



Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresistiven Messzellen

In der Sensorik werden verschiedene Methoden zur Druckmessung angewandt. Dabei wird im Allgemeinen zwischen der relativen, der differentiellen und der Absolutdruckmessung unterschieden. Was man über die Messung des Absolutdruckes mit piezoresistiven Druckmesszellen [1] wissen sollte, erläutert der nachfolgende Artikel der Firma AMSYS.

Absolutdruckmessung

Definition: Absolutdruckmessung ist die Druckmessung des Drucks P_1 relativ zum perfekten Vakuum P_0 ($P_0 = 0$ bar).

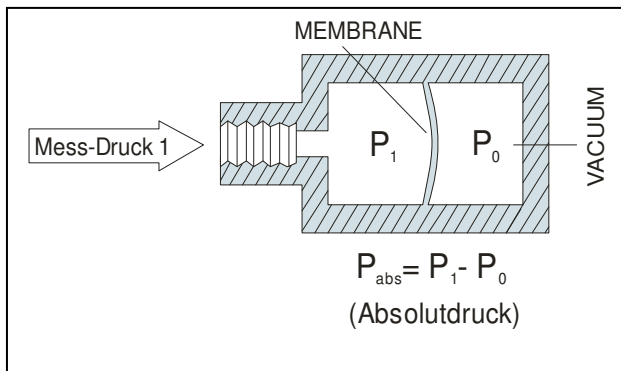


Abbildung 1: Prinzip eines Absolutdrucksensors



Abbildung 2: Industrieller Absolutdrucksensor (AMSYS U5100 [2])

Mikromechanische Druckmesszellen aus Silizium (Druckdie)

Da die mikromechanischen Wandlerelemente auf Siliziumbasis (siehe *Abbildungen 3, 4 und 5*) mit den Methoden der Halbleitertechnologie hergestellt werden, genügen sie deren Ansprüchen in Bezug auf Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit. Alle mikromechanischen Druckmesszellen aus Silizium haben als druckempfindliches Element eine dünne Membrane, die anisotrop aus dem Siliziumchip (Siliziumblock) ausgeätzt wird (Cavity). An geeigneten Stellen der Membrane werden im Halbleiterprozess lokal Fremdatome in das Siliziumkristall implantiert, so dass Zonen mit geänderter elektrischer Leitfähigkeit entstehen, die die Eigenschaften von Widerständen besitzen. Sobald ein Druck auf die Membran wirkt, deformiert sich mit der Durchbiegung der dünnen Siliziummembran die molekulare Struktur des Kristalls. Insbesondere in den Widerstandsgebieten finden starke Kristallverschiebungen statt, die zu einer messbaren Änderung ihres Widerstandwertes führen (Piezoresistiver Effekt). Werden diese integrierten Widerstände zu einer Brücke geschaltet, so erhält man bei Strom- oder Spannungseinprägung ein druckabhängiges, differentiellles Signal im Millivoltbereich, das mit geeigneten Instrumentenverstärkerschaltungen elektronisch erfasst und aufbereitet werden kann.

Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresistiven Messzellen

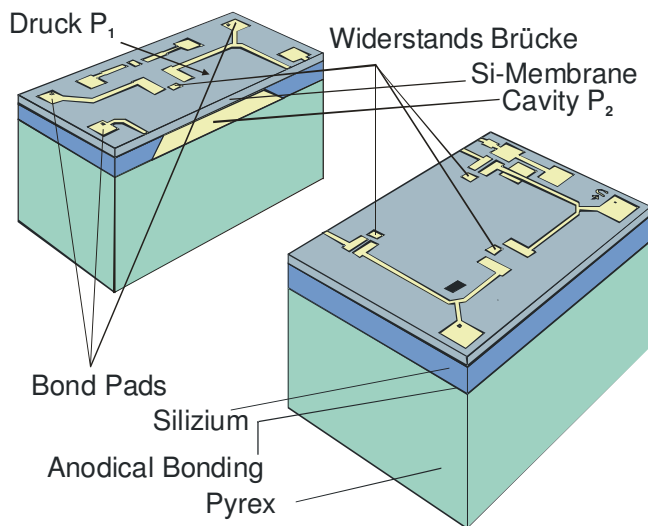


Abbildung 3: Typischer Aufbau einer Siliziummesszelle zur Absolutdruckbestimmung. P_1 ist gleich dem Druck P_2 in der Cavity

Die Abmessungen der Siliziummesszellen sind von dem Druckbereich und von der Herstellungstechnologie abhängig. Sie betragen ungefähr $2 \times 2 \times 0,8 \text{ mm}^3$ für den Druckbereich von ca. 300 mbar bis 30 bar.

