

Vorlesungsskriptum

Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

- Grundlagen der Sensorik und Messtechnik
- Einführung in die digitale Steuerungstechnik
- Grundlagen der Regelungstechnik
- Bussysteme und Automation
- Gebäudeleittechnik

erstellt von
Mag. Georg N. Strauss

0. Inhaltsverzeichnis

1. Sensoren und Messwertumformer

- 1.1. Allgemeines und Messaufbau
- 1.2. Aktive Messfühler
 - 1.2.1. Elektromagnetische und elektrodynamische Sensoren
 - 1.2.2. Aktive kapazitive Sensoren
 - 1.2.3. Piezoelektrische Sensoren
 - 1.2.4. Thermoelemente
 - 1.2.5. Fotoelemente und Solarzellen
 - 1.2.6. pH-Sonden
- 1.3. Passive Messfühler
 - 1.3.1. Ohmsche Widerstandssensoren
 - 1.3.1.1. Messpotentiometer
 - 1.3.1.2. Dehnmessstreifen
 - 1.3.1.3. Temperaturabhängige Widerstände
 - 1.3.2. Feldplatten
 - 1.3.3. Induktive Näherungssensoren
 - 1.3.4. Kapazitive Näherungssensoren
 - 1.3.5. Optische Näherungssensoren, IR Sensoren
 - 1.3.6. Hallsensoren
 - 1.3.7. Ultraschallsensoren
 - 1.3.8. Digitale Sensoren
- 1.4. Zusammenfassung der Messprinzipien
- 1.5. Messwertübertragung

2. Messgeräte

- 2.1. Kenngrößen
- 2.2. Arten und Bauformen
- 2.3. Messschaltungen und Anwendungen
- 2.4. Messfehler

3. Analoge Messverfahren

- 3.1. Verfahren zur Messung von elektrischen und nicht-electrischen Größen
- 3.2. Messwertübertragung
- 3.3. Anzeigegeräte

4. Projektierung von Steuerungen

- 4.1. Beschreibung der Steuerungsaufgabe
- 4.2. Steuerungsentwurf

5. Pneumatische und hydraulische Steuerungen

- 5.1. Pneumatische Steuerungen
 - 5.1.1. Wegeventile
 - 5.1.2. Sperrventile
 - 5.1.3. Elektrische Ventile
 - 5.1.4. Beispiel Biegevorrichtung
 - 5.1.5. Beispiel Taktstufensteuerung
 - 5.1.6. Beispiel Kaskadensteuerung
 - 5.1.7. Beispiel Wegplansteuerung
- 5.2. Hydro-pneumatische Steuerungen
- 5.3. Hydraulische Steuerungen
 - 5.3.1. Allgemeines
 - 5.3.2. Proportionalventile
 - 5.3.3. Servoventile
 - 5.3.4. Beispiel Handhabungsautomat

- 6. Elektromechanische und elektronische Systeme
- 7. Digitale Steuerungstechnik
 - 7.1. Grundlegende Definitionen und Kenngrößen
 - 7.2. Logische Verknüpfungen
 - 7.3. Systematischer Entwurf eines Schaltnetzes
 - 7.4. Codierung
 - 7.5. Binäre Speicherfunktionen
 - 7.6. Zeitfunktionen
 - 7.7. Anwendungsspezifische Grundsaltungen
 - 7.8. Speicherprogrammierbare Steuerungen
- 8. Digitale Messtechnik
 - 8.1. Digitale Messverfahren
 - 8.2. Messverfahren für Zählgrößen
 - 8.3. Analog/Digital Wandler, Digital/Analog Wandler
 - 8.4. Industrielle Microprozessortechnik
- 9. Anhang
 - 6.1. Formelsammlung
 - 6.2. Tabellen und Diagramme
 - 6.3. Abkürzungen und Zeichen
 - 6.4. Literaturhinweise

1. Sensoren und Messwertumformer

1.1 Allgemeines und Messaufbau

Bei der Konzeption und dem Betrieb von Mess- und Automatisierungssystemen kommt den Sensoren besondere Bedeutung zu. Sie stellen die Verbindung zu technischen Prozessen dar und formen die nicht-elektrischen Messgrößen in elektrische Signale um.

Der Anwender von Sensoren unterscheidet diese nach der zu erfassenden Messgröße, dem Messverfahren und weiters, ob der elektrische Ausgang binär oder multivalent ist. Letzterer bedeutet, dass die gewandelte nicht-elektrische Größe, z.B. Temperatur, als Analogwert in Form von z.B. 0-10V zur Verfügung steht, wobei im Falle von binär, der Ausgang nur zwei Zustände kennt: ein und aus.

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:

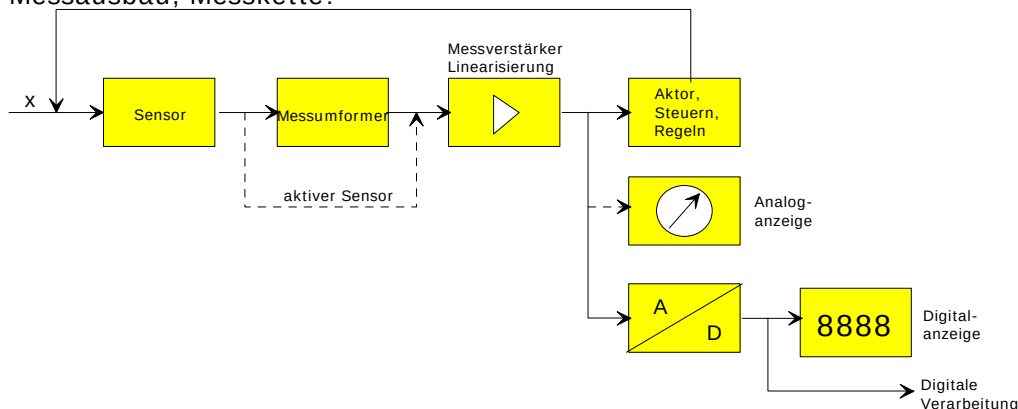


Abb.1.1: Prinzipaufbau einer Messeinrichtung

Tabelle 1.1: Beispiele für physikalische Messgrößen:

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

Messen heisst vergleichen mit einem Normal und abzählen, wie oft die Normaleinheit in der zu messenden Grösse enthalten ist.

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.

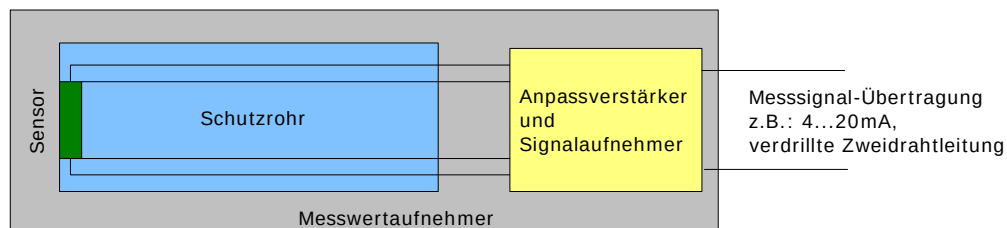


Abb.1.2: Messwertaufnehmer

Genormte Ausgangssignale:

- 0 ... 10V oder 0 ... +/- 10V
- 0 ... 20mA
- 4 ... 20mA (,live zero' Signal)

1.2 Aktive Messfühler

1.2.1. Elektromagnetische und elektrodynamische Sensoren

Elektromagnetisches Prinzip: Beim elektromagnetischen Prinzip erzeugt ein Dauermagnet einen mag. Fluss. Der mag. Widerstand ändert sich, wenn der Abstand des Bleches verändert wird (Abb. 1.3). Es lassen sich so Wegeänderungen in Bruchteilen von μm erfassen.

Achtung: In der festen Spule wird nur bei einer zeitlichen Flussänderung eine Spannung erzeugt (Induktionsgesetz), d-h- das Blech muss sich bewegen. Es sind mit diesem Messfühler somit nur dynamische Wegmessungen möglich, keine statischen.

Induktionsgesetz:

$$U = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

U ... induzierte Spannung
N ... Windungszahl
 $\Delta\Phi$... Flussänderung in Vs
 Δt ... Zeit in s

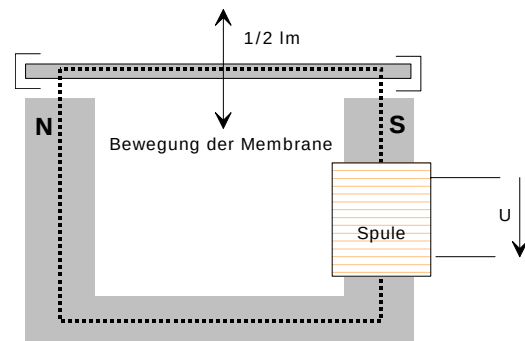


Abb.1.3: Prinzip des elektromag. Sensors

$$\phi = \frac{\Theta}{R_m} \Rightarrow R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A}$$

$$\Rightarrow U = N \frac{\Theta \mu_0 \mu_r A}{\Delta t l_m}$$

Ξ ... Durchflutung in A
 Φ ... mag. Fluss in Vs
 R_m ... mag. Widerstand in Henry
 l_m ... Luftspalt in m
 μ_s ... mag. Feldkonstante: $1,257 \cdot 10^{-3} \text{Vs/Am}$
 μ_r ... Permeabilitätszahl: $1 \leq \mu_r$

Anwendungen:

- ▶ Drehzahlsensor: Über einem Zahnrad wird eine Spule mit Dauermagnet im Kern montiert. Dreht sich das Zahnrad, verändert sich die Flusstärke und eine Spannung wird in der Spule induziert. Die Drehzahl des Zahnrades steckt in diesem Fall sowohl in der Amplitude, als auch in der Frequenz des Signals.
- ▶ Mikrofon
- ▶ Kopfhörer

Elektrodynamisches Prinzip: Beim elektrodynamischen Prinzip ist die Flusstärke immer konstant. Damit eine Spannung in der Spule induziert werden kann, muss sich die Spule bewegen. Auch hier können Wegänderungen in Bruchteilen von μm erfasst werden und es lassen sich ebenfalls keine statische Messungen durchführen. Im schmalen Luftspalt kann von einem homogenen Magnetfeld ausgegangen werden. Für die induzierte Spannung gilt:

$$U = B \cdot l \cdot v \cdot N$$

B ... magnetische Induktion in T
l ... Länge einer Windungsschleife
v ... Geschwindigkeit der Spulenänderung in m/s
N ... Anzahl der Windungen

Auch hier lässt sich der Effekt umkehren: Wird durch die Spule ein sich ändernder Strom geschickt, bewegt sich die Membrane, wobei die Amplitude von der Stromstärke abhängt.

Anwendungen:

- ▶ Dynamisches Mikrofon
- ▶ Tauchspulen Sensor für dynamische Wegmessung
- ▶ Umkehreffekt: Lautsprecher

1.2.2. Aktive kapazitive Sensoren

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).

