

# Driftstabile Hochtemperaturtaugliche Piezoresistive Drucksensoren auf Siliziumbasis

*R. Täschner, E. Hiller, M. Blech*

*CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Erfurt, Deutschland*

*Kontakt: rtaeschner@cismst.de*

## Abstract:

Die Erschließung neuer Anwendungsfelder und der Drang zur Größenreduktion von hoch stabilen Druckmesssystemen macht die Erweiterung der Einsatztemperaturbereiche der MEMS Primärsensoren nötig. Es wurden daher piezoresistive Drucksensoren für einen deutlich erweiterten Temperaturbereich entwickelt. Die Leckströme der Sensoren konnten im Bereich bis 300°C um 5 Größenordnungen gesenkt werden. Der Einfluss von allseitigen statischen Drücken konnte unter anderem durch die Anwendung des Niedertemperatur-Silizium-Direktbondens im Mittel auf Werte kleiner 0,007%FS/100bar gesenkt werden. Die entwickelten piezoresistiven Sensoren auf Siliziumbasis zeichnen sich durch eine hohe Montagespannungsresistenz aus. Die Nullpunktabweichungen nach dem zero- und first-level Packaging betragen weniger als 0,01%FS/24h bei Temperaturen von über 200°C.

**Key words:** Drucksensor, MEMS, Hochtemperatur, SOI, SDB

## Einleitung

Der Druck ist nach der Temperatur die am häufigsten in der Prozesstechnik gemessene physikalische Größe. Der Einsatz der Druckmesstechnik erfolgt an der überwiegenden Anzahl komplexer Geräte und Anlagen und ist für deren Regel- und Überwachungstechnik unerlässlich. In den vergangenen Jahren ist immer stärker der Trend zur Miniaturisierung, auch in den Hochpräzisionsanwendungen, zu erkennen. Diesem Trend kann nicht durch eine weitere Größenreduktion der MEMS Bauteile Rechnung getragen werden. Die neuen Gestaltungsmöglichkeiten, Kostenreduktionen und die Erschließung neuer Anwendungsfelder müssen über eine Erweiterung des zulässigen Betriebsbereichs der Sensoren erwirkt werden. Bei einer Messfähigkeit der Primärsensoren bis über 300°C vereinfacht sich der Aufbau einer Druckmesszelle erheblich. Es kann auf Teile von Ölvorlagen verzichtet und somit der Bauraum deutlich verkleinert werden. Da deutlich geringere Anforderungen an die thermische Isolation des Primärsensors bestehen, können Druckmittlerkapillaren in vielen Fällen vollständig entfallen. Die Dynamik und Stabilität des Messsystems steigen durch diese Maßnahmen deutlich, Einschränkungen über Isolationshöhen an Rohrleitungen oder auch Einschränkungen bezüglich der maximalen Umgebungstemperatur entfallen.

## Sensorauslegung

Das Drucksensorsystem wurde auf einen Nenndruckbereich von 10bar, bei einer Empfindlichkeit von  $dR/R \sim 2\%$  für die Sensoren in der monokristallinen Ausführung und  $dR/R \sim 1\%$  in der polykristallinen Variante ausgelegt. In diesem Druckbereich ergeben sich sinnvolle Anwendungen in der Messung von Absolut-, Relativ-, wie auch Differenzdrücken. Das 0-Level Packaging der Zielvarianten erfolgte per Silizium-Direkt-Bonden, da mit dieser Ausführungsform die geringsten thermomechanischen Spannungen im Package auftreten und die Einsatzcharakteristika sowie die erreichbaren Festigkeiten für die Anwendung hinreichend sind [1] [2]. Für die monokristallinen Ausführungen des Chips wurde der konventionelle Ansatz, über die Ausnutzung des longitudinalen und transversalen Piezoeffizienten von bordotiertem Silizium gewählt. Für die Modellierung des polykristallinen Materials musste ein anderer Ansatz gewählt werden, makroskopisch ist der identische Ansatz gültig, jedoch differieren die Orientierungen der einzelnen Kristallite zueinander und somit auch zur Belastungsrichtung. Es muss daher von der verallgemeinerten Berechnung ausgegangen werden, welche die Betrachtung der Piezoeffizienten in jeder möglichen Orientierung von Bestromung und Belastung zur Kristallbezugsebene erlaubt.

