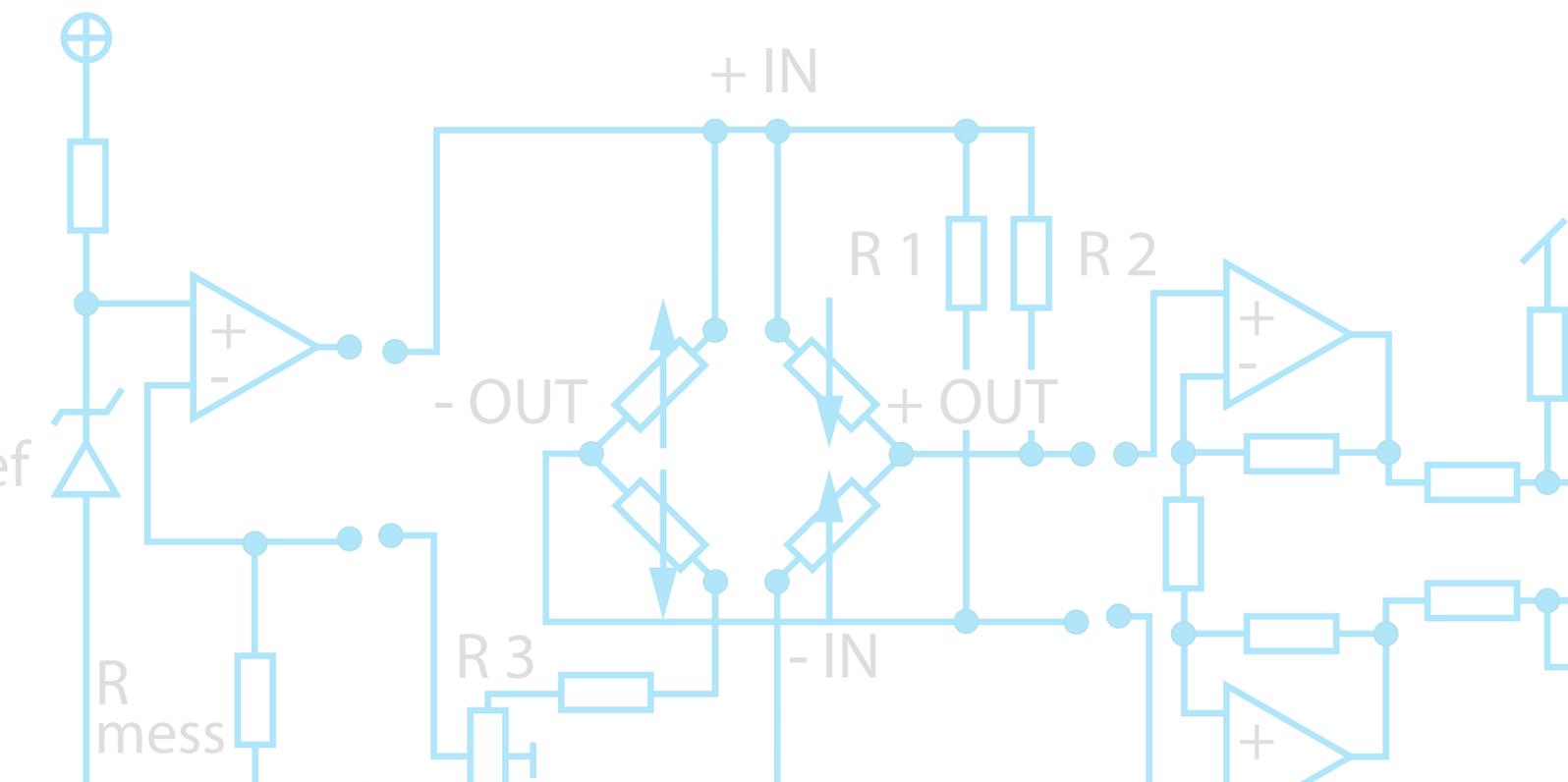
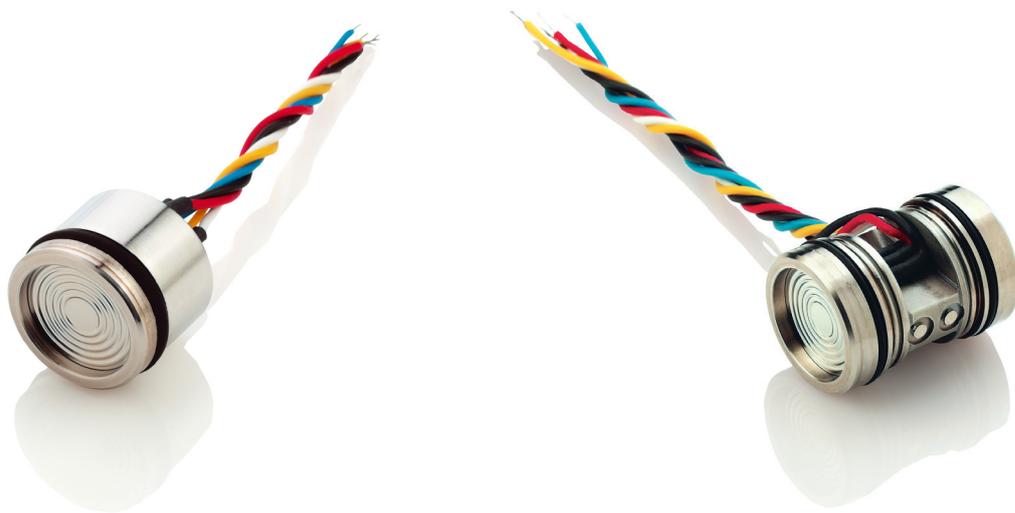




Elektrische Druckmessung auf piezoresistiver Basis

von Dipl. Masch. Ing. ETH Jens Bomholt, CH-Winterthur (verfasst 1984)





Inhalt

3.1.	Druckaufnehmer auf resistiver Basis	1
3.1.1.	Metallische Dehnmessstreifen (DMS).....	1
3.1.2.	Halbleiter-DMS.....	1
3.1.3.	Miniaturisierungsmöglichkeiten	2
3.2.	Grundlagen piezoresistiver Druckmessung	2
3.2.1.	Halbleitertechnische Grundlagen	2
3.2.1.1.	Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien	2
3.2.1.2.	Halbleiterherstellung	2
3.2.1.3.	Halbleiterwiderstand.....	3
3.2.1.4.	Die Halbleiterdiode.....	3
3.2.1.5.	Mehrere Widerstände auf dem gleichen Chip.....	3
3.2.1.6.	Temperaturverhalten der Halbleitereigenschaften	4
3.2.2.	Piezoresistiver Effekt.....	4
3.2.3.	Integrierte Membrane.....	5
3.2.4.	Integrierte Druckmesszelle.....	6
3.2.4.1.	Messzelle	6
3.2.4.2.	Verschluss und Montage.....	7
3.2.4.3.	Elektrische Kontaktierung	7
3.3.	Aufbau zum Druckaufnehmer	7
3.3.1.	Verpackung der Druckaufnehmer	7
3.4.	Verhalten piezoresistiver Druckaufnehmer	9
3.4.1.	Temperaturverhalten	9
3.4.2.	Druckverhalten Signal-Druck-Kurve.....	10
3.4.3.	Frequenzverhalten	11
3.4.4.	Hysterese, Reproduzierbarkeit.....	11
3.4.5.	Stabilität	12
3.5.	Auswertung, Kompensation, Kalibrierung.....	13
3.5.1.	Auswertung	13
3.5.2.	Temperatursauswertung und -kompensation.....	13
3.5.3.	Druckauswertung und Kalibrierung Druckverhalten.....	15
3.5.4.	Zusätzliche analoge Kompensationsmöglichkeiten	17
3.6.	Speisung und Verstärkung	17



Die Erfordernisse der Prozesstechnik, Automatisierung und Computertechnik verlangen nach Messgeräten mit elektrischem Ausgangssignal. Die erste Stufe war die Ausrüstung konventioneller Druckmessgeräte mit einem elektrischen Zusatz, der die Deformation des federnden Elementes in ein elektrisches Signal bewerkstelligte. Dies kann z.B. auf kapazitivem, induktivem oder resistivem Weg geschehen, indem die Deformation auf einem Kondensator mit variablem Plattenabstand, auf ein Spulensystem mit verschiebbarem Kern oder auf ein Potentiometer bzw. einen deformationsabhängigen Widerstand übertragen wird. Die zweite Stufe war die Entwicklung integrierter Sensoren, die einen Verbund von Druckaufnehmern und Druck-Signal-Wandlern darstellen. Zu ihnen gehören auch die piezoresistiven Messverfahren.

3.1. Druckaufnehmer auf resistiver Basis

Bei resistiven Druckaufnehmern wird durch einen Druck ein Widerstand bzw. mehrere Widerstände verändert. Es handelt sich in den meisten Fällen nicht um das Verstellen eines Potentiometers, sondern um die Veränderung der Leitfähigkeit eines Dehnmessstreifens. Solche Druckaufnehmer sind sowohl für statische als auch dynamische Anwendungen geeignet. Sie sind passiv, benötigen also eine Speisung. Je nachdem, welche Widerstände verwendet werden, und nach welchem Fertigungsprinzip der Druckaufnehmer hergestellt ist, wird er unterschiedlich bezeichnet.

3.1.1. Metallische Dehnmessstreifen (DMS)

DMS verändern ihren Widerstand durch eine Deformation. Normale DMS sind aus einer auf einen Trägerfilm aufbrachten Metallfolie (z.B. Constantan) herausgeätzt und werden zur Messung von Deformationen aller Art eingesetzt.

Die Widerstandsveränderung resultiert aus zwei überlagerten Effekten. Zum einen bewirkt eine Dehnung des Messkörpers eine Querschnittsverringerng und dadurch eine Erhöhung des Widerstandes. Zum anderen verändert sich auch der spezifische Widerstand mit der Dehnung. Dieser zweite Effekt wird piezoresistiver Effekt genannt. Ihm sind etwa 20% der Widerstandsveränderung beim normalen DMS zuzuschreiben.

3.1.2. Halbleiter-DMS

Bei Halbleitermaterialien ist der piezoresistive Effekt sehr viel ausgeprägter als bei Metallen. Er hängt von der Orientierung des Halbleiter-Einkristalles und von der Dotierung (Art, Dichte und Verteilung der Fremdatome, welche die Leitfähigkeit bestimmen) ab. Bei ausgeführten Halbleiter-DMS ist der piezoresistive Effekt etwa 50 mal stärker als bei metallischen DMS. Halbleiter-DMS werden zur Druckmessung entweder ebenfalls auf eine solche Struktur aufgeklebt oder das Halb-



leitematerial ist direkt aufgesputtert, so dass eine intensive Verbindung gewährleistet ist, was die Voraussetzung für Hysteresefreiheit, Alterungs- und Temperaturbeständigkeit ist. Obwohl der piezoresistive Effekt nicht allein dieser Gruppe vorbehalten ist, hat sich die Bezeichnung piezoresistiver Druckaufnehmer für diejenigen eingebürgert, bei denen die elastische, sich unter Druck deformierende Struktur und die Widerstände in einem Chip integriert sind.

3.1.3. Miniaturisierungsmöglichkeiten

Resistive Druckaufnehmer können klein – und abgesehen von der Membrane – ohne bewegliche Teilegebaut werden. Dadurch werden sie weitestgehend unabhängig von Lage, Erschütterungen und Beschleunigungen. Ihre Herstellung beruht auf den normalen (auf Massenproduktion ausgerichteten) Halbleiterfabrikationsmethoden. Gleichzeitig eröffnet sich die Möglichkeit, Widerstände und die elastische, sich unter Druck deformierende Struktur (die Membrane) in einem Chip zu integrieren, und damit eine Druckmesszelle in Chipgröße herzustellen. Die Abmessungen des Druckaufnehmers sind weitgehend dadurch bestimmt, dass die Messzelle für viele Anwendungen vor dem zu messenden Medium geschützt, d.h. in ein Gehäuse eingebaut werden muss. Solch komplett in rostfreiem Stahl gekapselte piezoresistive Druckaufnehmer als Einbaumesselemente sind bereits seit einem Jahrzehnt fertig entwickelt und werden heute in Aufbau und Form praktisch unverändert in vielen tausend Stück pro Monat von industriellen Anwendern eingesetzt. Die Weiterentwicklung auf dem Gebiet der piezoresistiven Druckaufnehmer wird sich nicht so sehr in einer weiteren Verkleinerung auswirken. Vielmehr werden Herstellung, hier vor allem die Kapselung in das Gehäuse sowie die Auswertung und die Kompensation von modernen, vollautomatisierbaren Verfahren profitieren, wodurch sich die Herstellkosten auch auf dieser Seite beträchtlich reduzieren lassen.

