

# Siliziumdehnungssensoren zur Werkzeuginnendruckmessung

Thomas Frank, Stefan Hermann, André Grün, Danny Hanig, Manuel Kermann, Michael Hintz, Andrea Cyriax, Heike Wünscher, Thomas Ortlepp,  
CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Germany,  
tfrank@cismst.de

## Zusammenfassung

Bei Spritzgusswerkzeugen wird zur Prozesskontrolle der Werkzeuginnendruck verwendet. Die Anforderungen für einen passenden Sensor sind: Frontbündiger Medienkontakt, frei formbarer Medienkontakt, keine Ölvorlage, Nenndruck bis 300 MPa. Beschrieben wird ein piezoresistiver Drucksensor ohne Biegeplatte, aufgebaut aus hochfestem Stahl, hybrid bestückt mit Silizium-Dehnungssensoren.

Keywords: Silizium, Dehnung, Piezoresistiv, Druck, Hochdruck, Werkzeuginnendruck, Stahl, Glasfritte.

## Werkzeuginnendruck

Bei Spritzgusswerkzeugen wird zur Prozesskontrolle der Werkzeuginnendruck verwendet. Vollmuth gibt in [1] einen Überblick über die Anwendung und die Anforderungen an die Sensorik. Der Innendruck ist für das Monitoring des Spritzvorgangs notwendig. Zurzeit werden vorzugsweise piezoelektrisch wirkende Drucksensoren verwendet. Diese benötigen keine Biegeplatte, sind aber nur für dynamische Anwendungen geeignet. Da der Spritzgussvorgang zyklisch ist, ist dieses Prinzip hierfür gut geeignet.

Die Anforderungen für einen passenden Sensor sind:

- Frontbündiger Medienkontakt
- Frei formbarer Medienkontakt
- keine Ölvorlage
- Nenndruck bis 300 MPa

Die Abb. 1 zeigt die bevorzugte Einbausituation eines Drucksensors zur Werkzeuginnendruckmessung. Es wird für die Simulation davon ausgegangen, dass der Druck nur von oben aufgebracht wird. Der Zylinder sitzt passend im Werkzeug, so dass die axiale Bewegung nicht behindert wird und keine Flüssigkeit, Spritzguss, die Zylinderwand beeinflusst.

Zur Herstellung von Drucksensoren werden verschiedene Technologien und Messprinzipien angewendet. Am weitesten verbreitet ist das piezoresistive Messprinzip. Zur

Realisierung der Messwiderstände werden Dickschicht- oder Dünnschichtwiderstände verwendet, aber auch implantierte Messwiderstände in Silizium finden eine Anwendung. Diese sind zu einer Wheatstone'schen Messbrücke verbunden.

