

2.3 Verstärker zur Instrumentierung

2.3.1 Differenzverstärker (Subtrahierer)

Der Differenzverstärker wurde im Abschnitt 2.24 behandelt. In der Instrumentierung wird er häufig durch einen vorgeschalteten Impedanzwandler zur Erhöhung des Eingangswiderstands erweitert.

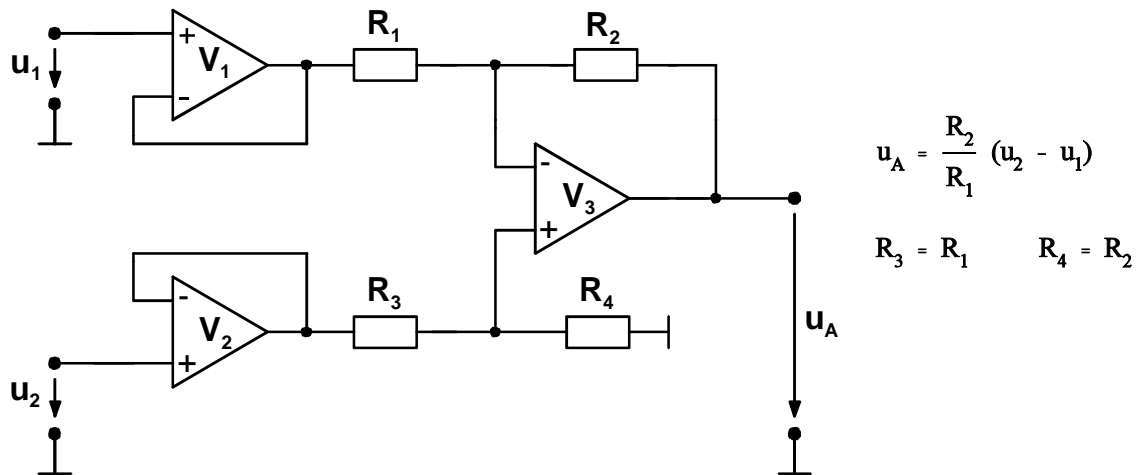


Bild 2.26 Elektrometerverstärker

Der Eingangswiderstand ist sehr hoch. Die Eingangsspannungen u_1, u_2 haben einen Bezug zur Versorgungsspannung, es muß $u_{1,2} < |U_{P,N}|$