3.2. Grundlagen piezoresistiver Druckmessung

3.2.1. Halbleitertechnische Grundlagen

3.2.1.1. Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien

Halbleiter sind Elemente mit speziellen elektrischen Eigenschaften, die weder die gute Leitfähigkeit der Leiter noch die ausserordentlich hohe Isolation von Isolatoren haben. Reine Halbleiter isolieren bei Raumtemperatur sehr gut, jedoch nimmt die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur ebenfalls zu, so dass sie im Gegensatz zu Isolatoren schon im festen Zustand leitend werden. Dies hat damit zu tun, dass die Elektronen weniger stark an den Atomkern gebunden sind, oder anders gesagt, dass weniger Energie zugeführt werden muss, um ein Elektron loszureissen als bei Isolatoren. Wesentlicher ist im Moment aber folgender Aspekt: Die

Leitfähigkeit kann auch durch kontrollierten Zusatz anderer Elemente beeinflusst werden. Dotierte Halbleiter erhalten bei der Herstellung kontrollierte Mengen von Dotierungs- bzw. Verunreinigungselementen. Diese Elemente haben entweder ein Elektron mehr oder ein Elektron weniger als das Halbleiterelement. Werden sie in das Kristallgefüge des Silizium-Einkristalles (gebräuchlichster Halbleiter) eingefügt, bleibt entweder das überschüssige Elektron für die Bindungen unbenutzt oder das fehlende Elektron führt dazu, dass ein sogenanntes Loch in der Kristallstruktur bleibt. Ein überschüssiges Elektron ist ein relativ freier, negativer Ladungsträger, der im Kristall wandern kann, wenn ein entsprechender Potentialunterschied vorhanden ist, d.h. eine Spannung anliegt. Je mehr solche freien Ladungsträger im Kristall vorhanden sind, d.h. je höher die Dotierungsdichte ist, desto höher ist auch die Leitfähigkeit des Halbleiters. Wie gesagt, es können auch fehlende Elektronen, sogenannte Löcher, als Ladungsträger benutzt werden. Während ein Elektron die Ladung -1 hat, also eine negative Ladung (deshalb n dotiert bzw. n -leitend, wobei n für negativ steht), entspricht einem Loch die Ladung $+1$, also eine positive Ladung (deshalb p -dotiert bzw. p -leitend, wobei p für positiv steht). Die Leitfähigkeitsmechanismen sind also leicht unterschiedlich für n - und für p -dotiertes Silizium, weshalb sich auch Unterschiede in den mit der Leitfähigkeit zusammenhängenden Effekten ergeben.

3.2.1.2. Halbleiterherstellung

Als Grundmaterial wird ein Siliziumeinkristall gezüchtet, wofür verschiedene Prozesse zur Verfügung stehen. Die Herstellung völlig reiner Silizium-Einkristalle ist praktisch nicht möglich. Der Einkristall wird in Scheiben, sogenannte Waffeln oder Wafers, geschnitten. Die Orientierung der Kristallstruktur und der Schnittebenen ist wesentlich, da sich Einkristalle anisotrop verhalten, d.h. in verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften aufweisen. In die polierte Oberfläche der Waffel können am gewünschten Ort lokal begrenzt Fremdatome eingelagert werden. Dazu muss vorerst an der zu dotierenden Stelle die Oxydschicht von der Waffeloberfläche entfernt werden. Mittels photochemischer Prozesse wird eine lichtempfindliche Schicht aufgebracht, die gewünschte Maske aufbelichtet, die nicht belichtete Stelle dieser Schicht weggelöst und die darunterliegenden Stellen der Oxydschicht weggeätzt. Die Einlagerung der Fremdatome erfolgt mittels Diffusion in Gasatmosphäre bei hohen Temperaturen oder mittels Ionenimplantation. Bei der Diffusion ergibt sich die höchste Konzentration von Dotierungsatomen an der Oberfläche. Bei der Ionenimplantation werden die Dotierungsatome regelrecht in die Waffel hineingeschossen, wodurch sich ein Maximum in einer gewissen Tiefe unter der Oberfläche ergibt. Da die Ionenimplantation durch den Beschuss die Kristallstruktur verletzt, ist eine Nachdiffusion zum Ausheilen der Gitterfehler erforderlich. Das Dotierungsprofil hängt also vom Herstellungsprozess



ab und beeinflusst ebenfalls die späteren Eigenschaften des Halbleiterprodukts. Je nach der Komplexität der zu erzeugenden Halbleiterschaltung, muss dieser Prozess des Maskierens und Dotierens nur einmal durchgeführt werden (Dioden, Widerstände), während komplexe Schaltungen wie Operationsverstärker, Mikroprozessorschaltungen etc. eine Vielzahl von Masken und Prozessoren erfordern. Als letzter Schritt der Herstellung werden die Kontaktierungen (Aluminiumleiterbahnen) und eine Schutzschicht (Siliziumoxyd) aufgebracht. Da die Waffeln inzwischen sehr gross und die Schaltungen verhältnismässig klein sind, kann die gleiche Schaltung auf einer Waffel einige bis einige hundert Mal nebeneinander angeordnet werden.

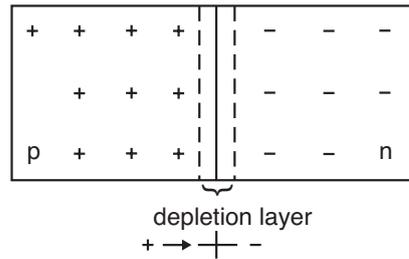
3.2.1.3. Halbleiterwiderstand

Ein Halbleiterwiderstand ist nichts weiter als das Halbleitergrundmaterial – hier Silizium – mit eingelagerten Dotierungsatomen. Der Widerstandswert hängt von der Fläche des Widerstandes, der Dotierungsdichte und dem Dotierungsprofil ab. Zudem ist der Widerstandswert wie alle Halbleitereigenschaften stark temperaturabhängig. Der Widerstandswert ändert sich auch bei einer mechanischen Deformation des Widerstandes: Dieser piezoresistive Effekt, der unter geeigneten Bedingungen sehr viel grösser ist als derjenige von Metallen, wird für die piezoresistive Druckmessung benutzt. Da sich ein einzelner Halbleiterwiderstand eines piezoresistiven Druckaufnehmers sowohl infolge mechanischer Deformation (durch Druck) als auch unter Temperatureinfluss verändert, fragt sich, was jeweils die Ursache der Veränderung ist. Die Lösung liegt in der Anordnung mehrerer Widerstände in einer Wheatstone-Brückenschaltung. Dazu müssen mehrere (mindestens zwei) Widerstände in den gleichen Chip integriert werden. Da wie gesagt auch das Grundmaterial der Waffel vordotiert ist und die beiden Widerstände in dieses gemeinsame, leitende Grundmaterial eingelagert sind, stellt sich die Frage: Was verhindert nun einen Kurzschluss zwischen diesen beiden Widerständen via Grundmaterial? Dazu benötigen wir das Verständnis der Halbleiterdiode.

3.2.1.4 Die Halbleiterdiode

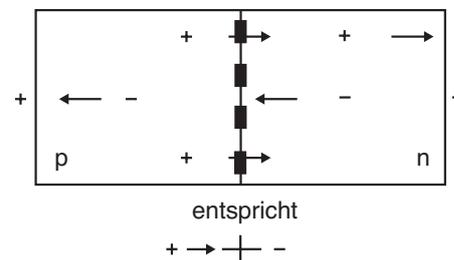
Die Diode ist ein zweipoliges Element, die in die eine Richtung leitet und in die andere Richtung sperrt. In der Halbleitertechnik lässt sich eine Diode einfach als p-n-Übergang herstellen. Der p-Bereich ist derjenige mit den überschüssigen positiven Ladungsträgern, den Löchern. Der n-Bereich ist derjenige mit den überschüssigen negativen Ladungsträgern, den Elektronen. An der Stelle, wo sich die beiden Bereiche berühren, herrscht in einer gewissen Zone ein Mangel an freien Ladungsträgern, da sich die freien Löcher mit den freien Elektronen kombinieren und einander aufheben. Diese Zone heisst Sperrschicht, auf englisch „depletion layer“.

Fall 1: Diode ohne elektrisches Feld.



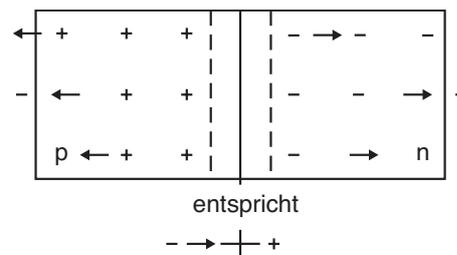
Fall 2: Elektrisches Feld in Leitrichtung.

Die freien Ladungsträger bewegen sich, müssen dafür aber zuerst die Sperrschicht überwinden, was einen Spannungsabfall von typisch 0,7 Volt verursacht.



Fall 3: Elektrisches Feld in Sperrichtung.

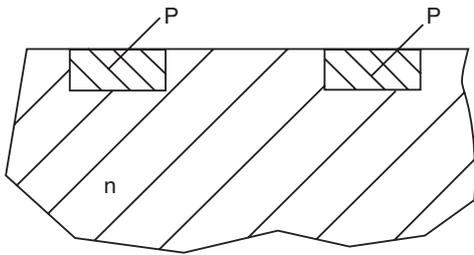
Die freien Ladungsträger entfernen sich von der Sperrschicht, die breiter wird. Die freien Ladungsträger bleiben dann stehen, da kein Nachschub kommt; es fließt kein Strom, der Widerstand ist sehr hoch.



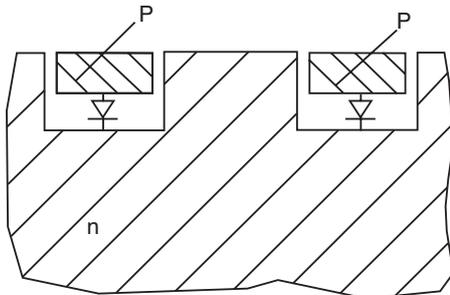
3.2.1.5. Mehrere Widerstände auf dem gleichen Chip

Am Beispiel zweier p-dotierter Widerstände in einem n-dotierten Grundmaterial erkennen wir, dass wohl jeder Übergang von Widerstand zu Grundmaterial eine in Leitrichtung gepolte Diode ist, durch die ein Strom in das Grundmaterial fließen konnte. Allerdings kann er dies nicht, denn die anderen Übergänge sind für diesen Strom in Sperrichtung gepolt. Es ist also möglich, mehrere Widerstände in das gleiche leitende, aber anders dotierte Grundmaterial zu integrieren. Somit ist uns die Möglichkeit gegeben, alle für die Wheatstone-Brückenschaltung erforderlichen Widerstände auf dem gleichen Chip zu integrieren.





entspricht



3.2.1.6. Temperaturverhalten der Halbleitereigenschaften

Die Halbleitereigenschaften sind sehr stark temperaturabhängig. Insbesondere verändert sich auch die Sperrfähigkeit der Halbleiterdiode, da mit zunehmender Temperatur die Mobilität der freien Ladungsträger sich erhöht und auch die Eigenleitung des Siliziums stark zunimmt. Damit wird die Isolation zwischen den einzelnen Widerständen auf dem Chip schlechter und erreicht bald eine Grenze, bei der der sogenannte Leckstrom ein unzulässig hohes Mass erreicht und die Messsignale merklich verfälscht. Für Druckmesszellen, die bei Temperaturen über ca. 150 °C eingesetzt werden, muss deshalb eine andere Technik benutzt werden, bei spielsweise SOS (Silicon on Sapphire), bei der die Widerstände nicht in ein Siliziumsubstrat eindiffundiert sind, sondern auf einem Isolator – hier Saphir – aufgebracht sind. Damit bleibt die Isolation zwischen den einzelnen Widerständen auch bei hohen Temperaturen bestehen. Das Temperaturverhalten im Temperaturbereich von -50 bis +150°, bei dem piezoresistive Druckaufnehmer einsetzbar sind, wird später noch behandelt.

3.2.2. Piezoresistiver Effekt

Praktische Anwendung

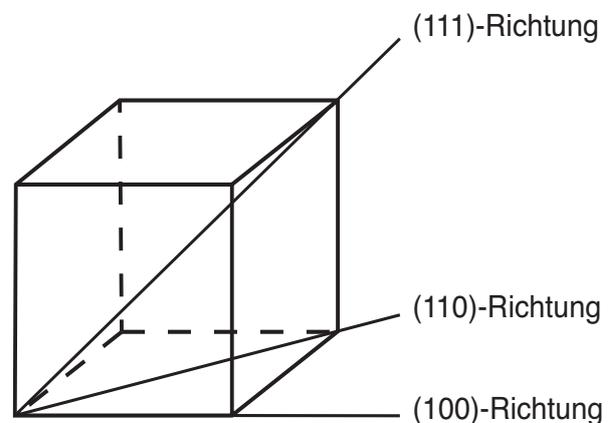
In der praktischen Anwendung muss berücksichtigt werden, dass der piezoresistive Effekt abhängt von:

- Dotierungsart, -dichte und -profil, Temperatur,
- Richtung des Siliziumkristalls und Richtung der Deformation.

