11] Datenblatt der Firma Sensor-Technik Wiedemann GmbH, OEM Druckmesszelle

- [12] H. Föll „Semiconductor Technologies“ Hyperscript, Christian-Albrechts Universität Kiel
- [13] H. Schaumburg (Hrsg.), „*Sensoranwendungen*“, B.G. Teubner (1995)
- [14] J. Tichy, G. Gautschi, „*Piezoelektrische Meßtechnik*“, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1980
- [15] K.-H. Martini, „*Piezoelektrische und piezoresistive Druckmeßverfahren*“, in K. W. Bonfig, W. S. Bartz, J. Wolf, „Technische Druck- und Kraftmessung, Expert-Verlag, Ehingen, 1995
- [16] Datenblätter der Firma Kistler Instrumente AG, CH-Winterthur
- [17] A. R. Mohammadi, „*Development of a compensated capacitive pressure and temperature sensor using adhesive bonding and chemical-resistant coating for multiphase chemical reactors*“, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 163, Issue 2, October 2010, Pages 471–480
- [18] V. Chavan, K. D. Wise, „*A monolithic fully-integrated vacuum-sealed CMOS pressure sensor*“, IEEE transactions on Electron devices, Vol. 49, NO. 1, January 2002
- [19] K. Ikeda et. all, „*Three dimensional micromachining of silicon pressure sensor integrating resonant strain gauge on diaphragm*“, Sensors and Actuators, A21-A23, 1007-1010, 1990
- [20] K. E. B. Thonton, „*Novel optically excited resonant pressure sensor*“, Electron. Lett., 24, 573-574, 1988
- [21] J. G. Smits, „*Pressure dependence of resonant diaphragm pressure sensor*“, Proc. 3rd Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'85), Philadenphia, PA, USA., June 7-11, 1985, pp. 93-96
- [22] D. Towers, „*Fiber pressure sensors find application in urology*“, SPIE Newsroom, 2006
- [23] J. M. Lopez-Higuera, „*Introduction to fiber optic sensing technology*“, Handbook of optical fiber sensing technology, Wiley, 2002
- [24] L. Ternerz, et al., „*0,5 mm Diameter Pressure Sensor for Biomedical Applications*“, Digest Techn. Papers, Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '87), Tokyo, Japan (1987), p.312
- [25] O. Tohyama, et al., „*A Fiber-Optic Pressure Microsensor for Biomedical Applications*“, Digest Techn. Papers, Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97), Chicago, IL, USA (1997), p.1489

-
- [26] J. von Berg, "*Piezoresistiver Brennraumdrucksensor auf der Basis neuer Substratmaterialien für den Serieneinsatz im Automotor*", Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 2000
- [27] H.-D. Ngo, "*Liquid-Free, Piezoresistive, SOI-Based Pressure Sensor for High Temperature Measurements up to 400 °C*", IEEE Sensors Conference, 2012
- [28] S. Guo, "*High temperature smart-cut SOI pressure sensor*", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 154, pp. 255-260, 2009
- [29] D. Kurtz, "*Improved ruggedized SOI transducers operational above 600°C*", 21st Transducer Workshop, Lexington, Maryland, June 22-23, 2004
- [30] V. M. Stuchechnikov, "*SOS strain gauge sensors for force and pressure transducers*", Sensors and Actuators, 1991, v. 28, No 3, pp. 207-213
- [31] K. Shimaoka, et al., "*Micro-Diaphragm Pressure Sensor using Polysilicon Sacrificial Layer Etch-Stop Technique*", Digest Techn. Papers, Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93), Yokohama, Japan (1993), p.632
- [32] S. Sugiyama, et al., "*High Resolution Silicon Pressure Imager with CMOS Processing Circuits*", Digest Techn. Papers, Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '87), Tokyo, Japan (1987), p.444
- [33] H. Schaumburg (Hrsg.), "*Werkstoffe*", B.G. Teubner (1990)
- [34] H. Schaumburg (Hrsg.), "*Halbleiter*", B.G. Teubner (1991)
- [35] T. Fujii, "*Fabrication of microdiaphragm pressure sensor utilizing micromachining*", Sensors and Actuators A, 34, pp. 217-224, 1992
- [36] Y. B. Gianchandani, "*Comprehensive Microsystems*", Volumes 1-3, Elsevier, 2008
- [37] M. Gad-el-Hak, "*The MEMS Handbook*", CRC Press, ISBN 0-8493-0077-0, 2001
- [38] "Harsh environments", 2005
- [39] A. Ned, "*Improved SIC leadless pressure sensors for high temperature, low and high pressure applications*", 21st Transducer workshop, Lexington, Maryland, June 22-23, 2004
- [40] J. Fraden, "*Handbook of Modern Sensors*" Springer 4th Edition, 2010
- [41] Datenblatt der Fa. Endevco, "*Piezoresistive pressure transducer - Model 8541*" www.gp-tm.com/images/datasheet/8541.pdf
- [42] Datenblatt der Firma Presens