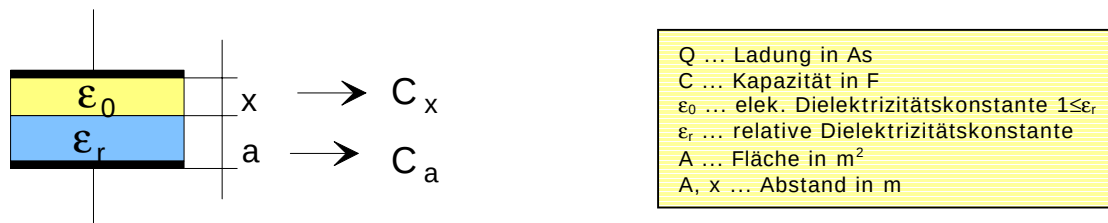


Abb.1.4: Prinzip eines aktiven kapazitiven Sensors

Es gilt:

$$C_a = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{a} \quad \text{und} \quad C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{x} \Rightarrow C_{tot} = \frac{C_a \cdot C_x}{C_a + C_x} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{a + x}$$

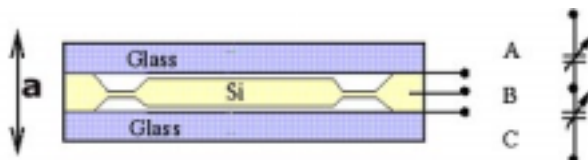
und somit für die erzeugte Spannung:

$$U = \frac{Q}{C_{tot}} = \frac{Q(a+x)}{\epsilon_0 \epsilon_r A} = k_1 x + d \quad \Rightarrow \text{Es besteht ein linearer Zusammenhang}$$

zwischen U und x

Anwendungen:

- Kondensatormikrofon: Die Schallwellen bewegen eine Metallmembrane (dünne Alu-Folie mit kleiner Masse), die eine Platte des Kondensators darstellen.
- Dynamische Messung von Wegänderungen im Bereich nm bis zu einem mm.
- Dynamische Beschleunigungsmessung



$$a = \frac{k * d * (C_1 - C_2)}{m * (C_1 + C_2)}$$

Bei Kapazitiven Sensoren dient die seismische Masse als mittlere Kondensatorplatte zwischen einer oberen und einer unteren Glasplatte. Der Vorteil gegenüber den Piezo Sensoren besteht in der höheren Empfindlichkeit, die relative Kapazitätsänderung ist größer als die relative Widerstandsänderung beim Piezo. Allerdings sind die zu messenden Kapazitäten bei vernünftigen Sensorgrößen sehr klein. Ein weiterer Vorteil ist die viel geringere Temperaturabhängigkeit.

1.2.3. Piezoelektrische Messwertaufnehmer

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:

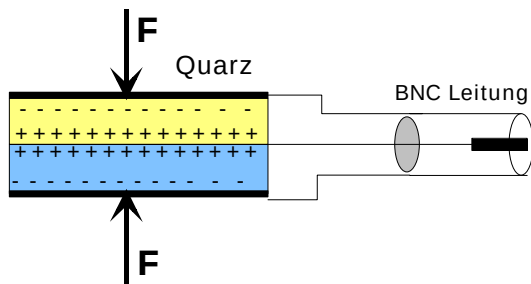
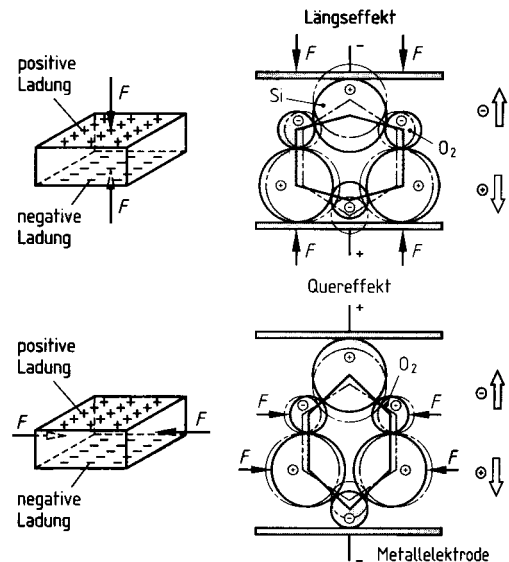


Abb.1.5: Prinzip des piezoelektrischen Sensors

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$



Die Kraft wird in eine mechanische Spannung umgewandelt, somit kann der piezoelektrische Sensor zur Kraft-, Druck-, Spannungs- und Beschleunigungsmessung verwendet werden.

σ ... Spannung oder Druck in N/m^2
 E ... E-Modul des Quarzes (etwa wie Stahl 37)
 ε ... Dehnung oder Stauchung in m/m (rel. Wegänderung)
 F ... Kraft in N
 A ... Fläche in m^2
 Δl ... Längenänderung in m
 l ... Länge des Quarzes in m

Bei der Beschleunigungsmessung wird eine bestimmte Masse über eine Feder auf den Quarz vorgespannt. Bei einer Beschleunigung verstärkt oder vermindert sich der Druck auf den Quarz.

Das Hook'sche Gesetz definiert den maximalen Dehn- bzw. Stauchbereich eines Materials, bei dem dieses nach einer Entlastung wieder die ursprüngliche Form annimmt. Beim Verlassen des Hook'schen Bereiches kommt es zu elastischen Verformungen.

Der piezoelektrische Sensor erlaubt nur dynamische Messungen, wobei für jeden Sensor eine typische obere und untere Grenzfrequenz vom Hersteller angegeben wird. Zur Messung der elektrischen Ladungsänderung kommt in der Regel ein Ladungsverstärker zur Anwendung (Abb. 1.6).

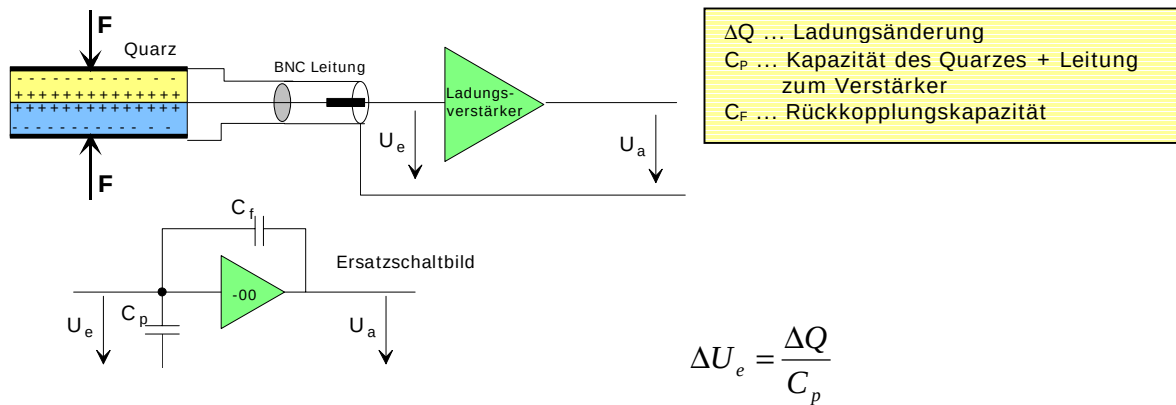


Abb.1.6: Piezoelektrischer Quarzsensormit Ladungsverstärker

$$\Delta U_e = \frac{\Delta Q}{C_p} = \frac{i_e \cdot \Delta t}{C_p} \quad \text{und} \quad \Delta U_a = \frac{i_f \cdot \Delta t}{C_f}$$

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = -\frac{C_p}{C_f} \Rightarrow \Delta U_a = -\frac{\Delta U_e \cdot C_p}{C_f} = -\frac{\Delta Q}{C_f}$$

Die Kapazität des Quarzes und des Zuleitungskabels spielen in erster Näherung keine Rolle

Die Linearität des piezoelektrischen Sensors ist ausgezeichnet und die Empfindlichkeit aussergewöhnlich hoch – auf 1000kg ist 1g noch erfassbar.

Die Temperaturempfindlichkeit des Quarzes liegt bei $-1,5 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$.

Statische Messungen sind nicht möglich.

Für die Piezoaktuatorik wird der inverse piezoelektrische Effekt ausgenutzt. Wird an ein piezoelektrisches Material eine Spannung angelegt, so verformt es sich. Der longitudinale Effekt bewirkt eine Längenänderung in Richtung des elektrischen Feldes, der transversale Effekt eine Längenänderung quer dazu. Die Längenänderung ist proportional zur Feldstärke. Als Material für piezoelektrische Aktoren werden vorwiegend Systeme aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) und Blei-Magnesium-Niobat (PMN) verwendet. Um die für die maximale Ausdehnung notwendigen Betriebsspannungen zu begrenzen, werden Piezoaktoren in der Regel aus sogenannten Piezostapeln aufgebaut. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl von Keramikscheiben, die miteinander verklebt sind. Zwischen den Scheiben befinden sich Elektroden, an denen die Betriebsspannung zum Aufbau des elektrischen Feldes angelegt wird. Bei einer Schiebendicke von nur 50-70µm kommt man mit Betriebsspannungen von 150V bis 200V aus und erreicht Stellwege bis zu 100 µm, bei einer maximalen Belastung von 1000N. Anwendung finden Piezoaktoren im Bereich der Mikrosystemtechnik

1.2.4. 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).



Abb.1.7: Prinzipschaltung eines

Seebeck-Effekt:

Das Austrittspotential von Elektronen aus einem Atomverband ist materialabhängig. Berühren sich zwei verschiedene Metalle, so diffundieren Elektronen aus dem Material mit kleinerer Austrittsarbeit in jenes mit grösserer Austrittsarbeit bis ein Gleichgewichtszustand eintritt. Dadurch bildet sich an den Drahtenden eine kleine Spannungsdifferenz, welche der Differenz der Austrittspotentiale entspricht.

Thermoelementes

Mit einem Thermoelement ist nur eine Temperaturdifferenz zwischen einer Messstelle und einer Referenzstelle messbar. Abgleich der Referenzstelle ϑ_2 innerhalb des Messgerätes mit einem temperaturabhängigen Widerstand.

$$U = k_{AB}(T_1 - T_2)$$

Typische Thermoelemente:

- Kupfer-Konstantan: $K_{CuKo} = 4,25 \text{ mV}/100^\circ\text{K}$, Linearität dürftig, Temperaturbereich: 0 ... 200°C.
- Eisen-KupferNickel: $K_{FeCuNi} = 5,37 \text{ mV}/100^\circ\text{K}$, Linearität recht gut, Temperaturbereich: 0 ... 600°C.
- NickelChrom-Nickel: $K_{NiCrNi} = 4,10 \text{ mV}/100^\circ\text{K}$, Linearität recht gut, Temperaturbereich: 0 ... 800°C.
- PlatinRhodium-Platin: $K_{PtRhPt} = 0,64 \text{ mV}/100^\circ\text{K}$, Linearität schlecht, Temperaturbereich: 0 ... 1500°C.

Peltiere-Effekt:

Der Thermoelementeffekt lässt sich umkehren, indem das Voltmeter durch eine Gleichspannungsquelle ersetzt wird. So kühlt sich die eine Kontaktstelle ab während sich die andere erwärmt. Der Wirkungsgrad ist allerdings sehr klein, weil der Temperatursausgleich (bedingt durch die gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen) groß ist. Peltierelemente kommen z.B. in elektronischen Schaltungen als Kühlelemente zur Anwendung.

1.2.5.Fotodioden, Fotoelemente und Solarzellen

Eine Fotodiode ist eine Halbleiterdiode deren pn-Übergang dem Licht gut zugänglich ist. Es werden vor allem Si und Ge Fotodioden hergestellt. Die Fotodiode wird in Sperrrichtung betrieben. Bei Lichteinfall werden Elektronen aus ihren Bindungen gelöst, es entstehen freie Ladungsträger und der Sperrstrom steigt um einige Zehnerpotenzen an. Fotodioden lassen einen mit der Beleuchtungsstärke ansteigenden Sperrstrom fließen.