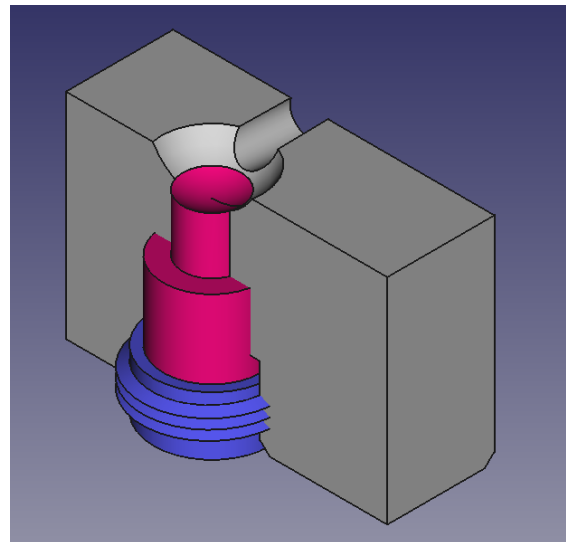


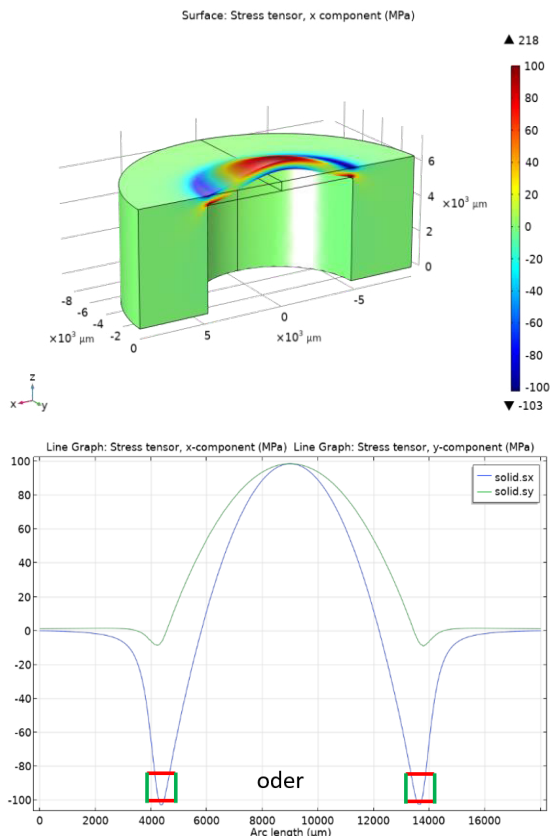
Abb. 1 Beispiel des Einbaus eines Drucksensors mit frei formbarem Medienkontakt: Grau: Werkzeuggehäuse, Blau: Einschraubhalterung, Magenta: Sensorelement, Durchmesser des Medienkontaktes ca. 4-8 mm

Während für die Dickschicht- oder Dünnschichttechnik vorzugsweise Verformungskörper aus Keramik bzw. aus Stahl verwendet werden und der Aufbau weitgehend standardisiert ist,

besteht bei siliziumbasierten Drucksensoren ein breites Spektrum an Aufbauten.

Drucksensoren für die Prozessmesstechnik aus Silizium, verwenden eine Ölvorlage und eine Trennmembran aus chemikalienbeständigem Stahl. Diese besitzen einen frontbündigen Medienkontakt. Wegen der Ölvorlage und der empfindlichen Trennmembran sind diese ungeeignet.

Drucksensoren, hergestellt in Dickschicht- oder Dünnschichttechnik lassen sich nur sehr aufwendig mit einem frontbündigen Medienkontakt fertigen. Die sensitiven Messwiderstände sind traditionell auf der ebenen Seite der Biegeplatte positioniert. Der Medienkontakt befindet sich in der Kavität auf der Rückseite.



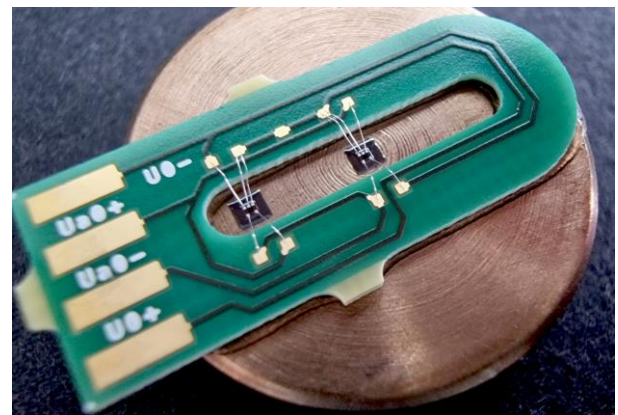
**Abb. 2** Traditioneller Drucksensor, aus Stahl vorgesehen für Dünnschichtwiderstände, Druck von unten, Alternativ die Position der Si-DMS auf der Oberseite, Si-DMS nach Abb. 4. Simulation des mechanischen Verhaltens

Die Abb. 2 zeigt die Simulation einer derartigen druckbelasteten Messzelle.

Die Messwiderstände befinden sich oben auf der Ebene, der Druck wirkt auf die Rückseite. Dadurch ist eine strikte Trennung der Medien-seiten von der Elektronik gewährleistet. Die Biegespannung ist mit den traditionellen Dünnschichtwiderständen leicht zu bestimmen.

Die Biegeplatte dient zur Vergrößerung der Empfindlichkeit. Durchmesser und Dicke sind abhängig vom Messbereich. Die Platte wird derart dimensioniert, dass die Biegespannung bei Nenndruck im Bereich von 50 bis 100 MPa liegt. Sie generiert aus dem anliegenden Druck negative und positive Dehnung für die Messwiderstände der Messbrücke.

Alternativ können Silizium-Dehnungssensoren eingesetzt werden. Die Abb. 3 zeigt ein Beispiel eines Testaufbaus.



**Abb. 3:** Si-DMS auf Stahlrunde, 1.4542,  $\varnothing=18$  mm, für den Aufbau eines Drucksensor, Testaufbau

Diese robusten und preiswerten Messzellen aus beständigem Stahl werden in vielen Anwendungen bevorzugt.

