

Hinweise zum Praktikum Messen Nichtelektrischer Größen

Stand: 08.03.13 / Prof. Palme

Nachfolgend sind wesentliche Rahmendaten, Geräte-/Kalibrierparameter und Berechnungsverfahren der Übungen zusammengefasst mit Hinweisen zur Auswertung der Messdaten.

Druckmesstechnik

2. Übung: Erstellen eines Manometer-Prüfberichts

Geräteparameter

Rohrfedermanometer, Klasse 1, Maßeinheit kp/cm^2 , Anzeigebereich 0 - 6 kp/cm^2 , Durchmesser 100 mm, Gewinde $\frac{1}{2}$ ", Kalibrierfehlergrenze 0,8 % vom Endwert (entspricht 0,048 kp/cm^2)

Prüfergebnis

Das Manometer erfüllt die Kalibriervorgaben vor allem wegen des ausgeprägten Nullpunktfehlers von etwa 0,2 kp/cm^2 nicht. Ferner tritt eine schwach ausgeprägte Hysterese im Bereich von $\pm 0,02 \text{ kp}/\text{cm}^2$ auf.

4. Übung: Messen quasistatischer Drücke in verschiedenen Messbereichen

4.1 Messen des Luftdrucks im Grobvakuumbereich

Geräteparameter

Grobhöhenmesser und Höhenmesser: Subskala 1013,25 hPa (Normzustand)

4.2 Messen mittelhoher Drücke, Prüfen von Einspritzdüsen

Prüfparameter

Öffnungsdruck 150 bar, Dichtheit innerhalb 10 s bei 90 % Öffnungsdruck (135 bar)

Prüfergebnis

Schnarrverhalten ohne Auffälligkeiten, Strahlform kegelig, symmetrisch zentriert, fein zerstäubt

5. Übung: Zeitverhalten von Messgeräten – Messen des Druckverlaufs einer Einspritzdüse

Geräteparameter

t/y -Schreiber: Grenzfrequenz $f_g = 1,7 \text{ Hz}$ (näherungsweise Tiefpass 1. Ordnung, PT_1)

Zeitmaßstab = Vorschub⁻¹: $k_{\text{kal},t} = 5,12 \text{ ms}/\text{mm}$

Kalibrierparameter

Druckkalibrierung $k_{\text{kal},p} = 1,11 \text{ bar}/\text{mm}$ (typisch)

Auswertung

Versuch 2: Dämpfung der Druckschwingung (Ausgabefrequenz f_2 am Schreiber) infolge zu hoher Schreibgeschwindigkeit

$$\frac{\hat{p}_2}{\hat{p}_1} \approx |H(f_2)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_2/f_g)^2}} \rightarrow \frac{f_g}{f_2} \text{ für } f_2 \gg f_g$$

Versuch 3: Dämpfung der Druckschwingung und exponentieller Abfall der Grundlinie wegen Ladungsrekombination innerhalb des piezoelektrischen Sensors bzw. zu geringem Eingangswiderstand des Ladungsverstärkers

6. Übung: Einfluss von Anschlussleitungen – Messen des Kompressionsdrucks eines Pressluftmotors

Geräteparameter

Pressluftmotor: Kompressionsraum $V_1 = 42 \text{ cm}^3$, Anschlussleitungsvolumen $V_L = 10,4 \text{ cm}^3$

Kalibrierparameter

Kalibrierdruck $p_0 = 1 \text{ bar}$

Kalibrierfaktoren der piezoresistiven Sensoren (alle Kanäle): $k_{\text{kal},p} = 0,033 \text{ bar/mm}$

Auswertung

Versuch 2: Verringerung des Kompressionsdrucks p_2 gemäß $p_2 V_2 = p_1 V_1$ mit $V_2 = V_1 + V_L$

Versuch 3: Exponentieller Verlauf der Sprungantwort aufgrund der näherungsweise PT_1 -Charakteristik der Druckleitung (Tiefpass 1. Ordnung): Druckänderungen mit hoher Frequenz werden zunehmend in der Amplitude gedämpft, die Sprungantwort erreicht nur noch kleinere Anteile des Endwerts.

