

Vorlesungsmitschrift

ANGEWANDTE SENSORIK

Mitschrift von

Falk-Jonatan Strube

Vorlesung von

Prof. Dr.-Ing. habil. André Gorbunoff

5. Mai 2017

INHALTSVERZEICHNIS

0	Einführung	6
0.1	Eingabegeräte	6
0.2	Ziel des Kurses	6
1	Grundlagen der Messtechnik	7
1.1	Messgröße und Messwert	7
1.1.1	Normal	7
1.1.2	Messen	7
1.1.3	Messprinzipien	7
1.2	Messmethoden	8
1.2.1	Methoden nach Art der Messgröße	8
1.2.2	Methoden nach Art der Vergleichsgröße	8
1.2.3	Methoden nach Art der Vergleichsvorgehensweise	8
1.2.4	Methoden nach Zeitablauf	10
1.2.5	Methoden nach Wertebereich der Ausgangsgröße	10
1.3	Signale	10
1.3.1	Informationsparameter	10
1.3.2	Signaltypen	11
1.3.2.1	Nach Wertebereich	11
1.3.2.2	Nach zeitlichen Verlauf	12
1.3.2.3	Kombinationen	12
1.3.3	Normsignale	12
1.4	Messeinrichtung	13
1.4.1	Messkette	13
1.5	Steuern	13
1.6	Regeln	14
1.7	Steuern oder Regeln?	14
2	Sensorik	16
2.1	Sensor	16
2.2	Einteilung von Sensoren	16
2.3	Statische Eigenschaften von Sensoren	17
2.3.1	Auflösung	18
2.3.2	Sensitivität	18
2.3.3	Linearität	18
2.3.4	Ansprechschwelle	18
2.3.5	Totband	19
2.3.6	Sättigung	19
2.3.7	Wiederholgenauigkeit	19
2.3.7.1	Reproduzierbarkeit	19
2.3.7.2	Hysterese	19
2.3.8	Selektivität	20
2.3.9	Rauschen	20
2.3.10	Weitere	20



2.4	Dynamische Eigenschaften von Sensoren	20
2.4.1	Sprungantwort und Zeitkonstanten	21
2.4.1.1	Dämpfung	22
2.4.2	Frequenzkonstanten	23
2.4.2.1	Frequenzkonstanten von Sensoren 1. Ordnung	23
2.4.2.2	Frequenzkonstanten von Sensoren 2. Ordnung	23
3	Temperatursensoren	25
3.1	Temperaturmessverfahren	25
3.2	Zeitverhalten eines Widerstandssensors	26
3.3	Thermoresistive Sensoren	26
3.3.1	Metallwiderstände	27
3.3.1.1	Pt100	27
3.3.2	Kalteiter (PTC)	28
3.3.2.1	Thermistoren	28
3.3.2.2	schaltende Sensoren	29
3.3.2.3	Si-Temperatursensoren	29
3.3.2.4	Spreading-Resistance-Sensor	29
3.3.2.5	Temperatur IC	29
3.3.3	Heißeiter (NTC)	30
3.3.3.1	Thermoelemente	30
3.3.3.2	Genormte Thermoelemente	31
3.3.3.3	Aufbau von Thermoelementen	31
3.3.3.4	Ansprechzeiten, Vorteile, Nachteile der Thermoelemente	32
3.3.4	Bimetallthermometer	32
3.4	Leitlinien für die Temperaturmessung	32
4	Druckmessung	34
4.1	Druck als Messgröße	34
4.2	Arten der Druckmessung	34
4.3	Prinzipien der Druckmessung	34
4.3.1	Membransensoren	35
4.3.1.1	Druckschalter	35
4.3.1.2	Kapazitiver Drucksensor	35
4.3.1.3	Kapazitive MEMS-Sensoren	36
4.3.1.4	Dehnungsmessstreifen (DMS)	36
4.3.1.5	Piezoresistive Metall-Membran-Drucksensoren	36
4.3.1.6	Silizium-Membran-Drucksensoren	37
4.3.2	Piezoelektrische Effekte	38
4.3.3	Beschleunigungssensoren	39
4.3.3.1	Airbag-Beschleunigungssensor	39
4.3.3.2	Bimorphe Beschleunigungssensoren	39
4.3.3.3	Anwendungen	40
4.3.4	Magnetoelastische Sensoren (Induktivitätssensoren)	40
5	Durchflusssensoren	41
5.1	Prinzipien der Durchflussmessung	41
5.2	Auslaufzähler	41
5.3	Verdrängungszähler	42
5.4	Volumenzähler mit Messflügeln	43
5.5	Schwebekörper-Durchflussmesser	44
5.6	Differenzdruckverfahren (Wirkdruckverfahren)	44



5.7	Staudruckverfahren	45
5.8	Wirbelzähler	46
5.9	Magnetisch: Induktives Verfahren	46
5.10	Ultraschall-Durchflussmessung	47
5.11	Korrelationsdurchflussmessung	48
5.12	Hitzdraht-Anemometer	48
5.12.1	Hitzdraht-Anemometrie	48
5.12.2	Aufheiz-Anemometrie	49
5.13	Coriolis Durchflussmessung	49
6	Binäre Positionssensoren	51
6.1	Grenztaster	51
6.1.1	Präzisionsschalter	52
6.1.2	Kontaktprellen	52
6.1.3	Vor- und Nachteile von Grenztastern	52
6.2	Näherungsschalter	53
6.2.1	Reedkontakte	53
6.2.2	Induktive Näherungsschalter / Wirbelstromsensoren	54
6.2.2.1	Materialfaktor und Schaltfrequenz	54
6.2.2.2	Vorteile und Nachteile	55
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	55
6.2.3	Kapazität	55
6.2.3.1	Nennschaltabstand	56
6.2.3.2	Vor-/Nachteile	56
6.2.3.3	Anwendungsbeispiele	57
6.3	Lichtschranken/-taster	57
6.3.1	Grundlagen	57
6.3.1.1	Elektromagnetische Strahlung	57
6.3.1.2	Reflektion	58
6.3.1.3	Polarisation	58
6.3.2	Arten von Lichtschranken/-taster	58
6.3.2.1	Einweg Lichtschranken	58
6.3.2.2	Reflexlichtschranke	59
6.3.2.3	Reflexlichttaster	59



VORBEMERKUNG

Prüfung: Keine Rechnung, kein Programmieren. Reine Wissensabfrage (Welche Sensoren für diesen Zweck, Vergleich, Vorteil/Nachteil, . . .)
Hilfsmittel: alles Handschriftliche zugelassen.



0 EINFÜHRUNG

Elektronische Geräte (PC usw.) sind blind, brauchen Sensoren.

0.1 EINGABEGERÄTE

Eingabegeräte: alle Geräte, über die einem Computer Informationen zugeführt werden können.

- UMFELDSENSOREN: führen die Informationen über die Umgebung unmittelbar dem Computer zu (ohne menschliches einwirken): Temperatur, Druck, Schall, ... ⇒ Hauptthema der VL
- USER INTERFACE DEVICES: Informationseingabe durch Benutzer: Tastaturen, Touchscreens (kapazitiv, induktiv, ...) usw.

0.2 ZIEL DES KURSES

- SENSORIK (Sensortechnik): Teilgebiet der Messtechnik, das sich mit Entwicklung und Einsatz von Sensoren befasst.
- wichtigste physikalischen Prinzipien zur Erfassung nichtelektrischer Messgrößen
- Funktionsweise ausgewählter Sensoren
- Vor- und Nachteile jedes Typs
- Anwendungshinweise für den zuverlässigen Sensorenbetrieb

Kapitel:

- Grundlagen der Messtechnik
- Einführung in die Sensorik
- Temperatursensoren
- Drucksensoren
- Durchflusssensoren
- Binäre Positionssensoren



1 GRUNDLAGEN DER MESSTECHNIK

1.1 MESSGRÖSSE UND MESSWERT

- MESSGRÖSSE ist ein messbares Merkmal eines Objektes oder Prozess:
 - Eigenschaft
 - Vorgang
 - Zustand⇒ Temperatur, Druck, Durchfluss, Position
- MASSEINHEIT: eine durch Vereinbarung festgelegte Vergleichsgröße
- SI-SYSTEM: m, kg, s, A, K, mol, cd
- MESSWERT: der gemessene Wert einer Messgröße = $ZW \cdot \text{Einheit}$ (also Messgröße kombiniert mit Maßeinheit)
- Messung: (Ablauf)
 - Quelle (Träger eine Messgröße)
 - Erfassung der Größe & Vergleich der Größe mit einer Einheit
 - Anzeige (des Messwerts)

1.1.1 NORMAL

NORMAL (DIN 1390): Maßverkörperung, Messgerät, Referenzmaterial oder Messeinrichtung zum Zweck eine Einheit festzulegen, zu verkörpern, zu bewahren oder zu reproduzieren.

- Internationale (nationale) Normale (Kopie der Ursprungs-Normale: bspw. Kopie Ur-Kilo)
- Bezugnormale (PTB) (für Betriebe usw.)
- Gebrauchs-, Prüfnormale (für die konkrete Messung)
- Lehren
- ...

1.1.2 MESSEN

MESSEN ist der Vorgang, durch den ein Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches eines Bezugswertes (Maßeinheit) ermittelt wird (Messen = Vergleichen).

1.1.3 MESSPRINZIPIEN

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

1.2.1 METHODEN NACH ART DER MESSGRÖSSE

Bsp. Messung der Temperatur (die sich nicht ändert)

- STATISCH: bestimmt wird eine zeitlich unveränderliche Messgröße nach einem Messprinzip, das nicht auf der zeitlichen Änderung anderer Größen beruht (Bsp.: Ablesen der Flüssigkeits-Säule im Thermometer)
- DYNAMISCH: Messgröße ist entweder selbst zeitlich veränderlich oder ihr Wert ergibt sich aus zeitlichen Änderungen anderer Größen (Messung durch Einwirkung anderer Kräfte um die Reaktion heraus zu finden [und so zu messen]. Bsp. Halbwertszeit von Materialien lässt Rückschlüsse auf Temperatur zu)

1.2.2 METHODEN NACH ART DER VERGLEICHSGRÖSSE

- DIREKTE MESSMETHODE: der Wert der Messgröße wird durch quantitative Vergleich mit einer physikalischen gleichartigen Einheit ermittelt (Metermaß).
- 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) (Messung der Temperatur durch Messung der Ausdehnung der Flüssigkeit im Thermometer)
- INKREMENTALE MESSMETHODE: der Messwert wird von einem Bezugspunkt aus durch Addition/Subtraktion von kleinen Wertzuwachsen (Inkrementen) ermittelt (Geld zählen: Münzen (als Inkrement) in Säule stapeln, diese messen und damit den Wert bestimmen; vgl. auch Kugelmaus: gerasterte, inkrementale Messung der Veränderung der Kugelbewegung)

1.2.3 METHODEN NACH ART DER VERGLEICHSVORGEHENSWEISE

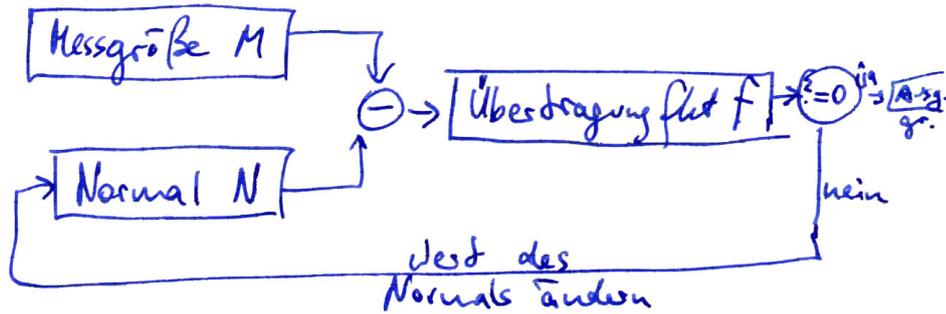
- AUSSCHLAGMETHODE: Messgröße wird direkt oder über eine Zwischengröße in eine möglichst proportionale Ausgangsgröße umgewandelt (vglw. Küchenwaage mit Feder)
Messgröße $M \rightarrow$ Übertragungsfunktion $f \rightarrow$ Ausgangsgröße A

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

- + keine Hilfsenergie benötigt
- + einfacher Aufbau
- + schnell
- Energieentzug aus Messobjekt \rightarrow Rückwirkung
- Kennlinie (Übertragungsfunktion) des Messgerätes muss bekannt sein
- starker Einfluss von Störgrößen



- KOMPENSATIONSMETHODE: Messgerät erzeugt eine bekannte variable Vergleichsgröße, um die Differenz zwischen beiden Größen gegen Null streben zu lassen.



