

Medienresistenter Absolutdrucksensor ohne Ölfüllung und frontbündigem Medienkontakt

Thomas Frank, Stefan Hermann, André Grün, Manuel Kermann, Andrea Cyriax, CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Germany tfrank@cismst.de

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Entwicklung absoluter Drucksensoren mit frontbündigem Medienkontakt, die für extrem kalte und hochmedienbeständige Anwendungen (z. B. Flüssigwasserstoff in der Raumfahrt) geeignet sind beschrieben. Statt herkömmlicher piezoresistiver Drucksensoren, die bei Kryotemperaturen mit Ölfüllung und komplexem Aufbau unhandlich sind, werden Silizium-Dehnungsmessstreifen (Si-DMS) in einer kompakteren, hochauflösenden Schaltung eingesetzt. Die Si-DMS werden per angepasster Glasfritte auf eine Frontplatte integriert und über Laserschweißverbindungen hermetisch mit einem Edelstahlgehäuse verbunden. Durch gezielte Anordnung der Sensorwiderstände in definierten Spannungsfeldern und Verwendung querdehnungsunempfindlicher Si-DMS mit geeigneter Kristallorientierung wird eine hohe Messgenauigkeit bei gleichzeitig robustem, mediengetrenntem Aufbau erreicht. Zur Bewertung werden die Temperaturkoeffizienten des Brückenwiderstands, des Nullpunktes und der Empfindlichkeit untersucht. Durch optimale Prozessparameter konnten diese kompensiert und minimiert werden. Drei Varianten für 100 bar relativ und 10 bar absolut in Edelstahl oder Titan wurden realisiert. Die Druckkennlinien zeigen geringe Hysterese ohne Offset bei 0 bar, die sich durch alternierende Belastung reduzieren lassen. Nach einer Lagerung bei 4 K über 2 h bleiben elektrische und mechanische Parameter unverändert, was die Zuverlässigkeit des Sensorkonzepts für luft- und raumfahrttechnische Anwendungen mit Flüssigwasserstoff unterstreicht.

Keywords: Medienkontakt, medienresistent, frontbündig, Silizium, Dehnungsmessstreifen, piezoresistiv, Drucksensorik

Einleitung

Im Rahmen der Druckmesstechnik gewinnt die zuverlässige Erfassung von Drücken unter extremen Einsatzbedingungen zunehmend an Bedeutung, insbesondere in kryogenen Anwendungen und im Umgang mit Wasserstoff. In industriellen und prozesstechnischen Anwendungen haben sich hierfür piezoresistive Drucksensoren mit Dünn- oder Dickschichttechnologie auf Stahl- oder Keramikkörpern etabliert. Sie weisen jedoch konstruktiv bedingte Einschränkungen bei frontbündigen und differenzdruckfähigen Ausführungen auf.

MEMS-Drucksensoren sind grundsätzlich geeignet, benötigen aber vielfach einen komplexen Aufbau mit Trennmembran und Ölfüllung. Für kryogene Temperaturen bei gleichzeitiger hoher Medienbeständigkeit, insbesondere mit Ölfüllung, ist dieser Aufbau nicht geeignet.

Siliziumbasierte Dehnungsmessstreifen (Si-DMS) eröffnen hier zusätzliche Freiheitsgrade im Sensordesign und ermöglichen kompakte, hochauflösende Messanordnungen mit anpassbarer mechanischer Integration.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz beschreibt die Entwicklung eines Absolutdrucksensors mit frontbündigem Medienkontakt auf Basis chemikalien- und tieftemperaturbeständigen Edelstählen. Auf diese Weise sind sie für Einsatztemperaturen bis 40 K und Lagertemperaturen bis hinunter zu 4 K ausgelegt. Kern des Aufbaus ist eine Frontplatte, auf der Si-DMS mittels Glasfritte gefügt und zu einer Vollbrücke verschaltet werden. Die Frontplatte ist über eine lasergeschweißte Verbindung hermetisch mit dem Sensorkörper gekoppelt. Durch die gezielte Anordnung der Messwiderstände in Bereichen definierter mechanischer Spannungen sowie den Einsatz querdehnungsunempfindlicher Si-DMS mit geeigneter Kristallorientierung wird eine hohe Messgenauigkeit bei gleichzeitig robustem, mediengetrenntem Aufbau angestrebt.