- [43] M. Nese, "*Silicon MEMS pressure sensor for space*", MNT for Aerospace Applications (CANEUS 2006), August 27, 2006, Toulouse, France
- [44] G. Iseni, "*High-precision pressure sensor*", US Patent, US 6,450,038 B1, 2002
- [45] Datenblatt der Fa. First Sensor AG, Harsh Environment Line, Silicon Absolute Pressure Sensor Die with Top Glass Cap 2011
- [46] E. Obermeier, "*Kurzfassung zur Vorlesung Sensorik*", TU-Berlin, 2009
- [47] H.-R. Tränkler, L. Reindl (Hrsg.), "*Sensortechnik*", Springer Verlag (2013)
- [48] S. Zappe, "*Development and characterization of the 3C-SiC/SOI material system for high temperature piezoresistive pressure microsensors*", Dissertation, Technische Universität Berlin 2002
- [49] R. W. Mann, "*Silicides and local interconnections for high-performance VLSI applications*", IBM J. Res. Develop. Vol. 39 NO. 4, July 1995
- [50] R. v. Metzen, "*TiSi₂-Kontakte für Mikrodrucksensoren – Prozessentwicklung und messtechnische Charakterisierung*", Diplomarbeit, Technische Universität Berlin 2004
- [51] J. M. E. Harper, "*Mechanisms for enhanced formation of the C45 phase of titanium silicide ultra-large-scale integration contacts*", Annual Reviews Material Science 2000. 30.523-43.
- [52] H. Schröder, "*Modell des anisotropen Ätzens von einkristallinem Silizium in wässrigen KOH-Lösungen*", Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000
- [53] L. Dietrich, G. Engelmann, "*Gold and Gold-Tin Wafer Bumping by Electrochemical Deposition for Flip Chip and TAB*", 3rd European Conference on Electronic Packaging Technology, Nürnberg, 1998
- [54] G. Engelmann, O. Ehrmann, "*Development of a Fine Pitch Bumping Process*", Micro System Technologies 90, pp 435-440 Springer 1990
- [55] E. Obermeier, "*Skriptum zum Reinraumpraktikum*", TU-Berlin, 2009
- [56] Homepage: www.schott.com [Stand: 20.07.2017]
- [57] L. Dietrich, G. Engelmann "*Conformance of ECD wafer bumping to future demands on CSP, 3D integration and MEMS*", IEEE- ECTC 2006
- [58] W. Scheel, (Editor.): Electronics Assembly Technology – 2nd Edition, Electrochemical Publications (2004), (Baugruppentechologie der Elektronik. Verlag Technik GmbH Berlin, 1. Aufl. S.172 (1997))

-
- [59] K.-D. Lang, *Qualitätssicherung im Zyklus II der Herstellung elektronischer Bauelemente am Beispiel des Drahtbondens*. Habilitation Humboldt Universität Berlin (1988)
- [60] H. Reichl, „*Vorlesungsmanuskript Drahtbonden*“ (2004) TU Berlin
- [61] G.G. Harman, „*Wire Bonding in Microelectronics*“ 3rd Edition McGraw-Hill Professional, United States, 2010
- [62] U. Geissler, „*Verbindungsbildung und Gefügeentwicklung beim Ultraschall Wedge-Wedge Bonden von AlSi1 Draht*“ Dissertation, TU-Berlin, 2008
- [63] W. Heiermann, T. Gerschke, M. Ruß, H. Vogt, „*Flip-Chip Technologie für Anwendungstemperaturen > 250 °C*“ MikroSystem Technik Kongress, Aachen, 2013
- [64] T. Schreier-Alt, T. Braun, K-F. Becker, C. Rebholz, B. Wunderle, H. Reichl, „*Flip chips on PCB – from single chip encapsulation to system in package*“ MST News 2/09, 2009
- [65] M. Klein, H. Oppermann, H. Reichel, „*Gold-gold flip chip bonding proceses for RF, optoelectronic, high temperature and power devices*“ Internal Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical System & Components, München, 2005
- [66] H. Oppermann, C. Kallmayer, M. Klein, R. Aschenbrenner, H. Reichl, „*Advanced flip chip technologies in rf microwave, and MEMS application*“ Proc. SPIE Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (Vol. 4019), Paris, 2000
- [67] M. Töpfer, D. Tönnies, „*Microelectronic Packaging*“, *Semiconductor Manufacturing Handbook*“, McGraw Hill Professional, 2005
- [68] B. Schellin, „*High-Temperature Stable Metallization Systems for SiC Applications*“, Aachen, Shaker (2011)
- [69] S. Zappe, „*Development and characterization of the 3C-SiC/SOI material system for high temperature piezoresistive pressure microsensors*“, Düsseldorf, VDI-Verl., 2002
- [70] Homepage: <https://www.prysmiangroup.com> [Stand 1.09.2017]
- [71] Homepage: <http://www.fliegerweb.com> [Stand 1.09.2017]
- [72] Homepage: <https://www.daimler.com> [Stand 1.09.2017]
- [73] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, K. E. Petersen „*Bulk Micromachining of Silicon*“ *Proceedings of IEEE*, vol. 86 (8), pp. 1536-1551, August 1998

