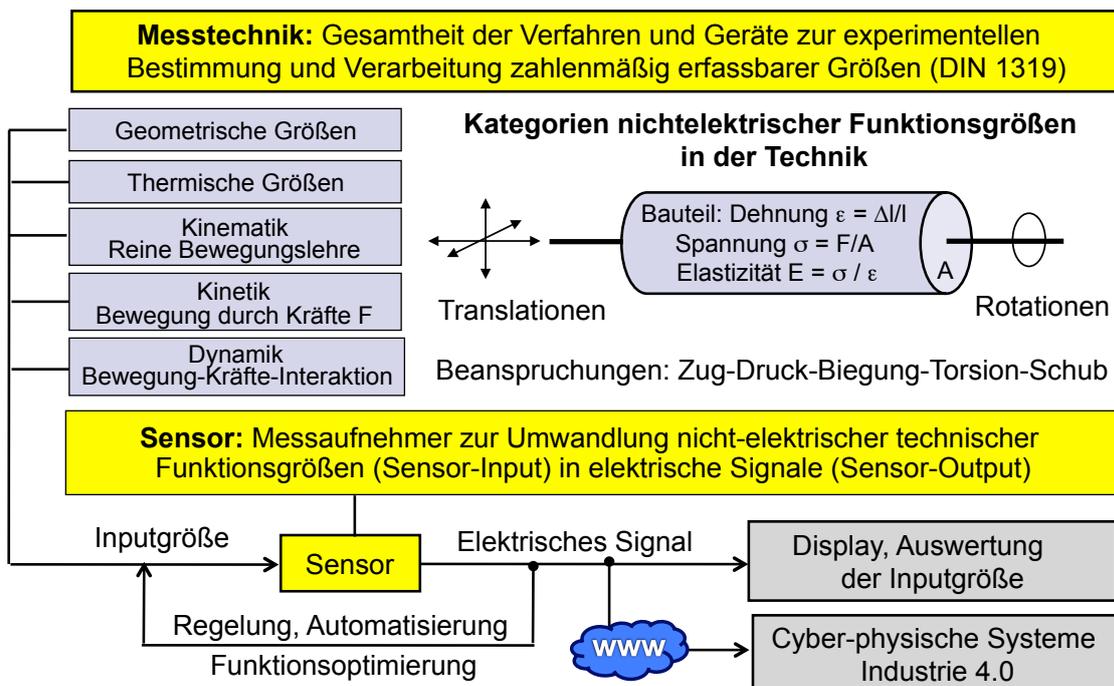


Messtechnik und Sensorik

1. Messtechnische Grundlagen
2. Sensortechnische Grundlagen
3. Bauteilsensorik → Geometrische Größen
4. Temperatursensorik → Thermische Größen
5. Positionssensorik
6. Geschwindigkeitssensorik
7. Beschleunigungssensorik
8. Kraft/Moment/Druck-Sensorik → Kinetik, Dynamik
9. Mikrotechnik
10. Strukturintegrierte Sensorik
11. Cyber-physische Systeme → Industrie 4.0

Literatur: Messtechnik und Sensorik, in Mechatronik (H. Czichos, Springer 2015)

Messtechnik und Sensorik: Übersicht





Messtechnik und Sensorik

1. Messtechnische Grundlagen



Messtechnik: Definitionen

Metrologie: Wissenschaft des Messens

Messtechnik: Gesamtheit der Verfahren und Geräte zur experimentellen Bestimmung und Verarbeitung zahlenmäßig erfassbarer Größen (Messgrößen) in Wissenschaft und Technik (DIN 1319).

Messung: Ermittlung numerischer Werte (Messwerte) einer Messgröße.

Messwerte werden dargestellt als Produkt aus Zahl und Einheit
(z. B. Messwert 20°C der Messgröße Temperatur)

Messabweichung: Abweichung eines Messwerts (Ist) von einem Referenzwert (Soll);

- **Absolutwert:** $\Delta = \text{Ist} - \text{Soll}$ (Zahlenwert und Maßeinheit)
- **Relativwert:** $\delta = (\text{Ist} - \text{Soll})/\text{Soll}$ (Prozent)

Anmerkung: Eine Messabweichung wird „Messfehler“ genannt, wenn sie einen zulässigen Wert, z. B. eine Toleranzgrenze, überschreitet.

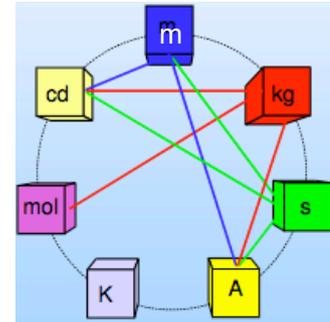
Basiseinheiten der Messtechnik und Rückverfolgbarkeit

Die Ergebnisse von Messungen müssen durch die Verwendung von Maßverkörperungen auf SI-Basiseinheiten oder daraus abgeleitete Einheiten rückführbar (traceable) sein.

Internationales Einheitensystem SI (Système International d'Unités)

Messunsicherheiten der Einheiten in []

- **Länge:** Meter (m), definiert über Lichtgeschwindigkeit und Zeit, [10⁻¹²]
SI-Einheit 1 m: Länge der Strecke s, die das Licht im Vakuum (Lichtgeschwindigkeit $c = s / t = 299.792.458 \text{ m/s}$) während der Dauer von $t = 1 / 299.792.458$ Sekunde zurücklegt
- **Masse:** Kilogramm (kg), Internationaler Pt-Ir-Prototyp, aufbewahrt beim BIPM, [2x10⁻⁹]
- **Zeit:** Sekunde (s), Periodendauer einer Strahlung (Nuklid 133Cs), [10⁻¹⁶], Abweichung von 1 sec in 150 Millionen Jahren
- **Stromstärke:** Ampere (A), definiert über Kraftwirkung zwischen elektrischen Leitern, [9x10⁻⁸]
- **Temperatur:** Kelvin (K), Tripelpunkt des Wassers (0 K entspricht - 273,15 °C), [3x10⁻⁷]
- **Lichtstärke:** Candela (cd), definiert über die Strahlung des Schwarzen Körpers, [10⁻⁴]
- **Stoffmenge:** Mol (mol), definiert über Atomzahl (12C in 12 Gramm), [2x10⁻⁹]



Technische Größen und SI-Basiseinheiten

Technische Größe	Name	Symbol	in SI-Einheiten	in SI-Basis-Einheiten
Kraft (Masse · Beschleunigung)	Newton	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Druck, mech. Spannung	Pascal	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Energie, Arbeit, Wärme	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Leistung	Watt	W	J/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Elektrische Ladung	Coulomb	C		$\text{s} \cdot \text{A}$
Elektrische Spannung	Volt	V		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
Elektrische Kapazität	Farad	F	C/V	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
Elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	V/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
Elektrische Leitfähigkeit	Siemens	S	A/V	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$

Erfordernisse zur Durchführung einer Messung

Die Messung einer technischen Größe (Messgröße) erfordert vier Dinge:

1. Messprinzip, 2. Messverfahren, 3. Messmethode 4. Messgerät

1. Das **Messprinzip** ist die physikalische Grundlage einer Messung.
2. **Messmethoden** sind allgemeine, grundlegende Regeln für die Durchführung von Messungen. Sie können gegliedert werden in:
 - direkte Methoden (Messgröße gleich Aufgabengröße)
 - indirekte Methoden (Messgröße ungleich Aufgabengröße)
 - analoge Methoden mit kontinuierlicher Messwertangabe
 - digitale Methoden mit diskreter Messwertangabe
 - Ausschlagmethoden führen zu einer unmittelbaren Messwertdarstellung
 - Kompensationsmethoden: Nullabgleich zwischen Mess- und Referenzgröße
3. Das **Messverfahren** ist die praktische Realisierung des Messprinzips.
4. **Messgeräte** (allgemein Messmittel, DIN 1319-2) liefern die Messwerte in Form von Skalananzeigen (Analoggeräte) oder Ziffernanzeige (Digitalgeräte).

Messgeräte müssen justiert (Nullpunkteinstellung), kalibriert (Zuordnung der Anzeige zum Messwert) und falls erforderlich geeicht sein (Behördliches Zertifikat).

Ermittlung der Messunsicherheit

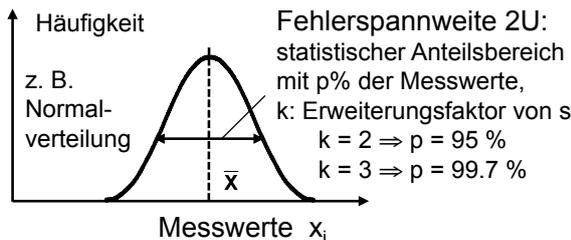
Typ A Auswertung: Statistische Auswertung

- Messreihe mit Messwerten x_i : x_1, x_2, \dots, x_n
- arithmetischer Mittelwert $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
- Abweichung eines einzelnen Messwerts

vom Mittelwert: $x_i - \bar{x}$

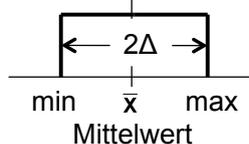
- Standardabweichung $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

- Standardmessunsicherheit: $u = s$
- erweiterte Messunsicherheit: $U = k \cdot s$

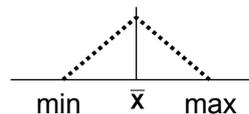


Typ B Auswertung: Fehlerspannweite

Bei Kenntnis des Maximal- und Minimalwertes einer Messgröße kann unter der Annahme einer Wahrscheinlichkeitsverteilung die Standardunsicherheit u nach Methode Typ B abgeschätzt werden.



Rechteckverteilung
(Gleichwahrscheinlichkeit von Werten im Intervall 2Δ)
 $\Rightarrow u = \Delta / \sqrt{3}$



Dreiecksverteilung:
 $\Rightarrow u = \Delta / \sqrt{6}$

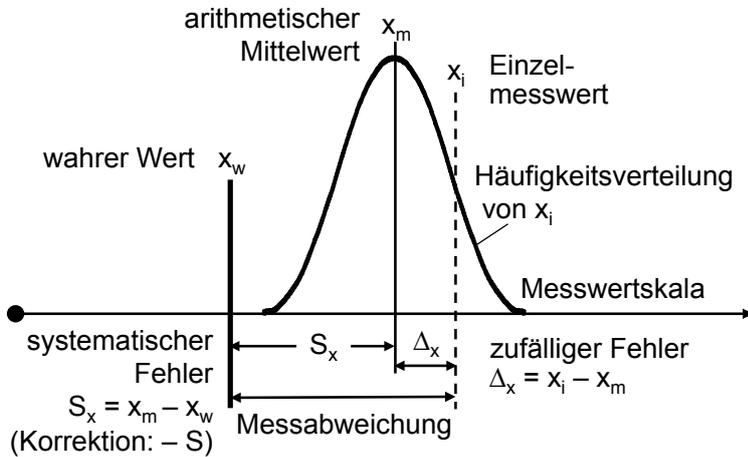
In der instrumentellen Messtechnik dient die Spannweite $2\Delta = \text{Maximalwert} - \text{Minimalwert}$ einer Messgröße zur vereinfachten Abschätzung der instrumentellen Messunsicherheit gemäß $u_{\text{instr}} \approx \Delta$.

Literatur: • GUM, Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO Genf 1995, download: www.bipm.org
• Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, DIN V 13005, 1999

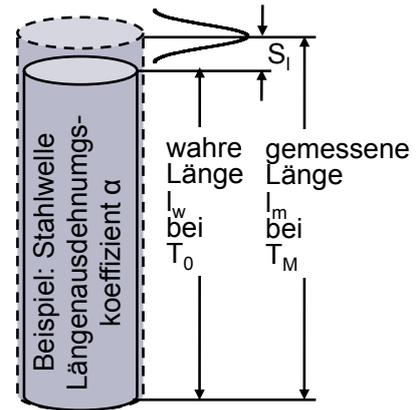
Messabweichungen

Messabweichungen („Messfehler“) werden traditionell eingeteilt in

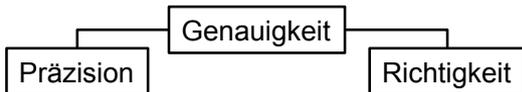
- **Zufällige Fehler Δ** : Einzelmesswert (Ist) minus Mittelwert einer Messreihe (Soll)
- **Systematische Fehler S** : Mittelwert einer Messreihe minus „wahrem Wert“