Das entwickelte Sensorkonzept adressiert insbesondere Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, in denen Flüssigwasserstoff als Arbeits- oder Treibmedium eingesetzt wird und Absolutdruckmessungen zur Detektion von Phasenübergängen und zur Überwachung variierender Umgebungsdrücke erforderlich sind.

Dabei steht neben der Druckmessgenauigkeit insbesondere das Verhalten der Si-DMS im kryogenen Temperaturbereich bis hin zum Ausfrieren der Ladungsträger sowie die Langzeitstabilität des Verbunds aus Silizium, Glasfritte und Edelstahl im Vordergrund.

Dehnungssensoren aus Silizium

Dehnungsmessstreifen (DMS) sind Bauelemente zur elektrischen Erfassung mechanischer Spannungen. In Kombination mit geeigneten Verformungskörpern lassen sich damit physikalische Größen wie Kraft, Druck oder Drehmoment messen.

Im Vergleich zu metallischen DMS bieten Silizium-Dehnungsmessstreifen (Si-DMS) entscheidende Vorteile: Sie besitzen eine bis zu 40-fach höhere Empfindlichkeit, zeigen kaum Kriecheffekte und ermöglichen dadurch eine deutlich präzisere Messung. Die verwendeten Si-DMS besitzen eine Empfindlichkeit von 0,4 - 0,5 mV/(V MPa), diese entspricht einem k-Faktor von 80 - 100.

Zudem sind sie in der Fertigung kosteneffizient, während die Herstellung herkömmlicher Metall-DMS weiterhin aufwendig bleibt. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Montage mittels Glasfritte. Infolge dessen Einsatztemperaturen bis 300 °C erreicht werden.

Durch diese Eigenschaften setzen Si-DMS neue Maßstäbe in der Sensortechnik und ermöglichen leistungsfähigere Messsysteme. Zur Evaluierung neuer Aufbautechnologien dienen klassische Drucksensorkörper aus verschiedenen Stahlsorten und Keramiken als Referenz.

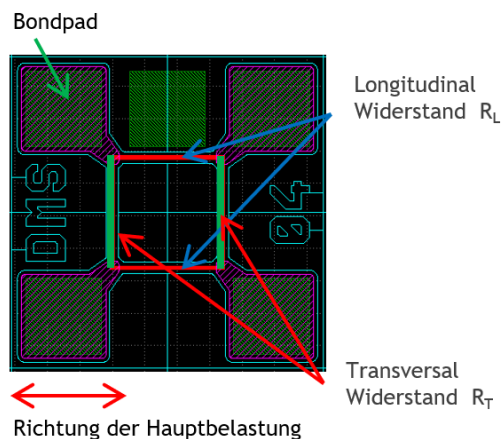


Abb. 1 Vollbrücke auf dem Si-DMS- Chip

In Sensorsystemen werden die Si-DMS in der Regel als Wheatstone'sche Messbrücke verschaltet. Dies hat den Vorteil, dass Störeinflüsse, die auf alle vier Messwiderstände gleichermaßen wirken, das Messergebnis nicht verfälschen. Voraussetzung dafür sind eine

symmetrische Brückenschaltung sowie eine identische Einwirkung äußerer Einflüsse auf alle Messwiderstände.

In der Abb. 1 ist das Layout des Si-DMS mit integrierter Vollbrücke dargestellt. Basis ist n-Silizium mit implantierten Messwiderständen aus p-Silizium. Bei der dargestellten Hauptbelastung werden die roten Messwiderstände longitudinal und die grünen transversal belastet. Die Abb. 2 zeigt die resultierende Schaltung. In der Abb. 3 und Abb. 5 sind zur Illustration eine einfache Simulation einer druckbelasteten Biegeplatte dargestellt.

