

Kostengünstige Nass/Nass-Differenzdruckmessung

Reinhard Werner, Henrik Schöpe

Analog Microelectronics GmbH, An der Fahrt 13, 55124 Mainz, Deutschland

Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung präsentieren wir ein Konzept für einen kostengünstigen, miniaturisierten Sensor zur Messung von Druckdifferenzen unter rauen / nassen Umgebungsbedingungen. Auf die in solchen Fällen oft eingesetzte Trennmembran mit Ölvorlage, die das Messelement vom jeweiligen Medium isoliert, wird hier verzichtet. Stattdessen werden zur Differenzdruckmessung zwei Silizium-messelemente eingesetzt und die Differenzdruckmessung durch zwei Druckmessungen mit relativem Bezug und anschließender Differenzbildung ersetzt. Konstruktionsbedingt kommen die sensiblen Messelemente nur mit ihrer unempfindlichen Rückseite mit dem jeweiligen Messmedium in Berührung, sodass auch elektrisch leitende Flüssigkeiten oder schwach korrosive Gase als Messmedium verwendet werden können.

Abstract

In this publication we present a concept for an inexpensive, miniaturized sensor to measure pressure differences in harsh or wet environments. The sensor has no separation membrane with oil buffer isolating the sensing element from the respective measuring medium. The differential measurement is done by performing two relative pressure measurements using two identical silicon sensing elements and subsequent subtraction of the sensing elements' output signals. Due to its design only the insensitive backside of the delicate sensing elements comes into contact with the respective measuring medium, so that even electroconductive fluids and weak corrosive gases can be used as measuring medium.

Keywords: Differenzdrucksensor, Medienresistenz, Nass / Nass, differential pressure sensor, harsh environment, wet / wet.

Einleitung

Auf dem Messen und Überwachen von Drücken, insbesondere von Druckdifferenzen, basiert die Funktion vieler Anlagen und Geräte. Beispielhaft sind folgende Einsatzgebiete zu nennen:

- Füllstandshöhe in Flüssigkeitstanks
- Überwachung von Filtern
- Durchfluss- Volumenstrommessung

Grundlagen und Stand der Technik

Die Umwandlung der mechanischen Größe „Druck“ p in eine elektrische Größe erfolgt meist auf dem gleichen Weg: Der Druck p , definiert als Kraft F pro Fläche A

$$p = F/A \text{ [Pa]}$$

wirkt auf eine Membran und deformiert diese. Die Deformation / Auslenkung kann mittels diverser physikalischer Prinzipien gemessen

werden, wobei hier nur die gängigen genannt werden sollen:

- induktives Messprinzip
- kapazitives Messprinzip
- resistives Messprinzip

In den meisten industriellen Drucksensoren kommt heute das resistive Prinzip zur Anwendung.

Die Methoden der modernen Halbleiterindustrie ermöglichen es, hochgenaue, stark miniaturisierte Druckmesselemente mit Membran, Messwiderständen und Leiterstrukturen in Silizium als MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) herzustellen. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Druckmesselements auf Siliziumbasis.

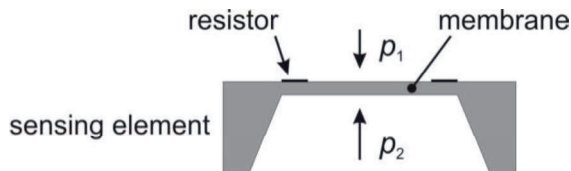


Abb. 1: Aufbau eines Druckmesslements auf Siliziumbasis.

Mit einem solchen MEMS Element lässt sich ein hoher Miniaturisierungsgrad, ein großes Nutzsignal auf Grund des piezoresistiven Effekts [1] und eine einfache Signalauswertung realisieren. Ferner ermöglicht das Halbleiterfertungsverfahren große Stückzahlen und eine kostengünstige Fertigung.