Fotoelemente und Solarzellen sind Energiewandler, bei denen sich Photonen (Lichtquanten) direkt in elektrische Energie umsetzen (innerer Photoeffekt). Die erzeugte Spannung ist so gerichtet, dass an der Anode der Pluspol liegt und somit die Spannung immer unterhalb der Schwellspannung der Diode ($\approx 0,6\text{V}$ bei Si) liegt. Im Leerlauf steigt die Spannung bis zur Schwellspannung an und die Fotodiode schließt sich selber kurz.

Die spektrale Empfindlichkeit ist vom Halbleitermaterial (Kristallaufbau) abhängig. Bei Silizium-Fotodioden liegt die spektrale Empfindlichkeit vom UV-Bereich bis weit in den IR-Bereich hinein. Selen-Fotodioden kommen der menschlichen spektralen Empfindlichkeit am nächsten. Der Unterschied zwischen Fotoelementen und Solarzellen liegt hauptsächlich in ihrer Größe. Fotoelemente sind meistens klein und werden in der Messtechnik eingesetzt, Solarzellen dienen der Energiegewinnung und sind großflächig.

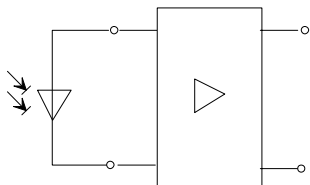


Abb.1.8: Fotodiode in aktiven Betrieb

Hinweis:

Der Kurzschlussstrom eines Fotoelementes ist genau proportional der Beleuchtungsstärke. Dies gilt allerdings nicht für die Spannung. Die Steilheit des Kurzschlussstromes ist temperaturabhängig. Will man aus einer Solarzelle das Maximum herausholen, muss der Arbeitspunkt gewählt werden, indem das Produkt aus Spannung und Strom maximal ist. Die Spannung einer Solarzelle nimmt mit $2\text{mV}/^\circ\text{K}$ ab.

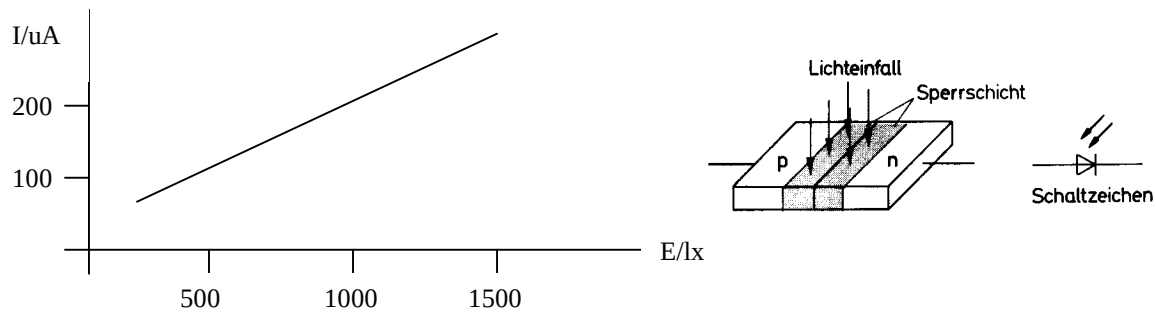


Abb.1.9: Kennlinie und Aufbau einer Fotodiode

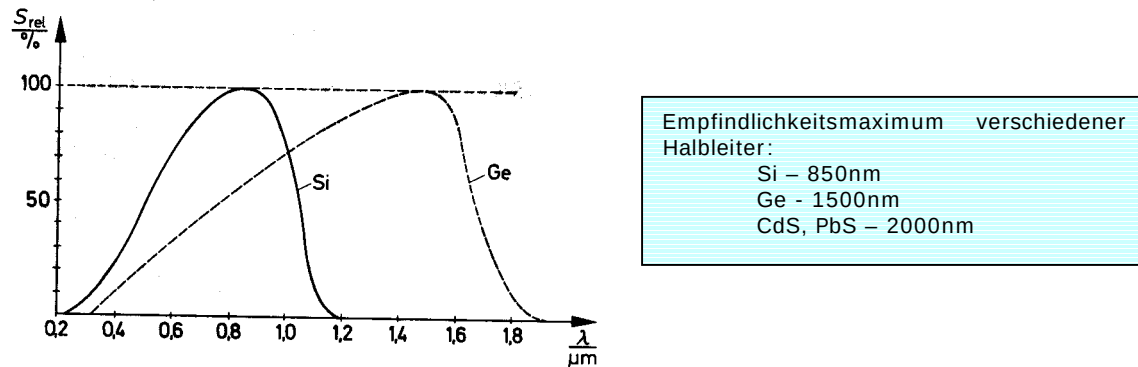


Abb.1.10: Spektrale Empfindlichkeit von Silizium und Germanium

Anwendungen:

- Lichtsensoren
- Optokoppler (galvanische Trennung)
- Energieerzeugung
- Messung der Beleuchtungsstärke
- Optische Signalübertragung

1.2.6. pH Sonden

Das pH-Messgerät erlaubt die Messung der Wasserstoff-Ionenkonzentration einer wässrigen Lösung. Es lässt sich somit bestimmen, wie sauer bzw. basisch eine Lösung ist. Reines Wasser von 22°C hat 10^{-7} mol/l H_3O^+ Ionen.

Es gilt:
 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)

Wird eine Metallelektrode in eine wässrige Lösung getaucht, entwickelt sich ein elektrisches Potential. Dieses Potential ist eine Funktion des Verhältnisses der reduzierenden und oxidierenden Bestandteile in der Lösung und ist als Redox-Potential bekannt. Gemessen wird das Potential gegen eine Bezugselektrode, die Ausgangsspannung liegt im mV-Bereich.

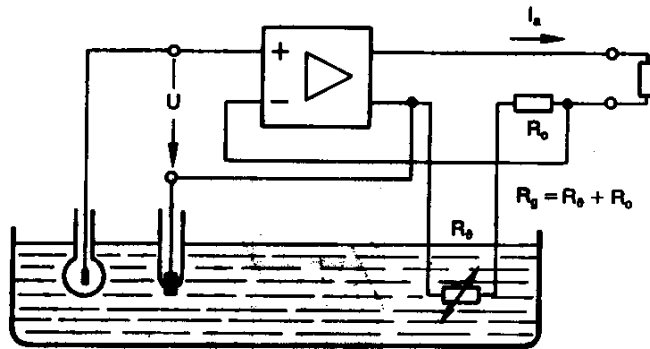


Abb.1.11: pH-Messkette mit Signalverstärker und automatischer Temperaturkompensation

Hinweis:

In einer wässrigen Lösung ist das elektrische Potential von der Wasserstoff-Ionenkonzentration logarithmisch abhängig und kann daher zur Messung des pH-Wertes herangezogen werden. Die Messung des Redox-Potentials erfolgt gegen eine Bezugselektrode, eine Temperaturkompensation ist notwendig. Die elektrische Energie, die erzeugt wird, kommt aus der Flüssigkeit – chemische Energie wird also in elektrische Energie umgesetzt. Zur Anzeige und Weiterverarbeitung des Signales sind spezielle Messverstärker notwendig.

Anwendungen:

- Chemische Industrie zur Regelung eines bestimmten Säure bzw. Laugenpegels in einem Prozess
- Kontrolle von Abwässern
- Kontrolle von Nutzwässern: z.B. müssen Schwimmbäder einen bestimmten pH-Wert einhalten, damit das Wasser keimfrei gehalten werden kann

1.3 Passive Messfühler

1.3.1 Ohm'sche Widerstandssensoren

1.3.1.1. Messpotentiometer

Durch Verschieben des Schleifers bei einem Schiebepotentiometer oder durch Verdrehen bei einem Drehpotentiometer verändert sich der Potentiometerwiderstand. Betreibt man das Potentiometer als Spannungsteiler, erhält man ein Spannungssignal U_x das analog zur Schleiferstellung x und damit ein zum Weg bzw. Drehwinkel ist.

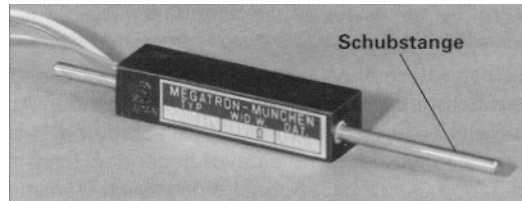
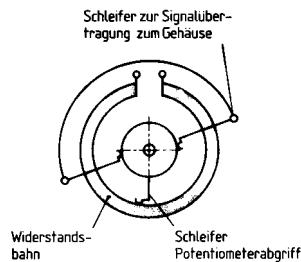


Abb.1.12: Drehpotentiometer und Schiebepotentiometer

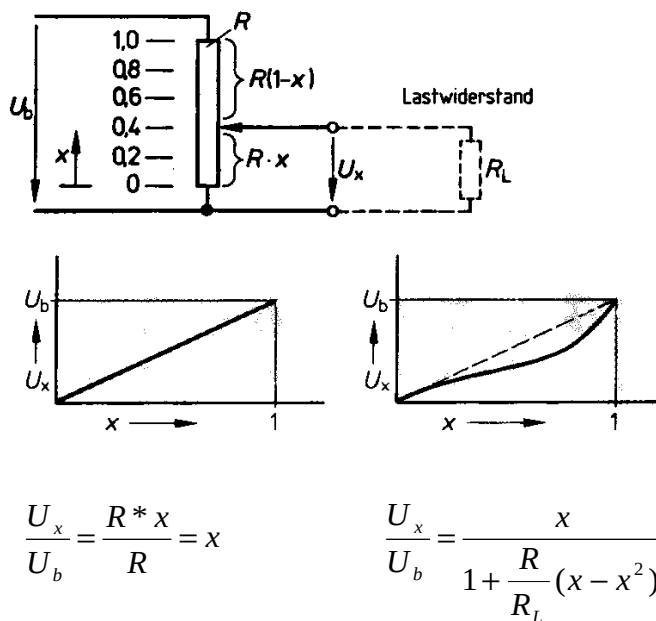


Abb.1.13: Potentiometerschaltung mit Kennlinie für unbelasteten (links) und belasteten (rechts) Fall

Wird das Potentiometer unbelastet oder nur wenig belastet ($R_L \gg R$), z.B. durch den Anschluss eines Messverstärkers, dann ist das abgegebene Spannungssignal proportional zum Verschiebeweg bzw. zum Drehwinkel. Bei Belastung ist der Zusammenhang zwischen Weg und Sensorsignal nicht linear.

Messpotentiometer haben eine Widerstandsschicht aus leitendem Kunststoff. Diese ist sehr abriebfest und ermöglicht ca. 10^8 Schleifspiele. Die Schleifer sind Edelmetall-Mehrfingerschleifer und mit Elastomer schwingungsgedämpft. Typische Auflösungen sind 0,1% mit einer Linearität besser als 1%. Die Nennlängen reichen von 10mm bis 2m.

Linearpotentiometer verwendet man z.B. als Messtaster und zur Wegmessung bei Maschinentischen. Drehpotentiometer verwendet man zur Drehwinkelmessung z.B. zum Erfassen der Gelenkwinkel bei einem Industrieroboter.