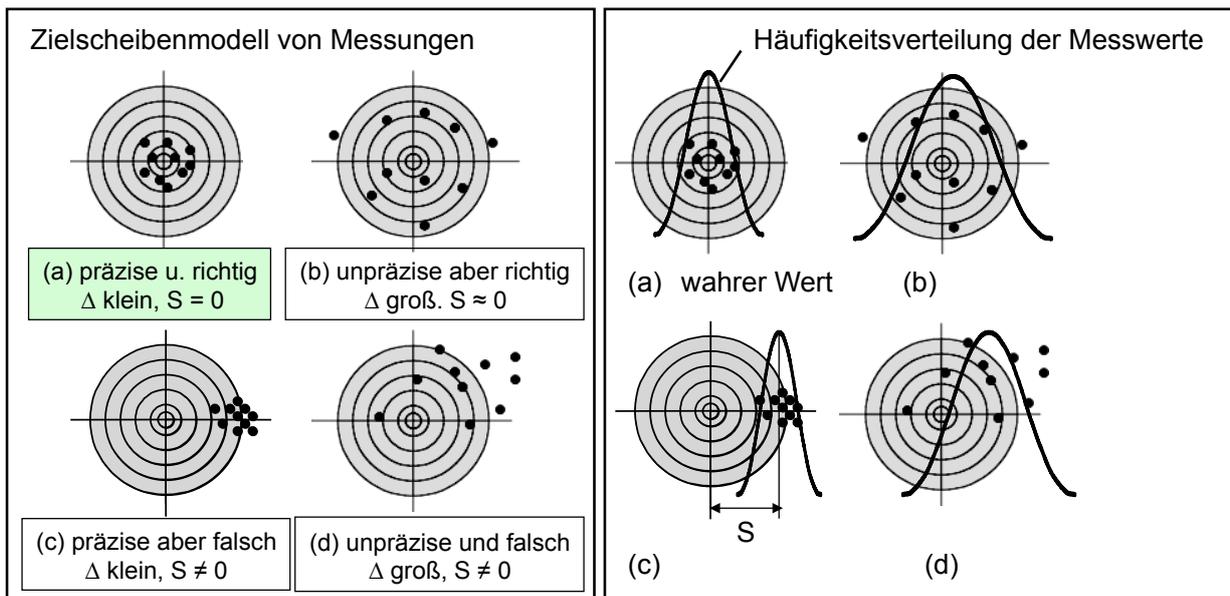
Beispiel: Systematischer Fehler S_1 einer Längenmessung in Abhängigkeit der Einflussgröße Temperatur T : $S_1 = l_w \cdot \alpha \cdot (T_M - T_0)$
Korrektur: $-S_1$



Messgenauigkeit

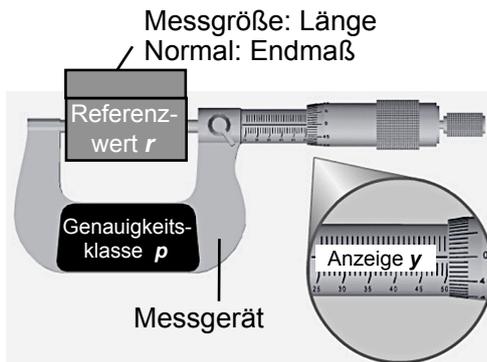


- zufällige Fehler Δ : Einzelmesswert (Ist) minus Mittelwert einer Messreihe (Soll)
- systematische Fehler S : Mittelwert einer Messreihe minus „wahrem Wert“

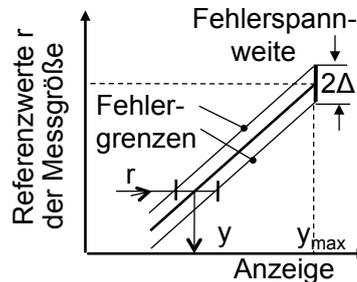


Kalibrierung von Messgeräten

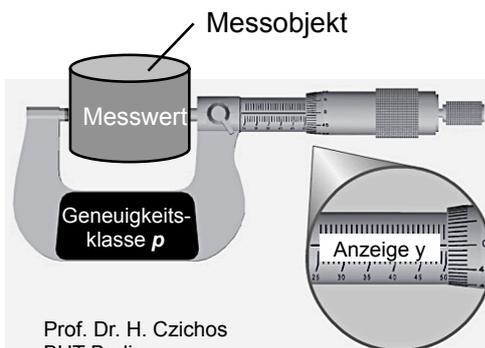
Beispiel Längenmesstechnik (Dimensional Metrology)



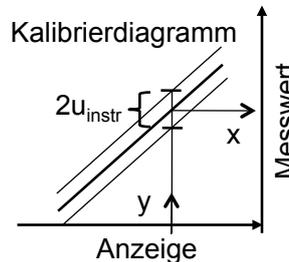
1. **Kalibrierung:** Zuordnung von Referenzwerten r der Messgröße zu Werten der Anzeige y



Die Fehlerspannweite kennzeichnet die Genauigkeitsklasse p eines Messgeräts $p = (\Delta / y_{\max}) 100$ (%).



2. **Messung:** Zuordnung von Werten der Anzeige y zu Messwerten x der Messgröße



Messergebnis:
Messwert x
 \pm Messunsicherheit u_{instr}
mit Maßeinheit

Prof. Dr. H. Czichos
BHT Berlin

11

Messunsicherheitsbudget für Messfunktionen mit mehreren Messgrößen

In technischen Aufgabenstellungen ist vielfach das anzugebende Messergebnis $y = f(A, B, C)$ eine Funktion mehrerer unabhängiger Messgrößen A, B, C, \dots

z. B.: Elektr. Widerstand = Spannung/Strom; Mechan. Spannung = Kraft/Fläche

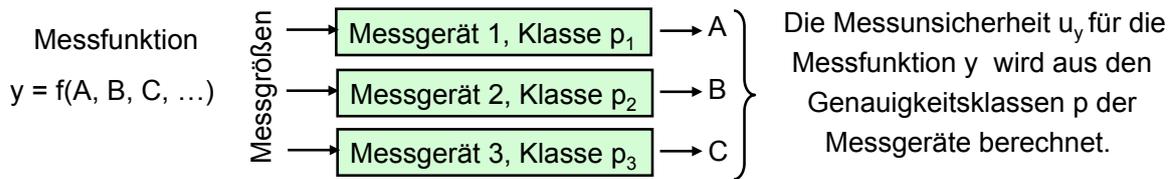
Bei Kenntnis der Messunsicherheiten der Messgrößen A, B, C mit den Absolutwerten $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ bzw. Relativwerten $\delta_A = \Delta_A/A, \delta_B = \Delta_B/B, \delta_C = \Delta_C/C$ ergibt sich für die gesamte Funktion y das folgende Messunsicherheitsbudget:

$$\Delta_y = \sqrt{[(\partial y/\partial A) \Delta_A]^2 + [(\partial y/\partial B) \Delta_B]^2 + \dots} \quad \text{mit folgenden Spezialfällen:}$$

- Summen/Differenzfunktion $y = A + B; y = A - B \Rightarrow u_y = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$
- Produkt/Quotientenfunktion $y = A \cdot B; y = A / B \Rightarrow \Delta_y/y = \delta_y = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$
- Potenzfunktion $y = A^p \Rightarrow \Delta_y/y = \delta_y = |p| \cdot \Delta_A/A = |p| \cdot \delta_A$

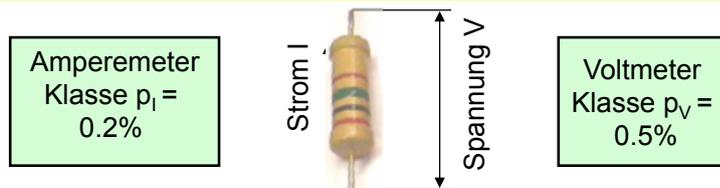
Die bei der Auswertung von Messungen erhaltenen Messergebnisse – Messwerte, Messunsicherheiten, Messunsicherheitsbudget – sind unter Zusammenstellung aller zu einer Reproduzierung der betreffenden Messung erforderlichen Angaben in einem Messprotokoll zusammenzufassen.

Messunsicherheitsbudget für Messfunktionen



$$\text{Für eine Produktfunktion } y = A \cdot B \cdot C \Rightarrow \Delta_y/y = \delta_y = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2 + \delta_C^2} = \sqrt{p_A^2 + p_B^2 + p_C^2}$$

• Beispiel: Messung eines elektrischen Widerstandes



$$\text{Messfunktion } R = V / I \Rightarrow \Delta_y/R = \delta_R = \sqrt{\delta_V^2 + \delta_I^2} = \sqrt{p_V^2 + p_I^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.2^2} = 0.54\%$$

Die kombinierte instrumentelle Messunsicherheit für den Widerstand beträgt 0,54%

Messtechnik und Sensorik

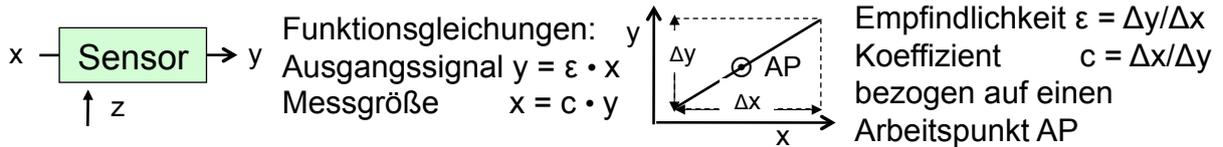
2. Sensortechnische Grundlagen

Sensorik: Grundlagen

Durch **Sensorik** können Messgrößen – umgewandelt in elektrische Signale – mit elektronischen Geräten (Schreiber, Drucker) dargestellt sowie für Aufgaben der Aktorik und der Steuer/Regelungs/Automatisierungstechnik verwendet werden.

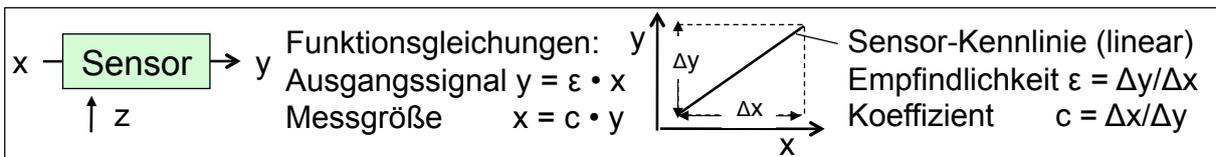
Sensor: Messgrößenaufnehmer zur Umwandlung einer Messgröße x (Sensor-Eingangsgröße) in ein elektrisches Sensor-Ausgangssignal y .

Sensor-Kennlinie: graphische Darstellung des Zusammenhangs von Messgröße x und Sensor-Ausgangssignal y im stationären Zustand.

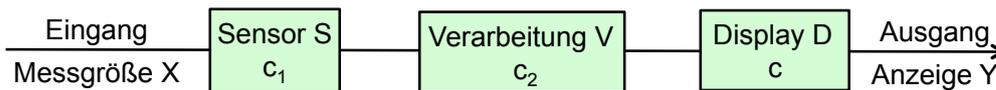


- Die Sensorfunktion kann durch Einflussgrößen z beeinflusst werden.
 - Bei einer Kennlinie sind Abweichungen (systematische Fehler) möglich:
 - Linearitätsabweichung: Abweichung von der Näherungsgeraden
 - Anfangspunkt/Nullpunkt-Abweichung: Verschiebung der Kennlinie
 - Steigungs/Empfindlichkeits-Abweichung: Verdrehung der Kennlinie
- Die Abweichungen können durch Justieren reduziert werden.

Sensor und Messkette



Eine Messkette besteht im einfachsten Fall aus Sensor, Signalverarbeitung und Display, d. h. Anzeige oder Registrierung

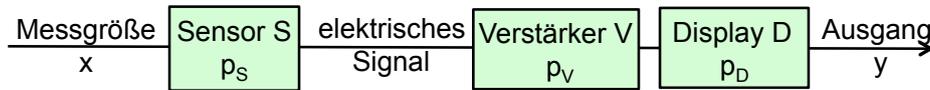


Messgröße = Anzeige • Meskettenkoeffizient c_M $c_M = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3$

$X = c_M \cdot Y$

Instrumentelle Messunsicherheit einer Messkette

Betrachtet wird eine Messkette, bestehend aus Sensor (Genauigkeitsklasse p_S), Verstärker (Genauigkeitsklasse p_A), Display, d. h. Anzeige oder Registrierung (Genauigkeitsklasse p_D). Die Genauigkeitsklassen sind stets auf den Messbereichsendwert bezogen.



- Messunsicherheitsbudget der Messkette gemäß Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta_M/|y| = \sqrt{(\Delta_S/x_S)^2 + (\Delta_V/x_V)^2 + (\Delta_D/x_D)^2}, \quad (\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C \text{ Messunsicherheiten von S, V, D})$$

Die relativen instrumentellen Messunsicherheiten können durch die Genauigkeitsklassen von S, V, D ausgedrückt werden: $\Delta_S/x_S = p_S$, $\Delta_V/x_V = p_V$, $\Delta_D/x_D = p_D$
Das Messunsicherheitsbudget der Messkette $f_M = \Delta_M/|y|$ ist damit

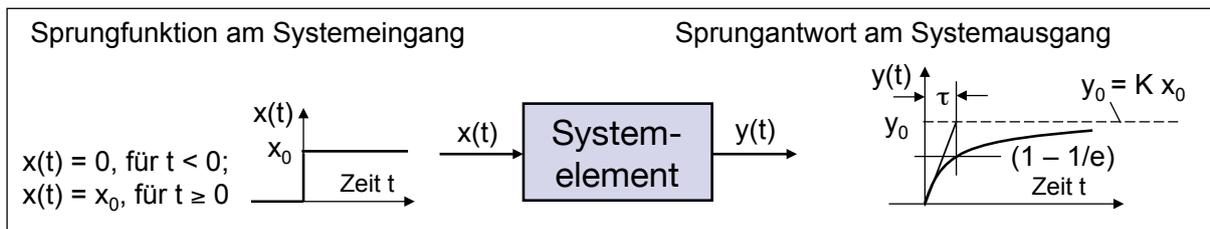
$$f_M = \Delta_M/|y| = \sqrt{p_S^2 + p_V^2 + p_D^2}.$$

Für eine Messkette mit n Komponenten in Reihe ergibt sich allgemein das folgende instrumentelle Messunsicherheitsbudget der Messkette

$$f_M = \sqrt{\sum p_i^2}, \quad i = 1 \dots n$$

Signalübertragungsverhalten

Das Signalübertragungsverhalten von Sensoren wird mit Testfunktionen untersucht z.B.: Sprungfunktion oder Rampenfunktion sowie δ -Impulsfunktion.



