

## 4.2.1 Differenzverstärker und Instrumentenverstärker

Die Schaltung in Abb. 4.3 bildet die Differenz zweier Spannungen ( $U_2 - U_1$ ) und gibt sie, verstärkt um einen wählbaren Faktor ( $R_5/R_4$ ) aus.

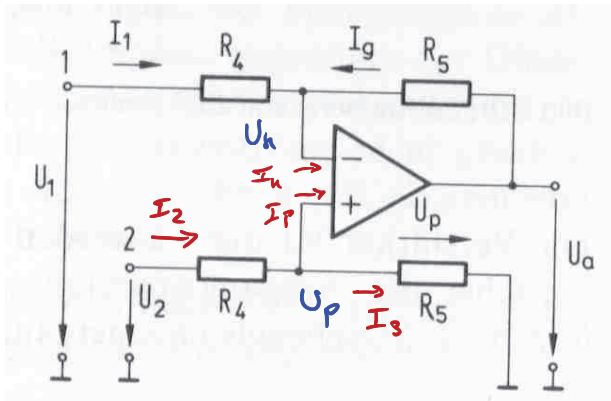


Abbildung 4.3: OP-Schaltung "Differenzverstärker"

Übung: Wie lautet die Abhängigkeit des Ausgangs  $U_a$  von  $U_1$  und  $U_2$ ?

Knotenregel:  $I_1 + I_3 = I_n = 0$  (Idealisierung)  $I_2 = I_p + I_3$

Ohmsches Gesetz:  $\frac{U_1 - U_n}{R_4} + \frac{U_a - U_n}{R_5} = 0$   $\frac{U_2 - U_p}{R_4} = \frac{U_p}{R_5}$

$U_n = U_p$  einbringen, Gleichungen vereinfachen und nach  $U_a$  auflösen

$$\begin{aligned} \bullet R_4 R_5: \quad & R_5 U_1 - R_5 U_n + R_4 U_a - R_4 U_n = 0 \\ & R_5 U_1 + R_4 U_a - (R_4 U_n + R_5 U_n) = 0 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} R_5 \cdot U_2 - R_5 \cdot U_p &= R_4 \cdot U_p \\ R_5 U_2 &= R_4 U_p + R_5 U_p \end{aligned} \right.$$

$$\Rightarrow R_4 U_a + R_5 U_1 - R_5 U_2 = 0$$

$$U_a = - \frac{R_5}{R_4} (U_1 - U_2)$$

wegen  $U_n = U_p$

(Idealisierung)

Diese Verstärkerschaltung ist nicht rückwirkungsfrei! Versucht man damit die Brückenspannung einer Messbrücke (siehe Kap. 4.5) zu messen, so wird diese mit den Strömen  $I_1$  und  $I_2 = U_2/(R_4 + R_5)$  unsymmetrisch belastet und dadurch verstimmt.

Dieses Problem wird gelöst, indem den Eingängen des Differenzverstärkers Spannungsfolgerschaltungen (auch: "Impedanzwandler") vorgeschaltet werden. Das ermöglicht eine annähernd stromlose Messung, wegen des sehr hohen Eingangswiderstands der Operationsverstärker V1 und V2. Man nennt die so entstehende Schaltung (Abb. 4.4) Instrumentenverstärker oder auch Elektrometer-Verstärker ([1], S. 238). Sie wird sehr häufig eingesetzt.

