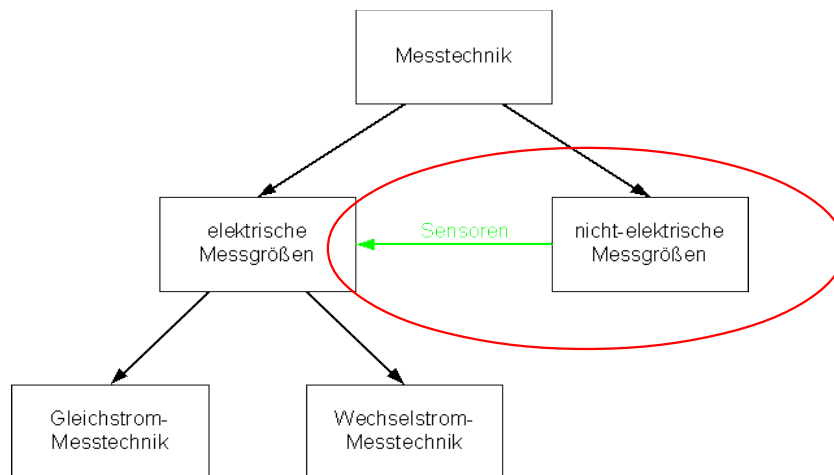


1 Einleitung und Begriffe



Die Sensorik befasst sich mit der Umwandlung nichtelektrischer Größen in elektrische Größen. Sensoren werden grob unterschieden nach der zu erfassenden Messgröße, dem Messverfahren und der Art des elektrischen Ausganges (analog, digital).

Moderne Elektronik wird vielfach in der Steuer- und Regelungstechnik eingesetzt, wodurch sich zwangsweise die Messung nichtelektrischer bzw. mechanischer Parameter ergibt.

Warum ist messen notwendig:

- ▶ damit ein Prozess überhaupt automatisch, also vom Menschen unabhängig gesteuert und geregelt werden kann.
- ▶ um Messgrößen (z.B. Intensität von Strahlung im UV oder IR Bereich), die vom Menschen nicht direkt wahrnehmbar sind, quantifizieren zu können.
- ▶ um Messgrößen aufnehmen zu können, die für den Menschen zu schnell oder zu langsam ablaufen.
- ▶ zur Erfassung von Messgrößen, die durch die menschlichen Sinne nicht hinreichend fein quantifiziert werden können.

Messausbau, Messkette:

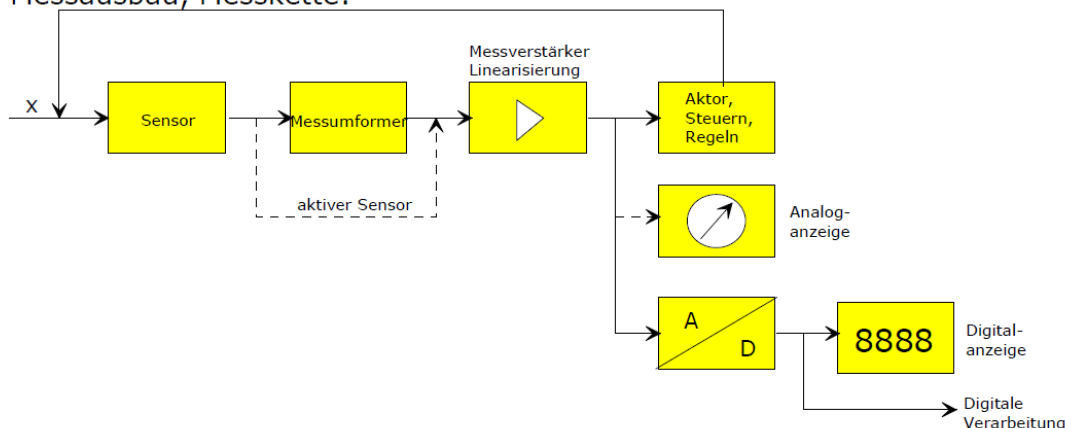


Abb.1.1: Prinzipaufbau einer Messeinrichtung

In der folgenden Tabelle sind einige Größen zusammengestellt, die sensorisch erfasst werden können.

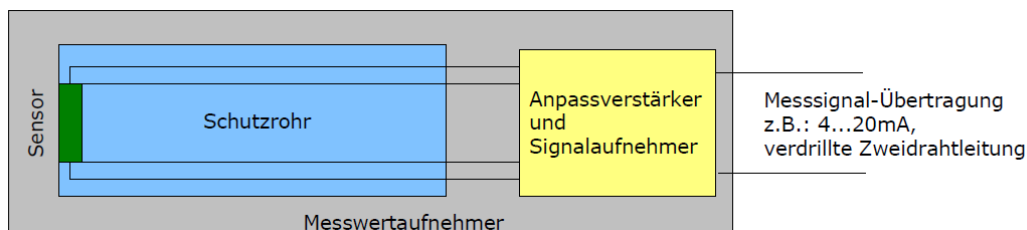
Mechanische Grössen von Festkörpern	Abstand, Länge, Höhe, Durchmesser, Winkel, Dehnung, Masse, Kraft, Dichte, Form, Gewicht, Kraft, Beschleunigung, Härte
Mechanische Grössen von Flüssigkeiten und Gasen	Dichte, Druck, Viskosität, Geschwindigkeit, Volumen, Zusammensetzung
Thermische Grössen	Temperatur, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Energie
Optische Grössen	Intensität, Wellenlänge, Polarisation, Reflexion, Absorption, Brechwert, Farbe
Akustische Grössen	Schalldruck, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Schallabsorption, Intensität, Frequenz
Chemische ‚Signale‘	PH-Wert, Konzentration, Molekül-Ionenart, Reaktionsgeschwindigkeit, Feuchtigkeit
Magnetische und elektrische Signale	Induktivität, Kapazität, Widerstand, Frequenz, Phasenverschiebung, Strom, Spannung, Leistung, Energie

Sensoren: formen nicht-elektrische Signale in elektrische Signale um

- ▶ aktive: formen nicht-elektrische Energie in elektrische Energie um, sie erzeugen dabei Spannung, Strom, Ladung oder Energie. Beispiel: Fotodiode, Thermoelement, Piezoelement, elektromagnetische Fühler, pH-Sonde ...
- ▶ passive: Sie stellen Impedanzen dar und verändern unter dem Einfluss der nicht-elektrischen Grösse ihre elektrischen Eigenschaften (R, L, C, ...), sie benötigen einen Messumformer und Hilfsenergie. Beispiel: Potentiometer, Widerstandsthermometer, Dehnungsmessstreifen, Ultraschallsensoren, kapazitive und induktive Fühler, ...