Für die Druckmessung werden die mechanischen Spannungen in der Siliziummembran unter Ausnutzung des piezoresistiven Effekts gemessen. An geeigneten Stellen werden hierfür vier Messwiderstände implementiert und zu einer Wheatstonschen-Messbrücke verschaltet (siehe Abb. 2). Beim Anlegen einer Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ vergrößern sich die Werte der Widerstände R_2 , R_3 und gleichzeitig reduzieren sich die Werte von R_1 und R_4 .

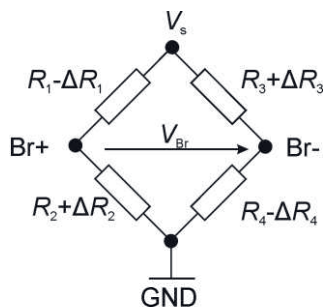


Abb. 2: Messbrücke

Für eine idealisierte Brücke mit vier gleichen Widerständen R und einer druckabhängigen Widerstandsänderung ΔR gilt für die Ausgangsspannung der Messbrücke V_{Br} :

$$V_{Br} = \frac{\Delta R(\Delta p)}{R} V_s$$

worin V_s die Versorgungsspannung bezeichnet.

Das resultierende Ausgangssignal kann mittels einer geeigneten Auswerteelektronik verstärkt, aufbereitet und als normiertes Signal ausgegeben werden. Hierfür bietet die Industrie passende Standard-Lösungen als integrierte Schaltungen (ASIC) an [2][3].

Diese können zusätzlich Nichtlinearitäten und Temperaturabhängigkeiten des Brückensignals kompensieren.

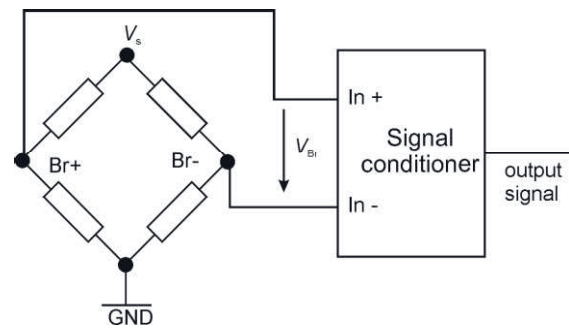


Abb. 3: Auswertung einer Sensorbrücke

In Abb. 4 ist der typischen Aufbau eines einfachen industriellen Differenzdrucksensors mit Siliziummesslement und Auswerteelektronik dargestellt [4]. Beide sind mittels Aufbau- und Verbindungstechnik zusammen auf einem Substrat montiert, das gleichzeitig der elektrischen Kontaktierung dient. Das empfindliche Innere wird durch eine druckdicht montierte Kappe geschützt. Die Druckzuführung erfolgt über die beiden Druckanschlüsse 1 und 2.

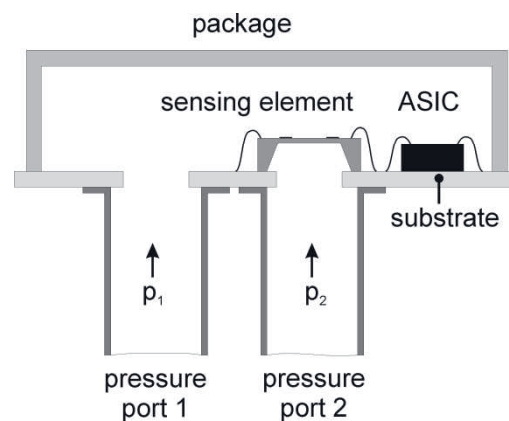


Abb. 4: Drucksensor mit einem Messelement

Diese einfachen Sensoren eignen sich nur zur Differenzdruckmessung von trockenen und nicht korrosiven Gasen. Für andere Medien sind sie nur sehr eingeschränkt verwendbar.