Die Absolutmesszellen bestehen aus einem geschlossenen Glas(Pyrex)sockel (blau-grün), dem Siliziumkörper (blau) und einer Membranschicht (hellblau), aus der die Cavity bis auf eine dünne Membranschicht ausgeätzt ist. Die Membran selbst hat abhängig von dem zu messenden Druck eine Stärke zwischen 10 und 50 μm .

In *Abbildung 5* wird die Struktur der Siliziumzelle vertieft.

Absolutdruckmessung mit Siliziumsensoren

Bei der Absolutdruckmessung (siehe *Abbildung 3*) erfolgt die Erfassung des Messdrucks P_1 gegen einen Referenzdruck P_2 in der Cavity, der so niedrig sein sollte, dass er im Vergleich mit dem zu messenden Druck vernachlässigt werden kann. Im Idealfall wäre dies $P_2 = 0 \text{ bar}$ (d.h. $P_2 =$ perfektes Vakuum).

Zahlenbeispiel - Eine Absolutdruckmessung von 700 mbar bedeutet ein Messdruck von 700 mbar über dem perfekten Vakuum und 313,25 mbar unter dem Normaldruck. (Normaldruck = 1013,25 mbar auf Meeresspiegelniveau bei 0°C und auf 45° geographischer Breite), also ein wahrnehmbarer Unterdruck gegenüber dem Normaldruck.

Für den Absolutdrucksensor (*Abbildung 4*) ergibt sich konstruktiv die Konsequenz, dass die Messzelle unter Vakuum hergestellt werden muss. Konkret: bei entsprechendem Unterdruck P_2 muss die Messzelle hermetisch mit dem Glassockel (Pyrexsubstrat) verschlossen werden, was in einem elektrochemischen Prozess unter hoher Spannung (Anodic Bonding) geschieht. Der Unterdruck P_2 (Referenzdruck) sollte wegen der Messwertstabilität dauerhaft seinen Wert beibehalten.

Bei Druckbeaufschlagung mit dem Druck P_1 auf die Membranoberseite, biegt sich diese in Richtung des niederen Druckes. Da gilt $P_1 \gg P_2$, biegt sich folglich die Membrane nach Innen in die Cavity (siehe *Abbildungen 5*).

Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresistiven Messzellen

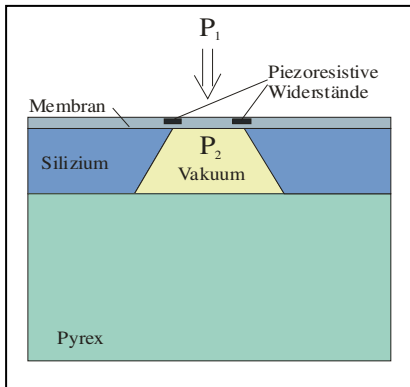


Abbildung 4: Querschnitt einer piezoresistiven Messzelle zur Bestimmung des Absolutdrucks P_1 mit Widerstandsbrückenschaltung
(In der Abbildung ist der äußere Druck $P_1 = P_2 = \text{Vakuum}$)

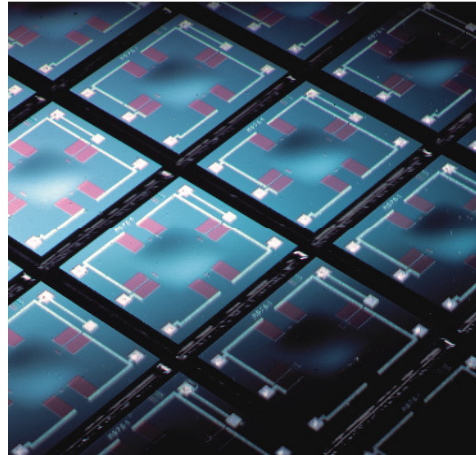


Abbildung 5: Siliziumdruckmesszellen im Waferverbund zur Absolutdruckmessung (Aufsicht) bei atmosphärischem Außendruck = P_1 . $P_1 \gg P_2$

Kommentar zur Abbildung 5: Die hellen Linien auf den Silizium-Druckmesszellen sind die Aluminium-Leiterbahnen mit den Alu-Pads (helle Vierecke) zum Anschluss der Verbindungsdrähte zur äußeren Beschaltung. Die violetten Flächen sind eindiffundierte, leitende Verbindungen zu den piezoresistiven Widerständen. Die tiefer eindiffundierten piezoresistiven Widerstände (nicht sichtbar) befinden sich also zwischen den violetten Flächen am Rande der Einwölbung, im Gebiet der größten mechanischen Spannungen. In der Mitte der Messzelle sieht man die Deformation (Einwölbung) der Membran, die durch den von außen wirkenden Atmosphärendruck P_1 verursacht wird.