- Lösungsansatz : Ausgangssignal + zeitliche Variation = Übertragungsfaktor · Eingangssignal \Rightarrow DGL 1. Ordnung $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = y_0$. Lösung: $y(t) = c_0 + c_1 \exp(-t/\tau)$ mit Zeitkonstante τ
- Signal-Sprungantwort: $y(t) = y_0(1 - \exp(-t/\tau))$. • Übertragungsfaktor: $K = y_0 / x_0$
- Die Tangente der Signal-Sprungantwort am Ursprung schneidet die Asymptote zur Zeit $t = \tau$, dort hat das Ausgangssignal $(1 - 1/e) = 63,2\%$ des Endwertes erreicht.

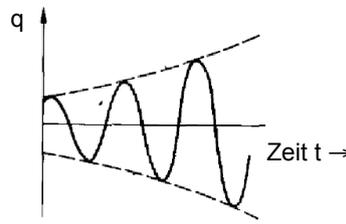
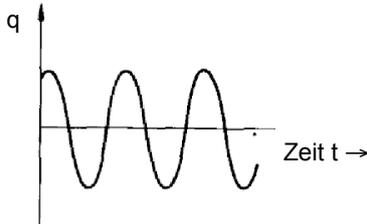
Dynamischer Fehler δ des Ausgangssignals: $\delta = (\text{Ist} - \text{Soll})/\text{Soll} = -\exp(-t/\tau)$.
Das Ist-Signal nähert sich asymptotisch dem idealen Soll-Signal.
Nach der Zeit $t = 2\tau$ ist $\delta \approx 10\%$ und nach der Zeit $t = 5\tau$ ist $\delta < 1\%$.

Schwingungsverhalten allgemein

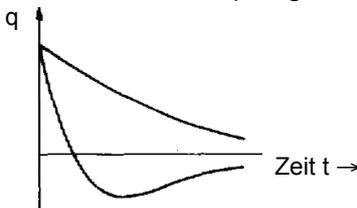
Kinematik von Schwingungen. Ansatz: Variable $q + 1.$ zeitl. Ableitung + 2. zeitl. Ableitung = 0
 \Rightarrow DGL 2. Ordnung: $\ddot{q} + 2D\omega_0\dot{q} + \omega_0^2q = 0$ mit ω_0 : Eigenfrequenz, D : Dämpfungsmaß

Schwingungsverhalten in Abhängigkeit vom Dämpfungsmaß D :

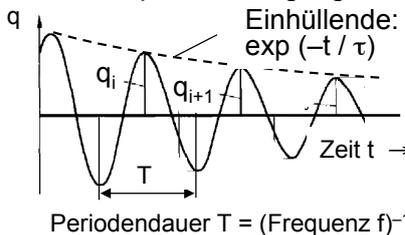
- Ungedämpfte Schwingung, $D=0$
- Angefachte Schwingung, $-1 < D < 0$



- Überkritische Dämpfung, $D > 1$



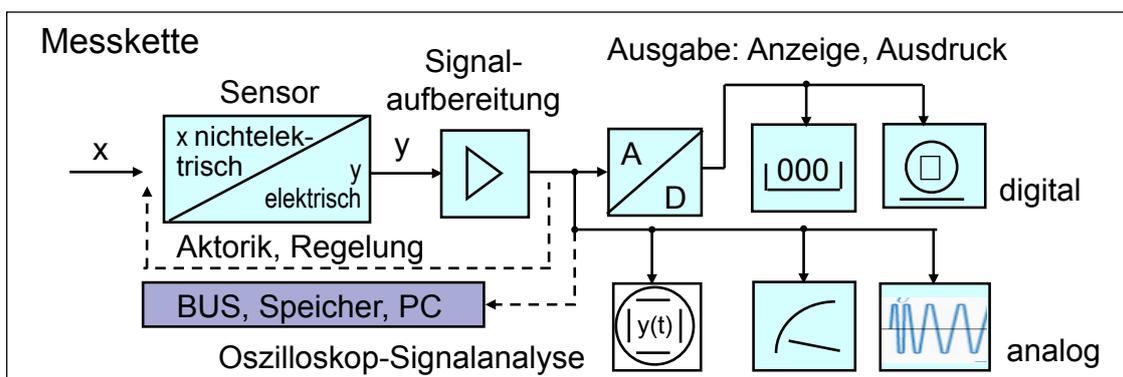
- Gedämpfte Schwingung, $0 < D < 1$



Abklingzeit τ :
 Berechnung aus dem logarithmischen Dekrement Λ
 $\Lambda = \ln(q_i / q_{i+1})$
 $\Lambda = \ln \frac{\exp(-t/\tau)}{\exp(-[t + nT]/\tau)}$
 $\Lambda = \exp(nT/\tau)$
 die Abklingzeit $\tau = nT \Lambda^{-1} = (n/f) \Lambda^{-1}$
 Nach der Zeit τ ist eine Amplitude auf $(1 - 1/e) = 63,2\%$ abgefallen

Messstrategie der Sensorik

- I. Definition der Messgröße und der metrologischen Bezugsgröße
- II. Festlegung von Messprinzip, Messverfahren und (kalibrierten) Messgeräten
- III. Strukturierung und Realisierung der Messkette

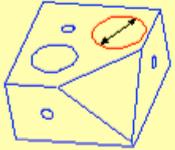
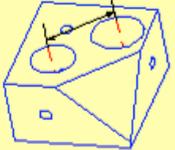
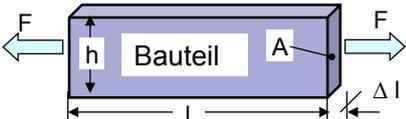
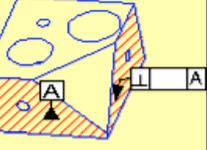
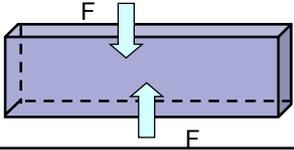
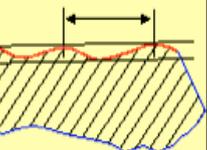
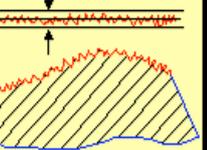
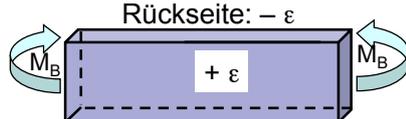
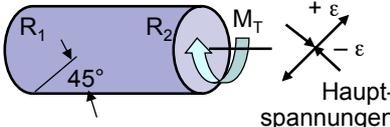


- IV. Durchführung der Messung, Festlegung der Arbeitsschritte (Check-Liste)
- V. Datenerfassung, Auswertung, Messunsicherheitsrechnung, Techn. Bericht

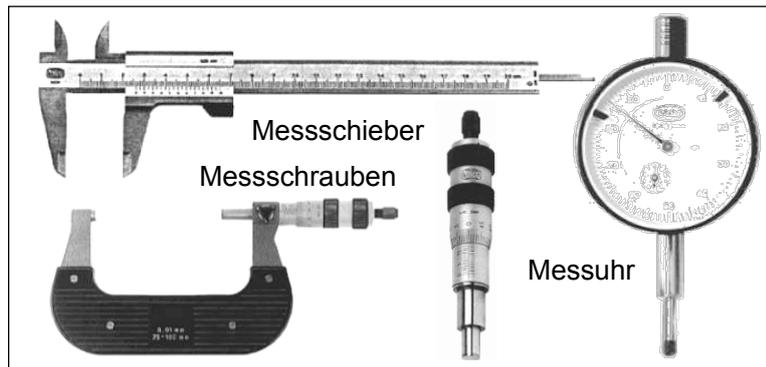
Messtechnik und Sensorik

3. Bauteilsensorik

Bauteilsensorik: Gestaltparameter und Beanspruchungen

<p>Maß</p> 	<p>Abstand</p> 	<p>Zug, Druck Kraft F</p>  <p>Dehnung $\varepsilon = \Delta l / l$, Spannung $\sigma = F / A$ Querkzahl (Poisson) $\nu = (\Delta h / h) / \varepsilon$ E-Modul: $E = \sigma / \varepsilon$ (Hooke)</p>
<p>Lage</p> 	<p>Form</p> 	<p>Scherung oder Schub Kraft F</p> 
<p>Welligkeit</p> 	<p>Rauheit</p> 	<p>Biegung Biegemoment M_B</p> 
		<p>Torsion Torsionsmoment M_T</p>  <p>Hauptspannungen</p>

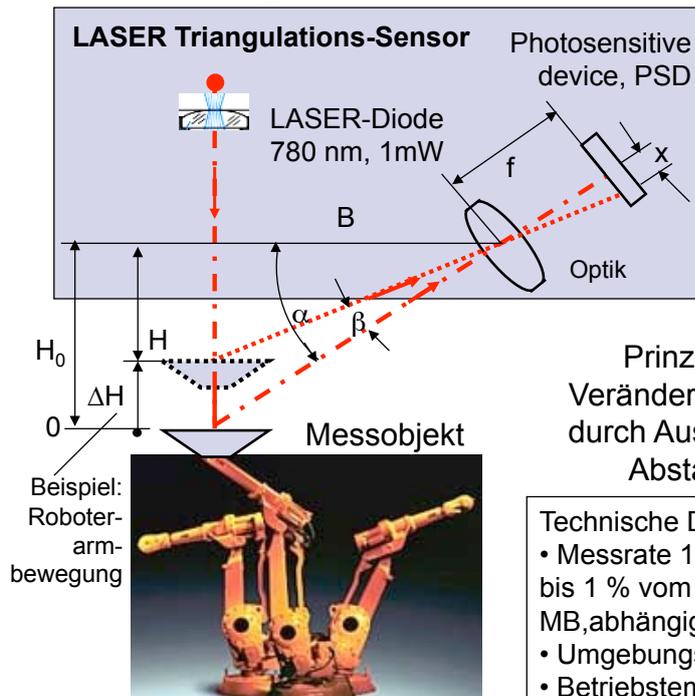
Klassische Instrumente der Längenmesstechnik



Abbesches Prinzip der Längenmesstechnik

In der Längenmesstechnik sollen nach dem Abbeschen Komparatorprinzip Messobjekt und Maßverkörperung in einer Ebene fluchtend angeordnet sein, um Messfehler 1. Ordnung – d.h. eine Messabweichung Δ proportional zum Winkel α einer möglichen Parallaxe – zu vermeiden.

Berührungslose Positions- und Bewegungssensorik



Sensor-Strahlengang-Geometrie

$$\tan \alpha = H_0 / B \quad \tan \beta = x / f$$

$$\tan (\alpha - \beta) = H / B$$

Trigonometrie:

$$\tan (\alpha - \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta}$$

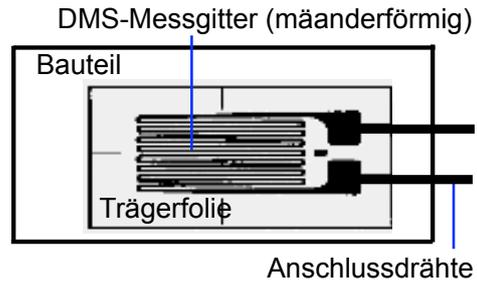
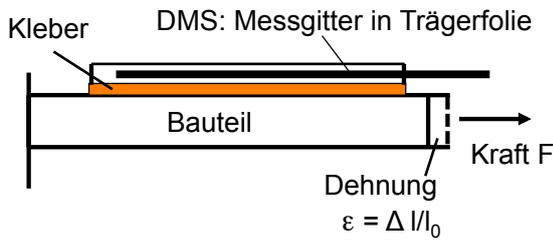
$$\Rightarrow \Delta H = H_0 - B \frac{f \cdot \tan \alpha - x}{f + (\tan \alpha) \cdot x}$$

Prinzip: Die Messung der Positions-Veränderung ΔH eines Messobjektes erfolgt durch Auswertung der Stromverhältnisse im Abstand x mit einem PSD-Detektor

Technische Daten: • Messbereich (MB) 0,1 bis 10 m
• Messrate 10 Hz bis 100 kHz • Genauigkeit 0,1 % bis 1 % vom MB • Auflösung 0,005 bis 0,1 % vom MB, abhängig von Material und Oberfläche
• Umgebungsbeleuchtung max. 5000 bis 30000 lx
• Betriebstemperatur 0 bis 50 °C

