

Angewandte Sensorik

Markus Klemm.net

Wintersemester 2014/2015

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Kurses	2
1.1	Messen	3
1.2	Messmethoden	4
1.3	Signale	6
1.4	Informationsparameter	6
1.5	Regeln	9
2	Begriff Sensor	10
2.1	Statische Eigenschaften von Sensoren	11
2.2	Selektivität, Stabilität	11
2.3	Dynamische Eigenschaften von Sensoren	12
2.4	Frequenzkenngrößen	12
2.5	Temperatursensoren	13
2.5.1	Thermoresistiver Effekt	13
2.5.2	Pt-100	13
2.5.3	Temperatur IC	14
2.5.4	Heißleiter (NTC)	14
2.5.5	Thermoelemente	15
2.5.6	Leitlinien für die Temperaturmessung	15
2.5.7	Bimetallthermometer	16
2.6	Druck als Messgröße	16
2.6.1	Druckschalter	16
2.6.2	DMS	17
2.6.3	Piezoresistive Metall-Membran-Drucksensoren	17
2.6.4	Silizium-Membran-Drucksensoren	18
2.6.5	Piezoelektrische Effekte	18
2.6.6	Piezoelektrische Drucksensoren	19
2.6.7	Schwebekörper Durchflussmesser	19
2.6.8	Differenzdruckverfahren Wirkdruckverfahren	19
2.6.9	Staudruckverfahren	20

2.6.10	Karmannsche Wirbelstraße	20
2.6.11	Magnetisch Induktives Verfahren	21
2.6.12	Ultraschall-Durchflussmessung 1	21
2.6.13	Korrleationsdurchflussmessung 2	22
2.6.14	Hitzdraht-Anemometer 1	22
2.6.15	Hitzdraht-Anemometer 2	22
2.6.16	Aufheiz-Anemometer	23
2.6.17	Coriolis-Durchflussmessung	23
2.6.18	Coriolis-Durchflussmesser 2	23
2.6.19	Binäre Positionssensoren	24
2.6.20	Vor und Nachteile von Grenztastern	25
2.6.21	Reed-Kontakte	25
2.6.22	Wirbelstrom	26
2.6.23	Vor und Nachteile induktiver Sensoren	26
2.7	Kapazität (Streifeldsensoren)	27
2.7.1	Nennschaltabstand	27
2.7.2	Vor- und Nachteile kapazitive Sensoren	27
2.8	Lichtschranken	28
2.8.1	Vor- und Nachteile Einweg-LS	28
2.8.2	Reflexlichtschranke	29
2.8.3	Vor- und Nachteile Reflexlichtschranke	29
2.8.4	Reflex-LT nach Winkellichtverfahren (Nahbereichstaster)	29
2.8.5	Reflex-LT Vor-Nachteile	29
2.8.6	Rot gegen Infrarot	30
2.8.7	Korrekturfaktoren	30

- Eingabegeräte: Alle Geräte, über die einem Computer Informationen zugeführt werden.
 - Umweltsensoren: Führen die Information über die Umwelt unmittelbar dem Computer zu
 - * Temperatur,Druck,Schall, Feldstärke . . .
 - User Interface Devices: Informationseingabe durch Benutzer

1 Ziele des Kurses

Sensorik (Sensortechnik): Teilgebiet der Messtechnik das sich mit der Entwicklung und Einsatz von Sensoren befasst. [Brockhaus]

- wichtigste physikalischen Prinzipien zur Erfassung nichtelektrischer Messgrößen
- Funktionsweise ausgewählter Sensoren
- Vor- und Nachteile jedes Typs

- Anwendungshinweise für den zuverlässigen Sensorbetrieb
- Grundlagen der Messtechnik
- Einführung in die Sensorik
- Temperatursensoren
- Drucksensoren
- Durchflusssensoren
- Binäre Positionssensoren
- Bonus: Tastaturen und Zeigergeräte

Literatur (OPAL) [Hess09] S. Hesse, G. Schnell, Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Vieweg-Teubner (2009) [Reif12] K. Reif, Sensoren im Kraftfahrzeug, Springer (2012)

1.1 Messen

Quantitativ das, was sich durch Zahlen ausdrücken lässt

Messtechnik experimentelle Bestimmung quantitativ erfassbarer Information über die Umwelt

Messen Ermitteln eines Wertes durch quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Maßeinheit [nach DIN 1319-1]
Messen = Vergleichen

Messgröße ist ein messbares Merkmal eines Objektes oder Prozesses:

- Eigenschaft
- Vorgang
- Zustand

Maßeinheit eine durch Vereinbarung festgelegte Vergleichsgröße

SI-System m,kg,s,A,K,mol,cd

Messwert der gemessene Wert einer Messgröße: $ZW \cdot \text{Einheit}$

Messung Quelle (Messgröße) \rightarrow Erfassung der Größe \rightarrow Vergleich der Größe mit einer Einheit \rightarrow Anzeige (Messwert)

Normal [DIN 1390] Maßverkörperung, Messgerät, Referenzmaterial oder Messeinrichtung zum Zweck, eine Einheit festzulegen, zu verkörpern, zu bewahren oder zu reproduzieren

Messprinzip eine charakteristische naturwissenschaftliche Erscheinung oder ein gesetzmäßiger Zusammenhang, der einer Messung zugrunde gelegt wird.