Um auch Differenzdruckmessungen an Flüssigkeiten und korrosiven Gasen durchführen zu können, muss das sensible Sensorinnere von dem Messmedium isoliert werden. Bei handelsüblichen Sensoren werden dazu verschiedene konstruktive Methoden [5][6] verwendet, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Die sicherste Möglichkeit, das Messelement und die dazu gehörige Auswerteelektronik vor dem Messmedium zu schützen, ist das Einsetzen einer elastischen Trennmembran aus Edelstahl und die Verwendung von Öl als Druckmittler (vgl. Abb. 5). Der konstruktive Aufwand führt zu einem entsprechenden Bauvolumen und in der Folge zu höheren Kosten.

Darüber hinaus verringert die Eigensteifigkeit der verwendeten Edelstahlmembran die Empfindlichkeit, so dass sich diese Methode nicht zur Messung von sehr kleinen Differenzdrücken eignet.

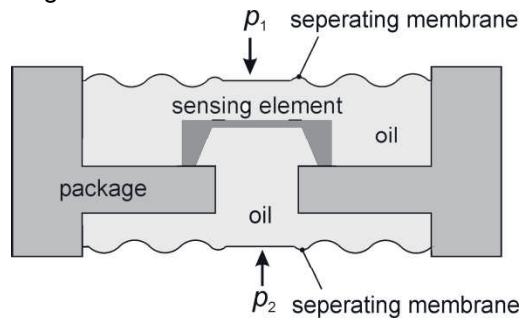


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau eines Differenzdrucksensors mit Trennmembranen

Eine kostengünstige Alternative stellt das Abdecken / Vergießen des empfindlichen Sensorinneren dar. Dazu werden üblicherweise Silikongele oder Polymerschichten (Parylene) verwendet. Abb. 6 zeigt den Aufbau eines solchen Systems.

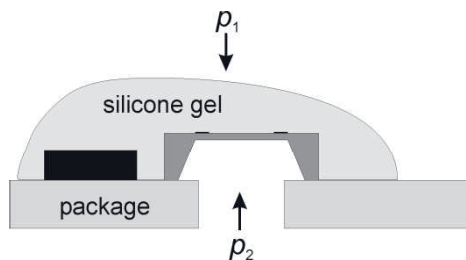


Abb. 6: Drucksensor mit Silikongelabdeckung

Dem Vorteil des geringen Platzbedarfs und der geringen Kosten steht der Nachteil einer nur eingeschränkten Medienkompatibilität gegenüber. Darüber hinaus bietet diese Methode nur einen eingeschränkten Langzeitschutz. Über einen längeren Zeitraum können Bestandteile des Mediums durch die Schutzschicht hindurch diffundieren oder sie unterkriechen.

Alternatives Lösungskonzept

In der Literatur [7][8] wird ein Differenzdrucksensor mit zwei Messelementen beschrieben, bei dem die Differenzdruckmessung durch zwei Relativdruckmessungen ersetzt wird. Dieser Ansatz, der von den Autoren auf dem aktuellen Stand der Technik umgesetzt wurde, verwendet zwei identische Silizium(Si)-Messelemente. Er ermöglicht eine kostengünstige Realisierung von medienkompatiblen Differenzdrucksensoren.

Abb. 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Differenzdrucksensors. Die beiden Messelemente sind zusammen mit einer Signalauswerteelektronik auf einem Substrat mon-

tiert. Das empfindliche Sensorinnere ist durch eine montierte Kappe mechanisch geschützt. Die Druckzuführung erfolgt durch die beiden Anschlussstutzen 1 und 2. Eine zusätzliche Bohrung dient dem Druckausgleich im Sensorinneren.

Beide Si-Messelemente messen den anliegenden Druck p_1 bzw. p_2 relativ zum Umgebungsdruck. Dabei kommen nur die unempfindlichen Rückseiten der Siliziummesselemente mit dem Messmedium in Kontakt. Auf diese Weise kann eine ausgezeichnete Medienkompatibilität erreicht werden, die nur durch die eingesetzten Materialien beschränkt ist.

