

Integration siliziumbasierter Dehnmessstreifen in Keramik zur Realisierung von Nass-Nass Differenzdrucksensoren

*Cathleen Kleinholz¹, Thomas Frank¹, Andrea Cyriax¹, Stefan Jagomast¹, Christian Maier¹,
Michael Hintz¹, Annett Schroeter², Uwe Krieger², Thomas Ortlepp¹*

¹ CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Germany

² VIA electronic GmbH, Robert-Friese-Straße 3, 07629 Hermsdorf, Germany

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Herstellung von vollständig integrierten Silizium-Dehnmessstreifen (Si-DMS) in ein Keramikmaterial zur Erzeugung von Differenzdrucksensoren für Anwendungen mit Medienkontakt vorgestellt. Die technologischen Herausforderungen im Herstellungsprozess werden aufgezeigt, Fertigungsprozesse etabliert und das Design optimiert. Ziel dieser Untersuchung ist die Herstellung eines membranfreien, medienbeständigen Differenzdrucksensors für Nass-Nass-Anwendungen.

Es werden zwei verschiedene Keramikmaterialien zur Einbettung von Si-DMS untersucht: Micromax™ GreenTape™ 951PX (Celanese) und bondbares Keramiktape (*engl. bondable ceramic tape* – kurz: BCT, Fraunhofer IKTS). Die Dehnmessstreifen werden auf die noch ungesinterte Keramik aufgebracht und gemeinsam mit der Keramik bei Temperaturen zwischen 850-900°C gesintert. Die Charakterisierung der eingebetteten Si-DMS erfolgt anhand verschiedener Kriterien: optisch, elektrisch und mechanisch.

Keywords: Biegeplatte, Dehnmessstreifen, Differenzdrucksensor, Keramik, Silizium.

Einleitung

In der Mikrosystemtechnik basieren Kraftmessungen in der Regel auf dehnungsempfindlichen Widerständen, sogenannten Dehnmessstreifen (DMS), die zur elektrischen Messung mechanischer Beanspruchung eingesetzt werden. Die Dehnmessstreifen können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden, wie beispielsweise aus Metall, Silizium oder Glasfaser [1, 2]. Dabei beeinflusst das verwendete Material die Empfindlichkeit, Temperaturstabilität, Kosten und das Anwendungsgebiet. Im Gegensatz zu metallischen DMS bieten Silizium-DMS eine bis zu 40-mal höhere Empfindlichkeit, weisen nahezu kein Kriechverhalten auf und ermöglichen eine höhere Messgenauigkeit. Bei Ausübung mechanischer Beanspruchung auf die dotierten Bereiche ändert sich der Leitungsmechanismus, was zu einer Änderung des ohmschen Widerstandes führt. Der elektrische Kontakt wird durch Drahtbonden erreicht, weshalb die Anschlussseite nicht für einen physischen Kontakt mit Medien vorgesehen ist. Aus diesem Grund lassen sich Differenzdrucksensoren mit beidseitigem Medienkontakt (Nass-Nass Anwendungen) mit dieser Methode nicht realisieren. Ein bislang ungelöstes Problem war der Schutz des Si-DMS vor dem Kontakt mit verschiedenen

aggressiven Medien und mechanischen Beschädigungen, sowie der gleichzeitige Erhalt der Empfindlichkeit des Sensors. Kontaktpads und Bonddrähte lassen sich beispielsweise durch Silikon vor Feuchtigkeit schützen, sind jedoch mechanischen Einflüssen ausgesetzt, die zu Beschädigungen führen können.

Um den Si-DMS zuverlässig vor mechanischer Manipulation wie auch vor dem Medium zu schützen, soll dieser in eine medienbeständige Biegeplatte integriert werden. Aus diesem Grund wird eine vollständige Integration von Si-DMS in einer Niedertemperatur-Einbrand-Keramik (*engl. Low Temperature Cofired Ceramic* – kurz: LTCC) vor dem Sinterprozess in Betracht gezogen. Bei keramischen Substraten können die Leitbahnen innerhalb des Substrates (vergraben) realisiert werden, sodass die Kontaktanschlüsse vor mechanischen und chemischen Einflüssen geschützt sind [3]. Somit berührt lediglich die LTCC das Medium und eine medienbeständige Biegeplatte für Nass-Nass-Anwendungen kann erzielt werden. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Si-DMS erfolgreich in eine Keramik mithilfe der bekannten LTCC-Mehrlagentechnologie partiell eingebettet werden kann [4].