1.3.1.2. Dehnmessstreifen (DMS)

Zur Ermittlung von Dehnungen an Bauteilen und Bauwerken verwendet man Dehnmessstreifen (DMS) und Reckdrähte. Das Messprinzip besteht darin, dass sich der Widerstand eines Drahtes mit zunehmender Drahtlänge und abnehmendem Querschnitt erhöht. Wird ein Draht gedehnt, so wird sein Querschnitt geringer und damit sein elektrischer Widerstand größer. Die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R$ ist proportional zur relativen Längenänderung (Dehnung) $\Delta l/l$ innerhalb bestimmter Grenzen (Proportionalitätsbereich).

$$\frac{\Delta R}{R} = k * \frac{\Delta l}{l} = k * \varepsilon$$

Δl	Längenänderung	l	Länge
ε	Dehnung		
ΔR	Widerstandsänderung	R	Nennwiderstand
k	k-Faktor		

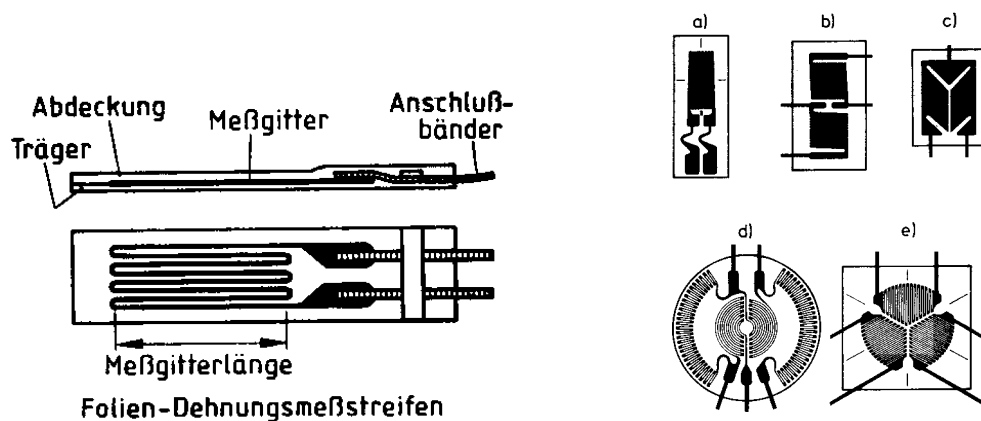


Abb.1.14: Folienmessstreifen (links) und verschiedene Messgitterformen für unterschiedliche Anwendungen (rechts)

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.

1.3.1.3. Temperaturabhängige Widerstände

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 – 1000Ω) oder Nickelwiderständen (Ni100 – 100Ω) ausgerüstet.

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

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

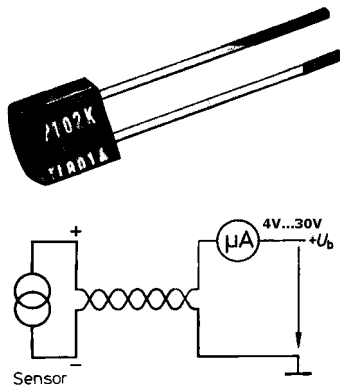


Abb.1.15: Halbleitertempersensor

Heißleiter – 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:

$$R = a * e^{b/T}$$

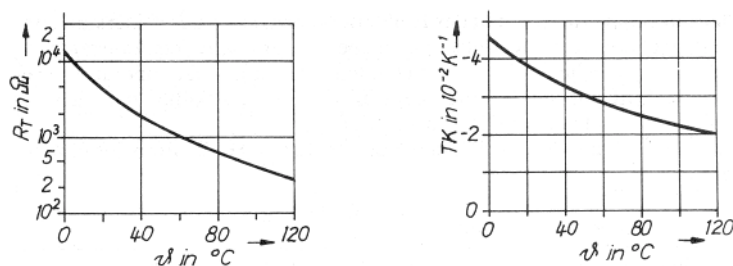


Abb.1.16: Kennlinie eines NTC (links) und dessen Temperaturkoeffizienten (rechts)

Wenn der Heißleiterwiderstand R_0 (Nennwiderstand meist bei 293K oder 298K) bekannt ist (Angabe aus dem Datenblatt), gilt für den Widerstand R_T bei einer bestimmten Temperatur T:

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

Wegen der Wärmeträgheit des Heißleiters ändert sich der Widerstand nur langsam, das Reaktionsverhalten wird durch die thermische Zeitkonstante angegeben. Die Anwendungsbereiche für NTC's liegen in der Temperaturmessung, in der Verwendung für Schaltungen zur Einschaltstrombegrenzung und Temperaturstabilisierung in Halbleiterschaltungen bzw. der Kompensation von Widerstandsänderungen anderer Bauteile.

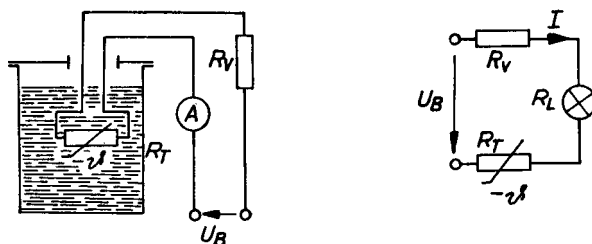


Abb.1.17: Anwendungsbeispiele für NTC

Kaltleiter – PTC (positive temperature coefficient)

Sie bestehen aus dotiertem Bariumtitanat (Titankeramik) und haben innerhalb eines begrenzten Temperaturbereiches einen sehr großen positiven Temperaturkoeffizienten. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes ergibt sich folgendermaßen:

$$R_T = R_0 * e^{-TK(T-T_0)}$$

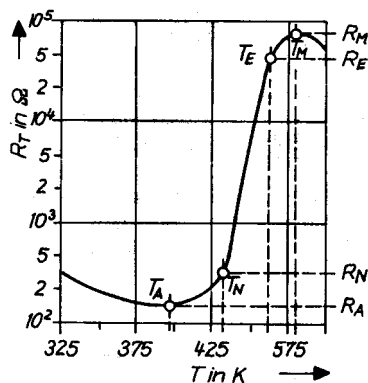


Abb.1.18: Kennlinie eines PTC

PTC's werden für Temperaturfühler für Messanordnungen und zur Überwachung der Wicklungstemperaturen in elektrischen Maschinen eingesetzt. Aufgrund ihres starken Widerstandsanstiegs in einem kleinen Temperaturbereich eignen sie sich vor allem für Temperatur-Überwachungsfunktionen und Grenzwertdetektion. Weiters verwendet man sie als Überstrom- und Kurzschlusssicherung für kleine Leistungen und in Flüssigkeitsniveaufühlern (z.B. Ölstandskontrolle) finden sie ebenfalls Anwendung.

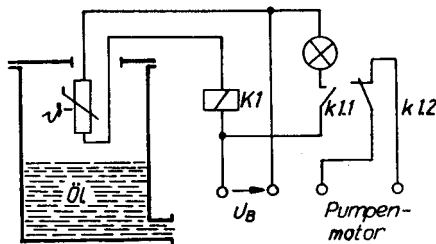


Abb.1.19: Anwendungsbeispiel eines PTC (Ölstandskontrolle)

1.3.2. Feldplatten

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.

Der Winkel, um den sich die Stromrichtung nach Anlegen eines Magnetfeldes ändert, heisst Hallwinkel δ . Er hängt von der Elektronenbeweglichkeit μ und der magnetischen Induktion B ab:

$$\text{tg } \delta = \mu * B$$

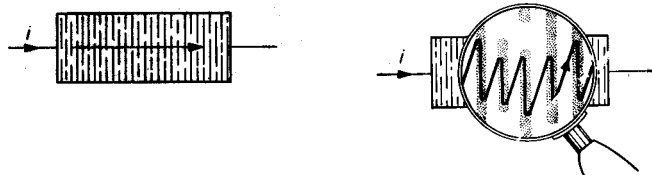


Abb.1.20: Verlauf der Strombahnen ohne (links) und mit (rechts) Magnetfeld in einer rechteckigen Magnetplatte aus InSb mit metallisch leitenden NiSb Nadeln als Kurzschlussstreifen.

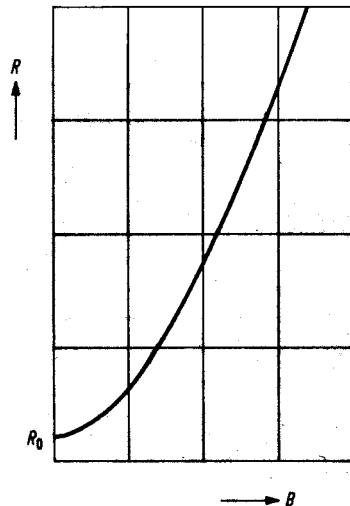
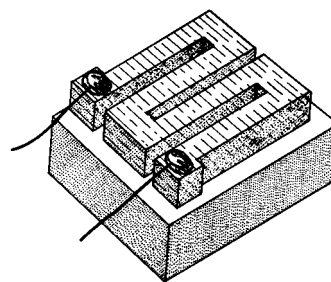


Abb.1.21: Abhängigkeit des Feldplattenwiderstandes von der Induktion

Abb.1.22: Feldplatte mit Träger



Die formgeätzten Halbleitersysteme werden auf isolierte Substrate aufgeklebt und die Halbleitermäander mittels Lötten kontaktiert. Die Oberfläche wird zum Schutz gegen mechanische Beanspruchung mit einer Lackschicht abgedeckt. Die Feldplatten werden als Einzel- oder Doppelfeldplatten hergestellt; letztere eignen sich besonders als Differentialfeldplatten für Brückenschaltungen.

Anwendungen:

- Komplette Positionssensoren in der Form von Feldplattendifferentialfühlern erhält man, indem Einzel- oder Doppelfeldplatten in einem permanentmagnetischen Kreis angeordnet und in geeignete Gehäuse eingebaut werden.
- Feldplatten lassen sich als kontakt- und stufenlos steuerbare Widerstände einsetzen. Die Ansteuerung erfolgt entweder mit einem Permanentmagneten, oder über einen Elektromagneten, in dessen Luftspalt der Halbleiter liegt.
- Drehzahl- bzw. Drehsinnerfassung mittels Feldplatten-Differential-Fühler
- Winkelschrittgeber bzw. Stellungsgeber mittels Feldplatten-Differential-Fühler
- Berührungslose Geschwindigkeitsmessung von Rotations- und Linearbewegungen mittels Feldplatten-Wirbelstromtachometer

1.3.3 Induktive Näherungssensoren

Induktive Näherungssensoren reagieren bei Annäherung eines metallischen Gegenstandes an die Senserspule. Durch das Metall wird ein mit der Senserspule gebildeter Schwingkreis stark gedämpft, d.h. die Schwingspannung wird stark vermindert. Mit einem nachgeschalteten Verstärker und einem elektronischen Schwellwertschalter wird ein binäres Ausgangssignal gebildet. Diese berührungsfreien Grenztaster sind unempfindlich gegen Staub, Schmutz und Erschütterungen und reagieren auf alle metallischen Gegenstände. Die Schalzhäufigkeit liegt bei ca. 3000 Schaltungen pro Sekunde und die Wiederholgenauigkeit bei etwa 1%.

