

Komplexpraktikum Automatisierungstechnik

Sensorik

1. Zielstellung des Versuches

Gewinnung von Messinformation mit industriellen Sensoren unter Berücksichtigung ausgewählter Einfluss- und Störgrößen. Am Beispiel induktiver, magnetischer, kapazitiver, optischer und akustischer Distanz-Sensoren sollen relevante Kennfunktionen, Einsatzmöglichkeiten und Leistungsgrenzen in Abhängigkeit vom Wirkprinzip bestimmt werden.

2. Theoretische und experimentelle Grundlagen des Versuches

2.1 Einführung

Aufgabe von Sensoren (auch: Aufnehmer, Geber, Fühler, Wandler, Transducer, pick-up ...) ist es, Messgrößen $x_e(t)$ in elektrische, pneumatische oder optische Mess-Signale $x_a(t)$ zu wandeln, die mit technischen Systemen günstig weiterverarbeitet und genutzt werden können. Zur Wandlung der Messgrößen $x_e(t)$ werden in den Sensoren die Verfahren wahlweise oder gleichzeitig genutzt:

- physikalische Effekte (z.B. Piezoeffekt)
- Modulationsverfahren (z.B. Frequenz-Modulation)
- strukturelle Methoden (z.B. Kompensationsmethode)
- Verfahren zur Signalverarbeitung (z.B. Filterung)

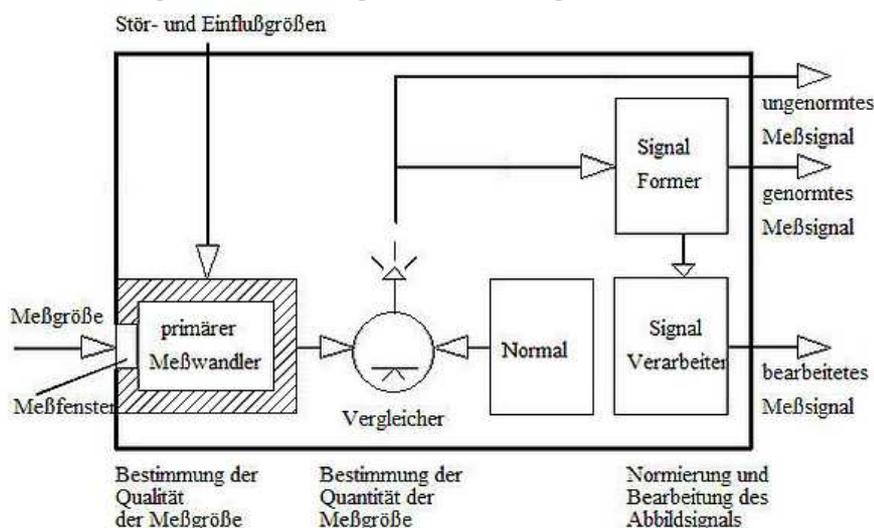


Bild 1: Schema eines Sensors

Die Gesamtheit der in einem Sensor genutzten Effekte, Verfahren und Methoden bildet dessen Wirkprinzip. Ein Mess-Signal $x_a(t)$ liefert Informationen über die **Qualität** (Größenart) und die **Quantität** (Betrag) einer Messgröße $x_e(t)$. Die Qualität der Messgröße $x_e(t)$ wird durch den primären Wandlungseffekt des Sensors bestimmt. Er soll als "**selektives Messfenster**" wirken und nur die interessierende Messgröße $x_e(t)$, z.B. eine Geschwindigkeit in ein Mess-Signal $x_a(t)$ wandeln.

Gleichzeitig auf den Sensor einwirkende Störgrößen, z.B. Temperaturschwankungen müssen abgeschirmt oder durch sensorinterne Maßnahmen in ihrer Wirkung auf das Mess-Signal $x_a(t)$ reduziert werden. Die Quantität der Messgröße $x_e(t)$ wird durch Vergleich mit einem Normal ermittelt. Mess-Signale $x_a(t)$ können unmittelbar angegeben, auf genormte Wertebereiche (z.B. 4...20mA) begrenzt, oder einer Signalverarbeitung (z.B. Filterung) unterworfen werden. Abhängig vom Wertevorrat des Informationsparameters des Messwertes $x_a(t)$ am Ausgang eines Sensors wird zwischen analogen, digitalen oder binären Sensoren unterschieden.

Analoge Sensoren wandeln wert-/zeit-kontinuierliche Messgrößen in wert-/zeit-kontinuierliche Ausgangssignale (meist: Spannung, Strom). Dabei wird eine lineare Kennlinie angestrebt, (Bild 2a). Bei **digitalen Sensoren** ist das Ausgangssignal wert-diskret, bei binären Sensoren treten am Ausgang nur zwei Werte auf: Hoher Spannungswert = High, niedriger Spannungswert = Low (Bild 2b). Häufig wird einem analogen Sensor ein Analog-Digital-Wandler (ADC) nachgeschaltet.