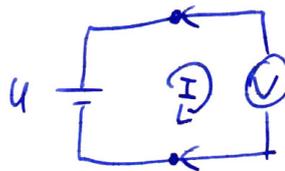
$$M = S$$

(Vergleich: alte Küchenwaage mit Schieberegler/Ausgleichsgewichten)

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

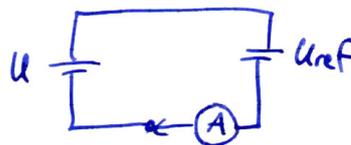
Beispiel Spannungsmessung

- Ausschlagmethode



Problem: braucht unendlich großen Widerstand, sonst verfälscht es die Messung

- Kompensationsmethode



Mit bekannter Spannung U_{ref} .

Strommessgerät: Ist Strom gleich 0? Dann sind beide Spannungen gleich.

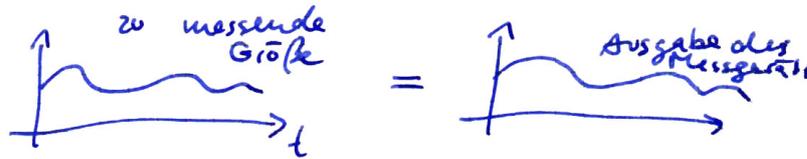
weitere Methoden:

- Differenzierungsmethode
- Substitutionsmethode



1.2.4 METHODEN NACH ZEITABLAUF

- KONTINUIERLICHE MESSMETHODE: die Größe wird ohne zeitliche Unterbrechung erfasst und auch angezeigt. (Vgl. Thermometer mit Flüssigkeit verändert sich stets/kontinuierlich)



- DISKONTINUIERLICHE MESSMETHODE: die Messgröße wird nur zu bestimmten (diskreten) Zeitpunkten erfasst (abgetastet) und/oder angezeigt.



Informationen werden begrenzt (aufs wesentliche), Zeit muss diskretisiert werden (in vernünftigen Maß: Nyquist-Shannon-Abtasttheorem $f_{Abtast} \geq f_{max}$)

1.2.5 METHODEN NACH WERTEBEREICH DER AUSGANGSGRÖSSE

- ANALOGE MESSMETHODE: die Messgröße wird durch eine eindeutige und stetige Anzeigegröße (Messwert) abgebildet.
 - kontinuierlicher Wertebereich
(Spannungsmesser mit Zeiger, Analoge Küchenwaage)
- DIGITALE MESSMETHODE: die Messgröße wird in Form einer in festgelegten Schritten quantisierten Anzeigegröße abgebildet.
 - diskreter Wertebereich
(digital Multimeter)

1.3 SIGNALE

- SIGNAL in der Messtechnik: wenn man einer speziell ausgewählten ZEITLICH VERÄNDERLICHEN physikalischen Größe (Signalträger, Informationsträger) eine Information zuordnet. Hat 3 Elemente: Erzeuger, Träger, Empfänger (Kommunikation: Nachricht wird generiert (im Kopf) und Schall wird erzeugt (Sprechen) → Schall wird übertragen → Schall wird gehört (Ohr) und Schall-Information wird entschlüsselt (im Kopf))
- MESSIGNAL: Signal mit einem (oder mehreren) zeitvariablen informationstragenden Parameter (Informationsparameter), der die Werte der Messgröße in eindeutiger und reproduzierbarer Weise abbildet.
- RAUSCHEN: zufällige zeitlich veränderliche Größe ohne nützliche Information.

1.3.1 INFORMATIONSPARAMETER

Kontinuierlich:

- Signalträgerwert („Wert auf x-Achse“)

- Amplitude
- Frequenz
- Phase

Diskret:

- Impulshöhe
- Pulsbreite (Pulsbreite/-länge als Indikator für Wert)
- Pulsfolge (Digitaltechnik: 001 hat andere Folge als 010)

1.3.2 SIGNALTYPEN

- DETERMINIERTES SIGNAL
Der Signalwert ist zu jedem Zeitpunkt verfügbar
 - + Information mit einmaliger Messung gewinnbar
 - zu viel Information. Sie kann auch durch Störung unbrauchbar werden
- Stochastisches Signal
regellos, zufällig schwankender Signalverlauf
 - + Störungen machen sich nur stark reduziert bemerkbar, sie werden über die Messzeit integriert
 - Information 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

1.3.2.1 NACH WERTEBEREICH

- WERTKONTINUIERLICHES SIGNAL: kontinuierlicher Wertebereich
 - + der Informationsparameter bildet adäquat die Messgröße ab
 - + kann theoretisch beliebig viele Werte innerhalb seines Wertebereichs annehmen
 - einfach zu stören
- WERTDISKRETES SIGNAL: diskontinuierlicher Wertebereich aus einer endlichen Anzahl von vordefinierten Werten
 - + Störeinflüsse machen sich erst nach Überschreiten von Grenzwerten bemerkbar
 - möglicher Informationsverlust (wenn Inkrement falsch gewählt wird)
- BINÄRES SIGNAL: der Wertebereich hat nur zwei Werte



1.3.2.2 NACH ZEITLICHEN VERLAUF

- KONTINUIERLICHES SIGNAL: IP kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt seinen Wert ändern
 - + jederzeit vorhanden: jederzeit ist der zeitliche Verlauf der 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 Parameterveränderungen können sich nicht auswirken
 - Informationen stehen nur zu diskreten Zeitpunkten zur Verfügung (Informationsverlust)

1.3.2.3 KOMBINATIONEN

- Analogsignal
- Digitalsignal (Zeit- und Wert-diskret)
 - + hohe Störsicherheit
 - + einfache Datenspeicherung
 - + flexible Weiterverarbeitung
 - + vielfältige Übertragungsmöglichkeiten
- diskret-kontinuierlich (ΔA : Amplituden-Quantisierungsintervall)
- analog-diskontinuierlich (Δt : Zeit-Quantisierungsintervall)

1.3.3 NORMSIGNALLE

Strom als Informationsträger ist störungssicher → Spannung ist leichter zu manipulieren als Stromstärke!

- STROM ANALOG:
 - 0 ... 20 mA (dead zero)
 - 4 ... 20 mA (live zero)
- SPANNUNG ANALOG:
 - 0 ... 10 mA (dead zero)
 - 2 ... 10 mA (live zero)
- SPANNUNG DIGITAL:
 - Spannungsbereiche an Transistoren für Definition von 1/0-Signalen (TTL, LVTTTL, CMOS)

Unterscheidung dead/live zero um einen Kabelbruch von einem Null-Signal unterscheiden zu können. Bei normaler Temperatur Unterscheidung bspw. 0 mA dead zero und 4 mA live zero.



1.4 MESSEINRICHTUNG

Gesamtheit aller zusammenhängender Funktionseinheiten (Glieder), die zum Zweck der Messung, Messdatenverarbeitung, Anzeige von einer oder mehreren Messgrößen benutzt werden [In Anlehnung an die Norm DIN 1319].

besteht aus:

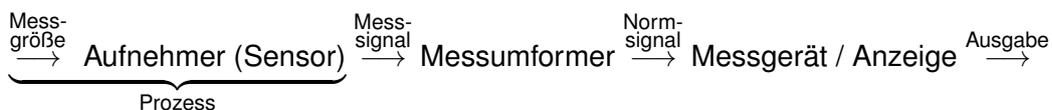
- Messgeräte
- Hilfsgeräte
- Maßverkörperungen
- chemische Reagenzien
- ...

Messanlage: dauerhaft installierte Messeinrichtung

Beispiel: Fieberthermometer

- Eingangsgröße: Temperatur ϑ
- Eingang: Sensor Thermoelement PT100. Temperatur erzeugt Änderung des darin liegenden Widerstands
- Anpassung: Element erzeugt durch Spannungs-/Stromquelle vom Widerstand abhängige Signale
- Verstärkung
- AD-Wandler
- μ Controller (verarbeitet Signale; piepst, wenn Messung fertig)
- Anzeige der Temperatur

1.4.1 MESSKETTE



offene Wirkungskette: Messkette

1.5 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 [DIN 19226].

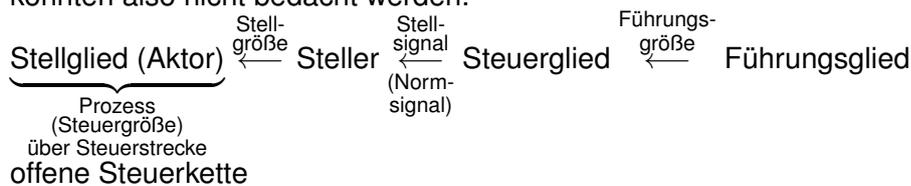
Steuerung ist also ein Plan, wie eine veränderliche Größe beeinflusst werden soll.

Beispiel Steuerung: Wecker klingelt jeden Tag um 7 Uhr. In dem Fall steuert der Wecker die Person.

Stellglied (beeinflusst unmittelbar die Steuergröße) kann verstellt werden (Steuerglied+Steller erzeugen aus der Führungsgröße die STELLGRÖSSE), um STEUERGRÖSSE (output) zu ändern. Der Sollwert (FÜHRUNGSGRÖSSE) für die Steuergröße wird vom FÜHRUNGSGLIED (als starrer



Befehlsgröße) diktiert. Es gibt allerdings keine Rückmeldung der Steuergröße, STÖRGRÖSSEN könnten also nicht bedacht werden.



Nachteile:

- keine Rückmeldung
- dynamische Eigenschaften des Prozesses müssen genau bekannt sein.

1.6 REGELN

Ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe (die zu regelnde Größe, die Regelgröße) erfasst, mit einer anderen Größe (der Führungsgröße) verglichen, und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird [DIN 19226].

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 Stellgröße aus der Regelabweichung
 - mit der Stellgröße wird somit die Regelgröße wieder beeinflusst.
 - eine Störgröße kann durch das Messen der Regelgröße wieder an den Steller zurück geführt werden.

Aus dem Prozess (Regelgröße) führt somit eine offene Messkette als Ausgabe heraus und führt eine offene Steuerkette als Regelabweichung herein. So wird zwischen dem Ein- und Ausgang ein Vergleichsglied gesteckt, die aus der Rückführgröße (Ist-Wert) und der Führungsgröße (Soll-Wert, von Außen bestimmt) diese Regelabweichung berechnet. Im Prozess führt die Regelstrecke vom Eingang zum Ausgang.

So entsteht ein geschlossener REGELKREIS.

1.7 STEUERN ODER REGELN?

Steuerung

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

ist 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 müssen nicht genau bekannt sein (Robustheit gegenüber Parameteränderungen)
- kann Störungen ausregeln (Störkompensation)
- Soll-Ist-Vergleich
- Messung ist notwendig
- Der geschlossene Regelkreis kann instabil werden (bsp.: Mikrofon neben Lautsprecher → Pfeifen)

ist sinnvoll, wenn:

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

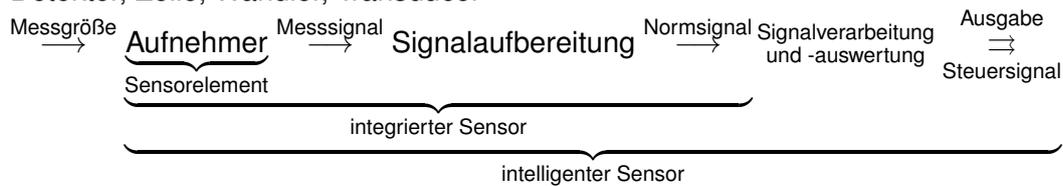


2 SENSORIK

2.1 SENSOR

Der Sensor ist das primäre Element einer Messkette

Sensor = Aufnehmer, Messwertaufnehmer, Messwertgeber, Signalgeber, Fühler, Geber, Initiator, Detektor, Zelle, Wandler, Transducer



2.2 EINTEILUNG VON SENSOREN

(a) Funktionsweise

- selbstgenerierende Sensoren (keine externe Energiequelle)
 - Spannungsausgang
 - Stromausgang
 - Ladungsausgang
- modulierende Sensoren (externe Energiequelle nötig)
 - Widerstand
 - Induktivität
 - Kapazität

(b) Aktive und passive Sensoren

- Selbstgenerierende Sensoren
= aktive Sensoren (in dt. Literatur, in engl.: passive)
- Modulierende Sensoren
= passive Sensoren (in dt. Literatur, in engl.: aktive)

Alternativ:

- passive: Aufnehmen vorhandener Signale
bspw. Kamera, Mikrofon, IR-Sensor
- aktive: Stimulieren der Umwelt und Aufnehmen der Antwort
bspw. Ultraschallsensor, Laserscanner, Radar

(c) Messprinzipien / Energieformen

- elektrisch
- magnetisch
- mechanisch
- thermisch



- Strahlung
 - chemisch/biologisch
- (d) Einzelne Messgrößen
- (e) Grad der Erfassung
- erfassende Sensoren (Binärsensoren)
 - messende Sensoren (Analog- und Digitalsensoren)
- (f) Kontaktierende und kontaktlose Sensoren
- (g) Absolute und relative Sensoren
- (h) Interne, externe Sensoren
 typisch interner Sensor: Schmerz
 typisch externer Sensor: Augen
- (i) Einsatzgebiet
- (j) Sensormaterialien
- (k) Betriebseigenschaften
- (l) Sondermerkmale
- ...