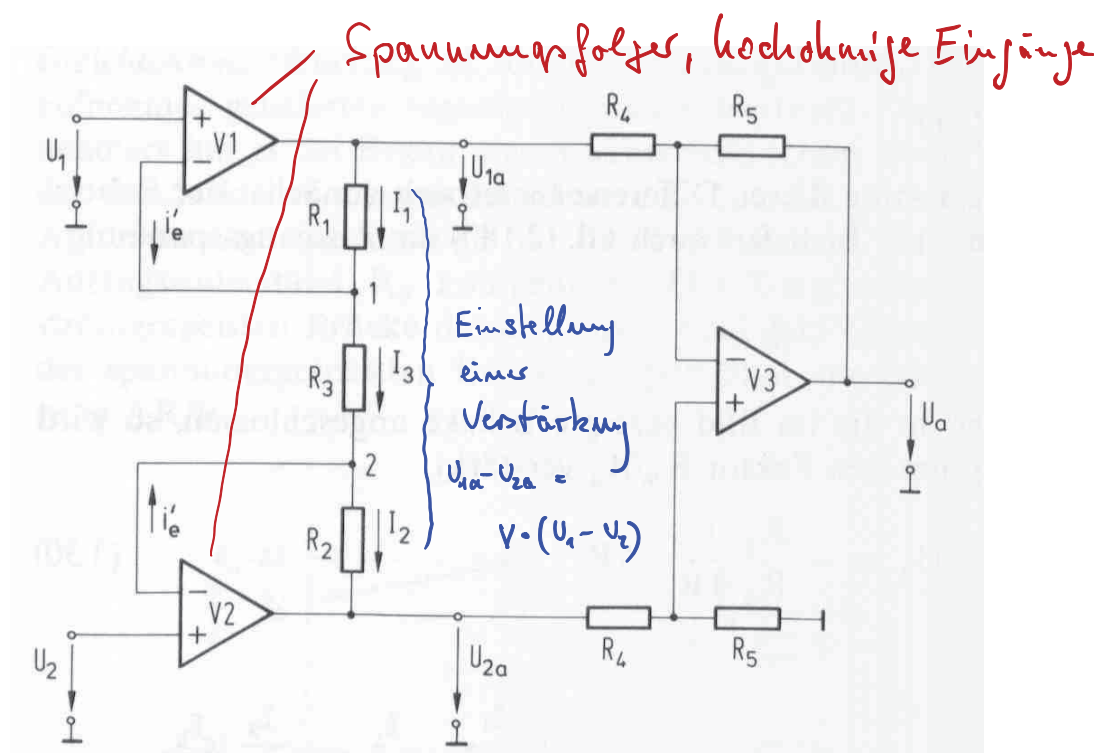


Abbildung 4.4: OP-Schaltung "Elektrometer-Differenzverstärker / Instrumentenverstärker"

Die folgenden Abschnitte und Übungen behandeln typische Anwendungen von Operationsverstärkern in messtechnischen Schaltungen.

#### 4.2.2 OP-Schaltung zum Anschluss einer DMS-Messbrücke

In der Betriebsanleitung eines integrierten Beschleunigungsaufnehmers, der mit einer DMS-Vollbrücke (Kap. 4.5.3) arbeitet, wird folgende Beschaltung zum Brückenabgleich und zur Signalaufbereitung empfohlen (ebenfalls als IC erhältlich, z. B. AD 620).

## SIGNAL CONDITIONING

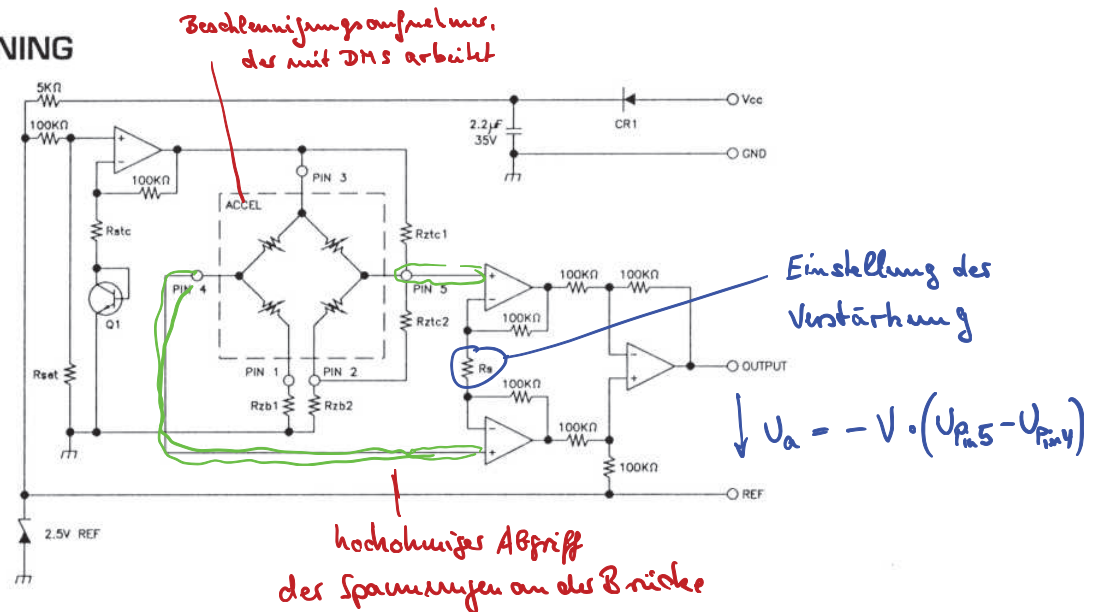


Figure 2. Typical Temperature Compensation and Amplification Circuit (component values specified for each sensor)