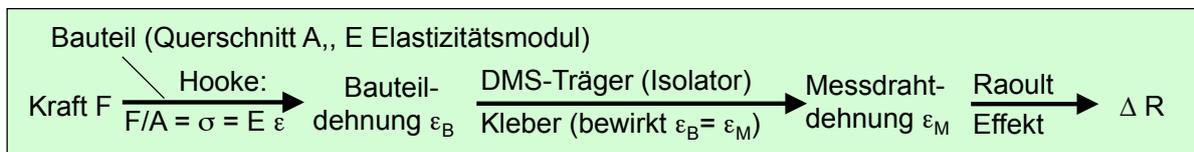
Dehnungsmessstreifen(DMS)-Technik

Bauteil mit aufgeklebtem DMS



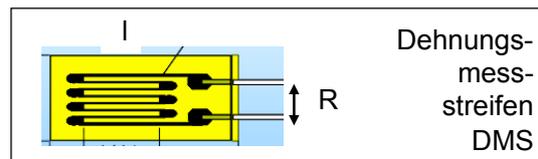
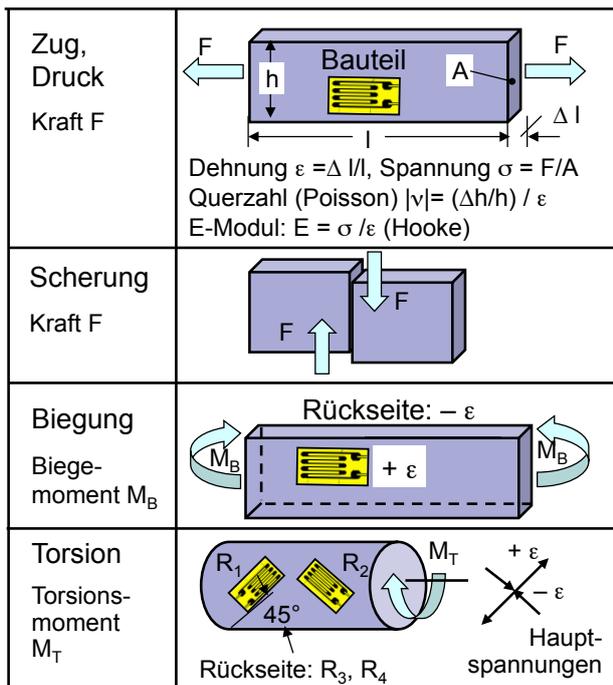
Die Kraft bewirkt eine Dehnung des Bauteils und damit eine dehnungsabhängige Änderung des elektrischen Widerstands des DMS

Funktion von DMS

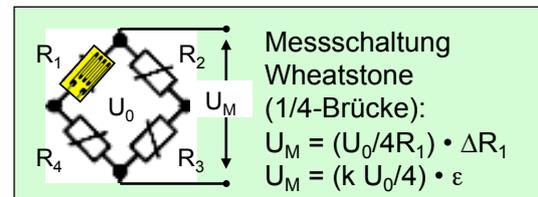


$$\Delta R/R = k \cdot \varepsilon \text{ (Grundgleichung der DMS-Technik)}$$

Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifentechnik

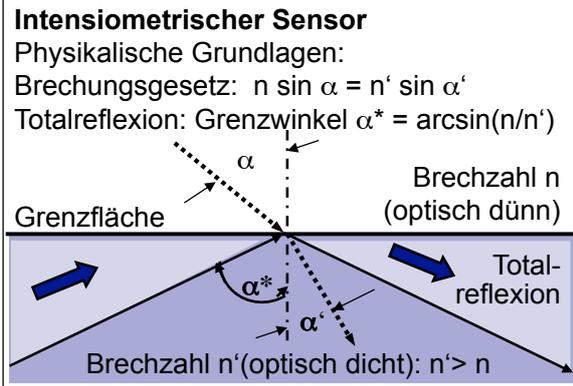


DMS-Funktion: $\Delta l \rightarrow \Delta R$
 Grundgleichung der DMS-Technik
 $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$, $k \approx 2$ (Metalle)



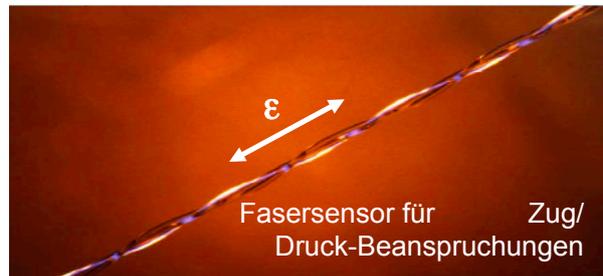
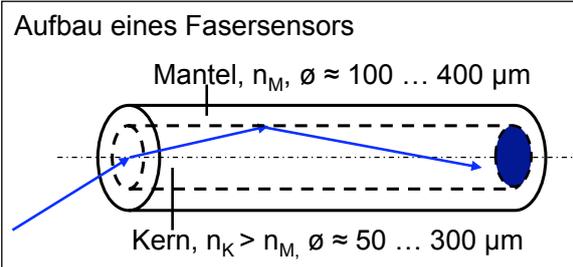
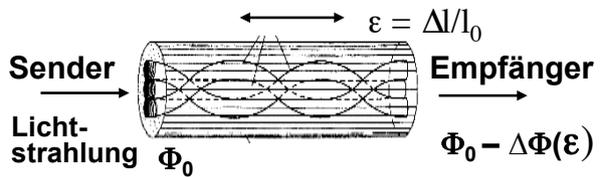
Beanspruchungsanalyse
 Dehnung $\varepsilon = \Delta R / R k = (4 / k U_0) U_M$
 Spannung $\sigma = E \varepsilon = (4 E / k U_0) U_M$
 Kraft $F = \sigma A = (4 A E / k U_0) U_M$

Faseroptische Sensorik



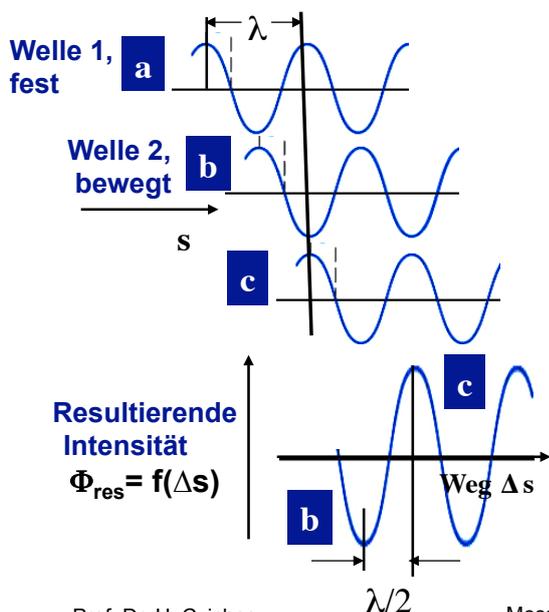
Sensorfunktion:

Dehnungen (ϵ) oder Biegungen verändern die Lage der Grenzfläche der Totalreflexion und führen zu Lichtverlusten als Maß für die Dehnung bzw. Biegung.

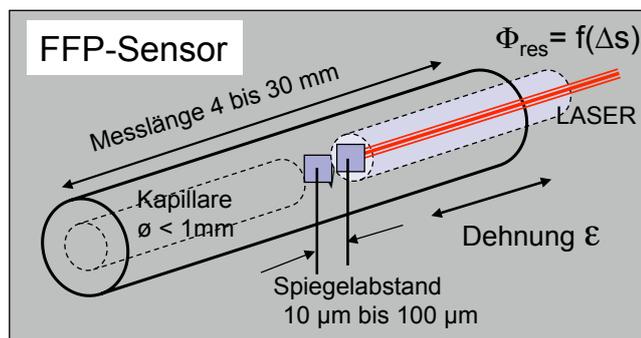


Faseroptisches Fabry-Perot-Interferometer

Physik der Interferenz



Funktionsprinzip

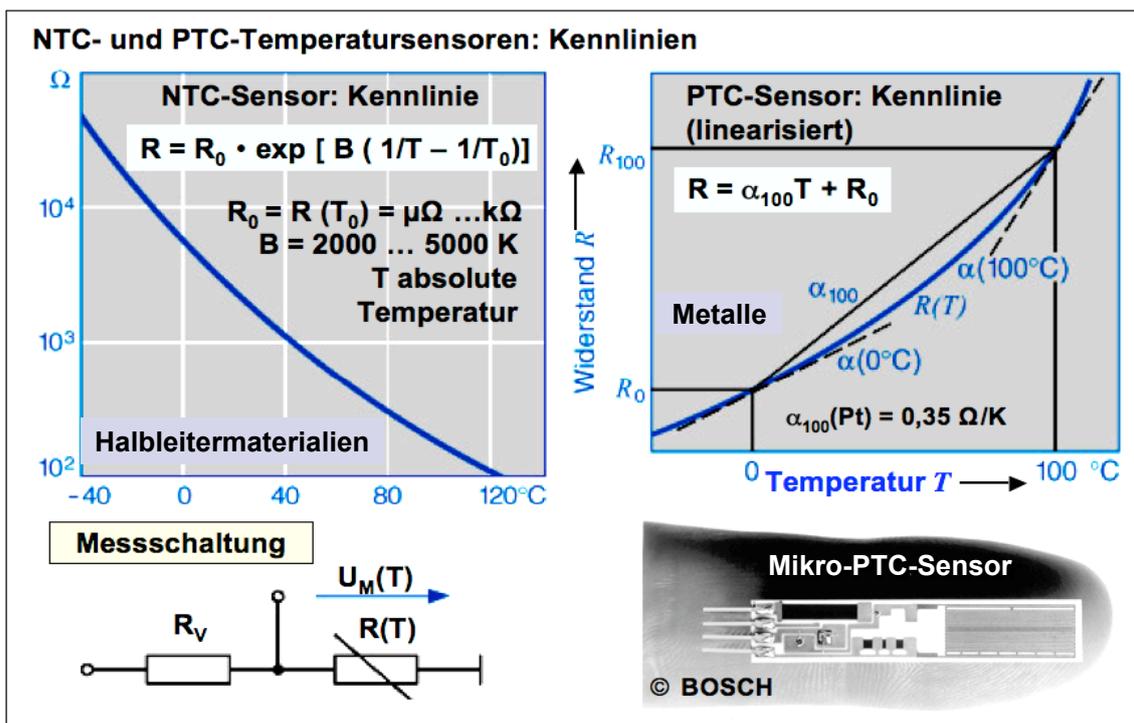


In einer Kapillare bewegen sich bei Verformung des Sensors zwei interferenzfähige Spiegel. Die Interferenzänderungen werden gemessen und daraus die Dehnung ($\pm \epsilon$) des Sensors mit einer Auflösung bis ca. $0,08 \mu\text{m}/\text{m}$ bestimmt.
 Applikationsarten: Verkleben, Einbetten in Bauteile \Rightarrow Embedded Sensors

Messtechnik und Sensorik

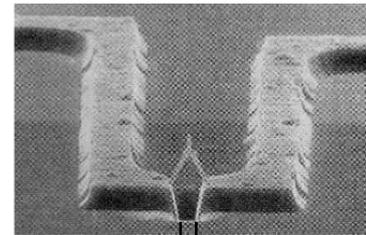
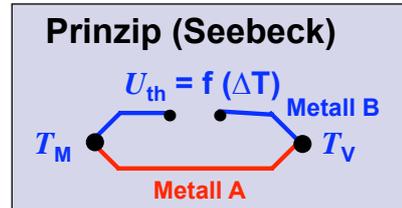
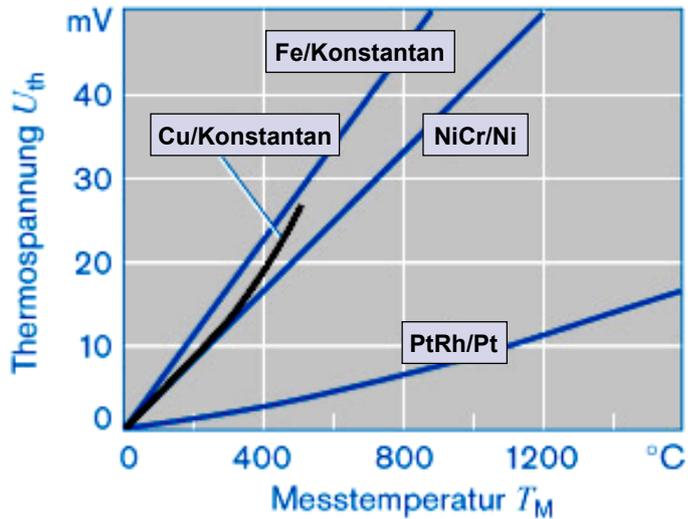
4. Temperatursensorik