Abkürzungen und Formelzeichen

3C-SiC		Cubic Siliziumcarbid
6H-SiC		Hexagonal Siliziumcarbid
9999		99,99%
a_0		Konstante Ausdehnung
ACA		Anisotropic-conductive-adhesive
Al_2O_3		Aluminiumoxid
a_{max}		Maximaler Bruchweg
At		Atom
Au+Cu/Sn		Gold+Kupfer/Zinn
AuSn		Goldzinn
Ave. Crit.		Critical average
AVT		Aufbau- und Verbindungstechnik
B	[m]	Breite
BCE		Backside-Exposure
BESOI		Bonded and Etched-Back SOI
Box		Burried Oxide
C1 bis C7		Prozess-Schritte in Abbildung 54
CVD		Chemical Vapour Deposition
d		Durchmesser
D-1 bis D-2		Prozess-Schritte in Abbildung 60
E-1 bis E-2		Prozess-Schritte in Abbildung 65
ELTRAN		Epitaxial Layer Transfer
E-Modul		Elastizitätsmodul
F	[Hz]	Frequenz
FC		Flip-Chip
FEM		Finite Elemente Methode
FE-Modell		Finite Elemente Modell
fF		Femtofarad
FIB		Focus Ion Beam
Fläche	m^2	Quadratmeter
FS		Fullscale
FSAG		First Sensor AG
FS-Belastung		Full Scale Belastung

FSO		Fullscaleoffset
FSO		Fullscale Output
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g		Gramm
GaN		Galliumnitrid
GDF		Glasdurchführung
H ₂ O		Wasser
H ₂ O ₂		Wasserstoffperoxid
HF		Flusssäure
HF/ H ₂ O ₂ / H ₂ O		Fluorwasserstoff/ Wasserstoffperoxid/Wasser
HT		Hochtemperatur
I _b	[A]	Betriebsstrom
ICA		Isotropic-conductive-adhesive
III-V		Hauptgruppe III-V (Verbindungshalbeiter)
In		Indium
IPA		Isopropanol
K		Kelvin
K4		Chip Typ
K-Faktor		Erdfaktor (Gauge-Factor)
kHz		Kilohertz
KJ/J ₂		Kalium-Jodid/Jod
KOH		Kaliumhydroxid
L	[m]	Länge
LETI		Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information
LPCVD		Low Pressure Chemical Vapour Deposition
LV		Low Voltage (niedrige Spannung)
LWOT		Oberer Ladungswechseltotpunkt
mA		Milliampere
MAT		Microsensor and Actuator Technology
mbar		Millibar
mN		Millinewton
mV		Millivolt
mV/K		Millivolt pro Kelvin
n		Donator

Abkürzungen und Formelzeichen

Na ₂ CO ₃		Natriumcarbonat
NCA		Non-conductive-adhesive
NH ₄ F		Ammoniumfluorid
Ni		Nickel
n-Typ		n-dotiertes Silizium
O ₂		Sauerstoffmolekül
P	[bar]	Druck
P ⁺ -Implantation		Bohrimplantation
P ⁺⁺ -Implantation		Hochdotierte Bohrimplantation
PbSn		Bleizinn
pF		Pikofarad
PSOI		Polysilicon-on-Insulator
Pt		Platin
p-Typ		p-dotiertes Silizium
PUR		Polyurethane
PVD		Physical Vapour Deposition
R _b	[Ω]	Brückenwiderstand
R _b		Brückenwiderstand
RCA		Nasschemischer Reinigungsprozess (Radio Corporation of America)
RIM		Reaction Injection Moulding
RTA		Rapid Thermal Annealing
SEM		Scanning electron microscope
Si		Silizium
Si ₃ N ₄		Siliziumnitrid
SiC		Siliziumcarbid
SiCOI		Siliziumcarbid on Insulator
SIMOX		Separation by Implanted Oxygen
SiO ₂		Siliziumdioxid
SiO _x N _y		Siliziumoxinitrid
SnAg		Zinnsilber
SOI		Silicon on Insulator
SOS		Silicon on Sapphire
TC		Thermo-Compression
Ti		Titan

Ti/TiWN		Titan/Titan-Wolfram-Nitrid
TiSi ₂		Titandisilizid
TiWN		Titan-Wolfram-Nitrid
TiWN/Au		Titan-Wolfram-Nitrid/Gold
TKE		Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit
TKO		Temperaturkoeffizient des Offsets
TKR		Temperaturkoeffizient des Brückenwiderstandes
TS		Thermo-Sonic
U _b		Brückenspannung
U _{off}		Offsetspannung
U _{out}	[V]	Ausgangsspannung
UT		Unterer Totpunkt
V _a		Ausgangsspannung
V _b		Betriebsspannung
ZOT		Oberer Zündtotpunkt
α		Ausdehnungskoeffizient
ε		Dehnung
ε _{min}		Minimale Bruchdehnung
ρ	[Ωcm]	Spezifischer Widerstand
Ω		Ohm