Messwertaufnehmer:

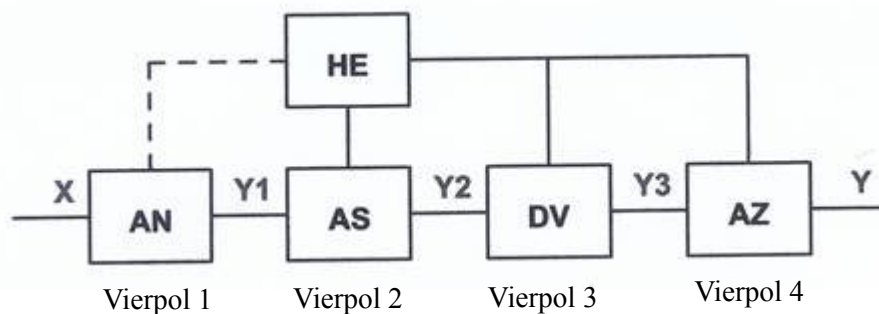
Setzt sich aus dem Messfühler (physikalisch elektrisches Umformglied) und der Anpasseelektronik und Signalumformung zusammen. Die Anpasseelektronik kann sehr einfach aus wenigen passiven Bauelementen bestehen oder aber aus einer komplexen Elektronik mit Mikroprozessor für Selbstdiagnose, Offsetabgleich und Verstärkungseinstellung, sowie der Aufbereitung des genormten Ausgangssignals.



2 Messkette

2.1 Messkettenkoeffizient, Wandlerkonstante

Der Grundaufbau eines Messwertaufnehmers ist eine Kettenschaltung verschiedener Baugruppen, die als Kettenschaltung von einzelnen Vierpolen aufgefasst werden kann. Am Beginn steht die Erfassung der nichtelektrischen Größe mit einem Sensor. Daran anschließend folgt die Umformung, Aufbereitung und Ausgabe des elektrischen Signals. Die Information bzw. das Signal und damit die Größe des Eingangswertes wird durch die Kette an den Ausgang weitergereicht.



X: nichtelektrische Messgröße

Y: Ausgangssignal und Messsignale Y1, Y2, Y3 (Zwischenwerte)

AN: Im Aufnehmer (Messaufnehmer, Sensor, Transducer) sind alle Bauglieder einschließlich Messfühler zur Umformung der physikalischen Größen in eine elektrische Größe enthalten.

AS: In der Anpassschaltung (Signalumformer) wird das analoge Eingangssignal entsprechend der geforderten Kennlinie in das Ausgangssignal umgeformt.

DV: In der Datenverarbeitung/-erfassung werden die Messdaten digitalisiert und zwischengespeichert. Durch einen Rechner können Korrekturen des Messwertes bzw. der Verknüpfung mehrerer Messwerte durchgeführt werden

AZ: Ausgabe des elektrischen Messwertes, der der anliegenden Messgröße X entspricht; optional kann eine Umwandlung in eine für den Menschen verständliche Anzeige: (z.B. Lampe, Zeiger, digitale Anzeige, Bildschirm, Drucker) erfolgen.

HE: Hilfsenergie (Stromversorgung) wird für alle Glieder der Messkette benötigt mit Ausnahme der aktiven Aufnehmer (z.B. Thermoelemente)

Jedem Glied der Messkette wird ein Koeffizient c_1, c_2, c_3 zugeordnet. Diese entsprechen den Übertragungsfunktionen der einzelnen Vierpole. Sie können reelle Zahlen oder auch komplexe, frequenzabhängige Funktionen sein. Der Koeffizient des eigentlichen Sensors wird dabei oft als Wandlerkonstante bezeichnet. Die anderen können Verstärkungen, eine A/D- Wandlerkonstante oder Konversionsfaktoren (z. B. U/I) sein.

Für die einzelnen Koeffizienten gilt, wenn i die laufende Nummer ist:

$$c_i = \frac{\text{Ausgangsgröße}}{\text{Eingangsgröße}} = \frac{Y_i}{Y_{i-1}}$$

Der Koeffizient der gesamten Messkette ergibt sich durch Multiplikation aller einzelnen Koeffizienten:

$$c_{\text{ges}} = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \dots \rightarrow c_{\text{ges}} = \prod_{i=1}^n c_i$$

Rechnet man die einzelnen Koeffizienten c_i auf dB um, so erhält man den gesamten Koeffizienten der Messkette durch Addition der dB- Werte:

$$a_i = 20 \cdot \lg c_i, \quad a_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n a_i$$

Zu beachten ist, dass die einzelnen Koeffizienten Einheiten tragen. Vor allem der Gesamtkoeffizient wird mit seiner Einheit angegeben, weil er über die Charakteristik des Sensors Aufschluss gibt. Die Hersteller geben diesen Koeffizienten oder die Sensorkonstante mit der zugehörigen Einheit in Datenblättern an.

Beispielsweise könnte für die Einheiten der Kettenelemente für einen Drucksensor gelten:

$[X] = \text{Pa}$	mechanische Einheit	$[c_1] = \frac{[Y_1]}{[X]} = \frac{\text{pF}}{\text{Pa}}$
$[Y_1] = \text{pF}$	elektrische Einheit, kapazitiver Wandler	$[c_2] = \frac{[Y_2]}{[Y_1]} = \frac{\text{V}}{\text{pF}}$
$[Y_2] = \text{V}$	elektrische Einheit	$[c_3] = \frac{[Y]}{[Y_2]} = \frac{\text{mA}}{\text{V}}$
$[Y] = \text{mA}$	elektrische Einheit, Ausgang Stromschleife	

Bei der Hintereinanderschaltung sind nicht nur die Koeffizienten, sondern auch deren Einheiten zu multiplizieren. Damit fallen, wie man leicht zeigen kann, alle Zwischeneinheiten weg und es bleibt die Einheit des gesamten Wandlers mA/Pa übrig. Mit dieser Einheit wird der gesamte Messwertaufnehmer spezifiziert.

Bei digitalen Messwertaufnehmern muss man die Zuordnung zwischen analogen und digitalen Werten definieren. Dies betrifft den ADC. Es werden folgende Zuordnungen festgelegt:

$X = 0$	digitaler Nullwert	Auflösung = Feinheit der Stufung
$X = X_{\text{max}}$	digitaler Maximalwert	

Dabei kann noch ein Vorzeichen berücksichtigt werden. Die Auflösung sowie die größte darstellbare Zahl hängen natürlich von der Bitanzahl ab.