In diesem Beitrag werden Si-DMS mit verschiedenen kommerziell erhältlichen Keramiken hergestellt und hinsichtlich ihrer

Kompatibilität zum jeweiligen Metallisierungssystem untersucht. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der vollständigen Integration des Si-DMS in ein keramisches Substrat sowie auf der Herstellung einer zuverlässigen elektrischen Kontaktierung.

Silizium-Dehnmessstreifen

Für die Untersuchung wurde ein Si-DMS mit einer Vollbrücke verwendet – bestehend aus jeweils zwei transversal und zwei longitudinal wirkenden Messwiderständen, die als Wheatstone'sche Messbrücke auf der Biegeplatte angeordnet sind (vereinfachte Darstellung in Abb. 1). Diese Anordnung gewährleistet, dass alle Widerstände gleichermaßen beeinflusst werden und keine Verfälschung des Ergebnisses auftritt.

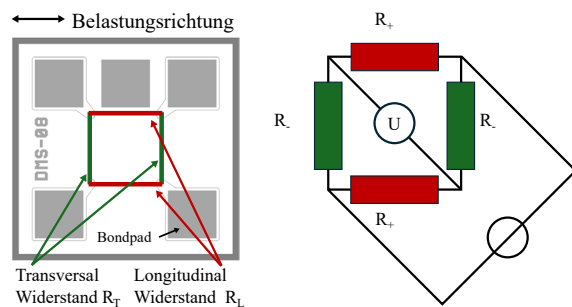


Abb. 1: Si-DMS aus <100> p-Silizium mit vollständiger Messbrücke (je zwei Widerstände für Längs- und Quereffekte), adaptiert und modifiziert von [5].

Integration von Si-DMS in LTCC

Die Herstellung des LTCC-Mehrlagensystems beginnt mit der Präparation der ungesinterten Keramiktapes, auch als „green tapes“ bekannt. Es erfolgt der Zuschnitt auf die geforderte Größe und anschließende thermische Vorbehandlung. Designspezifische Strukturierung der einzelnen Tapelagen wird durch Stanzen der Löcher für Durchkontaktierungen erzielt. Im Anschluss erfolgt das Füllen der Durchkontaktierungen, sogenannter „Vias“, und der Siebdruck der Leiterbahnen. Nach abgeschlossener individueller Tape-Prozessierung erfolgt der Aufbau und die Bestückung des Si-DMS zwischen den ungesinterten Tapes, bevor der LTCC-Stapel laminiert wird. Die Keramik wird druckunterstützt gesintert bei Spitzensinter-temperaturen bei ca. 850°C bis 900°C, entsprechend des jeweiligen Keramiksystems. Eine schematische Darstellung der Fertigungsschritte ist in Abb. 2 gezeigt. [3, 5, 6]

