

## Praktikum „Sensorik“

Verantwortlicher: Dr. Volkmar Norkus, BAR I/88, Tel. 33463

Versuch 3:

### **Kraft- und Drucksensoren**



Versuchsverantwortlicher: Dr. Margarita Günther, Dr. Reinhard Köhler  
BAR I/84, Tel. 35378

Versuchsraum: BAR E/74

## 1 Ziel des Versuches

Ziel des Versuches ist es, einen Überblick über Aufbau und Wirkungsweise von Drucksensoren - speziell piezoresistiver Silizium-Sensoren - zu gewinnen und dabei die Möglichkeiten der Signalauswertung kennenzulernen. Besonderes Augenmerk wird auf die verschiedenen Störgrößen sowie die Möglichkeiten und Wirkungsweisen von Kompensationsmaßnahmen gelegt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Literatur

- /1/ Vorlesungsmitschrift
- /2/ Schrüfer  
Elektrische Meßtechnik  
Hanser Verlag, München, 1992  
Abschnitte 3.3 Brückenschaltungen (S. 226-233) und 3.11 Dehnungsmeßstreifen
- /3/ Schaumburg  
Sensoren  
Teubner Verlag, Stuttgart 1992  
Abschnitt 4.1.7 Halbleiter-Drucksensoren
- /4/ Schiessle  
Sensortechnik und Meßwertaufnahme  
Vogel Buchverlag, Würzburg 1992  
Abschnitt „Resistive Meßwertnehmer“ (speziell S.64, 67 f., 73 f.)
- /5/ Ahlers, Waldmann  
Mikroelektronische Sensoren  
VEB Verlag Technik Berlin, 1989  
Abschnitte 1.1 Integration von Sensoren (S. 9-14) und 2.2 „Mechanosensoren“ (S. 96-105)

Vorausgesetzt werden weiterhin Kenntnisse über

- Verfahren der Halbleitertechnologie
- mechanische Zusammenhänge (Kraft, Spannung, Dehnung) und
- Möglichkeiten der Kompensation von Störgrößen (schaltungstechnisch und technologisch)
- MICROSOFT<sup>®</sup>-EXCEL<sup>®</sup> zur Eingabe und Auswertung von Messergebnissen.  
Alternativ ist eine Auswertung der Versuche auf DIN-A4-Millimeterpapier möglich.  
Das Millimeterpapier ist in diesem Fall mitzubringen!
- Funktionsweise eines U-Rohr-Manometers zur Druckmessung

## 2.2 Allgemeine Funktionsweise

### 2.2.1 Wirkprinzipien von Kraft- und Drucksensoren

Zur Druckmessung können verschiedene physikalische Effekte genutzt werden. Die Palette reicht von den weit verbreiteten piezoresistiven Sensoren über kapazitive Drucksensoren, Sensoren die die Druckabhängigkeit der Offsetspannung eines Halbleiters nutzen (Kandasensor) bis hin zu akustischen Oberflächenwellenbauelementen (AOW). Bei ersteren wird die Tatsache genutzt, dass sich bei Einwirkung einer mechanischen Kraft auf einen elektrischen Leiter dessen elektrischer Widerstand einerseits durch Form- und Geometrieänderung (Länge und Querschnitt) als auch durch Änderung der Materialeigenschaften (spezifischer Widerstand) ändert. Der Dehnungsmesseffekt beschreibt die Verformungswirkung und ist Grundlage für den Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS). Die Änderung des spezifischen Widerstandes wird als piezoresistiver Effekt bezeichnet und beim Einsatz in speziellen Drucksensoren angewandt. Als Maß für die durch die Verformung verursachte Widerstandsänderung wurde der k-Faktor eingeführt, in dessen Definitionsgleichung der geometrie- und der werkstoffbestimmte Anteil enthalten ist. Bei den resistiven Drucksensoren erfolgt die elektrische Messung in der Regel in Drei- oder Vierleitertechnik (Verschaltung in Messbrücken) durch Bestimmung der Diagonalspannung einer WHEATSTONE-Brücke. Damit werden

- der Einfluss der Zuleitungswiderstände gesenkt,
- aufgrund des Gleichgewichtszustandes (Diagonalspannung = 0) eine große relative Empfindlichkeit ermöglicht und
- die lineare Abhängigkeit der Messspannung von der Widerstandsänderung verbessert.