Widerstandsthermometer



Thermoelement-Sensoren

Kennlinien typischer Thermopaare

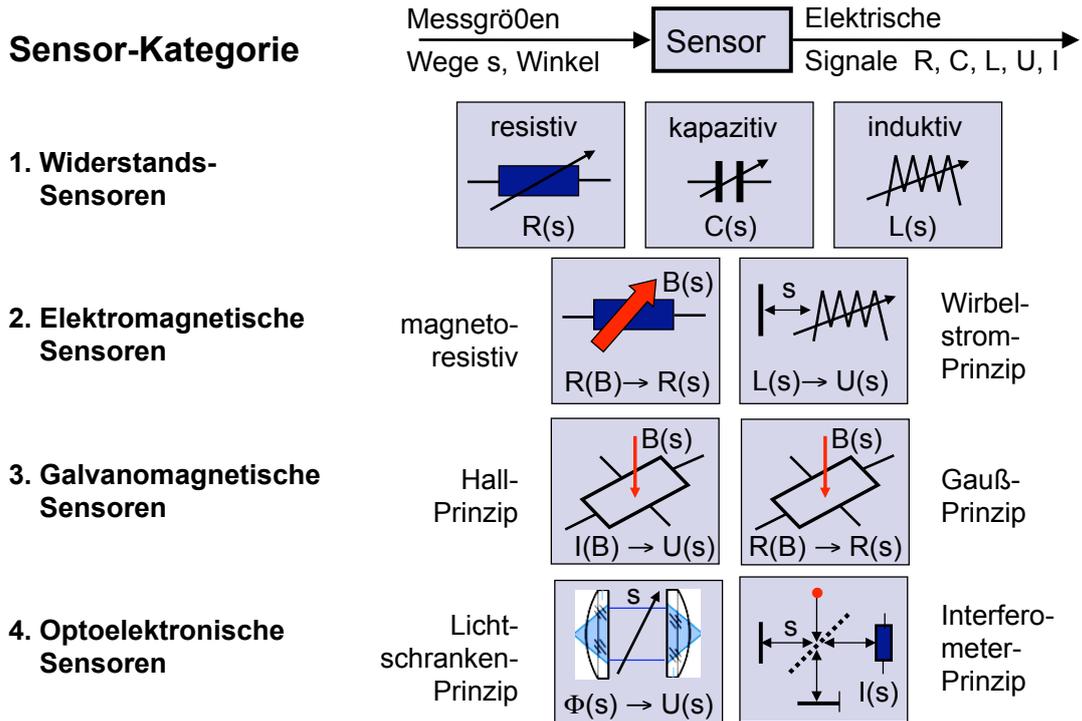


100 nm
Nano-Thermoelement

Messtechnik und Sensorik

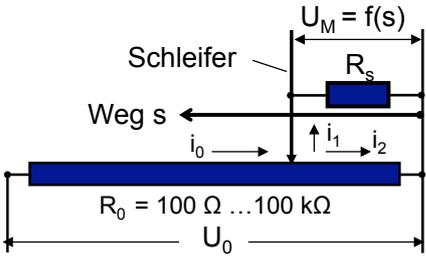
5. Positionssensorik

Positionssensorik



Resistiver Positionssensor (Messpotentiometer)

Resistiver Weg-Sensor



Technische Daten

- Messweg $s_{max} = 20 \dots 200 \text{ mm}$
- Auflösung $\Delta s = 0,1 \dots 10 \mu$
- Linearität $< \pm 0,1 \%$
- Betriebstemperatur $T_{max} = 80 \dots 140 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\Delta s / \Delta T = 3 \cdot 10^{-4} / \text{ }^\circ\text{C}$

Funktionsprinzip:
Grundlage: Potentiometerprinzip und Kirchhoffsche Regeln

Knoten : $i_0 = i_1 + i_2$

Maschen: $U_M = i_1 R_i = i_2 R_s$

wobei $R_s = R_0 (s/s_{max})$

$$U_0 = i_2 R_s + i_0 (R_0 - R_s)$$

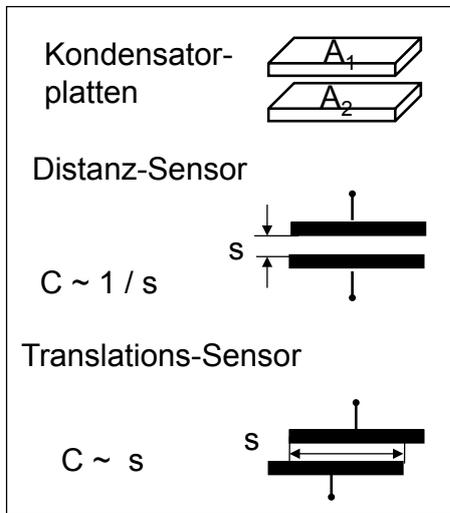
Für die Messspannung $U_M = f(s)$ folgt:

$$U_M = U_0 (s/s_{max}) / [1 + (R_0/R_i)(s/s_{max})(1 - s/s_{max})]$$

Bei hohem Innenwiderstand R_i , d.h. $R_0/R_i \rightarrow 0$ ergibt sich der lineare Zusammenhang

$$U_M = (U_0/s_{max}) \cdot s$$

Kapazitiver Positionssensor



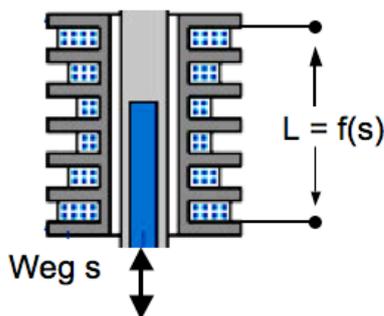
Kapazitiver Wegsensor: Funktionsprinzip
Bei kapazitiven Positionssensoren wird die elektrische Kapazität eines Plattenkondensators $C \sim A/s$ (A Überdeckungsfläche von A_1 und A_2 , s Plattenabstand) zur Wegsensorik genutzt.

- Bei einem Distanz-Sensor ist die Kapazität näherungsweise umgekehrt proportional zum Messweg s .
- Bei einem Translations-Sensor verändert sich bei einer Veränderung der Überdeckung der Kondensatorplatten A_1 und A_2 die Kapazität. Es besteht näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen Messweg s und Kapazität C .

Positionssensorik Induktiver Wegsensor

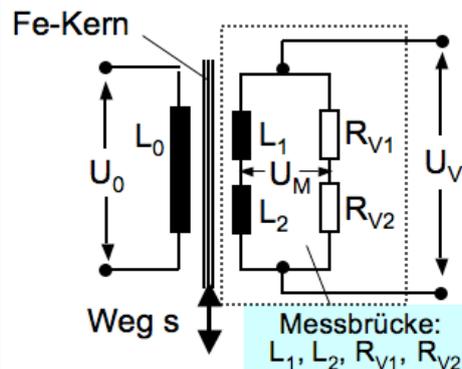
Induktiver Weg-Sensor

Tauchkern-Spulensystem, dessen Induktivität L durch die Eintauchtiefe eines ferromagnetischen Tauchkerns gesteuert wird.

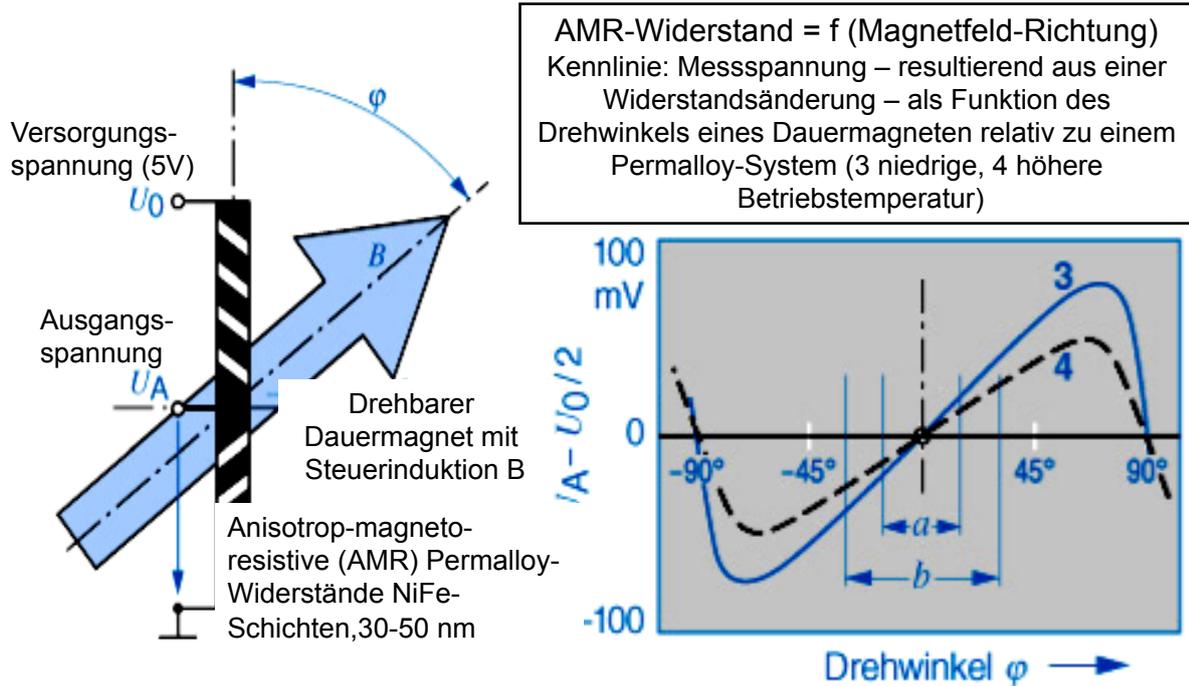


Differentialtransformator-Sensor

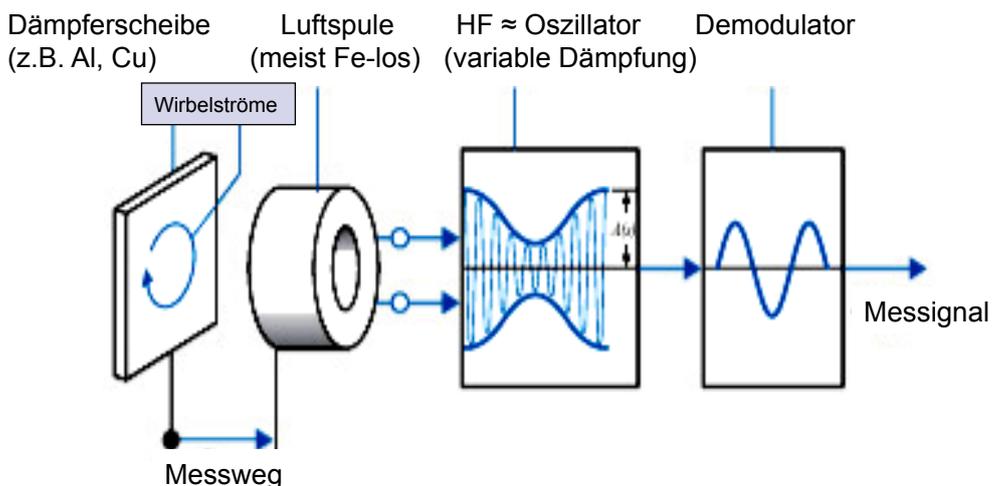
Prinzip: induktive wegabhängige Kopplung zwischen einer Primärspule L_0 und zwei Sekundärspulen L_1 L_2 einer Messbrücke; Messsignal: $U_M \sim \text{Weg } s$



Positionensorik: Magnetoestives Prinzip



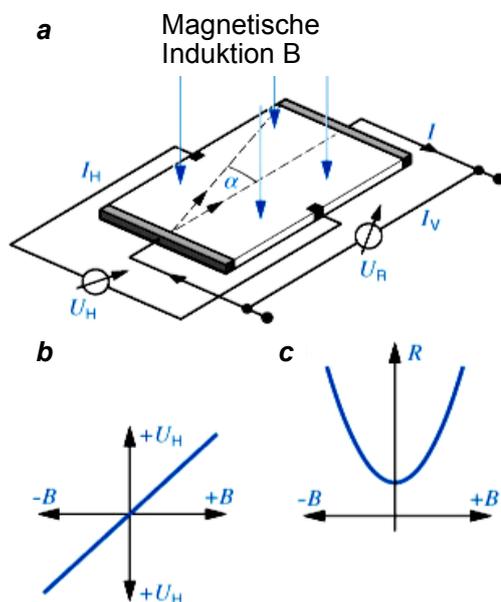
Wirbelstrom-Positionssensor



Technische Daten: • Schaltabstand 2...4 mm • Betriebstemperatur -25 bis 80 °C
• Linearitätsfehler 4...12 % ($\approx 60 \mu\text{m}$) • Schaltfrequenz max. 1 kHz

Positionsmesstechnik

Galvanomagnetische Sensorprinzipien

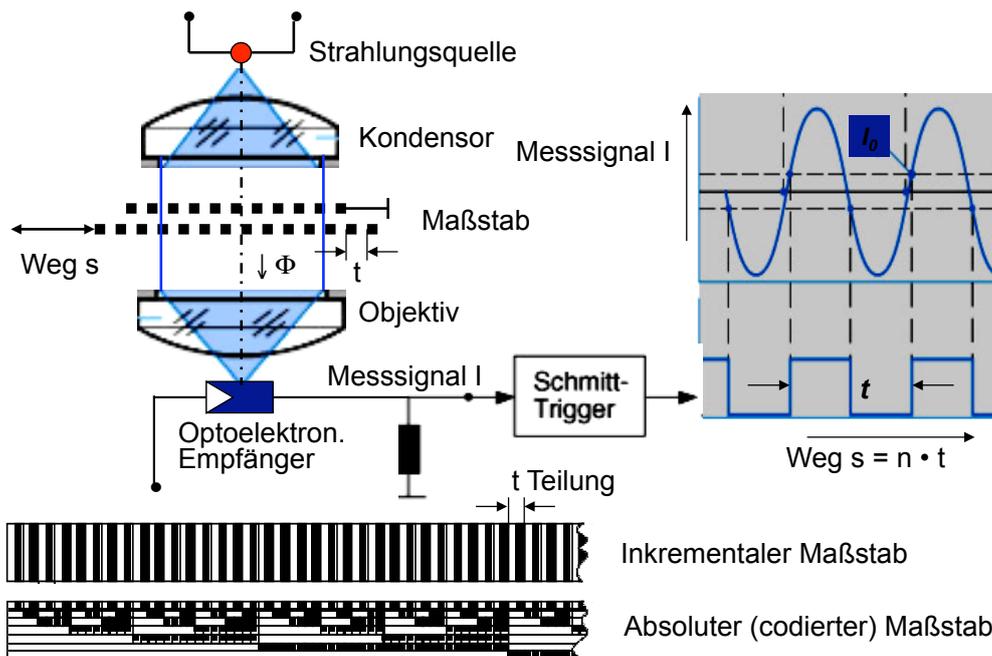


a Schaltung
 I_H Hall-Strom,
 I Feldplattenstrom,
 α Ablenkung der Elektronen durch das Magnetfeld

