3 Aufbau eines Messsystems, Sensoren, Messkette

3.1 Sensorelement, Sensor, Messkette

3.1.1 Messkette

Eine Messeinrichtung oder Messkette besteht aus Sensor, Wandler- bzw. Übertragungselement, Anzeige- und Verarbeitungseinheit.

Prozess-größe → Messwert-aufnehmer → Über-tragung → Messwert-darstellung

Abbildung 3.1: Typische Messkette

Die in der Messtechnik interessierenden Messgrößen sind häufig nicht-elektrische Größen. Eine Wandlereinheit, die mit Hilfe gezielt genutzter physikalischer Gesetzmäßigkeiten oder Effekte ein zur interessierenden Messgröße in fester Relation stehendes (im Idealfall proportionales) **elektrisches** Ausgangssignal (Spannung, Strom, Widerstand) liefert, heißt **Sensorelement**.

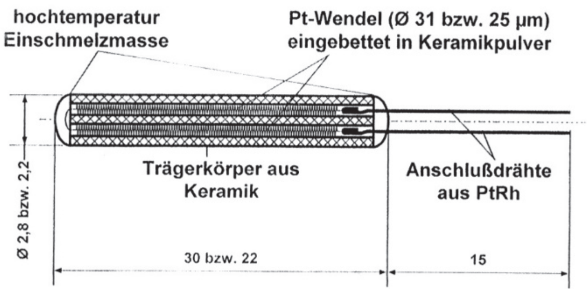


Abbildung 3.2: Beispiel eines Sensorelements: Temperaturfühler mit Pt-100 Widerstand

Tabelle 3.1 zeigt die vielfältigen in Sensorelementen zur Wandlung von elektrischen und nichtelektrischen Messgrößen genutzten physikalischen Effekte und Gesetzmäßigkeiten. Angegeben sind jeweils die physikalischen Effekte, die Größen des angegebenen physikalischen Typs in elektrische wandeln. Die Tabelle ist bei Weitem nicht vollständig: Die Sensorentwicklung ist ein hoch innovatives Gebiet, das in schneller Folge neue Verfahren und Systeme hervorbringt.

mechanisch	thermisch	magnetisch	elektrisch	optisch	molekular
Induktion, kapazitiver Effekt, piezoelektrischer u. piezoresistiver Effekt, digital: Laufzeit	temperaturabhängiger Widerstand, Thermoelektrizität (Seebeck-Effekt), Pyroelektrizität	Halleffekt, Thomsoneffekt, Induktion	Elektromagnetismus, Influenz, Ohm'sches Gesetz	Photowiderstand, äußerer und innerer Photoeffekt (Solarzelle)	Volta-Spannung, Kontaktpotential, elektrolytische Leitung, Konzentrationspotential, Leitfähigkeit

Tabelle 3.1: Messtechnisch nutzbare Umwandlungseffekte physikalischer Größen

3.1.2 Sensorbegriff

Das elektrische Signal eines Sensorelementes muss i. d. R. aufbereitet werden durch Verstärkung, Offset-Abgleich, Kennlinienkorrekturen, Umrechnungen. Weiter wird zunehmend die digitale Verarbeitung der Messwerte in die Messaufnehmer integriert. Abbildung 3.3 veranschaulicht dies und zeigt, welche Begriffe in diesem Zusammenhang verwendet werden.