$$\pi_i = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (1)$$

$$\pi_i = \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (2)$$

$l_1$ ,  $n_1$  und  $m_1$  entsprechen hierbei den Kosinus des Winkels zwischen der longitudinalen Ausrichtung (Bestromung) der Probe bzw. des Kristallits und dessen Kristallachsen,  $l_2$ ,  $n_2$  und  $m_2$  entsprechen den Kosinus der Winkel zwischen der transversalen Stresskomponente und den Kristallachsen [3]. Die mittleren piezoresistiven Komponenten können über Integration von (1) und (2) über alle möglichen Raumrichtungen und Wichtung dieser nach ihrer Auftretenshäufigkeit gewonnen werden [4]:

$$\pi_i = \pi_{11} - 0,4(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \quad (3)$$

$$\pi_i = \pi_{12} + 0,133(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \quad (4)$$

Dieser Ansatz stellt eine Näherung dar, da die realen Verhältnisse bezüglich Korngrößenverteilung und Ausrichtung je nach LP-CVD Prozess zur Erzeugung des polykristallinen Siliziums Schwankungen unterliegen. Die Piezoeffizienten des Siliziums sind neben der Raumrichtung sehr stark von der Dotierungsdichte abhängig. Es besteht zudem eine, je nach Dotierungsdichte, variierende Abhängigkeit der Piezoeffizienten von der Temperatur [5]. Für die Simulation des poly-Si Sensors wurde eine Dotierungsdichte von  $2,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$  gewählt. Diese Dotierungsdichten bedingen bereits einen Verlust an Sensitivität gegenüber den üblicherweise verwendeten geringeren Dotierstoffkonzentrationen. Die Verluste manifestieren sich speziell im Einsatztemperaturbereich unterhalb von  $150^\circ\text{C}$ . Der Verlust an Empfindlichkeit relativiert sich jedoch mit steigender Einsatztemperatur und ist im Bereich von über  $200^\circ\text{C}$  zu vernachlässigen. Die Vorteile der weitgehenden Eliminierung von Temperatureinflüssen auf die Charakteristik des Sensors überwiegen den Nachteil der geringeren Empfindlichkeit bei niedrigen Einsatztemperaturen deutlich. Mit der erhöhten Konzentration an Fremdatomen kann zudem der Bereich der Störstellenererschöpfung zu höheren Temperaturen hin ausgeweitet werden, was für die Funktion des Sensors erwünscht ist. Im Bereich der gewünschten Dosis kommt es bei der Ionenimplantation von Phosphor bereits zur Amorphisierung des Materials durch Strahlenschäden. Um dieses Phänomen nicht durch geheizte Implantationen oder das Teilen der Dosen in Einzelschritte mit Zwischenannealing vermeiden zu müssen, wird für die phosphordotierte Chipvariante die Dotierung durch Vorbelegung aus der Gasphase eingebracht. Bei Bor als Dotant ergibt sich im vorgesehenen

Dosisbereich keine Notwendigkeit für derartige Maßnahmen, daher wird die Dotierung in diesem Fall mittels Ionenimplantation eingebracht.

Mit den festgelegten Dosen wurde der spezifische Widerstand der sensorischen Schicht berechnet und unter der Annahme einer Schichtdicke von 450nm eine Widerstandsgeometrie festgelegt.