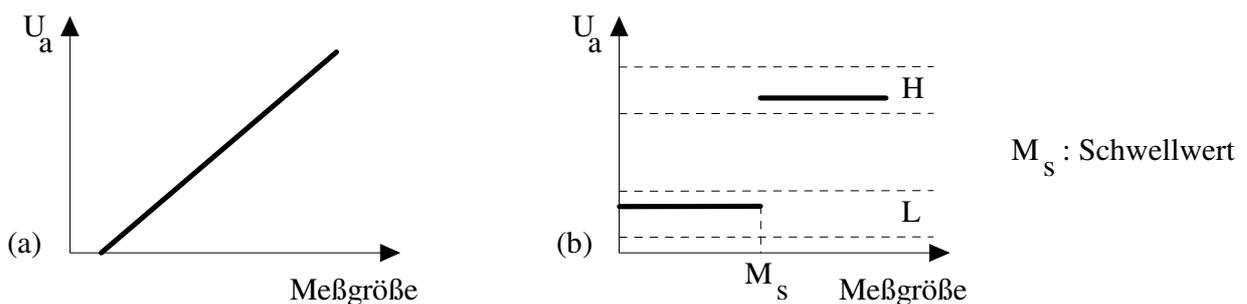
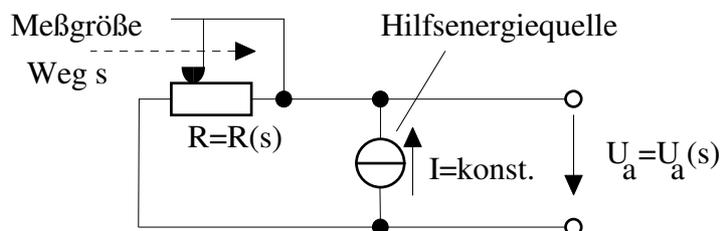


Bild 2: Kennlinienbeispiele: (a) analoger Sensor mit linearer Kennlinie, (b) binärer Sensor

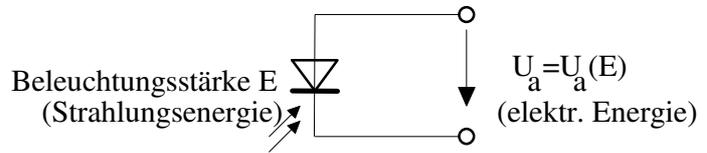
Abhängig davon, ob bei der Messgrößenwandlung Hilfsenergie erforderlich ist oder nicht, werden passive und aktive Sensoren unterschieden. Bei **passiven Sensoren** beeinflusst die Messgröße zunächst eine z.B. elektrische Größe (R, C, ε, æ, u, i usw.), die die Wirkung einer konstanten Hilfsenergie steuert.

Bild 3 :
Beispiel für einen passiven Sensor
(Resistiver Wegaufnehmer)

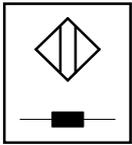


Ein **aktiver Sensor** wandelt die thermische, optische, mechanische usw. Energie der Messgröße in z.B. elektrische Energie des Ausgangssignals um und in Abhängig vom im Sensor genutzten primären physikalischen Wandlungseffekt wird zwischen induktiven, magnetischen, kapazitiven, optischen usw. Sensoren unterschieden.

Bild 4 :
Beispiel für einen aktiven Sensor
(Optischer Sensor)



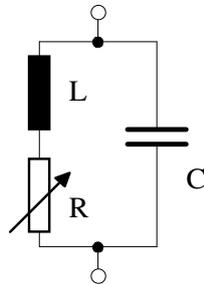
2.2 Wirkprinzipien binärer Distanz-Sensoren



Der **induktive binäre Distanz-Sensor** enthält einen Oszillator mit einem LC-Schwingkreis als frequenzbestimmendes Element. Werden elektrisch leitfähige Objekte in den Nahbereich des magnetischen Wechselfeldes der Schwingkreis-Induktivität gebracht, so kommt es auf Grund der im Objekt induzierten Wirbelströme zu einem Entzug von Schwingkreisenergie (vgl. Transformator mit sekundärseitiger Belastung). Zu einem ähnlichen Wirkungsverlauf kommt es

auch bei ferromagnetischen Objekten auf Grund der bei der Ummagnetisierung auftretenden Verluste. Das ist gleichbedeutend mit einer Senkung der Schwingkreisgüte Q , die Schwingung wird gedämpft. Im Extremfall kann sie sogar aussetzen, wenn die Schwingbedingung nicht mehr erfüllt ist. Der gedämpfte LC-Schwingkreis ist als Parallelkreis (Bild 5) mit Reihenwiderstand R darstellbar. In R lassen sich alle Verluste zusammenfassen (ohmsche und magnetische Verluste der Spule und solche, die durch die magnetische Verkopplung wirksam werden). Für die Güte des Schwingkreises gilt

Bild 5 :
Parallelschwingkreis



$$Q = Q(R) = \frac{\omega_0 L}{R}$$

mit der Eigenfrequenz

$$\omega_0 = \omega_0(R) = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$$

Beim Eindringen eines leitfähigen oder ferromagnetischen Objekts in das Magnetfeld der Spule wird der Schwingkreis bedämpft und gleichzeitig seine Eigenfrequenz verändert. Erreicht die Dämpfung einen bestimmten Schwellwert, wird dies binär signalisiert (Bild 6).