7. Übung: Messen von Druckstößen in einem Stoßwellenrohr

Kalibrierparameter

Kalibrierdruck $p_0 = 1 \text{ bar}$

Messbrückenverstärker (Kanal a): $k_{\text{kal},a} = 0,06 \text{ bar/mm}$ (typisch)

Ladungsverstärker (Kanäle b, c, d): $k_{\text{kal},b} = k_{\text{kal},d} = 0,02 \text{ bar/mm}$, $k_{\text{kal},c} = 0,03 \text{ bar/mm}$ (typisch)

Auswertung

Versuch 1: Scheinbares Vorseilen der Druckverläufe im Rohr (Kanäle b, c und d: piezoelektrische Drucksensoren mit Ladungsverstärker) gegenüber der Druckkammer (Kanal a: DMS mit Trägerfrequenz-Messbrücke) aufgrund der geringeren Laufzeit der Ladungsverstärker

Versuch 2: Phasenumkehr des Druckstoßes am offenen Ende führt zur Reflexion einer zurücklaufenden, durch Reibung und Reflexionsverluste zunehmend gedämpften Unterdruckwelle

Weg – Dehnung – Kraft

Allgemeine Beziehungen der DMS-Messtechnik

- *Dehnung* $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{n} \frac{2}{k} \varepsilon'$ relative Widerstandsänderung $\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon$

mit n : Zahl der *aktiven* Sensoren in der Messbrücke

k Empfindlichkeit des DMS gegenüber ε

ε' am Brückenverstärker *angezeigte* (scheinbare) Dehnung,

bezogen auf eine Standard-Empfindlichkeit $k = 2,0$ und $n = 1$

- *angezeigter Messwert A* (Spannung) des DMS-Brückenverstärkers $A = k_B \varepsilon'$

mit k_B : Empfindlichkeit des Brückenverstärkers

Somit ergibt sich für die gemessene Dehnung ε aus dem angezeigten (digitalen) Wert A

über die gesamte Messkette $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2}{n k k_B} A$

Weitere physikalische Messgrößen wie Kräfte F , Spannungen σ , τ und Momente M sind gemäß des jeweils zugrunde gelegten *physikalischen Modells* zu berechnen:

- *Kraft* $F = c x = c L \varepsilon$ mit Federkonstante c , Bezugslänge L

- *Längs-/Querspannung* $\sigma = E \varepsilon$ mit Elastizitätsmodul E

- *Schubspannung* $\tau = G \tan \gamma$ mit Schubmodul G , Schubwinkel γ

- *Drehmoment* $M = |\vec{F} \times \vec{s}| = F s \sin \beta$ mit Kraft \vec{F} , Hebelarm \vec{s} , Winkel β zwischen \vec{F} und \vec{s}

Hierbei wird jeweils Linearität vorausgesetzt (Hookscher Bereich).

3. Übung: Wärmedehnung als Störgröße

Sensorparameter

Methode 1 und 3: $n = 1$, $k = 2,01$

Kalibrierparameter

Messbrückenverstärker $k_B = 50 \text{ mV} / \mu\text{m/m}$

Auswertung

Versuch 1: gemäß obigen Beziehungen

Versuch 2: Temperaturkorrektur der bei Temperatur ϑ_E gemessenen Dehnung gegenüber der bei Bezugstemperatur ϑ_A kalibrierten Dehnung gemäß $\varepsilon_{kor} = \varepsilon - (\varepsilon_{\vartheta_E} - \varepsilon_{\vartheta_A})$ mittels der aus dem spezifizierten DMS-Temperaturgang $\varepsilon(\vartheta)$ ermittelten scheinbaren Dehnungswerte bei ϑ_E und ϑ_A .