Kristallstruktur von Silizium

In der Natur kommt Silizium in riesigen Mengen vor, aber meist als Oxyd in kleinen Stücken (Sand). Für die Halbleiter-

technik wird möglichst reines oder mit einer genau definierten Anzahl Fremdatomen versehenes Silizium benötigt. Dafür wird es als grosser Einkristall gezüchtet, so dass alle Atome in perfekter Anordnung zueinander ausgerichtet sind. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass die Halbleitereigenschaften optimal zur Geltung kommen und dass die Prozesse der integrierten Schaltungsherstellung gleichmässig ablaufen. Ein einzelner Kristall zeigt ein anisotropes Verhalten, d.h. seine Eigenschaften sind richtungsabhängig. Insbesondere ist auch der piezoresistive Effekt richtungsabhängig. Die Orientierung des Halbleiterkristalls ist also wesentlich. Silizium hat (etwas vereinfacht gesehen) ein einfaches, kubisches Gitter; an jeder Ecke eines Kubus sitzt ein Atom. Setzt man an eine dieser Ecken den Ursprung eines räumlichen Koordinatensystems, so können Kristallrichtungen bzw. -ebenen wie folgt bezeichnet werden:



- (100) als Richtung längs einer Würfelkante (aus Symmetriegründen sind z.B. die Richtungen (100), (010) und (001) gleichbedeutend).
- (110) als Richtung längs einer Flächendiagonale,
- (111) als Richtung längs einer Raumdiagonale.

Beanspruchungsarten

Zug und Druck, Biegung, Torsion können in jeder beliebigen Richtung einzeln oder einander überlagernd auf eine Struktur angreifen. Für einen Würfel innerhalb dieser Struktur ergibt sich infolge eines solchen Belastungsfalls eine Beanspruchung, die als Zugspannungen und Schubspannungen auf die Oberflächen dieses Würfels reduziert werden können.

Richtungsabhängigkeit des piezoresistiven Wirkungsfaktors

Ein piezoresistiver Widerstand reagiert unterschiedlich je nachdem, welches seine Orientierung im Siliziumkristall ist und welches die Orientierung der angreifenden mechanischen Spannung (Zug- oder Schubspannung) ist. Der Zusammenhang zwischen der relativen Widerstandsänderung und den angreifenden Spannungen ist im allgemeinen Fall durch Tensoren darstellbar. Damit lässt sich berechnen, wie ein beliebig orientierter Widerstand auf einen beliebigen Spannungs- bzw. Deformationszustand reagiert.



Auslegung piezoresistiver Widerstände zur Druckmessung

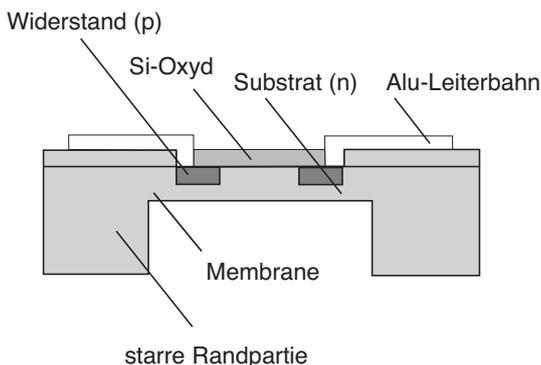
Es gibt eine überschaubare Anzahl von Varianten, nach denen ein integrierter piezoresistiver Druckaufnehmer ausgelegt werden kann: Als elastische Struktur zur Messung einer Deformation kommen beispielsweise Biegebalken oder Membranen in Frage. Aber nur letztere ermöglichen die Herstellung einer voll integrierten Struktur, in der im selben Element sämtliche erforderliche Funktionen vereint sind:

- die Umwandlung von Druck in Kraft,
- die gegenwirkende Rückstellkraft,
- das elastisch deformiert werdende Element,
- die piezoresistiven Widerstände zur Messung der Deformation.

Entscheidet man sich für das Prinzip der Membrane, legt man sich auf einen bestimmten Typ von Spannungs- und Deformationszuständen fest. Als Widerstände zur Erfassung dieser Spannungen kommen nur solche in Frage, die in der Membranebene liegen, da andere kaum herstellbar sind. Es ist nunmehr „nur“ noch zu entscheiden, in welcher Kristallebene und -richtung und an welchem Ort auf der Membrane die Widerstände angeordnet werden müssen, damit sich eine linear arbeitende und möglichst empfindliche Druckmesszelle ergibt. Diese Arbeit kann rechnerisch durchgeführt werden, wenn der Tensor der piezoresistiven Wirkungsfaktoren bekannt ist.

3.2.3. Integrierte Membrane

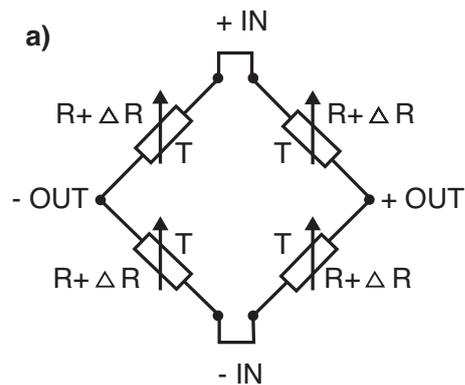
Anstelle der Herstellung von dünnen Halbleitermembranen, die auf eine Trägerstruktur aufgebracht werden, bietet es sich an, die Siliziummembrane durch rückseitiges Ausarbeiten aus einem relativ dicken Chip herzustellen. Dadurch sind für die Membrane auch definierte Randbedingungen gegeben. Dies ist wesentlich dafür, dass die sich durch die druckbedingten Deformationen ergebenden Spannungszustände genau und stabil festgelegt sind. Die gesamte Struktur, Membrane, Einspannung am Rand und eindiffundierte piezoresistive Widerstände bilden eine aus einem Einkristall bestehende Einheit.



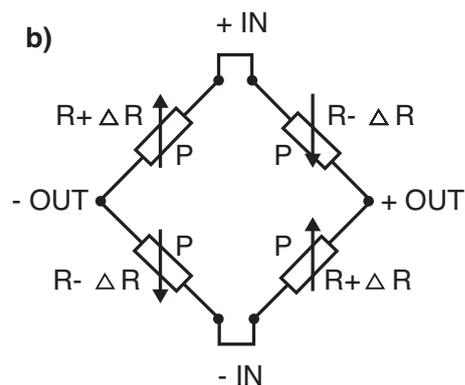
Anordnung der Widerstände

Für die Anordnung der Widerstände auf (genauer in) der Membrane bestehen verschiedene Möglichkeiten. Der allgemeine Fall ist ein Widerstand, irgendwo so angeordnet, dass der Spannungszustand der durch Druck ausgelenkt werdenden Membrane sich als Widerstandsveränderung bemerkbar macht. In der Praxis wünscht man sich jedoch eine möglichst grosse Empfindlichkeit, eine gute Linearität und wegen des Temperaturverhaltens des piezoresistiven Wirkungsfaktors ergänzende Widerstände zur Beschaltung zu einer Wheatstoneschen Brücke. Dabei wird für eine hohe Empfindlichkeit des Druckaufnehmers angestrebt, dass alle vier Widerstände der Brücke aktiv sind, sich also unter Druck verändern (zwei dieser Widerstände müssen sich bei der gleichen Deformation der Membrane vergrössern und zwei verkleinern). Die Veränderung der Brücke ist in untenstehendem Bild sowohl unter Einfluss von Temperatur als auch von Druck dargestellt.

Bild: Veränderung der Brücke unter dem Einfluss von Temperatur (a) und Druck (b)



+ OUT verschiebt sich nicht bezogen auf - OUT



+ OUT verschiebt sich gegenüber - OUT

Je nach der gewählten Orientierung des Silizium-Kristall-Gitters bestehen verschiedene Möglichkeiten für die Anordnung der Widerstände, z.B.

- vier Widerstände im Randbereich der Membrane,
- vier Widerstände im Zentrum der Membrane,
- zwei im Randbereich und zwei im Zentrum.

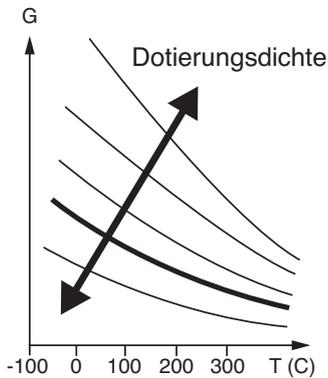


Bei der Anordnung im Randbereich ist eine Auslegung dergestalt möglich, dass zwei der Widerstände vorwiegend auf Radialspannungen und zwei vorwiegend auf Tangentialspannungen reagieren, da der jeweils andere Spannungsverlauf an einer bestimmten Stelle einen Nulldurchgang hat (es reagiert ja jeder Widerstand entsprechend der Grösse der entsprechenden piezoresistiven Koeffizienten, alle Komponenten des jeweiligen lokalen Spannungszustandes).

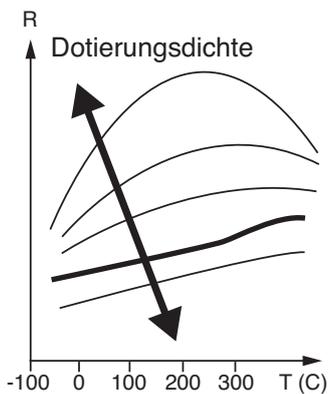
Eindiffundierte Widerstände

Die eindiffundierten Widerstände müssen von den Abmessungen her genügend klein sein, damit sie sich auf einen bestimmten Bereich beschränken, innerhalb dessen der Spannungszustand einigermaßen homogen ist. Bei gegebener Dotierungsdichte lässt sich durch die Wahl der Abmessungen (Länge, Breite) der Widerstandswert bestimmen. Mit der Dotierungsdichte verändert sich auch der piezoresistive Wirkungsfaktor, der Temperaturkoeffizient des Widerstandes sowie der Temperaturkoeffizient des piezoresistiven Wirkungsfaktors.

Bild: Abhängigkeit von der Dotierungsdichte
Bei einer bestimmten Dotierungsdichte hat sich G und R sowie deren Temperaturverhalten $G(T)$ und $R(T)$ festgelegt. (Beispiel: dick ausgezogene Kurve).



Piezoresistiver Wirkungsfaktor G als Funktion von T



Brückenwiderstand R als Funktion von T

Durch geschickte Auslegung ist es möglich, den Temperaturkoeffizienten des Widerstandes und den Temperaturkoeffizienten des piezoresistiven Wirkungsfaktors so aufeinander abzustimmen, dass sich die beiden kompensieren und man eine über einen weiten Temperaturbereich gleichbleibende Empfindlichkeit des Druckaufnehmers erhält (dazu muss die Brücke mit Konstantstrom gespeist werden). Da beide Temperaturkoeffizienten von der Dotierungsdichte abhängen, ist diese auf einen bestimmten Wert festgelegt. Somit kann auch nicht der höchstmögliche piezoresistive Wirkungsfaktor erzielt werden, sondern man muss sich mit demjenigen begnügen, der bei dieser Dotierungsdichte vorliegt. Er beträgt etwa 80, während Werte bis 200 durch höhere Dotierung erzielbar wären. Das Dotierungsprofil, nämlich die Verteilung der Dotierungsatome in die Tiefe, ist von der Charakteristik her weitgehend durch den Herstellprozess (Diffusion oder Ionenimplantation) festgelegt.

3.2.4. Integrierte Druckmesszelle

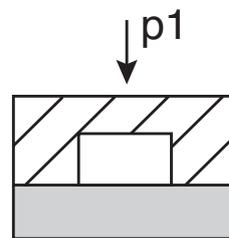
Die Messzelle in dem hier gebrauchten Sinn entspricht dem „Sensor“, der dann als fertige Druckmesszelle (siehe Bild bei 3.2.4.3. auf Seite 7) einen Zwischenzustand auf dem Weg zum „Aufnehmer“ darstellt.

3.2.4.1. Messzelle

Der Chip mit der ausgearbeiteten Membrane (siehe Bild bei 3.2.3. auf Seite 5) kann zu einer Absolut-, Referenz oder Differenz-Druckmesszelle montiert werden (in jedem Fall reagiert die Membrane auf eine Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite der Membrane). Diese drei Typen von Druckmesszellen sind unten dargestellt.