Bei kapazitiven Drucksensoren wird die Änderung der Kapazität eines Kondensators bei durch Druck hervorgerufener Änderung des Elektrodenabstandes genutzt. Kapazitive Sensoren bestehen in der Regel aus der Messbrücke, einem Oszillator zu deren Ansteuerung und einem gleichrichtenden Messverstärker zur Signalkonditionierung. Kapazitive Drucksensoren können gut gemeinsam mit anderen mikroelektronischen Siliziumschaltungen integriert werden.

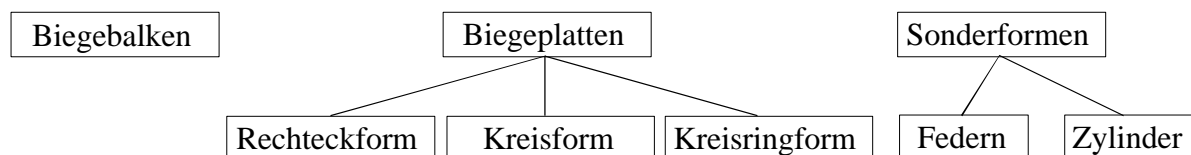
Akustische Oberflächenwellenbauelemente sind entweder als Verzögerungsleitung oder als Resonator ausgeführt und als die Frequenz bestimmendes Teil eines Oszillators geschaltet. Wirkt auf das AOW-Element ein Druck, wird dadurch die Oszillatorfrequenz moduliert. Die Verstimmung kann nun als Maß für die Druckänderung herangezogen werden. Typische Materialien für diese Sensoren sind Lithiumniobat, Quarz, Galliumarsenid oder Aluminiumnitrid, deren Eignung für die Integration in mikroelektronische Siliziumprozesse sehr verschieden ist.

### 2.2.2 Der piezoresistive Effekt

Er bezeichnet die Änderung des elektrischen Widerstandes unter Einfluss einer mechanischen Spannung. Bei Halbleitern liegt die Ursache hierfür in der Abhängigkeit der Bandstruktur von elastischen Gitterverzerrungen. Eine Verformung des Bandes verändert die elektrische Leitfähigkeit des HL. Wirkt eine mechanische Spannung in Richtung der Kristallachse des Grundsystems, wird das Energieniveau des Leitungsbandes in Richtung der mechanischen Beanspruchung angehoben, quer dazu gesenkt. Entsprechend wird der elektrische Widerstand in bezug auf die Kristallrichtungen größer oder kleiner. Die Höhe der Änderung ist abhängig von der Kristallstruktur, der Richtung der Krafteinwirkung, dem Leitungstyp und der Ladungsträgerkonzentration durch Dotierung des HL. Eine uniaxiale Kompression führt zur Änderung der Gitterabstände in Abhängigkeit von den Raumrichtungen, die Energien der Elektronenzustände verschieben sich zueinander, wodurch sich die Besetzungsdichte der ursprünglich äquivalenten Leitungsbänder ändert. Ein durch eine angelegte Spannung erzeugter Stromfluss ist abhängig von der Richtung des angelegten Feldes relativ zum Kristallgitter. Dabei kann auch eine transversale Feldkomponente entstehen (=> Pseudo-Halleffekt).