Als Membranstrukturierungsvariante wurde das anisotrope Ätzen mittels KOH gewählt, daher verschiebt sich die Einspannstelle der Membran bei Änderung ihrer Dicke. Die Positionen der Messwiderstände wurden daher variantenweise auf die veränderlichen Verhältnisse hin optimiert. Im Anschluss wurden die Positionen der Messwiderstände der Polysiliziumchips unter den Gesichtspunkten einer hinreichenden Empfindlichkeit bei hoher Kennlinienlinearität optimiert. Eine getrennte Betrachtung der SOI und p-SOI Varianten war notwendig, da Polysilizium Schichten durch die differierenden Orientierungen der Kristalle ein abweichendes Verhalten verglichen mit einkristallinem Silizium bezüglich der makroskopischen Ausprägung von transversalem und longitudinalem Piezoeffizienten zeigen. Bei dem weiten geplanten Einsatztemperaturbereich ist, verglichen mit Standardchips, mit erhöhten Montagespannungen zu rechnen. Sie ergeben sich beispielsweise, da der Sockel, welcher als Schnittstelle zur Messzelle dient, in seinen thermo-mechanischen Eigenschaften nicht vollständig an Silizium angepasst werden kann. Thermisch gut angepasste Sockel bestehen aus Kovar ( $\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{17}\text{Co}$ ), dieses Material hat einen mittleren Ausdehnungskoeffizient von  $\sim 5\text{ppm}$ . Die von Industrieanwendern bevorzugten Sockelmaterialien sind jedoch verschiedene Edelstähle, da diese deutliche ökonomische und teils technische Vorteile bieten. Der thermische Ausdehnungskoeffizient dieser Materialien beträgt 10-20ppm. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Silizium liegt im relevanten Temperaturintervall bei 2,5-3,8ppm, es kommt daher bei Temperaturänderungen immer zur Ausbildung von Montagespannungen am Interface zum Sockel. Um den Chip unempfindlich gegen derartige äußere Störungen zu machen, wurde ein Design gewählt, das bei einer mechanischen Verspannung durch den Gegenkörper oder den Sockel zur vorzeichengleichen mechanischen Verspannung aller Brückenarme führt. Durch diese Maßnahme führen mechanische Restspannungen, die durch das Rücksubstrat nicht abgebaut werden konnten oder für den Fall eines Sensors mit Borofloatglas Rückplatte von

diesem hervorgerufen werden [6], nicht zu einer signifikanten Änderung des Ausgangssignals. Dieses Prinzip wird bei einer Brückenschaltung bereits zur Kompensation von Temperatureffekten genutzt.

Da es bei den Poly-Si Chips durch die Anordnung der Messwiderstände nicht möglich war, geometrisch symmetrische Zuleitungen zu entwerfen, galt ein weiterer Fokus innerhalb der Designphase der Optimierung der Zuleitungsgebiete. Die Zuleitungen wurden zunächst unter der Maßgabe eines maximalen Querschnitts entworfen. Bei Poly-Si Devices ist dies notwendig, da die Spreizung des mittels Dotierung zu erzielenden Widerstands geringer ist als in monokristallinem Silizium. Dies führt zu einem stärkeren Einfluss der Zuleitungsgebiete auf die gesamte Messbrücke in Form einer Empfindlichkeitsminderung durch parasitäre Widerstände. Im Anschluss an den Erstentwurf wurden die Zuleitungen sukzessive für eine symmetrische Potentialverteilung optimiert. Die rechnerischen Optimierungen und Anpassungen nach den Gesichtspunkten Empfindlichkeit, Kennliniennichtlinearität, Brückengrundverstimmung und Montagespannungsresistenz wurden an diversen Varianten vorgenommen und entsprechende Layouts erstellt. Es wurde über den parasitären Einfluss, der sich durch die Zuleitung zwangsweise auf die Messbrücke ergibt, die Kennlinie weiter linearisiert. Mit steigendem Druck auf die Membran ergibt sich, integriert über die Brückenelemente, bereits im Nenndruckbereich und speziell darüber hinaus eine leicht nicht lineare Verteilung der mechanischen Spannung. Die Zuleitungen der Brückenelemente müssen ebenfalls über Gebiete des Chips geführt werden, die bei einer Druckbelastung mechanischen Spannungen ausgesetzt sind. Werden die Zuleitungen entsprechend dimensioniert und positioniert, kann der Effekt in Grenzen zur Korrektur der Kennlinienabweichung eingesetzt werden. Zu diesem Zweck wurden diese Gebiete diagonal zum Membrankantenverlauf nach außen geführt und in Ihrer Breite und Ihrem Abstand entsprechend angepasst.