2.2 Toleranzen, Messabweichung

Die einzelnen Elemente der Messkette haben Toleranzen der elektrischen Werte bzw. der Umwandlung, die mit den Abweichungen f_i in Prozent bezeichnet werden. Die Gesamtabweichung f_{ges} errechnet man mit dem **Fehlerfortpflanzungsgesetz** nach der Formel:

$$f_{\text{ges}} = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + \dots}$$

Der Beitrag des Elementes mit der größten Abweichung schlägt am stärksten in die Gesamtabweichung durch.

Bei modernen Wandlern ist es üblich, die Toleranzen durch Abgleiche (Kalibrierung) so gering wie möglich zu halten. Dabei können Teile der Hardware mechanisch abgeglichen werden.

Bei digitalen Wandlern ist es üblich, Abgleichwerte in einem nicht flüchtigen Speicher zu hinterlegen und die Abweichungen des Wandlers rechnerisch zu korrigieren. Dabei muss man sicher gehen, dass diese Speicherplätze im normalen Betrieb nicht überschrieben werden können.

Hängt die Wandlerkonstante von Umgebungsparametern wie Temperatur, Druck oder sonstigem ab, gibt dies der Hersteller in Form von grafischen Darstellungen oder Korrekturformeln an. Zur Erhöhung der Genauigkeit werden dann die entsprechenden Umgebungsparameter gemessen und zum rechnerischen Abgleich der Wandlerkonstanten verwendet.

3 Kennlinien

Der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße ist oft durch eine Kennlinie definiert. Diese Kennlinie kann linear oder auch nichtlinear sein. Nichtlineare Kennlinien werden immer durch ein Diagramm, manchmal auch mit einer algebraischen Formel spezifiziert. Aus der Kennlinie ist der Wertebereich des Ausgangssignales und der Aussteuerbereich, d.h. der verwendbare Arbeitsbereich der Eingangsgröße abzulesen. Der zulässige Verlauf der Kennlinie wird mit einem Min.- Max.- Toleranzschlauch dargestellt, innerhalb dessen sich die tatsächliche Kennlinie bei den vorgegebenen Parametern beliebig befinden kann.

Beispiel eines Drucksensors:

Bei der Dimensionierung ist zu beachten, dass der Wertebereich des Sensors nicht voll ausgefahren wird. Jedenfalls ist an den Grenzen genügend Abstand einzuhalten, um zwischen Sensorüberlauf und zu hohen Betriebswerten unterscheiden zu können.

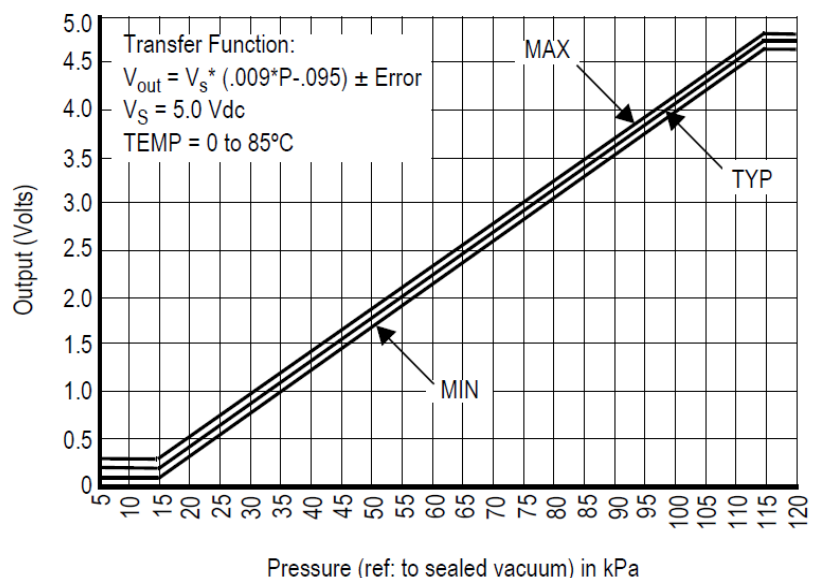


Figure 4. Output vs. Absolute Pressure

4 Prinzipien von passiven Sensoren

4.1 Widerstandssensoren

Das Messprinzip ist die Messung eines ohmschen Widerstandes. Diese kann durch Strom-Spannungsmessung oder in Form eines Brückenabgleiches erfolgen. Als Messgröße kommt der ganze Widerstand oder auch nur ein Teilabgriff in Frage. Zu beachten sind die Abhängigkeit des Widerstandes von Umweltparametern wie Temperatur, Feuchte uvam. sowie die Toleranzen des elektrischen und des mechanischen Aufbaus.

Messpotentiometer:

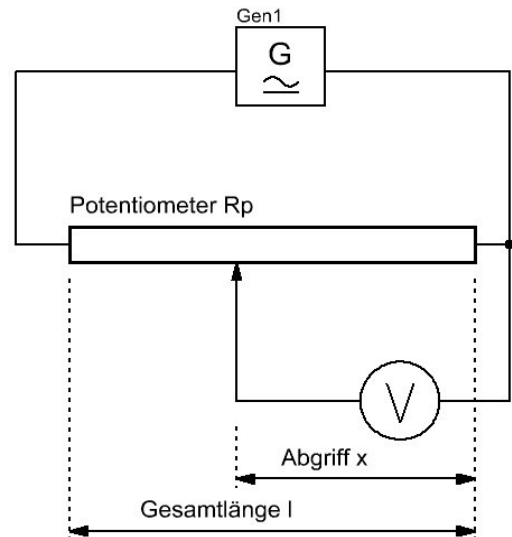
die Messgröße verstellt einen Schleifer. Die Ausgangsspannung ist der Schleiferstellung proportional (Spannungsteiler).

Aus der Spannungsteilerregel ergibt sich:

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{R_p \cdot \frac{x}{l}}{R_p} = \frac{x}{l} \rightarrow x = U_x \cdot \frac{l}{U_0}$$

Bei bekannten Größen Länge l und Generatorspannung U_0 kann direkt aus der gemessenen Spannung U_x die Position x abgeleitet werden.