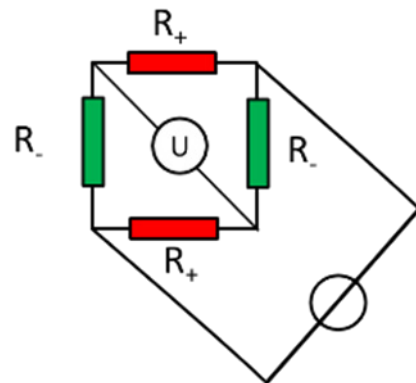


Abb. 2: Wheatstone'sche Messbrücke

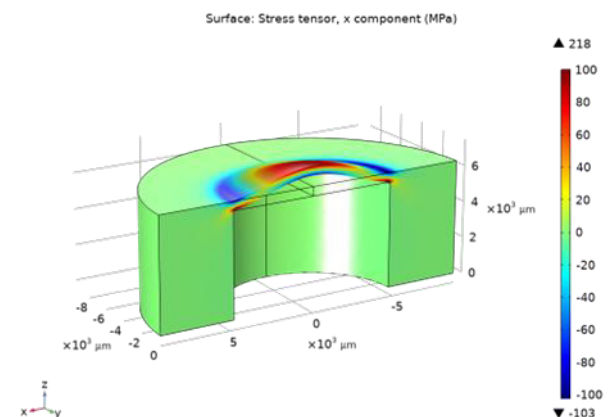


Abb. 3 Simulation einer Biegeplatte eines Drucksensors [1]

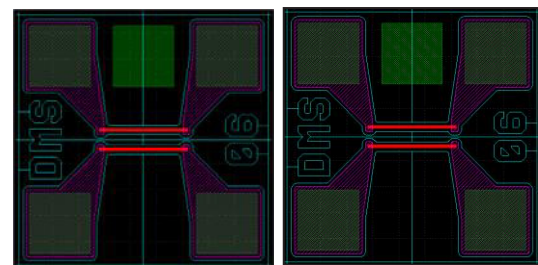


Abb. 4: 2 Paar Einzelwiderstände, Vollbrücke aus 2 Chips im Druckspannungsbereich und Zugspannungsbereich

Aus der Abb. 5 kann die jeweilige Position der verschiedenen Si-DMS-Varianten auf der Platte abgelesen werden, c) für den Si-DMS mit Vollbrücke. Der Si-DMS mit integrierter Vollbrücke ist optimal am Rand platziert, maximaler Stress in der Hauptrichtung solid.sx und minimaler Stress der Nebenrichtung solid.sy . In der Mitte der Biegeplatte arbeitet dieser Chip nicht, da solid.sx und solid.sy den gleichen Betrag besitzen und alle 4 Messwiderstände identisch belastet werden. Die Brückenschaltung und die gleichzeitige longitudinale und transversale Belastung führt zu einer fast vollständigen Kompensation des Messsignals.

In der Abb. 6 sind Piezoeffizienten in Abhängigkeit von der Dotierung und der Kristallorientierung dargestellt. Besonders wichtig ist dies für die Positionierung der Si-DMS in der Mitte der Biegeplatte. An dieser Position sind Messwiderstände notwendig, welche eine hohe Querdehnungsunempfindlichkeit besitzen. Das bedeutet, keinen Transversaleffekt. Messwiderstände aus p-Silizium auf $\langle 110 \rangle$ Material in Richtung $\langle 110 \rangle$.

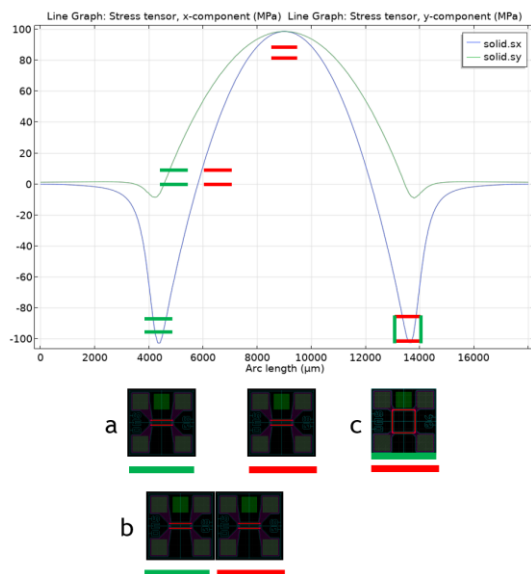


Abb. 5: Stress in der Biegeplatte, Position des Si-DMS: a) und b) 2 DMS mit je 2 Messwiderständen im Druckspannungsbereich und Zugspannungsbereich, vorzugsweise nur longitudinal belastet, beides auf der Biegeplatte eines Drucksensors angeordnet und als Vollbrücke verschaltet, c) 1 Chip mit einer Vollbrücke, 2 Transversalwirkende und 2 Longitudinalwirkende Messwiderstände.