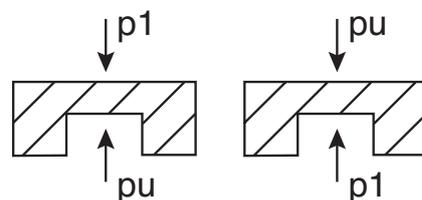
Absolut

Bezugsdruck z.B. Vakuum

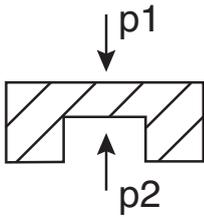


Referenz

p_u =Umgebungsdruck



Differenz



3.2.4.2. Verschluss und Montage

Die Referenz- und Differenzdruckzellen müssen so montiert werden, dass der Messdruck nur auf die eine und der andere Mess- oder Bezugsdruck nur auf die andere Seite der Membrane wirkt. Die Absolutdruckmesszellen dagegen müssen verschlossen werden, damit der Bezugsdruck z.B. Vakuum - fixiert ist. Eine solche Druckmesszelle funktioniert auch, wenn sie allseitig vom Messdruck umgeben ist, da sie ihren Bezugsdruck enthält. Zudem müssen auch die elektrischen Anschlüsse aus dem mit Druck beaufschlagten Raum herausgeführt werden. Dazu wird die Messzelle auf ein mit Glasdurchführungen der elektrischen Anschlüsse versehenes Bauelement, kurz Glasdurchführung genannt, aufgebaut. In jedem Fall muss es vermieden werden, dass der Chip mit der Siliziummembrane und den Messwiderständen durch eine solche Montage verspannt wird oder sich temperaturbedingte Deformationen der umgebenden Struktur auf den Chip übertragen können.

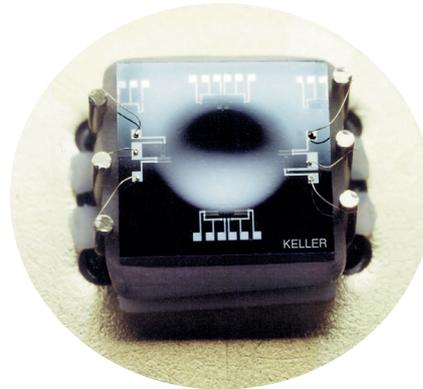
Für Referenz- und Differenzdruckaufnehmer hat sich in der Praxis eine Montage mit einem hochelastischen Klebstoff bewährt, der genügend dicht ist, um die beiden druckbeaufschlagten Seiten voneinander zu trennen und, solange er nicht auf Zug beansprucht wird, auch den entsprechenden Belastungen standhält. In den Fällen, wo die Grenzen dieser Montageart erreicht sind, sowie bei den Absolutdruckmesszellen, die ja mit einem starren Verschlussplättchen verschlossen werden müssen, sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die mit dem Chip starr verbundenen Teile müssen den möglichst genau gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen wie der Siliziumchip selbst, und
- die Stelle, an der eventuelle mechanische Spannungen eingeleitet werden können, soll möglichst klein sein.

Für den Verschluss der Absolutdruckmesszellen werden entweder Plättchen aus Silizium oder aus einem speziellen Glas verwendet. Referenz- und Differenzdruckaufnehmer, bei denen die Montage mit elastischen Klebern nicht ausreicht, weil sie beispielsweise für Unterdruckmessungen eingesetzt werden (Klebestelle auf Zug belastet), werden ebenfalls wie Absolutdruckmesszellen mit einem „Backplate“ versehen.

3.2.4.3. Elektrische Kontaktierung

Der Chip muss noch elektrisch kontaktiert werden. Die Verbindung zwischen den „bond-pads“ aus Aluminium auf dem Chip und den in die Glasdurchführung eingeschmolzenen Anschlussstifte kann mit Gold- oder Aluminiumdraht hergestellt werden. Für die Kontaktierung auf dem Chip werden Ultraschallbondverfahren eingesetzt, für die Kontaktierung mit den Anschlussstiften ebenfalls Ultraschallbondverfahren oder elektrisches Schweißen, je nach Drahtmaterial und Oberfläche der Stiftchen. Golddraht ist aufwendiger zu verarbeiten, hat jedoch den Vorteil, wesentlich weniger spröde zu sein und auch bei Vibrationen und Erschütterungen nicht zu brechen. Ein Beispiel einer fertig aufgebauten und kontaktierten Messzelle ist nachstehend dargestellt.



Fertige Druckmesszelle

3.3. Aufbau zum Druckaufnehmer

Um die Vielseitigkeit der Einbaumöglichkeiten zu erhöhen, werden Druckmesszellen in verschiedenen Verpackungsstadien angeboten.

3.3.1. Verpackung der Druckaufnehmer

Ungeschützte Druckmesszelle

Die Druckmesszelle selbst darf nur mit Medien in Berührung kommen, die weder leitend noch inkompatibel mit einem der Materialien der Druckmesszelle sind, noch Ablagerungen bilden. Dabei ist vor allem die Vorderseite der Messzelle mit den elektrischen Kontakten kritisch. Die Rückseite beispielsweise einer Referenzdruckmesszelle darf auch mit gewissen Flüssigkeiten beaufschlagt werden, die auf der Vorderseite zum Kurzschluss führen würden.

Behelfsmässig geschützte Druckmesszelle

Ein behelfsmässiger Schutz gegen viele Flüssigkeiten lässt sich durch Vergießen mit einem Gel erreichen. Einer der Nachteile einer solchen Vergussmasse ist, dass sie bei Erschütterungen schwabbelt und dabei die Bonddrahte abreißen kann. Eine weitere Möglichkeit, den Chip zu schützen,



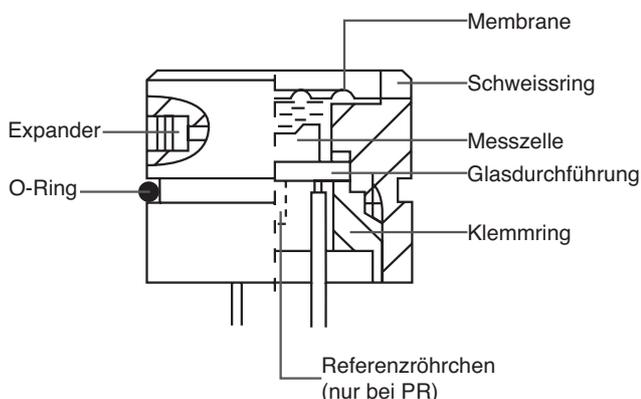
ist die Beschichtung mit Parylene, einer hauchdünnen, lückenlosen Kunststoffhaut, die hervorragende elektrische und auch chemische Isolationseigenschaften aufweist. Auch diese Kunststoffschicht ist jedoch nicht ideal: sie behindert die freie Bewegung der Siliziummembrane bei Messzellen für niedrige Drücke merklich, verursacht also Hysterese und langsames Einschwingverhalten. Zudem weist die Parylenschicht praktisch immer mikroskopisch kleine Verletzungen auf, durch die Flüssigkeiten eindringen und die Schicht unterwandern können (siehe Bild). Abgesehen von den Einschränkungen bezüglich Medienverträglichkeit ist die behelfsmässig geschützte Messzelle auch vom Druck her eine Grenze gesetzt: Die Low-Cost-Aufnehmer halten nur Drücke bis höchstens 20 bar aus, nicht wegen der Zellen, sondern wegen der Gehäuse.



Behelfsmässig geschützte Druckmesszellen

Gekapselte Druckmesszelle

Für sehr viele Anwendungen muss die Druckmesszelle auf Dauer und zuverlässig gekapselt sein. Die Kapselung muss über einen möglichst weiten Temperaturbereich einsetzbar sein und gegen die meisten Medien resistent sein. Selbstverständlich muss sie auch die durch die zu messenden Drücke entstehende Kräfte aushalten können. Eine universelle Kapselung ist aus rostfreiem Stahl, mindestens für die medienberührten Teile.



Aufbau einer gekapselten Druckmesszelle

Gegebenenfalls können je nach Anwendung auch andere Metalle eingesetzt werden, mit höherer Beständigkeit gegenüber besonders aggressiven Medien (Platin, Tantal, Hastelloy). Eine Verringerung der Druckaufnehmer durch Ersatz des rostfreien Stahlgehäuses durch z.B. Messinggehäuse für Hydraulikanwendungen ist nicht zu erwarten, da nicht die Material-, sondern die Herstellungskosten entscheidend sind. Eine Preissenkung kann vor allem eine Automatisierung der Herstellungsschritte bringen.

Bei dem in Bild „Aufbau einer gekapselten Druckmesszelle“ gezeigten Druckaufnehmer besteht die Frontpartie, auf die der Druck wirkt, aus einer wenige hundertstel Millimeter dicken Membrane, ebenfalls aus rostfreiem Stahl, die in den Gehäusekörper eingeschweisst oder eingelötet ist. Die Membrane ist mit Sicken (konzentrisch eingeprägte Wellen) versehen, damit sie sich möglichst spannungsfrei deformieren kann. Trotzdem kann im Interesse eines guten Temperaturverhaltens der Durchmesser der Membrane nicht unter ein gewisses Mass reduziert werden, da die durch die Ausdehnung des Öls verursachte temperaturabhängige Ausbauchung der Membrane nicht mehr kräftefrei erfolgt: Es baut sich ein Druck auf, der sich als Nullpunktverschiebung bemerkbar macht. Der als Einbaumesselement konzipierte Druckaufnehmer, mit der piezoresistiven Messzelle als Kernstück, ist somit in einer weitgehend universell verwendbaren Weise gekapselt.



Gekapselte Druckmesszelle für universelle Anwendungen

Sowohl die elektrische Beschaltung als auch die Aussenabmessungen sind weitgehend unabhängig vom Druckbereich. Lediglich für Differenzdruckaufnehmer ergibt sich eine etwas aufwendigere Konfiguration des Gehäuses, da beide Seiten des Aufnehmers eine Stahlmembrane, eine Ölfüllung und eine radiale Dichtung aufweisen müssen, während die elektrische Kontaktierung nicht behindert werden darf.





Gekapselte Druckmesszelle für Differenzdruckmessungen

Druckaufnehmer für Einzel- und Laboranwendungen

Prinzipiell genau gleich aufgebaut, aber mit Anschluss auf der Druckseite (Gewinde, Flansch, Adapter) und mit Kabel für den elektrischen Anschluss versehen sind die Aufnehmer für Einzel- und Laboraufwendungen. Basierend auf dem gleichbleibenden Prinzip lassen sich also jegliche Variantenkundenspezifischer Druckaufnehmer herstellen.

Transmitter

Während beim Gebrauch der Bezeichnungen Druckmessdose, Druckmesszelle, Druckaufnehmer, Drucksensor, Transducer, Druckgeber ein ziemliches Durcheinander herrscht, das weitgehend historisch bedingt ist, wird der Ausdruck Transmitter ziemlich einheitlich für die Elektronik in einem Gehäuse untergebrachten Druckaufnehmer benutzt. Dabei handelt es sich meist um die Zweileitertransmitter, die nur zwei Anschlüsse haben und gleichzeitig der Speisung und Signalübertragung dienen. Das Ausgangssignal ist üblicherweise 4 bis 20 mA (eine druckabhängige Stromsenke von 4 mA ohne Druck zunehmend bis 20 mA bei vollem Druck).

3.4. Verhalten piezoresistiver Druckaufnehmer

3.4.1. Temperaturverhalten

Das Verhalten eines piezoresistiven Druckaufnehmers verändert sich mit der Temperatur. Während temperaturbedingte Nullpunktverschiebungen offensichtlich sind und vom Anwender leicht erkannt und überprüft werden können, sind temperaturbedingte Änderungen der Empfindlichkeit und der Linearität weniger auffällig und werden deshalb oft übersehen.

Temperaturbedingte Nullpunktverschiebung

Die Ursache für die Nullpunktverschiebung ist eine Summe verschiedenster Effekte wie

- verschiedene Widerstandswerte oder verschiedene Temperaturkoeffizienten der einzelnen Widerstände in der Messbrücke,
- bei Absolutdruckaufnehmern die Änderung des Innendru-

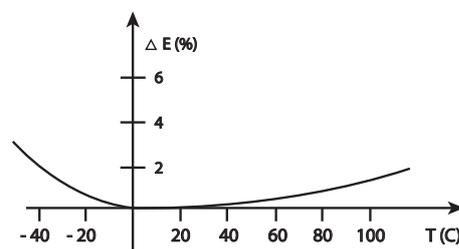
ckes im abgeschlossenen Hohlraum der Messzelle,

- mechanische Spannungen aufgrund der Montage der Messzelle auf ihrem Träger, die sich mit der Temperatur verändern,
- die Ausdehnung des Öls in Verbindung mit der Steifigkeit der Stahlmembrane führt dazu, dass sich ein Druck im Aufnehmer aufbaut,
- die Siliziummembrane ist nicht homogen, sondern mit einer Siliziumoxydschicht überzogen. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten bewirken temperaturabhängige Spannungen.

Je nach Aufbau des Druckaufnehmers und Druckbereichs fallen die einzelnen Effekte mehr oder weniger stark ins Gewicht. Wichtig ist in der Praxis nicht, woraus sich die thermische Nullpunktverschiebung zusammensetzt, sondern wie gut kompensierbar sie ist. Erwünscht ist ein möglichst lineares Verhalten über einen möglichst grossen Temperaturbereich. Auf Kompensationsmethoden und ihre Wirkungsweise wird im entsprechenden Kapitel eingegangen.