Versuch 3: Bei Verwendung eines (z.B. aufgrund von Einbau- und Kostenbeschränkungen nicht immer einsetzbaren) Temperaturkompensations-DMS ist die gemessene scheinbare Dehnung deutlich kleiner (und zeigt die verbleibende unvollständige Temperaturkompensation).

5. Übung: Messung eines Drehmoments nach 5 verschiedenen Messmethoden

Sensorparameter

Methode 5: $n = 2$, $k = 2,02$

Kalibrierparameter

Methode 4: Kraftmessverstärker $k_F = 8 \text{ mV} / \text{N}$

Methode 5: Messbrückenverstärker $k_B = 100 \text{ mV} / \mu\text{m/m}$

Auswertung

Der Versuch vergleicht 3 verschiedene Messprinzipien, welche das gesuchte Drehmoment M auf unterschiedliche physikalische Messgrößen zurückführen, die dabei teilweise zusätzlich unterschiedliche Messverfahren einsetzen:

Messprinzip	Messverfahren	physikalisches Modell (s.o.)
• Kraft	Methode 1: Dynamometer	$M = F a = 200\text{mm} \cdot F$
	Methode 4: Zug/Druck-Kraftaufnehmer	
• Weg	Methode 2: Messuhr	$M = \frac{G \pi d^4}{32 L_w a} s = 5,2 \frac{\text{Nm}}{\text{mm}} \cdot s$
	Methode 3: Inkrementalweggeber	
• Dehnung	Methode 5: DMS auf Torsionsstab	$M = \tau_{\max} W_p = 2G W_p \varepsilon_{45} = \frac{E}{1+\mu} W_p \varepsilon_{45} = \frac{E}{1+\mu} \frac{\pi d^3}{16} \varepsilon_{45} = 1,3 \frac{\text{Nm}}{\mu\text{m/m}} \cdot \varepsilon_{45}$

mit ε_{45} in 45 °-Richtung auf dem Torsionsstab gemessene Dehnung ε_{45}

a Hebelarm ($a = 200 \text{ mm}$)

L_w Länge des Torsionsstabs ($L_w = 513 \text{ mm}$)

d Durchmesser des Torsionsstabs ($d = 16 \text{ mm}$)

E Elastizitätsmodul (Stahl: $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}$)

μ Querkontraktionszahl (Poissonzahl, Stahl: $\mu = 0,28$)

G Schubmodul (Stahl: $G = 8,2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}$)

W_p polares Widerstandsmoment ($W_p = 8,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^3$)

6. Übung: Hauptnormalspannungen beim zweiachsigen Spannungszustand

Sensorparameter

DMS Messstelle A: $n = 1$, $k = 2,06$

DMS Messstelle B: $n = 1$, $k = 2,02$

Kalibrierparameter

Messbrückenverstärker $k_B = 5 \text{ mV} / \mu\text{m/m}$

Auswertung

Ermittlung der jeweiligen Dehnungen ε gemäß den eingangs angegebenen Beziehungen

Physikalische Modelle:

Messstelle A: Tangentialspannung $\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$ Axialspannung $\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\mu\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$

Messstelle B: $\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$ $\alpha = 0,5 \operatorname{atan} \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$

damit Berechnung von σ_1 , σ_2 wie bei Messstelle A

Vergleichswerte (Kesselformel): $\sigma_1 = 2\rho_i \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2}$ $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$

Fazit am Rande: Deshalb platzen Weißwürsch'd praktisch immer in Längsrichtung auf...