In dieser Position ist der Transversaleffekt minimal, bei hinreichend großem Longitudinaleffekt. Aufgrund des fehlenden Transversaleffektes sind mit diesem Material sind nur

Einzelwiderstände, keine integrierten Vollbrücken, möglich. Diese werden als Paar eingesetzt, siehe Abb. 4.

In der Abb. 5 sind 2 Möglichkeiten, a) und b), mit diesen Einzelwiderständen dargestellt. 2 Si-DMS mit je 2 Messwiderständen im Druckspannungsbereich und Zugspannungsbereich, vorzugsweise nur longitudinal belastet. Die Position ist besonders wichtig da die maximale mechanische Spannung in der Mitte der Platte ausgenutzt werden kann. Dies ist nur möglich, wenn der Messwiderstand eine hohe Querdehnungsunempfindlichkeit besitzt, keinen Transversaleffekt.

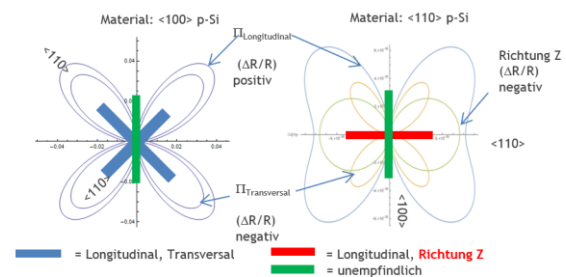


Abb. 6: Piezoeffizienten in Kristallrichtungen

$$\text{pSi } \langle 100 \rangle: \quad \Pi_L = 7,2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}, \quad \Pi_T = -6,1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\text{pSi } \langle 110 \rangle: \quad \Pi_L = 7,2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}, \quad \Pi_T = -1,1 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

Gefertigt werden diese auf 150 mm großen Siliziumwafern in einem MEMS-Prozess, einzeln durch einen „Dicing Before Grinding“ Prozess (DBG). Die Dicke beträgt nach dem Grinding 15 - 20 μm .



Abb. 7: Drahtgebondeter Si-DMS, gefügt mit Glasfritte auf Stahlrunde (1.4542), Prozesstemperatur ca. 420 °C [2]

Diese Chips werden mit einer angepassten Glasfritte auf die Stahlkörper/-ronden gefügt. Die Glasfritte liegt als druckfähige Paste vor und wird mit Schablonendruck auf die Ronden aufgetragen.

Durch Drahtbonden wird der Chip mit der Signalauswertung verbunden. Die Abb. 8 zeigt ein fertiges Testmodul.

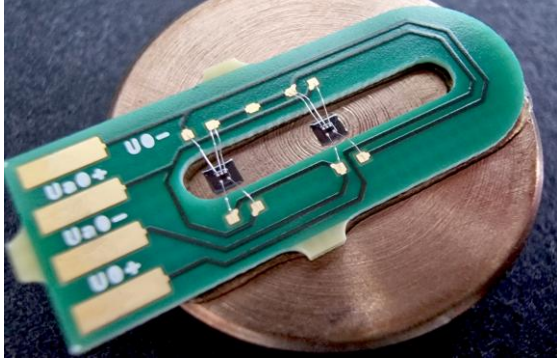


Abb. 8: Testaufbau mit 2 Si-DMS auf einer Stahlrunde (1.4542) und PCB

Der gesamte Fügeprozess ist nur auf einer ebenen Fläche wirtschaftlich durchzuführen. In Kavitäten ist das Fügen nur mit großem Aufwand möglich.