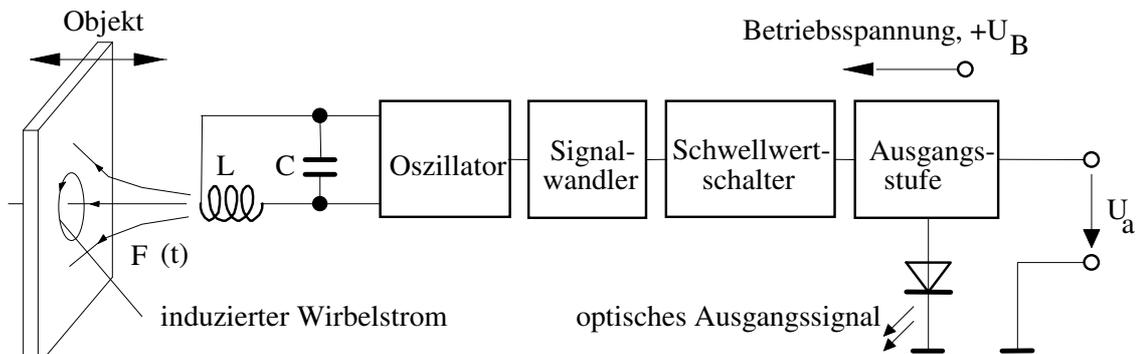
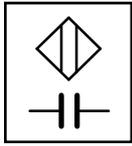
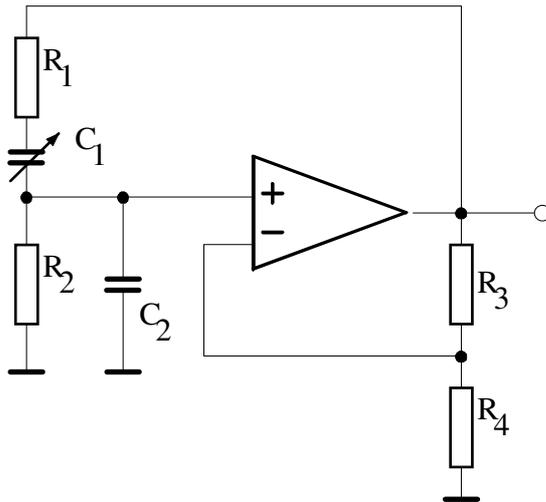


Bild 6: Induktiver Distanz-Sensor



Im Gegensatz zum induktiven Sensor wird beim **kapazitiven binären Distanz-Sensor** das elektrische Feld eines zu einem RC-Oszillator gehörigen Kondensators C von außen beeinflusst. Leitfähige Objekte im Nahbereich reduzieren den effektiven Plattenabstand und vergrößern somit die Kapazität C. Auch dielektrische Objekte mit $\epsilon_r > 1$ wirken kapazitätserhöhend. Die Kapazitätsänderungen sind

klein und nicht unmittelbar auswertbar. Deshalb wird der Kondensator als Element C_1 eines RC-Oszillators (Wien-Robinson-Oszillator, Bild 7) geschaltet. Die Brücke wird so dimensioniert, dass erst bei einer Erhöhung der Kapazität von C_1 um einen definierten Wert ΔC_1 eine Schwingung angefacht wird. Die angefachte Schwingung wird in ein binäres Ausgangssignal $x_a(t)$ gewandelt. Die Schwingbedingung lautet:



$$\frac{R_3}{R_4} \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1},$$

und die Schwingfrequenz ergibt sich aus

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 R_1 C_2 R_2}.$$

Bild 7: Wien-Robinson-Oszillator

Im Bild 8 ist ein kapazitiver Distanz-Sensor bei Annäherung einer elektrisch leitfähigen Platte dargestellt, Bild 9 zeigt die typische Gestaltungsform der Kondensatorplatten.

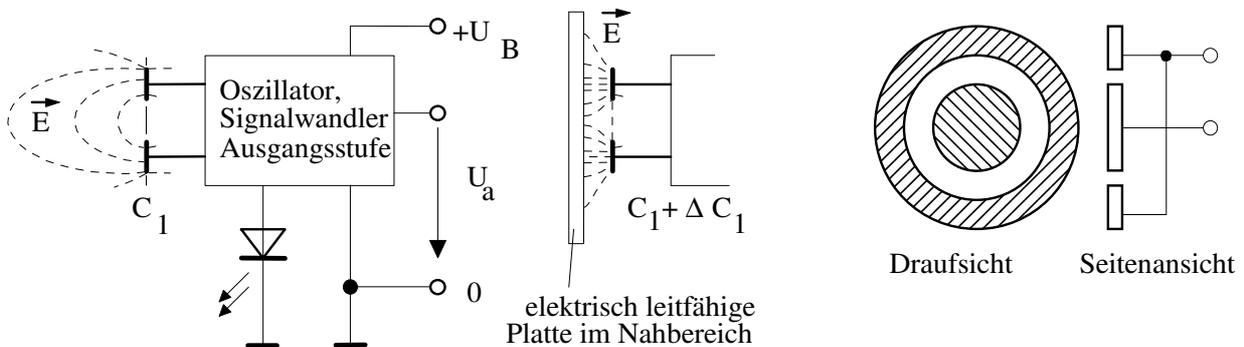
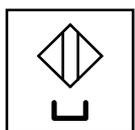