### 2.2.3 Aufbau

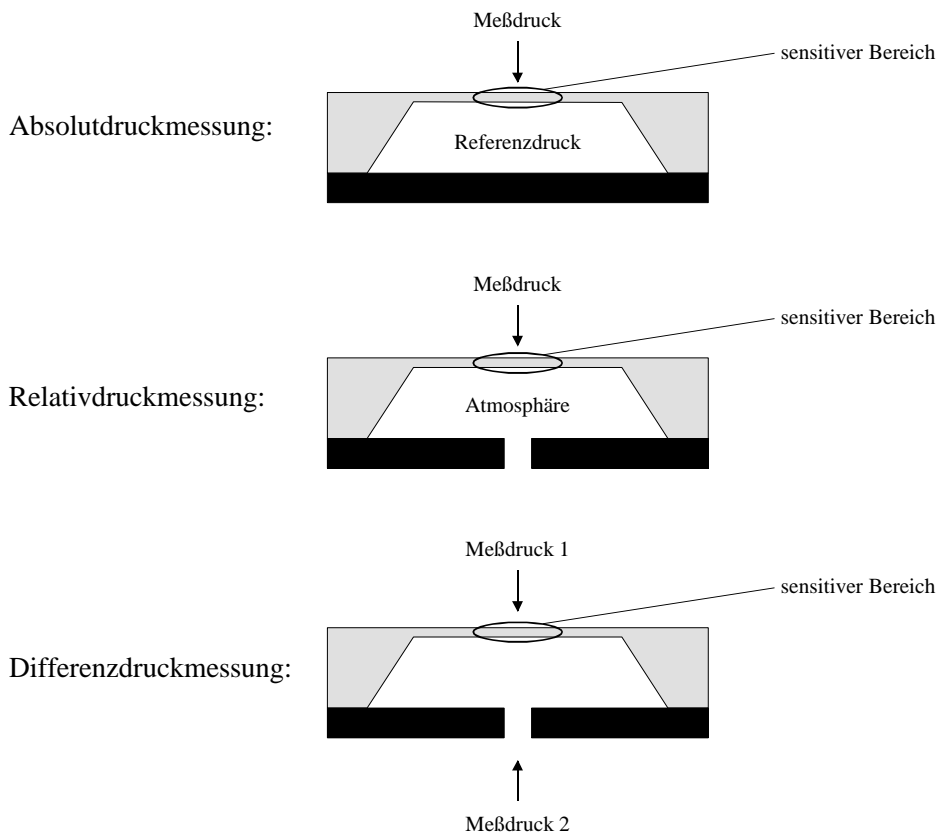
Zur Übertragung der mechanischen Eingangsgröße (Druck, Kraft) in eine elektrisch messbare Spannung sind geeignete mechanische Verformungskörper als Messgrößenumformer erforderlich. Grundformen und mögliche Modifikationen sind in Bild 1 zusammengestellt.



**Bild 1:** Federkörper-Übersicht

Die Anordnung der piezoresistiven Widerstände auf dem Verformungskörper erfolgt in Form von Brückenschaltungen in Bereichen maximaler mechanischer Spannung. Bei integrierten resistiven Drucksensoren ist ein Planarwiderstand in niedrigdotiertes HL-Material integriert. Dadurch wird eine direkte Verbindung Messelement - mechanischer Verformungskörper (später geätzte Membran) gewährleistet. Weiterhin weisen Si-Membranen keine plastische Verformung auf, zeigen damit keine Ermüdungserscheinungen und sind dadurch für große Lastwechselzahlen geeignet. Ein Überlastschutz verhindert die Zerstörung des Verformungskörpers. Die Verbindung zum Gehäuse wird durch Anlegieren oder anodisches Bonden erzeugt. Die Druckeinleitung erfolgt direkt auf den Si-Verformungskörper oder über eine Trennmembran und ein Druckübertragungsmedium (Flüssigkeit in der

Automatisierungstechnik). Man unterscheidet Absolutdruck-, Relativdruck- und Differenzdrucksensoren - erstere sind zur Rückseite gasdicht abgeschlossen, letztere besitzen zur Einleitung eines Referenzdruckes einen zusätzlichen Anschluss (Bild 2). Relativ- und Differenzdrucksensoren sind häufig konstruktiv gleich ausgeführt. Während bei Differenzdrucksensoren am zweiten Druckeinleitungsanschluss ein zweiter Messdruck angelegt wird, bleibt dieser Anschluss bei Relativdruckmessungen offen, so dass dort der Umgebungsluftdruck anliegt.



**Bild 2:** Funktionsweise der verschiedenen Druckmessverfahren ab Beispiel eines Si-Drucksensors

## 2.2.4 Druckempfindliche Materialien

Zur Kraft- und Druckmessung auf der Basis von druckabhängigen Widerstandsänderungen sind verschiedene Materialien geeignet, deren Vorzüge und Nachteile im Folgenden kurz beschrieben werden.

Vorteile von *HL-Drucksensoren* sind neben

- der hohen Sensorempfindlichkeit (10...100 mal größer als bei Metallen),
- die einfache und kostengünstige Herstellung,
- die geringen Abmessungen (dadurch Anwendung von Miniatursensoren in der Medizin möglich),

- die Anordnung von Primärelektronik und Abgleichmöglichkeit auf dem Sensorchip. Demgegenüber stehen
- die Notwendigkeit des Einbaus von HL-Kristallen in drucksichere Gehäuse und damit verbundene aufwendige Aufbau- und Verbindungstechnik,
- die Möglichkeit eines Sprödbruchs bei starker mechanische Überbelastung,
- die Einschränkung des Temperaturbereichs, da oberhalb von 150 °C die Sperrwirkung des pn-Überganges nicht mehr gewährleistet wird.