7. Übung: Messen wechselnder Größen, Frequenzgang der Messkette

Geräteparameter

t/y-Schnellschreiber: Zeitmaßstab = Vorschub⁻¹: $k_{\text{kal},t} = 10 \text{ ms/mm}$

Kalibrierparameter

Federkraft F_F Biegebalken mit DMS-Halbbrücke, Schreiberkalibrierung mit $F_{F,0} = 10 \text{ N}$

Dämpferkraft F_D Piezoelektrischer Sensor mit Ladungsverstärker, Schreiberkalibrierung mit $F_{D,0} = 5 \text{ N}$

Auswertung

Eigenfrequenz $f_0 = \tau_0^{-1}$

logarithmisches Dekrement $\Lambda = n^{-1} \ln \frac{x_a}{x_{a+n}}$ Dämpfungsmaß $D = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}$

9. Übung: Schienenfahrzeugwaage

Geräteparameter

t/y-Schnellschreiber: Zeitmaßstab = Vorschub⁻¹: $k_{\text{kal},t} = 40 \text{ ms/mm}$

Kalibrierparameter

Kalibriergewicht für Schnellschreiber und DMS-Messbrückenverstärker: $m_0 = 300 \text{ g}$

Temperaturmesstechnik

Allgemein: Dynamisches Verhalten von Temperatursensoren

Temperatursensoren verhalten sich dynamisch häufig in guter Näherung wie ein Tiefpass 1. Ordnung (PT₁-System).

Sprungantwort: $\vartheta(t) = k^{-1}u(t) = \vartheta_0 + \Delta\vartheta(1 - e^{-(t-t_0)/\tau})$ für $t > t_0$

mit Zeitkonstante τ , Empfindlichkeit $k = \frac{\Delta u}{\Delta \vartheta}$

Temperatursprung $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$ von ϑ_0 auf ϑ_1 zum Zeitpunkt t_0

Frequenzgang: $H(f) = \frac{k}{1 + jf/f_g}$ mit Grenzfrequenz $f_g = \frac{1}{2\pi\tau}$

Betrag $|H(f)| = \frac{k}{\sqrt{1 + (f/f_g)^2}}$ Phase $\varphi(f) = -\text{atan } f/f_g$

2. Übung: Zeitverhalten, Übergangsfehler, Einfluss der Randbedingungen

Geräteparameter

t/y-Schreiber: Zeitmaßstab = Vorschub⁻¹: $k_{\text{kal},t} = 2 \text{ s/cm}$, Spannungsverstärker: $k_{\text{kal},U} = 2 \text{ mV/mm}$

Auswertung

Auswertung mit Hilfe obiger Beziehungen

5. Übung: Messen von Oberflächentemperaturen mit berührenden Messfühlern

Sensorparameter

Fe-CuNi-Thermoelement: Empfindlichkeit $53,7 \mu\text{V/K}$, max. absoluter Messfehler $\pm 3 \text{ K}$

Leitungs- und Übergangswiderstände $R_L = 0,5 \Omega$

Geräteparameter

- Messschaltung 0 (kalibrierte Bezugsmessstelle): Drehspulinstrument kalibriert in °C, mit interner Vergleichsstelle, Messbereich 0 ... 55 °C, Instrumentenklasse 1
- Messschaltung 1: Drehspulinstrument mit externer Vergleichsstelle
Messbereich 10 mV, Instrumentenklasse 0,5, Messwerkwidstand $R_m = 105 \Omega$
Externe Vergleichsstelle: Glasthermometer, max. abs. Messfehler $\pm 1 \text{ K}$
- Messschaltung 2: Digitalmultimeter kalibriert in °C, mit interner Vergleichsstelle
Messbereich $\pm 200 \text{ °C}$, max. rel. Messfehler $\pm 0,1 \%$ vom Anzeigewert,
Eingangswidstand $R_e = 20 \text{ M}\Omega$
Interne Vergleichsstelle: max. abs. Messfehler $\pm 1 \text{ K}$
- Messschaltung 3: Manueller Kompensator mit externer Vergleichsstelle (Eiswasser)
Messbereich 200 °C , max. rel. Messfehler $\pm 0,2 \%$ vom Anzeigewert, Eingangswidstand $R_e \rightarrow \infty$ bei Abgleich
Externe Vergleichsstelle: Eiswasser, max. abs. Messfehler im Bereich $\pm 0,1 \text{ K}$