Q1: 2N3904

D1: 1N914 or equivalent

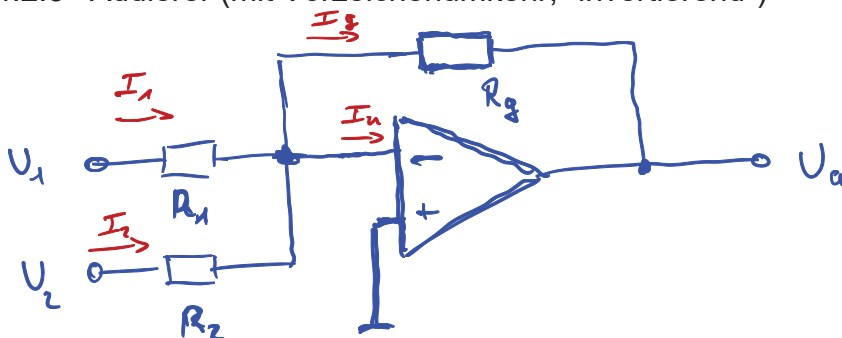
Op Amps: LT1014, LM324 or equivalent

- Rstc sets the excitation voltage ramp to compensate the sensitivity error due to temperature.
- Rset sets the excitation voltage to 5V at 25°C.
- Rzb1, Rzb2 and Rztc1 and Rztc2 calibrate the zero offset and compensate the offset error due to temperature.
- Rs calibrates the output span.
- Vcc must be >8 VDC.

Abbildung 4.5: OP-Schaltung zur Signalaufbereitung einer DMS-Brücke

Die Brückenspannung wird über einen Elektrometer-Differenzverstärker ausgegeben (im Schaltplan rechts unten).

#### 4.2.3 Addierer (mit Vorzeichenumkehr, "invertierend")

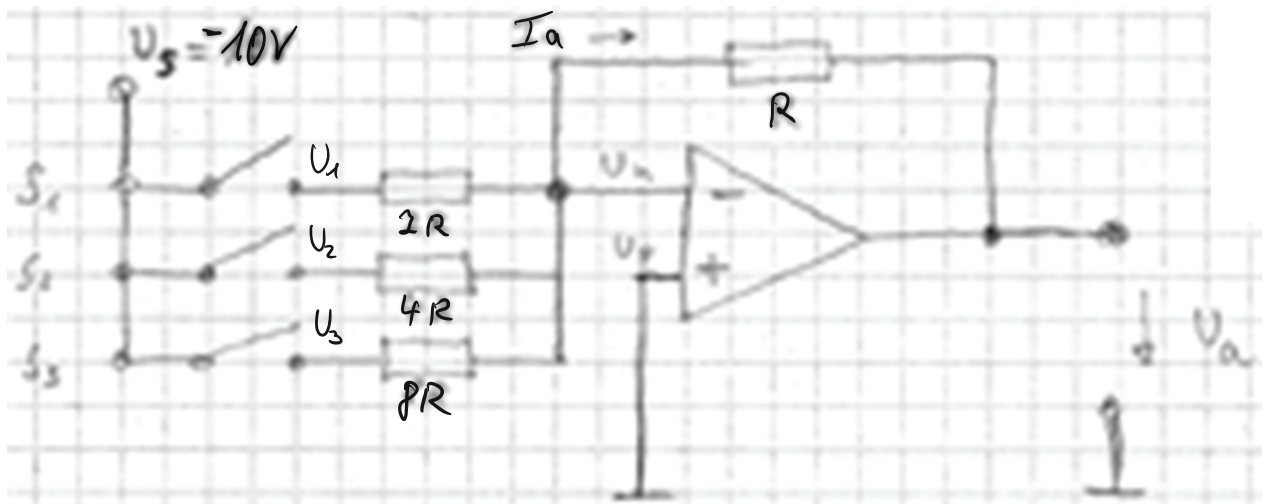


$$I_1 + I_2 = I_g + \underbrace{I_u}_{=0} \quad \stackrel{\text{Ohm}}{(\Leftrightarrow)} \quad \frac{U_1 - U_u}{R_1} + \frac{U_2 - U_u}{R_2} = \frac{U_u - U_a}{R_g}$$

$$U_n = U_p = 0 \Rightarrow \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = - \frac{U_a}{R_g} \Leftrightarrow U_a = - \left( \frac{R_g}{R_1} U_1 + \frac{R_g}{R_2} U_2 \right)$$