Bild 8: Kapazitiver Distanz-Sensor

Bild 9: Realisierte Anordnung der Kondensatorplatten

Magnetischer binärer Distanz-Sensor

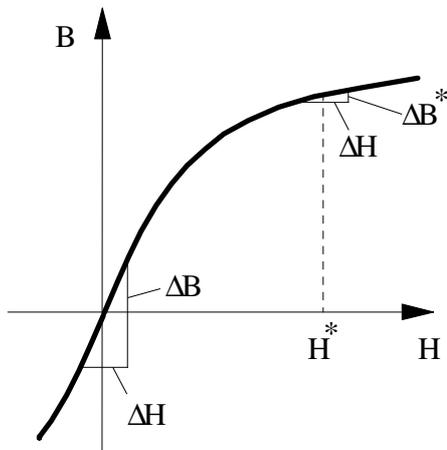


Der primäre Wandler von Sättigungskern-Sensoren ist eine Magnetspule mit hochpermeablem weichmagnetischen Kern. Dieser besteht meist aus amorphem Metall, dessen relative Permeabilität $\mu_r \sim B/H$ Werte bis $\mu_r = 500\,000$ erreichen kann. Die Magnetspule wird mit einem Impulsstrom (bis 100kHz) beaufschlagt. Bei jeder Impulsflanke wird ein Spannungsimpuls induziert. Seine Höhe hängt

von der gespeicherten magnetischen Energie und damit von Betrag und Richtung eines äußeren Magnetfeldes ab. Dieses Magnetfeld wird von einem sich nähernden Objekt geliefert.

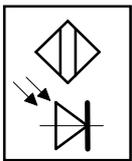
Die induzierte Spannung wird gleichgerichtet, gefiltert und ändert sich mit dem äußeren Magnetfeld, solange die Sättigung nicht erreicht wird. Eine weitere Möglichkeit zur Auswertung ist die Messung der Induktivität L oder die Güte Q der Magnetspule.

ΔH : Änderung der magnetischen



- H^* : Feldstärke bei Oszillatorbetrieb
- H^* : Von einem äußeren Objekt aufgeprägte magnetische Feldstärke (konstant)
- ΔB : Änderung der magnetischen Flussdichte bei fehlendem Gleichfeld ($\bar{H} = 0$)
- ΔB^* : Resultierende Änderung der magnetischen Flussdichte bei vorhandenem Gleichfeld ($\bar{H} = H^*$)

Bild 10 : Magnetische Kennlinie des Sättigungskerns



Der **optische binäre Distanz-Sensor** beruht auf dem Prinzip eines Reflektorkopplers. Er hat als Lichtsender eine Lichtemitterdiode im Infrarotbereich und als Empfänger einen Fototransistor (Bild 11). Der Empfänger wandelt die Intensität des an Objektoberflächen reflektierten Lichtes des Senders in eine elektrische Spannung. Diese Spannung wird bei einem definierten Schwellwert in ein binäres Ausgangssignal überführt. Die optischen Achsen von Sender und Empfänger bilden einen spitzen Winkel, so dass eine Kopplung nur durch ein in einem definierten Abstand vor dem Sensor befindliches reflektierendes Objekt verursacht wird.

Zur Vermeidung von Störungen durch gleichförmige oder schwankende Fremdlichteinflüsse (z.B. benachbarter Sensor, Sonne) wird der Empfänger mit einem gepulsten Sender synchronisiert und der Empfangsverstärker auf die Impulsfolgefrequenz des Oszillators abgestimmt, so dass andere Störfrequenzen unterdrückt werden. In den Sendepausen wird der Empfänger gesperrt. Das Messfenster des Empfängers ist mit einem Infrarotfilter versehen, um Fremdlicht mit längerer oder kürzerer Wellenlänge zu dämpfen.