Physikalische Grundlage der Messung

über 100 physikalisch-chemisch-biologische Effekte

1.2 Messmethoden

Messmethode „Spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung.“ [DIN 1319-1]

- allgemeine Vorgehensweise bei der Durchführung von Messungen
- nicht an eine physikalische Realisierung gebunden

statisch Bestimmt wird eine zeitlich unveränderliche Messgröße nach einem Messprinzip, das nicht auf einer zeitlichen Änderung anderer Größen beruht

dynamisch Messgröße ist entweder selbst zeitlich veränderlich oder ihr Wert ergibt sich aus zeitlichen Änderungen anderer Größen

direkte Messmethode der Wert der Messgröße wird durch quantitativen Vergleich mit einer physikalischen gleichartigen Einheit ermittelt

indirekte Messmethode der Messwert wird aus den Messdaten einer oder mehrerer anderer (direkt messbaren) Größen ermittelt, die mit der gesuchten Messgröße in einem definierten Zusammenhang steht (stehen)

inkrementale Messmethode der Messwert wird von einem Bezugspunkt aus durch Addition oder Subtraktion von kleinen Wertzuwächsen (Inkrementen) ermittelt

Ausschlagmethode Messgröße wird direkt oder über eine Zwischengröße (indirekt) in eine möglichst proportionale Ausgangsgröße umgewandelt.

Messgröße (M) \Rightarrow Übertragungsfunktion (f) \Rightarrow Ausgangsgröße (A).

$$M = f^{-1}(A)$$

- Pro:
 - schnell

- einfach
- keine Hilfsenergie benötigt
- Contra:
 - Energieentzug aus dem Messobjekt, Rückwirkung!
 - Kennlinie (Übertragungsfunktion) des Messgerätes muss bekannt sein
 - starker Einfluss von Störgrößen

Kompensationsmethode Messgerät nutzt eine bekannte variable Vergleichsgröße, um die Differenz zwischen beiden Größen gegen Null streben zu lassen. Messgröße (M), Normal(S)

$$M = S$$

- Variable Art der Kompensationsgröße
- Reduzierung der Rückwirkung und Störeinflüsse
- Nichtlinearität unkritisch
- keine Kalibrierung notwendig
- leichte Realisierung großer Messbereiche
- hohe Genauigkeit möglich
- Größerer technischer Aufwand
- mehrstufig: in der Regel langsam
- Hilfsenergie notwendig
- Viele bekannte Vergleichsgrößen

kontinuierliche Messmethode die Messgröße wird ohne zeitliche Unterbrechung erfasst und auch angezeigt.

diskontinuierliche Messmethode die Messgröße wird nur zu bestimmten (diskreten) Zeitpunkten erfasst (abgetastet) oder angezeigt

analoge Messmethode die Messgröße wird durch eine eindeutige und stetige Anzeigegröße (Messwert) abgebildet. Kontinuierliche Wertebereich

digitale Messmethode die Messgröße wird in Form einer in festgelegten Schritten quantisierten Anzeigegröße abgebildet.

1.3 Signale

Signal (in der Messtechnik): Wenn man einer speziell ausgewählten zeitlich veränderlichen physikalischen Größe (Signalträger) eine Information zuordnet.

Messsignal Signal mit den Werten der Messgröße

Informationsparameter ein oder mehrere zeitvariable informationstragende Parameter des Signals, die die Werte der Messgröße eindeutig und reproduzierbar abbildet.

$$\underbrace{u(t)}_{\text{Signalträger}} = \underbrace{\tilde{u}} \cdot \cos \left(\underbrace{\omega}_{\text{Informationsparameter}} t + \underbrace{\phi} \right)$$

1.4 Informationsparameter

- Impulshöhe
- Pulsbreite
- Pulsfolge
- Signalträgerwert
- Amplitude
- Frequenz
- Phase

Signaltypen nach Verfügbarkeit

- Determiniertes Signal: Der Signalwert ist zu jedem Zeitpunkt verfügbar
 - Information mit einmaliger Messung gewinnbar
 - Information kann durch Störung unbrauchbar werden
- Stochastisches Signal: regellos, zufällig, schwankender Signalverlauf
 - Störungen machen sich nur stark reduziert bemerkbar, sie werden über die Messzeit integriert
 - Informationen ist erst mit mehrmaligen Messungen zu gewinnen, das erfordert einen großen Zeitbedarf
- Signalgemisch: deterministisches Signal mit einem stochastischen Anteil (Rauschen). Das Rauschen ist unerwünscht und muss unterdrückt oder ausgefiltert werden

Signaltypen nach Wertebereich

- analoges Signal: kontinuierlicher Wertebereich
 - der Informationsparameter bildet adäquat die Messgröße ab
 - kann theoretisch beliebig viele Werte innerhalb seines Wertebereiches annehmen
 - einfach zu stören
- diskretes Signal: diskontinuierlicher Wertebereich aus einer endlichen Anzahl von vordefinierten Werten
 - Störeinflüsse machen sich erst nach Überschreiten von Grenzwerten bemerkbar
 - möglicher Informationsverlust
- binäres Signal: der Wertebereich hat nur zwei Werte

Signaltypen nach zeitlichen Verlauf

- kontinuierliches Signal: IP kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt seinen Wert ändern
 - jederzeit vorhanden: jederzeit ist der zeitliche Verlauf von Messwerten verfolgbar
 - Störungen können jederzeit wirken
 - Informationsmenge ist oft unnötig groß
- diskontinuierliches Signal: IP kann nur zu diskreten Zeitpunkten seinen Wert ändern
 - Störungen zwischen den Zeitpunkten der Parameteränderungen können sich nicht auswirken
 - Informationen stehen nur zu diskreten Zeitpunkten zur Verfügung (Informationsverlust)

Signaltypen Kombinationen

- Analogsignal
- Diskret-Kontinuierlich: ΔA ... Amplituden-Quantisierungsintervall
- Analog-Diskontinuierlich: Δt ... Zeit-Quantisierungsintervall
- Digitalsignal

Normsignale

- Strom analog
 - 0 ... 20 mA (dead zero)
 - 4 ... 20 mA (live zero)
- Spannung analog
 - 0 ... 10 V (dead zero)
 - 2 ... 10 V (live zero)

Messeinrichtung Gesamtheit aller zusammenhängenden Funktionseinheiten (Glieder), die zum Zweck der Messung, Messdatenverarbeitung, Anzeige von einer oder mehreren Messgrößen benutzt werden.