## 4.2.4 Addierer mit mehr als zwei Eingängen

Hier: mit schaltbaren Eingängen und spezieller Wahl der Eingangswiderstände



$$U_1 = S_1 \cdot U_S, \quad U_2 = S_2 \cdot U_S, \quad U_3 = S_3 \cdot U_S, \quad S_i = \begin{cases} 0 & \text{offen} \\ 1 & \text{geschlossen} \end{cases}$$

$$U_n = U_p = 0, \quad I_a = I_1 + I_2 + I_3 + \underbrace{I_n}_{=0}$$

$$-\frac{U_a}{R} = \frac{U_1}{2R} + \frac{U_2}{4R} + \frac{U_3}{8R}$$

$$U_a = -\left(\frac{U_1}{2} + \frac{U_2}{4} + \frac{U_3}{8}\right), \quad U_S = -10V$$

$$= 10V \cdot \left(\frac{1}{2}S_1 + \frac{1}{4}S_2 + \frac{1}{8}S_3\right)$$

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$U_a [V]$
0	0	0	0
0	0	1	1,25
0	1	0	2,5
0	1	1	3,75
1	0	0	5
1	0	1	6,25
1	1	0	7,5
1	1	1	8,75

3 Bit - Digital -  
Analog - Umsetzer

### 4.3 Übungen "Operationsverstärkerschaltungen"

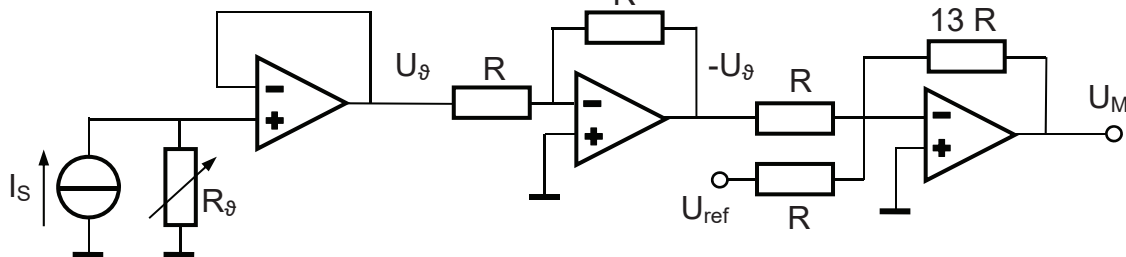
#### 4.3.1 Elektrometer-Differenzverstärker (Instrumentenverstärker)

- Bestimmen Sie für die Schaltung in Abbildung 4.5  $U_{1a}$ ,  $U_{2a}$  und  $U_{1a}-U_{2a}$  in Abhängigkeit von  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .
- Bei symmetrischer Beschaltung  $R_1 = R_2$ : Welche Funktion hat  $R_3$ ? Welche Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannungsdifferenz ergibt sich, wenn  $R_3$  weggelassen wird ( $R_3 \rightarrow \infty$ )? (~~Lsg. und weitere OP-Schaltungen: s. Anhang B~~)
- Bestimmen Sie für den Fall  $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$  den Widerstand  $R_3$  so, dass  $U_a = -4 \cdot (U_1 - U_2)$  wird.

#### 4.3.2 OP-Schaltung zur Temperaturmessung, Kennlinienabweichungen

Gegeben sei ein Temperaturmessgerät für den Messbereich  $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einem normgerechten Pt100-Element, wobei  $I_S = 2 \text{ mA}$  und  $U_{ref} = 0,2002 \text{ V}$ .

$$R(\vartheta) = R_0 (1 + A\vartheta + B\vartheta^2), \quad \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C}, \quad A = 3,9083 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}, \quad B = -5,775 \cdot 10^{-7} (^\circ\text{C})^{-2}$$

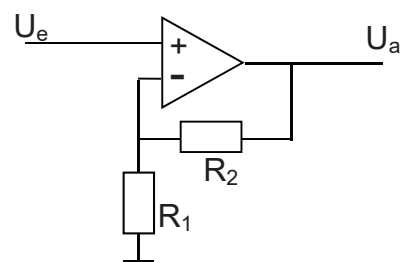


- Zeigen Sie:  $U_M = 13 \cdot (I_S \cdot R_\theta - U_{ref})$ .  
 $U_M = 0 \dots 1 \text{ V}$  entspreche einer Anzeige von  $0 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Wie groß ist der Offset-Fehler?
- Wie groß ist der maximale Linearitätsfehler im Messbereich (angegeben in Prozent vom Endwert)? Ein evtl. vorhandener Steigungsfehler soll unberücksichtigt bleiben.

