

## Klausur im Modulfach „Automatisierungs- und Messtechnik“ Teil 2: „Grundzüge des Messens“

ausgelegt für 90 min

### Am Beginn der Prüfung auszufüllen:

Nachname: \_\_\_\_\_ Vorname: \_\_\_\_\_

Matrikelnummer: \_\_\_\_\_ Studiengang: \_\_\_\_\_

Jahr der Bonusklausur-Teilnahme\*: \_\_\_\_\_ \* = Feld streichen, falls nicht zutreffend

Aufgabe	1	2	3	4	5	Bonus	$\Sigma$
Soll-Punktzahl	4	9	9	9	9	0 (+5)	40
Ist-Punktzahl							

### Hinweise:

- Die Klausur **zu Beginn und bei Abgabe** auf **Vollständigkeit** prüfen! **Deckblatt** ausfüllen!
- Ihre **Lösung** möglichst innerhalb der vorgezeichneten **Kästchen** angeben! Falls Platz nicht ausreicht, bitte **Blattrückseiten** benutzen (notfalls Zusatzblätter bei Aufsicht anfordern) und darauf verweisen! **Wert** bedeutet stets **Zahl mit Einheit!**
- **Eigene Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole** mindestens einmal im Text **erklären!**
- Für **Text, Berechnungen und Freihandskizzen** nur Kugelschreiber oder **Füller** verwenden (**kein Bleistift, kein rot/rosa!**)

### Zugelassene Hilfsmittel:

- 1 DIN A4 Blatt **insgesamt für die Modulprüfung**, beidseitig, handbeschrieben (keine Kopien!)
- Taschenrechner: Casio FX xxx-ES, Casio FX xxx-DE, Casio FX xxx-MS, Sharp 500er Serie, Texas Instruments 30er Serie
- Schreibutensilien
- **keine eigenen Blätter** verwenden!

### Folgende Sachverhalte werden als Betrugsversuch gewertet:

- Nutzung anderer als die zugelassenen Hilfsmittel, insbesondere Nutzung von Notebooks, Organizer, PDA, Fotoapparat und ähnlichen Geräten
- Mobiltelefon außerhalb Ihrer Tasche
- eingeschaltetes Mobiltelefon innerhalb Ihrer Tasche
- jegliche Kontaktaufnahme zu anderen Prüfungsteilnehmern

**Aufgabe 1: Messtechnisches Weltbild**

**(4 Punkte)**

a) Wie lautet die SI-Basiseinheit für elektrische Messgrößen?

0,5 Punkte

b) Bei einer Messung wird über 1000 unkorrelierte Einzelmesswerte gemittelt. Um welchen Faktor verringert sich die Standardunsicherheit des Mittelwertes gegenüber der Standardunsicherheit einer Einzelmessung?

0,5 Punkte

c) Wie ist bei einer Messung mit bekannten systematischen Messabweichungen zu verfahren?

0,5 Punkte

d) Nennen Sie eine Maßnahme zur Reduzierung induktiver Kopplungen!

0,5 Punkte

e) Nennen Sie einen Vorteil einer Halb- gegenüber einer Viertelbrücke!

0,5 Punkte

f) Bei der Messung der Spannung  $U$  wurde der Mittelwert  $\bar{U} = 15 \text{ V}$  aus 100 Einzelmessungen und die empirische Standardabweichung  $s_U = 15 \text{ mV}$  (des Einzelwertes) bestimmt. Geben Sie das vollständige Messergebnis für die Spannung an, wobei weitere Messabweichungen ausgeschlossen werden (**Werte!**)!

0,5 Punkte

g) Nennen Sie ein Messverfahren zur Temperaturmessung!

0,5 Punkte

h) Nennen Sie ein Anwendungsbeispiel für einen Lock-In-Verstärker!