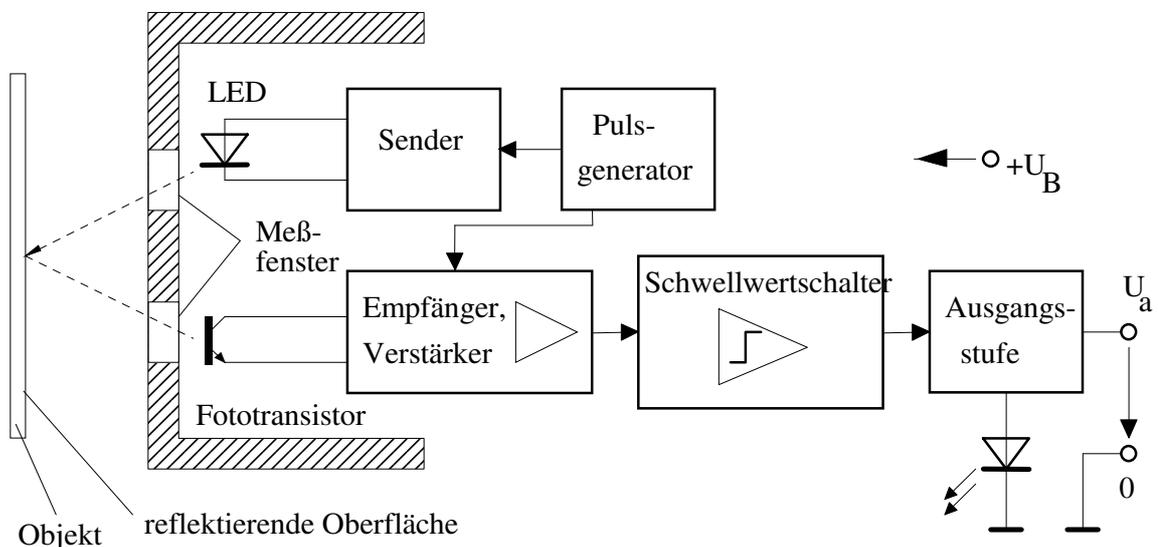


Bild 11 : Optischer Distanz-Sensor

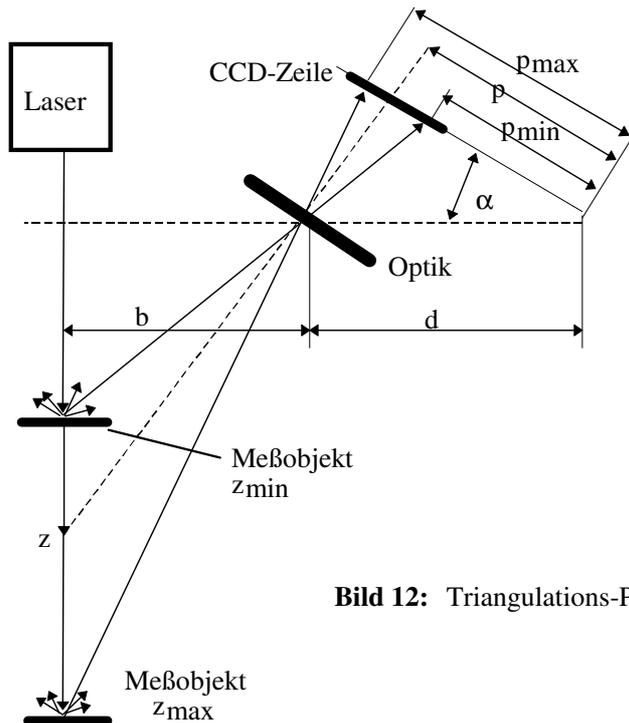


Bild 12: Triangulations-Prinzip

Bei einem Distanz-Sensor nach dem **Triangulations-Prinzip** wird ein Laserstrahl auf das Messobjekt gerichtet. Das vom Objekt diffus reflektierte Licht wird durch eine Optik auf einen positionsempfindlichen Photoempfänger, z.B. CCD-Zeile, fokussiert. Über Winkelbeziehungen kann von der Lage des Fokus auf die Entfernung des Messobjektes geschlossen werden.



Akustische Distanz-Sensoren nutzen als primären Wandlungseffekt die Änderung der Laufzeit τ oder der Intensität I von Ultraschall beim Durchlaufen einer Wegstrecke.

Beim **akustischen Impuls-Sensor** wird von einem piezoelektrischen Wandler ein kurzer Schallwellenimpuls abgesandt. Dieser durchläuft mit Schallgeschwindigkeit $c \sim 340$ m/s die Strecke s bis zu einem Objekt und wird dort reflektiert. Der reflektierte Impuls wird vom gleichen piezoelektrischen Wandler aufgenommen und in ein elektrisches Signal gewandelt (siehe Bild 13). Es zeigt das Vorhandensein des Objekts an.

Aus der Laufzeit Δt des Schallimpulses lässt sich die Entfernung $s = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$ des Objekts bestimmen.