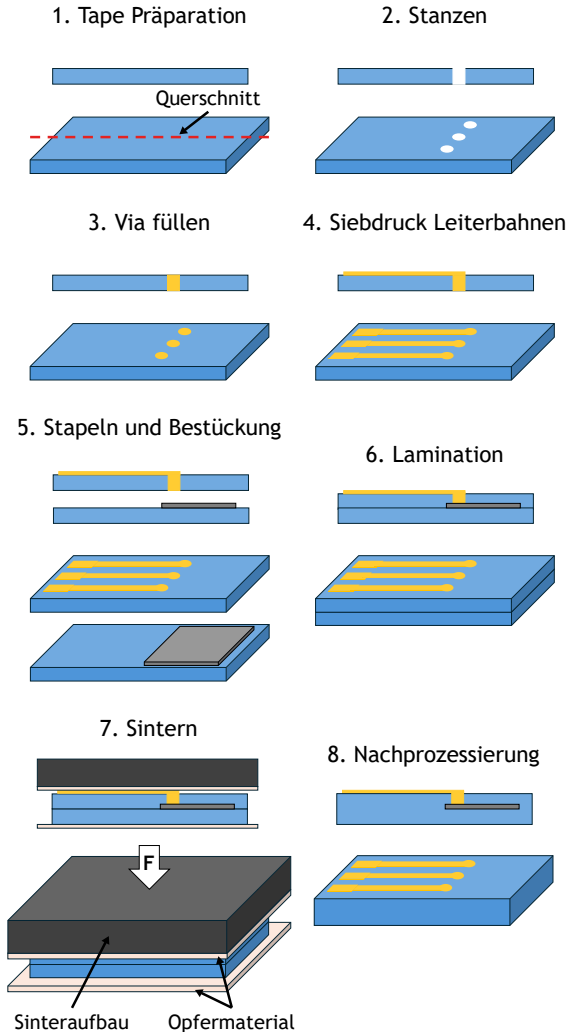


Abb. 2: Prozessablauf zur Herstellung vollständig eingebetteter Si-DMS in Keramik.

Keramikmaterial und Aufbauvarianten

Für die Einbettung des Si-DMS wurden zwei Keramikmaterialien untersucht: Micromax™ GreenTape™ 951PX (Celanese, im Folgenden 951PX; [6]) und ein bondbares Keramiktape (engl. *bondable ceramic tape* – kurz: BCT; Fraunhofer IKTS). Das 951PX ist ein etabliertes LTCC-Material für mehrlagige, cofired Keramiksubstrate, mit optimierten Metallisierungssystemen, verbesserter Stanzbarkeit/Handling und standardisierten Durchkontaktierungsprozessen. BCT ist ein speziell adaptiertes Keramiktape, mit einem an Silizium angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten mit besonderem Fokus auf hybride Integration. Die Fertigungsabläufe sind bei beiden Materialien identisch, Abweichungen finden sich in der Lagenanzahl und vereinzelt in Prozessparametern wie beispielsweise Laminierverfahren, -druck und -temperatur, sowie im Sinterprofil.

Für die konzeptionelle Betrachtung werden zwei Layoutvarianten für vollständig integrierte Si-DMS in Keramik vorgeschlagen, siehe Abb. 3. Zunächst erfolgt die Validierung der siebgedruckten Metallisierung auf der Außenlage (Abb. 3a) und im nächsten Schritt die Verlagerung der Leiterbahnen in eine innenliegende Lage mit Ausnahme der Kontaktierungsflächen am Substratrand (Abb. 3b), um direkten Kontakt mit aggressiven Medien zu vermeiden. Die Anzahl der Tapelagen wurde an die jeweilige Materialdicke angepasst. Für den Probenaufbau wurde eine Gesamtdicke von ca. 300–350 μm nach dem Sintern angestrebt.

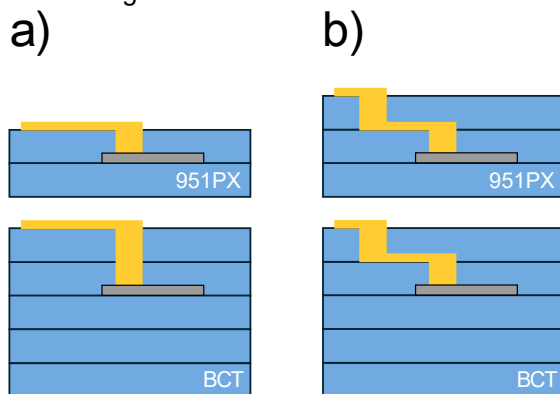


Abb. 3: Schematische Darstellung des Keramikdesigns mit unterschiedlicher Positionierung der Metallisierung und des Si-DMS: a) Leiterbahn auf der Toplage und b) vergrabene Leiterbahn.

Methoden zur Evaluierung

Vor Beginn der Untersuchung wurden essentielle Kriterien für die Bewertung der Ergebnisse definiert:

- Kompatibilität der Metallisierungen von Si-DMS und Keramik
- Messungen der elektrischen Eigenschaften
- Vollständige Integration des Si-DMS in die Keramik.

Zur Bewertung der späteren Sensorzuverlässigkeit werden die hergestellten Substrate zunächst einer elektrischen Kontaktprüfung unterzogen und anschließend einem Temperaturzyklus (Raumtemperatur bis 4 K) ausgesetzt. Oberflächennahe Schäden wie Risse, Delaminationen sowie unvollständige oder beschädigte Leiterbahnen werden mikroskopisch untersucht. Ergänzende Röntgenanalyse dienen der Identifikation innenliegender Defekte wie beispielsweise Metallisierungsunterbrechungen oder Positioniergenauigkeiten. Die Grenzfläche

zwischen Si-DMS und Keramik wird anhand von Querschnitten bewertet.