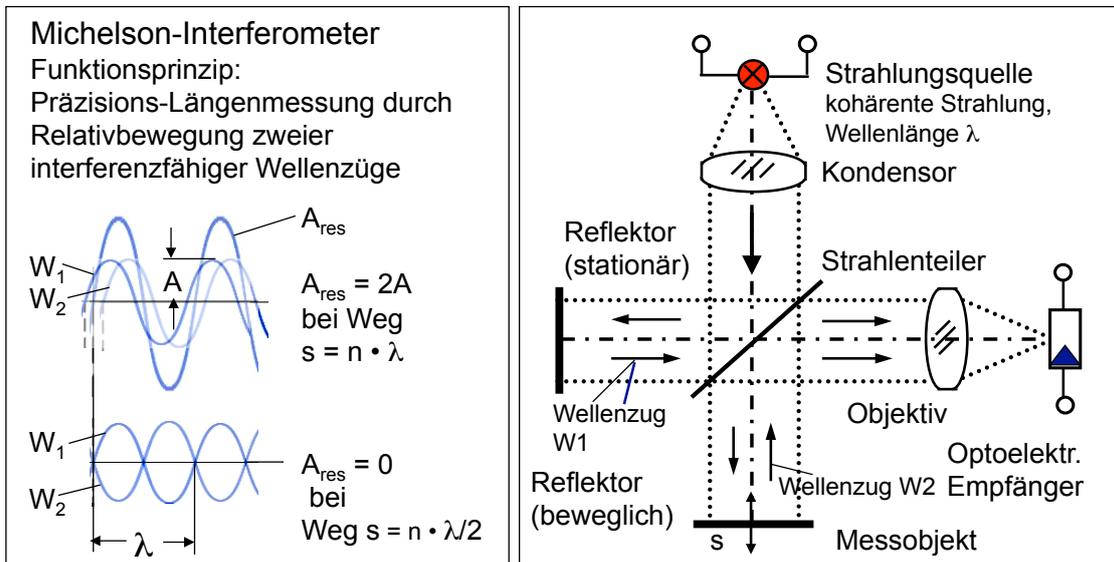
b Grundlage der Hall-Sensoren :
 Hallspannung U_H als Funktion
 der magnetischen Induktion B
 (Hall-Effekt),

c Grundlage der Feldplatten-
 Sensoren (kristallines InSb):
 Feldplatten-Widerstand R als
 Funktion von B (Gauß-Effekt)

Optoelektronisches Lichtschrankensystem mit Inkrementalmaßstab



Optoelektronische Positionssensorik

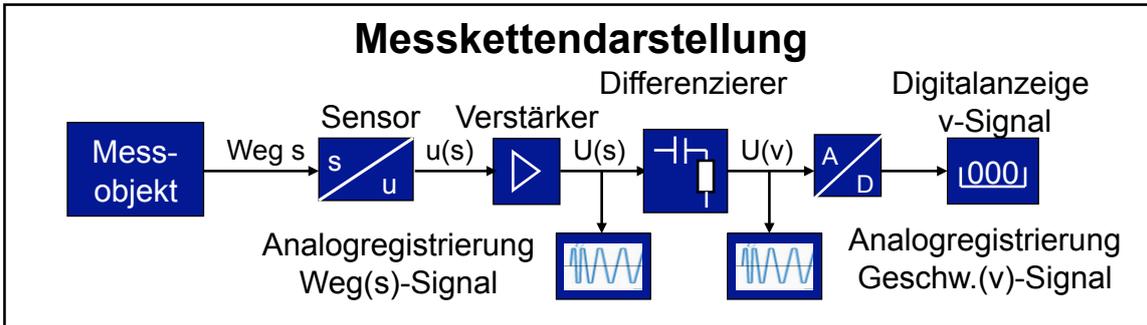


Messtechnik und Sensorik

6. Geschwindigkeits- und Drehzahlsensorik

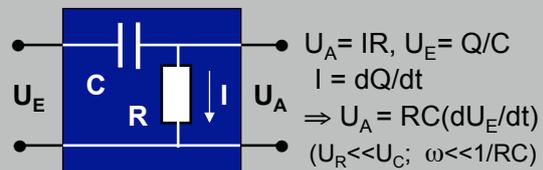
Geschwindigkeitsmesstechnik

Wegsensor + Differenzierer



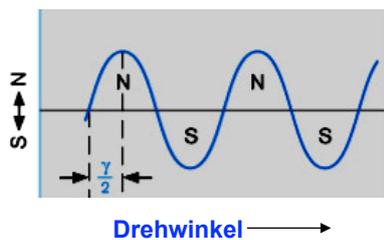
Geschwindigkeitsmessungen lassen sich prinzipiell gemäß $v = ds/dt$ (bei stetigen Signalverläufen) durch die Kombination eines Wegsensors mit einem Differenzierer auf Wegmessungen zurückführen.

Funktionsprinzip eines Differenzierers

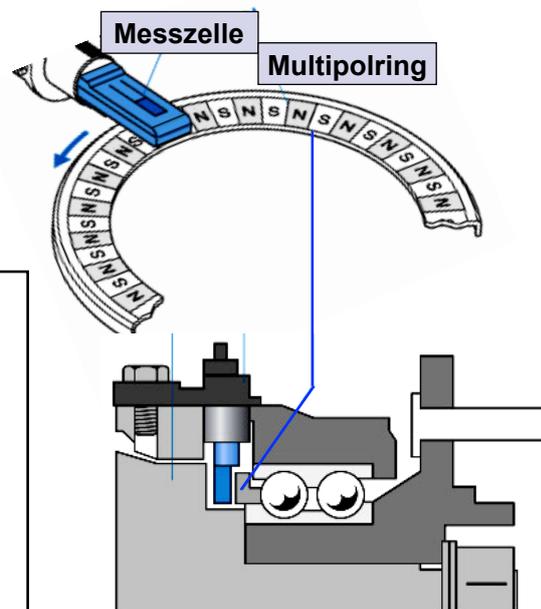


Drehzahlsensorik

Magnetpol-Sensor



Bei einem aktiven Drehzahlsensor übernehmen Magnete die Funktion der Zähne des Impulsrades. Die Magnete sind in einem Multipol integriert und in ihrer Polarität wechselweise auf deren Umfang angeordnet. Die Messzelle detektiert die harmonische Variation des Magnetfeldes bei Rotation des Multipolrings.

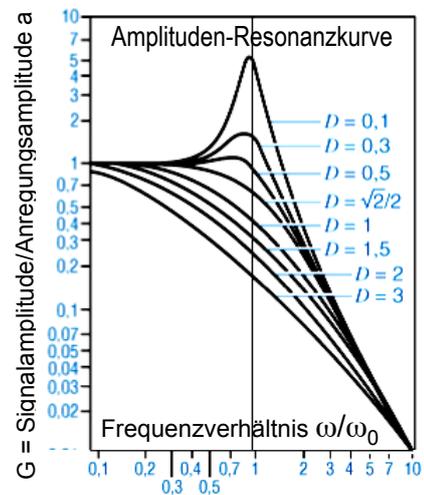
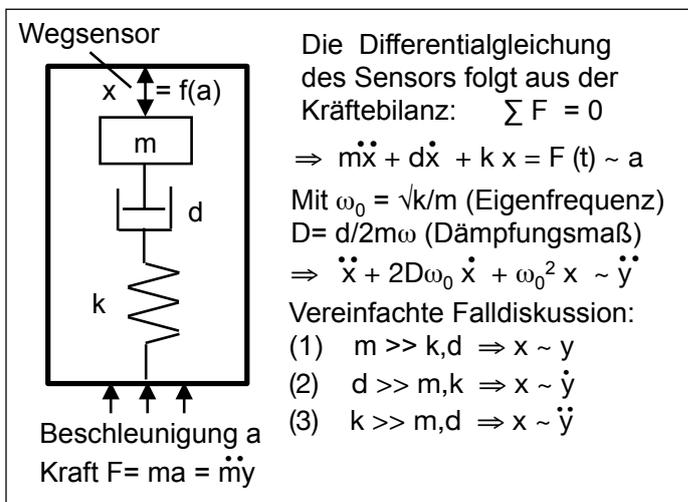


Messtechnik und Sensorik

7. Beschleunigungssensorik

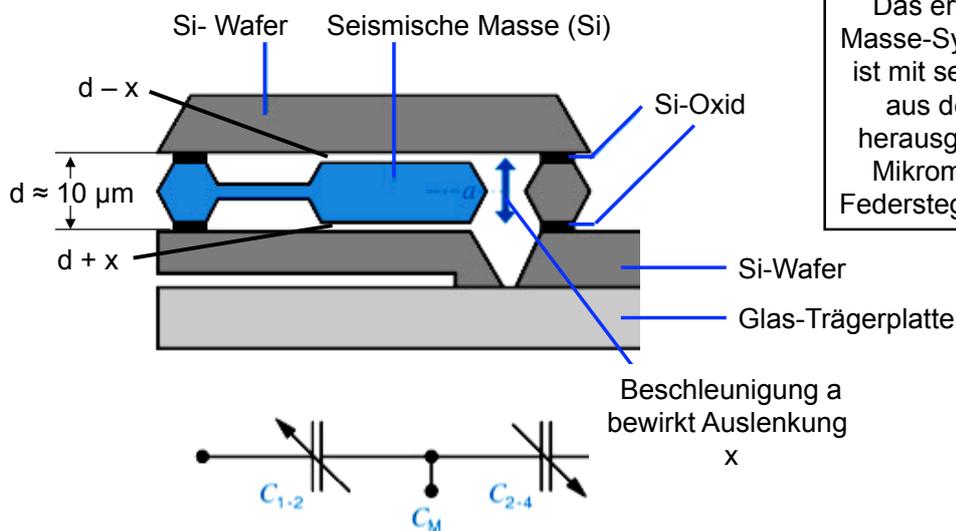
Beschleunigungsmesstechnik Seismischer Sensor

Die zu messende Beschleunigung a bewirkt über ein Masse(m)-Feder(k)-Dämpfer(d)-System an einem Wegsensor eine Auslenkung $x = f(a)$ bei $k \gg m, d$. Das Dämpfungsmaß D bestimmt das dynamische Verhalten des Sensors, gekennzeichnet durch die Amplituden-Resonanzkurve.



Beschleunigungsmesstechnik

Kapazitiver Mikromechanik-Sensor



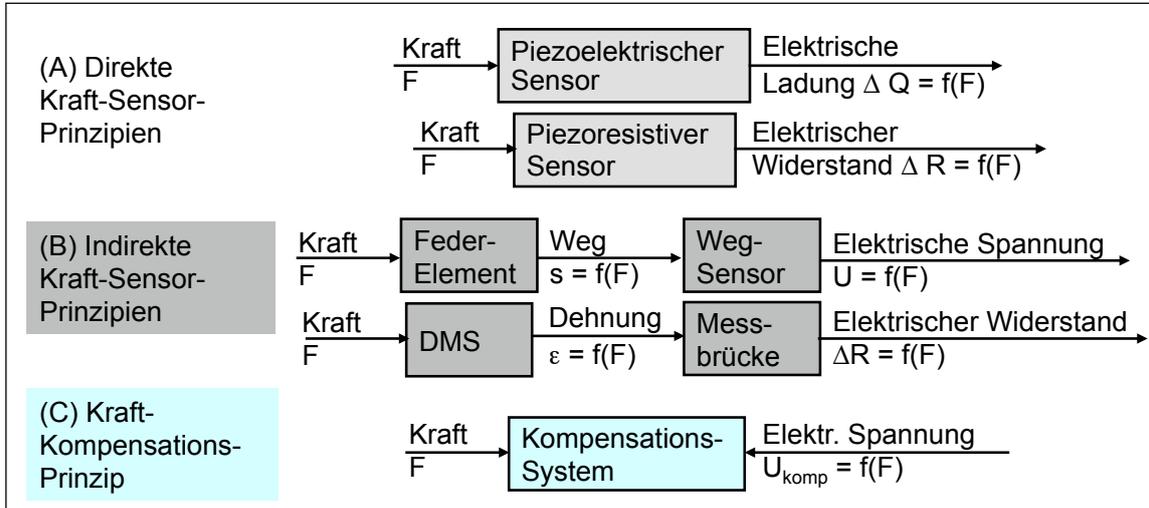
$$\text{Messkapazität } C_M \sim 1/\text{Kondensatorplattenabstand} \Rightarrow C_M \sim [1/(d-x) - 1/(d+x)] \Rightarrow C_M \sim 2x/d^2$$