Die Abb. 4 zeigt das Layout eines Silizium-Dehnungssensors mit einer integrierten Vollbrücke und das Ersatzschaltbild. Die Position der Si-DMS auf dem Federkörper befindet sich im Bereich eines Spannungsmaximums am Rand. Die Messwiderstände sind als eine Vollbrücke angeordnet. Ein Chip ist ausreichend, die Abb. 3 zeigt 2 Chips für eine bessere Temperaturkompensation.

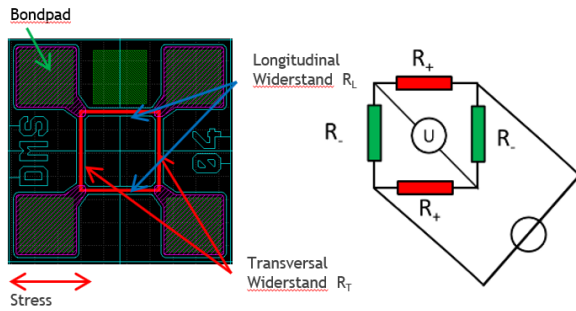


Abb. 4: Layout des verwendeter Si-DMS, die Messwiderstände sind zu einer Vollbrücke angeordnet

Diese Chips werden mit Glasfritte auf den Federkörper gefügt. In [2] bis [4] sind Informationen zur Funktion und zum Fügen auf dem Federkörper dargestellt.

Eine wichtige Eigenschaft ist zu beachten. In der Abb. 5 sind die Piezoeffizienten für p-Silizium der Orientierung  $\langle 100 \rangle$  dargestellt. Insbesondere treten bei diesem Material die Longitudinal- und Transversaleffekte alle  $90^\circ$  identisch auf. Das führt dazu, dass der Si-DMS wie er in Abb. 4 dargestellt ist; nur gut funktioniert, wenn die Belastung in den Richtungen X und Y stark unterschiedlich sind.

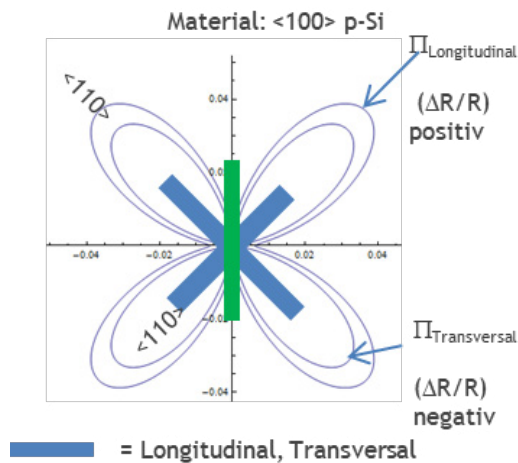


Abb. 5 Richtungsabhängige Größe der Piezoeffizienten für  $\langle 100 \rangle$   
 $\pi_L = 7,2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ,  $\pi_T = -6,1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

Bei einer isotropen mechanischen Belastung kompensiert die Brückenschaltung alle Änderungen. Der optimale Punkt ist am Rand, im Bereich der Einspannung. Die Mitte der Biegeplatte ist ungünstig, siehe Abb. 2.

Thermisch induzierte mechanische Spannung, hervorgerufen durch die unterschiedlichen Materialien, Silizium, Glasfritte und Stahl werden dadurch ebenso kompensiert, da die mechanischen Spannungen an allen 4 Messwiderständen im Idealfall identisch sind. Ein Messwiderstand vereinigt zwei gegenläufige Effekte, den Transversal- und den Longitudinaleffekt. Werden sie beide zeitgleich aktiviert ist die Änderung des Widerstands minimal. Eine isostatische Belastung führt so zu keinem gut nutzbaren Ergebnis. Vielmehr sollte pro Messwiderstand nur ein Effekt aktiviert und dieser im Spannungsfeld gut positioniert werden. Dies erfordert eine anisotrope Belastung.