2.3 STATISCHE EIGENSCHAFTEN VON SENSOREN

(keine Funktion der Zeit)

\xrightarrow{x} Sensor \xrightarrow{y}

(statische) Transferfunktion (Empfindlichkeitskennlinie, Kennlinie):
 Beziehung zwischen Eingangssignal x und Ausgangssignal y .

$$y = f(x)$$

Ideale Kennlinie soll möglichst

- monoton
- eindeutig
- linear

sein (bspw. $f(x) = x$).

Reale Transferfunktionen weisen in der Regel nicht alle dieser Eigenschaften auf (ggf. Quantisierung nötig).

Weiterhin ist der Messbereich (FSI: full scale input) und der Ausgabebereich (FSO) in der Regel begrenzt.

Dezibel $G[dB] = 20 \log \frac{s}{s_0}$ (Einheit von FSI und FSO)

für s_0 wird dann die Normgröße für Kraft, Strom oder Spannung eingesetzt (Spannung: $1\mu V$, Leistung: $1mV$, Schallpegel: $1 \cdot 10^{-12} W/m^2$)



2.3.1 AUFLÖSUNG

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

Spruch: „der kleinste Schritt der Eingangsgröße liefert auch noch eine fassbare Ausgangsgröße“

2.3.2 SENSITIVITÄT

(Empfindlichkeit)

$$S(x) = \frac{dy(x)}{dx}$$

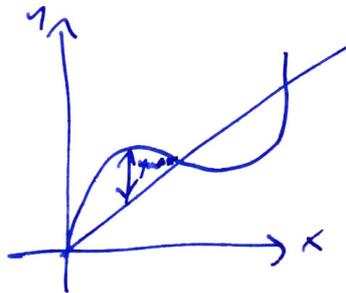
Sensitivität abhängig von Steigung der Funktion:

- hohe Steigung: hohe Sensitivität
- mittlere Steigung: mittlere Sensitivität
- niedrige Steigung: niedrige Sensitivität

2.3.3 LINEARITÄT

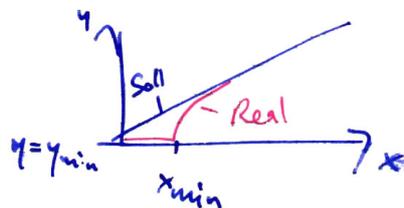
(Nichtlinearität) Betrachtet wird die maximale Abweichung zwischen einer linearen Näherung einer nicht-linearen Funktion (Δy_{\max}).

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta y_{\max}}{FSO} \cdot 100\%$$

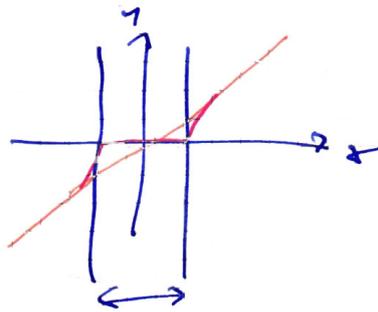


2.3.4 ANSPRECHSCHWELLE

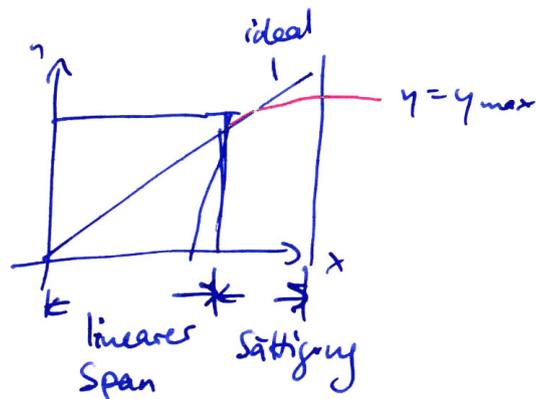
x_{\min}



2.3.5 TOTBAND



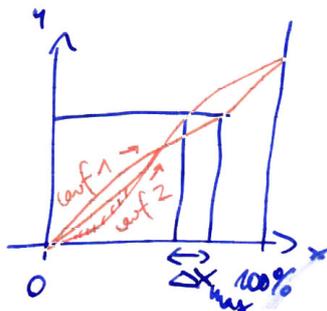
2.3.6 SÄTTIGUNG



2.3.7 WIEDERHOLGENAUIGKEIT

2.3.7.1 REPRODUZIERBARKEIT

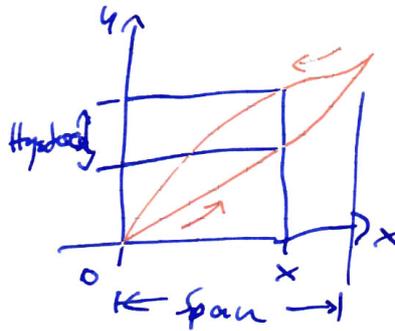
Maximales Intervall des Stimulus, bei welchem sich unter gleichen Laborbedingungen das Ausgangssignal nicht gleich ist.



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

2.3.7.2 HYSTERESE

(Wenn man die Messung zwei mal von unterschiedlichen Richtungen ausführt → Abweichung in y-Wert abhängig von der Richtung)



2.3.8 SELEKTIVITÄT

(Querempfindlichkeit)

Empfindlichkeit des Messwertes auf andere Größen

- Empfindlichkeitsänderung



- Nullpunktdrift



Behebung: Kompensationssensor einsetzen.

2.3.9 RAUSCHEN



2.3.10 WEITERE

- Langzeitstabilität
- Lebensdauer
- Exemplarstreuung
- ...

2.4 DYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN VON SENSOREN

- zeitlich veränderliche Messgrößen
- diese seien adäquat (entsprechend der statischen Transferfunktion) und verzögerungsfrei weiterzugeben

Beispiel:
Energiespeicher

- Massen
- elektrische Kapazitäten
- Induktivitäten
- Wärmekapazitäten
- dissipative Energieverluste

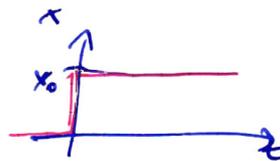
Ansprechverhalten Antwort eines Sensors auf ein zeitlich veränderliches Eingangssignal

Ordnung des Sensors Anzahl vorhandener Energiespeicher (Ordnung der Differentialgleichung)

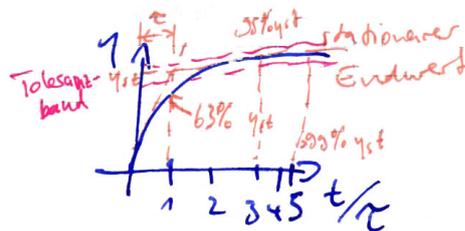
- 0. Ordnung: keine Zeitabhängigkeit $I(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$
- 1., 2., ... Ordnung: zeit- und frequenzabhängiges Ansprechverhalten

2.4.1 SPRUNGANTWORT UND ZEITKENNGRÖSSEN

Sprunganregung: $x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ x_0 & (t \geq 0) \end{cases}$



- 0. Ordnung: $y(t \geq 0) = S(x_0)$
- 1. Ordnung: (bspw. Kapazität, die auf-/entladen wird) $U_C(t) = U_0 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\}$
 $\tau = R \cdot C$ (Zeitkonstante)



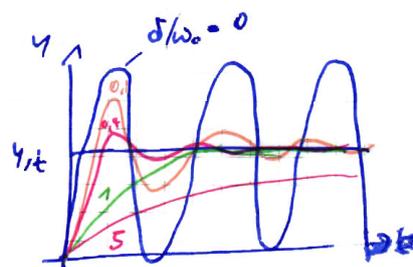
Halbwertszeit: $t_{0,5}$

Anstiegszeit (rise time): $t_r = t_{0,9}$ (also $t_{90\%}$, wann y_{st} zu 90% erreicht ist)

Einstellzeit: $t_E = 3\tau$



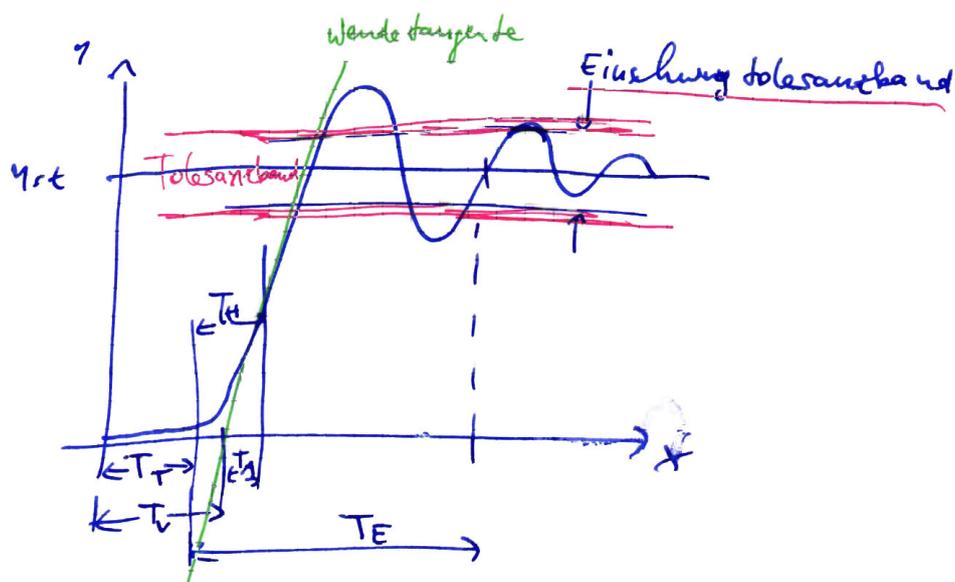
2.4.1.1 DÄMPFUNG



- δ Dämpfungskonstante
- ω_0 Eigenkreisfrequenz

Dämpfungsgrade:

- $\delta = 0$: ungedämpfte Schwingung
- $\frac{\delta}{\omega_0} < 1$: Schwingfall
- $\frac{\delta}{\omega_0} \geq 1$: Kriechfall (stationärer Wert wird ohne Überschwingung erreicht)



- Totzeit t_T
- Verzögerungszeit t_V
- Ausgleichszeit $t_A = \tau$
- Einstellzeit t_E

Das Toleranzband ist vorher zu bestimmen!

- $\delta_{opt} = 0,7 \dots 0,8 \cdot \omega_0$
- $\frac{\Delta y}{y_{st}} = \pm 4,5\%$

2.4.2 FREQUENZKENNGRÖSSEN

Antwort auf ein sinusförmiges Eingangssignal: $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$ (ω : Erregerfrequenz)

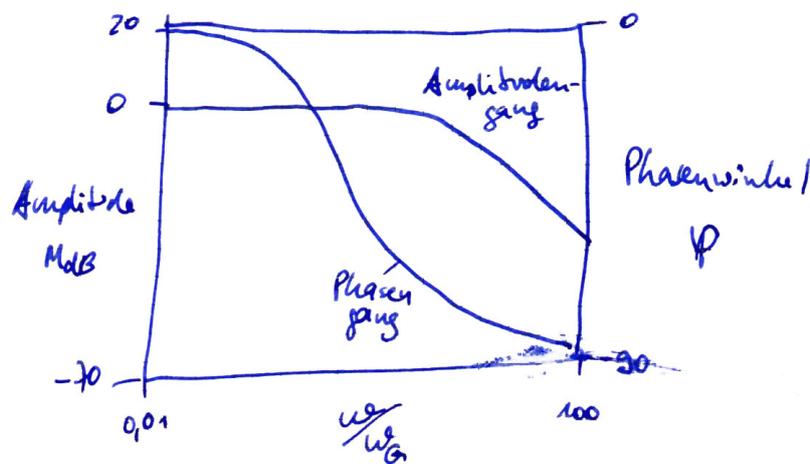
- stationärer (eingeschwungener) Zustand: $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \hat{y}_{st}(\omega) \cdot \cos(\omega t + \varphi)$
Nicht alle spektralen Komponenten (Frequenzen) können amplituden- und phasentreu übertragen werden.