Elektrometersubtrahierer

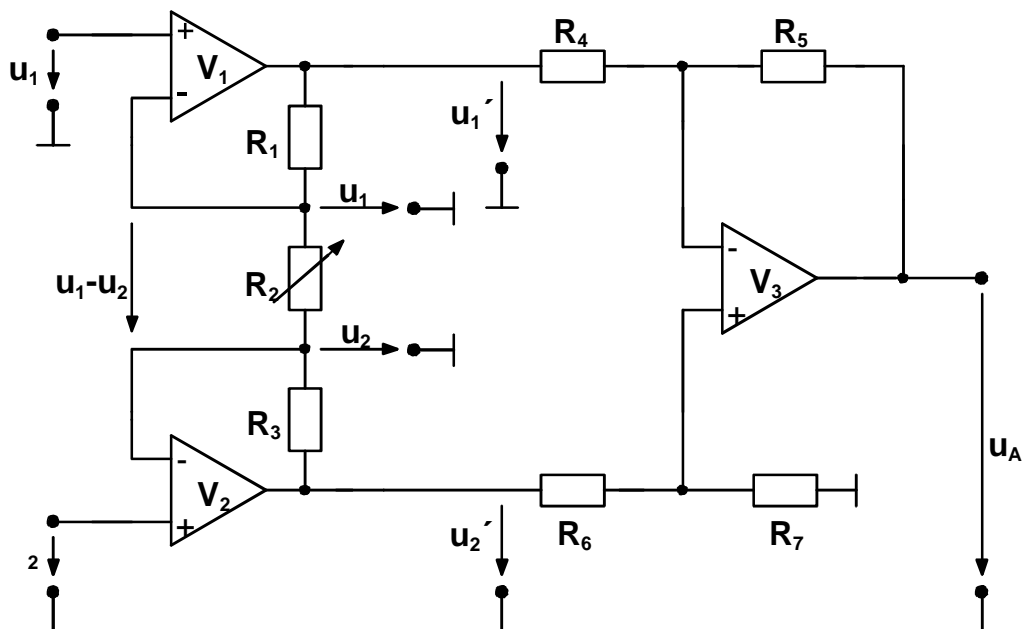
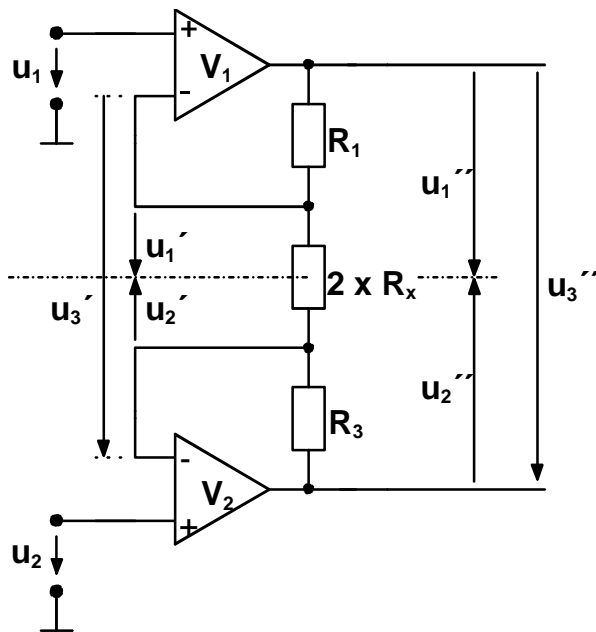


Bild 2.27 Elektrometerverstärker mit einstellbarer Verstärkung

Allgemeine Berechnung nach dem Überlagerungsprinzip:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} u_1' = u_1 \frac{R_1 + R_2}{R_2} \\ u_2 = 0 \end{array} \right. \quad \text{für } u_2 \neq 0 \\
 & u_1' - u_2' = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} + \frac{R_3}{R_2} \right) u_1 = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) u_1 \quad \text{für } R_3 = R_1 \\
 & \left\{ \begin{array}{l} u_2' = -u_1 \frac{R_3}{R_2} \\ u_A = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \frac{R_5}{R_4} (u_2 - u_1) \end{array} \right. \\
 & R_6 = R_4 \quad R_7 = R_5 \quad R_3 = R_1
 \end{aligned}$$

Symmetrischer Aufbau mit $R_1 = R_3$:



$$\begin{aligned}
 u_1'' &= u_1 \cdot \frac{R_1 + R_x}{R_x} \\
 u_2'' &= u_2 \cdot \frac{R_3 + R_x}{R_x} \\
 R_x &= \frac{R_2}{2}
 \end{aligned}$$

Bild 2.28 Symmetrischer Aufbau

$$\begin{aligned}
 u_A &= \left(\frac{R_1 + R_x}{R_x} \right) \frac{R_5}{R_4} (u_2 - u_1) \quad R_x = \frac{R_2}{2} \\
 u_A &= \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_2} \right) \frac{R_5}{R_4} (u_2 - u_1) = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \frac{R_5}{R_4} (u_2 - u_1)
 \end{aligned}$$

Für $R_5 = R_4$ (in Bild 2.27)

$$u_A = \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_2}\right) \cdot (u_2 - u_1) \quad u_A = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) \cdot (u_2 - u_1)$$

für $R_2 = R_1$

$$u_A = 3 (u_2 - u_1)$$

2.3.2 Doppelte OP-Verstärkerbeschaltung

Die folgende Verstärkerbeschaltung arbeitet sowohl mit Mit- als auch mit Gegenkopplung