0,5 Punkte

## Aufgabe 2: Druckmessung

(9 Punkte)

Es wird eine Messung des Drucks  $p$  gemäß Abb. 1 mit einer Brückenschaltung unter Nutzung von vier Dehnungsmessstreifen (DMS) durchgeführt. Für die ohmschen Widerstände der DMS gelte:  $R_1 = R_4 = R_0 \cdot (1 - k\varepsilon) \cdot (1 + \alpha\Delta T)$  bzw.  $R_2 = R_3 = R_0 \cdot (1 + k\varepsilon) \cdot (1 + \alpha\Delta T)$  mit der Dehnung  $\varepsilon$ ,  $k = 2$ , dem materialabhängigen Parameter  $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T = T - T_0$ . Für die Dehnung gelte  $\varepsilon = p / m$  mit der Konstanten  $m = 10^3 \text{ bar}$ . Die Dehnungsmessstreifen liegen alle auf einem Temperaturniveau. Als Brückenspeisespannung wird eine Gleichspannung  $U_0 = 5 \text{ V}$  verwendet. Die Messung der Brückendiagonalspannung  $U_d$  erfolgt mit einem Voltmeter.

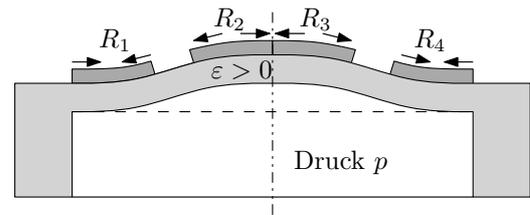


Abb. 1: Druckmessung

- a) • Skizzieren Sie die Brückenschaltung (Ausführung als Vollbrücke)!
- Bestimmen Sie die Brückendiagonalspannung  $U_d(p)$  in Abhängigkeit des Drucks  $p$ ! (**Formel**)
- Bestimmen Sie die Abweichung  $\Delta U_d$  der Brückendiagonalspannung  $U_d$  aufgrund der Temperatur  $T$  herrührend von der Temperaturabhängigkeit der Dehnungsmessstreifen! (**Formel**)

Skizze:

$$|U_d(p)| =$$

$\Delta U_d =$

3 Punkte

- b) • Die Speisespannung  $U_0$  besitze eine maximale systematische relative Abweichung von 2 %. Berechnen Sie die daraus resultierende maximale systematische relative Abweichung  $\hat{F}_p$  des Drucks  $p$ ! (**Wert**)
- Angenommen, das Messgerät wurde kalibriert und damit die Abweichung der Speisespannung kompensiert. Jedoch tritt bei der Messung der Brückendiagonalspannung  $U_d$  mit dem Voltmeter eine maximale systematische relative Messabweichung von  $\hat{F}_{U_d} = 1 \%$  auf. Wie groß ist dann die gemäß DIN 1319 resultierende relative Messunsicherheit  $\sigma_p / |p|$  des Drucks  $p$ , wobei die systematische Abweichung des Voltmeters unbekannt und nicht korrigierbar sei? (**Formel und Wert**)

$$\hat{F}_p =$$

$$\sigma_p / |p| =$$

3 Punkte

- c) Aus einer Stichprobe mit 20 Einzelmesswerten für die Spannung  $U_d$  ergaben sich ein Mittelwert von 100 mV und eine empirische Standardabweichung (des Einzelwertes) von 5 mV. Systematische Abweichungen seien ausgeschlossen.
- Berechnen Sie das daraus resultierende Vertrauensintervall für den Druck  $p$  bei einer statischen Sicherheit von 95 % unter Annahme einer Gaußverteilung! (**Werte**)
- Wie groß ist der Stichprobenumfang  $N$  mindestens zu wählen, um die Standardabweichung des Messwertes für  $p$  um den Faktor 10 gegenüber einer Einzelmessung zu reduzieren? (**Wert**)

P%	68,3	95,0	99,0	99,73	N
t	1,06	2,26	3,25	4,09	10
	1,03	2,08	2,96	3,45	20
	1,00	1,98	2,63	3,08	100