STATIONÄRER AMPLITUDENGANG (magnitude ratio): $M = \frac{\hat{y}_{st}(\omega)}{\hat{y}_{st}(\omega \rightarrow 0)}$

STATIONÄRER PHASENGANG: φ

Sensoren 0. Ordnung: amplitudentreu bei $M = 1$, phasentreu bei $\varphi = 0$

2.4.2.1 FREQUENZKENNGRÖSSEN VON SENSOREN 1. ORDNUNG



Grenzfrequenz: ω_G

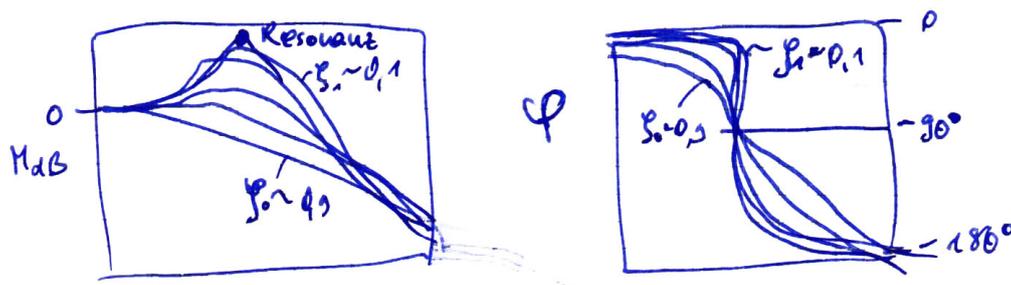
$M = 0,707$ $\varphi = 45^\circ$

Grenzfrequenz wird so angelegt, dass $\omega/\omega_G = 1$

- $\omega/\omega_G \ll 1$:
 $M \approx 1$
 $\varphi \approx 0$
- $\omega/\omega_G \gg 1$:
 $M \rightarrow 0$
 $\varphi \rightarrow 90^\circ$

Bandbreite: Frequenzbereich mit M zwischen $0,707 \dots 1,414 (\pm 3dB)$

2.4.2.2 FREQUENZKENNGRÖSSEN VON SENSOREN 2. ORDNUNG



$$\zeta = \frac{\delta}{\omega_0}$$

- quasistatische Anregung:
 $\omega \ll \omega_0: M \approx 1, \varphi \approx 0$
- Resonanz (bis $\delta = 0,71\omega_0$):
RESONANZFREQUENZ: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$
 $\varphi = -90^\circ, M \rightarrow M_{max}$
Ab Dämpfung $\zeta = 0,7$ verschwindet die Resonanz beinahe vollständig.
- hohe Anregerfrequenz $\omega \gg \omega_0$
 $\varphi \rightarrow -180^\circ, M \rightarrow 0$
- Bandbreite: Frequenzbereich mit M zwischen $0,707 \dots 1,414(\pm 3dB)$



3 TEMPERATURSENSOREN

Drucksensoren Durchflusssensoren Binäre Positionssensoren Flüssigkeits-Chemosensoren ...

3.1 TEMPERATURMESSVERFAHREN

Alle physikalischen Eigenschaften sind mehr oder weniger stark temperaturabhängig:

- Gasthermometer (73-543 K)
- Flüssigkeitstherm. (203-360 K)
- Farbstofftherm. (303-1873 K)
- Pt100 (53-1123 K)
- Keramik NTC, PTC (193-523 K)
- Thermoelemente (53-2773 K)
- Si-Halbleiter (208-573 K)
- IR-Sensoren (223-3473 K)

Hauptsächlich 2 Methodentypen:

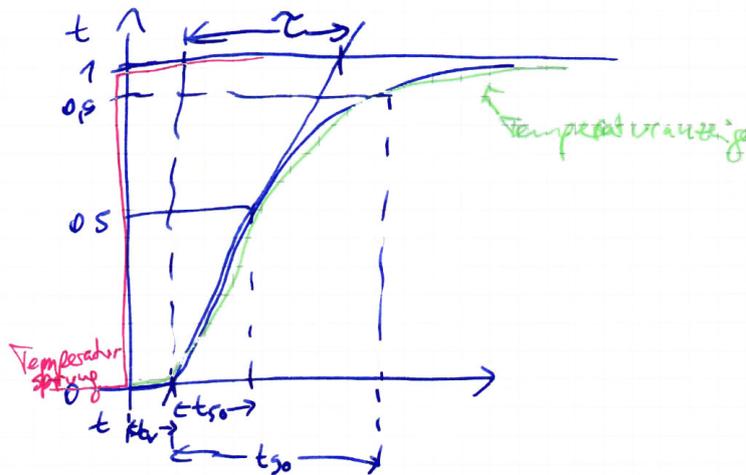
- Kontaktthermometrie (misst im Prinzip allerdings nicht die Temperatur des Mediums, sondern seine eigene \Rightarrow braucht Zeit um die Temperatur bei Kontakt anzugleichen \rightarrow Zeitaufwändig)
- Pyrometrie (Analysiert Wärmestrahlung)

Die für uns wichtigsten Kontaktthermometer sind:

- Thermoresistive Sensoren
- Thermoelemente
- Halbleiterfühler verschiedener Art (Sperrstrom oder Schwellspannung)



3.2 ZEITVERHALTEN EINES WIDERSTANDSENSORS



(Verhalten wie Sensor 1. Ordnung)

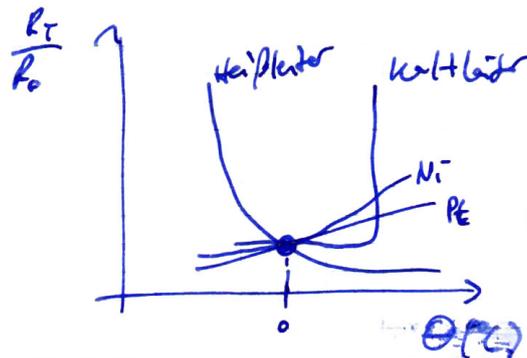
- Verzögerungszeit t_V
- Ausgleichszeit $t_A = \tau$
- Halbwertszeit t_{50}
- Anstiegszeit t_{90}
- Einstellzeit $t_E = 3\tau$

Luft: sehr langsame Anpassung der Temperatur am Sensor

Flüssigkeit: schnellere Anpassung (ca. 10 mal schneller als Luft)

Festkörper: etwas langsamere Anpassung

3.3 THERMORESISTIVE SENSOREN



Temperaturkoeffizient des Widerstands:

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

Unterscheidung der Sensoren:

- Kaltleiter $TK > 0$ (PTC: positive temperature coefficient)
bspw. Metallwiderstände (Ni und Pt)
Vorteil: in kleinen Temperaturbereichen ist Anstieg linear
- Heißleiter $TK < 0$ (NTC: negative temperature coefficient)

3.3.1 METALLWIDERSTÄNDE

Je nach Metall (Platin, Kupfer, Nickel) ist die Auslenkung unterschiedlich. Platin hat eine optimale Auslenkung, ist aber teuer. Etwas schlechter, aber billiger ist Kupfer. Nickel als alternative hat ab der Curie-Temperatur (352°C) eine sehr schlechte Auslenkung.

Die Metalle sollten folgende Eigenschaften haben:

- korrosionsfest
- alterungsfest
- hohe T_S (Schmelztemperatur)
- hoher ρ (elektrischer Widerstand)
(da kleine Änderungen einer kleinen Größe gemessen werden soll)
- duktil

Metall	ρ $10^{-8}\Omega\text{m}$	TK 10^{-3}K^{-1}
Platin (Pt)	10,6	3,92
Kupfer (Cu)	1,67	4,33
Nickel (Ni)	6,84	6,75

Man sieht: bei Metallen ist der Temperaturkoeffizient sehr klein.

Sensoren:

- Keramikkörper, in den Platinwendel (Drähte) lose in Löcher eingelegt werden
- Keramikdorn, um den Platinwendel (Drähte) umgewickelt werden (abgedeckt mit Glasrohr)
- alternative (zu den Draht-Lösungen): im Sensor wird eine Platindünnschicht auf Keramikträger aufgetragen (sehr wenig Platin \rightarrow deutlich günstiger; Nachteil: dünne Platinschicht liegt dicht auf Keramik. Bei Temperaturänderungen dehnt sich Keramik und Platin unterschiedlich schnell, das führt zu mechanischen Spannung)

3.3.1.1 PT100

gebräuchlichster Temperatursensor

- Spezifikation: DIN EN 60571
- Temperaturbereich (Dauerbetrieb): -7°C bis $+550^{\circ}\text{C}$
- Temperaturkoeffizient: $Tk = 3850$ ppm/K
- Langzeitstabilität: Max. R_0 -Drift: 0,04% nach 1000h bei 500°C
- Erschütterungsfestigkeit: Min. 40g Beschleunigung bei 10 bis 2000 Hz
- Umgebungsbedingungen: Ungeschützt nur im trockener Umgebung einsetzbar
- Isolationswiderstand: $> 10\text{M}\Omega$ bei 20°C , $> 1\text{M}\Omega$ bei 500°C
- Selbsterwärmung: $0,2\text{K}/\text{mW}$ bei 0°C
- Ansprechzeit:
Bewegtes Wasser ($v = 0,4\text{m}/\text{s}$): $t_{0,5} = 0,3\text{s}$; $t_{0,9} = 0,8\text{s}$
Lufstrom ($v = 1\text{m}/\text{s}$): $t_{0,5} = 3,0\text{s}$; $t_{0,9} = 9,0\text{s}$



- Messstrom: 100Ω : 0,1 bis 0,4mA

Vorteile:

- + für Präzisionsmessungen geeignet ($\pm 0,3\%$)
- + sehr gute Langzeitstabilität
- + gute Linearität (bis $150^\circ C$)
- + PT-Sensoren: $-270^\circ C$ bis $+850^\circ C$
mech. sehr stabil, Dünnschichtsensoren
- + Ni-Sensoren: kostengünstige Dickschichtsensoren

Nachteile:

- kostenaufwendig
- wegen Gehäuse meist langsam
- Spannungsversorgung erforderlich
- Ni-Sensoren: $-60^\circ C$ bis $+180^\circ C$
- keine punktförmige Messung
- Selbsterwärmung

SCHALTTECHNIKEN

- Zweileitertechnik: Auslesen des Spannungsabfalls über Pt100-Sensor direkt
Problem: Widerstände der Drähte von/zum Pt100-Sensor können Signal verfälschen.
- Vierleitertechnik:
Auslesen des Spannungsabfalls mit einer parallelen Leitung zusätzlich zur Versorgungsleitung des Pt100. Damit ist die Messung Stromfrei.
Nachteil: 4 Leiter mit Widerständen, die verfälschen können.
Lösung: Dreileitertechnik: nicht komplett parallele Spannungsmessung, sodass ein Widerstand weg fällt.

3.3.2 KALTEITER (PTC)

3.3.2.1 THERMOSITOREN

(temperaturabhängige Widerstände)

- + preiswert
- + großer Messwiderstand
- + $-30^\circ C$ bis $+350^\circ C$ ($\pm 5^\circ C$)
- + große Empfindlichkeit
- + ohne Gehäuse realisierbar \Rightarrow kurze Ansprechzeit
- stark nichtlineare Kennlinie
- ohne Gehäuse mechanisch anfällig
- Spannungsversorgung erforderlich
- keine punktförmige Messung



3.3.2.2 SCHALTENDE SENSOREN

- Überstrom-Überwachung
- Übertemperatur-Überwachung
- Niveaufühler für Flüssigkeiten

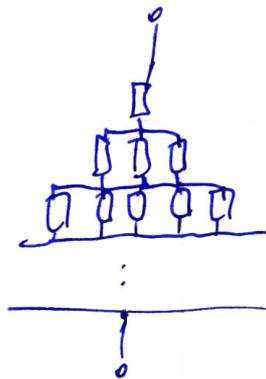
3.3.2.3 SI-TEMPERATURENSENSOREN

Widerstand steigt mit Temperatur → Kaltleiter.