### Leckstrom der Sensoren

Konventionelle Chips erreichen bei ca. 150°C die Grenze des Leckstroms, bis zu der der Betrieb des Sensors als sinnvoll angesehen werden kann. Oberhalb dieses Bereichs wird der Einfluss der parasitären Strompfade dominant, es kann in diesem Bereich kein stabiler Betrieb des Sensors gewährleistet werden. Im Vergleich wird der zulässige Leckstrom nach Extrapolation bei den entwickelten Sensoren mit zusätzlicher Schirmung erst bei ~400°C erreicht.

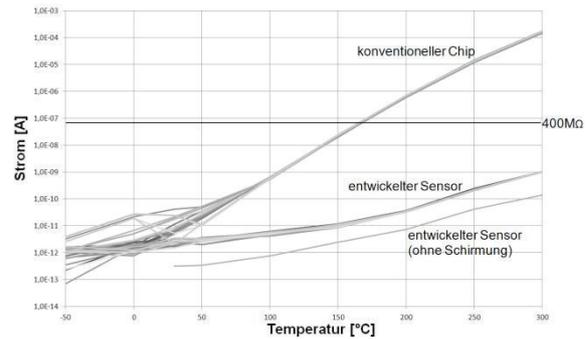


Abbildung 1) Leckstromverhalten der Chips im Vergleich

Die Sensoren ohne direkt an das Substrat angeschlossene Schirmung zeigen einen um rund eine Größenordnung geringeren Leckstrom. Der Unterschied erklärt sich durch den Wegfall eines parasitären Strompfades durch 125nm LP-CVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in Richtung der Schirmung. Die Schirmung dient der Stabilisierung des Chips gegen Fremdspannungseinflüsse, sie ist somit anwendungsabhängig optional. Im vorliegenden Fall ist der Einfluss der Schirmung auf den Isolationswiderstand gering, die Vorteile einer Schirmung überwiegen daher.

### Temperaturkoeffizient des Innenwiderstands

Die Chips zeigen bis zur Maximaltemperatur von 300°C einen kontinuierlich steigenden Verlauf des Widerstands. Es ist kein signifikanter Einfluss des Leckstroms zu erkennen. Die Widerstandsänderung verläuft nahezu linear und macht je nach Anforderungen an die Kompensationsgüte eine analoge Kompensation möglich. Konventionelle Vergleichschips hingegen zeigen einen stark nichtlinearen Widerstandsverlauf und ab ca. 200°C bereits im Innenwiderstand Anzeichen für einen signifikanten Leckstrom durch den pn-Übergang.

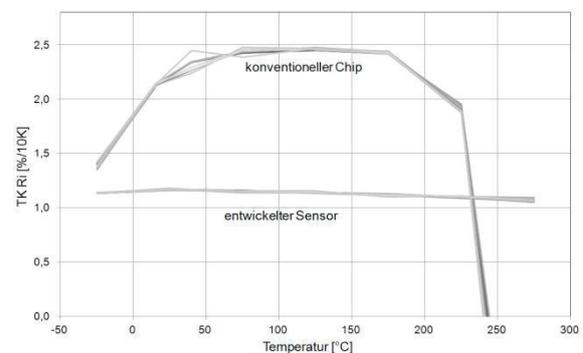


Abbildung 2) Temperaturkoeffizient des Innenwiderstands der Chips im Vergleich

In Abbildung 2 ist der Temperaturkoeffizient des Innenwiderstands über der Temperatur dargestellt. Abgebildet ist jeweils der mittlere TKRi innerhalb eines 50K Intervalls. Es ist zu erken-

nen, dass der neu entwickelte Chip einen annähernd konstanten TKRi über den gesamten gemessenen Temperaturbereich aufweist. Die konventionellen Chips weisen einen hoch nichtlinearen TKRi auf und zeigen zwischen 125 °C und 175 °C mit dem Sinken des TKRi einen an Bedeutung gewinnenden Leckstrom durch einen parasitären Strompfad zum Substrat an. Ab 175 °C wird der parasitäre Strompfad dominant, so dass ein Einsatz der konventionellen Sensoren unmöglich wird.