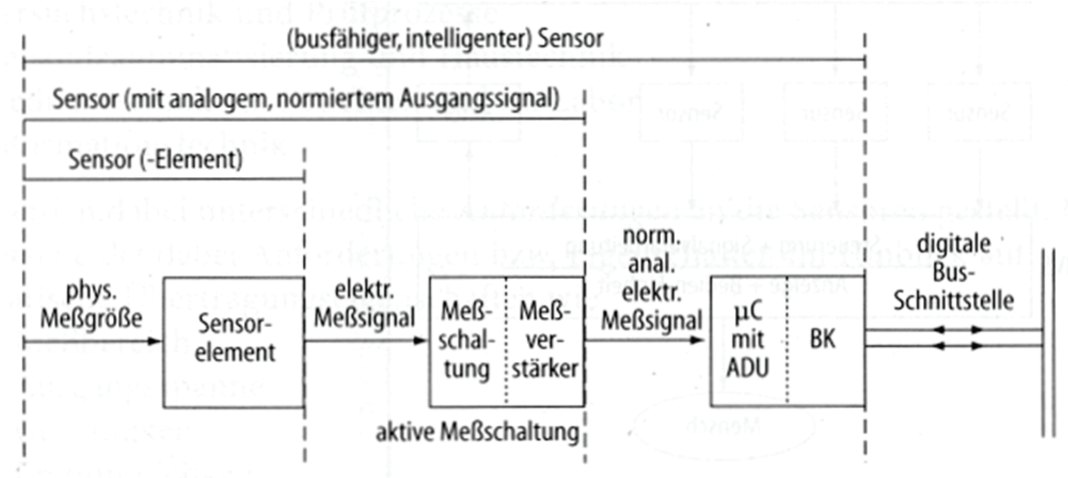


Abbildung 3.3: Abgrenzung der Begriffe "Sensorelement", "Sensor", "intelligenter Sensor"

Als **Sensor** bezeichnet man demnach die **Kombination aus Sensorelement und Signalaufbereitung**, die ein konditioniertes (d. h. meist einer linearen Kennlinie folgendes) Ausgangssignal liefert. Beispielsweise wird ein Pt-100 Sensorelement in Verbindung mit einer Widerstandsmessbrücke zum Temperatur**sensor**.

3.2 Statische Sensorkennlinie, Empfindlichkeit

Die Angabe einer Kennlinie ist eine Möglichkeit zur einheitlichen Beschreibung des Übertragungsverhaltens von Sensoren beliebigen Typs. Sie stellt eine - im Idealfall eindeutige und lineare - Abbildung der Prozess-Messgröße auf die (elektrische) Ausgangsgröße dar.

Zum Beispiel liefert die Wegmessung mit einem potentiometrischen Wegaufnehmer im Idealfall eine lineare Kennlinie entsprechend der Spannungsteilerregel.

$R(x = 0) = 0\,,\ \ R(x = l) = R_N$

$R(x) = \frac{x}{l} R_N$ bzw.

$U_M(x) = \frac{R(x)}{R_N} U_S = \frac{x}{l} U_S = \frac{U_S}{l} \cdot x$

Abbildung 3.5 zeigt die zugehörige Kennlinie.

Die Steigung wird als **Empfindlichkeit** des Sensors (auch: Übertragungsfaktor) bezeichnet.

hier: $E = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta U_M}{\Delta x} = \frac{U_S}{l} = \frac{10\,V}{2\,m} = 5\frac{V}{m}$