Messtechnik und Sensorik

8. Sensorik von Kraft, Drehmoment, Druck

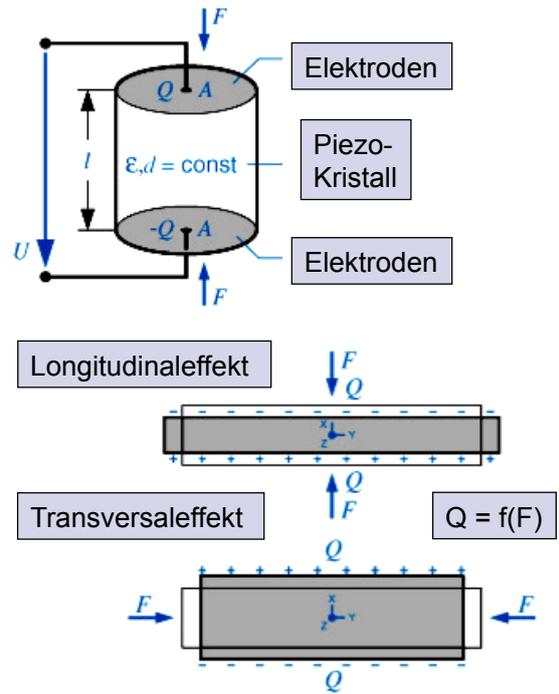
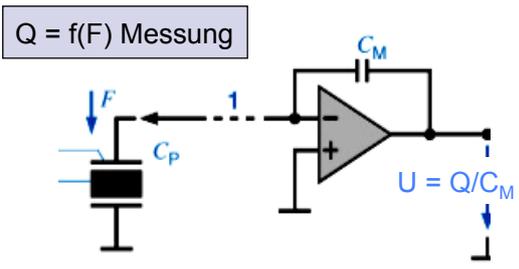
Kraftsensorik: Sensorprinzipien

Physik: Kräfte können nur aus ihren Wirkungen bestimmt werden



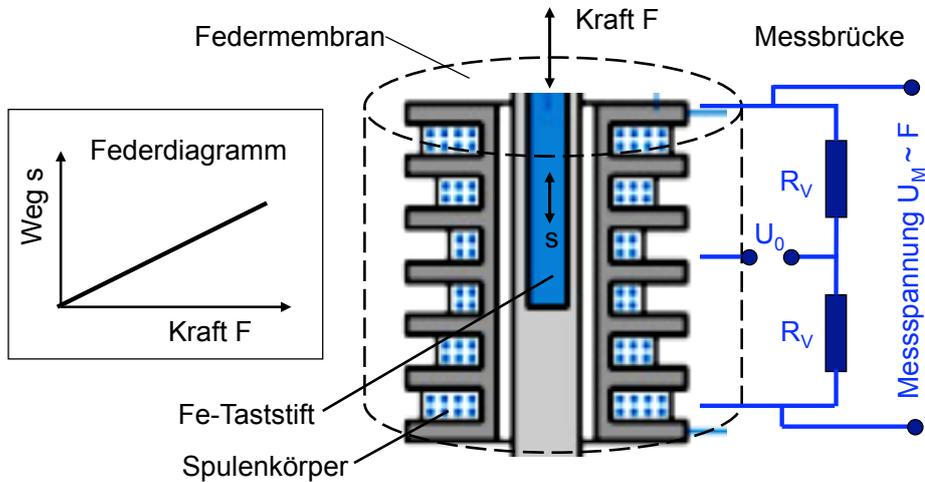
Piezoelektrische Kraftsensorik

Piezoelektrischer Effekt:
Erzeugung elektrischer Ladungen Q durch Einwirkung einer Kraft F auf bestimmte Kristalle. Den piezoelektrischen Effekt zeigen beispielsweise Kristalle aus Quarz, Zinkoxid oder Keramiken wie Bleizirconat-Titanat (PZT) sowie das Polymer Polyvinylfluorid (PVDV). In der Sensorik wird die Veränderung des Ladungszustandes durch eine mechanische Spannung für piezoelektrische Kraftsensoren genutzt.

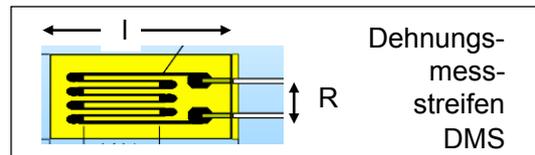
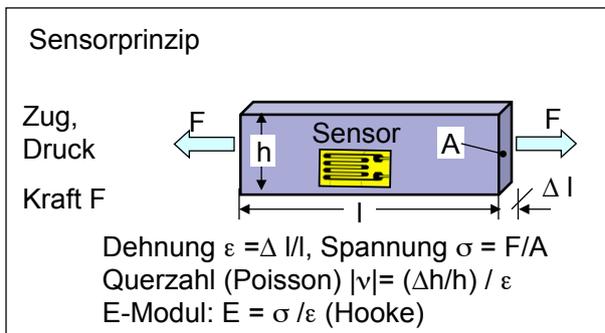


Induktive Kraftmessdose

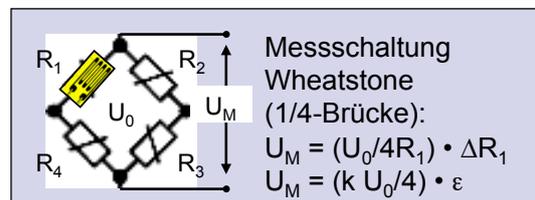
Prinzip: Rückführung der Kraftmessung auf eine Wegmessung



Kraftsensorik DMS-Sensorik



DMS-Funktion: $\Delta l \rightarrow \Delta R$
 Grundgleichung der DMS-Technik $\Delta R / R = k \cdot \varepsilon$, $k \approx 2$ (Metalle)



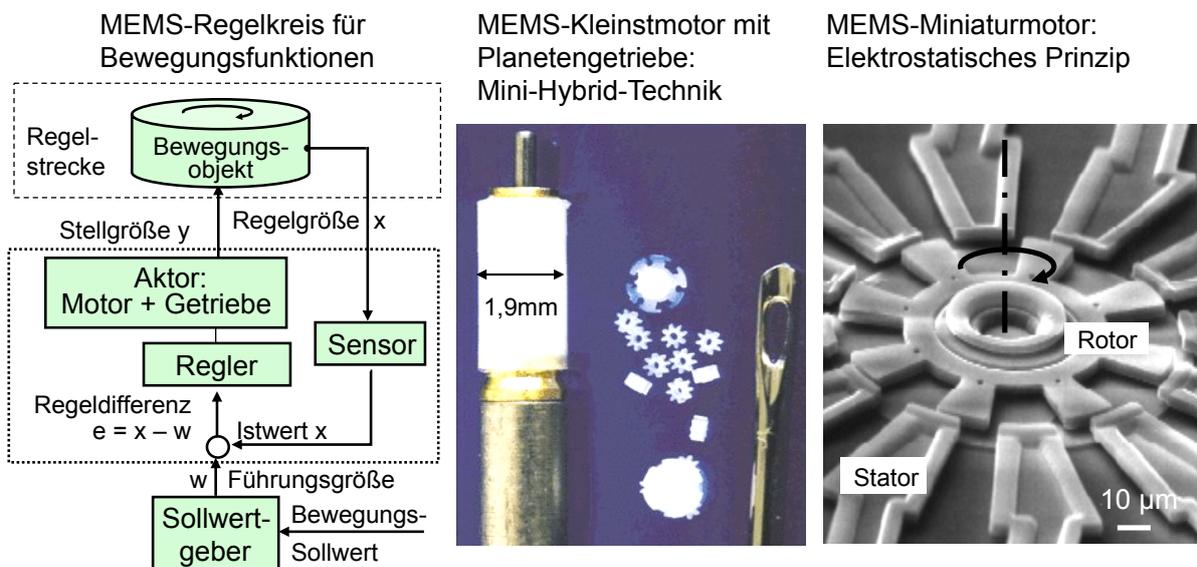
Funktionale Zusammenhänge
 Dehnung $\varepsilon = \Delta R / R = (4 / k U_0) U_M$
 Spannung $\sigma = E \varepsilon = (4 E / k U_0) U_M$
 Kraft $F = \sigma A = (4 A E / k U_0) U_M$

Messtechnik und Sensorik

9. Mikrotechnik

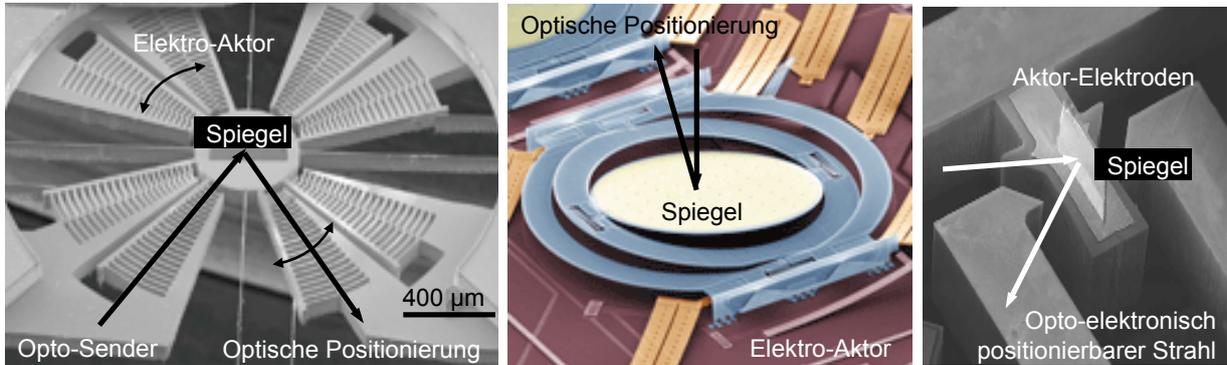
MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems

Miniaturisierte Sensor-Aktor-Systeme mit mikromechanisch/elektronischen Bauelementen für technische Bewegungsfunktionen

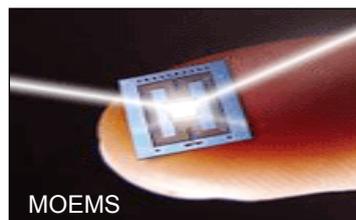
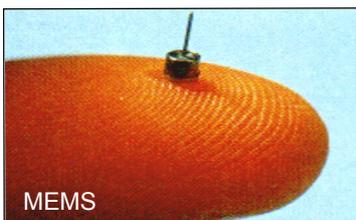
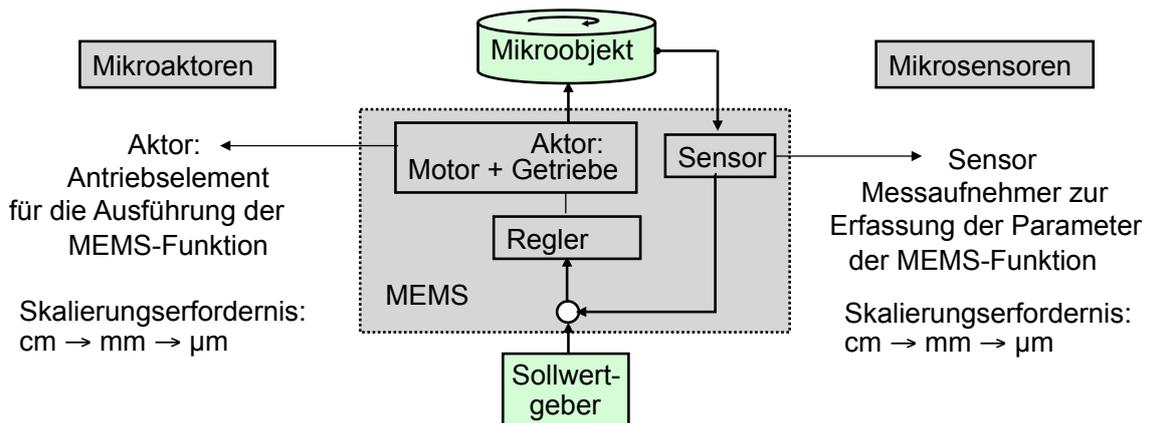


MOEMS, Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems

Kombinationen von MEMS mit optischen Mikroelementen. Sie operieren mit Electro-Aktoren und dienen zur Positionierung optischer Strahlengänge. Anwendungen: optische Schalter, optische Displays, Bar Codes, etc,



Mikrotechnik: MEMS, MOEMS, Sensorik, Aktorik



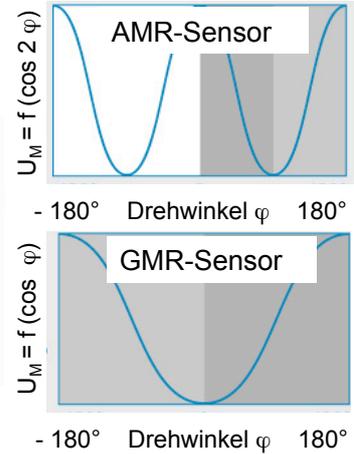
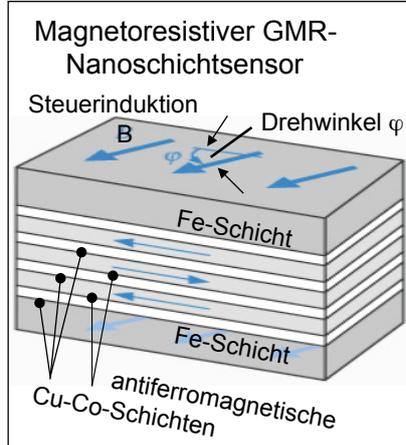
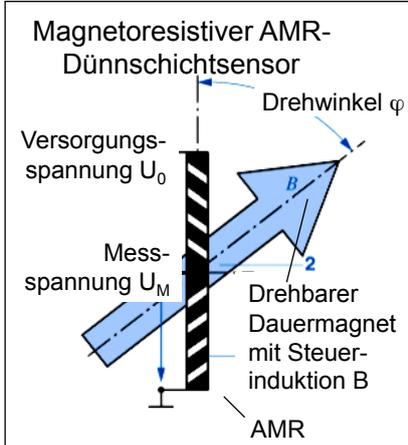
Dimensionsbereiche:
 $\approx 5 \mu\text{m} < \text{MEMS} < \approx 5 \text{mm}$

- Haar \varnothing : 50 μm ... 100 μm
- Atomhülle $\varnothing \approx 0,1 \text{nm}$
- Atomkerne $\varnothing \approx 10 \text{fm}$

Mikrosensoren für kinematische Größen

Mikrosensoren für kinematische Größen sind miniaturisierte Sensoren zur Umwandlung der Funktionsgrößen • Position (Wege, Winkel) • Geschwindigkeit • Drehzahl • Beschleunigung in elektrische Größen.