- + preiswert
- + großer Messwiderstand
- + große Empfindlichkeit
- keine lineare Kennlinie
- DMS-Effekt (Dehnungs-Mess-Streifen)
- Spannung erforderlich
- Gehäuse ⇒ langsam
- keine punktförmige Messung

3.3.2.4 SPREADING-RESISTANCE-SENSOR

$$R = \frac{\varrho(T)}{\pi \cdot d}$$



(Ersatzschaldbild)

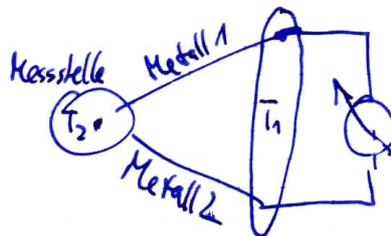
3.3.2.5 TEMPERATUR IC

Diodengleichung: $I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$ mit I_0 : Sperrstrom

3.3.3 HEISSLEITER (NTC)

- + breites Spektrum an R
- + großer TK ($3 \dots 6\%/K$)
- $-50^\circ C \dots +100^\circ C (\pm 5^\circ C)$
- Thermistoren: Bestehen aus Keramiken (oxyde).
- Temperaturfühler
- Zeitverzögerungsglied
- Spannungsstabilisierung

3.3.3.1 THERMOELEMENTE



Beispiel: Draht führt durch zu Eis/Kerze (Kupfer), dazwischen ist dann Konstantan. Der Spannungsunterschied wird gemessen.

Seebeck-Effekt: $U_{th} = \alpha_{th} \cdot \Delta T$ mit U_{th} : Thermospannung und α_{th} : Thermokraft

3.3.3.2 GENORMTE THERMOELEMENTE

Thermopaar	Kurzzeichen	lin. Thermosp., $\mu V/K$	T-Bereich ($^{\circ}C$)	Eigenschaften
Eisen-Konstantan (Fe-CuNi)	Typ J (Typ L)	53	-250 bis 700 (900)	billig, rostet, empfindlich gegen schwefel- und kohlenwasserstoffhaltige Luft
Kupfer-Konstantan (Cu-CuNi)	Typ T (Typ U)	443	-250 bis 300	rostet nicht, Cu-CuNi verzundert
Nickelchrom-Nickel (NiCr-Ni)	Typ K (Typ N)	41	-200 bis 1000 (1300)	hohe Thermokraft, recht linear, empfindlich gegen S-haltiges Gas
Platinrhodium-Platinum (PtRh-Pt; Pt/Rh=87/13)	Typ R	6,5	-50 bis 1500	bei Rotglut einsetzbar, teuer, oxidationsbeständig
Platinrhodium-Platinum (PtRh-Pt; Pt/Rh=90/10)	Typ S	6,5	-50 bis 1500	wie Typ R (angesächsisch), aber mehr im dt. Raum
PtRh-Schenkel mit verschiedenem Rh-Gehalt (70/30 - 94/6)	Typ B	6,3	0 bis 1600 (1800)	unempfindlich gegen Verunreinigungen, T der Vergleichsstelle muss nicht konstant sein
WRh-Schenkel mit verschiedenem Rh-Gehalt (75/25 - 97/3)	Typ G	15	0 bis 2200	T der Vergleichsstelle muss nicht konstant sein, nur in neutraler und reduzierender Atmosphäre

3.3.3.3 AUFBAU VON THERMOELEMENTEN

- Kabelthermoelemente
 - + sehr schnell
 - ungeschützt
- Mantelthermoelemente (im Prinzip Kabel inkl. Mantel) → etwas langsamer, aber geschützter
- Isolierte Messstelle (TI)
 - + elektrische und galvanische Trennung
 - lange Zeitkonstante
- mit Mantel verbundene Messstelle (TM) [an Messstelle liegt Thermoelement „blank“]
 - + kurze Zeitkonstante
 - galvanische Verbindung



3.3.3.4 ANSPRECHZEITEN, VORTEILE, NACHTEILE DER THERMOELEMENTE

- + sehr großer T-Bereich
- + kleine Gesamtabmessungen
- + große Flexibilität
- + einfacher, sehr robuster Aufbau
- + unempfindlicher gegen Hitze, Druck und Vibration
- + kleinste Ansprechzeiten
- + praktisch punktförmige Messstellen
- reduzierte Genauigkeit
- sehr kleine Thermospannung
- Temperatur der Anschlussstelle muss bekannt sein

3.3.4 BIMETALLTHERMOMETER

Zwei unterschiedliche Metalle sind in einem Streifen miteinander verbunden. Dadurch, dass sie sich bei Temperatur unterschiedlich verformen, kann durch die Auslenkung die Temperatur berechnet werden.

f : Auslenkung der Spitze des Streifens,

s : Dicke des Streifens (beider Metalle),

L : Länge des Streifens

δ : spezifische Ausbiegung

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

Einsatzbeispiel: Schalter wird durch den Bimetallstreifen betätigt, wenn die Temperatur bewirkt, dass er sich verformt: schaltende Sensoren (Überlastungsschutz, Temperaturregelung).

3.4 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 bei:

- Dickem Gehäuse
- Große Entfernung zwischen Objekt und Messstelle
- Objekte geringer Masse (mit massiven Fühlern → Verfälschung der Messung durch Angleichung der zu messenden Temperatur an die Fühlertemperatur)
- T-Messung bei Luftströmungen



4 DRUCKMESSUNG

4.1 DRUCK ALS MESSGRÖSSE

Normaldruck: 1013 hPa

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad [p] = 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \quad 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Druckbereich	Anwendung
< 40 mbar	Füllstand in Waschmaschine, Geschirrspüler
100 mbar	Staubsauger, Filterüberwachung, Durchflussmessung
200 mbar	Blutdruckmessung
1 bar	Barometer, Korrektur für Zündung und Einspritzung
0 ... 1 bar	Ansaugunterdruckmessung
10 bar	Öldruck und Luftdruck für Bremsen, Kühlmaschinen
50 bar	Pneumatik, Industrieroboter
500 bar	Hydraulik, Baumaschinen
3000 bar	Hochdruckschneiden mit Wasser

4.2 ARTEN DER DRUCKMESSUNG

Absolutdruck: Ausgehend von keinem Druck (0)

Unterdruck/Überdruck: Ausgehend vom Relativdruck (festgelegt: p_{atm} , bspw. Atmosphärendruck)

Differenzdruck: Druck zwischen zwei Messungen $p_{diff} = p_1 - p_2$

- Absolut-Drucksensor:
zu messender Druck auf einer Membran gegenüber dem Vakuum
- Relativ-Drucksensor:
zu messender Druck auf eine Membran gegenüber dem Umgebungsdruck
- Differenz-Drucksensor:
die beiden Drücke auf beiden Seiten der Membran

4.3 PRINZIPIEN DER DRUCKMESSUNG

- Verformung unter Druck: magnetoelastische und Membransensoren
- Druckabhängigkeit physikalischer Eigenschaften: piezoelektrische Kristallsensoren

Störeinflüsse:

- mechanische Spannungen
- Temperatureffekte



4.3.1 MEMBRANSENSOREN

Membran biegt sich unter Druck p (mit einer Durchbiegung Δx)

4.3.1.1 DRUCKSCHALTER

unter Druck wird Schalter betätigt. Abhängig von den eingebauten Membranen und Druckfedern.

- + Messbereich: mbar . . . kbar
- relativ große Hysterese (Einschalt- und Ausschaltdruck unterscheiden sich)

4.3.1.2 KAPAZITIVER DRUCKSENSOR

Auf Membran ist Messelektrode angebracht. Durch die Verformung der Membran variiert der Abstand zwischen der Messelektrode und der Referenzelektrode. Dadurch verändert sich die Spannung.

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

Typische Abmessungen:

- Äußerer Druckmesser: 32,4 mm
- Dicke des Grundkörpers: 5 mm
- Dicke der Membran (je nach Messbereich): 0,2 . . . 2,8 mm
- Abstand zwischen Membran und Grundkörper: 40 μm
- Durchbiegung bei Nenndruck: max. 8 μm

Eigenschaften:

- + sehr empfindlich
- + geringer Energieverbrauch (da nicht generierender, sondern modulierender Sensor)
- + geringe T-Abhängigkeit
- + sehr einfach, robust
- + nicht empfindlich für Überdruck
- + besonders für niedrige P: 10^{-7} . . . 1 bar
- + gasartunabhängig
- + Genauigkeit: 0,2% (Ker) . . . 2% (Me) vom Messwert
- + lineare Kennlinie
- Kapazitätsänderung: Bruchteile von pF
- Streukapazitäten-, staub- und feuchteempfindlich
- relativ komplexe Elektronik



4.3.1.3 KAPAZITIVE MEMS-SENSOREN

Mikro-Elektro-Mechanische Systeme: Ähnlich wie kapazitive Drucksensoren, bloß deutlich kleiner.

- Drucksensor
- Beschleunigungssensor

4.3.1.4 DEHNUNGSMESSSTREIFEN (DMS)

Messstreifen mit einer Länge l und Durchschnitt A :

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Da sich der Durchschnitt kaum ändert: $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$

Der k -Faktor:

Werkstoff	K-Faktor
Konstantan	2,0
Nichrom	2,2
FeNi	2,5
„Iso-Elastic“	3,6
PtW	4,0

Der k -Faktor ist sehr stark von der Temperatur abhängig!

MEMBRAN-DMS-SENSORELEMENT

Widerstand-Anordnung an der Membran ist zu vergleichen mit einer Wheatstone-Brücke (mit R_1 und R_2 parallel zu R_3 und R_4), wobei $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$.

R : 120 ... 5000 Ω

$\Delta R \sim 0,5 \dots 5\%$

- Metall-Dünnschicht-DMS
 - polySi-Membran-DMS
- + kleine Abmessungen möglich
- + für statische und dynamische Messungen geeignet

4.3.1.5 PIEZORESISTIVE METALL-MEMBRAN-DRUCKSENSOREN

- + höchste Genauigkeit: 0,2 ... 0,3%, sehr kleine Hysterese $< 0,05\%$ FSO
- + hervorragende Temperaturstabilität
- + überdrucksicher
- + sehr hohe Medienverträglichkeit
- + robuste Gehäuseausführungen möglich
- + direkter Kontakt mit Druckmedium
- + gute Langzeitstabilität



- für Drücke $< 5\text{bar}$ nicht geeignet
- für $T > 140^\circ\text{C}$ nicht geeignet
- aufwendige Fertigung
- sehr teuer (hoher Fertigungsaufwand)
- geringe elektrische Durchschlagsfestigkeit
- anfällig für elektro-magnetische Störeinkopplung
- Miniaturisierung eingeschränkt

Anwendung für Präzisions-Druckmessungen insbesondere in Hochdruckbereichen:

- Pneumatik und Hydraulik
- Mess- und Regeltechnik
- Verfahrenstechnik der Chemie, Pharmaindustrie, ...