#### 4.3.3 Nicht invertierender Verstärker

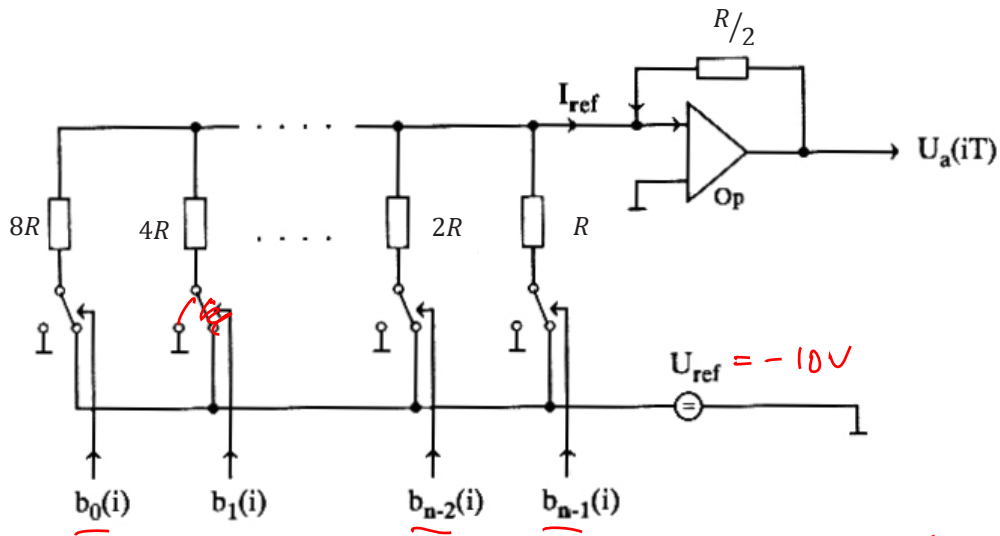
Bestimmen Sie das Übertragungsverhalten

$U_a = f(U_e)$  der nebenstehenden Operationsverstärkerschaltung (allgemein und für die Widerstandswerte  $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 13,2 \text{ k}\Omega$ ).



## 4.3.4 D/A-Wandler

Bestimmen Sie  $U_a$ , wenn  $U_{ref} = -10V$ ,  $n = 4$  und  $b = [b_3, b_2, b_1, b_0] = [1, 1, 0, 1]$  (alle Schalter wie im Bild gezeigt, nur der Schalter bei  $b_1$  geöffnet).



Addierer

$$U_a = - \left( \frac{R/2}{8R} \cdot (-10V) + \frac{R/2}{4R} \cdot 0V + \frac{R/2}{2R} \cdot (-10V) + \frac{R/2}{R} \cdot (-10V) \right)$$

$$= \left( \frac{10}{16} + 0 + \frac{10}{4} + \frac{10}{2} \right) V = 8,125 V$$

#### 4.4 Messschaltung mit Rückkopplung, Kompensation

Blockdiagramm:

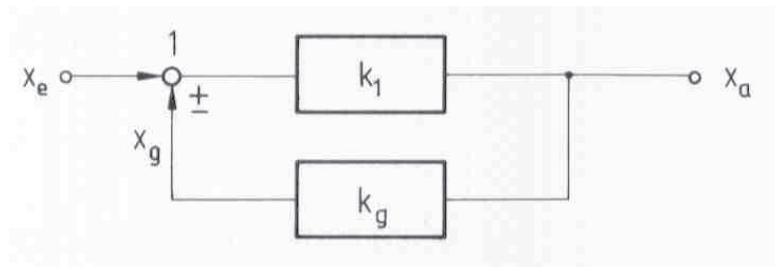


Abbildung 4.6: Kompensationsstruktur

Beispiel: Berührungslose Strommessung, DC/AC - Stromwandler

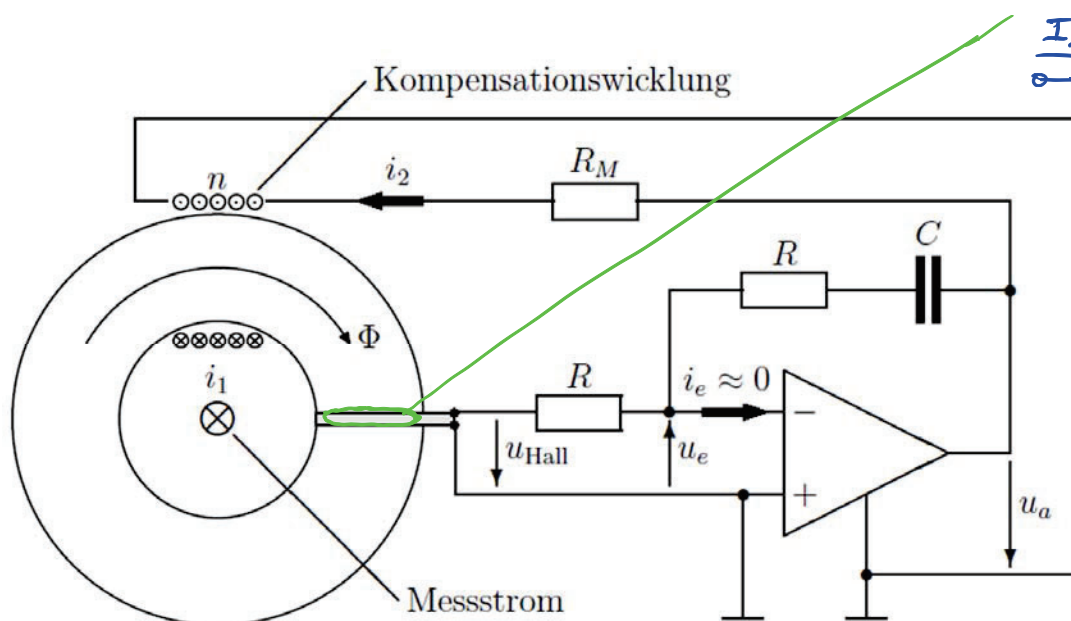
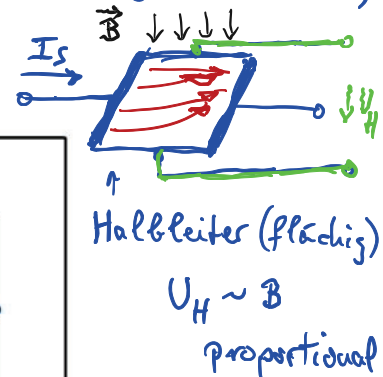


Abbildung 4.7: Potentialfreie und berührungslose Strommessung für Gleich- und Wechselstrom mittels Magnetfeldkompensation

Ablenkung der Ladungsträger führt zu ungleicher Ladungsverteilung und damit zur "Hall-Spannung".  
"Hall-Sonde" (Sensor)



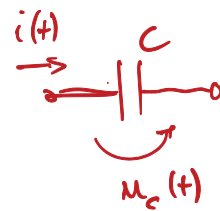
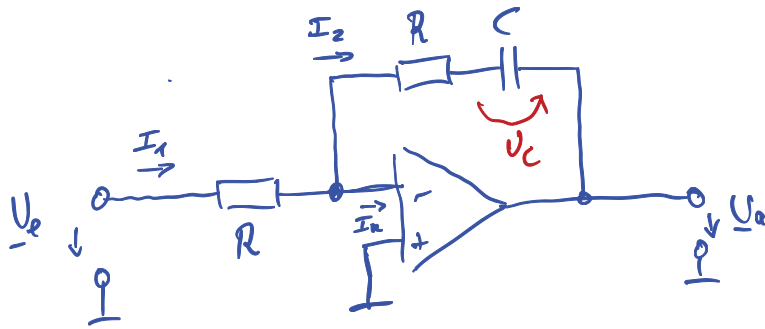
$$i_2 = \frac{U_a}{R_M}$$

Der vom Hall-Element gesteuerte Verstärker treibt den Strom  $I_2$  derart, dass sich die von  $I_1$  und  $I_2$  erzeugten magnetischen Flüsse gegenseitig aufheben. Der Kompensationsstrom ist dabei direkt proportional zum Messstrom

$$I_1 = n \cdot I_2 = n \cdot \frac{U_a}{R_M}$$

Die OP-Schaltung stellt einen **PI-Regler** dar, der die Hall-Spannung auf Null regelt. Im Gegensatz zur direkten Auswertung der Hall-Spannung kompensiert diese Schaltung mehrere mögliche Störeinflüsse, wie z. B. die Temperaturabhängigkeit der Hall-spannung.





$$Q = C \cdot U$$

$$\int i dt = C \cdot U$$

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt$$

$$= \frac{1}{C} \int \frac{U_e}{R} dt = \frac{1}{RC} \int U_e dt$$

Knotenregel:  $I_1 = I_2 + \underbrace{I_u}_{=0}$

$$\frac{U_e - U_u}{R} = \frac{U_u - U_a}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$V_p = 0 \Rightarrow U_u = 0$  Idealisierung

$$U_a = - \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{R} \cdot U_e = - \left( 1 + \frac{1}{j\omega RC} \right) \cdot U_e$$

Welches Übertragungssystem hat den Frequenzgang  $G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T}$