Anhand dieses Beispiels soll die Wirkung von Toleranzen und deren Behandlung gezeigt werden. Zunächst werden die Fehlereinflüsse bzw. Toleranzen ermittelt. Danach werden die Gegenmaßnahmen gewählt.



Mögliche Fehlereinflüsse sind:

- 1) R- Verlauf der Widerstandsbahn nicht gleichmäßig;
- 2) Genauigkeit des Voltmeters;
- 3) Belastung des Potentiometers durch den Voltmeterstrom;
- 4) Toleranz und Schwankung der Versorgungsspannung
- 5) Temperaturschwankungen.

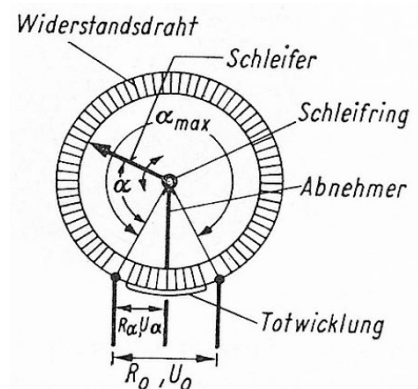
Möglichkeiten zur Reduktion der Gesamttoleranz der Messung:

- a) Messbrücke statt einfache U- Messung, Voltmeter als Nullindikator:
vermeidet Abweichungen 2, 3, 4.

- b) digitale Messung mit Prozessoren und ADC:

Messung von U_0 und U_x gleichzeitig vermeidet Fehler in U- Messung (2, 4);
hochohmige U- Messung (3);
Kalibriermessung liefert Datensatz, mit dem sich Fehler (1) eliminieren lässt;
Mitmessen der Temperatur und rechnerische Messwertkorrektur (5).

Verwendet man statt des Linearpotentiometers ein Drehpotentiometer, so kann man einen Drehwinkelgeber realisieren.



Vorteile

- beliebige Speisung (DC, AC,...)
- gute EMV (hohe Messleistung)
- relativ große Messwege
- gute Linearität
- gezielte Nichtlinearität erzeugbar

• Nachteile

- mechanisches Schleifen
 - Verschleiß (Abrieb, Übergangswiderstand)
 - Reibungskraft (Hysteresis)
- Kontakt (Korrosion, Verschmutzung)
- Leistungsverbrauch

Dehnungsmessstreifen: der Widerstand eines Leiterstückes ändert sich bei mechanischer Verformung.

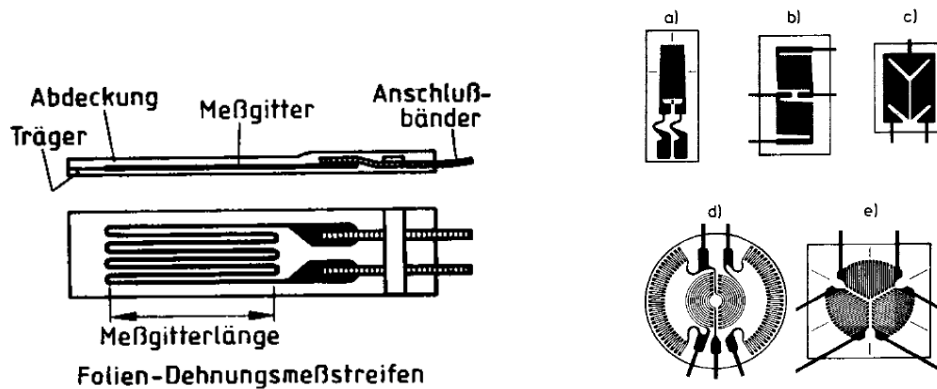


Abb.1.14: Folienmessstreifen (links) und verschiedene Messgitterformen für unterschiedliche Anwendungen (rechts)

Die Widerstandsänderung wird mit einer Brückenschaltung (Wheatstone-Brücke) ausgewertet. Man unterscheidet die Vollbrückenschaltung mit 4 DMS, die Halbbrückenschaltung mit 2 DMS und die Viertelbrückenschaltung mit einem DMS. Die Brückenschaltungen können sowohl mit Wechselspannung (Trägerfrequenzverfahren) als auch mit Gleichspannung betrieben werden.

Temperaturabhängige Widerstände: der Widerstand eines Leiters ist temperaturabhängig.

Bei Widerstandsthermometern nützt man die Widerstandsänderung von Metallen oder Halbleitern bei Temperaturänderung aus. Der Widerstand von Metallen nimmt mit zunehmender Temperatur zu, der von Halbleitern und gewissen Sinterstoffen ab. Mit Hilfe einer Widerstandsmessung kann man auf die Temperatur des Sensors schließen. Die Metallwiderstandssensoren sind meist bei Raumtemperatur mit Platinwiderständen (Pt100 - 100Ω, Pt1000 - 1000 Ω) oder Nickelwiderständen (Ni100 - 100 Ω) ausgerüstet.

Widerstandsthermometer werden z.B. bei elektrischen Öfen, einfachen Feuerungsanlagen, bei Heizkesseln, zur Temperaturregelung von Klimaanlage und Gefrierschränken eingesetzt.

Der Halbleitertempertursensor besteht aus einem integrierten Schaltkreis und liefert in Abhängigkeit von der Temperatur einen eingepprägten Strom. Halbleitertempertursensoren werden zur Temperaturanzeige, Temperaturüberwachung und Temperaturregelung in Geräten und Maschinenanlagen eingesetzt.

Heißeleiter – NTC (negative temperatur coefficient):

Sie bestehen aus pulverisierten und gesinterten Metalloxiden (Eisen-, Nickel- und Kobaltoxide) Titanverbindungen und Füllstoffen. Sie werden in Perlen-, Stäbchen- und Scheibenform hergestellt. Für die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur gilt allgemein die Beziehung:

$$R = R_0 * e^{-b(1/T_0 - 1/T)}$$

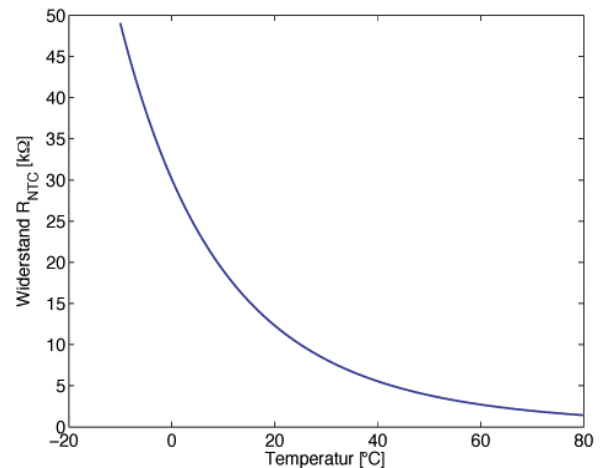
wenn R₀ der Nennwiderstand bei T₀ = 20°C, b aus Datenblättern.