Elektrische Evaluierung

Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die erste Aufbauvariante (Abb. 3a) für beide Keramiksysteme.

Der Brückenwiderstand der eingebetteten Si-DMS in beiden Keramikmaterialien wurde vor und nach dem thermischen Zyklus gemessen, $R_{951PX} = 4,6 \text{ k}\Omega$ und $R_{BCT} = 4,9 \text{ k}\Omega$; ein nicht eingebetteter Si-DMS liegt bei $R_{Si-DMS} = 5 \text{ k}\Omega$. Die abweichenden Brückenwiderstände lassen sich durch unterschiedliche Materialien und daraus resultierendes Materialverhalten während des Sinterns erklären, da die Schrumpfung einen direkten Einfluss auf die induzierten Materialspannungen und damit auf den Si-DMS Widerstand hat. In Abb. 4 sind die Messverläufe von 951PX und BCT über den Temperaturbereich $RT \rightarrow 4 \text{ K} \rightarrow RT$ dargestellt.

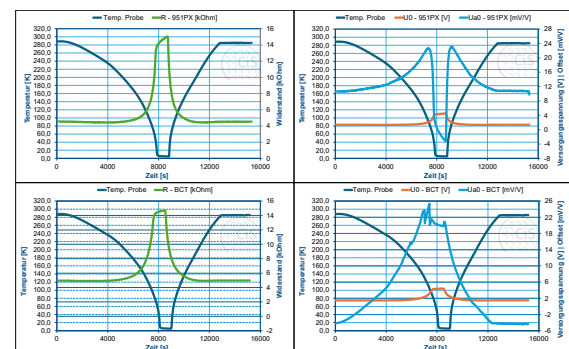


Abb. 4: Temperaturzyklusmessung eines in Keramik eingebetteten Silizium-Dehnmessstreifens, oben: 951PX und unten: BCT. Links ist jeweils die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes dargestellt und rechts die Temperaturabhängigkeit der Versorgungsspannung (U_0) und des Offsets/ normierte Brückenausgangsspannung (U_{a0}).

Im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 4 K stiegen die Brückenwiderstände R_{951PX} und R_{BCT} reversibel an und kehrte beim Wiedererwärmen auf den Ausgangswert zurück. Dieses Verhalten ist charakteristisch für Carrier-Freeze-out sowie für temperaturabhängige Änderungen der Kontaktwiderstände und wird auf piezoresistive Effekte und thermisch induzierte Eigenverspannungen im Verbund zurückgeführt [7]. Die relative Änderung des Brückenwiderstands betrug bei 951PX

-0,46%FS, während für BCT eine Änderung von +0,465%FS gemessen wurde. Die Versorgungsspannung U_0 veränderte sich proportional Brückenwiderstand. Für den Offset U_{a0} wurde ein substratabhängiges Verhalten beobachtet, bei 951PX trat ein Vorzeichenwechsel nahe 4 K auf, während bei BCT ein kontinuierlicher Anstieg verzeichnet wurde. Die unterschiedlichen Verläufe von U_{a0} lassen sich durch eine Kombination aus spannungsinduzierten Effekten infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten (CTE-Mismatch) sowie variierendem Kontaktverhalten der verwendeten Silberpasten erklären. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen bestätigt sich eine hohe Stabilität der eingebetteten Si-DMS selbst unter extremen thermischen Bedingungen und zeigt gleichzeitig eine Substratabhängigkeit. Der Vorzeichenwechsel ist Gegenstand laufender Untersuchungen. Zusätzliche reproduzierbare Messreihen und Experimente sind notwendig zur abschließenden Klärung.

Optische Evaluation

Die Ergebnisse der optischen Untersuchungen beider Keramiken sind in Abbildung 5 dargestellt.

Bei der mikroskopischen Auswertung der siebgedruckten Leiterbahnen (Abb. 5 a & d) lag der Fokus auf der Vollständigkeit und Unversehrtheit der Leiterbahnen, der Adhäsion zum LTCC-Substrat sowie dem Vorhandensein von Rissen und Delaminationen. Für beide untersuchten LTCC-Keramiken zeigten sich in der mikroskopischen Auswertung keine Auffälligkeiten.