Sensoraufbau

Der piezoresistive Absolutdrucksensor besteht aus der Messzelle, die auf ein Substrat aufgebaut wird, der Verstärker- und Auswerteelektronik (ASIC) und dem Gehäuse mit Druckanschluss und elektrischer Verbindung.

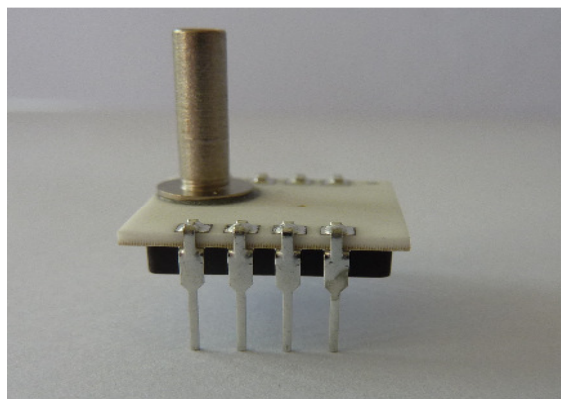
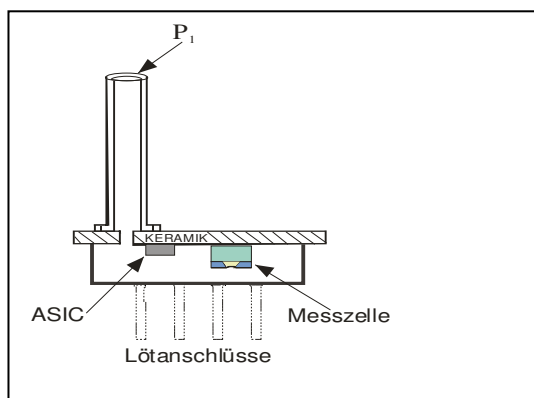


Abbildung 6: Absolutdrucksensor am Beispiel AMS 5812 [3]

Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresitiven Messzellen

Ausgangssignal

Durch den piezoresitiven Effekt der monokristallinen Messzelle ergibt sich am Ausgang der implantierten Widerstandsmessbrücke (*Abbildung 4*) ein Signal $V_{OUT} = f(P_1, P_2)$, das proportional zum wirkenden Druck ist. Es gilt mit S = Sensitivität:

$$V_{OUT} \approx S \cdot (P_1 - P_2)$$

Dieses Differenzsignal wird im Instrumentenverstärker des Signal Conditioning Systems (*Abbildung 8*) um den Faktor g verstärkt.

Mit der Proportionalität hat man die Steigung der Übertragungskennlinie des Sensors ermittelt, aber noch nicht Null- und Endpunkt festgelegt, d.h. man muss den Abbildungsfaktor a durch eine entsprechende Kalibration bestimmen.

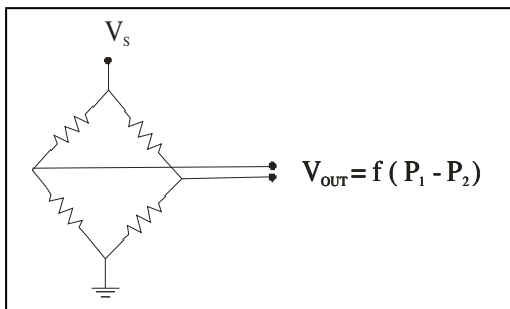


Abbildung 7: Wheatstonesche Brückenschaltung

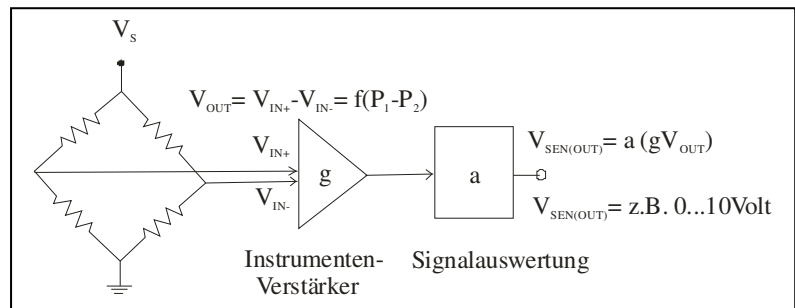


Abbildung 8: Prinzipschaltung Sensor mit Auswerteschaltung

Nullpunkt (Offset)