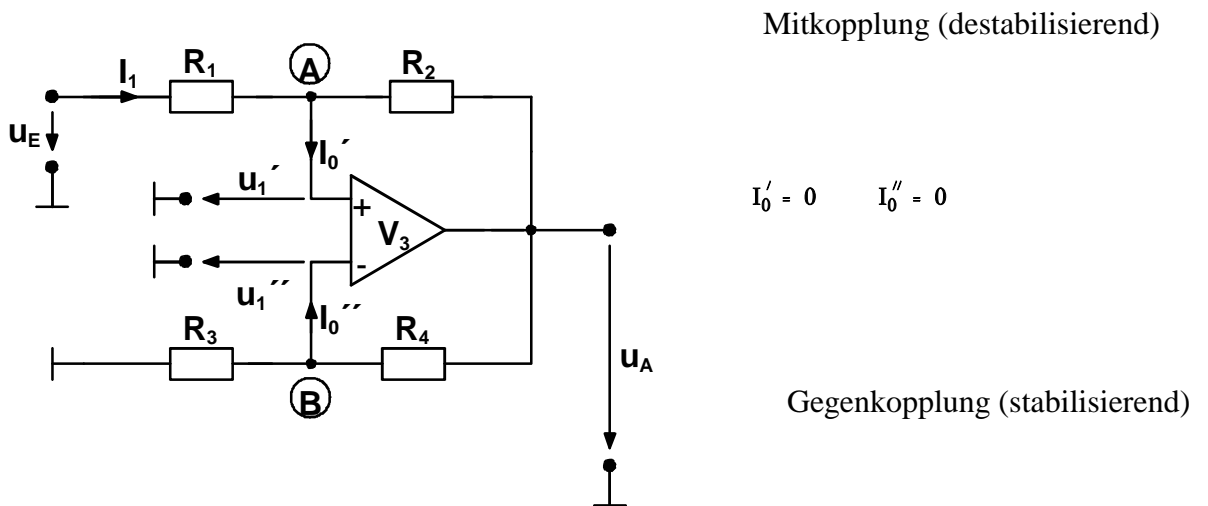


Bild 2.28 Beschaltung für Mit- und Gegenkopplung

Stromsumme für die Knoten:

$$A \quad \frac{u_E - u_1'}{R_1} + \frac{u_A - u_1'}{R_2} = 0 \quad \left. \vphantom{\frac{u_E - u_1'}{R_1}} \right\} \Rightarrow u_1' = u_1'' = u_1$$

$$B \quad \frac{u_A - u_1''}{R_4} - \frac{u_1''}{R_3} = 0 \quad J$$

$$A \quad \frac{u_E}{R_1} - \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_A}{R_2} - \frac{u_1}{R_2} = 0$$

$$B \quad \frac{u_A}{R_4} - \frac{u_1}{R_4} - \frac{u_1}{R_3} = 0$$

$$\frac{u_A}{R_2} = u_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) - \frac{u_E}{R_1}$$

$$\frac{u_A}{R_4} = u_1 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)$$

$$\text{a) } u_1 = u_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + u_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{b) } u_1 = u_A \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

a) und b) gleichsetzen und nach u_A und u_E ordnen:

$$u_A \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = u_E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Damit wird die Verstärkung zu:

$$\begin{aligned} v = \frac{u_A}{u_E} &= \frac{R_2}{(R_1 + R_2) \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} = \frac{R_2}{R_3 \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} - R_1} \\ &= \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_3 (R_1 + R_2) - R_1 (R_3 + R_4)} = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_1 R_3 + R_2 R_3 - R_1 R_3 - R_1 R_4} \end{aligned}$$

$$v = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_2 R_3 - R_1 R_4} \quad \text{c)}$$

$\alpha)$ Weitere Vereinfachung erhalten wir nur mit $R_4 = R_2$

$$v = \frac{R_2 + R_3}{R_3 - R_1} \quad v \rightarrow \infty \quad \text{für} \quad R_3 = R_1$$

Es besteht Gleichgewicht von Mit- und Gegenkopplung

$\beta)$ Gleichsetzen von $R_1 = R_4$, $R_2 = R_3$ aus c):

$$v = \frac{R_2 (R_2 + R_1)}{R_2^2 - R_1^2} = \frac{R_2 (R_2 + R_1)}{(R_2 - R_1) (R_2 + R_1)} = \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$

$v \rightarrow \infty$ für $R_2 = R_1$ (dann wird auch $R_1 = R_3 \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_4$)

Es besteht ebenfalls Gleichgewicht von Mit- und Gegenkopplung.