- Messgeräte
- Hilfsgeräte
- Maßverkörperungen
- chemische Reagenzien

Messanlage dauerhaft installierte Messeinrichtung

Messkette Prozess(Messgröße - [Aufnehmer(Sensor)]) - Messsignal - [Messumformer] - Normsignal - [Messgerät/Anzeige] - Ausgabe

- offene Wirkungskette: Messkette

Steuern ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen (Führungsgrößen) andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.

- Stellglied: beeinflusst unmittelbar die Steuergröße
- Steuerglied + Steller :erzeugt aus der Führungsgröße die Stellgröße
- Führungsglied: als starrer Befehlsgeber

Steuerkette [Führungsglied] - Führungsgröße - [Steuerglied] - Stellsignal (Normsignal) - [Steller] - Stellgröße - [Stellglied (Aktor)] - Steuerstrecke - Prozess (Steuergröße)

- offene Steuerkette
- keine Rückmeldung
- dynamische Eigenschaften des Prozesses müssen genau bekannt sein

1.5 Regeln

Regeln ein Vorgang bei dem fortlaufend eine Größe (die zu regelnde Größe, die Regelgröße), erfasst, mit einer anderen Größe (er Führungsgröße) verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

1. Messen: die Regelgröße wird direkt gemessen oder aus anderen Messgrößen berechnet
2. Vergleichen: die Regelgröße wird mit der Führungsgröße verglichen und die Regelabweichung berechnet
3. Regelglied + Steller: erzeugt die Steuergröße aus der Regelabweichung

Regelkreis geschlossener Regelkreis: Führungsgröße

Steuerung

- offene Wirkungskette
- Prozesseigenschaften (stat. + dyn.) müssen genau bekannt sein
- kann auf Störungen nicht reagieren
- kein Soll-Ist-Vergleich
- keine Messung notwendig
- Prozessstabilität wird nicht beeinflusst

Sinnvoll wenn

- die Auswirkungen von Störgrößen vernachlässigbar klein sind
- nur eine Störgröße auftritt, die nach Art und Verlauf bekannt ist
- Störgrößenänderungen selten sind

Regelung

- geschlossener Regelkreis
- Prozesseigenschaften müsse nicht genau bekannt sein (Robustheit gegenüber Parameteränderungen)
- kann Störungen ausregeln (Störkompensation)
- Soll-Ist-Vergleich
- Messung ist notwendig

- Der geschlossene Regelkreis kann instabil werden

Sinnvoll wenn:

- veränderliche, unbekannte, nach Art und Größe verschiedene, nicht messbare Störgrößen auftreten können

2 Begriff Sensor

Sensor das primäre Element in einer Messkette = Aufnehmer, Messwertaufnehmer, Messwertgeber, Transducer, Signalgeber, Fühler, Geber, Detektor, Zelle, Wandler, Initiator

Messgröße - (intelligenter Sensor(integrierter Sensor (Sensorelement([Aufnehmer]) - Messsignal - [Signalaufbereitung]) - Normsignal - [Signalverarbeitung und Auswertung])

- Ausgabe /Steuersignal

Einteilung von Sensoren

	In dt. Literatur	In engl. Literatur
Selbstgenerierende Sensoren	Aktiv	Passiv
Modulierende Sensoren	Passiv	Aktiv

Alternativ:

- passive: Aufnehmen vorhandener Signale (z.B. Kamera Mikrofron)
- aktive: Stimulieren der Umwelt und Aufnehmen der Antwort (z.B. Ultraschallsensor, Laserscanner, Radar)

Weitere Einteilung

- Einzelne Messgrößen
- Grad der Erfassung
 - erfassende Sensoren (Binärsensoren)
 - messende Sensoren (analog oder digital)
- Kontaktierende und Kontaktlose
- Absolute und relative
- Interne, Externe
- Einsatzgebiet
- Sensormaterialien
- Betriebseigenschaften
- Sondermerkmale

2.1 Statische Eigenschaften von Sensoren

(statische) Transferfunktion (Empfindlichkeitslinie, Kennlinie): Beziehung zwischen Eingangssignal x und Ausgangssignal y , keine Funktion der Zeit

$$y = f(x)$$

Ideale Kennlinie möglichst

- monoton
- eindeutig
- linear

Dezibel $G[db] = 20 \log \frac{s_2}{s_1}$

Auflösung $\Delta x_{min} \Rightarrow$ fassbares Δy

Sensitivität (Empfindlichkeit) $S = \frac{dy(x)}{dx} = f'(x)$

Linearität (Nichtlinearität) $\varepsilon_{max} = \frac{\Delta y_{max}}{FSO} \cdot 100\%$ (FSO = Full Scale Output)

Ansprechschwelle x_{min} (Beidseitig: Totband)

Sättigung $y = y_{max}$

Reproduzierbarkeit $\delta_R = \frac{\Delta x_{max}}{FSI}$

Hysterese $\delta_H = \frac{\Delta y(x)}{FSO}$

2.2 Selektivität, Stabilität

Querempfindlichkeit (Selektivität) Empfindlichkeit des Messwertes auf andere Größen. (Empfindlichkeitsänderung oder Nullpunktdrift)

- Rauschen
- Landzeitstabilität
- Lebensdauer
- Exemplarstreuung

2.3 Dynamische Eigenschaften von Sensoren

- zeitlich veränderlichen Messgrößen
- adäquat und verzögerungsfrei

Problem:

- Energiespeicher (Massen, Kapazitäten, dissipative Energieverluste ...)

