

Formelsammlung Messtechnik & Sensorik (ET054)

Änderungshistorie

- 01.06.2007 Definitionen, systematische und zufällige Fehler
- 03.06.2007 Dynamische Fehler, Genauigkeitsklassen bei Messgeräten, Leitfaden
Messunsicherheit
- 11.06.2007 Empfindlichkeit, Messwerke, Multimeter
- 14.06.2007 Messungen in einphasigem Wechselstromkreis, Messung von ohmschen
Widerständen, Temperatursensoren, Drucksensoren, Messverstärker
- 30.06.2007 Grundsaltungen der Messverstärker, Photometrie, Optische Sensoren
- 11.07.2007 CCD

Inhalt

Änderungshistorie.....	1
Inhalt.....	2
Definitionen.....	3
Systematische Fehler.....	4
Zufällige Fehler.....	5
Leitfaden: Messunsicherheit.....	6
Dynamische Fehler.....	7
Genauigkeitsklassen bei Messgeräten.....	7
Analoge Messwerke.....	8
Digital Multimeter.....	8
Messung von Wechselgrößen.....	9
Messungen im einphasigen Wechselstromkreis.....	9
Messung von ohmschen Widerständen.....	10
Temperatursensoren.....	11
Kraft und Drucksensoren.....	12
Photometrie.....	13
Optische Sensoren.....	14
Messverstärker.....	15

Definitionen

Messen

Quantitatives Erfassen einer Größe, der sog. Messgröße. Sie wird durch experimentellen Vergleich als Vielfaches einer allg. anerkannten Einheitsgröße der selben physikalischen Dimension bestimmt.

Ausschlagsmethode

Messgröße wird direkt oder über Zwischengrößen in einen Ausschlag umgewandelt. Entzug von Energie aus Messobjekt bedeutet Rückwirkung auf Messgröße.

Kompensationsmethode

Von der Messgröße wird eine mit einer Hilfsquelle erzeugte Kompensationsgröße subtrahiert, sodass die Differenz gerade Null ergibt. Rückwirkungsfreie Messmethode.

Messsignal

Zeitfunktion einer Messgröße; Träger von Information

Messergebnis

Messwert \pm Messunsicherheit; korrigierter Messwert \pm Messunsicherheit; Mittelwert \pm Messunsicherheit

Empfindlichkeit

Änderung des Ausgangssignals bezogen auf die Änderung des Eingangssignals. Bei digitalen ist der kleinste mögliche Ziffernschritt ("least significant digit") ausschlaggebend.

Garantiefehlergrenze

Maximal möglicher Fehler.

Klassengenauigkeit

Maximal möglicher Fehler in Prozent vom Messbereichsendwert (analoge Geräte). Bei digitalen Messgeräte wird der Fehler in Prozent vom gemessenen Wert angegeben.

Systematische Fehler

Wahrer Messwert

$$x_w = x - \Delta x \quad \begin{array}{l} x_w: \text{wahrer Wert} \\ \Delta x: \text{absoluter Fehler} \end{array}$$

$$x_w = x \left(1 - \frac{\Delta x}{x} \right)$$

Messfehler

$$\Delta x = x - x_w \quad \Delta x: \text{absoluter Fehler}$$

$$\Delta x_r = \frac{\Delta x}{x} \quad \Delta x_r: \text{relativer Fehler}$$

Fortpflanzung

für Einzelmessfehler klein gegenüber
Einzelmessgröße:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\delta f}{\delta x_i} \Delta x_i \quad \begin{array}{l} \Delta y: \text{Gesamtfehler} \\ f: \text{Funktion} \end{array}$$

Fortpflanzungs-Regeln für bekannte Fehler

- Addition der Messgrößen → Addition der absoluten Fehler
- Subtraktion der Messgrößen → Subtraktion der absoluten Fehler
- Multiplikation der Messgrößen → Addition der relativen Fehler
- Division der Messgrößen → Subtraktion der relativen Fehler