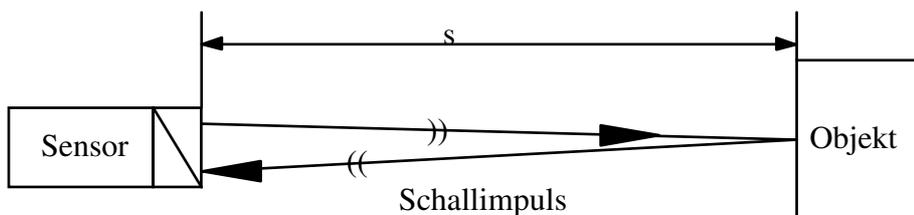


Bild 13: Wirkungsweise des akustischen Impuls-Sensors

2.3 Eigenschaften und Kennwerte von Distanz-Sensoren

Der **Nennschaltabstand** s_n ist der Abstand zwischen dem Messobjekt und der Frontfläche des Sensors, bei dem ein Schaltvorgang unter **Referenzbedingungen** ausgelöst werden würde. Beispielsweise wird für induktive Sensoren als Referenzobjekt eine quadratische Platte aus Stahl (St37, Dicke 1mm) verwendet. Der Nennschaltabstand ist ein Nennwert, bei dem Umgebungseinflüsse und Fertigungstoleranzen unberücksichtigt bleiben.

Der **Schaltabstand** s (auch: Arbeitsschaltabstand) ist der Schaltabstand unter **Prozessbedingungen**. Er ist abhängig vom Material und der Größe des Objektes, von Umgebungseinflüssen und Fertigungstoleranzen sowie von der Einbautechnologie des Sensors im Träger. Ist beispielsweise die aktive Fläche eines induktiven Sensors nicht von elektrisch leitfähigem Material umgeben (nichtbündiger Einbau), sind größere Schaltabstände als beim bündigen Einbau möglich.

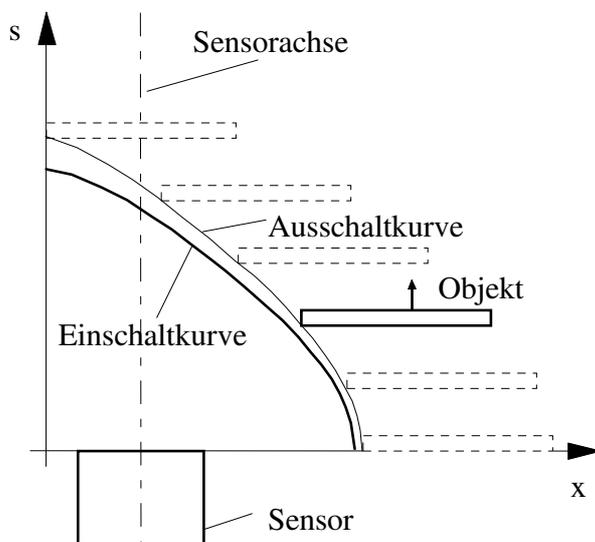
Das Verhältnis von Schaltabstand s zum Nennschaltabstand s_n wird als **Reduktionsfaktor** R bezeichnet: $R = s / s_n$. Beispiele für Reduktionsfaktoren bei Messung mit induktiven Sensoren : Al-Folie 0,95; Al 0,5; rostfreier Stahl 0,7; Messing 0,55; Cu 0,45.

Die Differenz zwischen **Ausschaltabstand** s_a beim Entfernen und **Einschaltabstand** s_e beim Nähern des Objektes, wird als **Hysterese** bezeichnet. Als Kennwert gibt man die **Schalthysterese** H bezogen auf den Nennschaltabstand s_n an: $H = (s_a - s_e) / s_n$.

Die **maximale Schaltfrequenz** f_s (häufig auch nur: Schaltfrequenz) gibt an, wie viele Schaltvorgänge pro Zeiteinheit für einen Sensor maximal möglich sind. Das Verhältnis von Ein- zu Ausschaltzeit beträgt dabei üblicherweise 1 : 2.

$$\text{Max. Schaltfrequenz} = \frac{1}{\text{Ansprechzeit} + \text{Abfallzeit}}$$

Die Ansprechzeit ist die Zeitdauer zwischen der Beeinflussung des Sensors und dem Durchschalten seines Ausgangs. Damit der Schalter anspricht, muss die Zeitdauer der Beeinflussung größer/gleich der Ansprechzeit sein. Die Abfallzeit ist die Zeitdauer zwischen der Beeinflussung des Sensors und dem Öffnen des Ausgangs.



Aus den **Ansprechkurven**, den Grenzlinien für das Ansprechen des Sensors, lassen sich Aussagen über den Schaltabstand bei gleichzeitig axialer (s -Richtung) und radialer (x -Richtung) Verschiebung eines Objektes gewinnen.