Ansprechverhalten Antwort eines Sensors auf ein zeitlich veränderliches Eingangssignal

Ordnung des Sensors Anzahl vorhandener Energiespeicher (Ordnung der Differentialgleichung)

- 0. Ordnung: keine Zeitabhängigkeit $I(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$
- n. Ordnung

2.4 Frequenzkenngrößen

Frequenzkenngrößen Antwort auf ein sinusförmiges Eingangssignal: $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$
stationärer (eingeschw.) Zustand: $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \hat{y}_{st} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$

Nicht alle spektralen Komponenten (Freq.) können amplituden und phasentreu übertragen werden.

stationärer Amplitudengang (magnitude ratio) $M = \frac{\hat{y}_{st}(\omega)}{\hat{y}_{st}(\omega \rightarrow 0)}$

stationärer Phasengang: φ

Sensoren 0. Ordnung: amplituden und phasentreu ($M = 1, \varphi = 0$)

Frequenzgrößen von Sensoren 1. Ordnung

- Grenzfrequenz ω_0 : $M = 0,707, \varphi = 45^\circ$
 $\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$: $M \approx 1, \varphi \approx 0$
 $\frac{\omega}{\omega_0} \gg 1$: $M \approx 0, \varphi \approx 90^\circ$

Frequenz-KG von Sensoren 2. Ordnung

- quasistatische Anregung $\omega \ll \omega_0, M \approx 1, \varphi \approx 0$
- Resonanz (bis $\delta = 0,71\omega_0$)
 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \varphi = -90^\circ, M \rightarrow M_{max}$
- hohe Anregerfrequenz $\omega \gg \omega_0$
 $\varphi \rightarrow -180^\circ, M \rightarrow 0$

2.5 Temperatursensoren

- Gasthermometer 73-543 K
- Flüssigkeitst. 203-360 K
- Farbstofft. 303-1873 K
- Pt100 53-1123 K
- Keramik NTC,PTC 193-523 K
- Thermoelemente 53-2773 K
- Si-Halbleiter 208 - 573K
- IR-Sensoren 223 - 3472 K
- Kontaktthermometrie
- Pyrometrie
- Thermoresistive Sensoren
- Thermoelemente
- Halbleiterfühler verschiedener Art (Sperr oder Schwellspannung)

2.5.1 Thermoresistiver Effekt

$$TK_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

Temperaturkoeffizient des Widerstands

Kaltleiter $TK > 0$ (PTC), Heißleiter $TK < 0$ (NTC)

2.5.2 Pt-100

Spezifikation	DIN EN 60571
Temperaturbereich (Dauerbetrieb)	$TK = 3850 \text{ ppmK}^{-1}$
Langzeitstabilität	Max R_ρ Drift 0,04% nach 1000h bei 50° C
Erschütterungsfestigkeit	Max 40g Beschl. bei 10 bis 2000 Hz
Umgebungsvariablen	Ungeschützt nur im Trockenem
Isolationswiderstand	$> 10M\Omega$ bei 20° C, $> 1M\Omega$ bei 500° C
Selbsterwärmung	$0,2 \frac{K}{mW}$ bei 0° C
Ansprechzeit	Bewegtes Wasser $v = 0,4m/s^{-1}$, $t_{0,5} = 0,3s$, $t_{0,9} = 0,8s$ Luftstrom $v = 0,5m/s^{-1}$
Messstrom	$100\Omega, 0,1 - 0,3mA$
Vorteile:	

- für Präzisionsmessungen geeignet ($\pm 0,3\%$)

- sehr gute Langzeitstabilität
- gute Linearität (bis 150° C)
- Pt-Sensoren $-270 - +850^{\circ}C$
- mechn. sehr stabil Dünnschichtsensoren
- Ni-Sensoren: kostengünstige Dickschichtsensoren

Nachteile:

- kostenaufwendig
- wegen Gehäuse meist langsam
- Spannungsversorgung notwendig
- Ni-Sensoren $-60 - +180^{\circ}C$
- keine punktförmige Messung
- Selbsterwärmung

2.5.3 Temperatur IC

Diodengleichung $I = I_0 \cdot [\exp(\frac{eU}{k_bT}) - 1]$

2.5.4 Heißeiter (NTC)

- Thermistoren
- + breites Spektrum an R
- großer TK
- - $-50^{\circ}C \dots + 100^{\circ}C (\pm 5^{\circ}C)$
- Temperaturfühler
- Zeitverzögerungsglied
- Spannungsstabilisierung

2.5.5 Thermoelemente

- Messstelle ... T_2 , Metallenden ... T_1 .
- Seebeck-Effekt $U_{th} = \underbrace{\alpha_{th}}_{\text{Thermokraft}} \cdot \Delta T$
- linearisierte Thermospannung $\mu V K^{-1}$ [6, 3; 53]
- Kabelthermoelemente (sehr schnell, aber ungeschützt, Meterware konfektionierbar)
- Mantelthermoelemente
- Isolierte Messstelle (TI) (galv. Trennung, lange Zeitkonstante)
- mit Mantel verbundene Messstelle (TM) (kürzere Zeitkonstante, galv. Verbindung)
- großer Temperaturbereich
- kleine Gesamtabmessungen
- große Flexibilität
- einfacher, robuster Aufbau
- unempfindlichsten gegen Hitze, Druck, Vibrationen
- kleine Elemente haben kleinste Ansprechzeiten
- erlauben kleinste, punktförmige Messstellen
- reduzierte Genauigkeit
- sehr kleine Thermospannungen
- Temperatur der Anschlussstelle muss bekannt sein

2.5.6 Leitlinien für die Temperaturmessung

- Messort
- Gehäuseeinfluss
- Ansprechzeit
- Eigenerwärmung
- Absolute Genauigkeit
- Für hohe Ansprüche an die Auflösung und Genauigkeit: Pt-Fühler