### Ein Sensor für den Werkzeuginnendruck

Zur Bestimmung des Werkzeuginnendruck wird ein Sensor ohne Biegeplatte mit Si-DMS entwickelt. Drucksensoren ohne Biegeplatte und Hohlräume sind besonders für sehr hohe Drücke geeignet. Das Angebot von Drucksensoren für einen Messbereich über 300 MPa ist sehr übersichtlich. Anwendungen existieren bis 2 GPa, z.B. die Autofrettage. Für Drücke bis 300 MPa ist insbesondere eine bündige Frontplatte mit einem minimalen Durchmesser wünschenswert. Aufwendig ist ein Aufbau mit frontbündigem Medienkontakt mit der Erweiterung, dass dieser freiformbar ist, so dass die Teilgeometrie des Formwerkzeugs eingearbeitet werden kann. Diese beiden Anforderungen können durch folgenden Aufbau gelöst werden.

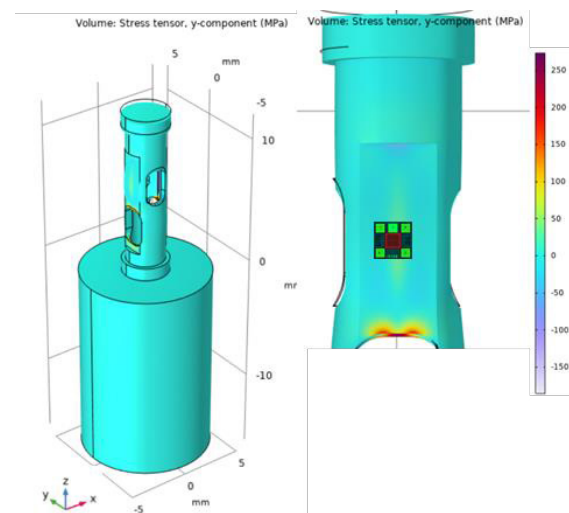


Abb. 6 Simulation des Federkörpers, Bereich des Si-DMS, Position Si-DMS

Es wird daher ein senkrechtbelasteter Federkörper gewählt. Dieser ist derart gestaltet, dass der Si-DMS aus  $\langle 100 \rangle$  p-Silizium günstig belastet werden kann.

Die Abb. 6 zeigt eine Simulation der Messzelle und dessen mechanischen Spannungsverlauf im Bereich des Si-DMS. Die Zelle besteht aus einer breiten Basis, auf dieser befindet sich ein zylinderförmiger Federkörper, welcher im Inneren die elektrische Zuführung zum Si-DMS beinhaltet. Der Verlauf der mechanischen Spannung ist für den Si-DMS sehr günstig. Die relevante Richtung ist Y. In Richtung X treten nur minimale mechanische Spannungen auf, siehe Abb. 7.

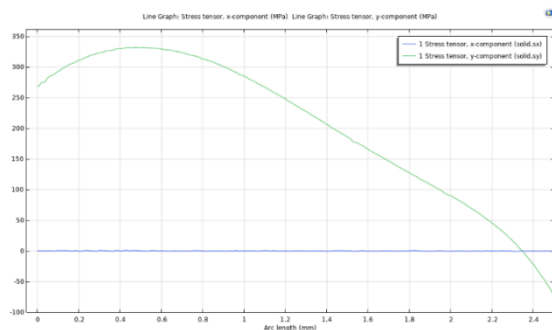


Abb. 7 Verlauf der mechanischen Spannung im Federbereich, der Si-DMS ist im Maximum positioniert

Der Federkörper wird abschließend durch eine Hülse aus einem steifen und harten Material geschützt, siehe Abb. 8. Diese Hülse schützt die Elektronik und versteift den Sensor. Durch verschiedene Hülsen kann das Design bis 2 GPa angepasst werden. Hierfür wird ein Wolframcarbid-Kobalt-Hartmetalle verwendet. Die Druckfestigkeit bei diesem Material liegt bei über 5 GPa und ist für die Anwendung geeignet.

Der Verlauf der relevanten mechanischen Spannung an der Position des Si-DMS für verschiedene Belastungen und Hüsendurchmesser ist in der Abb. 9

Volumen: Spannungstensor, y-Komponente (MPa)