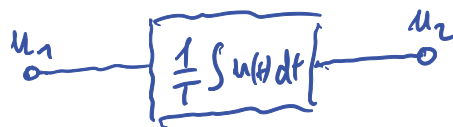
$$\underline{U}_1 = \text{Re} \{ \hat{U}_1 e^{j\omega t} \}$$

$$\underline{U}_2 : \text{Integral von } \underline{U}_1 \quad \underline{U}_2 = \text{Re} \left\{ \int \hat{U}_1 e^{j\omega t} dt \right\}$$

$$= \text{Re} \left\{ \frac{1}{j\omega} \cdot \hat{U}_1 e^{j\omega t} \right\}$$



entspricht



$\left( 1 + \frac{1}{j\omega RC} \right)$  bedeutet also proportionale Verstärkung mit Faktor 1 und integrals Verstärkung

"PI-Regler" - der am häufigsten eingesetzte Regler in der Regelungstechnik.

Frequenzgang

$$G(j\omega)_{dB} = 20 \lg \left| 1 + \frac{1}{j\omega RC} \right| = 20 \lg \left| \frac{j\omega RC + 1}{j\omega RC} \right| = -20 \lg \underbrace{\left| \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \right|}_{\text{Hochpass}}$$





## 4.5 Brückenschaltungen

### 4.5.1 Einfache Brückenschaltung

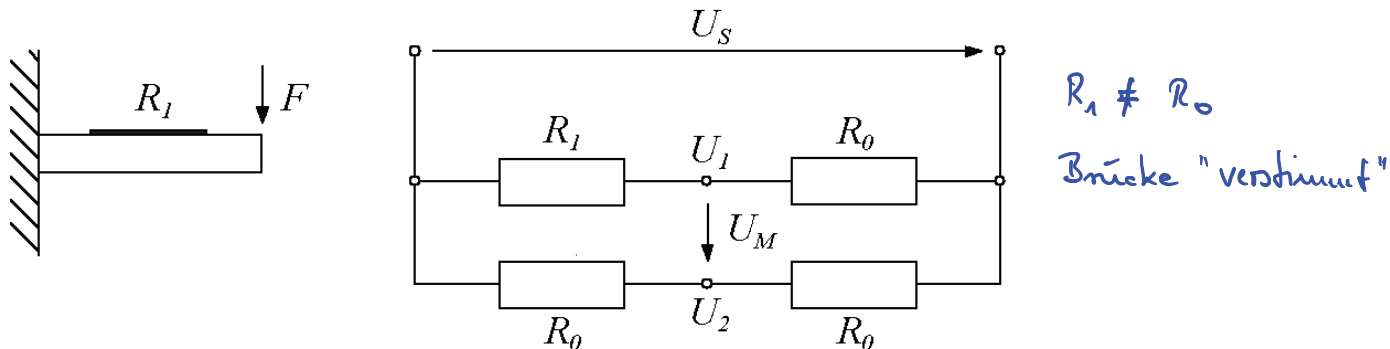


Abbildung 4.8: Biegebalken unter Krafteinwirkung mit DMS in Brückenschaltung

Beispiel: Dehnungsmessung mit Dehnungsmessstreifen (DMS)

$R_1 = R_0 + \Delta R_\epsilon + \Delta R_T$  : dehnungs- und temperaturabhängig Nennwert von  $R_1$  ist  $R_0$

$$U_M = U_1 - U_2 = \frac{R_0}{R_1 + R_0} \cdot U_S - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \cdot U_S = U_S \cdot \left( \frac{R_0}{2R_0 + \Delta R_\epsilon + \Delta R_T} - \frac{1}{2} \right)$$
Abweichungen führen zu  $U_M \neq 0$

$$U_M = U_S \cdot \left( \frac{2 \cdot R_0 - (2 \cdot R_0 + \Delta R_\epsilon + \Delta R_T)}{2 \cdot (2 \cdot R_0 + \Delta R_\epsilon + \Delta R_T)} \right)$$

und damit wegen  $\Delta R_\epsilon + \Delta R_T \ll R_0$

$$U_M \approx -\frac{U_S}{4 \cdot R_0} \cdot (\Delta R_\epsilon + \Delta R_T)$$

Wesentlich: Hochgenaue Messung von  $U_1 - U_2$  (stromlos, damit kein weiterer Spannungsabfall an  $R_1$  entsteht).

Bei der Bestimmung des Widerstands in der einfachen Brückenschaltung gehen temperaturabhängige Änderungen im gleichen Maß wie die dehnungsabhängigen Änderungen (das eigentliche Nutzsignal) in den Messwert ein. Die Schaltung ist deshalb für die Dehnungsmessung kaum geeignet.