Temperaturbedingte Empfindlichkeitsveränderung

Der piezoresistive Wirkungsfaktor verringert sich mit zunehmender Temperatur. Für die Praxis bewährt hat sich eine so ausgelegte Messzelle, bei der die Zunahme des Brückenwiderstandes diese Abnahme automatisch kompensiert, wenn der Druckaufnehmer mit Konstantstromspeisung betrieben wird. Damit erhält der Anwender eine Messzelle, die in einem für viele Anwendungen ausreichenden Temperaturbereich von ca. 10 bis 80° die Empfindlichkeit um weit weniger als 1% ändert (Bild 3.12). Auch hier kann mit weiteren Kompensationsmethoden das Temperaturverhalten zusätzlich beeinflusst werden, obwohl das normalerweise nicht erforderlich ist.



Temperaturbedingte Empfindlichkeitsänderung

Weitere temperaturbedingte Veränderungen

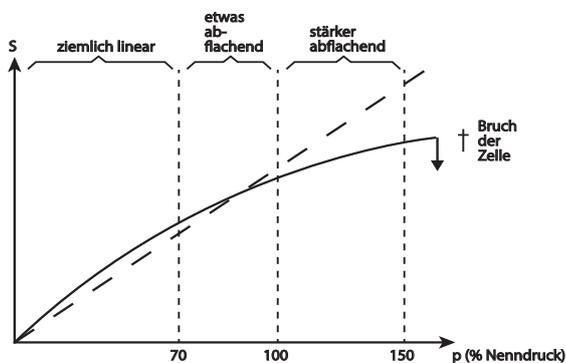
Auch die Linearität verändert sich etwas mit der Temperatur, aber dies kann in der Praxis meist vernachlässigt werden. Falls solche Temperatureffekte berücksichtigt und kompensiert werden sollen, ist dies meist nur im Rahmen einer kompletten mathematischen Modellierung des Aufnehmergehaltens sinnvoll und möglich. Dieses mathematische Modell beschreibt das gesamte Druck- und Temperaturverhalten



eines Aufnehmers genauestens. Es bedarf aber eines Rechners oder digitaler Kompensationsmethoden, um dieses mathematische Modell anwenden zu können. Diese Methoden werden in den entsprechenden Kapiteln besprochen.

3.4.2. Druckverhalten Signal-Druck-Kurve

Vom Anwender wird ein lineares Druckverhalten gewünscht, bei dem das Ausgangssignal proportional zum anstehenden Druck ist. Die Kurve im Druck-Signal-Diagramm soll eine Gerade sein, deren Anfangspunkt mit Nullpunkt und deren Steigung mit Empfindlichkeit bezeichnet wird. Der wirkliche Verlauf der Druck-Signal-Kurve zeigt immer mehr oder weniger starke Abweichungen von der idealen Geraden: diese Abweichung ist der Linearitätsfehler des Druckaufnehmers, die Steigung der Kurve entspricht dagegen der Empfindlichkeit.



Linearitätsfehler des Druckaufnehmers

Ein praktisch linearer Teil der Kennlinie wird ausgenutzt, wenn der Aufnehmer mit geringerer Empfindlichkeit (ca. 70%) eingesetzt wird.

Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit des Druckaufnehmers hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab:

- dem Widerstandswert der eindiffundierten Halbleiterwiderstände und ihrem piezoresistiven Wirkungsfaktor und
- der Dicke der Siliziummembrane.

Der letztgenannte Einfluss überwiegt. Die Dicke der Siliziummembrane wird durch mechanische, chemische oder kombinierte Bearbeitung festgelegt. Diese Prozesse lassen sich nicht so genau kontrollieren, dass alle Druckmesszellen die genau gleiche Empfindlichkeit aufweisen. Deshalb werden Klassen gebildet, innerhalb derer die Druckaufnehmer für einen bestimmten Druckbereich eingesetzt werden können. Innerhalb dieser Klassen können die Empfindlichkeiten um etwa +/-20% streuen. Diese Abweichung kann durch den Speisestrom oder den Verstärkungsfaktor in der Elektronik kompensiert werden (Kalibrierung).

Linearität

Für die Linearität ist wichtig zu wissen, nach welcher Definition sie angegeben wird. Man unterscheidet nach

- beste Gerade.
- beste Gerade mit Zwangsnulldpunkt und
- Endpunktlinearität.

Zudem muss beachtet werden, dass bei Linearitätsangaben in Prozent meist % FS (full scale, Endwert), angegeben werden. Bezogen auf einen Messwert kann der Fehler also durchaus stark ins Gewicht fallen, auch wenn in der Herstellerangabe ein sehr kleiner Wert, aber eben als % FS, angegeben wird. Im Zweifelsfall erkundige man sich beim Hersteller nach seiner Linearitätsdefinition und verlange gegebenenfalls zu seinem Druckaufnehmer ein Messprotokoll mit mehreren Messpunkten. Bei der Druckmesszelle hängt die Linearität von mehreren Faktoren ab:

- die Halbleiterwiderstände müssen genügend klein und an der genau richtigen Stelle der Siliziummembrane eindiffundiert sein;
- die Siliziummembrane muss sauber, scharfkantig und genau am richtigen Ort sein;
- die Linearität ist unterschiedlich, ob Über- oder Unterdruck gemessen wird, d.h. ob sich die Membrane in konkaver oder konvexer Form baucht;
- das Verhältnis Durchmesser zu Dicke der Siliziummembrane muss innerhalb eines bestimmten Bereiches sein. Sehr dünne Membranen deformieren sich mit einer überlagerten Streckung: Dieser Balloneffekt führt bei Aufnehmern für tiefe Druckbereiche zu einem typischen s-förmigen Verlauf der Linearitätskurve;
- bei sehr dicken Siliziummembranen ist die beabsichtigte Struktur der am Rand starr eingespannten Membrane nicht mehr realisierbar, da z.B. bei einem 1000 bar Aufnehmer die Membrane halb so dick ist wie der Chip.

Überlast

Der typische Verlauf der Linearitätskurve ist in einem grossen Teil recht linear und dann eher stark abflachend. Im Interesse eines möglichst grossen Ausgangssignales wird der grösstmögliche Bereich dieser Kurve ausgenutzt. Bis etwa zwei Drittel ist der Verlauf so linear, dass der Fehler kleiner als 0,5% FS ist. Darüber wird der Linearitätsfehler schnell grösser, so dass eine Grenze von der Genauigkeit her gesetzt ist. Ausser bei sehr tiefen und sehr hohen Druckbereichen kann der Nenndruckbereich um etwa 50% überschritten werden, bis die Messzelle bricht (siehe Bild „Linearitätsfehler des Druckaufnehmers“). Ein Bruch der Messzelle ist definitiv: Der Aufnehmer ist gestorben.

Um die Überlastsicherheit zu erhöhen, muss auf ein hohes



Nutzsignal verzichtet werden: Man muss einen Druckaufnehmer verwenden, der an sich für einen höheren Druckbereich bestimmt wäre. Während beispielsweise bei kapazitiven Druckaufnehmern ein mechanischer Anschlag für die sich unter Druck durchbiegende Membrane vorgesehen werden kann, der eine sehr hohe Überlastfestigkeit gewährleistet, ist dies bei den vergleichsweise winzig kleinen Siliziummembranen der piezoresistiven Druckmesszellen mit ihren kleinsten Auslenkungen kaum möglich.

Basisdruck

Beim Einsatz piezoresistiver Differenzdruckaufnehmer für Durchflussmessungen mit Messblenden oder -düsen ist es häufig der Fall, dass die Druckdifferenz wenige Millibar ist, während in der Leitung ein Systemdruck von mehreren Dutzend bar herrscht. Für die Messung im Normalfall ist dies kein wesentliches Problem, da die sogenannte Basisdruckfestigkeit sehr gross ist und sehr gut unterdrückt wird. Im Störfall hingegen kann es passieren, dass ein Ventil geschlossen wird oder die Messblende verstopft, so dass eine unzulässig hohe Druckdifferenz sich aufbaut und den Druckaufnehmer zerstört. Dazu genügen auch kürzeste Druckspitzen, die auf konventionellen Druckmessgeräten gar nicht angezeigt werden. Gerade in diesem Bereich ist man bestrebt, überlastsichere piezoresistive Druckaufnehmer zu entwickeln, wobei aber noch keine praktikable Lösung gefunden wurde.

Minimaler und maximaler Druckbereich

Der minimale Druckbereich, für den die piezoresistiven Druckaufnehmer eingesetzt werden können, liegt bei ca. 100 mbar. Die Grenze setzen dabei verschiedene Gegebenheiten wie:

- Bei der gegebenen Grösse des Chips kann die Empfindlichkeit nicht erhöht werden, da die Siliziummembrane nicht dünner gefertigt werden kann.
- Die Siliziummembrane ist bereits so dünn, dass die Siliziumoxydschicht auf ihrer Oberfläche in einer ähnlichen Grössenordnung liegt: die Membrane ist nicht mehr homogen.
- Das Dicken- zu Durchmesser Verhältnis ist so, dass die Linearität durch den Balloneffekt merklich beeinflusst wird.
- Die Zelle ist so empfindlich, dass Stabilitätsprobleme, z.B. durch die Übertragung mechanischer Spannungen auf die Zelle gross werden, bezogen auf das Nutzsignal.
- Bereits bei den 0,1 bar-Druckmesszellen ist das Vollbereichssignal mehr als 10 mal geringer als bei Zellen für Bereiche von 5 bar und mehr. Auch die temperaturbedingte Nullpunktverschiebung ist nicht nur absolut grösser als bei den Zellen für höhere Drücke, sondern besonders auch bezogen auf das geringere Nutzsignal.

- Damit ist die Grenze gesetzt, für die das Verhältnis Nutzsignal zu Fehlersignal noch vernünftig ist. Der maximale Druckbereich liegt bei etwa 1000 bar:

- Bei einer Zelle für 1000 bar ist die Siliziummembrane bereits etwa halb so dick wie der Chip. Der beabsichtigte Zustand der am Rand starr eingespannten Membrane ist für Bereiche darüber nicht mehr gewährleistet.

- Bei der piezoresistiven Druckmesszelle müssen die elektrischen Anschlüsse aus dem mit Druck beaufschlagten Raum in den drucklosen Raum geführt werden. Dies geschieht durch die Glasdurchführung. Eine dichte Glasdurchführung ist für Drücke über 1000 bar kaum mehr herstellbar.

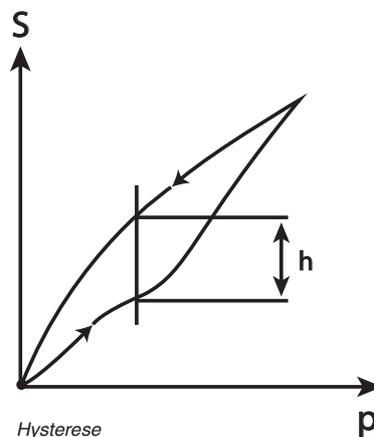
3.4.3. Frequenzverhalten

Die Messzelle der piezoresistiven Druckaufnehmer ist sehr klein. Die Membrane ist zudem sehr dünn und hat entsprechend wenig Masse. Dadurch ergibt sich ein ausgezeichnetes Frequenzverhalten mit einer oberen Grenzfrequenz von mehreren zehn kHz bis etwa hundert kHz je nach Druckbereich. Die eigentliche Grenze bei der Anwendung setzt aber meistens die Anschlussleitung. Je länger und enger die Zuleitung zum Druckaufnehmer, desto tiefer die obere Grenzfrequenz des Systems. Bei geeigneter Auslegung eines Mess-Systems, die dies berücksichtigt, können auch kürzeste Druckspitzen erfasst werden, die jedoch die zulässige Überlast keinesfalls überschreiten dürfen.

3.4.4. Hysterese, Reproduzierbarkeit

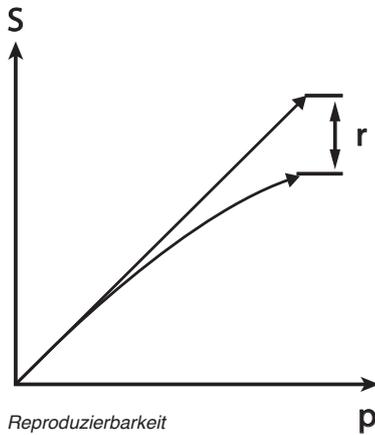
Hysterese

Hysterese bedeutet, dass der Druckaufnehmer unterschiedlich darauf reagiert, ob ein Druckwert von oben oder unten angefahren wird. Bei piezoresistiven Druckaufnehmern existiert eine Hysterese praktisch nicht.



Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit gibt an, wie gross der Fehler beim wiederholten Anfahren des gleichen Drucks von der gleichen Seite ist. Reproduzierbarkeit ist ein Stabilitätsproblem (thermisch bedingte Veränderung des Nullpunktes und der Empfindlichkeit gehören hier nicht dazu; wir setzen also konstante Umgebungsbedingungen voraus).



3.4.5. Stabilität

Die Stabilität piezoresistiver Druckaufnehmer hängt sowohl von mechanischen als auch halbleiterphysikalischen Einflüssen ab.

Mechanische Stabilität

Die Druckmesszelle ist nicht vollständig monokristallin:

- Der Chip und das „Backplate“ sind miteinander verbunden.
- Die Oberfläche des Chips ist nicht monokristallines Silizium, sondern glasartiges Siliziumoxyd.

Bei hochempfindlichen Messzellen sind diese Einflüsse wesentlich. Bei Referenz- und Differenzdruckaufnehmern ist die Zelle so auf der Glasdurchführung zu montieren, dass Vorder- und Rückseite des Druckaufnehmers getrennt sind. Die Montagestelle muss dicht, dauerhaft, druck- und eventuell zugbelastbar sein. Auch Absolutdruckmesszellen müssen irgendwie montiert werden, damit der Druckaufnehmer bei Erschütterungen nicht kaputt geht. Auch mit hochelastischen Klebern und optimaler Gestaltung der Kontaktstelle ist es nicht zu vermeiden, dass mechanische Spannungen auf die Zelle übertragen werden. Die ganze Verpackung des Druckaufnehmers und auch die Montage durch den Kunden beeinflussen also die Zelle, vor allem natürlich wieder bei den hochempfindlichen Zellen mehr als bei denjenigen für grosse Druckbereiche.

Elektrische Stabilität

Die Verwendung einer Halbleitermesszelle bringt es mit sich, dass verschiedene Halbleitereffekte die Druckmessung be-

einflussen und mitberücksichtigt werden müssen. Die Temperaturgrenze für den Einsatz der piezoresistiven Druckmesszellen liegt bei etwa 150°C. Bei diesen Temperaturen ist die Eigenleitung des Siliziums bereits so gross, dass die Abgrenzung der einzelnen im gemeinsamen Grundmaterial eingebetteten Widerstände nicht mehr genügend gross ist: Der zunehmende Leckstrom beeinflusst die Messung. Gemäss einem Lawineneffekt vergrössert sich der Leckstrom ausserdem und bewirkt, dass das Ausgangssignal instabil wird und wegdriftet. Auch bei tiefen Temperaturen, also z.B. Raumtemperatur, treten ähnliche Effekte auf:

- Leckströme werden durch beispielsweise Lichteinfluss (Photoeffekt) bei den ungekapselten Chips der Low-Cost-Aufnehmer verursacht.
- Bei den in Metallgehäusen eingebauten Chips mit Ölfüllung können elektromagnetische Felder innerhalb des Druckaufnehmers den Chip beeinflussen und auf diese Weise Leckströme verursachen.

Massnahmen

Diesen Einflüssen wird natürlich bereits bei der Konzeption und Herstellung eines Druckaufnehmers Rechnung getragen. Trotzdem sind sie nicht völlig auszuschliessen. In der Prüfung und Auswertung, die jeder Aufnehmer durchläuft, wird auch das Stabilitätsverhalten überprüft. Im allgemeinen bestätigt sich die Regel, dass sich das Stabilitätsverhalten mit der Zeit verbessert. Ein Druckaufnehmer, der als stabil beurteilt worden ist, wird normalerweise stabil bleiben. Jedoch ist eine präzisere Aussage als diese nicht möglich: eine Extrapolation des Stabilitätsverhaltens für einen bestimmten Druckaufnehmer ist nicht möglich. Dem Anwender kann folgendes empfohlen werden:

- Einbau- und Anschluss Hinweise des Herstellers beachten,
- Selbsterwärmung der Zelle berücksichtigen: die Messzelle braucht einige Minuten, um sich zu stabilisieren, wenn die Speisung des Druckaufnehmers eingeschaltet wird,
- gelegentliche Überprüfung der Anlage und Kontrolle des Nullpunktes und der Empfindlichkeit,
- gegebenenfalls Auto-Zero und Auto-Range, d.h. automatischen periodischen Neuabgleich der Anlage, vorsehen,
- bei Anwendungen, wo höchste Genauigkeit angestrebt wird, versucht man gelegentlich, mit einem höheren Speisestrom die Empfindlichkeit und damit das Ausgangssignal zu vergrössern. Ein höherer Strom verschlechtert jedoch die Stabilität, da die Feld- und übrigen Halbleitereffekte verstärkt werden, diese Effekte dann nicht linear, sondern stark überproportional mit der Spannung bzw. dem Strom laufen. Ein Druckaufnehmer ist so genau, wie er stabil ist: von sämtlichen Fehlern eines piezoresistiven Druckaufnehmers sind



die Stabilitätsfehler diejenigen, die normalerweise nicht kompensierbar sind. Alle anderen Fehler, insbesondere thermische Nullpunktverschiebung, thermische Verschiebung der Empfindlichkeit sowie Linearitätsfehler sind beispielsweise durch den Einsatz von Mikroprozessoren praktisch vollständig kompensierbar.

3.5. Auswertung, Kompensation, Kalibrierung

3.5.1. Auswertung

Herstellungsbedingt weist jeder einzelne Druckaufnehmer ein individuelles Druck- und Temperaturverhalten auf. Dies betrifft druckmässig vor allem Empfindlichkeit und Linearität und temperaturmässig die temperaturabhängige Nullpunktverschiebung. Jeder einzelne Druckaufnehmer wird deshalb in umfangreichen Auswertungen auf sein Verhalten überprüft. Die Kompensation wird berechnet und die Eigenschaften des Druckaufnehmers werden protokolliert. Dazu werden weitgehend computergesteuerte, automatisierte Anlagen eingesetzt, die Temperatur- und Druckzyklen fahren, Messungen vornehmen und sämtliche notwendigen Berechnungen durchführen. Die heutigen Möglichkeiten der automatischen und trotzdem flexiblen Auswertung, auch in kleinen Stückzahlen, sowie die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Kompensation und Kalibrierung (digitale Kompensation), werden in Kürze dazu führen, dass jeder Kunde ein Produkt bekommt, das sowohl für seine Anwendung massgeschneidert ist als auch voll kompensiert und abgeglichen ist: Der Aufnehmer ist kundenspezifisch, aber die elektrische Schnittstelle ist standardisiert.

3.5.2. Temperatureauswertung und -kompensation.

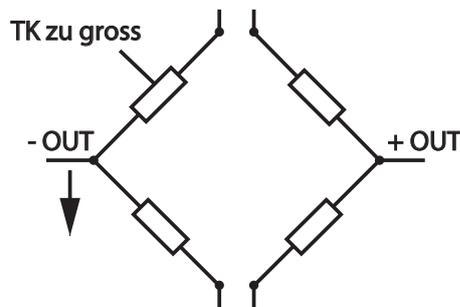
Temperaturverhalten der Empfindlichkeit

Wie bereits erläutert, ist das Temperaturverhalten der Empfindlichkeit durch geeignete Dotierung so eingestellt, dass die Abnahme des piezoresistiven Wirkungsfaktors durch die Zunahme des Brückenwiderstandes weitgehend kompensiert wird, mit einem Optimum im für die Praxis wichtigen Temperaturbereich zwischen etwa 10 und 80°C (siehe Bild „Temperaturbedingte Empfindlichkeitsänderung“). Voraussetzung dafür ist, dass der Druckaufnehmer mit konstantem Strom gespeist wird. Eine zusätzliche Kompensation ist möglich, wenn der Druckaufnehmer beispielsweise bei sehr hohen oder sehr tiefen Temperaturen eingesetzt werden soll. Für den Normalfall kann aber darauf verzichtet werden. Diese zusätzlichen Möglichkeiten werden später beschrieben.

Temperaturverhalten der Nullpunktspannung

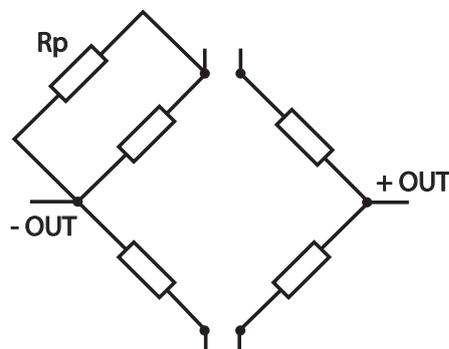
Für die thermische Nullpunktverschiebung sind viele verschiedene, sich überlagernde Einflüsse von Chip, Zelle und Verpackung verantwortlich. Weil im Gegensatz zur thermischen Empfindlichkeitsänderung nur wenige genau definier-

te Einflüsse vorliegen, ist das Temperaturverhalten jedes einzelnen Druckaufnehmers individuell, und muss entsprechend individuell ausgemessen und kompensiert werden. Wenn man die Vollbrücke des Druckaufnehmers gedanklich in die zwei Halbbrücken trennt, deren Abgriffpunkte +out und -out sind, kann man eine positive thermische Nullpunktverschiebung gedanklich so interpretieren, dass -out potentialmässig so stark heruntergedrückt wird infolge eines zu grossen Temperaturkoeffizienten (TK) des Widerstandes links oben.



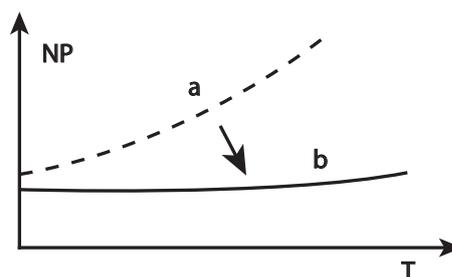
Grund für TK: Ein Widerstand habe einen zu grossen TK

Zur Kompensation einer positiven thermischen Nullpunktverschiebung kann der Temperaturkoeffizient dieses Widerstandes durch Parallelschalten eines Widerstandes geeigneter Grösse, der keinen Temperaturkoeffizienten hat, gesenkt werden.



Kompensation: Den TK dieses Widerstandes durch einen Parallelwiderstand nach TK dämpfen

Genau entsprechend wird eine negative thermische Nullpunktverschiebung gedanklich einzig dem zu grossen TK des Widerstandes rechts oben angelastet; hier besteht die Kompensation darin, diesem Widerstand einen geeigneten Widerstand mit möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten parallelzuschalten.



Wirkung des Kompensationswiderstandes



Hinweise für die Praxis

- Ein Kompensationswiderstand beeinflusst nicht nur das Temperaturverhalten des entsprechenden Messwiderstandes, sondern jede Veränderung, also auch unter Druck. Eine Auswertung der Empfindlichkeit muss also mit zugeschaltetem Temperaturkompensationswiderstand erfolgen.

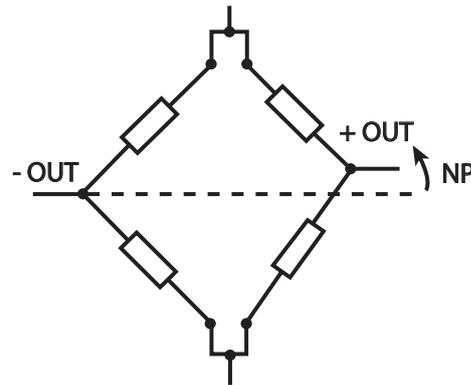
- Der Vorteil einer solchen Kompensation mit einem Parallelwiderstand (möglichst) ohne TK besteht darin, dass der Widerstand nicht der gleichen Temperatur ausgesetzt werden muss wie die Druckaufnehmer. Die Kompensation kann also an einem beliebigen Ort untergebracht werden, auch in der Elektronik, die bis zu hundert Meter vom Aufnehmer entfernt sein kann.

- Mit dem parallelgeschalteten Kompensationswiderstand wird die Kurve der thermischen Nullpunktverschiebung nur in die Horizontale gekippt, aber nicht gerade gerichtet. Eine gekrümmte Kurve bleibt krumm, jedoch kann sie so gelegt werden, dass sie im gewünschten Betriebstemperaturbereich des Aufnehmers eine horizontale Tangente hat. Die Krümmung kann in gewissen Grenzen korrigiert werden, jedoch sind dafür temperaturabhängige Elemente einzusetzen.

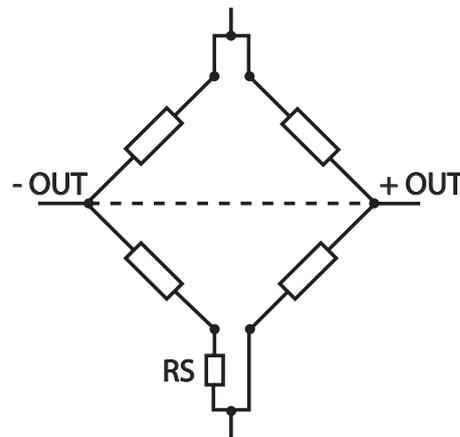
- Die Zuschaltung des Parallelwiderstandes verschiebt den Nullpunkt, so dass ein Nullpunktgleich erforderlich ist, und zwar nach der thermischen Nullpunkt Kompensation.