- Für kleinste Messstellen und schnelles Ansprechen: Thermoelemente

Messprobleme wenn

- Dickes Gehäuse
- Große Entfernung zw. Objekt und Messstelle
- Objekte geringer Masse (mit massiven Fühlern)
- T-Messung bei Luftströmungen

2.5.7 Bimetallthermometer

$$f = \frac{L^2}{s} \cdot \delta \cdot \Delta T$$

(L ... Länge, s ... Dicke, f ... Abstand zur Ruhelage)

2.6 Druck als Messgröße

Prinzipien der Druckmessung

- Verformung unter Druck: magnetoelastische und Membransensoren
- Druckabhängigkeit physk. Eigenschaften, piezoelekt. Kristallsensoren
Störeinflüsse
 - mechanische Spannungen
 - Temperatureffekte
- piezoelekt. Aufnehmer 0 ... 100 MPa
- kapazitive Aufnehmer 1 ... 100 kPa

2.6.1 Druckschalter

Druckbereich mbar ... kbar, relativ große Hysterese

Kapazitiver Drucksensor

- sehr empfindlich
- geringer Energieverbrauch
- geringe T-Abhängigkeit
- einfach, robust
- unempfind. gegen Überdruck

- bes. für niedrige P
- gasartunabh.
- Genauigkeit 0,2 Ker .. 0,02 (Me) vom MEsswert
- lineare Kennlinie
- Kapazitätsänderung: Bruchteile von pF
- Streukapazitäten
- relativ komplexe Elektronik

2.6.2 DMS

$$R = \rho \frac{l}{A} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

2.6.3 Piezoresistive Metall-Membran-Drucksensoren

- höchste Genauigkeit 0,2...0,3%, sehr kleine Hysterese < 0,05%FSO
- hervorragende Temperaturstabilität
- eine hervorragende Überdrucksicherheit
- sehr hohe Medienverträglichkeiten
- extrem robuste Gehäuseausführungen möglich
- direkter Kontakt mit dem Druckmedium
- gute Langzeitstabilität, Korrosionsbeständigkeit
- für Drücke < 5bar nicht geeignet
- für $T > 140^{\circ}C$ nicht geeignet
- aufwendige Fertigung
- sehr teuer (hoher Fertigungsaufwand)
- geringe el. Durchschlagsfestigkeit
- anfällig für el.magn. Störeinkopplung
- Miniaturisierung eingeschränkt
- Präzisions-Druckmessungen besonders im Hochdruckbereich

2.6.4 Silizium-Membran-Drucksensoren

- Ideal für niedrige Druckbereiche
- gutes Preis-Leistungsverhältnis
- vergleichsweise kleine Abmessungen
- Integration mit der Signalverarbeitungselektronik
- hoher K-Faktor
- keine Krieeffekte
- keine Isolierschicht
- hohe Ausgangssignale
- hohe Eigenfrequenz
- hohe T-Abhängigkeit
- großer Aufwand für Linearisierung und T-Kompensation
- empfindlich gegen äußerere Einflüsse
- geringere Genauigkeit gegen äußeren Einflüsse
- geringere Genauigkeit als Metall-DMS
- Einsatz nur bis max $125^{\circ}C$
- Hysterese 0,15% FSO
- keine hohen Genauigkeitsansprüche
- insbesondere im Niederdruckbereich
- Haushalt (keine T-Schwankungen)

2.6.5 Piezoelektrische Effekte

$$Q = \underbrace{d}_{\text{piezoelekt. Koeff}} \cdot F$$

2.6.6 Piezoelektrische Drucksensoren

- nahezu weglose Kraftaufnehmer (nur wenige μm)
- hoher Wirkungsgrad
- einfacher mechn. Aufbau
- sehr großer Messbereich (0 ... 100 MPa)
- hohe Linearität des piezoelektr. Effektes
- Auflösung $< 10^{-7}$ FSI, Genauigkeit 1 %
- großer dynam. Messbereich $f > 100kHz$
- kleine Bauweise
- Betriebstemp-Bereich $-196 \dots + 240^\circ C$
- Kriechströme
- statische Messungen nur begrenzt möglich

2.6.7 Schwebekörper Durchflussmesser

Die Steighöhe des Schwebekörpers ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Genauigkeit 2% $F_g = mg$ $F_A = pV$ $F_S \sim \frac{q_v}{h}$

2.6.8 Differenzdruckverfahren Wirkdruckverfahren

$q_v \sim \sqrt{p_1 - p_2}$ Für reine Flüssigkeiten und Gase Messgenauigkeit $< 1\%$ v.E

- am meisten angewandtes Verfahren
- International genormt, keine Kalibrierung erforderlich
- einfach, robust, wartungsarm
- Geeignet für extreme Bed.
- empfindlich für Verschmutzung des Messmediums (Erosion)
- Nicht-linear
- Nur in voll gefüllten Rohren $D > 50$ mm anwendbar
- Hoher Druckverlust (Blende 35 – 90%, Düse 6 – 25% des Wirkdruckes)
- Fehler durch Verschleiß der Blenden
- große Ein- und Auslaufstrecken erforderlich

2.6.9 Staudruckverfahren

$$p_{ges} = p_{stat} + \Delta p, v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}, q_v = A \cdot v$$

- überwiegend in Gases
- Messgenauigkeit $(\pm 3) \pm 1\%$ v.S.
- Punktförmige Messung
- geringe Druckverluste
- keine mechn. Teile
- quadrat. Zusammenhang $v^2 \sim \Delta p$
- Durchfluss ergibt sich durch Abtasten der Geschwindigkeitsverteilung über Querschnitt und anschließende Integration