Maximaler absoluter Fehler

$$\text{absolut: } \Delta y_{\max} = \pm \sum_{i=1}^n |\Delta x_i|$$

$$\text{relativ: } \frac{\Delta y_{\max}}{y} = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right|$$

Wahrscheinlicher Fehler

$$\text{absolut: } \Delta y_{\text{wahrsch}} = \pm \sqrt{\Delta x_1^2 + \dots + \Delta x_n^2}$$

$$\text{relativ: } \frac{\Delta y_{\text{wahrsch}}}{y} = \pm \sqrt{\left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|^2 + \dots + \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|^2}$$

Gesamtfehler

Bei Linearkombination der gem. Größen:

$$y = f(x_1; \dots; x_n) = a_1 x_1 + \dots + a_n x_n$$

$$\Delta y = a_1 \Delta x_1 + \dots + a_n \Delta x_n$$

Bei Multiplikation der gemessenen Größen:

$$y = f(x_1; \dots; x_n) = a_1 x_1^{\alpha_1} \cdot \dots \cdot a_n x_n^{\alpha_n}$$

$$\Delta y = a_1 \alpha_1 x_1^{\alpha_1-1} \cdot \dots \cdot a_n x_n^{\alpha_n} \cdot \Delta x_1$$

+ ...

$$+ a_1 x_1^{\alpha_1} \cdot \dots \cdot a_n \alpha_n x_n^{\alpha_n-1} \cdot \Delta x_n$$

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{x_i} \cdot \Delta x_i$$

Zufällige Fehler

Mittelwert (arithmetisches Mittel)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$$

Casio fx-991ES: Statistikmodus, 1-VAR, Dateneingabe, AC, Shift, 1, 5, 2

Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad s: \text{Schätzwert}$$

Casio fx-991ES: Statistikmodus, 1-VAR, Dateneingabe, AC, Shift, 1, 5, 3 (4 ist Schätzwert)

Varianz

$$\text{Var}(x) = \sigma^2$$

Dichtefunktion

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)^2}$$

$$P_s(x) = \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{s} \right)^2}$$

Casio fx-991ES: Statistikmodus, 1-VAR, Dateneingabe, AC, Shift, 1, 7, 1

Vertrauensbereich

$\pm \sigma$: 68,27% der Einzelwerte sind in diesem Bereich zu erwarten

$\pm 2\sigma$: 95,45% ...

$\pm 3\sigma$: 99,73% ...

Vertrauensfaktor

Wert t wird je nach Anzahl der Messungen n und dem gewünschten Vertrauensbereich aus einer Tabelle abgelesen.

Zufälliger Fehler

$$\Delta x_i = \pm t \cdot s \quad (\text{für } n < \infty)$$

Mittlerer Fehler

$$\Delta \bar{x} = \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}$$

Vertrauensbereich

$$x_v = \bar{x} \pm \Delta \bar{x}$$

Fortpflanzung

Gilt nur bei unabhängigen Messgrößen x_i .

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 s_i^2} \quad \begin{array}{l} s_y : \text{Schätzwert der} \\ \text{Standardabweichung} \\ s_i : \text{Schätzwert (absoluter} \\ \text{Wert)} \\ x_i : \text{korrigierte Messwerte} \end{array}$$

Leitfaden: Messunsicherheit

1. Ermittlung der Fehlerquellen und Einordnung in Gruppen

- Messgeräte
- Messaufbau
- Messperson
- Messumgebung
- Messobjekt
- Maßverkörperung

2. Klassifizierung der Fehlerarten

- a) bekannte systematische Fehler (→ korrigieren)
- b) unbekannte systematische Fehler (→ Messunsicherheit)
- c) zufällige Fehler (→ Messunsicherheit)
- d) grobe Fehler (→ eliminieren)

3. Ermittlung der Fehler

Unbekannte systematische Fehler:

- Datenblätter
- Toleranzangaben
- geometrische Angaben

Zufällige Fehler:

- Standardabweichung berechnen
- Datenblätter

4. Berechnung

$$\text{allgemein: } u = \pm \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\delta f}{\delta x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots}_{\Sigma (\text{unbekannte systematische Fehler})^2} + \underbrace{\left(\frac{\delta f}{\delta x_1} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta x_2} \sigma_2\right)^2 + \dots}_{\Sigma (\text{zufällige Fehler})^2}}$$

bei einfacher Addition (fluchtende Fehler): $u = \pm \sqrt{\Delta x_1^2 + \dots + \Delta x_n^2 + \sigma x_1^2 + \dots + \sigma x_m^2}$

5. Angabe des vollständigen Messergebnisses

Korrigierter Messwert \pm Messunsicherheit (absolut oder relativ) & Angabe des Vertrauensniveaus

Messunsicherheitsgleichung: $m_u = \pm \text{konst. Anteil} + m_{u1}(S1) + m_{u2}(S2) + \dots$

Dynamische Fehler

Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{1}{2\pi\tau}$$

(Amplitudenverhältnis beträgt $\frac{1}{\sqrt{2}}$)

Grenzkreisfrequenz

$$\omega_g \tau = 2\pi f_g \tau = 1 \quad (\text{bei } f_g)$$

Sollte mind. Faktor 10 größer als die zu messende Kreisfrequenz sein.

Amplitudengang

$$\lg\left(\frac{\hat{y}_a}{\hat{x}_e}\right) \text{ oder } \lg\left(\frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e}\right) \text{ über } \lg\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)$$

Phasengang

$$\varphi \text{ über } \lg\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)$$

Genauigkeitsklassen bei Messgeräten

Maximaler relativer Fehler

$$\frac{\Delta}{x} = \pm \frac{x_{end}}{x} \cdot \frac{G}{100\%} \quad G: \text{Genauigkeitsklasse}$$

Nimmt zu wenn Messbereich nur im unteren Teil genutzt wird.

Fortpflanzung: maximale Unsicherheit

$$\Delta y^* = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta f}{\delta x_i} \Delta x_i \right| \quad f: \text{Ergebnisfunktion}$$

(lineare Addition der Fehlergrenzenbeträge)

Fortpflanzung: wahrsch. Unsicherheit

Bei Linearkombination der Größen:

$$\Delta y^{**} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Multiplikation der Größen:

$$\frac{\Delta y^{**}}{y} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \alpha_i \right)^2}$$

Messergebnis

$$y_w = y \pm \Delta y^{**} = y \left(1 \pm \frac{\Delta y^{**}}{y} \right)$$

Analoge Messwerke

Drehspulmesswerk

Stromdurchflossene Spule ist im Magnetfeld drehbar gelagert.

- richtungsabhängig
- Mittelwertanzeige
- geringer Eigenverbrauch
- geringe thermische und mechanische Überlastbarkeit
- Widerstand der Spulenwicklung ist temperaturabhängig

Elektrodynamisches Messwerk

Wirkprinzip wie Drehspulmesswerk, aber statt Permanentmagnet ist eine zweite Spule vorhanden.

- multiplizierend (geeignet für Leistungsmessung)
- Effektivwertmesser

Dreheisenmesswerk

Kraft zwischen zwei Magnetpolen, wobei das benötigte Magnetfeld vom zu messenden Strom erzeugt wird. Dazwischen werden zwei Eisenplättchen gleich sinnig magnetisiert.

- richtungsabhängig
- Effektivwertmesser
- hoher Eigenverbrauch
- hohe thermische und mechanische Belastbarkeit

Drehpulquotientenmesswerk

Zwei Spulen sind starr miteinander verbunden (90°) und werden von der Messströmen durchflossen. Die Spulen befinden sich in einem konstanten Magnetfeld.