Ölfreier Absolutdrucksensor mit frontbündigem Medienkontakt

Für einen ölfreien Absolutdrucksensor mit frontbündigem Medienkontakt wurden folgende Randbedingungen abgeleitet.

- Ebene Biegeplatte zum Fügen der Si-DMS
- Si-DMS und die elektrische Kontaktierung befindet sich im Referenzdruckvolumen
- Medienberührende Materialien, beständiger Stahl
- Eignung für kryogene Temperaturen

In der Abb. 9 ist der Aufbau vereinfacht dargestellt. Basis bildet die Biegeplatte, der Medienkontakt.

Die Si-DMS werden auf diese gefügt und mittels eines Flexleiters elektrisch angeschlossen, siehe Abb. 10a. Diese Platte wird mit dem Gehäuse durch Laserschweißen hermetisch dicht gefügt. Der Flexleiter wird mit dem Abschlusssockel verbunden. Final wird der Abschlusssockel unter Vakuum mit dem Gehäuse hermetisch dicht verschweißt.

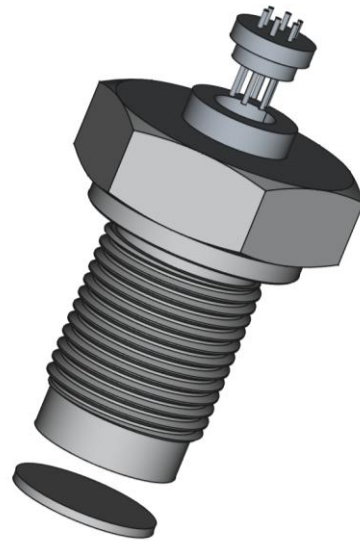
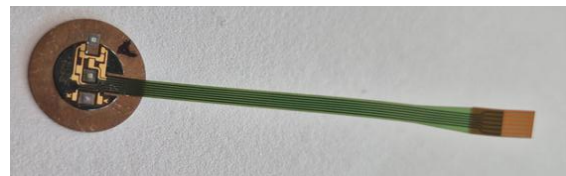


Abb. 9: Aufbau Ölfreier Absolutdrucksensor mit frontbündigem Medienkontakt, Biegeplatte, Gehäuse mit Anschlussgewinde, Abschlusssockel mit hermetisch dichten Glasdurchführungen

Durch die innenliegenden Si-DMS sind die Position a) und c) aus Abb. 5 nicht möglich, da die erforderliche Stressverteilung auf der Innenseite nicht vorhanden ist. Die Mitte der Platte ist, aufgrund der hohen Empfindlichkeit ideal, aber nur für die querdehnungsunempfindliche Variante. Den Gegenpart bildet der erste Chip aus Position b). Die Verteilung ist nicht ideal symmetrisch, zeichnet sich aber durch eine sehr gute Empfindlichkeit aus.



a)



b)

Abb. 10: a) Platte $\varnothing$ 16 mm, Dicke 0,25 mm, b) gefügte Platte und Abschlusssockel.

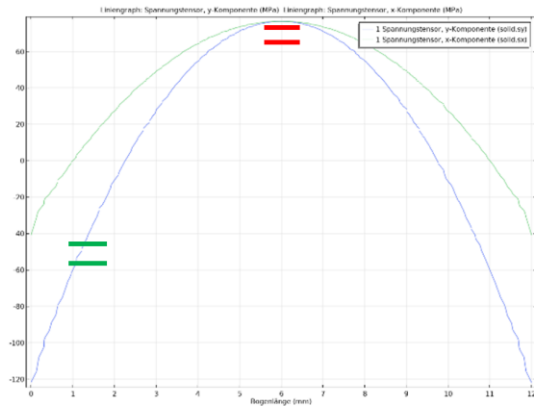


Abb. 11: Position der Si-DMS auf der Unterseite der Platte.

Bewertung der Sensoren

Zwei wichtige Eigenschaften bei Drucksensoren sind eine hohe Druckabhängigkeit und eine geringe Temperaturabhängigkeit des Signals.