2.6.10 Karmannsche Wirbelstraße

Wirbelablösefrequenz $f \sim \frac{v}{d}$

- Medien: Gase, Dämpfe oder niedrigviskose Flüssigkeiten
- Messgenauigkeit $\approx 1\%$ v.M.
- Fehlerquellen: Schwingungen des Messrohres und Pulsationen des Mediums
- hohe Genauigkeit
- hohe Langzeitstabilität
- robust wartungsarm
- Unempfindlich gegen Verschmutzung
- linearer Zusammenhang $v \sim f$
- beliebige Einbaulage
- großer Dynamikbereich
- für kleine Durchflussgeschw. nicht geeignet
- relativ hohe verbleibende Druckverluste
- große Ein- und Auslaufstrecken und ggf. Strömungsgleichrichter nötig

2.6.11 Magnetisch Induktives Verfahren

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$U = B \cdot d \cdot v$$

- Medien: insbesondere wässrige Lösungen
- Messgenauigkeit: $\pm 0,2 - 1\%$ v.S.
- unabhängig von Dichte, T, p, Viskosität des Mediums
- unabhängig von Art der Strömung (laminar, turbulent) und vom Strömungsprofil
- berührungslos
- linearer Zusammenhang zwischen Volumendurchfluss und Spannung
- keine mechn. Teile
- keine Rohreinbauten notwendig
- geeignet für korrosive, aggressive und verschmutzte Medien
- kurze Ein- und Auslaufstrecken
- Eignung für kleinste bis mittlere Mengen
- Nur für leitende Flüssigkeiten $> 1 \mu S cm^{-1}$ für Gase nicht geeignet
- Ablagerungen im Messrohr führen durch die Querschnittsverkleinerungen zu Messfehlern
- es dürfen sich keine elektrisch leitenden Ablagerungen bilden
- Mit der Nennweite überproportional steigende Herstellkosten
- relativ kleine Messsignale (im mV Bereich und niedriger)
- Die Elektroden sollten aus korrosionsfesten Material bestehen

2.6.12 Ultraschall-Durchflussmessung 1

$$v \approx \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2L \cdot \cos \varphi} \text{ Außerdem Reflexionsverfahren und Doppler-Verfahren } (\Delta f = 2f_0 \cdot \cos \varphi \frac{v}{c})$$

1. Messgenauigkeit $\pm 0,5 - 3\%$ (Doppler schlechter)
2. Medien: reine Flüssigkeiten und Gase (für Doppler: Streuzentren notwendig)
3. Vorteile
 - a) keine Einbauten in der Rohrleitung (keine Querschnittsverengung)
 - b) Messungen über mehrere Meter Distanz möglich

4. linearer Messeffekt
5. Einsatz auch bei nichtleitenden und verschmutzten Fluiden (Doppler)
6. Clamp-On Verfahren möglich
7. Nachteile
 - a) gut ausgebildete Strömungsprofile notwendig
 - b) die Flüssigkeit muss frei von größeren Störkörpern sein
 - c) die Laufzeitdifferenz ist Stoff- und Temperaturabhängig
 - d) Schall schluckende und reflektierende Ablagerungen sind zu vermeiden
 - e) relativ großer messtechnischer Aufwand
 - f) Beschränkung der Nennweitenpalette nach unten

2.6.13 Korrelationsdurchflussmessung 2

1. Fluideigenschaften : Mehrphasenströmungen, reine Fluide
2. Messgenauigkeit: Abhängig von der Aufgabenstellung

2.6.14 Hitzdraht-Anemometer 1

1. Kalorimetrie Messung von Wärmemengen
2. Hitzdraht-Anemometrie
3. Aufheiz-Anemometrie
4. Hitzdraht-Anemometrie Messung des geschwindigkeitsabh. Wärmeabgabe eines beheizten Sensors an ein vorbeifließenden, kälteres Fluid

$$q_m = \frac{m}{t} = A \left[\frac{RI_0^2}{a(T_s - T_n)} - \frac{b}{a} \right]^2$$

5. konstanter Heizstrom CC (langsam) $I = const$, $R = R(v)$
6. konstante Hitzdrahttemperatur CT (schneller): $R = const$ $I = I(v)$

2.6.15 Hitzdraht-Anemometer 2

1. Fluideigenschaften: hauptsächlich Gase
2. Messgenauigkeit: $(\pm 2) \pm 1\%$ v.S.
3. Vorteile
 - a) empfindlich, bes. geeignet für kleine und mittlere Strömungsgeschw.

- b) geringe Abmessung des Heizdrahtes, kleine Einstellzeit
- c) rel. geringe Heizleistung erforderlich
- d) wenige Druckverluste an der Messstelle
- e) direkte elektr. Anzeige des Messwertes
- f) sowohl im lam. und turb. Strömungen (Kalibrierung notwendig)

4. Nachteile

- a) abnehmende Empfindlichkeit mit wachsender Geschwindigkeit
- b) Messung bei kleinen Durchflüssen wegen Eigenkonvektion nicht möglich
- c) Eichung jedes einzelnen Drahtes notwendig
- d) Alterung infolge von temperaturbedingten Strukturänderungen
- e) abhängig vom Medium und Strömungsart

2.6.16 Aufheiz-Anemometer

Messung der Erwärmung des messenden Fluids durch Wärmestromzufuhr aus einer Heizwicklung

$$q_m = f(\Delta T)$$

1. hohe Heizleistungen erforderlich
2. linearer Messeffekt
3. unabhängig von Dichte des Mediums
4. abhängig von spez. Wärme
5. Genauigkeit $\leq 1\%v.E.$
6. Einstellzeit von Null bis $\pm 2\%$ v.S.