Der Systemdruck, der gleichzeitig an beiden Ports dieses Differenzdrucksensors anliegen darf, ist auf Grund der zweifachen Relativdruckmessung auf den Nenndruck der einzelnen Messelemente beschränkt.

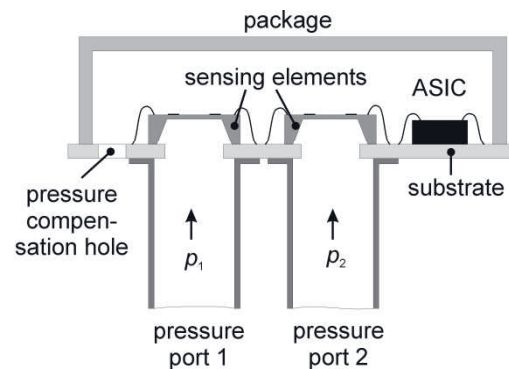


Abb. 7: Aufbau eines Differenzdrucksensors mit zwei Siliziummesselementen

Die verwendete Signalauswerteelektronik hat die Aufgabe, die Brückensignale der beiden Messzellen aufzubereiten und die Differenz zu bilden.

Die Signalaufbereitung kann rein analog oder nach analog / digital (A/D)-Wandlung digital erfolgen. Sie umfasst die Linearisierung, die Temperaturkompensation und den Abgleich auf ein Standardausgangssignal. Die Differenzbildung kann dabei vor der eigentlichen Signalaufbereitung oder erst am Schluss geschehen.

Um maximale Flexibilität und Genauigkeit zu erreichen, wurde bei dem realisierten Sensor die Signalauswertung gemäß Abb. 8 realisiert.

Die einzelnen Messbrückensignale werden hier getrennt voneinander verstärkt und A/D gewandelt. Anschließend erfolgt für jedes Digitalsignal eine Linearisierung, Temperaturkompensation und ein Abgleich auf ein Standardsignal mit Hilfe eines Mikro(μ)-Controllers.

Die Differenzbildung wird erst im letzten Schritt durchgeführt.

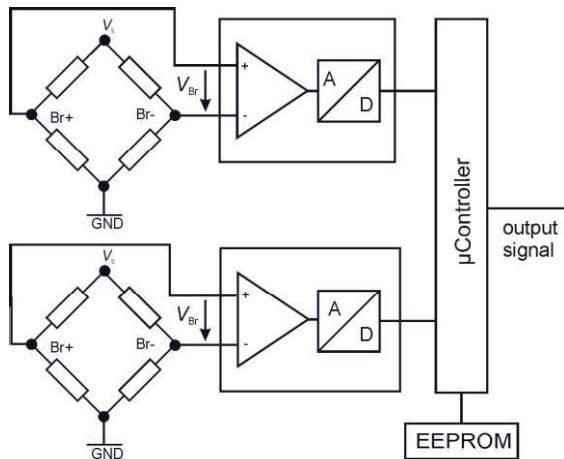


Abb. 8: Sensor mit Auswerteelektronik.

Realisierter Prototyp

Abb. 9 zeigt das Foto eines Prototyps des realisierten Differenzdrucksensors. Er wurden als miniaturisierte board mount Drucksensoren im DIL-Gehäuse auf Basis eines Keramiksubstrats (Abmessung: $15 \times 15 \text{ mm}^2$) konzipiert.