- Ausschlag hängt vom Quotienten zweier Ströme ab
- geeignet zur Widerstandsmessung

Digital Multimeter

- Messung von AC-, DC-Größen, Kapazitäten, Widerständen,...
- großer Eingangswiderstand ($1\text{ M}\Omega$ bis $1\text{ G}\Omega$)
- großer Empfindlichkeit und hohe Auflösung (A/D-Wandler)
- stochastische Fehler (Einstreuungen) verfälschen die Anzeige (Augenblickswerte)
- geringere Fehlergrenzen als bei analogen Messwerken
- div. Schnittstellen und Speichermöglichkeiten

Messung von Wechselgrößen

Sinusförmige Spannung

$$u(f) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$$

Linearer Mittelwert

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \cdot \sin(\omega t) dt \quad (0 \text{ bei sinusförmigen Größen})$$

Gleichrichtwert

$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{u} \cdot \sin(\omega t)| dt = \frac{2}{\pi} \hat{u} = 0,637 \cdot \hat{u}$$

Effektivwert

$$u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\hat{u} \cdot \sin(\omega t))^2 dt} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{u}$$

Effektivwerte bewirken die gleiche Verlustleistung in ohmschem Widerstand wie äquivalente Gleichstrom- und spannungswerte.

Scheitel-/Crestfaktor

$$C = \frac{\text{Scheitelwert}}{\text{Effektivwert}}$$

$$\text{sinusförmig: } = \sqrt{2} = 1,414$$

Formfaktor

$$F = \frac{\text{Effektivwert}}{\text{Gleichrichtwert}}$$

$$\text{sinusförmig: } = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$$

Messungen im einphasigen Wechselstromkreis

Spannung: Scheitelwert

Mit Einweggleichrichtung. Kondensator wird über eine Diode aufgeladen und dann dessen Spannungswert gemessen. Korrigierend muss die minimale Flussspannung der Diode (Si: $\approx 0,6 \text{ V}$) hinzugerechnet werden.

Spannung: Effektivwert (RMS)

- Mit Drehspulmesswerk und Zweiweggleichrichtung Gleichrichtwert einer bekannten Signalform messen und in den Effektivwert umrechnen (siehe Formfaktor). Dies ist keine „echte“ RMS-Messung
- Mit Dreheisenmesswerk (führt Mittlung selbst durch)
- Mit elektrodyn. Messwerk: beiden Spulen in Reihe/parallel schalten.
- Digitalmultimeter mit echter RMS-Messung sind auch für nicht sinusförmige Größen geeignet.

Leistung: Wirkleistung

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(\varphi_{UI})$$

Messung mit elektrodyn. Messwerk (jeweils eine Spule für Spannung und Strom). Bei Wechselgrößen ist der Ausschlag proportional zum Quadrat des Effektivwerts ($\alpha \sim k I^2$).

Leistung: Blindleistung

$$Q = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin(\varphi_{UI})$$

Messung mit elektrodyn. Messwerk unter Verwendung eines Kondensators oder einer Induktivität als Phasenschieber (90° bei gewollter Frequenz) vor einer Spule. So wird aus der Blind- Wirkleistung die nun abzulesen ist.

Leistung: Scheinleistung

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Messung durch getrennte Erfassung der Effektivwert und anschließendes Errechnen.

Messung von ohmschen Widerständen

Direkte Messung

An einer Spannungsquelle wird der Strom durch den bekannten Vorwiderstand R_v ein Mal mit (I_0) und einmal ohne Messwiderstand R_x (I_1) gemessen. Aus dieser folgender Beziehung kann dann der Wert des R_x errechnet werden:

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{R_v}{R_v + R_x} \Leftrightarrow R_x = \frac{I_0 R_v}{I_1} - R_v$$

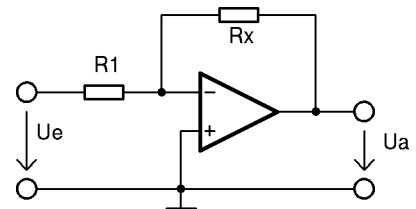
Messung mit Multimeter

Der Messwiderstand wird an einer Konstantstromquelle (schaltbar in verschiedenen Stufen) angeschlossen. So ist der Spannungsabfall, im Gerät verstärkt und digitalisiert, proportional zum Widerstand.