2.6.17 Coriolis-Durchflussmessung

$$\vec{F}_C = 2m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega})$$

$$q_m \sim \varphi$$

2.6.18 Coriolis-Durchflussmesser 2

1. Fluideigenschaften Flüssigkeiten und Gase bei höheren Drücken (≥ 5 bar)
2. Breite und ähnlich hochviskose Fluide, homogene Mehrphasengemische
3. pneumatisch förderbare Schüttgüter

4. Messgenauigkeit: $\pm 0,2 - 0,3\%$ v.S. für Flüssigkeiten und Gase, $\pm 1\%$ v.S. für pneumatisch förderbare Schüttgüter
5. Vorteile
 - a) Eine direkte Bestimmung des Massenstroms
 - b) fast unabhängig von Druck, T, Dichte, Viskosität des Mediums
 - c) Resonanzfrequenz \sim Dichte des Mediums
 - d) Können auch bei Kleinstmengen, bei Kurzzeitdosierung, pulsierender Strömung, hohen und niedrigen Temperaturen, bei nicht vollständig befüllten Rohren und hohen Drücken eingesetzt werden
6. Nachteile
 - a) hohe Druckverluste
 - b) Schwingungsentkopplung der Messanlage erforderlich
 - c) empfindlich für Druckschwankungen
 - d) verklebende Schüttgüter können das Messergebnis verfälschen
 - e) unsicher bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten von Gases

2.6.19 Binäre Positionssensoren

Binäre Sensoren: nur zwei Ausgangssignale, (Schaltzustände) Ein/Aus

Taktile Sensoren (Taster): mit mechanischen Kontakt mit dem zu detektierenden Objekt

Näherungsschalter (Initiatoren)

Grenztaster nicht berührungslos, Rest schon

Näherungsschalter (gegen Taster)

- berührungslos
- rückwirkungsfrei
- verschleißfrei
- erzeugen prellfreie Ausgangssignale
- z.T. über große Entfernungen
- Lebensdauer größer als bei Taster
- Hilfsenergie notwendig
- Fehlschaltungen durch Fremdfelder und Verschmutzung
- z.T. wesentlich teurer als Taster

2.6.20 Vor und Nachteile von Grenztastern

- Preisgünstig
- Robust und sicher
- klein in den Abmessungen
- keine Hilfsenergie notwendig
- Verwendbarkeit bis 600 V
- unbeeinflussbar durch Fremdfelder
- sehr hohe Genauigkeit und Wiederholungsgenauigkeit des Schaltpunktes (typisch $\pm 10\mu m$) auch bei low-cost Typen
- für kleinste und größte Schaltleistungen erhältlich
- Absolut zuverlässige (hundertprozentige) galvanische Trennung
- eine mechan. Berührung ist notwendig (Schaltkraft, Eingriff in Prozess)
- spez. mech. Vorrichtungen notwendig
- Kontakte prellen
- hohe Anfälligkeit gegen Verschmutzung und Verschleiß
- nur niedrige Schaltfrequenzen realisierbar
- Schaltpunktdrift
- Übergangswiderstände an den Kontakten

2.6.21 Reed-Kontakte

- berührungslos schaltend
- höhere Schaltfrequenz als bei mechn. Schaltern
- vermindertes Kontaktprellen gegenüber mechn. Schaltern
- hohe Schutzart durch geschlossenen Glaskörper
- hohe Einschaltströme möglich
- niedriger Preis
- magnetische Feldstärke höher als bei magnetischen Sensoren
- Verschleiß der Kontakte

- Schaltpunktdrift durch Materialermüdung
- geringe Wiederholgenauigkeit des Schaltpunktes
- Übergangswiderstände an den Kontakten
- Anzahl der Schaltspiele ist begrenzt
- mehr als ein Schaltpunkt

2.6.22 Wirbelstrom

Faradaysches Induktionsgesetz

$$U_{ind} = -\frac{d\vec{\Phi}}{dt}$$

Messprinzip: Sensor erzeugt magnetisches Streufeld, kommt elektrisch leitender Stoff ins Streufeld, werden Wirbelströme induziert. Dadurch Wirbelstromverluste ähnlich Transformator, Triggerung.

2.6.23 Vor und Nachteile induktiver Sensoren

- weite Verbreitung in der Automatisierungs und Verfahrenstechnik
- berührungslos und rückwirkungsfrei
- wegen geschl Bauform resistent gegen Umwelteinflüsse
- hohe Zuverlässigkeit
- keinen Einfluss nichtmetallischer Verschmutzung
- kein Kontaktprellen und Verschleiß
- hohe Schaltfrequenz (bis 5 kHz)
- keine Rückwirkungen auf die Werkstoffoberfläche
- dem Abstand propoprtionales Analogsignal möglich
- preisgünstiger als optische Sensoren
- sehr hohe Messgenauigkeit möglich $< 0,01mm$
- es lassen sich nur leitende Materialien detektieren
- nur kurzreichweitig Faustformel Objektdisanz gleich halber Sensordurchmesser (Spulendurchmesser)
- gegenseitige Beeinflussung (Abstand einhaltne)

2.7 Kapazität (Streifeldsensoren)

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Material	ε_r
Papier	1,2...3
PVC	3
Glas	3...5
Alkohol	6x
Wasser	8x

2.7.1 Nennschaltabstand

- Bauform des Sensors
- äußere Bedingungen
- Form, Abmessung und Materialeigenschaft des zu erfassenden Objekts
- Normmessplatte: Metall $a, b > D$ oder $3S_n$
- Störfaktoren:
- Fremde Objekte
- Oberflächenbeschaffenheit
- Feuchtigkeit, Spritzwasser
- Staub, Verschmutzung
- elektrische Wechselfelder
- Temperatur