4.3.1.6 SILIZIUM-MEMBRAN-DRUCKSENSOREN

Si-Messmembran mit poly-Si-Dünnschicht DMS

- + Ideal für niedrige Nenndruckbereiche
- + gutes Preis/Leistungsverhältnis
- + vergleichsweise kleine Abmessungen
- + Integration mit der Signalverarbeitungselektronik
- + hoher k-Faktor
- + keine Kriecheffekte
- + keine Isolierschicht
- + hohe Ausgangssignale
- + hohe Eigenfrequenz
- hohe Temperatur-Abhängigkeit
- hoher Aufwand für Linearisierung und Temperatur-Kompensation
- empfindlich gegen äußere Einflüsse
- geringere Genauigkeit als Metall-DMS
- Einsatz nur bis max. 125°C
- Hysterese 0,15%FSO

Anwendungsbereiche:

- keine hohen Genauigkeitsansprüche
- insbesondere im Niederdruckbereich
- Haushalt (keine Temperatur-Schwankungen)



4.3.2 PIEZOELEKTRISCHE EFFEKTE

$q = d \cdot F$ mit $d \dots$ piezoelektrischer Koeffizient

Prinzip: Atom-Anordnung ist anders bei unterschiedlichem Druck

- normal: sehr symmetrische Anordnung
- Longitudinal-Effekt (Druck von oben und unten, dort wo Ladung angelegt wird): Atome werden zusammengedrückt, so sind teilweise oberhalb unterschiedliche Ladungen (positiv/negativ)
- Transversal-Effekt (Druck von oben und unten, Ladung liegt seitlich an): Atome werden zusammengedrückt und gedreht, dadurch entstehen wieder unterschiedliche Ladungen
- Schub-Effekt (Ladungsplatten (oben/unten) werden seitlich verschoben): Atome verschieben sich

Spannung über dem Sensorelement: $U = \frac{d}{\epsilon_r} \cdot \frac{F \cdot l}{\epsilon_0 \cdot A}$

PIEZOELEKTRISCHE MATERIALIEN

Material	Dielektrizitätskonstante ϵ_{33}	Piezoelktrische Dehnungskonstante d_{31} [pC/N]	Curie-Temperatur [°C]	typische Einsatz-Temperatur
Quarz	4	2,3	560	-200...300 °C
→ exzellente Linearität und Langzeitstabilität, keine Hysterese, keine Pyroelektrizität. Aber: Quarz ist polymorph und stärker temperaturabhängig				
Blei-Zirkonat-Titanat Keramik (PZT) P8	1600	300	370	
Bleimetaniobat	200	75	540	
Turmalin	7	1,8	$T_m \geq 900$	bis 650 °C
Keramik P14	160	20	680	
Lithiumniobat	85	80	1200	bis 700 °C
$BaTiO_3$ -Keramik	2000 – 5000	190	120	

PIEZOELEKTRISCHE DRUCKSENSOREN

- + nahezu weglose Kraftaufnehmer (nur wenige μm)
- + hoher Wirkungsgrad (mechanische in elektrische Energie)
- + einfacher mechanischer Aufbau: flach, klein, leicht
- + sehr großer Messbereich (0...100 MPa)
- + hohe Linearität des piezoelektrischen Effekts
- + Auflösung: $< 10^{-7}$ FSI, Genauigkeit: 1%
- + großer Frequenzbereich $f > 100$ kHz



- + kleine Bauweise
- + Betriebstemperaturbereich: $-196 \dots + 240 \text{ }^\circ\text{C}$
- Kriechströme
- statische Messungen nur beschränkt möglich

Anwendungsbereich:

- insbesondere Messung hoher Drücke bei erhöhter Temperatur
- Werkzeugmaschinen
- Kunststoffverarbeitende Industrie
- KFZ (Brennkammerdrucksensoren)
- Sport (zur mehrdimensionalen Messungen)
- Ballistik
- Beschleunigungsmessung

4.3.3 BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN

Prinzip: Trägheitskraft auf seismische Masse

Wirkungsweise:

- kapazitive Änderung (durch Verschiebung) oder
- piezoelektrisch:
 - Aufnehmer vom Kompressionstyp
 - Aufnehmer nach dem Scherkonstruktionsprinzip
 - Aufnahmerelement unter Biegebeanspruchung

4.3.3.1 AIRBAG-BESCHLEUNIGUNGSSENSOR

(auf Basis der Scherkonstruktion)

- Hohe Empfindlichkeit: bis 1 nC/g
- Betriebstemperaturbereich: $-55 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$
- Empfindlichkeitsbereich: bis $\pm 500 \text{ g}$
- Frequenzbereich: ab 1 Hz bis $0,3 f_R$

4.3.3.2 BIMORPHE BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN

(auf Basis der Biegebeanspruchung) Die seismische Masse ist das Piezoelement selbst.

- Masse: $4,5 \text{ g}$
- Empfindlichkeit: 1 V/g
- leicht, klein, hochauflösend, kostengünstig



4.3.3.3 ANWENDUNGEN

- Generelle Maschinenschwingungen
- Verpackungsindustrie
- Radialbeschleunigungssensoren (Eisenbahn)
- Crashtests
- Airbags im Auto
- Karosserieanalyse
- Sport (Aktivitätssensor)
- Lagesensor

4.3.4 MAGNETOELASTISCHE SENSOREN (INDUKTIVITÄTSSENSOREN)

Prinzip: Spuleninduktivität (Villari-Effekt, Differentialtransformator)

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 A}{l}$$

- statische und quasi-statische Messungen
- Messeffekte sind sehr groß (keine große Verstärkung nötig)
- keine Rückwirkung auf Messobjekte
- Einsatzbereich: 1 kN ... 2,5 MN
- Messfehler: 1%



5 DURCHFLUSSENSENSOREN

Rohrströmung

- laminare Rohrströmung
Strömung ohne Turbulenz
- turbulente Rohrströmung

Reynolds-Zahl: $Re = \frac{\nu \cdot D \cdot \rho}{\eta}$

Fließgeschwindigkeit im Rohr ist je nach laminarer oder turbulenter Strömung unterschiedlich verteilt. Bei der turbulenten Strömung ist das Profil (über den Querschnitt des Rohrs) ausgeglichener, bei laminarer zentriert (mit größerem Ausschlag).

⇒ eine Ein-Punkt-Messung gibt keine Aussage über die gesamte Strömung.

5.1 PRINZIPIEN DER DURCHFLUSSMESSUNG

- Volumenstrom

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

– Volumenzähler

- ♦ Volumetrische Zähler ΔV
 - Verdrängungszähler
 - Auslaufzähler
- ♦ Strömungszähler $\Delta V = A \cdot \nu$
 - Messflügel
 - Drosselgeräte (Wirkdruck ΔP)
 - Verschiedene physikalische Effekte

- Massenstrom

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

Aussagekräftig für die Frage der Menge die durchgeflossen ist.

– Massendurchflussmessung
Coriolis, thermisch

5.2 AUSLAUFZÄHLER

- Kippzähler: Zählung der Kippvorgänge
Flüssigkeit fließt in eine von zwei Messkammern. Wenn Messkammer gefüllt ist, schwenkt die Messkammer zur Seite (und entleert sich), dadurch fließt Flüssigkeit nun in die andere Messkammer. Es wird die Anzahl der Kippvorgänge gezählt.
- Trommelzähler: Zählung der Umdrehungen
(Vergleich Wassermühle mit Eimern statt Schaufel)



Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: nur Flüssigkeiten
 - Messgenauigkeit: $\pm 0,1 \dots 0,5\%$ v.S. (vom Sollwert)
 - Fehlerquellen: Ungemessene Flüssigkeitsmengen während des Kippvorgangs
→ negative Messabweichung
- + hohe Genauigkeit
- + Messung stark verschmutzter Flüssigkeiten möglich
- + niedriger Grenzwert (kleinste Mengen können verarbeitet werden)
- + geringe Druckverluste
- Flüssigkeiten mit großer Viskosität des Mediums nicht möglich
- nicht für Gase geeignet
- erzeugen pulsierende Strömung

5.3 VERDRÄNGUNGSZÄHLER

Volumenzähler mit beweglichen Kammerwänden

- Ovalradzähler
- Drehkolben-Gaszähler
- Zahnradzähler
- Zahnringzähler
- Ringkolbenzähler

Es wird gezählt, wie viel sich der Zähler bewegt/verdreh.

Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: Flüssigkeiten und Gase
 - Messgenauigkeiten: $\pm 0,5\%$ v.S.
 - Fehlerquellen: hauptsächlich durch Spaltverluste (Verschleiß)
- + großer Messebereich 0,15 bis 1501/s
- + Betriebsdruck bis 30 bar
- + hohe Genauigkeit über großen Messbereich
- + weitgehende Viskositätsunabhängigkeit
- + lange Lebensdauer (bei sorgfältiger Filterung des Messgutes)
- + keine Störeinflüsse über die Strömungsprofile
- extrem empfindlich gegenüber Verschmutzungen
→ sorgfältige Filterung des Messgutes notwendig



- pulsierende Strömung
- Druckverluste bis 1 bar
- Verschleiß
- Blockieren der Leitung im Falle einer Verstopfung oder Verklemmung
- Erhebliche Geräuschentwicklung

5.4 VOLUMENZÄHLER MIT MESSFLÜGELN

Drehzahl des Turbinenrades: $f \sim v \sim q_v$

- Turbinenradzähler axial/senkrecht
- Flügelradzähler

Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: reine Flüssigkeiten und Gase
- Messgenauigkeit: $\pm 2 - 5\%$ v.S.
- Fehlerquellen:
 - durch Lagerreibung, Strömungsprofil, von der Viskosität abhängige hydraulische Verluste
 - Verwirbelung, Strömungspulsation und Druckschwankungen
- + hohe Genauigkeit bei definierten Viskositäten (2 – 5%)
- + Temperaturen bis 350 °C
- + für große Durchflussmengen geeignet
- + Messungen bei hohem Druck bis > 600 bar möglich
- + längere Lebensdauer der Lager bei senkrechten Bauarten
- Viskosität muss bekannt sein
- Beruhigungsstrecke vor und nach der Turbine erforderlich
- empfindlich gegenüber Verschmutzungen → Schmutzfilter
- aufgrund von Lagerreibung und Massenträgheit der Rotoren können Schleichmengen nicht erfasst werden
- Strömungsprofil-abhängig



5.5 SCHWEBEKÖRPER-DURCHFLUSSMESSER

Prinzip: Schwebekörper in einer Röhre. Von unten fließt das Medium ein. Die Steighöhe des Schwebekörpers h ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Auf sie wirken 3 Kräfte:

- Gewichtskraft \downarrow : $F_G = m \cdot g$
- Auftriebskraft \uparrow : $F_A = V \cdot \rho$
- Kraft des Strömungswiderstandes \uparrow : $F_S \sim \frac{qV}{h}$

Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: Flüssigkeiten und Gase
 - Messgenauigkeit: $\pm 2\%$ v.E. (von Endwert)
 - Fehlerquellen: Abhängigkeit von der Schwerkraft, empfindlich auf Pulsation und Vibration
- + einfacher, leicht kontrollierbarer Aufbau
- + keine Vorlaufstrecke (Beruhigungsstrecke) erforderlich
- + robust, einfache Montage, leicht einstellbare Grenzwerte
- + günstiges Preis/Leistungsverhältnis
- + auch für aggressive Medien geeignet
- + näherungsweise lineare Skala
- + geringer Druckverlust
- + leichte elektronische Positionserfassung (z.B. induktiv)
- + besonders für kleine Durchflussmengen
- kann empfindlich gegen Verschmutzung sein
- senkrechte Einbaulage erforderlich

5.6 DIFFERENZDRUCKVERFAHREN (WIRKDRUCKVERFAHREN)

Rohr mit Verengung. Differenz zwischen den Drücken vor und nach der Blende wird gemessen (Wirkdruck):

$$q_v \sim \sqrt{p_1 - p_2}$$

Varianten:

- Blende
- Düse (leicht führende Blende)
- Venturidüse

Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: für reine Flüssigkeiten und Gase (keine Mehrphasenströmungen)



- Messgenauigkeit: < 1% v.E.
- Fehlerquellen: Fehler durch Verschleiß der Blenden, empfindlich für Strömungsprofil und Verschmutzung des Messmediums
- + einfach, robust und wartungsarm
- + international genormt, keine Kalibrierung erforderlich
- + besonders für große Durchflussmengen geeignet
- + unter extremen Bedingungen (P,T, Überlastbetrieb, Medium) einsetzbar
- + äußerst langzeitbeständig (je nach Aggressivität des Mediums)
- + extrem große Nennweitenpalette bei nur minimaler Preisänderung
- nur in voll gefüllten Rohren ($D > 50 \text{ mm}$) anwendbar
- nichtlinearer Effekt: Wirkdruck steigt quadratisch mit Durchfluss
- hoher Druckverlust (Blende 35% – 90%, Düse 6% – 25% des Wirkdrucks)
- große Ein- und Auslaufstrecken erforderlich

5.7 STAUDRUCKVERFAHREN

Es wird der Druck auf einen Staukörper gemessen (zwei Röhrchen in dem „Strahl“, zwischen denen die Druckdifferenz gemessen wird)

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad \Delta p: \text{unterschied des Drucks}$$

$$q_V = A \cdot v$$

Eigenschaften

- Fluideigenschaften: vor allem Gase
- Messgenauigkeit: $(\pm 3) \pm 1\%$ v.S.
- + robust und wartungsarm
- + punktförmige Messung der Strömungsgeschwindigkeit
- + geringe Druckverluste
- nichtlineare Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Druck
→ hohe Messfehler im unteren Bereich
- Gesamtdurchfluss ergibt sich durch das Abtasten der Geschwindigkeitsverteilung über Querschnitt und anschließende Integration



5.8 WIRBELZÄHLER

Zählt Verwirbelungen, die sich hinter einem Objekt (Störkörper) in einem Strom (in Rohr) ergeben (Vergleich: Flagge an Mast).