Im Anschluss erfolgten Röntgenaufnahmen (b & e), um Informationen über innere Defekte, Via-Integrität und Positioniergenauigkeit zu erhalten. Hierbei zeigte sich, dass bei beiden Keramiken um die Vias ringförmige Kontrastunterschiede sichtbar sind, was auf ein partielles Ablösen bzw. Wegschrumpfen der Keramik in diesen Bereichen hindeutet. An den untersuchten Substraten ließen sich für beide LTCC-Materialien keine Fehler in der Positionierung des Si-DMS nachweisen.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurden Querschnitte angefertigt (c & f). Die Einbettung des Si-DMS in beide Keramiken gelang insgesamt zufriedenstellend, seitlich waren jedoch noch kleine Hohlräume erkennbar. Der Querschnitt des 951PX (c) bestätigte die Vermutung von Hohlräumen um die Durchkontaktierungen (Vias) nicht. Beim BCT zeigte der Querschnitt hingegen deutliche sinterungsbedingte Hohlräume zwischen

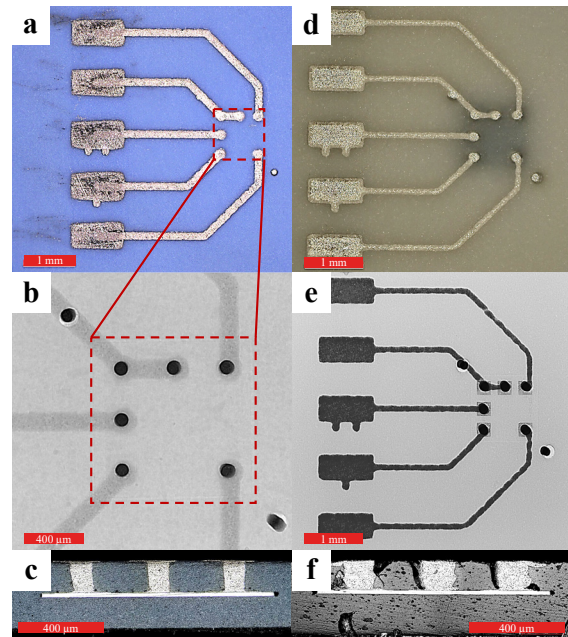


Abb. 5: Vergleich der gesinterten Keramiken 951PX (a - c) und BCT (d - f): mikroskopische Untersuchung der Leiterbahnen (a & d), Röntgenuntersuchung der gefüllten Durchkontaktierungen und der Ausrichtungsgenauigkeit (b & e) und Querschnitt der vollständig eingebetteten Si-DMS in Keramik (c & f). Adaptiert und modifiziert von [5].

Keramik und Via. Diese sind durch das Schwindungsverhalten des Keramiktafes während des Sinterprozesses bedingt. Zu berücksichtigen ist, dass für BCT bislang kein vom Hersteller validiertes Metallisierungssystem verfügbar war. Daher wurde auf ein handelsübliches Metallisierungssystem eingesetzt, dessen Siebdruckpaste bereits für BCT validiert wurde, die für die Via-Metallisierung verwendete Paste bislang nur teilweise validiert war. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei der Auswahl bzw. Anpassung des Metallisierungssystems für BCT weiterer Optimierungsbedarf besteht.

Aufgrund der sinterungsbedingten Schrumpfung des Keramiktafes nahe der Vias sowie des vermuteten CTE Mismatches wurden ergänzende Analysen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) durchgeführt. Die REM-Aufnahmen dokumentierten Mikrorisse in der Keramik um die Vias (siehe Abb. 6, rote Markierungen).