Bild 14 : Ansprechkurven eines Sensors

3. Versuchsvorbereitung (vor Versuchsbeginn zu lösende Aufgaben, bitte 1 Blatt Millimeterpapier zum Versuch mitbringen)

- 3.1 Erklären Sie die Beeinflussung der Schwingkreisgüte beim induktiven Sensor für elektrisch leitfähige Proben! Hinweis: Stellen Sie die Zusammenhänge qualitativ entweder mit Hilfe eines Zeigerdiagramms oder einer geeigneten elektrischen Ersatzschaltung oder über die Feldbeziehungen her.
- 3.2 Berechnen Sie für einen induktiven Sensor die Änderung der Güte des Schwingkreises bei einer Änderung des Verlustwiderstandes von $\Delta R = +5 \Omega$.
Gegeben sind: $L = 100 \text{ mH}$, $C = 3,3 \text{ nF}$, $R = 30 \Omega$.
- 3.3 Ist es beim induktiven Sensor zweckmäßiger, die Güteänderung oder die Frequenzänderung zur Messgrößenwandlung zu nutzen? Begründen Sie Ihre Aussage mit Hilfe der Beziehungen für den Parallelschwingkreis!
- 3.4 Diskutieren Sie anhand der Formel für den Plattenkondensator Beeinflussungsmöglichkeiten der Schwingkreiskapazität eines kapazitiven Sensors!
- 3.5 Welche Frequenz f_0 wird beim Wien-Robinson-Oszillator angefacht?
Gegeben sind: $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 3,3 \text{ nF}$.
Bestimmen Sie die jeweilige Frequenzänderung bei $C_1 = 3,30 \text{ nF}$ und $3,33 \text{ nF}$.
- 3.6 In welchen Fällen ist ein Ansprechen der Sensoren durch leitfähige bzw. isolierende Gehäusewände hindurch möglich?
- 3.7 Warum ist eine fehlende bzw. eine zu große Hysterese eines Distanz-Sensors beim praktischen Einsatz ungünstig?
- 3.8 Diskutieren Sie die Abhängigkeit des Schaltabstandes eines optischen Sensors von der Beschaffenheit der Materialoberfläche des Messobjektes und dessen Lage.
- 3.9 Der von einem Objekt im Bereich $[z_{\min}; z_{\max}]$ reflektierte Laserstrahl trifft an der Position p auf den optischen Positionssensor. Geben Sie eine Gleichung $z = z(p)$, mit der aus der Position p eine Objektentfernung $z_{\min} < z < z_{\max}$ bestimmbar ist.

Auflistung der im Versuch verwendeten Sensoren, Materialproben und Gase

Vorhandene Distanz-Sensoren:

- | | | |
|---|--------------------------|--|
| 1 | Induktiver Sensor | NJ 5-18 GM50-E2-V1 |
| 2 | Magnetfeldsensor | MJ 60-12 GM-E2-V1 |
| 3 | Optischer Sensor | OJ 200-18 GM-E2-V1 |
| 4 | Ultraschallsensor | UJ300-30GM-E2-V1 |
| | Spannungsanschluss 1 - 4 | Pluspol rot, Minuspol blau, Ausgang schwarz, weiß n.b. |
| 5 | Kapazitiver Sensor | CJ 8-18 GM-E2-V1 |
| | Spannungsanschluss: | Pluspol rot, Minuspol blau, Ausgang schwarz |
| 6 | Triangulationssensor | LD 1605-100 |
| | Spannungsanschluss: | Pluspol rot, Minuspol blau |

Objekte / Materialproben:

(Maßangaben in mm, Trägermaterial Cevaunit)

- | | | |
|----|------------------|----------------------------|
| 1 | Stahl St37 | 10x18x1 |
| 2 | Aluminium | 10x18x1 |
| 3 | Messing | 10x18x1 |
| 4 | Schaumstoff | 100x100x10 |
| 5 | Pappe | 100x100x10 |
| 6 | Platine einfach | 62,5x18x1 |
| 7 | Platine dick | (Cevaunit, dick = doppelt) |
| 8 | Platine dünn | (Cevaunit, dünn) |
| 9 | Spiegel | |
| 10 | Dauermagnet | groß |
| 11 | Kupfer | |
| 12 | Kunststoffplatte | standardweiß |
| 13 | Kunststoffplatte | mattschwarz |
| 14 | Kunststoffplatte | schwarzglänzend |
| 15 | Korkfläche | |

4. Aufgabenstellung für die Versuchsdurchführung, Hinweise zur Versuchsauswertung

4.1 Untersuchen Sie mit dem **induktiven Sensor** folgende Materialproben: Stahl, Aluminium, Cevausit-Platine (dünn). Bestimmen Sie die Reduktionsfaktoren (Nennschaltabstand $s_n = 5\text{mm}$) bzw. charakterisieren Sie das Schaltverhalten!

4.2 Bestimmen Sie mit dem **kapazitiven Sensor** jeweils die Ein- und Ausschaltpositionen für Stahl und Cevausit (dünn) und berechnen Sie daraus die Schalthysterese. Kontrollieren Sie vor der eigentlichen Messung die Empfindlichkeit des kapazitiven Sensors: **Messen** Sie, den Schaltabstand s_e bei der Materialprobe Stahl (etwa 5mm) beträgt. Setzen Sie dann für die Rechnungen $s_e = s_n$!

Legen Sie den kapazitiven Sensor auf dem Arbeitstisch neben das leere Polystyrolgefäß. Wählen Sie den Abstand so, dass der Sensor gerade nicht anspricht. Füllen Sie Wasser in das Gefäß und halten Sie Ihre Beobachtungen fest.