Hauptnachteil ist jedoch die starke Temperaturabhängigkeit der Sensorkennlinie von monokristallinem Silizium, die eine entsprechende Kompensation erfordert. Günstiger ist der Einsatz von polykristallinem Si (Poly-Si). Wegen der unterschiedlichen Kornorientierung stellt sich ein über alle Kristallrichtungen gemittelter Wert des k-Faktors ein. Dieser ist zwar geringer als bei monokristallinem Si (aber immer noch erheblich höher als bei Metallen), jedoch weniger temperaturabhängig.

Aufklebbare *Metallfolien-DMS* besitzen eine hohe Auflösung ( $10^{-6}$ ) und haben außerdem den Vorteil, dass sie vom Anwender auf beliebig geformte Werkstücke aufgebracht werden können, weshalb sie in verschiedenen Formen und Größen verfügbar sind. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch Auftrennen von Kurzschlussverbindungen des Widerstandsnetzwerkes, den DMS bezüglich Empfindlichkeit und minimalem Nullpunktsignal abzugleichen.

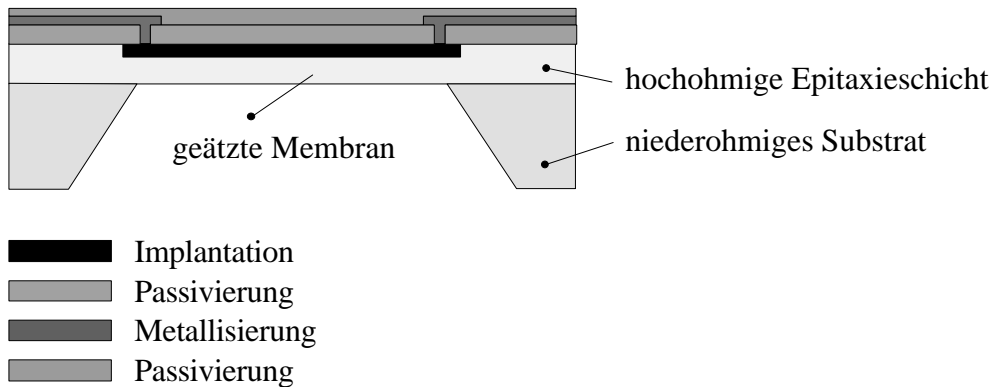
In Hinblick auf Hochohmigkeit, Miniaturisierung und genaue Messung kleiner Drücke (bis ca. 5 bar) sind *Dünnschicht-DMS* entwickelt worden, die direkt auf den elektrisch isolierenden Federkörper aufgebracht (Sputtern, CVD-Verfahren, Aufdampfen) werden. Die hohen Herstellungskosten beschränken den Einsatz auf Präzisionsmessungen.

Dagegen werden die kostengünstiger herstellbaren *Dickschicht-DMS* wegen der notwendigen hohen Einbrenntemperaturen insbesondere für keramische Federkörper genutzt.