Nullpunktgleich

Der Nullpunkt eines Druckaufnehmers ist in den meisten Fällen nicht Null. Gründe sind unter anderem ungleiche Widerstände in der Brücke, mechanische Spannungen, die auf die Zelle wirken und der obengenannte Temperaturkompensationswiderstand, der ebenfalls den Nullpunkt verschiebt. Zudem ist der Nullpunkt nicht eine feste Grösse, sondern das Ausgangssignal unter Bezugsbedingungen. Diese hängen von der Anwendung ab, beispielsweise bei Absolutdruckaufnehmern: Soll der Absolutdruck gemessen werden, ist der Nullpunkt für Vakuum einzustellen. Mit der gleichen Zelle kann aber in Relativ-Betriebsart gemessen werden, indem der Nullpunkt bei Umgebungsluftdruck eingestellt wird: Das Ausgangssignal entspricht dann direkt dem Über- bzw. Unterdruck gegenüber Umgebungsdruck. Da sich letzterer ändert (typisch +/-20 mbar an einem bestimmten Ort), ist der Bezugspunkt sowie das entsprechende Ausgangssignal – eben der Nullpunkt – nicht fest. Betrachtet man den Druckaufnehmer wieder als zwei Halbbrücken mit den Abgriffen +out und -out, verschieben sich beim temperaturkompensierten Aufnehmer +out und -out mit der Temperatur gleich stark; sie liegen jedoch noch nicht auf gleichem Potential. Will man den Nullpunkt (unter irgendwelchen Bezugsbedingungen) auf Null abgleichen, muss das Potential des einen Abgriffpunktes auf dasjenige des anderen angehoben oder abgesenkt werden. Ein geeigneter Widerstand am Fuss- oder Kopfpunkt der betreffenden Halbbrücke hebt oder senkt das Potential des Abgriffs um den gewünschten Wert.



Brücke geschlossen, ohne Nullpunktgleich: +out und -out auf unterschiedlichem Potential



Brücke geschlossen, ohne Nullpunktgleich: +out und -out auf unterschiedlichem Potential

Aus Symmetriegründen kann wiederum die eine Halbbrücke angehoben oder die andere gesenkt werden, also der Widerstand links unten oder rechts oben eingesetzt werden bzw. rechts unten oder links oben.

Hinweise für die Praxis

- Diese Art des Nullpunktgleichs setzt voraus, dass die Brücke des Druckaufnehmers nicht geschlossen (4-polig) sondern einseitig offen (5-polig) oder als zwei getrennte Halbbrücken (6-polig) herausgeführt wird.

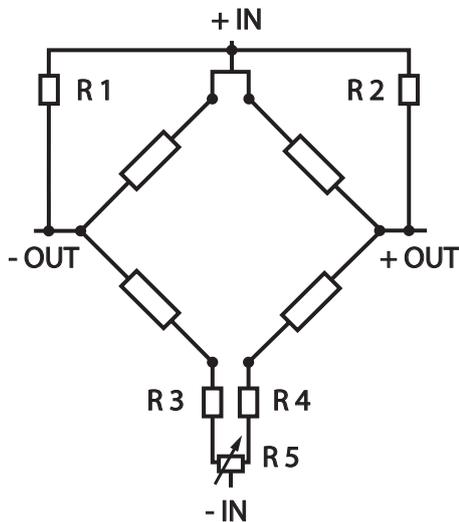
- Der Nullpunktgleichwiderstand beeinflusst, sofern er einen kleinen Temperaturkoeffizienten hat, das Temperaturverhalten des Druckaufnehmers nicht (vorausgesetzt allerdings, dass der Aufnehmer mit Konstantstrom gespeist wird und die Empfindlichkeit somit temperaturunabhängig ist).

- Der Nullpunktgleichwiderstand kann deshalb – wie bereits der Temperaturkompensationswiderstand – entweder im Aufnehmer oder in der Elektronik untergebracht werden. Für den Nullpunktfeinabgleich wird ein Potentiometer eingesetzt, damit der Nullpunkt bei Bedarf verstellt werden kann.

- Wird eine extrem grosse Nullpunktverschiebung durch einen Abgleichwiderstand in nur einer Brückenhälfte vorgenommen, sind die beiden Halbbrücken nicht mehr genügend



symmetrisch, wodurch das Verhalten des Aufnehmers beeinflusst wird. Sehr grosse Nullpunktverschiebungen werden besser entweder hälftig auf beide Halbbrücken verteilt (falls möglich) oder im Verstärker vorgenommen. Die komplett kompensierte Brücke des Druckaufnehmers, wie sie im Normalfall verwendet wird, ist also entsprechend untenstehendem Bild beschaltet.



Komplett kompensierte Brücke des Druckaufnehmers

R1 oder R2: Thermische Nullpunktcompensation (R1 kompensiert positiven, R2 einen negativen TK).

R3 oder R4: Nullpunktsabgleich grob (R3 für Abgleich eines positiven, R4 eines negativen Nullpunktes).

R5: Nullpunktsfeinabgleich

3.5.3. Druckauswertung und Kalibrierung Druckverhalten

Das Ausgangssignal eines Druckaufnehmers verändert sich weitgehend linear mit dem Druck.

Empfindlichkeit

Genaugenommen ist die Empfindlichkeit druckabhängig. Vereinfacht und praxiserleichtert definiert man sie als mittlere Steigung der Kurve. Die Abweichungen werden als Linearitätsfehler bezeichnet. Die Empfindlichkeit eines piezoresistiven Druckaufnehmers hängt einmal vom Chip ab (Dotierdichte, -profil, Widerstandswerte etc.). Wird aus dem Chip eine Messzelle hergestellt, ist es jedoch die Dicke der Siliziummembrane, die die resultierende Empfindlichkeit hauptsächlich bestimmt. Die bei der Herstellung der Siliziummembrane ins Spiel kommenden Bearbeitungstoleranzen verursachen Empfindlichkeitstoleranzen von bis zu +/- 20%. Die Druckmesszelle bzw. der Druckaufnehmer muss deshalb individuell kalibriert werden.

Kalibrierung

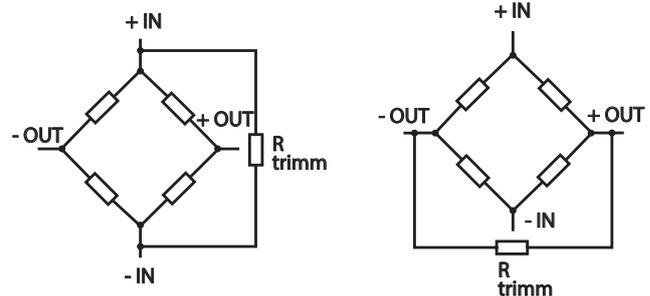
Die Empfindlichkeit eines konstantstromgespeisten Druckaufnehmers ist direkt proportional zum Speisestrom. Damit

lässt sich ein Kalibrierstrom definieren: Der Kalibrierstrom ist der Strom, bei dem der Druckaufnehmer seine Nennempfindlichkeit aufweist. Diese ist diejenige, die der Aufnehmer haben sollte, aber wegen obengenannten Toleranzen nicht hat. Somit bekommt jeder der Aufnehmer entsprechend seiner individuellen Empfindlichkeit entweder die Angabe:

- Empfindlichkeit bei Nennstrom oder
- Kalibrierstrom für Nennempfindlichkeit.

Empfindlichkeitstrimm

Die Empfindlichkeit eines konstantstromgespeisten Druckaufnehmers kann auch durch einen Parallelwiderstand zur Brücke beeinflusst werden.



Beeinflussung der Empfindlichkeit eines Druckaufnehmers

Es ist auf diese Weise jedoch nur eine Reduktion der Empfindlichkeit möglich. Zudem, wenn normale Widerstände verwendet werden, verschiebt sich das Widerstandsverhältnis Brücke zu Parallelwiderstand mit der Temperatur: Es ergibt sich durch diese Schaltung ein zusätzlicher Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit. Trotzdem muss diese Methode gelegentlich angewendet werden, wenn es gilt, für einen im Feld ausgefallenen Druckaufnehmer Ersatz zu liefern und niemand in der Lage ist, die Anlage neu abzugleichen und zu kalibrieren.

Verstärkereinstellung

In den meisten Fällen wird das Ausgangssignal des Druckaufnehmers nicht direkt verwendet, sondern zuerst verstärkt. Durch Einstellung des Verstärkungsfaktors kann das Ausgangssignal eines Druckaufnehmers beliebiger Empfindlichkeit z.B. auf 0 bis 10 Volt verstärkt werden.

Hinweise für die Praxis

- Durch die Dicke der Siliziummembrane können Druckbereiche von 0,1 bar bis 1000 bar mit dem gleichen Chip gemessen werden. Meist jedoch werden Chips mit unterschiedlichen Abmessungen verwendet (kleinerer Durchmesser der Siliziummembrane für hohe Druckbereiche).

- Die Grenze von 0,1 bar als kleinster Druckbereich kann bei kleinen Chips nicht unterschritten werden, da die Membrandicke nicht beliebig dünn hergestellt werden kann.



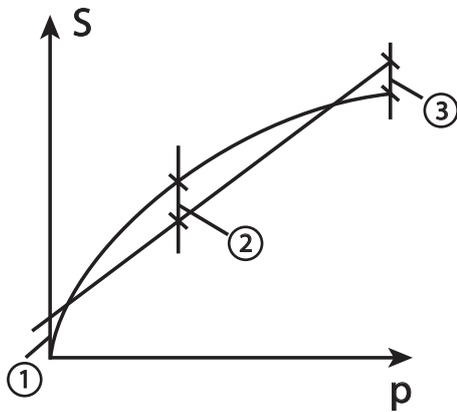
- Die Empfindlichkeit ist unterschiedlich, ob ein Druckaufnehmer für Über- oder Unterdruck eingesetzt wird. Wird er für einen Messbereich eingesetzt, der beides umfasst, wird der Linearitätsfehler entsprechend gross. Um diesen in Grenzen zu halten, müssen Kompromisse bei der Empfindlichkeit gemacht werden.

- Bei der Wahl der Empfindlichkeit ist zu berücksichtigen, dass die Überlast, die die Zelle verkraftet, meist bei etwa dem 1,5 fachen des Messbereiches liegt.

Linearität

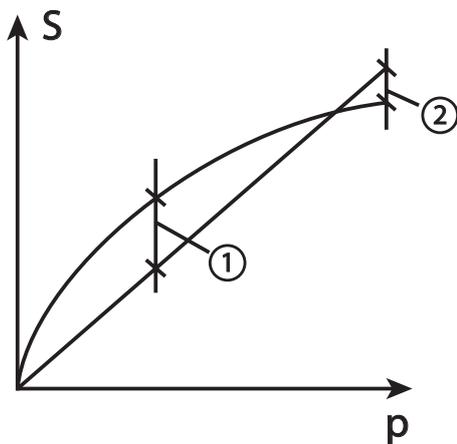
Für die Linearität ist entscheidend, nach welcher Definition sie festgelegt ist und ob der Linearitätsfehler auf das jeweilige Messsignal oder auf das Vollbereichssignal bezogen wird. In untenstehenden Bildern sind dargestellt:

- Fehler bezüglich der besten Geraden



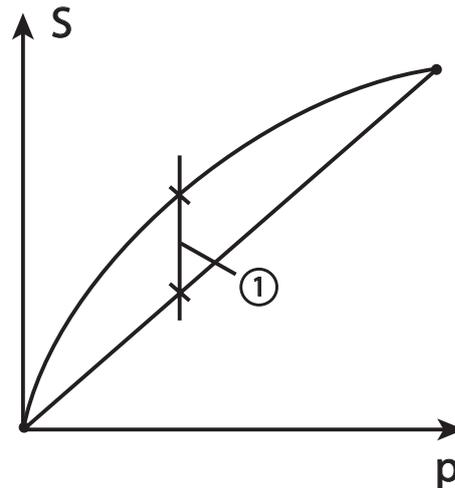
„Beste Gerade“ – 3 Punkte mit gleichem Fehler (dem maximalen Fehler)

- Fehler bezüglich der besten Geraden mit Zwangsreferenz



„Beste Gerade mit Zwangsnullpunkt“ – 2 Punkte mit gleichem Fehler

- Endpunktslinearität



„Endpunkts-Linearität“ – 1 Punkt mit gleichem Fehler

Der Linearitätsfehler hängt von der Anordnung der Widerstände auf der Siliziummembrane und der Auslegung des Chips insgesamt ab. Bei der Herstellung der Siliziummembrane ist die Präzision der Bearbeitung entscheidend und die Membrane muss genau zentrisch zu den Widerständen liegen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, was natürlich nur innerhalb gewisser Toleranzen gelingen kann, hängt die Linearität von weiteren Kriterien ab:

- Die Siliziummembrane reagiert unterschiedlich auf Deformation in konkaver oder konvexer Richtung. Nicht nur Empfindlichkeit, sondern auch Linearität sind unterschiedlich.