Die Spannung V_{out} am Messbrückenausgang bei der Bedingung $P_1 = P_2$ wird allgemein als Offsetspannung bezeichnet. Dies gilt ohne Einschränkung für alle Drucksensoren. Wenn per Definition der Absolutdruck gegen das perfekte Vakuum gemessen werden soll, müsste in der Cavity P_0 herrschen. Man muss jedoch berücksichtigen, dass ein Referenzdruck von 0 bar in der Cavity technisch nicht zu realisieren ist. Es wird also in der Praxis ein Druck P_2 vorhanden sein, der auf jeden Fall größer als 0 bar ist. Unter dem Aspekt der Definition des Absolutdruckes bedeutet der Druck $P_2 \neq 0$ bar einen Offset, der die Messung verfälscht.

In der Nullpunkt-Kalibration wird dieser Wert durch einen Algorithmus ermittelt und in der Signalauswerteschaltung (*Abbildung 8*) elektronisch vorgehalten. Dazu wird die Druck-Kennlinie des individuell zu messenden Sensors bei zwei Drücken z.B. Nenndruck und Niederdruck aufgenommen. Die Gerade durch beide Punkte wird bis zum Drucknullpunkt extrapoliert. Der sich ergebende y-Achsenabschnitt entspricht der Offsetspannung, die auf den gewünschten Nullpunktwert kalibriert werden muss z.B. 0 V.



Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresistiven Messzellen

Full-Scale-Signal (Spanne)

Die Spanne (FSO) ist definiert als das Ausgangssignal bei max. Messdruck minus der Offsetspannung. Bei einem Sensorausgangssignal von 10 Volt und einer Offsetspannung von 0,05 Volt ist die Spanne 9,95 Volt. Das FSO ist nicht zu verwechseln mit dem FS-Signal, das als Messdruck inklusiv dem Offset definiert ist und in dem Zahlenbeispiel 10Volt beträgt.

Ähnlich wie der Offset, muss das Full-Scale-Signal auf den gewünschten Ausgangsendwert z.B. 10 Volt oder andere Werte kalibriert werden.

Beim Absolutdrucksensor ist die Spanne immer auf das perfekte Vakuum bezogen.

Mit der Bestimmung der Offsetspannung und des Spannsignals ist die Übertragungskennlinie des Sensors bei Raumtemperatur festgelegt.

Da sowohl der Offset als auch das Spannsignal temperaturabhängig sind, müssen diese Fehler kompensiert werden. Dazu werden während der Kompensation die Temperaturfehler des Offsets (TSO) und der Spanne (TCS) bei verschiedenen Temperaturen ermittelt und in der Signalauswerteschaltung in gleicher Weise wie Offset und Spanne korrigiert.

All diese Abgleichprozeduren (Kalibration und Kompensation) werden bei den abgeglichenen und verstärkten Sensoren bereits bei dem Hersteller durchgeführt.

Anwendungen

In Industrieanlagen, in denen der Druck, der im Inneren eines Systems herrscht, überwacht werden muss und bei denen der Umgebungsdruck keinen Einfluss auf den Druck im System hat, z.B. bei geschlossenen Druckluftsystemen, eignet sich ein Absolutdrucksensor zur Druckerfassung. Ein geläufiges Beispiel für die Anwendung des Absolutdrucksensors ist die Druckmessung in Gasflaschen oder in pneumatischen Systemen (Kompressoren). Der Vorteil der Absolutdrucksensoren in solchen geschlossenen Systemen ist in dem relativ einfachen Aufbau der Sensoren zu sehen. Im Gegensatz zu den Relativdruckaufnehmern muss keine zusätzliche Verbindung vom Sensor zur Umgebungsbereich geschaffen werden, sondern der Absolutdrucksensor muss nur an das Innere des zu messenden Systems angeschlossen werden.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist ein System, das aus einer Pumpe mit einem angeschlossenen Behälter (Vakuumkammer) besteht, der ausgepumpt werden und kontrolliert werden soll. Abhängig von der Dichtigkeit der Pumpe und der Anlage kann man in der Vakuumkammer einen Unterdruck erzeugen, der allerdings nur bis zu dem Wert P_2 , der in der Cavity herrscht, korrekt angegeben wird.