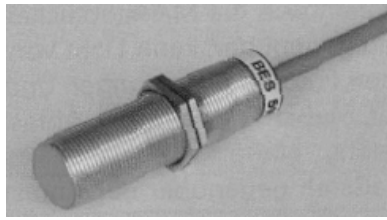


Abb.1.23: Induktiver Näherungssensor

Induktive Näherungssensoren verwendet man z.B. als Endlagenschalter bei Maschinensteuerungen und zum Erfassen, Zählen und Sortieren von Bauteilen oder Werkstücken.

1.3.4 Kapazitive Näherungssensoren

Kapazitive Näherungssensoren haben den gleichen Gehäuseaufbau wie induktive Näherungssensoren. Sie reagieren auf eine Veränderung der Schwingungsfrequenz eines Oszillators durch Veränderung des Dielektrikums in der Umgebung des Sensorkondensators und damit auf eine Kapazitätsänderung.

Mit kapazitiven Näherungssensoren erfasst man Bauteile bzw. Werkstücke aus Glas, Keramik, Kunststoff, Holz, Stein, Öl, Wasser, Papier oder Zement.

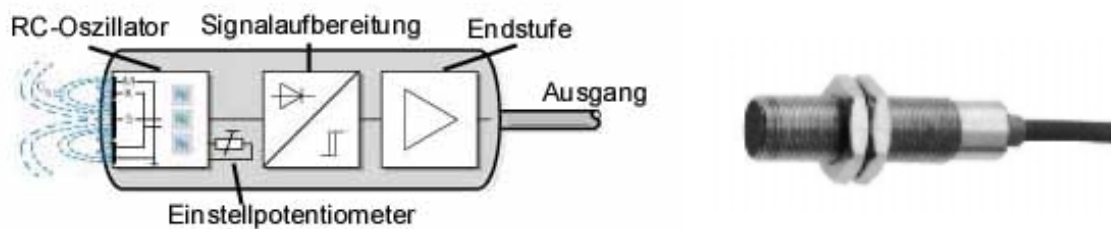


Abb.1.24: Kapazitiver Näherungssensor

1.3.5. Optische Näherungssensoren, IR Sensoren

Optische Näherungssensoren arbeiten als Reflexsensoren mit gepulster Infrarotstrahlung. Über eine Infrarot-Sendediode wird gepulste Infrarotstrahlung (zur Vermeidung von Fremdlichtstörungen) abgestrahlt, bei Annäherung eines Gegenstandes reflektiert und über einen Fototransistor ausgewertet. Sendediode, Empfangstransistor und Schaltelektronik sind meist in einem Gehäuse untergebracht. Beeinflusst wird die optische Abtastung auch durch die Oberfläche und die Farbe des reflektierenden Gegenstandes.

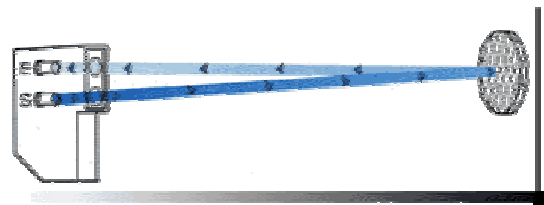
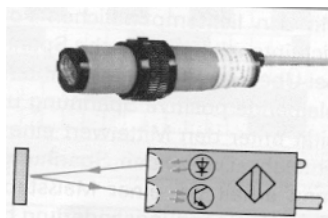


Abb.1.25: Optischer Näherungssensor

1.3.6 Hallensoren

Setzt man einen bandförmigen, stromdurchflossenen Leiter einem transversalen Magnetfeld aus, so werden die bewegten Elektronen durch die Lorentzkraft zur Seite abgelenkt. Durch die Ansammlung der Elektronen an einem Rand des Leiters entsteht ein elektrisches Feld quer zum Leiter, dessen Kraft auf die Elektronen im Gleichgewichtsfall die Lorentzkraft gerade aufhebt.

Die elektrische Feldstärke quer zum Leiter entspricht einer Spannung zwischen den Rändern, der Hallspannung U_H . Diese Hallspannung tritt in jedem Leiter auf, der einem transversalem Magnetfeld ausgesetzt ist. Der Wert ist jedoch wegen der geringen Abmessungen der Leiter und vor allem der geringen Geschwindigkeit der im Leiter bewegten Elektronen so klein, dass sie im Normalfall nicht messbar ist.

Die technische Anwendung des Halleffektes wurde erst, durch die Entwicklung von Halbleitermaterialien mit einer hohen Elektronenbeweglichkeit, ermöglicht. Solche sogenannten III-V Halbleiter sind z.B.: InSb

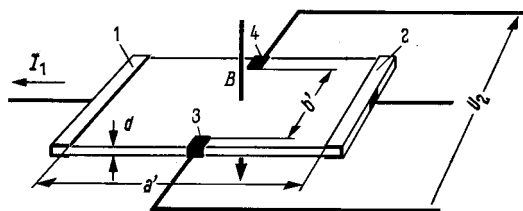
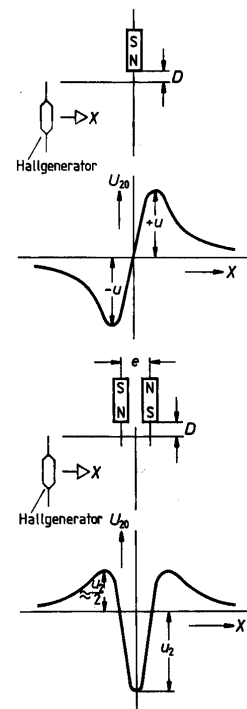


Abb.1.26: Aufbau eines Hallgenerators

Ein langgestrecktes Plättchen aus geeignetem Halbleitermaterial mit der Dicke d wird in der Längsrichtung von einem Strom I_1 (Steuerstrom) durchflossen und senkrecht zur Fläche von einer magnetischen Induktion B (Steuerfeld) durchsetzt. Bei gleichzeitiger Einwirkung dieser beiden Steuergrößen entsteht ein zwischen den Punkten 3 und 4 eine Potenzialdifferenz (Leerlaufhallspannung) der Größe:

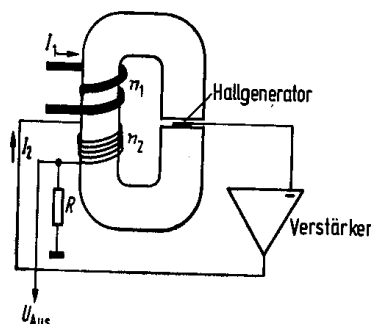
$$U_H = \frac{R_H}{d} * I_1 * B$$

R_H ist eine Materialkonstante (Hallkonstante)



Anwendungen:

➤ Feldregelung: Die Regelung und Konstanthaltung von Magnetfeldern kann so erfolgen, dass die Ausgangsspannung eines im Feld angeordneten Hallgenerators zur Regelung des Spulenstromes verwendet wird.



- Potentialfreie Strommessung: Die Verwendung von Hallgeneratoren in einem Weicheisenjoch gestattet die Messung von Gleichströmen bei völliger Potentialtrennung zwischen Stromkreis und Messkreis.
- Strommessung an Leitern durch Bestimmung Magnetfeldstärke an der Oberfläche
- Signalhallgeneratoren werden in Steuerungen aller Art als kontaktlose Signalgeber eingesetzt.
- Detektion von des Vorbeibewegens von verschiedenen Magnetanordnungen

Abb.1.27: Hallgenerator zur Strommessung

1.3.7 Ultraschallsensoren

Ultraschall-Wegsensoren messen durch aussenden von Ultraschallimpulsen die Zeit, die vergeht, bis der Ultraschallimpuls von dem zu erfassenden Gegenstand reflektiert wird und als Echo zurück kommt. Sender und Empfänger sind entweder Lautsprecher mit kleinen Metallmembranen oder Piezokristalle. Die verwendeten Ultraschallfrequenzen liegen im Bereich von 50kHz bis 200kHz. Die Messgenauigkeit beträgt bei Distanzen bis 100mm etwa 0,5mm und bei Distanzen bis 1m etwa 5mm. Da die Schalllaufzeit von Luftdruck, Lufttemperatur und der Luftfeuchte abhängen, können keine Präzisionsmessungen durchgeführt werden. Ultraschall-Wegsensoren werden zur automatischen Entfernungseinstellung bei Fotoapparaten und zur Distanzkontrolle bei automatisch gesteuerten Flurfahrzeugen verwendet. Weiters können sie zur Erfassung von Füllstandhöhen in Kesseln und Silos eingesetzt werden. Ultraschallsensoren für Strömungsgeschwindigkeiten bestehen aus einem Sender und einem Empfänger. Zwischen beiden addiert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls mit der Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Mediums. Dadurch ergeben sich je nach Strömungsgeschwindigkeit für die Schallimpulse unterschiedliche Laufzeiten. Diese Laufzeiten werden erfasst.

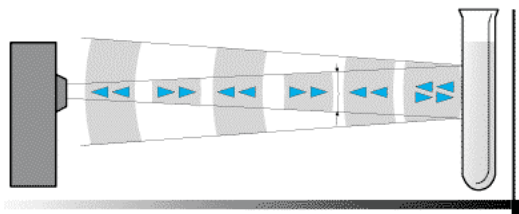


Abb.1.28: Ultraschall Näherungssensor

1.3.8 Digitale Sensoren

Digitale Sensoren werden zum zahlenmäßigen Erfassen von Messgrößen wie Wegstrecken, Zeitspannen oder Energien eingesetzt. Häufig werden aber auch analoge Sensorsignale digitalisiert, mit Hilfe von Computern aufbereitet und für steuerungs- und regelungstechnischen Abläufen eingesetzt.

Inkrementale Weggeber sind Strichmaßstäbe, bei denen das Abtasten der Striche berührungslos durch Licht oder magnetisch erfolgt.