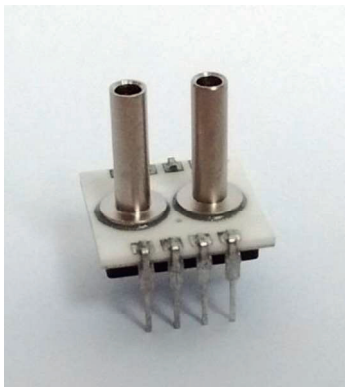


Abb. 9 Bild des Differenzdrucksensors

Kalibrierung

Zum Abgleich der Prototypen werden die beiden Messelemente des jeweiligen Sensors an drei verschiedenen Umgebungstemperaturen bei jeweils mehreren Drücken charakterisiert. Diese individuellen Messdaten werden mittels eines Algorithmus zur Berechnung von Korrekturkoeffizienten genutzt, die im EEPROM des jeweiligen Sensors gespeichert werden. Im späteren Betrieb errechnet der μ Controller auf Basis der gespeicherten Korrekturkoeffizienten und der aktuellen, digitalisierten Brückensignale die standardisierten Relativdrucksignale und daraus als Differenz das standardisierte Differenzdrucksignal.

Messergebnisse

Die nachfolgenden Messergebnisse wurden mit Sensorprototypen ermittelt, die mit zwei

identischen 1 bar Druckmesselementen aufgebaut wurden. Um möglichst gleiche Eigenschaften der Messelemente garantieren zu können, wurden jeweils benachbarte Messelemente von einem Wafer verwendet.

Die Sensorprototypen wurden nach der Kalibrierung in einem Druck- und Temperaturprüfstand untersucht.

In einem ersten Schritt wurden der Gleichlauf der beiden Relativdrucksensoren und die Systemdruckabhängigkeit des Ausgangssignals des Differenzdrucksensors bei Raumtemperatur überprüft. Dazu wurden die beiden Druckanschlüsse gemeinsam an einen Druckkalibrator angeschlossen und der Druck, beginnend bei 0 bar in 25 mbar Schritten bis 1 bar erhöht und anschließend in gleicher Weise wieder gesenkt. Nach dem Erreichen eines jeden Druckwerts wurden die standardisierten Relativdrucksignale und das Differenzdrucksignal aufgezeichnet. Insgesamt wurden 16 Druckzyklen durchlaufen. Die Temperatur wurde dabei konstant bei 25°C gehalten.

Aus diesen Daten wurde der Fehler, bezogen auf das Nutzsignal (Full Span Output = FSO), bestimmt.

In Abb. 10 ist der Fehler der einzelnen Drucksignale als Funktion des anliegenden Systemdrucks für einen Sensor dargestellt. Der aufgetragene Fehler wurde aus der Differenz des jeweiligen Ausgangssignals zur idealen Kennlinie, normiert auf 1 bar, berechnet.

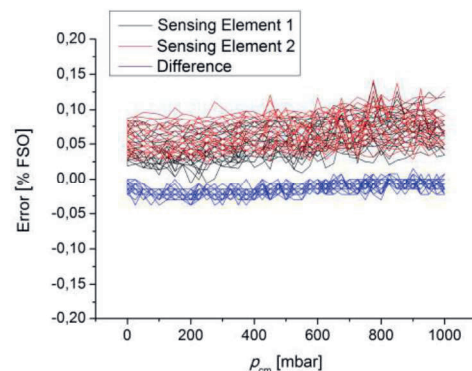


Abb. 10. Gleichlauf der zwei Si-Druckmeselemente bei Raumtemperatur

Im gesamten Druckbereich von 0 bis 1 bar weisen die beiden Relativdrucksensoren eine sehr gute Genauigkeit auf; der maximale Fehler ist kleiner als 0,15 %FSO. Das Differenzdrucksignal zeigt nahezu keine Abhängigkeit vom angelegten Systemdruck. Der maximale Fehler von 0,04 %FSO des Differenzdrucksignals und die geringe Streuung bestätigen den exzellenten Gleichlauf beider Relativdrucksensoren.

In einem zweiten Schritt wurden der Gleichlauf der Messelemente und die Systemdruckabhängigkeit der Prototypen unter Temperatureinfluss untersucht. Dazu wurde die Umgebungstemperatur im Intervall von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Schritten von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zyklisch variiert. Bei jedem Temperaturpunkt wurde der zuvor beschriebene Druckzyklus zwischen 0 und 1 bar einmal durchlaufen und die Relativdrucksignale sowie das Differenzdrucksignal aufgezeichnet.