P%	68,3	95,0	99,0	99,73
a	1	1,96	2,56	3,00

Vertrauensintervall für den Druck:

$$\leq p \leq$$

$N =$

3 Punkte

### Aufgabe 3: Phasenlaufzeitmessung

(9 Punkte)

Zur Messung der Distanz  $d$  zu einem Messobjekt wird ein amplitudenmoduliertes Signal  $s_1(t)$  gesendet. Über Detektor 1 wird das Signal  $s_1(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$  verzögerungsfrei und direkt empfangen. Dabei bezeichnet  $f$  die Modulationsfrequenz des Signales,  $t$  die Zeit und  $A$  die Amplitude des Signals. Über den Detektor 2 wird das am Messobjekt reflektierte Signal  $s_2(t) = B \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \phi)$  empfangen, wobei mit  $B$  die Amplitude und mit  $\phi$  die Phasenverschiebung gegenüber  $s_1(t)$  bezeichnet wird.

Zur Bestimmung der Phasenverschiebung  $\phi$  stehen ein einfacher Phasendiskriminator (Abb. 2) mit der Ausgangsgröße  $y_1$  sowie ein Quadratur-Phasendiskriminator (Abb. 3) mit der Ausgangsgröße  $y_2$  zur Verfügung. Schließlich kann die Distanz  $d$  über die Beziehung  $\phi = -4\pi \cdot d \cdot f / c$  mit der Frequenz  $f = 1 \text{ MHz}$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  bestimmt werden.

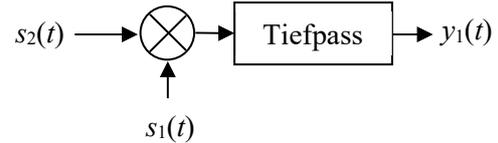


Abb. 2: einfacher Phasendiskriminator

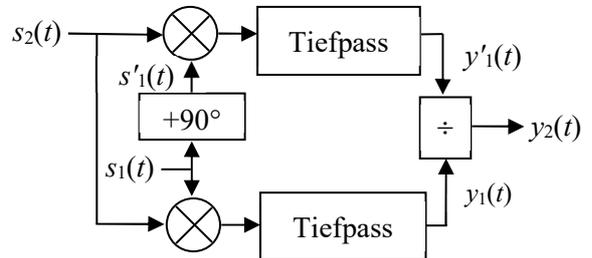


Abb. 3: Quadratur-Phasendiskriminator

- a) • Bestimmen Sie für den einfachen Phasendiskriminator bzw. für den Quadratur-Phasendiskriminator die Beziehungen  $y_1(\phi)$  bzw.  $y_2(\phi)$ ! (**Formeln**)  
 • Warum sind Tiefpässe notwendiger Bestandteil der beiden Schaltungen?  
Hinweise:  $\cos(a) \cdot \cos(b) = 0,5 \cdot [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$

$y_1(\phi) =$	
$y_2(\phi) =$	
Notwendigkeit der Tiefpässe:	3 Punkte

- b) Die Amplituden  $A$  bzw.  $B$  der Detektorsignale  $s_1$  und  $s_2$  schwanken jeweils zufällig und statistisch unabhängig voneinander mit der Varianz  $\sigma^2$ .  
 • Berechnen Sie die hieraus resultierende Messunsicherheit  $\sigma_{y,1}$  bzw.  $\sigma_{y,2}$  der Ausgangssignale eines einfachen Phasendiskriminators  $y_1$  bzw. eines Quadratur-Phasendiskriminators  $y_2$ ! (**Formeln**)  
 • Welche relative Messunsicherheit  $\sigma_{y,1} / |y_1|$  ergibt sich hieraus bei  $B = A / 2 = 2,5 \text{ V}$  und  $\sigma = 10 \text{ mV}$  für den einfachen Phasendiskriminator? (**Wert**)