### Sensitivität, Kennlinienabweichung und statischer Druckeinfluss

Die bisher vorgestellten Messungen zeigen die prinzipielle elektrische Stabilität der Sensoren, weisen allerdings nicht ihre Fähigkeit aus, mechanische Spannungen durch eine Druckänderung in ein elektrisches Ausgangssignal zu wandeln. Für diese druckabhängigen Messungen wurden die vereinzelt Mikrosysteme auf TO-8 Sockel montiert und in einem Prüfaufbau mit Druck beaufschlagt. Dargestellt ist in Abbildung 3 beispielhaft eine Druckkennlinie eines Sensors in poly-Silizium Technologie. Zwischen den getesteten Varianten bestehen, je nach Dotierung, leichte Unterschiede in der Sensitivität, da die Piezokoeffizienten mit steigender Dotierung sinken, die Unterschiede bewegen sich im Rahmen von +/-10% der dargestellten Variante. Die mittlere Empfindlichkeit dieser Technologievariante beträgt 1,0mV/(V\*bar).

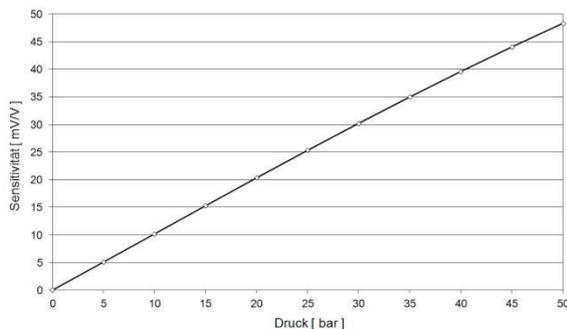


Abbildung 3) Sensitivität des Drucksensors (Nenn-Druck 10bar)

Die Kennlinienabweichung eines Drucksensors ist durch die Abweichung des Ausgangssignals von einer idealen Gerade definiert. Die Idealgerade wird im Regelfall durch eine Zweipunkt Kalibrierung an den Messbereichsgrenzen festgelegt, es existieren jedoch auch Anwendungen, bei denen die Gerade als so genannte Best Fit Gerade definiert wird. Welche Methode zum Einsatz kommt, hängt von den Anforderungen der geplanten Anwendung, der erwarteten Kennlinien- Abweichung und -Form sowie den zur Kompensation zur Verfügung stehenden Mitteln ab. Die Kennlinienabweichung im

Nenndruckbereich von 10bar beträgt unabhängig von der Technologievariante einseitig weniger als 0,2% Full Scale. In der technologischen Vorzugsvariante lag die Kennlinienabweichung deutlich unter 0,1 %FS. Erreicht werden konnten diese ausgezeichneten Werte durch eine Gegenkompensation der Kennlinienabweichung durch die gezielte Führung der Zuleitungsgebiete über spannungsbehaftete Membranteile. Dies erklärt die leichten Abweichungen vom Idealwert bei Technologievariationen, da sich mit ändernder Dotierung die Piezokoeffizienten unterschiedlich stark verschieben und die Gegenkompensation dann mit dem gewählten Layout nicht mehr im vollen Umfang möglich ist.