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

Messverfahren:

- Drucksensoren an Rohrwandung
- Drucksensoren an Störkörper
- Vorgeheizte Thermistoren an Querbohrung des Störkörpers
- DMS oder Piezo-Wandler an schwingungsfähigen Steg

Eigenschaften

- Fluideigenschaften: Gase, Dämpfe und/oder niedrigviskose Flüssigkeiten
- Messgenauigkeit: $\pm 1\%$ v.S.
- Fehlerquellen: Schwingungen des Messrohres und Pulsation des Mediums

+ robust und wartungsarm

+ hohe Genauigkeit, großer Dynamikbereich

+ hohe Langzeitstabilität

+ Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung

+ linearer Zusammenhang $f(v)$

+ beliebige Einbaulage

– für kleine Durchflussgeschwindigkeiten nicht geeignet

– relativ hohe verbleibende Druckverluste

– große Ein- und Auslaufstrecke und ggf. Strömungslechrichter nötig

5.9 MAGNETISCH: INDUKTIVES VERFAHREN

Abhängig von Lorentz-Kraft: $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

Spannung an dem Rohr: $U = B \cdot d \cdot v$

Eigenschaften:

- Medien: insbesondere wässrige Lösungen
- Messgenauigkeit: $\pm 0,2\%$ bis $\pm 1\%$ v.S.
- Fehlerquellen: Querschnittsverkleinerung durch Ablagerungen im Messrohr, relativ kleine Messsignale (im mV-Bereich und niedriger)

+ berührungslos, robust, praktisch verschleiß- und wartungsfrei

+ unabhängig von Dichte, Temperatur, Druck, Viskosität des Mediums



- + unabhängig von Art der Strömung (laminar, turbulent) und vom Strömungsprofil
- + linearer Zusammenhang $q_v(U)$
- + keine Rohreinbauten notwendig
 - keine Querschnittsverengung → keine zusätzlichen Druckverluste
- + geeignet für korrosive, aggressive und verschmutzte Medien (Schlämme, Feststoffe)
- + kurze Ein- und Auslaufstrecken
- + Eignung für kleinste bis mittlere Mengen
- nur für leitende Flüssigkeiten ($> 1 \mu\text{S}/\text{cm}$) geeignet → nicht für Gase
- es dürfen sich keine elektrisch leitenden Ablagerungen bilden
- mit der Nennweite überproportional steigende Herstellungskosten
- die Elektroden sollten aus korrosionsfesten Material bestehen

5.10 ULTRASCHALL-DURCHFLUSSMESSUNG

Ultraschall durch Medium

- Diagonalverfahren: Messung diagonal zum Rohr mit zwei Sendern/Empfängern auf jeweils einer Seite des Rohrs.

$$\nu \approx \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2 \cdot L \cdot \cos \varphi}$$

- Reflexionsverfahren: Messung mit einem Sender und einem Empfänger, durch Reflexion des Schalls am Rohr wird der Durchfluss gemessen.
- Doppler-Verfahren: Beweglicher Sender/Empfänger. Durch Doppler-Effekt wird Durchfluss gemessen.

$$\Delta f = 2 \cdot f_0 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\nu}{c}$$

Eigenschaften:

- Medien: reine Flüssigkeiten und Gase (für Doppler: Streuzentren notwendig)
- Messgenauigkeit: $\pm 0,5\%$ bis 3% v.S. (Doppler: schlechter)
- + keine Einbauten in der Rohrleitung
 - keine Querschnittsverengung → keine zusätzlichen Druckverluste
 - Messungen über mehrere Meter Distanz möglich
- + linearer Messeffekt
- + Einsatz auch bei nichtleitenden und verschmutzten Fluiden (Doppler)
- + Clamp-On-Verfahren möglich
- gut ausgebildete Strömungsprofile erforderlich
- die Flüssigkeit muss frei von größeren Störkörpern sein (Feststoffe, Gasblasen)
- die Laufzeitdifferenz ist Stoff- und temperaturabhängig
- Schall schluckende bzw. reflektierende Ablagerungen sind zu vermeiden
- relativ großer messtechnischer Aufwand
- Beschränkung der Nennweitenpalette nach unten



5.11 KORRELATIONS DURCHFLUSSMESSUNG

An Rohr werden (mit Abstand d) zwei Sensoren (für alles möglich: Druck, Temperatur usw.) befestigt. Diese werden beständig gemessen und erhalten dem entsprechend zwei Signale. Diese Signale werden auf Ähnlichkeiten untersucht. Der zeitliche Abstand dieser Ähnlichkeiten stellt den Durchfluss dar.

Eigenschaften:

- Fluideigenschaften: Flüssigkeiten, Gase, Mehrphasenströme
- Messgenauigkeit: Abhängig von der Aufgabenstellung
- + dort, wo andere Verfahren versagen, besonders bei Mehrphasenströmungen
- + hohe Flexibilität bezüglich der Messstellen und Messstoffe
- + kann als Clamp-On-Messverfahren eingesetzt werden
- manchmal sehr stark eingeschränkte Genauigkeit
- aufgrund der rechnerischen Auswertung im Korrelator immer langsamer als direkt anzeigende Messverfahren

5.12 HITZDRAHT-ANEMOMETER

Kalorimetrie (calometry): Messung von Wärmemengen

5.12.1 HITZDRAHT-ANEMOMETRIE

Messung der geschwindigkeitsabhängigen Wärmeabgabe eines beheizten Sensors an ein vorbeifließendes, kälteres Fluid.

$$q_m = A \left(\frac{R_S \cdot I^2}{a \cdot (T_S - T_0)} - \frac{b}{a} \right)$$

wobei a , b und A Konstanten sind.

konstanter Heizstrom CC (langsam): $I = \text{const}$ $R = R(\nu)$

konstante Hitzdrahttemperatur CT (schneller): $R = \text{const}$ $I = I(\nu)$

- Fluideigenschaften: hauptsächlich Gase
- Messgenauigkeit: $(\pm 2) \pm 1\%$ v.S.
- + empfindlich, besonders geeignet für kleine und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten
- + geringe Abmessung des Heizdrahts → kleine Einstellungszeit
- + rel. geringe Heizleistung erforderlich
- + wenige Druckverluste an der Messstelle
- + direkte elektrische Anzeige des Messwertes
- + sowohl im lam. und turb. Strömungen (Kalibrierung notwendig)
- abnehmende Empfindlichkeit mit wachsender Geschwindigkeit



- Messung bei kleinen Durchflüssen wegen Eigenkonvektion nicht möglich
- Eichung jedes einzelnen Drahtes notwendig
- Alterung infolge von temperaturbedingten Strukturänderungen
- abhängig vom Medium und Strömungsart

5.12.2 AUFHEIZ-ANEMOMETRIE

Messung der Erwärmung des zu messenden Fluids durch Wärmestromzufuhr aus einer Heizwicklung.

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

- hohe Heizleistung erforderlich
- linearer Messeffekt
- unabhängig von Dichte des Mediums
- abhängig von spezifischer Wärme
- Genauigkeit: $\leq 1\%$ v.E.
- Einstellzeit von Null bis $\pm 2\%$ v.S.: $< 2\text{ s}$

5.13 CORIOLIS DURCHFLUSSMESSUNG

- inertiales Bezugssystem
- rotierendes Bezugssystem

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

Rechte Hand: Daumen \underline{F}_C , Zeigefinger \underline{v} , Mittelfinger $\underline{\omega}$ (gegen Uhrzeigersinn drehend)

$$q_m \sim \varphi$$

- Fluideigenschaften: Flüssigkeiten und Gase bei höheren Drücken ($> 5\text{ bar}$)
 - Breie und ähnliche hochviskose Fluide, homogene Mehrphasengemische
 - pneumatisch förderbare Schüttgüter
 - Messgenauigkeit: $\pm 0,2 - 0,3\%$ v.S. für Flüssigkeiten und Gase, $\pm 1\%$ v.S. für pneumatisch förderbare Schüttgüter
- + Eine direkte Bestimmung des Massenstroms
- + nahezu unabhängig von Druck, Temperatur, Dicht, Viskosität des Mediums
- + Resonanzfrequenz \sim Dichte des Mediums
- + auch bei Kleinstmengen, pulsierende Strömung, nicht vollständig befüllten Rohren, hohen und niedrige Temperaturen und hohe Drücken einsetzbar
- hohe Druckverluste
 - eine Schwingungsentkopplung der Messanlage erforderlich



- empfindlich zu Druckschwankungen
- verklebende Schüttgüter können das Messergebnis verfälschen
- unsicher bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen



6 BINÄRE POSITIONSENSOREN

nur zwei Ausgangssignale (Schaltzustände): „Ein“/„Aus“

- Taktile Sensoren (Taster):
mit mechanischem Kontakt mit dem zu detektierenden Objekt
- Näherungsschalter (Initiatoren):
berührungslos arbeitende Schalter

Sensortyp	berührungslos
Grenztaster	nein
Lichtschranken	ja
Induktive Sensoren	ja
Kapazitive Sensoren	ja
Ultraschall-Sensoren	ja
(Passiv-)Infrarotmelder	ja

Näherungsschalter (gegen Taster)

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

6.1 GRENZTASTER

Messprinzip: Kontakt über Stößel betätigen (taktile) [Schaltkraft]

Ausführungen: gekapselt/leicht

Schaltpunktgenauigkeit $\pm 10 \mu\text{m}$



6.1.1 PRÄZISIONSSCHALTER

Schaltpunktgenauigkeit	$\pm 1 \mu\text{m}$
Hysterese	$< 2 \mu\text{m}$
mech. Lebensdauer	10^6
Schaltfrequenz	10 Hz
Nachlaufweg Stößel	1,5 mm

6.1.2 KONTAKTPRELLEN

Prellen: das Schaltelement bei einem Schließvorgang durch die Federwirkung mehrmals öffnet oder wieder schließt, bis ein endgültiger Kontakt da ist.

- idealer Schalter: kein Zeitverzug (vertikale Flanke)
- Näherungsschalter: schaltet im μs -Bereich (Flanke mit Anstieg)
- Mechanischer Schalter: höhere Verzögerung schaltet im ms -Bereich zusätzlich Kontaktprellen (Schalter federt nach, es gibt mehrere kleinere Flanken in einem Bereich)

6.1.3 VOR- UND NACHTEILE VON GRENZTASTERN

- + Preisgünstig: viel preisgünstiger als Initiatoren
- + Robust und sicher im Einsatz
- + klein in den Abmessungen
- + keine Hilfsenergie notwendig
- + Verwendbarkeit bis 600 V
- + unbeeinflussbar durch Fremdfelder
- + sehr hohe Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit des Schaltpunktes (typisch $\pm 10 \mu\text{m}$) auch bei low-cost Typen
- + für kleinste und größte Schalteleistungen erhältlich
- + Absolut zuverlässige (hundertprozentige) galvanische Trennung
- eine mechanische Berührung erforderlich (Schaltkraft, Eingriff in Prozess)
- spez. mecha. Vorrichtungen notwendig
- Kontakte prellen → unsauberes Signal
- hohe Anfälligkeit gegen Verschmutzung und Verschleiß
- nur niedrige Schaltfrequenzen realisierbar
- Schaltpunktdrift durch Verschleiß und Materialermüdung
- Übergangswiderstände an den Kontakten

Messgrößen:



- Objektdistanz über/unterschritten
- Druck, Kraft
- Niveau

Einsatzgebiete:

- End- oder Referenzschalter
- Sicherheitsschalter
- Ablaufsteuerungen
- absolute Nullpunktgeber eines Inkrementalgebers
- Präzisionsmessung
- ...

6.2 NÄHERUNGSSCHALTER

6.2.1 REEDKONTAKTE

Messprinzip: Kontakt über Magnetfeld betätigen

- 1 Schaltpunkt:
Magnet parallel (Ebene N-S) zum Schalter: näher – geschlossen; weiter entfernt – offen
 - 2 Schaltpunkte:
Magnet orthogonal (N an Schalter, S von Schalter Weg) zum Schalter: direkt drüber – offen; links/rechts entfernt – geschlossen
 - 3 Schaltpunkte:
Magnet parallel (Ebene N-S) zum Schalter: direkt darüber / links davon / rechts davon
- + berührungslos schaltend
 - + höhere Schaltfrequenz als bei mechanischen Schaltern (bis 200 Hz)
 - + vermindertes Prellen gegenüber mech. Schaltern
 - + hohe Schutzart durch geschlossenen Glaskörper und Kunststoffgehäuse
 - + 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 durch Nebenfelder
 - erschütterungs- und vibrationsempfindlich



6.2.2 INDUKTIVE NÄHERUNGSSCHALTER / WIRBELSTROMSENSOREN

Faradaysches Induktionsgesetz:

$$U_{ind} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{dB}{dt}$$

Flussdichte B in den Wirbelstrom, Wirbelstrom gegen den Uhrzeigersinn.