Zur Bewertung des Temperatureinflusses werden mehrere Koeffizienten bestimmt:

- Temperaturkoeffizient des Brückenwiderstandes: TKR
- Temperaturkoeffizient des Nullpunktes: TKN
- Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit, Sensitivität: TKS

Der vorliegende Aufbau zeigt, dass diese Koeffizienten von einer Reihe von Parametern abhängen. Die wesentlichen Temperatureinflüsse sind:

- Die temperaturbedingte Widerstandsänderung der Messwiderstände im Nullpunkt: Die Wirkung des TKR auf das Messsignal wird nahezu vollständig durch die Brückenschaltung kompensiert. Der Brückenwiderstand ändert sich mit der Temperatur, der Nullpunkt bleibt konstant. Der TKR kann durch Variation der Prozessparameter im Bereich von 0,5 bis ca. 3,3 %/10K angepasst werden. Das Optimierungskriterium ist in der gewählten Schaltung die Temperaturkompensation des TKS.
- Die thermisch induzierten mechanischen Spannungen durch die verschiedenen Temperaturkoeffizienten (CTE) der Materialien bewirken durch den piezoresistiven Effekt eine Änderung der Widerstände der Messwiderstände. Im Idealfall, bei einem perfekten Glasfritprozess, wirken identische mechanische Spannungen auf alle Messwiderstände. Dadurch ist auch die Widerstandsänderung identisch und dies wird durch die Messbrücke kompensiert. Der TKN ist bei guter Prozessführung, Chipfertigung und Fügetechnik minimal.

- Die Piezokoeffizienten sind von der Temperatur abhängig. Bei der gewählten Technologie fallen diese mit steigender Temperatur, bezogen auf den ungefügen Si-DMS. Der TKS ist so eine Eigenschaft der Messwiderstände im Silizium. Insbesondere der TKR ist bei der Kompensation des TKS wichtig.

Ein hoher TKN deutet auf einen nicht optimalen Aufbau hin, einen hohen Offset im Nacktchip und ungünstige Lage in der Glasfritte. Der dadurch verursachte unterschiedliche Stress in den Messwiderständen führt zu unterschiedlichen Änderungen der Messwiderstände und folglich zu einer temperaturabhängigen Änderung des Nullpunktes.

Es wurden drei Varianten nach der beschriebenen Technologie aufgebaut.

- 100 bar relativ, Stahl 1.4404 (4 Stück)
- 10 bar absolut, Stahl 1.4404 (1 Stück)
- 10 bar absolut, Titan Grade 5 (2 Stück)

Die aufgebauten Drucksensoren weisen ein typisches Verhalten auf.

Das Diagramm, Abb. 12 zeigt die Druck-Kennlinie bei 30°C bis in den Überlastbereich von 200 bar. Auffällig ist die leichte Druckhysterese, Abb. 13. Es wird die Differenz im Signalverlauf vom Nullpunkt zum Nenndruck und zurück aufgetragen. Wichtig ist, dass es am Nullpunkt, 0 bar, kein Gap gibt. Dies würde auf eine starke plastische Verformung bei der Belastung hinweisen. Durch eine alternierende Belastung bis 100% Überlast, 200 bar, konnte die Hysterese bereits reduziert werden.

Die Diagramme Abb. 14 bis Abb. 16 zeigen die Kennwerte der Absolutdrucksensoren.

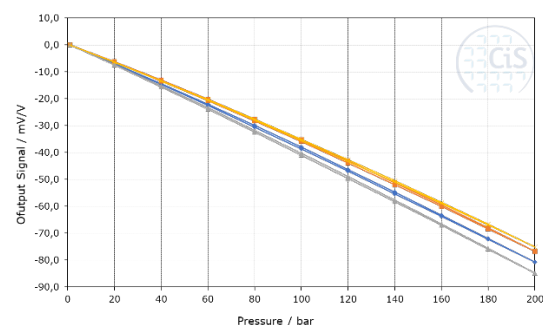


Abb. 12: Im Nullpunkt korrigierte Kennlinie, Nenndruck 100 bar, Überlast 200 bar, Temperatur: 30°C, 100 bar relativ, Stahl 1.4404