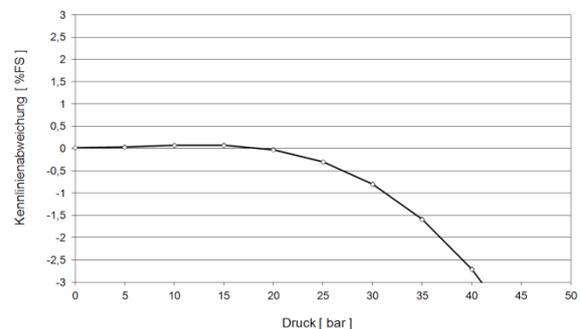


Abbildung 4) einseitige Kennlinienabweichung

Wird der Sensor über seinen Nenndruckbereich hinaus betrieben trägt dieser Auslegungsansatz bis ca. 25bar, ab diesem Wert wird die Kennlinie stärker nichtlinear. Bei ca. 38bar erreicht die Kennlinie eine Abweichung von der Idealen von ~2,5 %FS. Es kann in der technologischen Zielvariante ein Wert von maximal 0,06%FS Kennlinienabweichung bei doppeltem Nenn-Druck von 20bar erzielt werden, dies macht den Einsatz des Sensors auch bei höheren Drücken, insofern es die Berstdruckanforderungen zulassen, möglich. Der Berstdruck beträgt bei der gewählten Ausführungsform mehr als das Achtfache des Nenn-Drucks von 10bar.

Da die Sensoren neben der Verwendung als Absolut- und Relativdrucksensoren ebenfalls als Differenzdrucksensoren zum Einsatz kommen können, ist ein Ansprechen des Sensors auf allseitige statische Drücke unerwünscht. Diese Situation ist beispielsweise bei einer differenzdruckbasierten Durchflussmessung gegeben, bei der der zu messende Differenzdruck von dem vorherrschenden Systemdruck, z.B. innerhalb der Rohrleitung, überlagert ist. Ein unzulässig hohes Ansprechen des Sensors auf diesen überlagerten statischen Druck würde dessen Messung und eine entsprechende Gegenkompensation bedingen. Diese Situation gilt es zu vermeiden, da hierbei der apparative Aufwand deutlich steigt. Die entwickelten

Sensoren sind, durch die Verwendung von Silizium als Konstruktionsmaterial der 0-level-Packaging Substrate, unempfindlich gegen eine derartige Belastung.

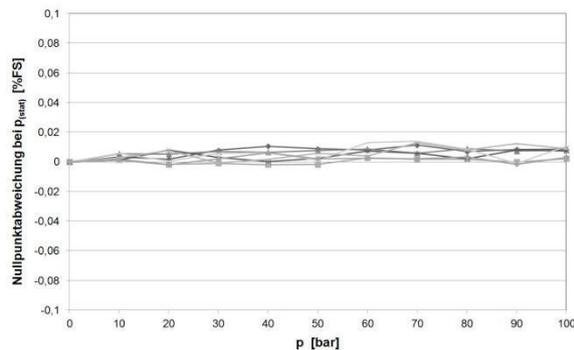


Abbildung 5) Nullpunktabweichung bei allseitigem statischen Druck bis 100bar

Die Silizium-Direkt gebondeten Sensoren weisen im Mittel eine Nullpunktabweichung von 0,007%FS bei einer Belastung von 100bar auf.

### Elektrische Stabilität bei Montagespannungen

Ziel bei diesen Versuchen war es, die Empfindlichkeit des entwickelten Chips gegen mechanische Verspannungen zu testen. Diese Verspannungen können auf verschiedene Arten induziert werden, ein Beispiel ist das Quellen eines Montageklebstoffs unter Feuchteinfluss, ein weiteres Beispiel sind thermomechanische Spannungen durch Unterschiede in den Ausdehnungskoeffizienten innerhalb des Packages. Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten können zwischen Silizium und den Deckschichtsystemen, den Metallisierungen, Rückplatten, Klebstoffen oder auch Sockelmaterialien bestehen. Da die Materialien meist stoffschlüssig verbunden sind, führen die differierenden Dehnungen bei Temperaturwechseln zu Spannungen im System. Als Test für die Empfindlichkeit gegen derartige Montagespannungen wurde das bisher verwendete Silizium als Gegenkörpermaterial durch Borofloatglas ersetzt und die Chips anodisch gegen strukturierte Gläser gebondet. Beim anodischen Bonden wird die stoffschlüssige Verbindung bei  $\sim 350^\circ\text{C}$  hergestellt, die Verbände sind durch die über den Temperaturbereich differierenden thermischen Dehnungen somit bereits bei Raumtemperatur verspannt. Die innere Spannung ist mit der Temperatur stark veränderlich und weist wenig über der Prüftemperatur von  $135^\circ\text{C}$  ein Maximum auf. Gläser weisen unter Belastung eine Restviskosität und somit ein Kriechverhalten auf, zudem zeigen sie bei erhöhten