### 4.5.2 Halbbrücke

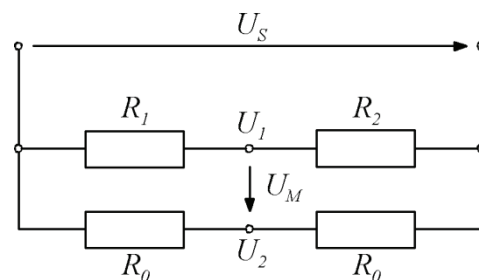
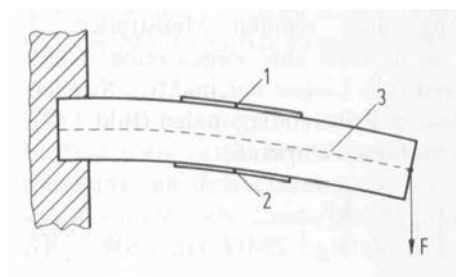


Abbildung 4.9: 2 DMS ( "1" gedehnt, "2" gestaucht) in einer Halbbrückenschaltung

$$R_1 = R_0 + \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T \quad R_2 = R_0 - \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T$$

$$U_M = U_S \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{1}{2} \right) = U_S \cdot \left( \frac{R_0 - \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T}{2 \cdot R_0 + 2 \cdot \Delta R_T} - \frac{1}{2} \right) \approx -\frac{U_S}{2 \cdot R_0} \cdot \Delta R_\varepsilon = -\frac{U_S}{2} \cdot \frac{\Delta R_\varepsilon}{R_0}$$

$\Delta R_T$  geht nicht mehr in den Messwert ein!

#### 4.5.3 Vollbrücke

Bei Einsatz von je 2 gedehnten und gestauchten DMS erhält man eine Vollbrücke, mit der sich die Empfindlichkeit der Messschaltung gegenüber der Halbbrücke nochmals verdoppeln lässt.

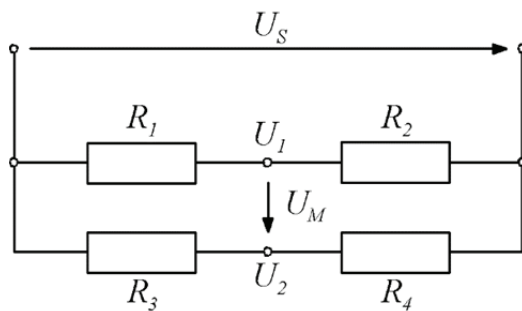


Abbildung 4.10: Vollbrückenschaltung

$$R_1 = R_0 + \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T \quad R_2 = R_0 - \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T$$

$$R_3 = R_0 - \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T \quad R_4 = R_0 + \Delta R_\varepsilon + \Delta R_T$$

Bestimmung von  $U_M$  als Übung (siehe unten).

## 4.6 Übungen "Brückenschaltungen"

### 4.6.1 Einfache Brückenschaltung

In Abbildung 4.8 sei  $U_S = 6\text{ V}$ ,  $R_0 = 1\text{ k}\Omega$ .

Wie groß ist  $R_1$ , wenn  $U_M = 1\text{ V}$  gemessen wird?

### 4.6.2 Anwendung DMS-Messbrücke

Auf Ober- und Unterseite eines Rotorblattes einer Windenergieanlage wird je ein Metall-DMS mit Nennwiderstand  $200\ \Omega$  aufgebracht. Die DMS werden mit zwei Präzisionswiderständen von  $1\text{ k}\Omega$  so zu einer Halbbrücke verschaltet, dass jeweils ein DMS in Reihe mit einem  $1\text{ k}\Omega$ -Widerstand liegt. Die Brücke wird mit  $U_S = 10\text{ V}$  gespeist.

- a) Skizzieren Sie die Anordnung und den Schaltplan der Brückenschaltung.
- b) Welche Brückenspannung messen Sie, wenn die Dehnung der DMS bei vertikaler Belastung des Rotorblatts  $\varepsilon = 0.2\%$  (bzw. Stauchung:  $\varepsilon = -0.2\%$ ) beträgt?

(Hinweis: Bei Metall-DMS kann die relative Widerstandsänderung gleich dem Doppelten der Dehnung angenommen werden, also  $\frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot \varepsilon$ .)

### 4.6.3 Vollbrücke

Herleitung der Beziehung zwischen  $U_M$  und  $\Delta R_\varepsilon$  für die Vollbrücke.