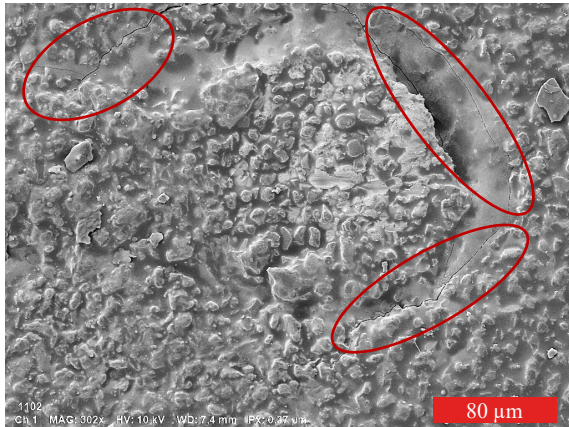


Abb. 6: Detailaufnahme mittels REM der BCT-Keramik in Via-Nähe.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Lösungsansatz für direkten Medienkontakt, sogenannte Nass-Nass-Sensoranwendungen auf Grundlage von Silizium und LTCC wurde untersucht. Silizium-Dehnungsmessstreifen konnten erfolgreich in zwei Keramikmaterialien, integriert, gesintert und ein elektrischer Kontakt nachgewiesen werden.

Die Brückenwiderstände R_{951PX} und R_{BCT} der vollständig eingebetteten Si-DMS kehren nach dem Temperaturwechselzyklus (Raumtemperatur – 4 K – Raumtemperatur) zu ihren ursprünglichen Werten zurück. Somit ist eine dauerhafte Schädigung durch die thermische Untersuchung für beide Keramiken auszuschließen. Beide Keramiken sind auf Grundlage der durchgeführten Experimente kryogen- und hochtemperaturbeständig, wie in dieser Studie gezeigt wurde. BCT erwies sich als vorteilhaft, da es nach dem Sintern semi-transparent erscheint und somit eine vorläufig einfache Überprüfung der Positioniergenauigkeit des Si-DMS ohne zusätzliche Werkzeuge ermöglicht.

Trotz des bei BCT nachgewiesenen sinterungsbedingten Schrumpfungsverhaltens der Keramik um die Vias traten keine elektrischen Ausfälle auf.

Als nächster Arbeitsschritt werden mit beiden Keramik-Materialsystemen die zweite Aufbauvariante mit innenliegenden Leiterbahnen gefertigt und charakterisiert. Anschließend werden an diesen Proben Temperaturwechselzyklen durchgeführt. Parallel dazu wird für das BCT eine gezielte Optimierung der eingesetzten Via-Metallisierung untersucht. Abschließend soll ein erster Prototyp eines membranfreien Differenzdrucksensors aufgebaut werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz/Energie (BMWK/BMW) unter den Förderkennzeichen 49MF230066 (DMS in Keramik) und 20M2216E (H2ELZET). Wir danken B. Müller, M. Fischer und J. Müller (Gruppe Elektroniktechnik, Technische Universität Ilmenau) für die Bereitstellung der Geräte, die Unterstützung während des Herstellungsprozesses mit dem BCT-Material und bei der Durchführung der Röntgenuntersuchung. Wir bedanken uns bei den Kolleginnen und Kollegen A. Böttger für die Querschnitt- und REM-Analysen sowie K. Lauer und S. Hermann für die Unterstützung und Durchführung der Temperaturwechselzyklen.

Literaturnachweis

- [1] A. A. Velichko et al., "The Strain Gauges on the SOI Structures," 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2021, pp. 53-57, doi: [10.1109/APEIE52976.2021.9647644](https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647644).
- [2] R. Tamura et al., "High Dynamic Range 6-Axis Force Sensor Employing a Semiconductor–Metallic Foil Strain Gauge Combination," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 4, pp. 6243-6249, 2021, doi: [10.1109/LRA.2021.3093008](https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093008).
- [3] Y. Imanaka, "Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology", Springer (2004).
- [4] T. Frank et al., "Siliziumdehnungssensoren zur Spannungsanalyse," MikroSystemTechnik Kongress, Stuttgart-Ludwigsburg, Germany, 2021.
- [5] C. Kleinholt et al., "Fabrication and Evaluation of Fully Embedded Silicon Strain Gauges in Ceramic Material for Wet-Wet Applications," International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 2026.
- [6] Celanese Corporation, Technical Datasheet Celanese Micromax™ GreenTape™ 951PX, 2024, available at: <https://www.celanese.com/en/products/micromax>.
- [7] P. Verma, D. Punetha and S.K. Pandey, "Sensitivity Optimization of MEMS Based Piezoresistive Pressure Sensor for Harsh Environment," Silicon [12](#), 2020, 2663–2671.