Abb. 11 zeigt den Fehler der einzelnen Drucksignale als Funktion der Temperatur.

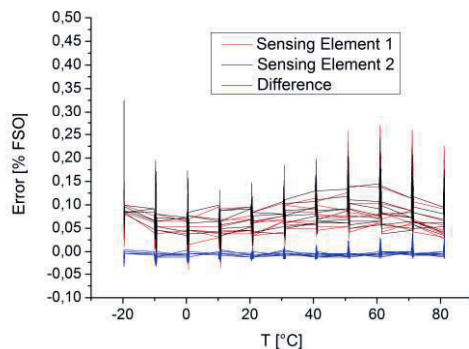


Abb. 11: Temperaturgang der zwei Si-Druckmesselemente und des Differenzsignals im Bereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Im untersuchten Temperatur- und Druckbereich weisen die beiden Relativdrucksensoren einen maximalen Gesamtfehler von kleiner als $0,35\text{ \%FSO}$ auf; der Temperaturgang des Offsets ist kleiner als $0,15\text{ \%FSO}$.

Dies zeigt, dass die Temperaturkompensation bei beiden Messzellen gut funktioniert.

Das Differenzdruckausgangssignal weist im gesamten Temperatur- und Systemdruckintervall einen maximalen Fehler kleiner als $0,1\text{ \%FSO}$ auf; die Temperaturabhängigkeit des Offsets ist kleiner als $0,05\text{ \%FSO}$.

Die Messdaten zeigen, dass auch unter Temperatur ein exzellenter Gleichlauf der beiden Si-Messelemente erreicht werden konnte.

Für die weiteren Untersuchungen wurden Prototypen als Differenzdrucksensoren mit einem Druckbereich von 0 bis 100 mbar konfiguriert. Auf Grund der verwendeten 1 bar Si-Messelemente sind Systemdrücke von 0 bis 1000 mbar möglich.

Bei Raumtemperatur wurde an diesen Differenzdrucksensoren verschiedene Druckmessungen durchgeführt: Zum einen wurde die Differenzdruckkennlinie bei unterschiedlichen Systemdrücken zwischen 0 und 900 mbar aufgezeichnet. Zum anderen wurde

die Systemdruckabhängigkeit des Ausgangssignals bei verschiedenen, konstant gehaltenen Druckdifferenzen untersucht.

In Abb. 12 ist der Fehler des Differenzdrucksignals eines Differenzdrucksensors bei Raumtemperatur als Funktion des anliegenden Differenzdrucks zwischen 0 und 100 mbar mit dem Systemdruck als Parameter dargestellt. Als Systemdruck wurden 0, 250, 500, 750 und 900 mbar gewählt. Zur Fehlerberechnung wurde die Abweichung des realen Messwertes von der idealen Kennlinie berechnet und auf 100 mbar FSO normiert. Im Rahmen der Fehlergrenzen konnte für den Differenzdrucksensor eine Messgenauigkeit von kleiner $\pm 0,3\text{ \%FSO}$ erreicht werden. Der Systemdruck zeigt dabei nur einen sehr geringen Einfluss. Die detaillierte Abhängigkeit des Ausgangssignales vom Systemdruck ist in Abb. 13 dargestellt. Aufgetragen ist der Fehler des Differenzdruckausgangssignales bei Raumtemperatur als Funktion des Systemdrucks für die Differenzdrücke von 0, 25, 50, 75 und 100 mbar. Nahezu unabhängig vom angelegten Differenzdruck kann eine leichte Systemdruckabhängigkeit beobachtet werden. Im Rahmen der Fehlergrenzen beträgt die maximale Abweichung von der idealen Kennlinie $\pm 0,4\text{ \%FSO}$.

Beide Abbildungen zeigen, dass sich mit den beiden identischen 1 bar Messelementen 100 mbar Differenzdrucksensoren mit guter Messgenauigkeit realisieren lassen.