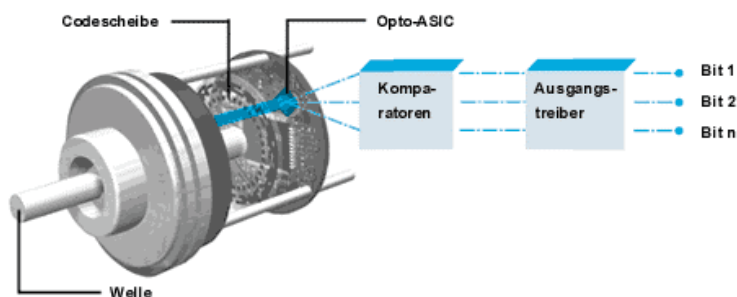


Abb.1.29: Inkrementaler Drehgeber



Abb.1.30: Winkelcodierer: inkremental (links) und absolut (rechts)

1.4 Zusammenfassung der Messprinzipien mit Schwerpunkt Gebäudetechnik und Gebäudeautomation

1.4.1 Temperaturmessung

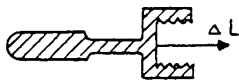
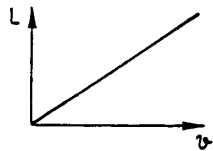
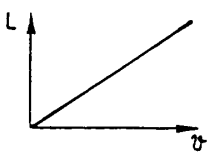
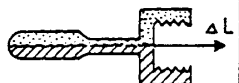
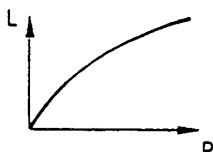
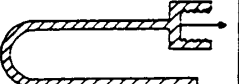
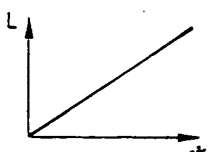
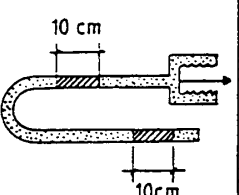
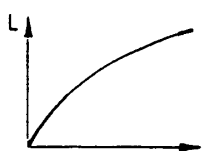
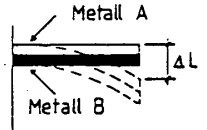
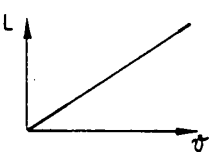
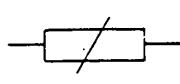
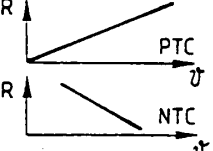
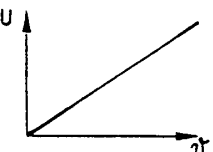
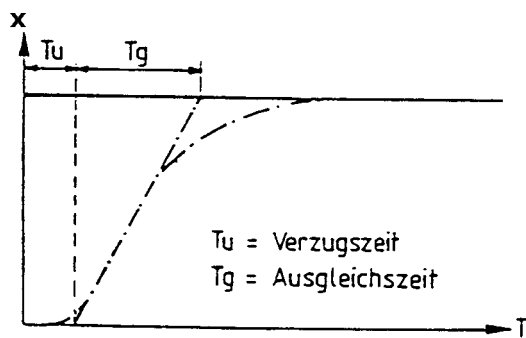
	Material	Konstruktion	Funktion	System
Ausdehnungsthermometer	Flüssigkeit z.B. Quecksilber, Alkohol			Kraft - Weg
	Gas z.B. Helium			Kraft - Weg
	Dampf für kleine Messbereiche			Kraft - Weg (unproportional wegen latenter Wärme bei der Aggregats- zustandsänderung)
	Flüssigkeit "Durchschnittbildend" Das Kapillarrohr ist auf der ganzen Länge aktiv			Kraft - Weg
	Dampfdruck / Kondensation Bereits 10cm der gesamten Kapillar- rohrlänge genügen für den gesamten Messbereich (Funktion analog Frostschutzthermostat)			Kraft - Weg
Widerstands- thermometer	Bimetall z.B. Stahl - Messing Invar - Messing			Längendifferenz - Weg
	Platin Nickel			el. Widerstand R in Ohm Ω
	Cu - Konstantan Fe - Konstantan Cr Ni - Konstantan Pt Rh - Pt Ni Cr - Ni			Spannung U in (V)

Abb.1.31: Messprinzipien zur Temperaturbestimmung

**Anhaltswerte für die Kenngröße eines Fühlers:**

Thermoelement:	$t_u = 1\text{ s bis } 5\text{ s}$
	$t_g = 5\text{ bis } 25\text{ s}$
Widerstandsthermometer:	$t_u = 2\text{ s bis } 5\text{ s}$
	$t_g = 40\text{ bis } 100\text{ s}$

Abb.1.32: Übergangsfunktion eines Temperaturfühlers

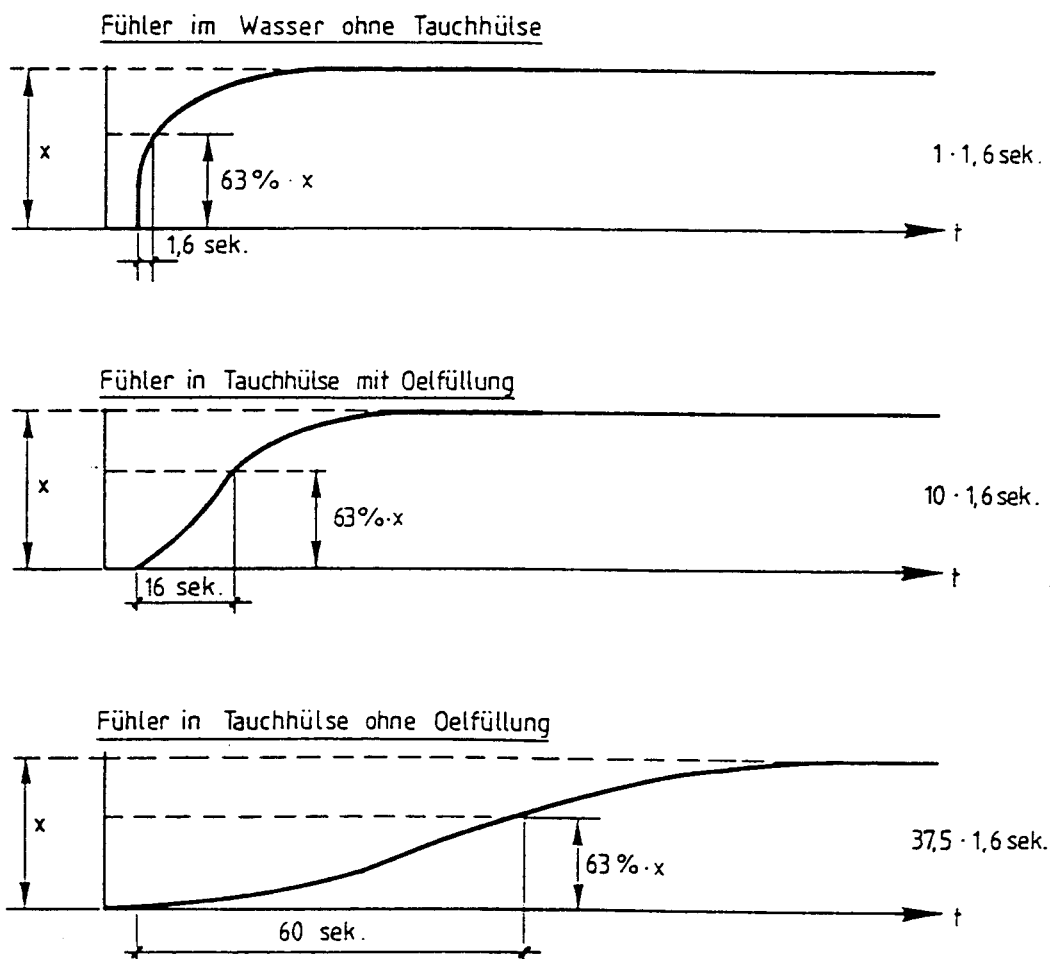


Abb.1.33: Verschiedene Zeitkonstanten bei Messfühlern in Flüssigkeiten

Bei Messung und Erfassen von Flüssigkeitstemperaturen in Rohrleitungen werden häufig Fühler mit Tauchhülsen eingebaut. Die Tauchhülsen bilden das erste Verzögerungsglied, der Luftspalt zwischen Tauchhülse und Messelement das zweite und die Zeitkonstante des Fühlers bildet das dritte Verzögerungsglied. Von diesen drei in Serie legenden Verzögerungsgliedern ist jene des Luftspaltes am größten, da die Luft ein schlechter Wärmeleiter ist. Dieses schlechte Übertragungsverhalten lässt sich mit Öl oder Glycerin stark verbessern.

MESSGRÖSSE: Temperatur (°C) (K)						
Sensor	konventionelles Thermometer	Thermoelement	Widerstandsthermometer	Halbleiterthermometer	Quarzthermometer	Pyrometer
physik. Prinzip	Ausdehnung von Gas, Flüssigkeit Festkörper	Thermospannung	Widerstandsänderung	Sperrschichtspannung	Frequenzänderung	Temperaturstrahlung
Messbereich	-200 °C bis +1000 °C	-200 °C bis +1800 °C	-200 °C bis +800 °C	-20 °C bis +150 °C	-100 °C bis +200 °C	-80 °C bis einige +1000 °C
Genauigkeit	0.1 °C bis 1 °C	0.5 °C	Pt,Ni 0.1 °C NTC 0.5 °C	0.2 °C	0.1 °C	1° bis 10 °C
Lokalanzeige	Analog	Ziffern	Ziffern	Ziffern	Ziffern	Ziffern
Messumformer	---	Spannungsverstärker	elektr. Messbrücke, Spannungsverstärker	Spannungsverstärker	Frequenzumsetzer	Umsetzelektronik
Bemerkung	---	Linearisierung, Referenzpunkt nötig	Linearisierung	schwach nicht linear	nicht linear	eher Labor
Zuverlässigkeit	gut bis mittel	gut bis mittel	gut bis mittel	gut bis mittel	gut bis mittel	---

Abb.1.34: Vergleich verschiedener Temperatursensoren und ihrer Eigenschaften

Häufig werden zur genauen Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern sogenannte Messbrücken (Wheatstone-Brücken) eingesetzt. Die Brücke wird auf den Widerstandswert des Messfühlers am Messbereichsanfang abgeglichen, damit ist der Ausschlag am Messinstrument Null. Durch die Widerstandsänderung des Fühlers bei Temperaturänderung wird die Brücke verstimmt und eine der Temperaturerhöhung proportionale Brückenspannung kann gemessen werden.

Bei der Zweileiterschaltung (Abb1.35 b) wird der fließende Strom im Messpfad durch den Messwiderstand bestimmt und damit der Ausschlag des Messinstrumentes. Aber auch Temperaturschwankungen entlang der Fernleitungen führen zu Widerstandsänderungen und somit zu Messfehlern. Sie sind daher nur für kurze Entfernungen, ohne starke Temperaturschwankung entlang der Fernleitung sinnvoll.

Bei der Dreileiterschaltung (Abb1.35 a) wirken die Temperaturschwankungen auf alle drei Leitungen und bewirken eine gleichmäßige Widerstandsänderungen in allen Brückenpfaden und rufen somit keine Änderung der Ausgangsspannung hervor. Es tritt somit eine Kompensation des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die Fernleitung auf.

In Verbindung mit modernen elektronischen Messgeräten kommt auch die Vierleiterschaltung zum Einsatz. Sie ermöglicht hochgenaue Messungen ohne Leitungsabgleich und ohne Umgebungseinflüsse entlang der Fernleitung. Hier erfolgt die Speisung des Messfühlers durch eine im Messgerät enthaltene Konstantstromquelle. Der durch den Fühler fließende Strom wird dadurch auch bei Widerstandsänderungen durch unterschiedliche Leitungslängen bzw. durch Umgebungseinflüsse entlang der Fernleitung immer konstant gehalten. Über ein

zweites Leitungspaar wird der über dem Fühler auftretende Spannungsabfall leistungslos gemessen.