Der Widerstandsverlauf eines NTC über der Temperatur ist stark nichtlinear.

Der NTC ist relativ träge und stellt sich nur relativ langsam auf eine Temperaturänderung ein.

Die NTC werden als billige Sensoren bei Heizungen als Raumtemperaturfühler, Anlagefühler für Heizungsrohre und Außenfühler eingesetzt. In der Elektronik finden sie vielfache Verwendungen.

Der PTC ist wegen seiner Schaltcharakteristik für die Messung von Temperaturen nicht geeignet. Er wird zur Übertemperaturüberwachung eingesetzt.



Feldplatten: der Widerstand eines Leiters ist von der Magnetisierung abhängig.

Feldplatten sind magnetisch steuerbare Widerstände aus Halbleitermaterialien (z.B. InSb/NiSb), deren Beeinflussbarkeit auf dem Gauseffekt beruht. Die den Halbleiter durchlaufenden Ladungsträger werden durch die Einwirkung eines transversalen Magnetfeldes aufgrund der Lorentzkraft seitlich abgelenkt.

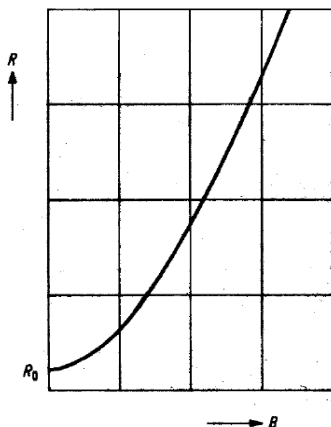
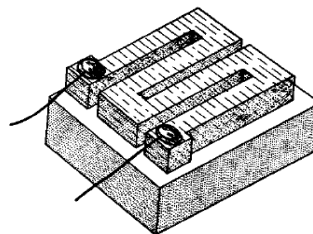


Abb.1.21: Abhängigkeit des Feldplattenwiderstandes von der Induktion

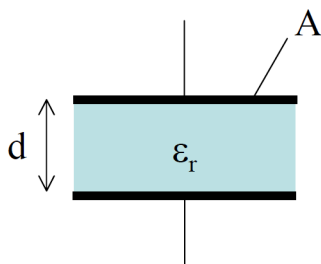
Abb.1.22: Feldplatte mit Träger



4.2 Kapazitive Sensoren

Kapazitive Sensoren nutzen die Kapazität zwischen zwei voneinander isolierten Leitern. Die Kapazität ist von der Geometrie der Anordnung und dem Material des Isolators abhängig. Die Kapazität muss mit üblichen AC- Methoden gemessen werden. Problematisch sind die an sich geringen Werte der Kapazität, die eine spezifische Messtechnik erfordern.

Grundsätzlich gilt für einen einfachen Plattenkondensator mit der Plattenfläche A, dem Plattenabstand d und dem Material mit der relativen Permittivität ϵ_r :



$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Um die Kapazität zu ändern, kann man den Abstand d, die Fläche A oder das Dielektrikum ϵ_r verändern. Je nachdem ergeben sich ein unterschiedliches Verhalten und andere Anwendungsmöglichkeiten.

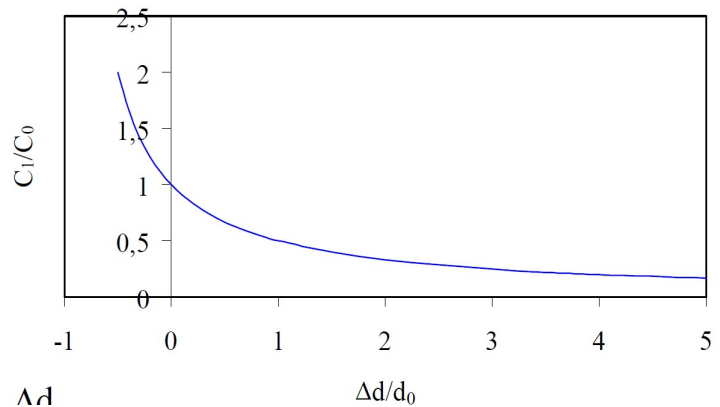
4.2.1 Abstandsänderung Δd

$$d_0 \xrightarrow{\quad} d_1 = d_0 + \Delta d$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d_0} \quad C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{(d_0 + \Delta d)}$$

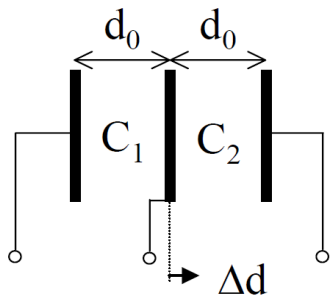
Kennlinie:

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{d_0}{d_0 + \Delta d}$$



Der Kapazitätsverlauf ist stark nichtlinear. Bei größeren Abständen ist die relative Änderung gering, so dass die Empfindlichkeit schlecht ist.

Der Verlauf lässt sich mit einem **Differentialkondensator** relativ gut linearisieren.



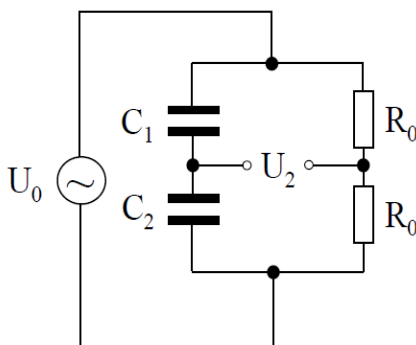
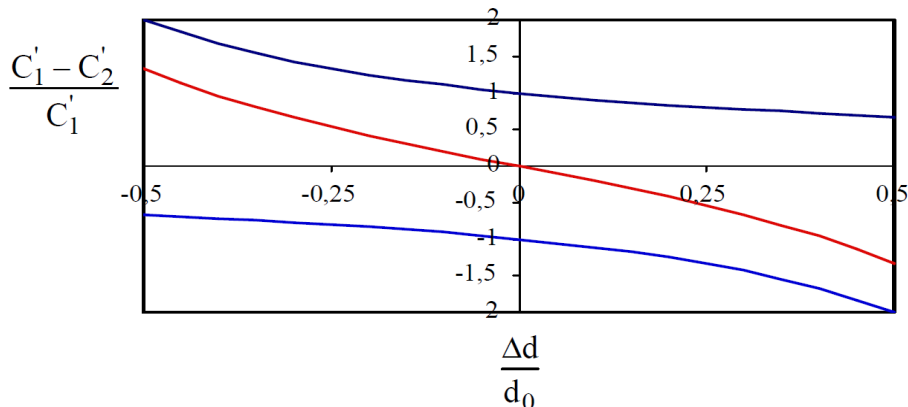
Bei einer Verschiebung Δd der mittleren Platte erhält man für die beiden Teilkapazitäten:

$$C'_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d_0 + \Delta d} \quad C'_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d_0 - \Delta d}$$