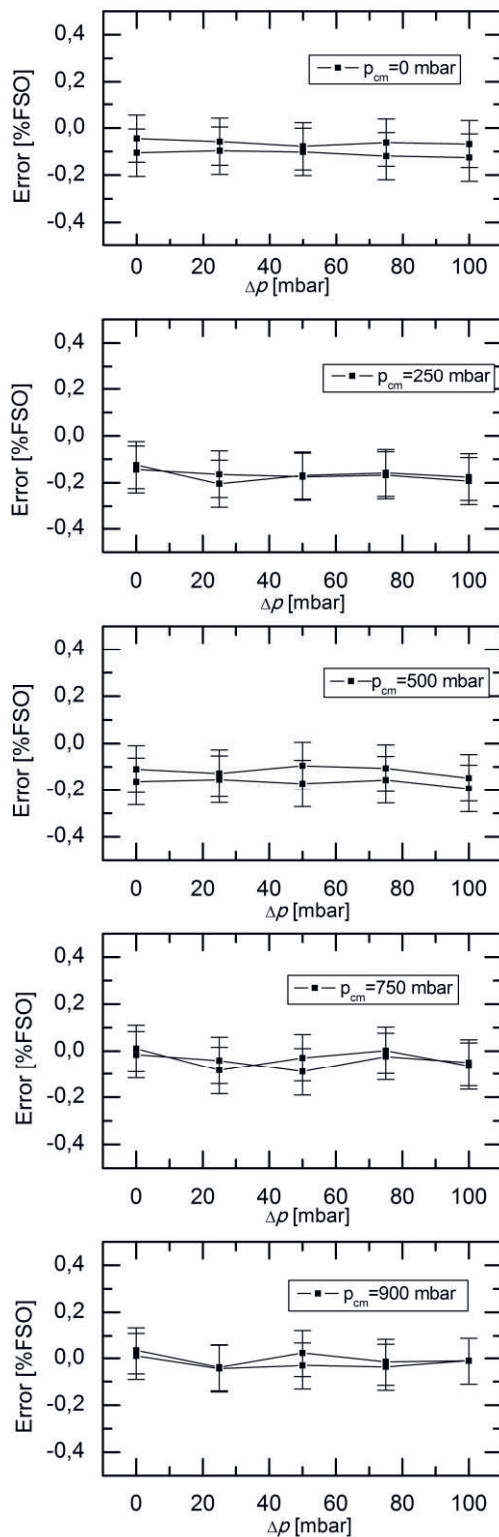


Abb. 12: Fehler des Differenzdrucksignals als Funktion des anliegenden Differenzdrucks bei unterschiedlichen Systemdrücken.