### 2.2.5 Aufbau (integrierter) piezoresistiver Drucksensoren

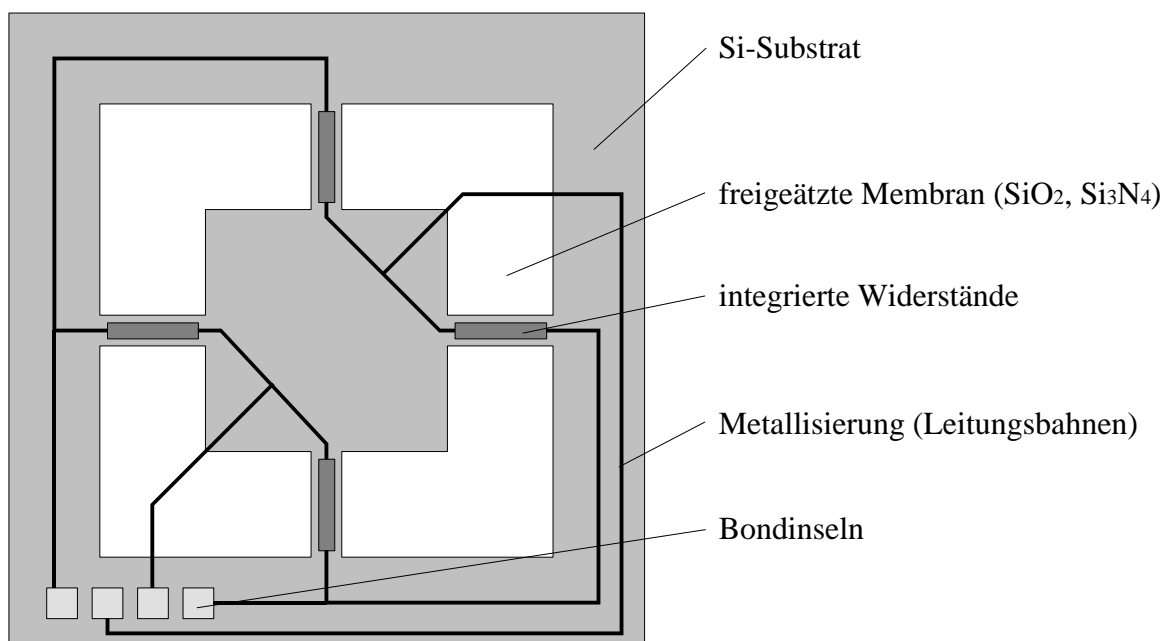
Piezoresistive Sensoren können hinsichtlich des Integrationsgrades und der Grundstruktur klassifiziert werden. Breite Anwendung haben Sensoren mit monolithisch integrierten Widerständen (Bilder 3 und 4) gefunden. Weiterentwickelte Konfigurationen besitzen neben den integrierten piezoresistiven Wandlern noch Elemente zur Kompensation von Störgrößen und zur Verstärkung des Ausgangssignals. Für Drucksensoren mit geringem Integrationsgrad sind gewöhnlich externe Kompensationsmaßnahmen mit aktiven und passiven Bauelementen erforderlich.

Bei der monolithischen Integration von Si-Sensoren werden Federkörper und Wandlerelement gleichzeitig in einem Technologiezyklus hergestellt. Das Ausgangsmaterial sind vorrangig



**Bild 3:** Monokristalliner Si-Drucksensor

hochohmige n-Si-Scheiben oder eine auf ein niederohmiges Si-Substrat epitaktisch aufgewachsene hochohmige Si-Schicht. Im ersten Schritt werden die Sensorchips im Scheibenverband hergestellt. Hierzu zählen fotolithographische Prozesse, die Ionenimplantation der Planarwiderstände, deren Kontaktierung durch aufgebraute metallische Schichten und die Passivierung der Widerstände und Metalleitbahnen. Die Herstellung des Druckmesselements umfasst das Abdünnen, die Vereinzelung der Chips und deren Befestigung auf einem Substratkörper. Das Abdünnen kann mechanisch (bewirkt starke Kristallstörungen), mit gasförmigem oder mit nasschemischem Ätzen (anisotrop, isotrop, mit Ätzstoppschicht) erfolgen.



**Bild 4:** Draufsicht eines integrierten Si-Sensors in Vollbrückenschaltung

### 2.2.5 Störgrößen

Hauptaugenmerk wird auf die Optimierung der Querempfindlichkeit gegenüber der *Temperatur* gelegt. Verlustleistung in der Messbrücke kann zu Schwankungen der Umgebungstemperatur führen. Diese beeinflusst sowohl den Widerstandswert des DMS und alle anderen Kenn-

werte (Elastizitätsmodul, k-Faktor), als auch die Ausdehnung der einzelnen Bestandteile. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnung von DMS und Trägermaterial kann es zum Bimetalleffekt kommen. Abhilfe kann hier geschaffen werden durch:

- temperatur- oder selbstkompensierende Streifen (DMS aus Konstantan), deren Temperaturkoeffizient (TK) an das Messobjekt angepasst wird,
- Verarbeitung von Messsignalen aus mehreren DMS, so dass Temperatureffekte die Messung nicht verfälschen (=> Brückenschaltung),
- getrennte Temperaturerfassung und nachträgliche Korrektur des Messergebnisses.