Realisierung:

An der Stirnseite des Sensors sitzt eine Spule (mit Ferritkern). Dahinter folgt

- Oszillator
- Demodulator
- Trigger
- Verstärker

und endet im Ausgangssignal.

Messprinzip:

- Sensor erzeugt magnetisches Streufeld.
- In elektrisch leitendem Stoff, der ins Streufeld kommt, werden Wirbelströme induziert (bspw. Metallplatte vor Sensor).

Wirbelstromverluste: bei $s_n = 10 \text{ mm}$ ca. 10%. Läuft gegen 0% für höhere und gegen 100% für geringe Dicken.

Schaltabstand hängt ab von:

- Art und Bauform des Sensors
- Abstand und Lage des Gegenstands
- Form und Abmessung des Gegenstands
- elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität des Gegenstands
- äußere Bedingungen

Wiederholgenauigkeit der Wirbelstromsensoren: $< 5\% S_n$

6.2.2.1 MATERIALFAKTOR UND SCHALTFREQUENZ

Material	~ Leitwert	~ Materialfaktor
Kupfer	10^8	0,35
Aluminium	$8 \cdot 10^7$	0,4
Messing	$2 \cdot 10^7$	0,42
Eisen	10^7	0,95
Blei	$9 \cdot 10^6$	0,55
Titan	$2 \cdot 10^6$	0,65
Graphit	10^5	1,0

Schaltfrequenz hängt ab von:

- im Oszillatorschwingkreis gespeicherte Energie
- Frequenz des Oszillators



- Größe der Wirbelstromverluste im Schwingkreis
- Aufschwingung > Dämpfen des Oszillators

Durchmesser	max. Schaltfrequenz, kHz
< 8 mm	5
< 12 mm	2
< 20 mm	1
> 20 mm	0,5

6.2.2.2 VORTEILE UND NACHTEILE

- + weite Verbreitung in der Automatisierungs- und Verfahrenstechnik
- + arbeiten berührungslos und rückwirkungsfrei
- + wegen geschlossener Bauform resistent gegen Umwelteinflüsse
- + hohe Zuverlässigkeit
- + keinen Einfluss von nichtmetallischer Verschmutzung
- + kein Kontaktprellen und Verschleiß
- + hohe Schaltfrequenz (bis 5 kHz)
- + keine Rückwirkung auf die Werkstoffoberfläche
- + dem Abstand proportionales Analogsignal möglich
- + preisgünstiger als optische Sensoren
- + sehr hohe Messgenauigkeit möglich (< 0,01 mm)
- es lassen sich nur leitende Materialien detektieren
- nur kurze Reichweite. Faustformel: Schaltabstand = 0,5 Durchmesser
- gegenseitige Beeinflussung (vorgeschriebener Abstand ist einzuhalten)

6.2.2.3 ANWENDUNGSBEISPIELE

Objektdistanz über/unterschritten: Autoindustrie usw.

6.2.3 KAPAZITÄT

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

Material	ε_r
Papier	1,2...3
PVC	3
Glas	3...5
Alkohol	25
Wasser	81
Messprinzip:	



- Sensor erzeugt elektrisches Streufeld
- Objekt, das ins Streufeld kommt, erhöht die Kapazität des Sensors

6.2.3.1 NENNSCHALTABSTAND

Normmessplatte: Metall $a, b > D$ oder $3S_n$

Nennschaltabstand hängt ab von:

- Bauform des Sensors
- äußere Bedingungen
- Form, Abmessung und Materialeigenschaften des zu erfassenden Objektes

Material	$\sim \varepsilon_r$	\sim Materialfaktor
Öl	2	0,25
Eis	5	0,38
PVC	5	0,4
Keramik	5	0,5
Glas	5	0,6
Alkohol	25	0,75
Wasser	81	1,0

Störfaktoren:

- Fremde Objekte
- Oberflächenbeschaffenheiten
- Feuchtigkeit, Spritzwasser
- Staub, Verschmutzung
- elektrische Wechselfelder
- Temperatur

6.2.3.2 VOR-/NACHTEILE

- + erfasst praktisch alle Materialien (bes. wasserhaltige und Metalle)
- + hohe Zuverlässigkeit, keine beweglichen Teile
- + Schaltfrequenz: 5 . . . 50 Hz (kleiner als bei ind. aber größer als bei mech. Sensoren)
- + völlig berührungslos und rückwirkungsfrei
- + Kontakt mit Medium nicht erforderlich (und damit Betrieb unter widrigsten Bedingungen möglich)
- + berührungslose Erfassung selbst durch Wände oder PTFE-Schutzhüllen hindurch
- teurer als induktive Sensoren
- kurzreichweitig. Schaltabstände sind aber größer als bei induktiven



- Streukapazität zu klein: eine bestimmte minimale Sensorfläche nötig
- nicht so klein wie induktive (min. Fläche ca 1 cm^2)
- anfälliger gegen Störungen, z.B. durch Wasser oder Ablagerungen
- wird von allen Objekten im Streufeld beeinflusst
- Reproduzierbarkeit: schlechter als bei induktiven Sensoren
- Gegenseitige Beeinflussung: wie bei den induktiven Sensoren

6.2.3.3 ANWENDUNGSBEISPIELE

Messgrößen:

- Anwesenheit des Objektes im bestimmten Raum
- Objektdistanz über/unterschritten
- Niveau

Bspw. Füllstand einer Flasche.

6.3 LICHTSCHRANKEN/-TASTER

6.3.1 GRUNDLAGEN

6.3.1.1 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG

sichtbares Licht: $380 \text{ nm (blau)} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm (rot)}$

ROT GEGEN INFRAROT

Infrarot: $\lambda = 950 \text{ nm}$

Infrarot

- + 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 sichtbare Fremdlichtstörungen
- IR-Lichtfleck ist nicht sichtbar → schwierigere Montage und Justage

Rotlicht

- + Polfilter für Rotlicht sind besser und preiswerter
- + Dämpfungen in Lichtleitern ist geringer
- + Lichtfleck ist sichtbar → einfachere Montage und Justage
- Störende Wirkung des Tageslichts
- kleinere Abstrahlleistung als bei Infrarot-LED



6.3.1.2 REFLEKTION

Reflektionsarten:

- ideal spiegelnd (Eintrittswinkel = Austrittswinkel)
- gerichtet diffus (Austrittswinkel entspricht grob dem Winkel des Austrittswinkels)
- ideal diffus (komplette Streuung des Austrittswinkels)

6.3.1.3 POLARISATION

Metallobjekte: Polarisationsrichtung wird nicht geändert.

Tripel Spiegel: Polarisationsrichtung wird um 90° gedreht.

6.3.2 ARTEN VON LICHTSCHRANKEN/-TASTER

- Einweg-Lichtschanke (bis 100 m)
- Reflexions-Lichtschanke (bis 4 m)
- Reflexions-Lichttaster (bis 0,5 m)

Messprinzip: Lichtstrahl wird unterbrochen

Erfasst wird: Lichtmenge auf dem Empfänger

6.3.2.1 EINWEG LICHTSCHRANKEN

Schaltet nur, wenn Lichtstrahl von Sender zum Empfänger durch kommt.

Funktionsreserve = $\frac{\text{Lichtintensität auf Empfänger}}{\text{Schaltschwellwert}}$

- + große Wegstrecken (bis > 100 m)
- + 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 Empfänger leuchtet

VOR-/NACHTEILE

- hoher Preis (zwei Geräte mit Linsensystemen und Elektronik)
- teure Installation von zwei getrennten Geräten
- aufwändige Justierung bei größeren Überwachungsstrecken
- unsicheres Erkennen von transparenten Gegenständen

Anwendungen:

- Papierstau in Drucker



- Einfahrt in Garage
- Durchgang in Tür

Messgrößen:

- Anwesenheit des Objektes im bestimmten Raum
- Niveau

6.3.2.2 REFLEXLICHTSCHRANKE

Ein Gerät mit Sender und Empfänger. Gerät sendet zu einem Retroreflektor-Bauteil und misst die (vorhandene) Reflexion.

Zwischen Sender(LED) und Empfänger(Fotodiode) liegt ein Blindbereich (also ein Abstand von dem Gerät), in dem die Reflexion nicht gemessen werden kann. Lösung dafür: Sender und Empfänger werden im Gerät durch Spiegel an eine Position gebracht, dadurch ist der Weg des Lichts gerade und es gibt keinen Blindbereich.

RETROREFLEKTOR

Ist kein einfacher Spiegel, sondern ein „Katzenauge“:

- Tripelspiegel (3 Spiegel senkrecht zueinander). Dreht die Polarisationsrichtung um 90° .
- Reflexfolie (Folie mit vielen durchsichtigen Kugeln eingebettet in reflektierendem Material)

REFLEXIONSCHRANKE MIT GEKREUZTEN POLFILTERN

Erkennung von hochreflektierenden und transparenten Objekten. Durch normale Objekte wird die Polarisation des gesendeten Lichts nicht geändert. Das kann erkannt werden.

VOR-/NACHTEILE

- + nur ein kompaktes Gerät für Sender und Empfänger
- + einfache Montage
- + sicheres Erkennen von undurchsichtigen Gegenständen und spiegelnden Objekten (mit Polfiltern)
- Blindbereich
- mittlere Reichweite, da doppelter Strahlenweg
- unsicheres Erkennen von transparenten Gegenständen
- Funktionsreserve ist klein
- Verschmutzung ist sehr kritisch
- Störung durch Witterungseinflüsse wie Schnee, Nebel und Eisbesatz an den Linsen

6.3.2.3 REFLEXLICHTTASTER

Tastet ohne Reflektor.

Intensitäts-RLT: Tastet zwischen 3 mm und maximal 200 mm

Autokollimations-RLT: kein Blindbereich, sehr kleine Tastweite



WINKELLICHTVERFAHREN (NAHBEREICHTASTER)

Sensoren sind durch die (Winkel-)Position zueinander für eine Distanz genau eingestellt.

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

TRIANGULATIONSVERFAHREN

Der Empfänger im Gerät nimmt zwei Messungen nebeneinander durch eine kippbare Linse vor. Dadurch bekommt man mehrere Werte, wenn mehrere Objekte getroffen wurden.

Es wird die Differenz der Lichtmengen der beiden Messungen ausgewertet.

- + keine Störungen durch hellen Hintergrund oder Fremdlicht
- + kein Einfluss der Farbe, Größe
- + auf eine bestimmte Tastweite einstellbar
- teurer

POSITION SENSITIVE DETECTOR (PSD)

Der Empfänger im Gerät (PSD) kann messen, wo die Reflexion eintrifft und damit den Abstand messen. Je näher das Objekt, desto flacher der eintreffende Lichtwinkel

- + keine Mechanik
- + geringer Blindbereich
- + automatische Abstandmessung
- + geringere Anfälligkeit gegen Fremdlicht
- noch teurer

VOR-/NACHTEILE REFLEX-LICHTTASTER

- + direktes Abtasten von Gegenständen
- + einfache Montage
- + transparente Objekte sind besser erkennbar als bei der EW- oder R-LS
- + beim LT mit Hintergrundaussblendung ist eine Abstandsmessung möglich
- geringere Tastweiten im Vergleich zu den Reichweiten der Lichtschranken. Bei gleicher Bauweise verhalten sich die Tastweiten bei der EW-LS, R-LS und R-LT wie 20 : 5 : 1
- Störungen durch Hintergrund (Spiegel, Metall, weiß)
- Hintergrundaussblendung mit noch geringeren Tastweiten möglich
- keine präzisen Schaltpunkte. Die Tastweite ist abhängig von:
 - von den Reflexionseigenschaften der zu erfassenden Objekte
 - der Verschmutzung der Linsen



ANWENDUNGSBEISPIELE

Messgrößen:

- Anwesenheit des Objektes im bestimmten Raum
- Objektdistanz über/unterschritten
- Niveau
- Objektzustand (bspw. Gewinde vorhanden)

Gemessen wird bspw.:

- Erkennung von Rollende (Papier)
- Erkennung von Referenzmarken (gelochtes Papier)
- Erkennung von Chiporientierung (Fließband)