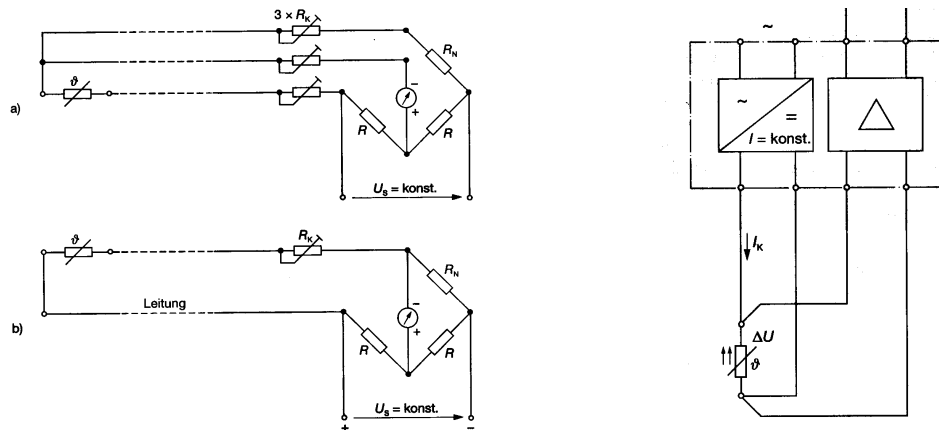


Abb.1.35: Vergleich verschiedener Temperatursensoren und ihrer Eigenschaften

1.4.2 Luftfeuchtemessung

MESSGRÖSSE: Luftfeuchte					
Sensor	Taupunkt-hygrometer	LiCl-Taupunkt Hygrometer	Schleuder-Psychrometer	Haarhygrometer-	Bistreifen-hygrometer
physik. Prinzip	Sättigungsverfahren (absolute Feuchte)	Sättigungsverfahren (absolute Feuchte)	Verdunstungsverfahren (absolute Feuchte)	Hygroskopische Materialeigenschaften (relative Feuchte)	Hygroskopische Materialeigenschaften (relative Feuchte)
Messbereich	Taupunkt bis -20 °C	Taupunkt bis -10 °C	Trockentemperatur -10 °C bis +60 °C	40% bis 90% relat. Feuchte -10 °C bis +50 °C Trockentemperatur	wie Haarhygrometer
Genauigkeit	0,5 °C Taupunkt	0,5 °C – 1 °C Taupunkt	0,3 °C Taupunkt 2% relat. Feuchte	5% relat. Feuchte	5% – 8% relat. Feuchte
Lokalanzeige	Ziffern	Ziffern	Analog	Analog	Analog
Messumformer	im System enthalten	im System enthalten	Umrechnung aus Ableseung nötig	möglich Wegänderung elektr. Signal	---
Bemerkung	Dauereinsatz bei autom. Spiegelreinigung	Wartung periodisch nötig	Wartung nötig. Für punktuellen Einsatz gut	Periodische Regenerierung nötig	primitivstes Gerät
Zuverlässigkeit	gut	gut bis mittel	gut	fragwürdig	fragwürdig

Abb.1.36: Übersicht über verschiedene Luftfeuchte-Messmethoden

Die Bestimmung der feuchte bezieht sich bei der Lüftungs- und Klimatechnik hauptsächlich auf die Erfassung des Gehaltes von Wasserdampf in der Luft. Bei der Feuchtemessung wird je nach gewähltem Verfahren entweder die absolute oder die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt.

Unter absoluter Luftfeuchtigkeit x versteht man den in dem aktuellen Luftzustand tatsächlich enthaltenen Anteil an Wasserdampf. Die Angabe der enthaltenen Wasserdampfmenge bezieht sich dabei auf eine entsprechende Menge des trockenen Mediums. So erfolgt die Angabe in Gramm Wasserdampf pro kg trockener Luft.

Die Luft ist in der Lage bei einer bestimmten Temperatur eine Höchstmenge an Wasserdampf aufzunehmen. Dieser Betrag nimmt mit steigender Temperatur stark zu. Die Luft ist damit gesättigt, d.h., dass der Partialdruck des Wasserdampfes dem Dampfdruck des trockenen gesättigten Wasserdampf bei der zugehörigen Temperatur entspricht. Setzt man die absolute Feuchte ins Verhältnis zu dieser Höchstmenge, so erhält man die relative Feuchte ϕ in Prozent.

Wird der Sättigungsdruck durch Abkühlen der Luft überschritten, so scheidet sich überschüssiger Wasserdampf als Nebel aus, der sich in der Regel an kühleren Gegenständen als Tau niederschlägt. Die Temperatur, bei der dieser Vorgang eintritt, wird auch als Taupunkttemperatur bezeichnet.

1.4.3 Druckmessung

Der Druck ist der Quotient aus der gleichmässig auf eine Fläche wirkenden Kraft und der belasteten Fläche:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}, \quad p = \frac{F}{A} \quad \text{in Pa} = \text{Nm}^{-2}$$

Normaldruck im internationalen Einheitssystem (SI): $1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 750\text{Torr}$

Anwendungen im Bereich der Heizungs- Lüftungs- und Klimatechnik finden Druckmesssensoren zur Bestimmung des Aussendruckes, der Raumdrücke, sowie der Systemdrücke in Kälteanlagen und Expansionsanlagen und der Drücke in pneumatischen Anlagen.

Sensor	Flüssigkeitsmanometer	Federmanometer	piezoelektrischer Druckmesser
physik. Prinzip	Verschiebung einer Flüssigkeitssäule	elastische Verformung durch Druck über Wegmessung	Druckbeanspruchung führt zu elektrostatischen Ladungen (Quarzkristalle) Barium-Titanat
Messbereich	gerätespezifisch	gerätespezifisch	gerätespezifisch
Genauigkeit	abhängig von der techn. Ausführung (bis 0.01 mm) Weg möglich	bis 0.1% v.M. möglich	gerätespezifisch
Lokalanzeige	Analog	Analog	Ziffern
Messumformer	---	Widerstandsänderung, Kapazitätsänderung, Induktive Wegaufnehmer + Messumformer	Ladungsverstärker
Bemerkung	---	Verschiedene Materialien für verschiedene Medien	gut für dynamische Messungen
Zuverlässigkeit	gut bis mittel	gut bis mittel	gut

Abb.1.37: Übersicht über verschiedene Messmethoden zur Druckbestimmung

1.4.4 Geschwindigkeitsmessung

Zur Messung der Luftgeschwindigkeit in Lüftungs- und Klimaanlage kommen Flügelanemometer, Hitzdrahtanemometer, Lambrechtsonden und Staurohre zur Anwendung. Lambrechtsonden und Staurohre führen die Geschwindigkeitsbestimmung auf eine Druckmessung zurück.

Messinstrument	Thermisches Anemometer	Flügelrad-Anemometer	Strömungs-sonde, z.B. Lambrecht	Staurohr z.B. Prandtl
Anwendungs- gebiet	Für kleine Luftgeschwindigkeiten. Vorwiegend für Raumströmungen	Für momentane Luftgeschwindigkeiten. Je nach Gerät auch gemittelte Luftgeschwindigkeit über eine bestimmte Messdauer bestimmbar. Besonders geeignet für Messungen über Filter-Wärmetauscher und Luftwäscherquerschnitten, und in Kanälen	Für Geschwindigkeitsmessungen bei Austrittsöffnungen, Kanälen, Gitter, Lochblechen usw.	Für vorwiegend Kanalmessungen
Bereich	0,1 – 0,5 m/s 0,1 – 5,0 m/s	Mit diversen Messbereichen von 0,2 m/s bis 20 m/s, Ausbau bis 80 m/s.	Mit diversen Messbereichen 0 – 50 m/s	Mit U-Rohr bzw. Mikromanometer (Neigung > 1:20) ab 4 m/s, darunter grosse Ungenauigkeit
Genauigkeit	$\pm 2 - 10\%$ vom Skalenendwert	+ 2,5% vom Skalenendwert	+ 2% vom Skalenendwert	Sehr gute Genauigkeit. Im Bereich grösser 4 m/s. Keine Nacheichungen
Einschränkung	Bei einigen Typen ist die Genauigkeit im unteren Skalenbereich schlecht	Kann leicht demontiert werden. Reparaturanfällig. Periodische Kalibrierung notwendig. Grosser und kleiner Messteil verfügbar. Lagerverschleiss.	Probleme bei korrosiver Luft, periodische Kalibrierung nötig (alle 2 Jahre)	Benötigt werden zusätzlich Druckmessgeräte (U-Rohr, Schrägrohr etc.)
Nachteile	Temperaturabhängig, Richtungsabhängig ($\pm 10^\circ\text{C}$ zulässig)	Richtungsabhängig ($\pm 10^\circ\text{C}$ zulässig)	Richtungsabhängig ($\pm 10^\circ\text{C}$ zulässig)	Richtungsabhängig ($\pm 10^\circ\text{C}$ zulässig). Nicht direkt in m/s ablesbar. Umrechnung erforderlich.

Abb.1.38: Messinstrumente und Messmethoden zur von Luftgeschwindigkeiten

1.4.4 Verschiedene Messfühler - Übersicht

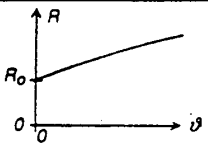
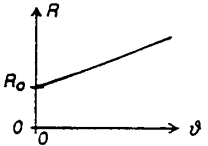
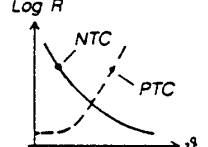
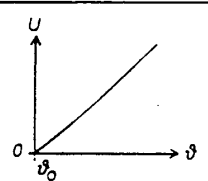
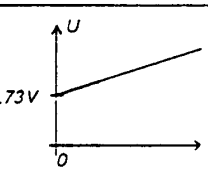
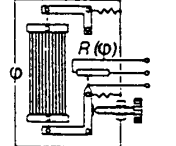
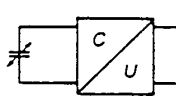
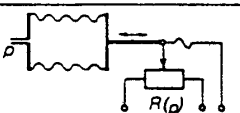
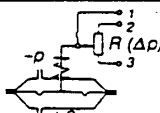
Messgrösse	Messfühler	Messbereich		
Temperatur	Platinfühler • Pt-100 • Pt-1000	-220...750 °C		- Widerstand bei 0 °C (R_0) 100 Ω bei Pt-100 bzw. 1000 Ω bei Pt-1000. - Kennlinie kann für kleinere Messbereiche als linear angenommen werden.
	Nickelfühler • Ni-100 • Ni-1000	-60...180 °C		- Widerstand bei 0 °C (R_0) 100 Ω bei Ni-100 bzw. 1000 Ω bei Ni-1000. - Kennlinie kann für kleinere Messbereiche als linear angenommen werden.
	Thermistoren • Heissleiter NTC • Kaltleiter PTC	-20...250 °C		- Stark nichtlineare aber stetige Kennlinie mit negativer Steigung beim NTC. - Stark nichtlineare und unstetige Kennlinie mit positiver Steigung beim PTC.
	Thermoelemente • Eisen-Konstantan Fe-Ko	-200...700 °C		$U = 0V$ bei der Temperatur der Vergleichsstelle (ϑ_0). - Kennlinie kann für kleinere Messbereiche als linear angenommen werden; die Empfindlichkeit beträgt im Mittel 54 $\mu V/K$.
	Integrierte Sensoren mit Ausgang 10 mV/K	-55...125 °C		- Ausgangsspannung bei 0 °C beträgt 273 K · 10 mV/K = 2.73 V - Lineare Kennlinie im ganzen Messbereich
Absolute Feuchte	Lithiumchlorid-Fühler	-10...60 °C Taupunkttemp.		- An U_H wird eine Heizspannung (z.B. 24 V) angelegt. - Gemessen wird die Taupunkttemperatur mittels Messwiderstand als Mass für die absolute Feuchte.
Relative Feuchte	Mechanischer Feuchtefühler mit Potentiometerausgang	30...90% r.F. bei -10...50 °C		Der mechanische Feuchtefühler überträgt den Messwert auf ein Potentiometer, welches einen entsprechenden Widerstandswert liefert (z.B. 1000...2000 Ω).
	Feuchtefühler mit kapazitiver Messzelle	0...100% r.F. bei -40...115 °C		- Die Messzelle ist ein Kondensator mit hygroskopischem Dielektrikum. - Der Messwandler liefert ein der relativen Feuchte proportionales Normsignal.
Druck	Mechanischer Druckfühler mit Potentiometerausgang	0...1 bar bis 0...20 bar je nach Bauart		Der mechanische Druckfühler überträgt den Messwert auf ein Potentiometer, welches einen entsprechenden Widerstandswert liefert.
Druck-differenz	Membran-Druckdifferenzfühler mit Potentiometerausgang	0...25 mbar bis 0...160 mbar je nach Bauart		Die Membran des Druckdifferenzfühlers ist mit einem Potentiometer verbunden, welches einen entsprechenden Widerstandswert liefert.