Kommt es durch plastische Verformung des Federkörpers oder der Verbindung zum DMS zu einer Verschiebung der Sensorkennlinie, spricht man vom *Kriechverhalten*. Diese Brücken Grundverstimmung muss kompensierbar sein.

*Feuchtigkeit* kann sowohl zum Quellen von Kleber und DMS, als auch zur Absenkung des Isolationswiderstandes führen. Dagegen hilft eine Abschirmung von den Umgebungseinflüssen.

### 2.2.6 Primärelektronik

Zur Auswertung der Widerstandsänderung werden Brückenschaltungen verwendet, da wegen der guten Übereinstimmung der TK (der Einzelwiderstände) bei Temperaturänderung die Änderung der Ausgangsspannung gering ist. Solange die Brückengrundwiderstände übereinstimmen, wird der Brückenoffset ebenfalls sehr klein. Je nach Einsatzzweck und Entwurfsbedingungen werden gleichstrom- oder gleichspannungsgespeiste Brücken verwendet. Bei Speisung mit konstantem Strom  $I_0$  führt dieser zu einem Spannungsabfall  $U_0$ . Da die Diagonalspannung der Brücke nicht mehr vom Grundwert  $R_0$  sondern nur noch von der Widerstandsänderung abhängig ist, besitzen stromgespeiste Brücken den Vorteil, hochohmige Druckaufnehmer verwenden zu können. Darüber hinaus wird die Temperaturabhängigkeit geringer, da Widerstand und k-Faktor ein in bezug auf steigende Temperatur entgegengesetztes Verhalten haben und als Faktor in die Berechnung der Spannungsänderung eingehen. Konstantspannungsgespeiste Messbrücken können durch ein abgestimmtes Widerstandsnetzwerk temperaturstabilisiert werden, haben dann aber kleinere Ausgangsspannungen.

Je nach Anzahl der druckempfindlichen Sensoren (1, 2 oder 4) unterscheidet man Viertel-, Halb- oder Vollbrücken, wobei die beste Linearität des Übertragungsfaktors und die größte Empfindlichkeit bei der Vollbrücke zu erwarten ist.

Zum Ausgleich von Störgrößeneinflüssen, vor allem der Temperatureinwirkung gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Die *passive Kompensation* umfasst die Beschaltung der Messbrücke mit störgrößenunabhängigen (temperaturunabhängigen) Zusatzwiderständen. Eine nachträgliche, meist aufwendige Kompensation in der Auswerteelektronik bezeichnet die *aktive Kompensation*.



### 2.3 Parameter und Beziehungen

Allgemein folgt für Dehnmessstreifen (mit Querschnitt  $A$  und Länge  $l$ ) nach der Bestimmungsgleichung für den elektrischen Widerstand

$$F \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta l}{l} * k = \mathbf{e} * k,$$

wobei  $\mathbf{e}$  die der mechanischen Spannung proportionale Dehnung (Hook'sches Gesetz) ist.

Das Maß  $k$  für die Empfindlichkeit ist abhängig von

- der Querkontraktionszahl (Poissonsche Zahl)  $\mathbf{m} = -\frac{dD/D}{dl/l}$ ,

- der relativen Änderung des spezifischen Widerstandes  $\mathbf{b} = \frac{d\mathbf{r}/\mathbf{r}}{dl/l}$

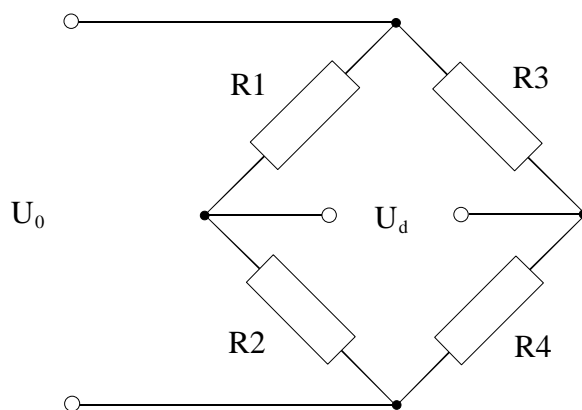
und berechnet sich zu  $k = 1 + 2\mathbf{m} + \mathbf{b}$ .