4.3 Ermitteln Sie die Ansprechkurve des **induktiven Sensors** mit der Materialprobe Stahl aus 8 Messwertpaaren (Querverschiebung x am Materialprobenträger vorgeben, Ausschaltabstand s_a mit Hilfe des Mess-Schlittens bestimmen).

4.4 Legen Sie den **magnetischen Sensor** - wie im Bild 17 dargestellt – am besten auf ein Blatt Millimeterpapier vor die Experimentiereinrichtung auf den Tisch. Bestimmen Sie die Ansprech-Kurven für beide dargestellte Orientierungen des großen Dauermagneten.

Simulieren Sie danach mit vorhandenen Materialproben verschiedene Gehäusewände vor der Stirnfläche des magnetischen Sensors und halten Sie das Ergebnis (Schaltverhalten) fest.

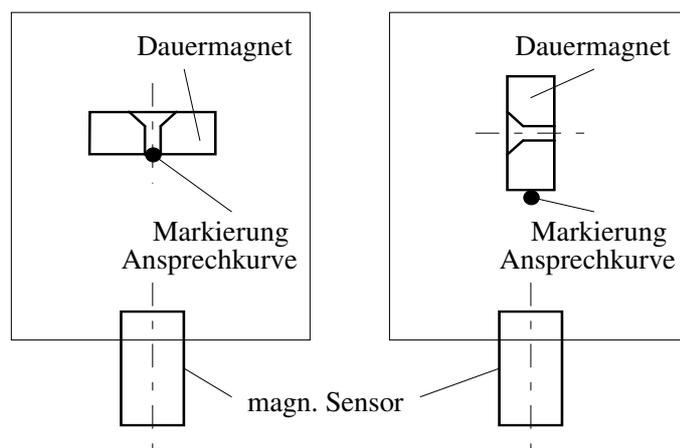


Bild 17: Ermittlung von Ansprechkurven des magn. Sensors

4.5 Bestimmen Sie mit dem **optischen Sensor** die Ausschaltposition s_a bei jeweils 0° , 15° , 30° , 45° und 60° Neigung der Materialoberflächen: Standardweiß, spiegelnde Aluoberfläche und mattschwarzer Kunststoff.

Befestigen Sie bei dieser Messung den Materialprobenträger auf der linken Seite der Segmentscheibe. Tragen Sie alle Messwerte in eine gemeinsame Tabelle ein und diskutieren Sie das Ergebnis!

Prüfen Sie ob und unter welchen Bedingungen (Materialbeschaffenheit) eine einfache Objekterkennung mit dem Sensor möglich ist?

- 4.6** Untersuchen Sie das Schaltverhalten des **Ultraschallsensors** mit den Probeträgern „Stahl, Schaumstoff und Cevaunit“ bei 0°- und 45°- Stellung des Probeträgers. Beachten Sie dabei, dass sich die Strecke zum Sensor vom hinteren Steckplatz wie unter Punkt 4.5 verlängert.
- 4.7** Nehmen Sie die Kennlinie $U(z)$ des **Triangulationssensors** mit der Kork-Probe auf. Wie groß ist die Empfindlichkeit des Sensors?
- 4.8** Befestigen Sie den **induktiven Sensor** mit der Stirnfläche zur Teilung der Segmentscheibe auf dem Sensorschlitten. Positionieren Sie den Sensor so, dass die innere Teilung sichere Schaltvorgänge bewirkt. Regeln Sie die Drehzahl so ein, dass der elektronische Zähler eine Schaltfrequenz von 75Hz anzeigt.
Messen Sie die Schaltfrequenz bei unveränderter Drehzahl auf der äußeren Teilung.
Berechnen Sie für beide Messungen die Drehzahl! Wiederholen Sie den Versuch mit der Schaltfrequenz 95Hz auf der inneren Teilung. Was schlussfolgern Sie aus den Messergebnissen?

5. Literatur

- [1] Schröter, E.: Elektrische Messtechnik
Hemser Verlag, München 1990
- [2] Profos, P.; Pfeifer, T. (Hrsg.) Handbuch der industriellen Messtechnik
Oldenbourg Verlag München, Wien 1992
- [3] Hart, H.: Einführung in die Messtechnik
4. Aufl., Verlag Technik, Berlin 1986
- [4] Tränkler, H.-R.: Taschenbuch der Messtechnik
2. Aufl., Oldenbourg Verlag, München 1990
- [5] Bleicher, M.: Halbleiter-Optoelektronik
Hüthig Verlag, Heidelberg 1986
- [6] Schnell, G.: Sensoren in der Automatisierungstechnik
Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [7] Schaumburg, H.: Sensoren
Teubner, Stuttgart

Erarbeitet: Prof. Dr. L. Zipser, Dipl.-Ing. L. Benke, Dipl.-Ing. W. Zschögner
Überarbeitet: Prof. Dr. L. Zipser, DI L. Benke, März 1999
Überarbeitet: Dipl.-Ing. (FH) W.-D. Bretschneider, Februar 2015