Temperaturen eine vorbehandlungsabhängige Volumenkontraktion und eine Änderung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Dies führt bei Belastung zu zeitlich veränderlichen mechanischen Spannungen im Verbund, welche je nach Design des Sensors das Ausgangssignal unterschiedlich stark beeinträchtigen [6]. Als Vergleich für diesen Test wurden unterschiedliche Fremdmuster bereits in Produktion befindlicher Chips vermessen, welche ebenfalls als anodisch gebondete Relativdrucksensoren aufgebaut sind. Diese repräsentieren auf diesem Gebiet den Stand der Technik und besitzen spezifizierete Obergrenzen der Einsatztemperatur von  $85^\circ\text{C}$ - $150^\circ\text{C}$ .

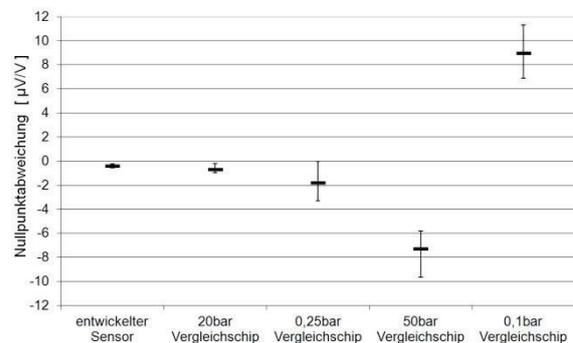


Abbildung 6) Nullpunktabweichung über 24h bei  $135^\circ\text{C}$  als anodisch gebondete Sensoren

Die entwickelten Sensoren, aufgebaut als anodisch gebondete Wandlerkerne, zeigen eine Drift  $<0,5\mu\text{V/V}$  über 24h bei  $135^\circ\text{C}$ .

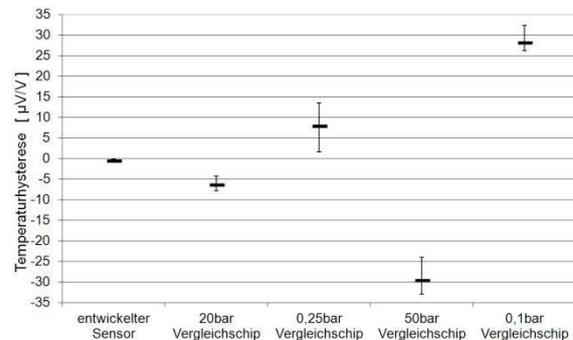


Abbildung 7) Temperaturhysterese des Nullpunkts zwischen  $30^\circ\text{C}$  und  $135^\circ\text{C}$  mit 24h Haltezeit bei  $135^\circ\text{C}$  als anodisch gebondete Sensoren

Es ist bei den Sensoren keine signifikante Temperaturhysterese nachweisbar. Sie übertreffen damit den zugänglichen Stand der Technik an anodisch gebondeten piezoresistiven Drucksensoren bezüglich der Stabilität und Temperaturhysterese bei Einsatztemperaturen bis  $135^\circ\text{C}$  deutlich.

## Elektrische Stabilität im erweiterten Temperaturbereich

Für diese Messung wurden die entwickelten Sensoren als SDB Package auf TO-8 Sockel montiert. Als Sockelmaterial fand für die Druckzuführung Kovar Anwendung. Für die Montage wurde ein Epoxy basierter Klebstoff mit einer maximalen Betriebstemperatur von 340 °C verwendet. Diese Art des Aufbaus prüft den Sensor nicht nur bezüglich seiner thermischen Stabilität sondern zudem bezüglich seiner Unempfindlichkeit gegen Montagespannungen im erweiterten Temperaturbereich. Im Regelfall ist bei ähnlich aufgebauten Sensoren ohne spezielle Maßnahmen zur Reduktion der Montagespannungen mit einer deutlichen Verschlechterung der Sensorperformance bei Temperaturwechseln zu rechnen.