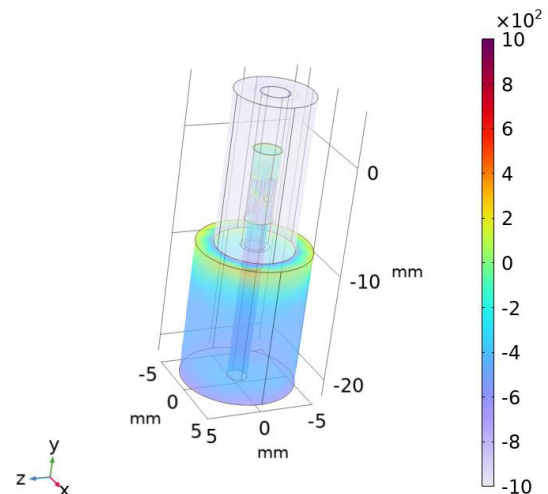


Abb. 8 Verlauf der mechanischen Spannung im Bereich des Si-DMS

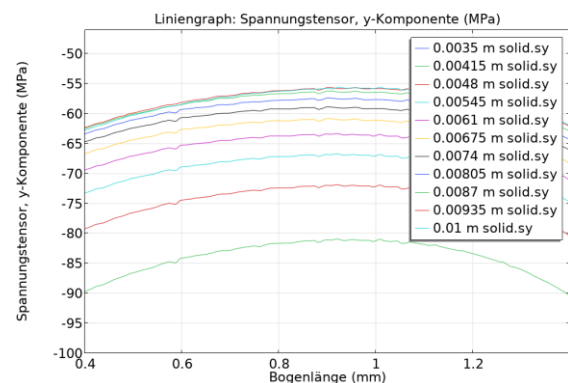


Abb. 9 Verlauf der mechanischen Spannung im Bereich des Si-DMS

Die Abb. 10 zeigt den mechanischen Aufbau, Stahlkörper, Si-DMS und die LTCC-Leiterkarte. Der Bereich um den Si-DMS ist durch einige Freistellungen nachgiebig ausgeführt. Der Si-DMS wird durch Drahtbonden mit der LTCC-Leiterkarte elektrisch kontaktiert. Durch eine Hülse wird der Messbereich eingestellt. Diese Hülse schützt die Elektronik und versteift den Sensor.



Abb. 10 Mechanischer Aufbau, Federkörper 1.4542, Si-DMS, Leiterplatte aus LTCC für den Anschluss des Si-DMS



Abb. 11 Si-DMS gefügt mittels Glasfritte

Die Abb. 11 zeigt den gefügten Si-DMS, drahtgebondet mit der LTCC-Leiterkarte vor dem Verguss. In Abb. 12 ist der vollständige Aufbau mit Verguss LTCC-Leiterkarte und Flexleiter für die elektrische Anbindung.



Abb. 12 Vollständiger Aufbau für die Innendruckmessung

In diesem Zustand wurde die Kennlinie aufgenommen. Erste Messergebnisse sind in Abb. 13. Die Messung wurde ohne die Hülse an einer Prüfmaschine QUASAR50 von GALDABINI durchgeführt.

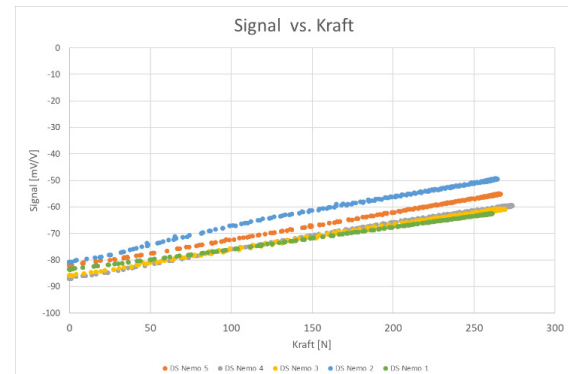


Abb. 13 Verlauf der mechanischen Spannung im Bereich des Si-DMS

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Europäischen Kommission für die finanzielle Unterstützung der Projekte DS-NEMO (49MF220036) DS300MPa (49MF220019) und SIDMESES (49MF200061).

## Literaturnachweis

- [1] Jan Vollmuth, konstruktionspraxis.de - Alles, was der Konstrukteur braucht, Der Werkzeuginnendruck ist ein Indikator der Produktqualität, 16.01.2023, <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/der-werkzeuginnendruck-ist-ein-indikator-der-produktqualitaet-a-4f3f6cef04c619a69d2d8c11643b69da/>
- [2] 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
- [3] André Grün, "Innovative Fügetechnologien zum Aufbau von feuchte- und temperaturstabilen Kraftsensoren basierend auf piezoresistiven Silizium-Dehnmessstreifen", Deutsche IMAPS-Konferenz 2021, München, Deutschland, 21.-22.10.2021.
- [4] Thomas Frank, "Monitoring von Verbindungselementen mit Hilfe von Silizium-Dehnmessstreifen"