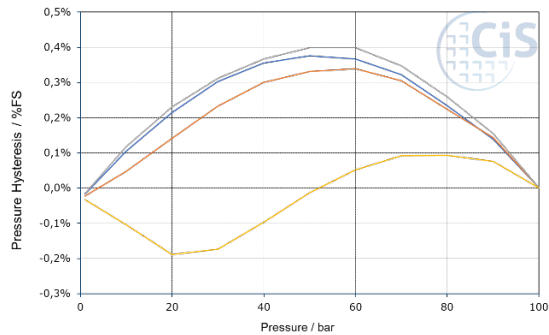


Abb. 13: Druckhysterese 0 bar bis 100 bar, Temperatur: 30°C, 100 bar relativ, Stahl 1.4404

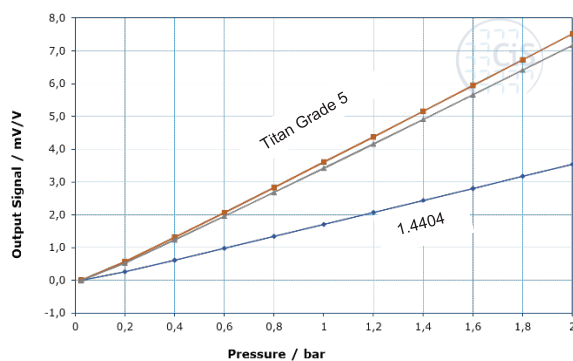


Abb. 14: Im Nullpunkt korrigierte Kennlinie, Nenndruck 10 bar, Teilbereich 2 bar, Temperatur: 30°C.

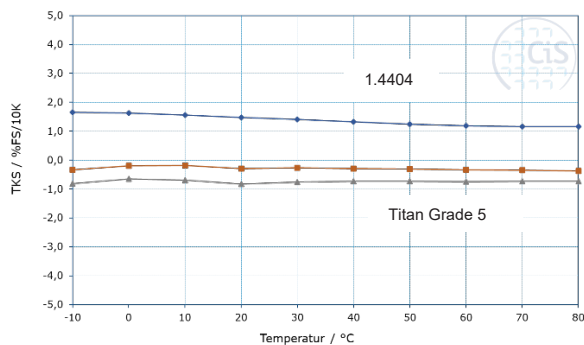


Abb. 15: Temperaturkoeffizient der Sensitivität, TKS

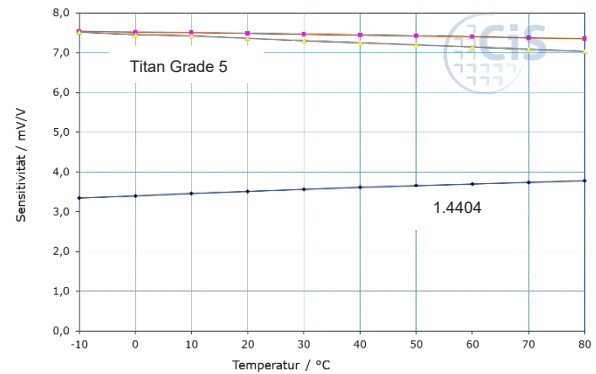


Abb. 16: Sensitivität bei 2 bar, Temperatur -10°C bis 80°C

Anschließend wurde eine Lagerung bei 4 K über 2 Stunden durchgeführt. Dies haben die Sensoren gut überstanden. Die Parameter der Sensoren vor und nach der Lagerung waren gleich. Die mitgelockten elektrischen Parameter zeigten ebenfalls keine Ausfälle oder kurzzeitige Aussetzer. Zur Funktionalität bei unter 50 K konnten noch keine Untersuchungen durchgeführt werden.

Literaturnachweis

- [1] Thomas Frank, André Grün, Christian Maier, Andrea Cyriax, M. T. Asghar, Michael Hintz, U. Krieger, Thomas Ortlepp, "Siliziumdehnungssensoren zur Spannungsanalyse", MikroSystemTechnik Kongress, Ludwigsburg, Deutschland, 08.-10.11.2021
- [2] André Grün, "Innovative Fügetechnologien zum Aufbau von feuchte- und temperaturstabilen Kraftsensordsystemen basierend auf piezoresistiven Silizium-Dehnmessstreifen", Deutsche IMAPS-Konferenz 2021, München, Deutschland, 21.-22.10.2021.