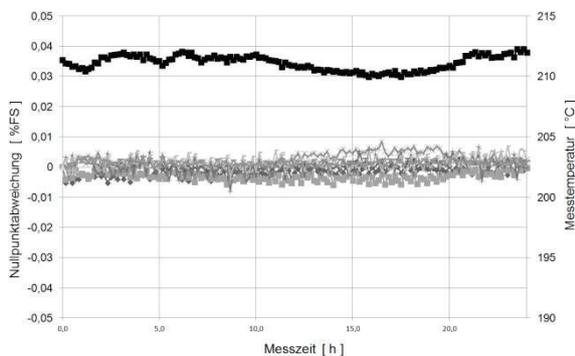


Abbildung 8) Nullpunktabweichung über 24h bei 210 °C

Bei Messungen im Temperaturbereich von 210 °C und darüber wurden keine konventionell produzierten Sensoren als Referenz hinzugezogen. Der Leckstrom konventioneller Sensoren ist in diesem Bereich bereits derart hoch, dass die Sensoren keine sinnvollen Stabilitätsmessungen mehr zulassen. Die Temperaturstabilität beträgt bei diesem Messaufbau 2,5K, der Temperaturkoeffizient des Nullpunkts führt durch diese Temperaturschwankung zu einer Schwankung des Nullpunkts kleiner 0,005%FS, welche in diesem Fall unkompensiert in die Daten eingeht. Die höchste messbare Abweichung des Nullpunkts lag innerhalb dieser Messungen bei 0,009%FS. Bezüglich der Nullpunktabweichung innerhalb des erweiterten Temperaturbereichs bis 210 °C sind die Sensoren daher uneingeschränkt einsetzbar.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelten Sensoren weisen eine ausgezeichnete Stabilität gegen den Einfluss von Montagespannungen auf und zeigen sich daher in einem weiten Einsatztemperaturbereich unempfindlich gegenüber Packagingvarianten mit heterogenen Materialkombinationen.

Im Bereich bis 300 °C weisen die Sensoren einen, verglichen mit Standardbauteilen, um 5 Größenordnungen reduzierten Leckstrom auf, ebenso zeichnen sich die Sensoren durch einen nahezu über den gesamten Einsatztemperaturbereich konstanten Temperaturkoeffizienten des Innenwiderstands aus.

Die Stabilität des Nullpunkts der entwickelten Sensoren beträgt inklusive zero- und first-Level Packaging bei 210 °C <0,01% Full Scale über 24h. Für Messungen im Temperaturbereich über dem erreichten Temperaturniveau sind jedoch noch Anpassungen am 1-Level-Packaging nötig, da die momentan verwendeten Metallisierungssysteme diesen Temperaturen nicht standhalten.

## Literatur

- [1] R. Täschner, E. Hiller: Influence of high temperature and humidity conditions to the strength of low temperature silicon direct bonding, Conference on Wafer Bonding for Micro Systems, 3D and Wafer Level Integration, 2011, Proceedings
- [2] R. Täschner, E. Hiller: Aktivierungsverfahren für das Niedertemperatur-Silizium-Direkt-Bonden, Proceedings MikroSystemTechnik Kongress 2011, ISBN 978-3-8007-3367-5
- [3] O. Tufte, E. Stelzer: Piezoresistive properties of silicon diffused layers, Journal of Applied Physics, 34, pp. 313–318., 1963
- [4] D. W. Burns: "Micromechanical integrated sensors and the planar processed pressure transducer". PhD Arbeit, 1988. University of Wisconsin, Madison
- [5] Y. Kanda, 1982, A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficient in Silicon, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-29, No.1
- [6] M. Blech, H. Übensee, R. Täschner, G. Brokmann, X. Xu, T. Ortlepp: Zeitkonstanten für die Relaxation thermomechanischer Spannungen in Silizium-Glas-Verbänden, MST Kongress 2015

## Danksagung

Teile der Arbeiten wurden von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie innerhalb des Projekts MF110117 im Rahmen des Förderprogramms INNO-KOM-Ost gefördert.