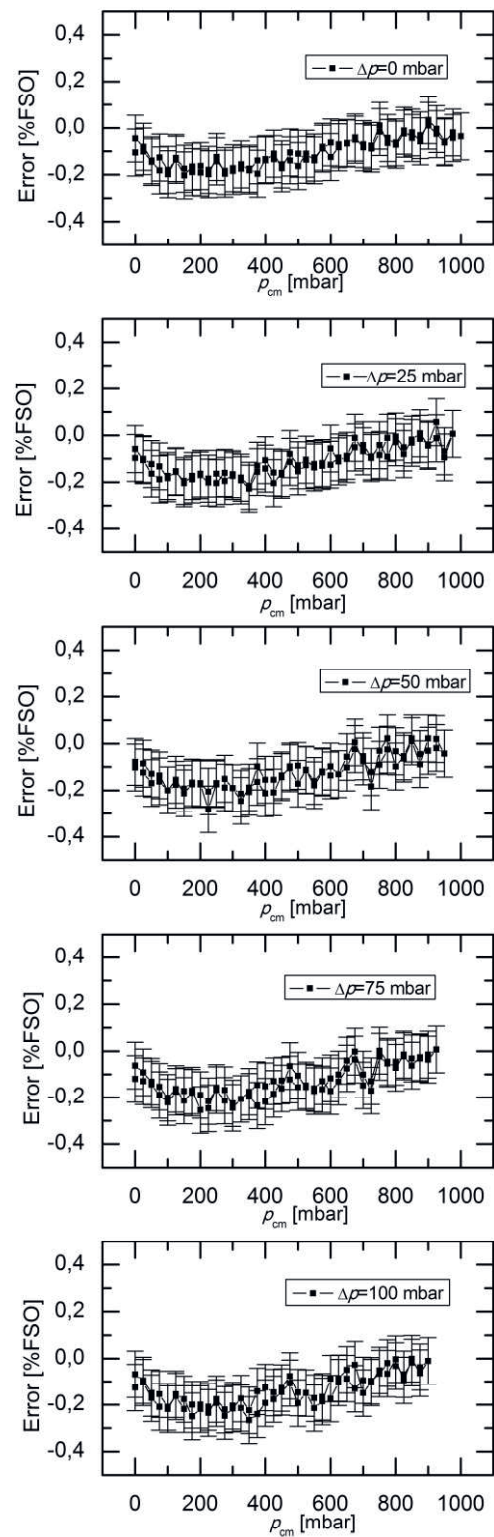


Abb. 13 Fehler des Differenzdrucksignals als Funktion des Systemdrucks für die Differenzdrücke von 0, 25, 50, 75 und 100 mbar.

Ausblick

Die Eigenschaften der mit 1 bar Messzellen aufgebauten 100 mbar Differenzdrucksensor-Prototypen haben ermutigende Ergebnisse geliefert. Daher soll das Konzept auf weitere Druckbereiche ausgeweitet werden.

Die vorliegenden Messungen sind an Prototypen mit Messelementen von demselben Wafer durchgeführt worden. Um die Serientauglichkeit des Konzeptes weiter zu untersuchen, müssen die Messungen an zusätzlichen Prototypen wiederholt werden, bei denen Messelemente von anderen Wafern / Losen zum Einsatz kommen. Erst dann kann ermittelt werden, mit welcher Streuung diese Differenzdrucksensoren produziert werden können.

Ferner ist noch zu klären, wie langzeitstabil der Gleichlauf zwischen den beiden Messelementen ist, bzw. wie stark sich deren Eigenschaften über die Zeit verändern.

Literaturnachweis

- [1] G. Gerlach, R. Werthschützky, 50 Jahre Entdeckung des piezoresistiven Effekts-Geschichte und Entwicklungsstand piezoresistiver Sensoren, *Technisches Messen* 72, S. 53-76 (2005);
- [2] ZSC31014 Resistive Sensor Signal Conditioner with Digital Output, Datenblatt, Integrated Device Technology, Inc., www.idt.com
- [3] MAXQ7670A Microcontroller with 12-Bit ADC, PGA, 64KB Flash, and CAN Interface. Datenblatt, Maxim Integrated Products, Inc. www.maximintegration.com
- [4] AMS 5915 - Drucksensor mit I2C-Ausgang für die PCB-Montage, Datenblatt. Analog Microelectronics GmbH. www.analog-micro.com
- [5] Mark J. Clifford, Erfinder; Kavlico Corporation, Inhaber. Independent-Excitation crosscoupled differential-pressure transducer. United States patent US 6581468 B2. 2003 Jun. 24.
- [6] D5100 Industrial Differential Pressure Transducer. Datenblatt. Measurement Specialties, Inc., a TE Connectivity company. www.TE.com/sensorsolutions/D5100Industrial
- [7] Walter Czarnocki, William, Erfinder; Motorola Inc., Inhaber. Gain-adjusting circuitry for combining two sensors to form a media isolated differential pressure sensor. United States patent US 5471884. 1995 Dez. 5.
- [8] Anthony D. Kurtz. Erfinder; Kulite Semiconductor Products, Inhaber. United States patent US 6272928 B1. 2001 Aug. 14.