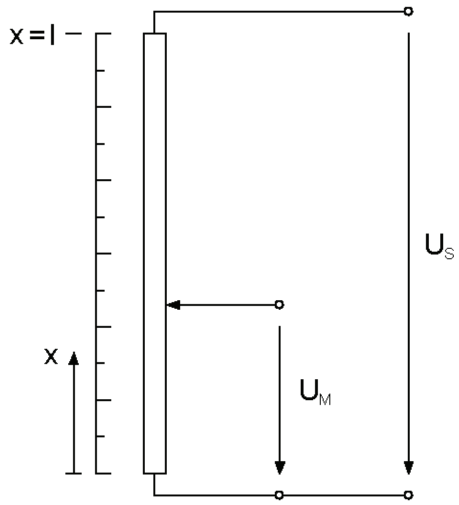


Abbildung 3.4: Prinzip eines potentiometrischen Wegaufnehmers

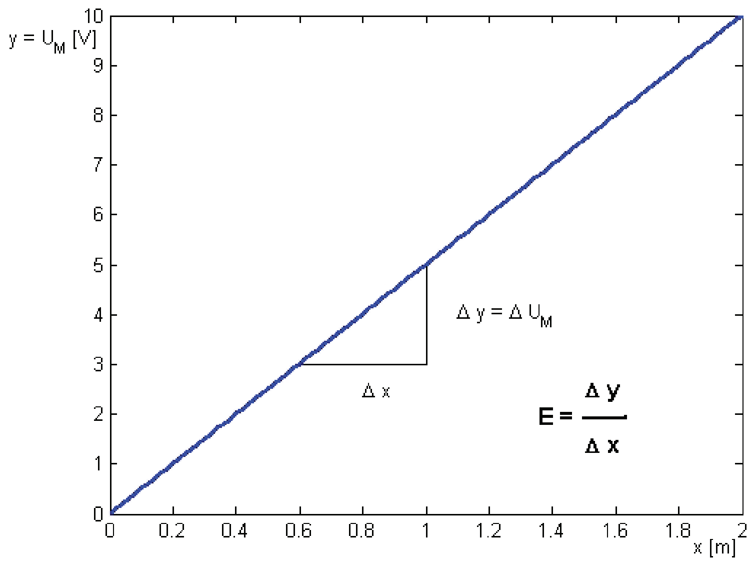


Abbildung 3.5: Ideale Sensorkennlinie eines Wegaufnehmers

Die Bezeichnung "Empfindlichkeit" wird nicht nur für Sensoren sondern mit entsprechender Definition auch für jede beliebige Maßverkörperung und alle anzeigenden Messinstrumente verwendet.

3.3 Statische Kennlinienabweichungen

Fertigungsbedingt oder aufgrund physikalischer Effekte wird kein Sensor oder Messsystem eine ideale Kennlinie gemäß Abbildung 6.3 aufweisen. Vielmehr treten Abweichungen auf in Form von

Offset	Nullpunktverschiebung, Nullpunktdrift (z. B. temperaturabhängig);
Steigungsfehler	(auch: Verstärkung, Gain) Abweichung der Empfindlichkeit;
Nichtlinearität	Abweichung vom linearen Zusammenhang zwischen Mess- und Ausgangsgröße, häufig prinzipbedingt, z. B. quadratischer Term der Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Metallen;
Hysterese	maximale Abweichung zwischen den erhaltenen Messwerten, wenn der Messpunkt von niedrigeren und von höheren Messwerten aus angesteuert wird.

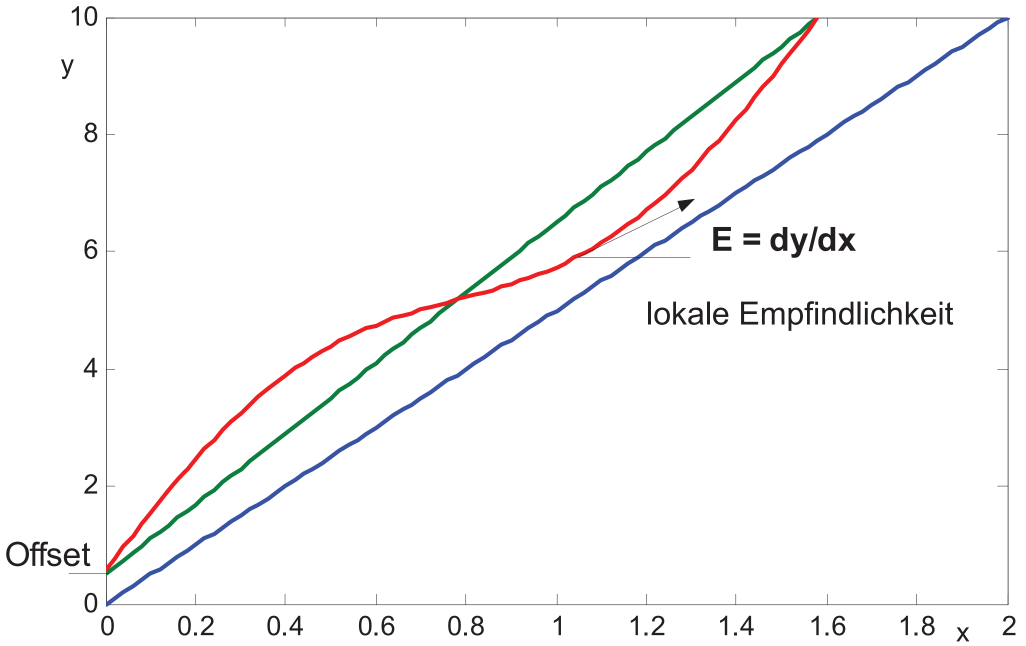


Abbildung 3.6: Kennlinienabweichungen: Offset, Verstärkungsfehler, Nichtlinearität