Abb.1.39: Zusammenstellung verschiedener Messfühler und ihrer Eigenschaften

4. Projektierung von Steuerungen

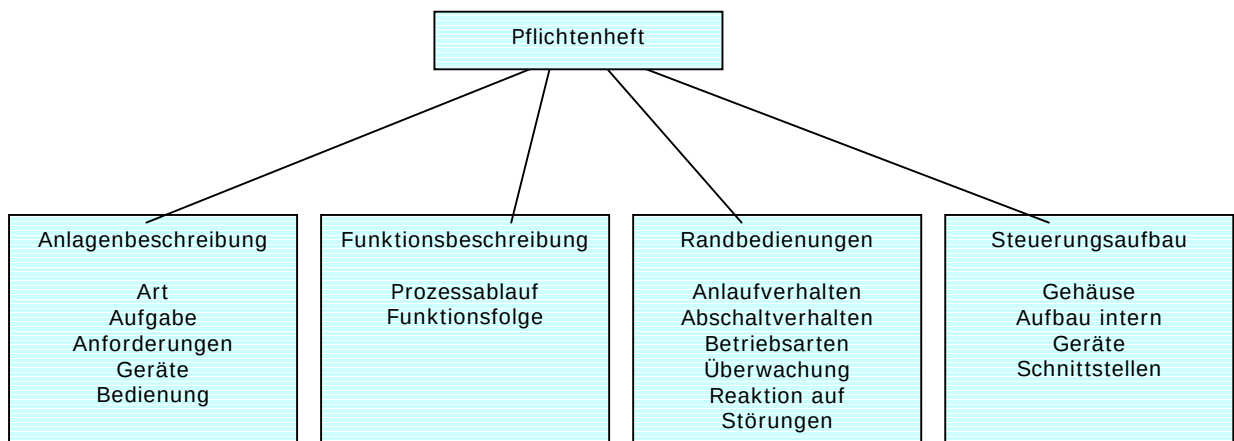
4.1. Beschreibung der Steuerungsaufgabe

Am Beginn des Entwurfes einer Steuerung steht die Frage: „Wie soll die Steuerung funktionieren?“ bzw. „Was ist steuerungstechnisch umzusetzen und wie sieht die Aufgabenstellung an die Steuerung aus?“.

Die Steuerungsaufgabe soll in Form eines Pflichtenheftes zweifelsfrei beschrieben werden. Darin sind alle Bedingungen, die bei der Planung, der Konstruktion und dem einwandfreien Betrieb einer Steuerung zu beachten sind, aufzuführen. Auf der Basis des Pflichtenheftes soll der Steuerungstechniker in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten die Aufgabenstellung realisieren.

Im Pflichtenheft wird die Anlage aus der Sicht des Steuerungstechnikers beschrieben. Ihm liegt die Problembeschreibung des Anlagenbauers in Form eines Forderungskataloges, einer Leistungsbeschreibung oder eines Lastenheftes zugrunde. Das Pflichtenheft setzt sich aus einer Reihe von Einzelkomponenten zusammen. Es ist eine Sammlung verschiedener Beschreibungen in Form von Texten, Zeichnungen und Tabellen.

Folgende Bestandteile sollten berücksichtigt werden:

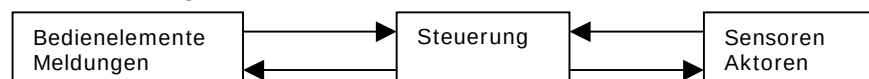


Anlagenbeschreibung

Bildhafte Darstellung: Als Basis für die Anlagenbeschreibung ist ein Technologieschema zu erstellen, also eine schematische Darstellung des Gerätes, der Maschine oder des Prozesses. Das Schema dient als Vorstellungsgrundlage für klärende Gespräche und zur Fixierung von Ergebnissen. Darin lassen sich Aktoren und Sensoren eintragen, eventuell auch Wegdiagramme. Als nächstes sollten die Bedien- und Meldeeinrichtungen skizziert werden, anhand derer sich ein Grossteil der Anlagenfunktion klären lässt.

Verbale Kurzbeschreibung: Die Kurzbeschreibung muß den Namen der Anlage und eine Aufgabenstellung beinhalten. Außerdem sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Prozessablauf: Was muss bewegt werden (Anfangspunkte, Endpunkte, Reihenfolge) ? Welche Zeitkriterien sind einzuhalten? Welche physikalischen oder chemischen Bedienungen sind zu berücksichtigen?
- Aus dem Prozessablauf ergeben sich die Ein- und Ausgangssignale der Steuerung.



➤ Sie lassen sich anhand folgender Fragen ermitteln:

Aktoren: Wie werden die Geräteteile bewegt? (Motoren, Ventile, Pumpen, Magnete, ...)

Sensoren: Welche Rückmeldungen werden benötigt? (Endschalter, Initiatoren, Lichtschranken, Weggeber, Temperaturfühler, Wärmefühler, Helligkeitsmesser, ...)

Bedienelemente: Welche Bedienelemente sind notwendig? (Wahlschalter, Taster, Schlüsselschalter, Not-Aus, Meldeleuchten, Regelvorgaben, ...)

Meldungen: Was ist anzuzeigen? (Bedienerführung, Prozesszustände, Gefahren-Meldungen, ...)

Ausserdem sind Anforderungen an die Anlage wie Taktzeiten und Stückzahlen festzuhalten, sowie Verbindungen zu anderen Anlagen. Wichtig sind auch Aufstellungsbedingungen wie klimatische Verhältnisse, Staub, Störeinflüsse oder Explosionsschutz.

Technische Angaben: Die technischen Angaben zu Sensoren und Aktoren, sowie Bedienelemente und Meldeeinrichtungen sind in Listen festzuhalten.

Funktionsbeschreibung

Nur bei einfachen Steuerungen reicht eine verbale Beschreibung. Bei komplexeren Anlagen muß sie durch technische Beschreibungsformen ergänzt werden. Diese sollten das Zusammenspiel der einzelnen Arbeitseinheiten und Bauglieder eindeutig wiedergeben.

Funktionsdiagramme: Je nach Art des Prozesses eignet sich als Funktionsdiagramm: Wegdiagramm, zeitabhängiges Zustandsdiagramm, schrittabhängiges Zustandsdiagramm.

Funktionsplan: (DIN 40719 Teil 60) Der Funktionsplan ist eine prozessorientierte Darstellung, die es ermöglicht, viele Einzelfunktionen die nacheinander oder parallel ablaufen, grafisch darzustellen und zu beschreiben. Die Darstellung ist unabhängig von den verwendeten Betriebsmitteln, und eignet sich besonders zur Darstellung von Ablaufsteuerungen.

Beschreibung von Steuerungsdetails: Sollen bestimmte Steuerungsdetails herausgearbeitet und präzisiert werden, bieten sich dazu die in der Digitaltechnik gebräuchlichen Beschreibungsformen, wie Funktions- und Wahrheitstabellen, schaltalgebraische Gleichungen und Impulsdiagramme an.

Randbedingungen

Die in den nationalen und internationalen Vorschriften und Richtlinien genannten Bedingungen sind ein wesentlicher Bestandteil des Pflichtenheftes. Sie beinhalten Aussagen zu:

Betriebsarten: Automatik, Teilautomatik, Einzelschritt, Hand, Einrichten

Ein- und Ausschaltbedingungen: Anfahren, Stillsetzen, Sicherheitsbedingungen, Startbedingungen, Stopbedingungen, Not-Aus

Überwachung: Zeitüberwachung, Endschalterüberwachung, Logiküberwachung

Verhalten im Störfall: Störmeldungen, Sicherheitsabschaltungen

Steuerungsaufbau

Im Pflichtenheft sind Aussagen zu machen wie: Gehäuse mit Abmessungen, interner Aufbau, verwendete Geräte, Schnittstellen.

Die Gesamtfunktion und die erforderlichen Details der zu projektierenden Steuerung sind auf die beschriebene Weise im Pflichtenheft festzulegen. Diese Vorarbeiten sind eine große Hilfe für die anschließende Konstruktion. Je detaillierter und präziser das Pflichtenheft ausgearbeitet wird, desto klarer sind die Vorgaben für den Konstrukteur. Die Funktionsbeschreibung sollte in ständiger Absprache mit den Kunden erfolgen, und Bestandteil der Auftragsbestätigung sein. Das Pflichtenheft dient nach Abschluß des Projektes auch als Beleg für die ordnungsgerechte Umsetzung der Kundenforderungen und als Absicherung gegen nachfolgende Forderungen.

4.2. Steuerungsentwurf

Erst wenn die Funktion der Anlage beschrieben ist, beginnt der Konstrukteur mit dem Entwurf der Lösungsstruktur. Der Steuerungsentwurf muß mit allen Details dokumentiert werden, und zwar in einer Form, die jedem Fachmann verständlich ist. Prinzipiell ist die Beschreibung der steuerungstechnischen Lösung prozessorientiert und damit weitgehend unabhängig von der zur Realisierung eingesetzten Technologie oder von bestimmten Geräten. Aufgrund dieses Kenntnis greift der Konstrukteur zu der Beschreibungsform, die sich am besten zur späteren Realisierung eignet.

Beispiel:

Realisierung mit:	Beschreibungsform
Schützen oder Relais	Stromlaufplan, Wirkschaltplan
Digitalbausteinen	Logikplan, Wahrheitstabellen, bool'sche Algebra
SPS	Stromlaufplan und/oder Logikplan bzw. Funktionsplan für Ablaufsteuerungen, Ein-Ausgabelisten
Microcomputer, Controller	Ablaufdiagramme, Flussdiagramme, Ein-Ausgabelisten

Ganz allgemein sollte die Steuerungsaufgabe zu Beginn strukturiert werden. Das Gesamtproblem ist in möglichst abgeschlossene Funktionseinheiten zu gliedern. Bestimmte Teilaufgaben treten bei allen Steuerungsaufgaben immer wieder auf, für diese können Standardbausteine entworfen werden, die sich immer wieder verwenden lassen.

4.3. Grundlegende Definitionen

Definition Steuern: Steuern ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen (Eingangsgrößen) eine oder mehrere Größen (Ausgangsgrößen) aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsablauf über die einzelnen Übertragungsglieder der Steuerung. (DIN 19226 – Unterscheidung Steuern-Regeln)

Bemerkung: Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man heute unter Steuerungstechnik vorwiegend die Anwendung und Verarbeitung binärer (zweiwertiger) Signale.

Definition Binäres Signal: Ein binäres Signal ist ein Signal das nur 2 Zustände kennt:

Aus – Ein
0 – 1
Low – High
0V – 5V/24V
-5V – 0V