Die Differenz dieser Werte ergibt dann:

$$C'_1 - C'_2 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot \left(\frac{1}{d_0 + \Delta d} - \frac{1}{d_0 - \Delta d} \right) = -2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot \frac{\Delta d}{d_0^2 - (\Delta d)^2}$$

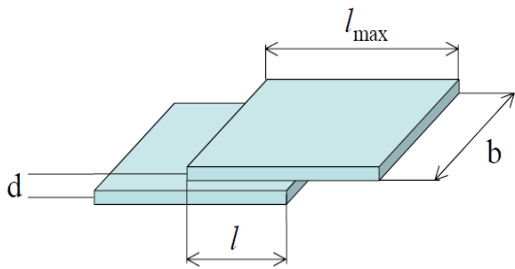
Die Kennlinie des Differentialkondensators wird näherungsweise linear (mittlere Linie):



Die Messschaltung kann in Form einer Brückenschaltung realisiert werden, wodurch sich eine lineare Abhängigkeit zwischen Brückenspannung U_2 und Abstandsänderung ergibt.

$$U_2 = -\frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta d}{d_0}$$

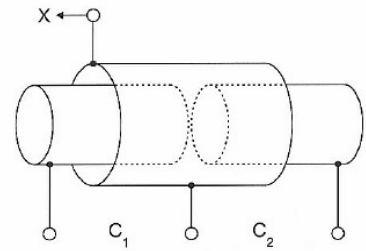
4.2.2 Flächenänderung ΔA



Die Flächenänderung wird meist in Form einer Verschiebung realisiert, wodurch sich eine Abhängigkeit der Kapazität von einer Wegstrecke (Länge l) ergibt.

$$C_x = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{b}{d} \cdot l$$

Grundsätzlich ist der Zusammenhang linear. Das praktische mechanische Problem besteht allerdings darin, den Abstand d während der Verschiebung konstant zu halten. Zur Verbesserung dieses Fehlereinflusses kann man einen Differentialkondensator konstruieren.

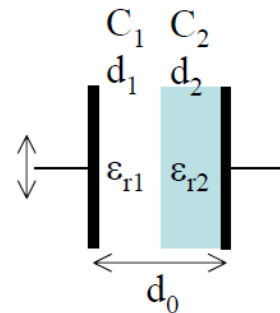


4.2.3 Änderung des Isolatormaterials

Variante 1: Schicht aus unterschiedlichem Isoliermaterial

- Serienschaltung von C_1 und C_2
- $\epsilon_{r1} = 1$ (Luft, Vakuum)

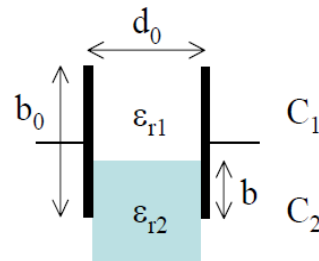
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot A} \cdot \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$



Anwendung: Schichtdickenmessung

Variante 2: Füllung mit unterschiedlichem Material

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\epsilon_{r2} - 1}{b_0} \cdot b \quad \text{mit } C_0 = C(b=0)$$

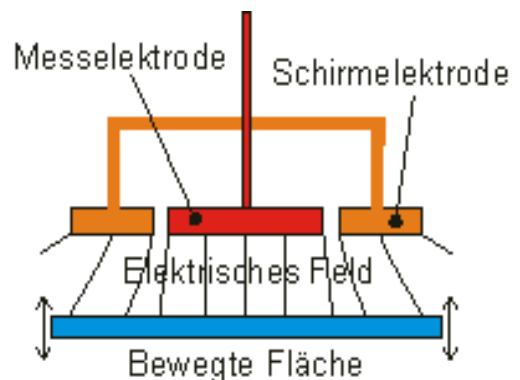


Die relative Kapazitätsänderung ist dem „Füllstand“ des Materials 2 proportional.

Anwendung: berührungsloser Füllstandsensor.

Es gibt kapazitive Sonden, die das Freifeld auswerten, das sich vor einer offenen Elektrodenanordnung ergibt. Kommt ein beliebiger Körper in die Reichweite des elektrischen Feldes, wird die sich ergebende Kapazitätsänderung ausgewertet.

Anwendung: kapazitive Näherungssensoren für alle Materialien.



Im folgenden werden einige Vor- und Nachteile kapazitiver Sonden gegenübergestellt.

Vorteile

- berührungslos
⇒ keine Reibung
- einfachste Bauweise
- sehr geringe Leistungsaufnahme
- durchdringt auch isolierende Stoffe
- geringe Temperaturabhängigkeit
- extremer Temperaturbereich
- weitgehende Freiheit in Kennliniengestaltung
- Auflösung im sub-nm-Bereich möglich

Nachteile

- Wechselspannung erforderlich ⇒ messtechnischer Aufwand
 $C \leq 100 \text{ pF} \Rightarrow$ hohe Frequenzen
- kleine Messleistung (Störungen)
- Messwege klein (max. bis zu einigen cm)
- Beeinträchtigung durch Isolierwände
- Beeinträchtigung durch Staub und Feuchtigkeit ($\epsilon_r(\text{H}_2\text{O}) = 81!$)

4.3 Induktive Sensoren

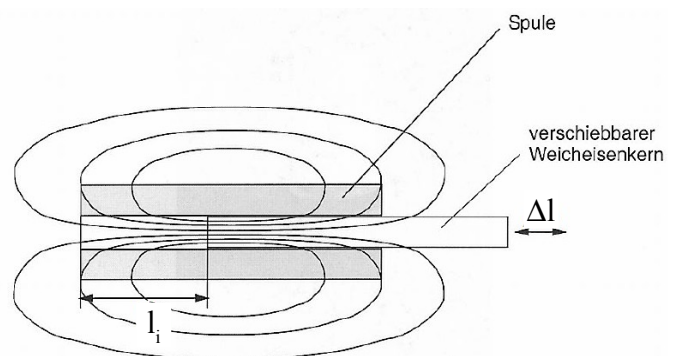
Bringt man in die Nähe einer von Wechselstrom durchflossenen Spule Magnetmaterial oder leitfähiges Material, so ändern sich die magnetischen Verhältnisse und damit die Induktivität (Änderung μ_r) und der Verlustwiderstand (Wirbelströme im nahen Leiter). Diese Änderungen werden ausgewertet.