Die **lokale Empfindlichkeit** ist die Steigung an der Stelle des jeweiligen Messwerts.

$$E(x) = \frac{\mathrm{d}U_M}{\mathrm{d}x} = \frac{U_S}{l} \cdot \frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x} .$$

Beispiel

Die nichtlineare Temperaturabhängigkeit beim **Pt-100** - Widerstandsthermometer ist nach DIN EN 60751(IEC 751) gegeben durch

$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + 3{,}9083 \cdot 10^{-3} {}^\circ C^{-1} \cdot \vartheta - 5{,}775 \cdot 10^{-7} {}^\circ C^{-2} \cdot \vartheta^2)$ für $\vartheta > 0$ °C

mit $R_0 = 100\ \Omega$.

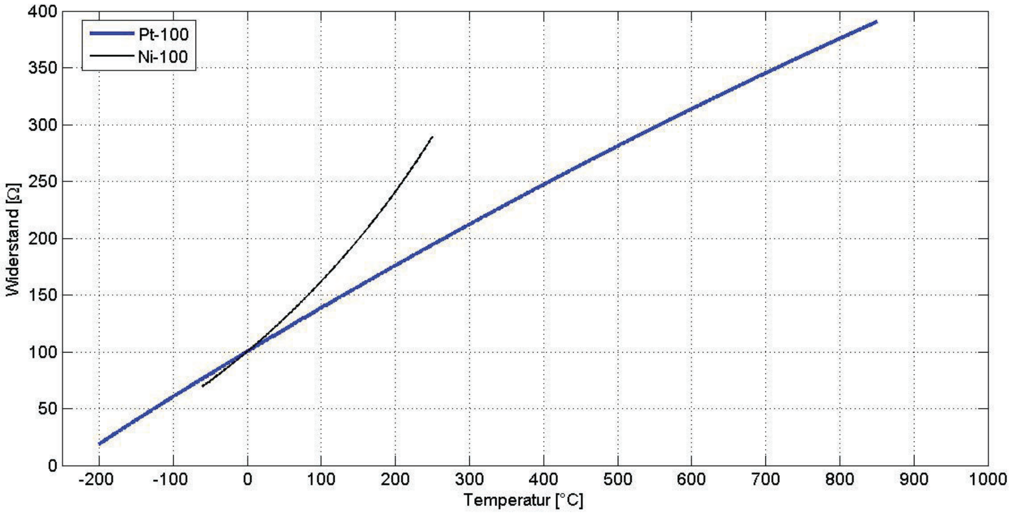


Abbildung 3.7: Kennlinien von Platin- und Nickel-Temperatursensorelementen

ϑ aus R : Umkehrfunktion

$$\vartheta(R) = -\frac{A}{2B} - \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{R - R_0}{R_0 B}}$$

hinterlegt im LabVIEW-VI und im Multimeter als "RTD"

Vereinfachte Rechnung mit Linearisierung

Bei Pt-100 oft mittels Näherung

$$R(\vartheta) = R_0 \cdot \left(1 + 3{,}85 \cdot 10^{-3} \frac{1}{{}^\circ C} \cdot \vartheta\right)$$

$$\vartheta = \frac{1}{3{,}85 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{R(\vartheta)}{R_0} - 1\right) {}^\circ C$$

$\Delta\vartheta$ Linearitätsfehler

3.4 Übungen "Sensorkennlinien, Linearitätsfehler"

3.4.1 Temperaturabhängiger Kupfer-Widerstand

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands eines Leiterstücks aus Kupfer sei mit $\alpha_{20} = 0{,}0043\ {}^\circ C^{-1}$ angegeben. Welche Empfindlichkeit bezüglich der Umsetzung der Temperatur in eine Messspannung hat dieses Kupferelement, wenn es mit einem Konstantstrom von 10 mA gespeist wird und bei 0°C den Widerstand R = 50 Ω hat?