Eine populäre Anwendung der Absolutdruckmessung ist die Ermittlung des barometrischen Druckes zwischen 700 und 1200 mbar als herrschender Umgebungsdruck. In diesem Falle wird wegen des Wunsches nach einer optimierten Anzeigedynamik der Nullpunkt auf 700 mbar und das Full Scale-Signal auf 1200 mbar kalibriert. (Ein weiterer Artikel von AMSYS zur Höhenmessung mit Absolutdrucksensoren gibt konkrete Anwendungsbeispiele [4])

Mit der Messung des barometrischen Druckes, lässt sich der Absolutdrucksensor als Höhenmesser benutzen. Da die geographische Höhe h mit dem herrschenden Luftdruck p über die folgende Formel verknüpft ist, kann man durch die Bestimmung des Absolutdrucks die geographische Höhe bestimmen:



Wissenswertes zur Absolutdruckmessung mit piezoresistiven Messzellen

Höhenbestimmungsformel

$$h = \frac{288,15 \text{ K}}{0,0065 \text{ K/m}} \left[1 - \left(\frac{p}{101.325 \text{ Pa}} \right)^{0,0065 \text{ K/m} \frac{R}{g}} \right]$$

Die Approximation basiert auf folgenden Annahmen:

- Druck bei Normalnull = 101325 Pa = 1013,25 mbar
- Temperatur bei Normalnull = 288,15 K
- Temperaturgradient = 6,5 K / 1000 m
- R ist die spezifische Gaskonstante
 $R = R^* / M_0$ ($R = 287,052 \text{ J/K kg}$)
- g ist die Erdbeschleunigung $g = 9,80620 \text{ m/s}^2$ auf dem 45. Breitengrad.

Im Bereich der barometrischen Sensoren werden Drucksensoren angeboten, die mit 24bit Prozessoren arbeiten und damit bei 1000 mbar bis zu 0,012 mbar ($\approx 10\text{cm}$) auflösen können. Dazu zählt z.B der MS5803 [5] und der miniaturisierte MS5607 [6], der in mobilen Höhenmessern (Uhren) eingebaut werden kann.

Aufgrund solcher Leistungsmerkmale werden beispielsweise moderne Absolutdruckaufnehmer zur Höhenkontrolle in Flugzeugen, in Wetterballons und Fallschirmen und im Flugzeugmodellbau als mobile Höhenmesser eingesetzt.

Zusammenfassung

Absolutdruckmessung ist nur eine Art der Druckbestimmung. Mit dieser Methode misst man den Druck gegen das perfekte Vakuum und bezeichnet die so ermittelte Größe als Absolutwert. Es ist die probate Art, den Druck in geschlossenen Systemen zu messen, die z.B. unabhängig vom Außendruck sind.

Weiterführende Informationen

- [1] Detaillierte Informationen zu den piezoresistiven Drucksensoren: <http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/>
- [2] Produktinformation medienresistenter Drucksensor U5100: <http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/d5100-medienkompatible-differenzdrucktransmitter/>
- [3] Produktinformation Drucksensor AMS 5812: <http://www.amsys.de/t/produkte/drucksensoren/ams5812-analog-digitaler-drucksensor/>
- [4] Anwendungsnotiz 509: „Präzise Höhenmessung mit dem Druckmessmodul MS5607“ <http://www.amsys.de/downloads/notes/MS5611-Präzise-Höhenmessung-mit-einem-Drucksensormodul-AMSYS-509d.pdf>
- [5] Produktinformation Drucksensor MS5803: <http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/ms5803-digitaler-absolutdrucksensor-fuer-outdoor-anwendungen/>
- [6] Produktinformation Drucksensor MS5607: <http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/ms5607-digitaler-präzisions-barometer-sensor/>

Kontakt

AMSYS GmbH & Co. KG
An der Fahrt 4
55124 Mainz
Deutschland

Telefon: +49 (0) 6131/469 875 0
Telefax: +49 (0) 6131/469 875 66
E-Mail: info@amsys.de
Internet: <http://www.amsys.de>