2.7.2 Vor- und Nachteile kapazitive Sensoren

- erfasst praktisch alle Materialien
- hohe Zuverlässigkeit, keine beweglichen Teile
- Schaltfrequenzen 5...50 Hz (kleiner als bei indirekten aber größer als bei mechn. Sensoren)
- völlig berührungslos und rückwirkungsfrei
- Kontakt mit Medium nicht erforderlich
- berührungslose Erfassung selbst durch Wände oder PTFE Schutzhüllen
- teurer als induktive Sensoren

- kurzreichweitig (aber größer als bei induktiven)
- Streukapazität ist zu klein : gewisse Sensorfläche notwendig
- nicht so klein die induktive (min. Fläche 1cm^2)
- anfälliger gegen Störungen
- wird von allen Objekten im Streufeld beeinflusst
- Reproduzierbarkeit schlechter als bei induktiven Sensoren
- Gegenseitige Beeinflussung

2.8 Lichtschranken

- Messprinzip: Lichtstrahl wird unterbrochen
- Erfasst wird Lichtmenge auf dem Empfänger
- Einweglichtschranke: 10m ... 100 m
- Reflexions-Lichtschranke bis 4m
- Reflexions-Lichttaster
- Funktionsreserve: $\frac{\text{Lichtintensität auf Empfänger}}{\text{Schaltschwellwert}}$

2.8.1 Vor- und Nachteile Einweg-LS

- große Wegstrecken
- große Funktionsreserve (Sicherheit)
- unkritisch zu spiegelnden Oberflächen
- unkritisch zu Verschmutzung der Linsen
- sicheres Erkennen von undurchsichtigen Gegenständen
- weitgehend unempfindlich gegen Fremdlicht, sofern es nicht direkt in den Empfänger leuchtet
- hoher Preis (zwei Geräte mit Linsensystem und Elektronik)
- teure Installation von zwei getrennten Geräten
- aufwändige Justierung bei größeren Überwachungsstrecken
- unsicheres Erkennen von transparenten Gegenständen

2.8.2 Reflexlichtschranke

- Reflexlichtschranke
 - Doppellinsensystem
 - Autokollimator (Halbdurchlässiger Spiegel)

2.8.3 Vor- und Nachteile Reflexlichtschranke

- nur ein kompaktes Gerät ist für Sender und Empfänger
- einfache Montage
- sicheres Erkennen von undurchsichtigen Gegenständen und spiegelnden Objekten
- Blindbereich
- mittlere Reichweite, da doppelter Strahlenweg
- unsicheres Erkennen von transparenten Gegenständen
- Die Funktionsreserve ist klein
- Verschmutzung ist sehr kritisch
- Witterungseinflüsse wie Schnee, Nebel und Eisbesatz an den Linsen täuschen unter ungünstigen Bedingungen ein Objekt vor

2.8.4 Reflex-LT nach Winkellichtverfahren (Nahbereichstaster)

- keine Störungen durch hochreflektierende Gegenstände im Hintergrund
- Empfänger ist werksseitig fest auf eine bestimmte Tastweite eingestellt
- Die Tastweite beträgt nur 20 bis 30 % des baugleichen Reflexlichttasters
- Die Tastweite ist stark von der Oberflächenstruktur und Farbe abhängig

2.8.5 Reflex-LT Vor-Nachteile

- direktes Abtasten von Gegenständen
- einfache Montage
- Das Erkennen von transparenten Gegenständen ist besser als bei der Einweg oder Reflex-LS
- Bei LT mit Hintergrundausbldung ist eine Abstandsmessung möglich
- geringe Tastweiten im Vergleich zu den Reichweiten der Lichtschranken. Bei gleichen Gehäuse verhalten sich die Tastweiten bei der Einweg-LS, Reflexions-LS und Reflexions-LT wie 20:5:1

- Störungen durch den Hintergrund (Spiegel, Metall, weiß)
- Hintergrundaussblendung mit noch geringeren Tastweiten möglich
- keine präzisen Schaltpunkte. Die Tastweite ist abhängig von den Reflexionseigenschaften des zu erfassenden Objekts und der Verschmutzung der Linsen

2.8.6 Rot gegen Infrarot

Infrarotlicht:

- Sendedioden haben einen höheren Wirkungsgrad und sind billiger
- maximale Empfindlichkeit von Si-Photodioden und Phototransistoren
- IR-Optik ist weniger für kleine Staubteilchen empfindlich
- Geräte sind unempfindlicher gegen Fremdlichtstörungen
- IR-Lichtfleck ist nicht sichtbar, was die Montage und Justage schwieriger macht

Rotlicht:

- Polfilter für Rotlicht sind besser und preiswerter
- Dämpfung in Lichtleitern ist geringer
- Lichtfleck ist sichtbar, die Montage und Justage sind wesentlich einfacher
- Störende Wirkung des Tageslichts
- kleinere Abstrahlleistung als bei Infrarot-LED

2.8.7 Korrekturfaktoren

Umgebung	Umgebungsfaktor C _{fa}
staubfrei	1,5
leicht staubig oder ölig, Linsen periodisch gereinigt	5
ziemlich staubig, ölig Linsen nur spärlich ger.	10

2.9 Lichtleiter: Vor- Nachteile

- unempfindlich gegen Stoßbelastung und Vibrationen
- lassen sich auch bei äußerst beengten Platzverhältnissen einsetzen
- reagieren überhaupt nicht magnetische Störfelder
- Glas LL: unempfindlich für hohe Temperaturen bis 250°C
- stark divergierende Strahlen, geringe Reich- Tastweiten

- Taster: bis 13 cm
 - Einweg: bis 32 cm
 - mit Vorsatzlinsen: bis zu x5 größere Reichweiten
- Kunststoff LL
 - $-25^{\circ}\text{C} \dots 80^{\circ}\text{C}$ anwendbar
 - nicht für IR
 - höhere Dämpfung
 - elektrisch aufladbar