3.4.2 Lokale Empfindlchkeit

Bestimmen Sie die lokale Empfindlichkeit eines Platin-Sensorelementes bei 200°C und vergleichen Sie die Werte mit denen bei 0°C. Geben Sie für den Arbeitspunkt 200°C die linearisierte Kennlinien an (= Tangente an die Originalkennlinie).

3.4.3 Kennlinienabweichungen

Eine Temperatur-Anzeigeeinheit zeigt ϑ_A = –20 °C bei einer (Eingangs-) Messspannung U_M = -1 V und ϑ_A = 60 °C bei U_M = 3 V an.

a) Geben Sie die entsprechende lineare Kennlinie der Anzeigeeinheit $\vartheta_A(U_M)$ an (Formel und Skizze).

Mit Hilfe einer Konstant-Stromquelle (I_M = 1 mA) und eines NI-100-Sensorelementes mit der Charakteristik $R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + 5{,}5 \cdot 10^{-3} {}^\circ C^{-1} \cdot \vartheta + 6{,}7 \cdot 10^{-6} {}^\circ C^{-2} \cdot \vartheta^2)$ wird die Messspannung durch eine Verstärkerschaltung wie folgt erzeugt:

$$U_M = 86{,}7 \cdot I_M \cdot R(\vartheta) - 8{,}74\,V$$

b) Bestimmen Sie die Kennlinie $\vartheta_A(\vartheta)$ dieser Messanordnung (nur Formel!).

c) Bestimmen Sie den Offsetfehler der Temperaturanzeige bei $\vartheta = 0$ °C sowie die Abweichung bei 100 °C.

d) Bestimmen Sie die Gleichung für die nach Korrektur des Offsetfehlers verbleibende nichtlineare Kennlinienabweichung $\Delta\vartheta_A(\vartheta)$.

e) Bei welchen Temperaturen ist der Linearitätsfehler gleich Null?

3.5 Übungen "Sensorkennlinien, Linearisierung"

3.5.1 Quadratische Kennlinie eines Temperatursensorelementes

Für einen Si-Widerstands-Temperatursensor mit

$R(\vartheta) = R_{25} \cdot (1 + 0{,}01\,{}^\circ C^{-1} \cdot \Delta\vartheta + 5 \cdot 10^{-5} {}^\circ C^{-2} \cdot \Delta\vartheta^2)$,

$R_{25} = R(\vartheta = 25°C) = 2\,k\Omega$, $\Delta\vartheta = \vartheta - 25°C$

ist eine lineare Kennlinie $R_{lin}(\vartheta) = R_{off} + E \cdot \vartheta$ zu bestimmen.

1. Bestimmen Sie als Linearisierung die Tangente an die Kennlinie bei $\vartheta = 25\,°C$.
2. Bestimmen Sie als weitere Linearisierung die Ausgleichsgerade, die sich aus den Punkten der Kennlinie bei ϑ = 0 °C, ϑ = 20 °C, ϑ = 50 °C und bei ϑ = 80 °C ergibt.
3. Geben Sie für beide Linearisierungen den Offsetfehler bei ϑ = 0 °C und die Kennlinienabweichung (absolut und relativ) bei ϑ = 100 °C an.

3.5.2 Fehler bei linearer Verstärkung und Anzeige

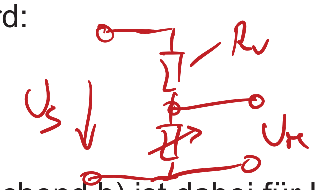
Durch Speisung des Sensors aus 3.5.1 mit einem Konstantstrom von 1 mA entsteht die Messspannung $U_{m1} = R(\vartheta) \cdot 1\,mA$. Diese wird mit einem Verstärker, der die Spannung U_{Offset} subtrahiert und das Ergebnis um den Faktor V verstärkt, in eine Messspannung U_{m2} umgesetzt, die zwischen 0 und 10 V liegen soll, wenn die Temperatur zwischen 0 und 100 °C variiert. Eine angeschlossene Digitalanzeige setzt mit idealer, linearer Kennlinie Spannungen zwischen -2 und 12 V in Temperaturanzeigewerte zwischen –20 °C und 120 °C um.