Anwendung: induktive Näherungssensoren, induktive Wegmessung uvm.

4.3.1 Tauchankersensor

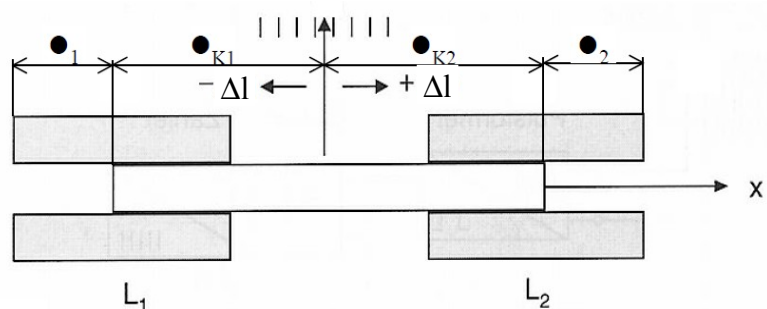
Eine stromdurchflossene Luftspule baut um sich herum ein Magnetfeld auf. Daraus ergibt sich eine bestimmte Induktivität. Bringt man in das Innere der Spule einen Anker aus weichmagnetischem Material, so ändert sich diese Induktivität in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Ankers (Tauchanker).

Dieser Zusammenhang ist nichtlinear.



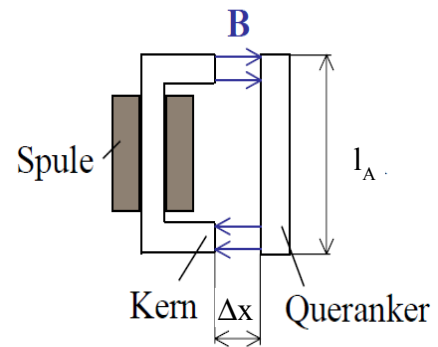
Das erhebliche Streufeld der Anordnung ist ein weiteres Problem. Eine wesentliche Verbesserung erreicht man mit dem **Differential- Tauchankeraufnehmer**.

Ein Kern aus Weicheisen kann in zwei Spulen verschoben werden. In Nullzustand werden die beiden Induktivitäten gleich eingestellt. Bei Verschiebung des Tauchankers wird immer eine Induktivität größer und die andere kleiner. Durch Differenzbildung ist eine sehr feine Auflösung der Verschiebung Δx möglich, die noch dazu relativ linear ist.



4.3.2 Querankersensor

Eine Spule befindet sich auf einem Kern mit weichmagnetischen Material. Vor dem Kern ist ein Queranker beweglich angeordnet. Ändert sich dessen Abstand Δx , so ändert sich auch die Induktivität der Anordnung. Dieser Zusammenhang ist nichtlinear. Zur Linearisierung sind Differentialanordnungen möglich. Die Bauweise des Sensors ist sehr robust. Er reagiert jedoch nur auf magnetisches Material.



Im folgenden werden einige Vor- und Nachteile induktiver Sonden gegenübergestellt.

Vorteile

- berührungslos
- driftfrei (AC-Speisung)
- mittlerer Messweg
- relativ hohes Ausgangssignal
- sehr hohe Messempfindlichkeit (bis nm-Auflösung möglich)
- keine Beeinträchtigung durch Staub oder Schmutz
- Durchdringen nichtleitender und nichtmagnetischer Materialien (z.B. Gehäuse)

Nachteile

- höhere Stellkräfte als bei kapazitiven Sensoren
- gewisse magnetische Rückwirkung
- AC-Speisung $\Rightarrow$ erheblicher messtechnischer Aufwand
- Temperaturabhängigkeit (kann aber z.T. durch Differenzialanordnungen eliminiert werden)
- erhebliche Nichtlinearität
- kaum Möglichkeiten zum Maßschneiden der Kennlinie

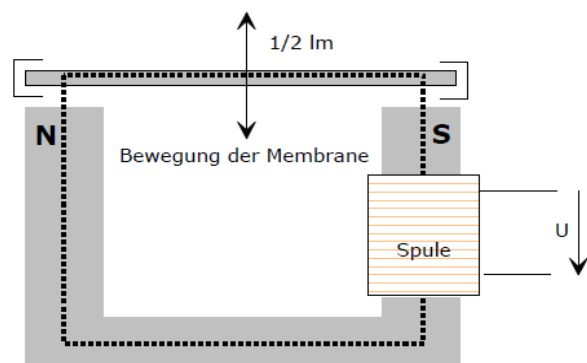
5 Bauprinzipien von aktiven Sensoren

Für die Sensorik werden unterschiedlichste physikalische Eigenschaften und Effekte angewendet.

5.1 Elektromagnetisches Prinzip

Ein Magnetkreis besteht aus Dauermagnet, feststehendem Eisen- oder Ferritkern, einer darüber gewickelten feststehenden Spule und einem beweglichen Magnetkern (Anker, Membran), der einen Luftspalt zum festen Kern bildet.

Bewegt sich die Membran zufolge mechanischer Kräfte, so ändert sich der Luftspalt und damit der magnetische Widerstand sowie der magnetische Fluss. Dadurch entsteht eine Wechselspannung in der Spule (Ruheinduktion), die mit der Bewegungsgeschwindigkeit (bzw. der Frequenz der Schwingung) der Membran zunimmt.



$$u(t) = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{oder} \quad U = j\omega c_{\text{ges}} \cdot v \quad \text{mit } c_{\text{ges}} \text{ als Wandlerkonstante}$$

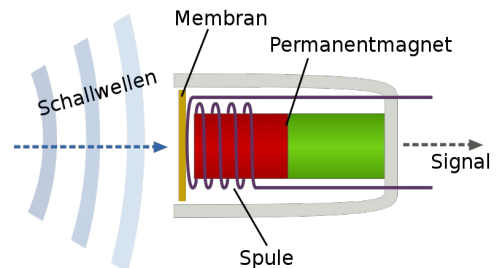
Diese Sensortype liefert nur dann ein Signal, wenn eine Relativbewegung zwischen Membran und

Kern stattfindet. Die Spannung ist synchron mit der Bewegungsänderung. Im Ruhezustand liefert der Sensor kein Signal. Wegen der geringen Masse der Membran reagiert dieser Sensor auf relativ schwache Kräfte, jedoch ist die Ausgangsspannung nicht sehr groß.