$\sigma_{y,1} =$	$\sigma_{y,2} =$
$\sigma_{y,1} /  y_1  =$	
	3 Punkte

- c) • Wie groß ist jeweils der Eineindeutigkeitsbereich  $d_{\max} - d_{\min}$ , wenn für die Phasenbestimmung ein einfacher Phasendiskriminator bzw. ein Quadratur-Phasendiskriminator (mit Auswertung der Vorzeichen der Quadratursignale) verwendet wird? (**Werte**)  
 • Nennen Sie einen Vorteil der Nutzung von Licht gegenüber Ultraschall bei der Phasenlaufzeitmessung!

$(d_{\max} - d_{\min})_{\text{einfacher Phasendiskriminator}} =$
$(d_{\max} - d_{\min})_{\text{Quadratur-Phasendiskriminator}} =$
Vorteil der Nutzung von Licht:
3 Punkte

**Aufgabe 4: Geschwindigkeitsmessung****(9 Punkte)**

Zur Messung der Geschwindigkeit  $v$  in einem Strömungskanal wird ein Hitzdraht-Anemometer eingesetzt: Als umströmter Sensor im Kanal wird hierbei ein von der Temperatur  $T$  abhängiger Widerstand  $R_w(\Delta T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$  mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = T - T_0$ , dem Referenzwiderstand  $R_0$  und dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  eingesetzt. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Referenztemperatur  $T_0 = 20 \text{ °C}$  hängt dabei von der gesuchten Geschwindigkeit  $v$  ab.

- a) Das Hitzdraht-Anemometer liefert eine Ausgangsspannung  $U$ , der mittels Kalibrierung ein Messwert für die Geschwindigkeit  $v$  zugeordnet wird. Bei der Kalibrierung ergab sich näherungsweise der Zusammenhang:

$$U^2 = A + B \cdot v^{0,5}, \text{ mit } A = 2 \text{ V}^2 \text{ und } B = 3 \text{ V}^2 (\text{m/s})^{-0,5}$$

- Berechnen Sie in Abhängigkeit der gemessenen Geschwindigkeit  $v$  und der Kalibrierkonstanten  $A$  und  $B$  sowie für  $v = 36 \text{ m/s}$  die Standardunsicherheit  $\sigma_v$ , die aus der Standardunsicherheit  $\sigma_U = 20 \text{ mV}$  der Spannung  $U$  resultiert! **(Formel, Wert)**
- Wie viele Wertepaare  $(U_i, v_i)$  sind bei der Kalibrierung mindestens notwendig, um die Koeffizienten  $A$  und  $B$  bestimmen zu können? **(Wert)**

$\sigma_v =$   Anzahl an Wertepaaren:	3 Punkte
--	----------

- b) • Warum wird bei Hitzdraht-Anemometern neben einem umströmten temperaturabhängigen Widerstand ein weiterer temperaturabhängiger Widerstand an der Innenwand des Kanals eingesetzt?  
 • Handelt es sich bei einem Hitzdraht-Anemometer, welches mit konstantem Strom betrieben wird, um ein Kompensations- oder ein Ausschlagsmessverfahren?  
 • Nennen Sie zwei Vorteile des Verfahrens mit konstanter Temperatur gegenüber dem Verfahren mit konstantem Strom!

Grund für zweiten temperaturabhängigen Widerstand:  Art des Messverfahrens:  2 Vorteile des Verfahrens mit konstanter Temperatur: <ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> </ul>	3 Punkte
--	----------