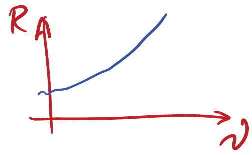
1. Bestimmen Sie U_{Offset} und V so, dass U_{m2} = 0V bei $\vartheta = 0$ °C und U_{m2} = 10V bei $\vartheta = 100$ °C wird.
2. Bestimmen Sie U_{Offset} und V so, dass U_{m2} = 0V bei $\vartheta = 0$ °C und U_{m2} = 10V bei $\vartheta = 100$ °C gelten würde, wenn die Sensorkennlinie durch die oben berechnete Ausgleichsgerade gegeben wäre.
3. Berechnen Sie bezüglich des Anzeigewertes der Temperatur für 2. den Offsetfehler und den absoluten und relativen Messfehler bei 100 °C sowie für beide Verstärkerauslegungen die absolute und relative Abweichung bei 50 °C.

3.5.3 (Verbesserte) Linearisierung durch Vorwiderstand

Alle Aufgaben wie in 3.5.2, wobei nun aber der Si-Widerstands-Temperatursensor über einen Vorwiderstand R_v an eine konstante Speisespannung U_S angeschlossen und U_{m1} über dem Si-Widerstand abgegriffen wird:

$$U_{m1} = \frac{R(\vartheta)}{R_V + R(\vartheta)} \cdot U_S \quad , U_S = 10\text{ V}, \quad R_V = 10\text{ k}\Omega$$





Die Ausgleichsgerade für die Auslegung entsprechend b) ist dabei für U_{m1} zu bestimmen, das heißt für die Werte von U_{m1} bei ϑ = 0 °C, ϑ = 20 °C, ϑ = 50 °C und bei ϑ = 80 °C.

Vergleichen Sie die Ergebnisse.

Hinweis: Für diese Aufgabe empfiehlt sich Rechnerunterstützung, z. B. alle Rechnungen in einem MATLAB-Script.

Dann sollten Sie auch einmal folgendes tun: Wiederholen Sie die Rechnung mit einem Vorwiderstand von $R_V = 3{,}3\text{ k}\Omega$ und $R_V = 1\text{ k}\Omega$ und vergleichen Sie!

3.5.4 Linearitätsfehler einer Temperaturmessung

Gegeben ist die Kennlinie eines Si-Widerstands-Temperatursensors durch die Gleichung

$R(\vartheta) = R_{25} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta \cdot \Delta\vartheta^2)$,

$R_{25} = 2\ k\Omega$, $\Delta\vartheta = \vartheta - 25°C$, $\alpha = 7{,}88 \cdot 10^{-3} °C^{-1}$, $\beta = 1{,}937 \cdot 10^{-5} °C^{-2}$.

Die Serienschaltung dieses Sensors mit einem 3,3 kΩ - Widerstand wird mit einer Konstantspannung von 10 V gespeist. Die Messspannung U_M wird über dem Sensor abgegriffen.

1. Berechnen Sie die resultierende nichtlineare Sensorkennlinie $U_M(\vartheta)$
2. Bestimmen Sie umgekehrt $\hat{\vartheta}(U_M)$.
3. Geben Sie eine lineare Umrechnung der Form $\vartheta_M = k \cdot (U_M - U_0)$ an, die bei ϑ = 5 °C und 45 °C exakt ist. Wie groß ist die Abweichung bei 25 °C und bei 100 °C?

Stellen Sie $\hat{\vartheta}(U_M)$ und $\vartheta_M(U_M)$ in einem Diagramm dar.

Wie groß ist im Bereich $3\text{V} \le U_M \le 6\text{V}$ die maximale Abweichung zwischen tatsächlicher und berechneter Temperatur?