Anwendung: Drehzahlgeber, Kopfhörer, Mikrofon

5.2 Elektrodynamisches Prinzip

Ein Magnetkreis besteht aus Dauermagnet mit feststehendem Eisen- oder Ferritkern, der einen Luftspalt enthält. Eine Spule ist in diesem Luftspalt beweglich. Bewegt sich die Spule zufolge mechanischer Kräfte, so entsteht eine von der Geschwindigkeit v der Bewegung abhängige Wechselspannung (Bewegungsinduktion). Im Ruhezustand liefert der Sensor kein Signal.



Anwendung: dynamisches Mikrofon, Tauchspulensensor.

$$u(t) = -N B A_{Fe} \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{oder} \quad U = j \omega c_{ges} \cdot v \quad \text{mit } c_{ges} \text{ als Wandlerkonstante}$$

5.3 Elektretkondensator Prinzip

Während der normale Kondensator ein passiver Sensor ist, dessen Kapazitätsänderung gemessen werden muss, ist der Elektretkondensator ein aktiver Sensor.

Der oder das Elektret ist ein elektrisch isolierendes Material aus Kohlenwasserstoffen, das permanent gespeicherte elektrische Ladungen oder permanent ausgerichtete elektrische Dipole enthält und somit ein permanentes elektrisches Feld in seiner Umgebung oder in seinem Inneren erzeugt.

Bei einem aktiven kapazitiven Sensor sind zwei Platten in einem bestimmten Abstand montiert. Ein Teil des Dielektrikum besteht aus Luft, der andere aus einem Elektret (polarisiertes Dielektrikum). In einem Kondensator mit Elektret ist dauernd eine Ladung vorhanden ohne dass von aussen eine Spannung angelegt werden muss. Die obere Platte ist beweglich ausgeführt, sodass x sich verändert (siehe Abb. 1.4).



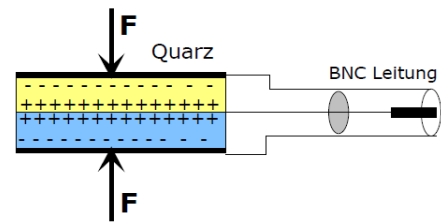
Abb.1.4: Prinzip eines aktiven kapazitiven Sensors

Die Spannung an den Platten ist direkt proportional der Wegstrecke x . Die Auswertung erfolgt mit hochohmigen Messschaltungen, die den Ladestrom erfassen.

Anwendung: Kondensatormikrofon (Elektretmikrofon), dynamische Wegmessung (nm bis mm), dynamische Beschleunigungsmessung.

5.4 Piezoelektrisches Prinzip

Wird ein bestimmter Quarz deformiert, werden Ladungen verschoben. Diese Ladungsänderung kann an den gegenüberliegenden Quarzflächen über eine metallische Kontaktierung in Form einer elektrischen Spannung gemessen werden. Die Wegänderung aufgrund der Deformation ist proportional zur Ladungsänderung und ist über das Hook'sche Gesetz mit der einwirkenden Kraft verbunden:



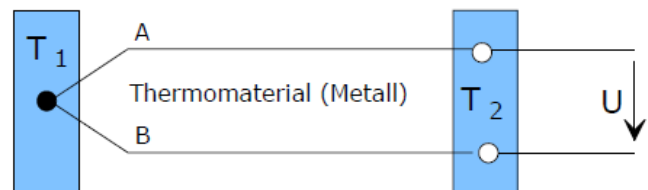
Die Kraft wird in eine mechanische Spannung umgewandelt, die das Kristallgitter deformiert und damit eine Polarisation (Ladungsverschiebung) verursacht. Diese Polarisation verursacht ein elektrisches Feld, das an Kontaktflächen als Spannung abgegriffen werden kann. Der Sensor ist jedoch so hochohmig, so dass praktisch nur das Fließen des Polarisationsstromes während der Ladungsverschiebung ausgewertet werden kann (Ladungsverstärker). Die Messung kann daher nur dynamisch innerhalb bestimmter Frequenzgrenzen erfolgen.

Anwendung: Sensoren zu Kraft-, Druck- oder Beschleunigungsmessungen.

5.5 Thermoelemente

Ein Thermoelement entsteht, wenn zwei verschiedene Metalle eine Kontaktstelle bilden (z.B.: Cu-Fe), an den anderen beiden Enden kann dann die Thermospannung gemessen werden (mV Bereich). Je heißer die Kontaktstelle im Vergleich zur Messstelle, umso höher ist die gemessene Spannung (Seebeck-Effekt).

Die Thermospannung ist eine Gleichspannung und linear von der Temperaturdifferenz der beiden Kontaktstellen T1 und T2 abhängig. Die Stelle T2 muss auf einer Referenztemperatur gehalten werden (z.B. Eiswasser 0 °C).



5.6 Fotoelemente

Diese Sensoren sind auf Halbleiterbasis hergestellt.

Bei der Fotodiode wird durch Lichteinfall auf die Sperrschicht der Sperrstrom erhöht, weil durch die Lichtenergie zusätzliche freie Ladungsträger entstehen.

Fotoelemente und Solarzellen sind Energiewandler, bei denen sich Photonen direkt in elektrische Energie umsetzen (innerer Fotoeffekt).

Die spektrale Empfindlichkeit ist vom Material abhängig.

5.7 Hall- Sonden

Siehe Kapitel über magnetische Messgeräte.

5.8 pH- Sonden

Wird eine Metallelektrode in eine wässrige Lösung getaucht, so entwickelt sich ein elektrisches Potential (Redox- Potential) im mV- Bereich. Dieses hängt vom pH- Wert der Lösung ab.

pH = 0 ... 7 sauer (je kleiner umso stärker ist die Säure)
pH = 7 neutral
pH = 7 ... 14 basisch (je höher umso stärker ist die Lauge)

Anwendung: chemische Industrie, Abwasserkontrolle, Nutzwasserkontrolle, ...