- c) • Ein Strömungskanal wird mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  betrieben. Zur Messung der Geschwindigkeit wird ein Hitzdraht-Anemometer zum Zeitpunkt  $t = 0$  eingeschaltet. Dadurch steigt die Temperatur des umströmten Messwiderstandes  $R_w$  von der Ausgangstemperatur  $T_0$  auf  $T_1 = 80 \text{ °C}$  exponentiell mit der Zeitkonstanten  $\tau$  an. Berechnen Sie die daraus resultierende relative Abweichung  $|\Delta R_w / R_w|$  des Widerstands  $R_w$  zum Zeitpunkt  $t = 2\tau$ ! **(Formel, Wert)**  
 • Berechnen Sie die Zeitkonstante  $\tau_{\text{max}}$ , für welche die relative Abweichung  $|\Delta R_w / R_w|$  des Widerstands  $R_w$  1 s nach dem Einschalten 1 % beträgt! **(Wert)**

$ \Delta R_w / R_w  =$  $\tau_{\text{max}} =$	3 Punkte
---	----------

### Aufgabe 5: Strommessung

(9 Punkte)

Der Strom  $I$  durch einen Lastwiderstand  $R_L = 100 \Omega$  soll bestimmt werden. Hierfür wird eine Schaltung mit Strom-Spannungs-Wandlung (siehe Abb. 1) eingesetzt und die Ausgangsspannung  $U_A$  gemessen. Es wird eine Spannungsquelle mit  $U_0 = 10 \text{ V}$  und einem Innenwiderstand von  $R_i = 1 \Omega$  verwendet. Der OPV sei ideal, es gelte  $R_v = 1 \text{ k}\Omega$ .

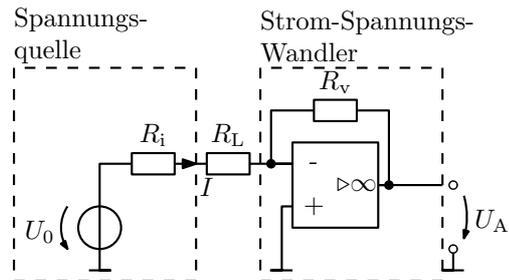


Abb. 1: Schaltung zur Bestimmung des Stroms  $I$

- a) • Berechnen Sie den vorliegenden Strom  $I$  mithilfe der gegebenen Größen! (**Formel und Wert**)  
 • Berechnen Sie die gemessene Ausgangsspannung  $U_A(I)$  in Abhängigkeit des Stroms  $I$ ! (**Formel**)

$$I =$$

$$U_A(I) =$$

3 Punkte

- b) Die Messung der Spannung  $U_A$  erfolge nun mit einem Voltmeter, welches eine maximale systematische Abweichung von  $|\hat{F}_{U_A}| = |\Delta \hat{U}_A / U_A| = 0,1\%$  besitzt. Für jeden der verwendeten Widerstände ist eine Toleranz von  $|\hat{F}_R| = |\Delta \hat{R} / R| = 10\%$  angegeben.

- Berechnen Sie die resultierende maximale systematische relative Messabweichung  $|\hat{F}_I| = |\Delta \hat{I} / I|$  in Abhängigkeit der gegebenen maximalen systematischen relativen Abweichungen  $|\hat{F}_{U_A}|$  und  $|\hat{F}_R|$ ! (**Formel und Wert**)

- Wie groß ist die daraus resultierende Messunsicherheit  $\sigma_I$  (nach DIN 1319) des Stroms  $I$ , wenn die systematischen Abweichungen unbekannt und nicht korrigierbar sind? (**Wert**)

$$|\hat{F}_I| =$$

$$\sigma_I =$$

3 Punkte

- c) Für den Strom  $I$  wurde eine Stichprobe  $I_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) mit  $N$  Werten aufgenommen. Geben Sie für  $I$  den Mittelwert  $\bar{I}$ , die empirische Standardabweichung  $s_{Ii}$  auf Basis der Stichprobe sowie die Standardunsicherheit  $\sigma_I$  (nach DIN 1319) bei zusätzlicher Berücksichtigung von unbekanntem relativen systematischen Abweichungen von betragsmäßig maximal  $|\hat{F}_I|$  an! (**Formeln**)

$$\bar{I} =$$

$$s_{Ii} =$$

$$\sigma_I =$$

3 Punkte