Während eine elastische Verformung z.B. bei Metallen nur eine geringe Änderung des spezifischen Widerstandes hervorruft - der  $k$ -Faktor ist hier  $\approx 2$  - ist besonders bei Halbleitern (HL) der piezoresistive Effekt ausgeprägt ( $k$ -Faktor 100 ... 200).

Die Auswertung der Sensorausgangsspannung erfolgt mit Hilfe einer Brückenschaltung. Damit die Ausgangsspannung im unbelasteten Zustand Null wird, müssen sich in den gegenüberliegenden Brückenzeigen gleich große Widerstände befinden ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ).

Unter der Annahme einer spannungsgespeisten Brücke (Bild 5) gilt:

$$U_a = U_3 - U_1 = U_0 * \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$



**Bild 5:** Spannungsgespeiste Messbrücke

Mit der Bedingung, dass sich in den Brückenzeigen vier gleiche Widerstände  $R_0$  befinden, ergibt sich für die Diagonalspannung  $U_a$  näherungsweise:

Viertelbrücke ( $\Delta R_2 = \Delta R$ )	Halbbrücke ( $\Delta R_2 = -\Delta R_4 = \Delta R$ )	Vollbrücke ( $-\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$ )
$\frac{U_0}{4} * \frac{\Delta R}{R_0}$	$\frac{U_0}{2} * \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_0 * \frac{\Delta R}{R_0}$

**Tabelle 1:** Brückenspannung für Viertel-, Halb- und Vollbrücke

### 3 Praktikumsaufgaben

#### 3.1 Versuch 1: Linearitätsfehler des Übertragungsverhaltens einer Viertelbrücke

**Aufgabenstellung:**

Die Übertragungskennlinie des piezoresistiven Drucksensors  $U_a=f(p)$  soll an einer Viertelbrücke und an einer Vollbrücke untersucht werden. Vor den Messungen ist mit geeigneten schaltungstechnischen Mitteln aus dem Versuchsaufbau eine Nullpunktkorrektur durchzuführen. Die Kennlinienunterschiede beider Schaltungsvarianten sind zu ermitteln. Die Fehler sind abzuschätzen, nachzuweisen und zu begründen.

**Geräte und Zubehör:**

Spannungsquelle, Druckeinleitung über U-Rohr-Manometer, Messbrücken, verschiedene Widerstände, Spannungsmessgerät, PC mit Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> oder Millimeterpapier

#### 3.2 Versuch 2: Temperaturgang einer Vollbrücke und dessen Kompensation

**Aufgabenstellung:**

Die Nullpunktspannung  $u_{a0}$  (bei fehlendem Messdruck) setzt sich zusammen aus der Brückengrundverstimmung, der zufälligen Nullpunktschwankung und der durch Temperaturänderung verursachten Änderung der Nullpunktspannung. Mittels passiver Kompensation (Beschaltung der Messbrücke mit Zusatzwiderständen) kann der Temperatureinfluss minimiert werden. Durch Parallelschalten eines temperaturunabhängigen Zusatzwiderstandes  $R_p$  zu einem auszuwählenden Messwiderstand wird dessen TK verringert ( $Da_R = 0$ ). Der Temperaturkoeffizient des Übertragungsfaktors wird durch die Beschaltung des Speisekreises mit einem temperaturabhängigen Vorwiderstand, der die Temperatur der Messbrücke aufweisen muss, kompensiert.

**Geräte und Zubehör:**

Spannungsquelle, Druckeinleitung über U-Rohr-Manometer, Messbrücke, Spannungsmessgerät, Thermostatiereinrichtung, PC mit Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> oder Millimeterpapier

#### 3.3 Versuch 3: Unterschiede des TK des Übertragungsfaktors für Strom- und Spannungsspeisung der Vollbrücke

**Aufgabenstellung:**

Es gibt die Möglichkeit, Brückenschaltungen mit Konstantstrom oder -spannung zu speisen und entweder den Ausgangsstrom oder die -spannung auszuwerten. Die Brücken mit Spannungsausgangssignal dominieren in der Praxis. Das Übertragungsverhalten sowie die Vor- und Nachteile von u-u und i-u-Brücken sollen hier untersucht und diskutiert werden.

**Geräte und Zubehör:**

Spannungsquelle, Stromquelle, Druckeinleitung über U-Rohr-Manometer, Messbrücke, Spannungsmessgerät, Thermostatiereinrichtung, PC mit Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> oder Millimeterpapier