Messung mit invertierendem OP

Der zu messende Widerstand R_x wird als Gegenkopplungswiderstand in der Schaltung eingesetzt.

$$U_a = \frac{R_x}{R_1} \cdot U_e \Leftrightarrow R_x = \frac{U_a}{U_e} \cdot R_1$$



Wheatstone Messbrücke

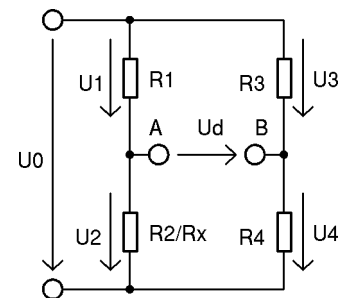
Eine relativ genaue Messmethode die für Widerstände von 1Ω bis $1M\Omega$ geeignet ist (Fehlergrenze 0,1%). Bei $U_D = 0$ gilt:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ oder } R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Der zu Messende Widerstand R_x (hier anstatt R_2) wird eingesetzt und

$$R_1 \text{ so justiert, dass } U_D = 0 \text{ wird. Nun ist } R_x = \frac{R_1 R_4}{R_3}.$$

$$U_d = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$



Temperatursensoren

Metall-Widerstandstemperaturfühler

$$R(\vartheta) = R_0 (1 + \Delta \vartheta \cdot \alpha_0) \quad R_0: \text{Wert bei } 0^\circ\text{C}$$

- hohe Linearität
- großer Temperaturbereich (z.B. PT100: -200 °C bis +850°C)
- geringe Toleranzen

Thermistoren

- hohe Empfindlichkeit
- große Toleranzen (z.B. 20%)
- NTC: negativer Temperaturkoeffizient; aus Halbleiterverbindungen oder dotiertem Silizium; abschnittsweise lineare Kennlinie
- PTC: positiver Temperaturkoeffizient; aus halbleitendem und ferroelektrischem Material (Bariumnitrat); stark nichtlineares Verhalten

Temperaturfühler ICs

- Ausführung in IC mit Spannungsversorgung
- Messbereich typ. -55 bis 150 °C
- Messverstärker integrierte
- liefert standardisierte Ausgangsspannungen wie z.B. 10 mV/K

Zur eigentlichen Messung wird meist die U_{BE} -Differenz zweier Transistoren verwendet.

Flussspannung an PN-Übergängen

Die Differenz der Flussspannungen zweier Dioden oder der Basis-Emitter-Spannungen zweier Transistoren ist linear von der Temperatur abhängig. Die Dioden bzw. Collector-Emitter-Strecken müssen dazu unterschiedlich hohe Ströme führen.

$$U_2 - U_1 = \frac{k \cdot T}{e_0} \cdot \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

$$K: \text{ Boltzmann Konstante } (5,56 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right])$$

T : Temperatur (in °Kelvin ???)

e_0 : elektr. Elementarladung ($1,602 \cdot 10^{-19} [As]$)

Thermoelemente

Aufgrund des Thomsons effekts entsteht an einem Leiterstück mit Temperaturgradienten eine kleine Spannung. An zwei Leitern mit dem selben Temperaturgradienten aber unterschiedlichen Materialien (ein Endwert muss als Referenz bekannt sein) entstehen unterschiedliche Spannungen. Hierdurch kann man auf die Temperaturdifferenz zur Referenzstelle schließen.

- Temperaturbereich je nach Typ -40 bis +1800 °C
- Empfindlichkeit typ. 40 $\mu\text{V/K}$
- Kennlinie etwas nichtlinear

Kraft und Drucksensoren

Druckkammer

Ein zylindrisches Gehäuse mit Druckanschluss wird durch eine weiche Membran abgeschlossen. Die andere Seite des Membrans kann verschieden aufgebaut sein:

- Eine weitere Druckkammer, die als Kondensator-Pol wirkt, die einen Referenz Gegendruck enthält. Bei Auslenkung der Membran ändert sich die Kapazität Gegendruckkammer, die zum Beispiel als Verstimmung eines Schwingkreises gemessen werden kann. System hat Rückwirkung auf Messgröße.
- Eine Gegendruckkammer mit Anschluss für einen Ausgleichsdruck. Dieser wird so reguliert, dass die Membran keine Auslenkung hat und somit keine Druckänderung im Messsystem vorhanden ist. Gemessen wird nun der Druck in der Gegendruckkammer. Messung ist rückwirkungsfrei.
- An der Membran wird eine stromdurchflossene Tauchspule angebracht. Diese befindet sich in einem Magnetfeld, das wiederum von einem Elektromagnet erzeugt wird. Bei Auslenkung des Membrans, kann durch Anpassung der Stromstärke des Elektromagnets der Bewegung entgegen gewirkt werden. Messung ist rückwirkungsfrei.

Piezoeffekt

An bestimmten Kristallen oder Keramiken entsteht bei geringfügiger Verformung in eine Richtung durch Molekülverschiebung an den (metallisierten) Schnittflächen eine Spannung.

- sehr geringe Rückwirkung auf Messgröße
- extrem hochohmiger Messverstärker benötigt

Dehnungsmesstreifen

Auf eine Kunststoffolie wird der Messstreifen aus einer NiCr-Legierung schlingenförmig aufgedampft. Dieser DMS wird dann auf das zu untersuchende Teil geklebt.

- Kann je nach Anordnung der Messstrecke nur Dehnung oder Stauchung nur in eine Richtung messen. Manchmal werden auch mehrerer Messwiderstände in verschiedenen Richtungen aufgebracht.
- Widerstandsänderung ist proportional zur Dehnung, da sich der Leiterquerschnitt zwangsweise verjüngt.
- Den Temperaturgang des Widerstandsmaterials versucht man durch Verschalten von zwei gleichen Sensoren (einer wird gedehnt, der andere gestaucht) in einer Halbbrücke zu relativieren.

Photometrie

Steradian

Einheit des Raumwinkels: $[sr]$. Entspricht der Teilfläche einer Kugel dividiert durch das Quadrat des Radius.

Lumen

Einheit des (sichtbaren) Lichtstroms: $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$

Candela

Einheit der Lichtstärke: $1 \text{ cd} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = I_v(550\text{nm})$

Lux

Einheit für die Beleuchtungsstärke: $1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{m}^2} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$

Bestrahlungsstärke

$$E = \frac{\phi}{A_E} \quad \begin{array}{l} \phi : \text{Strahlungsleistung [W]} \\ A_E : \text{Empfängerfläche [m}^2\text{]} \end{array}$$

Beleuchtungsstärke

$$E_v = \frac{\phi_v}{A}$$

Lichtstrom

...einer Strahlungsquelle im sichtbaren Bereich, gemessen in Lumen.

$$\phi_v = K_m \int_0^\infty \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad \begin{array}{l} K_m : \text{Max. des photometrischen Strahlungsäquivalent} = 683 \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] \\ V(\lambda) : \text{Helligkeitsempfindlichkeitsfunktion des menschl. Auges} \end{array}$$

(???)

Optische Sensoren

Photoelektrischer Effekt

Durch Absorption kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung können an einem Halbleiter pn-Übergang Elektronen in das Valenzband übertreten und erzeugen beim Schließen des Stromkreises einen Ausgleichsstrom. Dieser ist abhängig von der einfallenden Strahlungsleistung.

Der Wirkungsgrad – ausschlaggebend bei der Nutzung als Solarzelle - an einem Silizium pn-Übergang ist aus physikalischen Gründen auf max. 28% beschränkt.

Photoelement

- Empfindlichkeitsbereich: 0,3 bis 1,1 μ m
- geringes Eigenrauschen → für kleine Messgrößen geeignet
- träge (Zeitkonstanten bis 20ms)

Photodiode

Wird mit konstanter Vorspannung in Sperrrichtung betrieben. Dadurch verbreitert sich die Raumladungszone, die Sperrschichtkapazität sinkt (5 bis 500pF), was wiederum hohe Grenzfrequenzen im Mhz-Bereich zur Folge hat.