- Umfasst die Messspanne eines Druckaufnehmers sowohl Über- als auch Unterdruck, so ergibt sich aus den unterschiedlichen Empfindlichkeiten ein Linearitätsfehler.

- Bei Absolutdruckaufnehmern ist der abgeschlossene Hohlraum meistens evakuiert. Auf die Siliziummembrane wirkt also bei Umgebungsluftdruck bereits ein bar. Wird eine solche Messzelle für Überdruckmessung eingesetzt, so addiert sich der Messdruck zum bereits vorhandenen Umgebungsluftdruck. Die Siliziummembrane wird also besonders bei hochempfindlichen Messzellen dieses Typs in einem Bereich benutzt, in dem sie bereits stark ausgelenkt ist.

- Bei Druckaufnehmern für sehr hohe Drücke ist demgegenüber die Bedingung der starr eingespannten Membrane nicht mehr ideal erfüllt, da die Siliziummembrane dick im Verhältnis zur Randpartie der Zelle ist. Dementsprechend ergibt sich auch hier eine für den Druckbereich typische Nichtlinearität.

Massnahmen

Eine Korrektur der Linearitätsfehler ist für die meisten Anwendungen nicht erforderlich. Bei Kleinststückzahlen können meistens auch Exemplare mit extrem guter Linearität ausge-



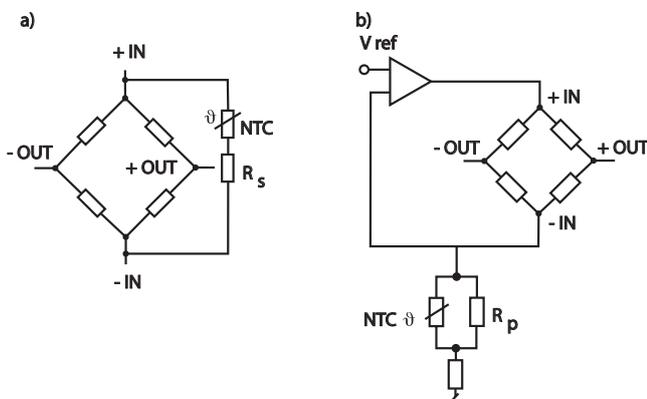
sucht werden. Für anspruchsvolle Anwendungen können die Linearitätskurven mit mehreren Messpunkten erfasst werden und beispielsweise zur Korrektur der Messwerte mittels Rechner verwendet werden.

3.5.4. Zusätzliche analoge Kompensationsmöglichkeiten

Der Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit ist in dem für die Praxis wichtigsten Temperaturbereich von ca. 10 bis 80 °C praktisch konstant. Soll der Druckaufnehmer bei höheren oder tieferen Temperaturen eingesetzt werden, muss der Verlauf der Kurve Empfindlichkeitsveränderung über die Temperatur berücksichtigt werden. Eine Kompensation der Empfindlichkeitszunahme bei hohen Temperaturen ist möglich, indem ein NTC (Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizienten; d.h. bei steigender Temperatur wird der Widerstand kleiner) mit Serienwiderstand parallel zur Brücke geschaltet wird (Bild „Kompensationsmöglichkeiten a“)

Für die Kompensation der Empfindlichkeitsänderung bei den sehr tiefen Temperaturen wird ein NTC mit Parallelwiderstand in der Stromquelle angebracht: sinkt die Temperatur, erhöht sich der Widerstand dieser Schaltung, und die Stromquelle reduziert den Strom (Bild „Kompensationsmöglichkeiten b“). Auch reduziert sich mit dem Speisestrom wieder die Empfindlichkeit des Druckaufnehmers.

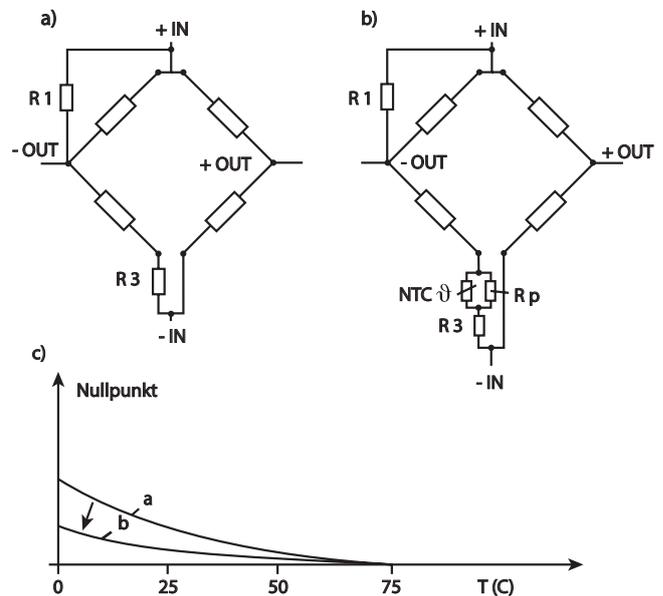


Kompensationsmöglichkeiten der Empfindlichkeit bei hohen (a) und niedrigen (b) Temperaturen

Für die Nullpunktspannung

Zum Temperaturverhalten der Nullpunktspannung wirken weit mehr und individuell verschiedene Einflüsse zusammen. Der Verlauf der thermischen Nullpunktverschiebung muss deshalb auch für jeden Druckaufnehmer individuell ausgemessen und kompensiert werden. Der Verlauf kann gekrümmt, s-förmig, oder irgendwie sonst und möglicherweise stark unregelmässig sein. Die normale Kompensation der thermischen Nullpunktverschiebung mittels Parallelwiderstand (R3) bewirkt nur, dass die Kurve unkompensiert in die Horizontale gedreht wird. Die Krümmung der Kurve wird praktisch nicht beeinflusst. Man ist deshalb darauf angewie-

sen, dass die in die Horizontale gedrehte Kurve über den gewünschten Temperatureinsatzbereich genügend flach verläuft. Eine einfache Krümmung im tiefen Temperaturbereich der thermischen Nullpunktverschiebung kann, wiederum mit einem NTC (gegebenenfalls mit Parallelwiderstand), kompensiert werden (siehe Bild unten). Die NTC-Schaltung wirkt dabei gleich wie ein Nullpunktgleichwiderstand, ist aber temperaturabhängig.



Kompensationsmöglichkeiten für die Nullpunktspannung

Nachteile dieser zusätzlichen Methoden

Bei all diesen zusätzlichen Kompensationsmethoden kommen temperaturabhängige Elemente, in diesem Fall NTCs, zum Einsatz, die damit eine solche Kompensation funktionieren – zur gleichen Zeit der gleichen Temperatur ausgesetzt sein müssen wie die Druckmesszelle. Dies bedeutet zum Teil mehr Verdrahtungsaufwand (Empfindlichkeitskompensation für tiefe Temperaturen). In vielen Fällen werden Temperaturgradientenfehler unvermeidlich sein, indem Temperaturänderungen nicht gleichzeitig die Messzelle und die NTCs erreichen, und damit die Kompensation verfrüht oder verzögert reagiert.

3.6. Speisung und Verstärkung

Speisung mit Konstantstrom

Die Druckaufnehmer werden mit Konstantstrom gespeist, damit die Empfindlichkeitstemperatur unabhängig ist. Die Empfindlichkeit des Druckaufnehmers ist proportional zum Speisestrom. Um ein möglichst grosses Ausgangssignal zu erzielen, wäre ein sehr grosser Speisestrom erwünscht. Hingegen erhöht sich auch die Selbsterwärmung der Widerstände und die Halbleitereffekte, die zu Stabilitätsproblemen beitragen, verstärken sich ebenfalls wesentlich. Deshalb sollen die vom Hersteller empfohlenen Werte für den Speisestrom nicht überschritten werden. Bei der Auslegung einer Strom-



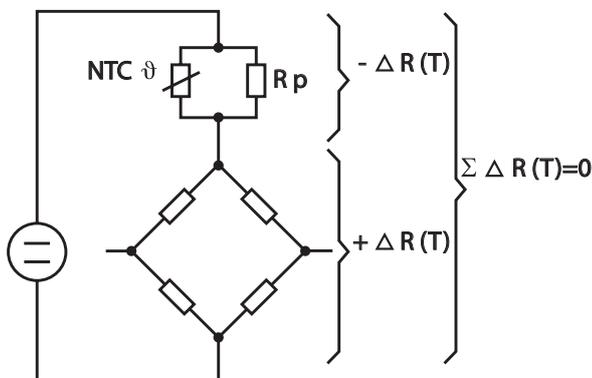
quelle muss berücksichtigt werden, dass bei einem Speisestrom von z.B. 4 mA und einem Widerstand der Messbrücke von 3500 Ohm eine Spannung von 14 Volt über der Brücke liegt. Mit der Temperatur steigt der Brückenwiderstand zusätzlich mit einem Temperaturkoeffizient TK von ca. 2200 ppM/K zu, so dass die Brückenspannung ebenfalls zunimmt.

Speisung mit Konstantspannung

Ist die Stromquelle nicht in der Lage, diese Spannungen zu liefern, so wird die Brücke nicht mehr mit Konstantstrom sondern Konstantspannung gespeist: Die Empfindlichkeit verringert sich dann mit der Temperatur mit einem TK von ca. -2200 ppM/K.

Speisung mit Konstantspannung

Muss der Druckaufnehmer aus irgendeinem Grund mit Konstantspannung gespeist werden, gibt es trotzdem eine Möglichkeit, eine temperaturunabhängige, gleichbleibende Empfindlichkeit zu erzielen: In Serie mit der Brücke wird ein temperaturabhängiger Widerstand geschaltet, so dass der Gesamtwiderstand von Brücke plus Vorwiderstand über die Temperatur konstant bleibt. Die Änderung des Brückenwiderstandes ist etwa $3500 \text{ Ohm} \times 2200 \text{ ppM/K} = 7,7 \text{ Ohm/K}$. Entsprechend muss die Änderung des Vorwiderstandes $-7,7 \text{ Ohm/K}$ betragen: hierzu wird ein NTC mit Parallelwiderstand verwendet.



Der Parallelwiderstand bewirkt zum einen, dass der TK des NTC auf die erforderlichen $-7,7 \text{ Ohm/K}$ reduziert wird, und zum anderen, dass die nach einer Exponentialfunktion verlaufende Charakteristik des NTC in einem gewissen Temperaturbereich annähernd linear wird. Je nach Temperaturbereich, in dem der Druckaufnehmer benutzt werden soll, ist eine geeignete Kombination von NTC und Parallelwiderstand zu verwenden.

Verstärkung

Die Brücke des Druckaufnehmers darf nicht durch einen niederohmigen Eingang belastet werden. Andernfalls würde ein Teil des Speisestromes in den Verstärker fließen und die Empfindlichkeit des Druckaufnehmers entsprechend reduziert werden (die Situation entspräche derjenigen beim

Empfindlichkeitstrimm in Kap. 3.5.3.). Es muss also ein Instrumentenverstärker mit hoher Eingangsimpedanz verwendet werden.

Komplette Beschaltung

Nachstehendes Bild zeigt die Messbrücke des piezoresistiven Druckaufnehmers mit der kompletten, normalerweise erforderlichen Beschaltung für Speisung, Temperaturkompensation, Nullpunktabgleich und Verstärkung.

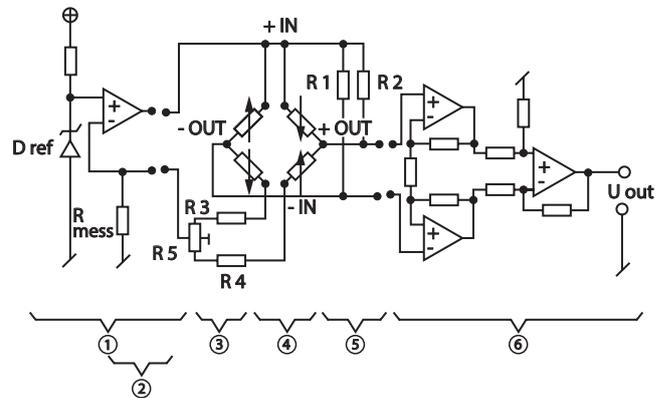


Bild oben: Messbrücke des piezoresistiven Druckaufnehmers

- 1 = Konstantstromquelle
- 2 = Strommesswiderstand zur Kalibrierung der Stromquelle
- 3 = Nullpunktabgleich
- 4 = Messbrücke des piezoresistiven Druckaufnehmers
- 5 = Temperaturkompensation der Nullpunktspannung
- 6 = Instrumentenverstärker mit Analogspannungsausgang

Bildnachweis: Verfasser sowie KELLER AG für Druckmesstechnik, CH-8404 Winterthur.