Magneto-resistive Mikro-Drehwinkelsensoren



Messung der Beschleunigung a über die Auslenkung einer seismischen Masse m infolge der Newtonschen Trägheitskraft $F = m \cdot a$. Die seismische Masse liegt im μ Gramm-Bereich, und es müssen Kapazitätsänderungen von weniger als 1% F detektiert werden. Dies erfordert die Integration von Sensor und Auswerteelektronik auf einem gemeinsamen Si-Substrat.

Festelektrode 1
Seismische Masse 3
Festelektrode 2

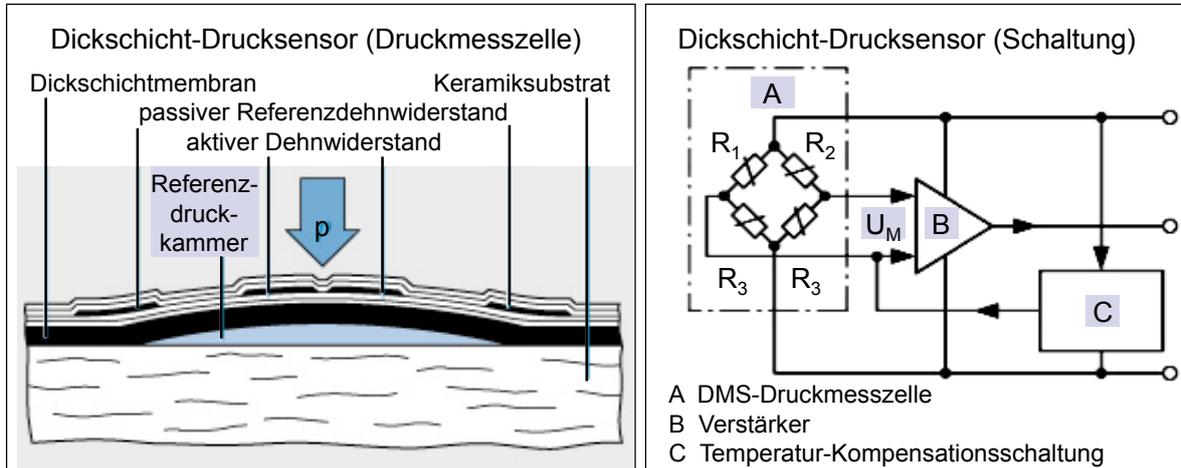
Mikromechanik-Beschleunigungssensor

Masse m
 $x \sim a$
 $F = m \cdot a$
 $C_1 \sim 1/x$ $C_2 \sim 1/x$
In einer Messbrückenschaltung ist die Messspannung $U_M \sim a$

Funktionsprinzip
eines
Mikromechanik-
Beschleunigungs-
sensors

Mikromechanik-Drucksensor

Die meisten der in Dickschichttechnik hergestellten Mikrodruckaufnehmer nutzen die Veränderung des elektrischen Widerstandes dotierten Siliziums durch eine mechanischen Verzerrung der Kristallstruktur (Dehnung) (Piezoresistiver Effekt). Daher lässt sich die druckabhängige Auslenkung einer Si-Membran über die elektrische Widerstandsänderung eines dotierten Bereiches der Membran detektieren (Prinzip der Kraft-Weg-Wandlung).



Prof. Dr. H. Czichos
BHT Berlin

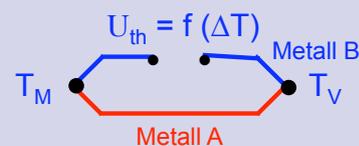
Messtechnik und Sensork
Skript

59

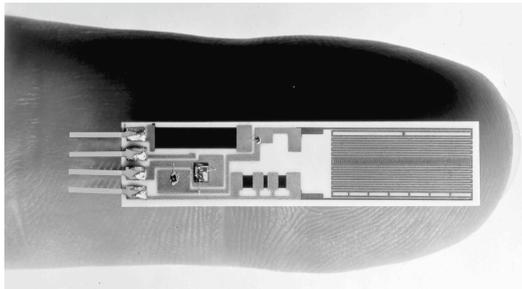
Mikro-Temperatursensoren

Mantelthermoelemente, bei denen die Thermopaare isoliert in Al_2O_3 eingebettet und mit einem Edelmantel ($\varnothing < 1$ mm) umhüllt sind, haben durch die Miniatürisierung kurze Einstellzeiten. Für die Sub-Mikro-Temperatursensorik wurden bereits Nano-Thermo-elemente entwickelt

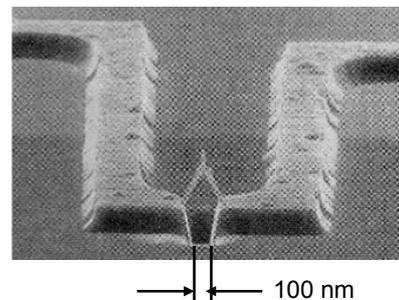
Prinzip (Seebeck)



Mikro-PTC-Sensor (BOSCH)



Nano-Thermoelement



Prof. Dr. H. Czichos
BHT Berlin

Messtechnik und Sensork
Skript

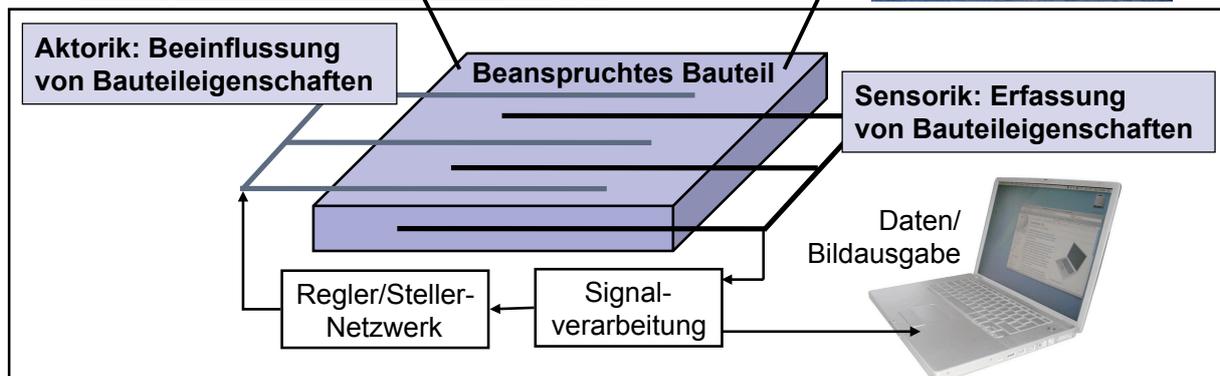
60

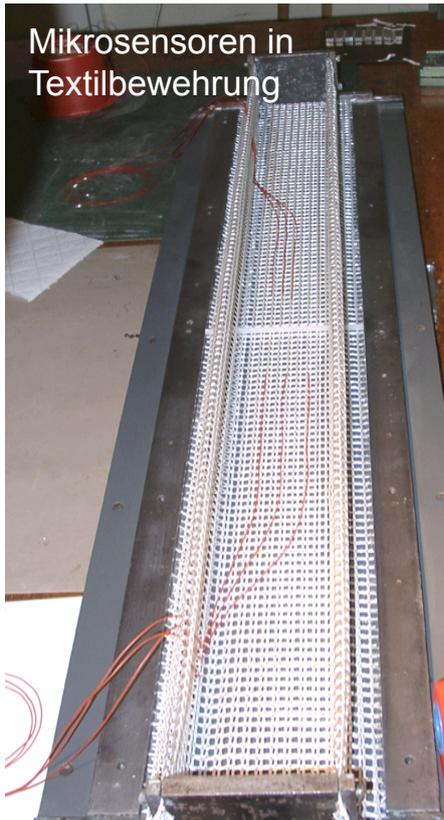


Messtechnik und Sensorik

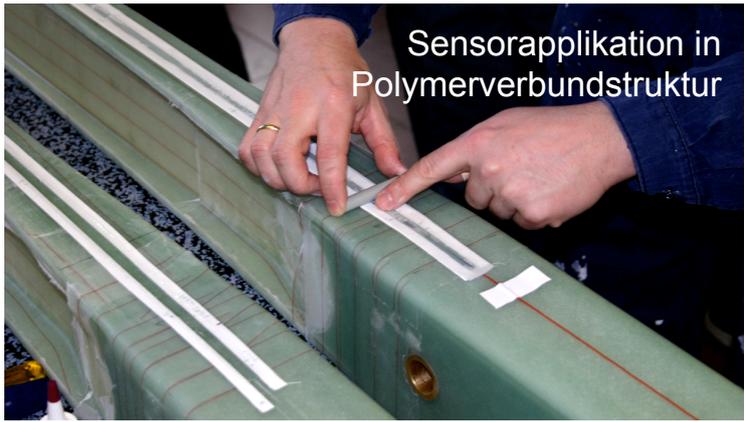
10. Strukturintegrierte Sensorik

Strukturintegrierte Sensorik: Embedded Sensors





Mikrosensoren in Textilbewehrung



Sensorapplikation in Polymerverbundstruktur



Sensoren in Stahlseilkonstruktionen

Embedded Sensors in Windenergieanlagen



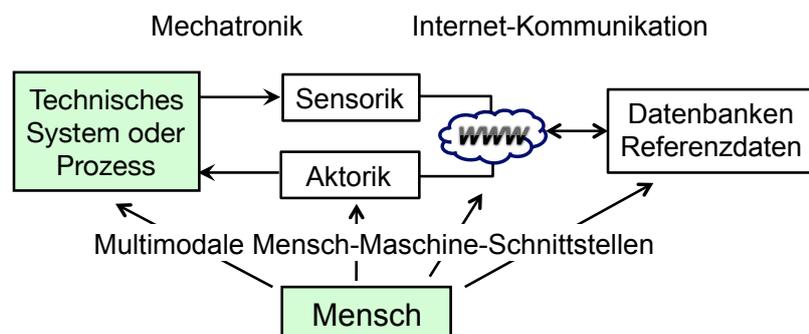
Sensorik zur Bauwerksdynamik:
Überwachung der Rotorblätter von Windenergieanlagen durch Faser-Bragg-Gitter-Sensoren;

Teilbild rechts: Sensorsignale nach 10^7 Lastwechseln

10. Cyber-physische Systeme

Cyber-physische Systeme

- Cyber-physische Systeme (CPS) basieren auf dem Verbund von Mechatronik und Internet-Kommunikation. Sie bilden die Grundlage für das Entwicklungsprojekt Industrie 4.0.
- CPS benutzen Sensoren, die physikalische Daten erfassen und über digitale Netze mittels Aktoren auf Produktions-, Logistik- und Engineeringprozesse einwirken wobei sie über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen.

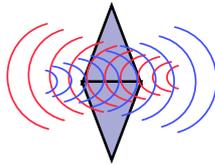


CPS-Beispiel: Bauwerksüberwachung

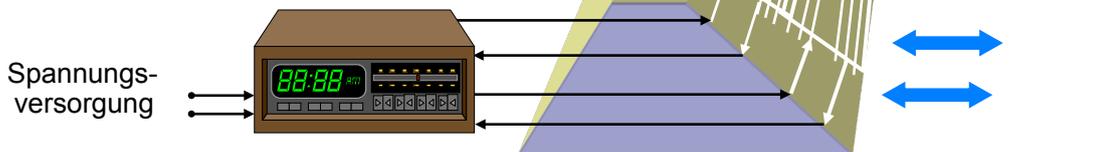


Deichmonitoring

Kommunikation



Die Signalübertragung von eingebetteten Sensoren erfolgt mittels RFID-Technologie (radio-frequency identification), Ein RFID-Tag besteht aus einem eingebetteten Transponder der einen kennzeichnenden Code enthält sowie einem Lesegerät.



CPS-Beispiel: Produktionstechnik