Phototransistor

Funktion wie ein Bipolartransistor, jedoch wirkt der Kollektor-Basis-Übergang wie eine Photodiode und erzeugt so je nach Lichtverhältnis einen Basisstrom der auch noch gleich verstärkt wird. Relativ träge.

Photozelle

Funktion ähnlich der Elektronenröhren. Statt Heizung und Steuerungsgitter verbaut man eine Photokathode aus einem Material mit geringer Austrittsarbeit. Die austretenden Elektronen (durch Licht angeregt) werden zur Anode hin beschleunigt: Strom fließt.

CCD (Charge Coupled Device)

An eine Metallelektrode wird eine positive Spannung angelegt, wodurch in einem p-Dotiertem Kristall eine Raumladungszone entsteht. In der Integrationsphase werden nun die in diesem Bereich durch Lichteinfall erzeugten Valenzelektronen hier gesammelt und in der folgenden Transferphase in einen lichtunempfindlichen Bereich verschoben. Dies geschieht durch das Anpassen der Steuerspannungen. Von dort aus Transfer in ein Schieberegister zur seriellen Ausgabe.

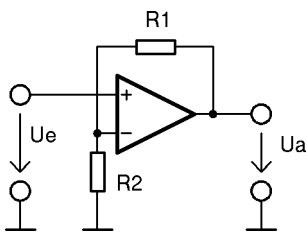
Messverstärker

Anforderungen

- Linearität
- hohe Verstärkung (angegeben in dB)
- geringe Rückwirkung auf Messgröße
- ausreichende Bandbreite (Grenzfrequenz)
- niedriges Eigenrauschen
- passendes Ausgangssignal (Spannung / Strom)

Grundsaltungen

Spannungs-Spannungs-Umformer ($U_a \sim U_e$)



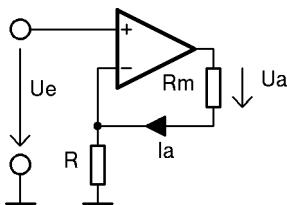
$$R_e \rightarrow \infty$$

$$R_a \rightarrow 0$$

$$v_u = \frac{R_1}{R_2} + 1$$

Der Verstärker soll die Quelle (den Sensor) möglichst wenig belasten und am Ausgang wie eine ideale Spannungsquelle wirken.

Spannungs-Strom-Umformer ($I_a \sim U_e$)



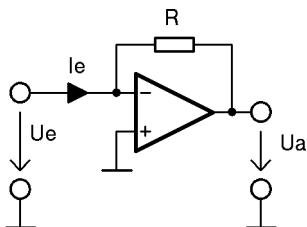
$$R_e \rightarrow \infty$$

$$R_a \rightarrow \infty$$

$$I_a = \frac{U_e}{R}$$

Der Ausgangsstrom ist proportional zur Eingangsspannung und ermöglicht somit lange Messleitungen ohne Verfälschung des Messergebnisses. Um Leitungsunterbrechung zu erkennen wird mit gebendem Nullpunkt gearbeitet (z.B. 4 bis 20 mA).

Strom-Spannungs-Umformer ($U_a \sim I_e$)



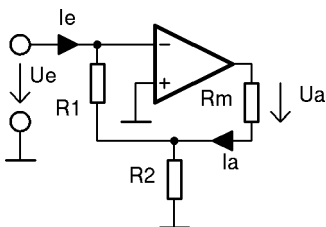
$$R_e \rightarrow 0$$

$$R_a \rightarrow 0$$

$$U_a = -I_e \cdot R$$

Wirkt am Eingang wie ein Kurzschluss. Der dann fließende Strom wird als Eingangsgröße verarbeitet.

Strom-Strom-Umformer ($I_a \sim I_e$)



$$R_e \rightarrow 0$$

$$R_a \rightarrow \infty$$

$$I_a = I_e \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

Formt einen Eingangsstrom in einen verstärkten Ausgangsstrom um (Ausgang wirkt als Stromquelle).