Für $v \rightarrow \infty$ wird (ideal) $u_A \rightarrow \infty$
 \Rightarrow Stromquelle für einen Widerstand im Ausgangszweig, der gegenkoppelt.

Allgemeine Einordnung für β :

$R_2 > R_1$ Verstärker; $R_2 \rightarrow \infty$ $v = +1$

$R_2 = R_1$ Grenze $v \rightarrow \infty$

$R_2 < R_1$ Schmitttrigger

2.3.3 Gesteuerte Stromquelle

Die Schaltung wird am Eingang und im Rückkoppelzweig erweitert mit R_E und R'_E (Bild 2.29):

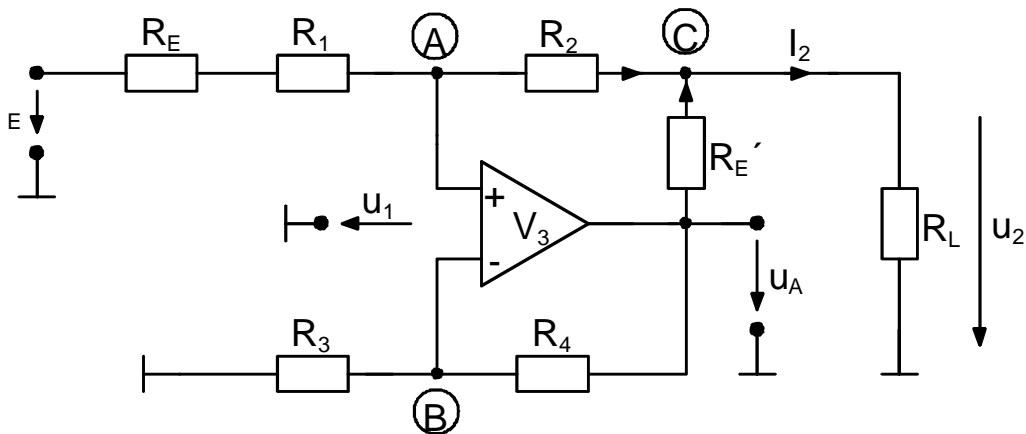


Bild 2.29 Spannungsgesteuerte Stromquelle, Lastwiderstand gegen Masse

a) Für $R_4 = R_1$, $R_3 = R_2$ und $I_2 = 0$ wird:

$$v = \frac{R_2 + R'_E}{R_2 + R'_E - (R_1 + R_E)}$$

mit $R'_E = R_E$ erhalten wir:

$$v = \frac{R_2 + R_E}{R_2 - R_1} \quad v \rightarrow \infty \text{ für } R_2 = R_1 \text{ wie bisher, dann ist auch } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

b) $I_2 \neq 0$

$$\begin{aligned} \text{A} \quad \frac{u_E - u_1}{R_E + R} + \frac{u_2 - u_1}{R} = 0 & \quad \rightarrow \quad u_2 - u_1 = \frac{-R}{R_E + R} (u_E - u_1) \\ & \quad \quad \quad u_1 - u_2 = \frac{R}{R_E + R} (u_E - u_1) \end{aligned}$$

$$\text{B} \quad \frac{u_A - u_1}{R} - \frac{u_1}{R} = 0 \quad \rightarrow \quad u_A = 2u_1$$

$$\text{C} \quad I_2 = \frac{u_A - u_2}{R_E} + \frac{u_1 - u_2}{R}$$

mit $u_A = 2u_1$ wird:

$$u_1 - u_2 = \frac{R}{R_E + R} (u_E - u_1)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{2u_1 - u_2}{R_E} + \frac{u_E - u_1}{R_E + R} = \frac{u_1}{R_E} + \frac{u_1 - u_2}{R_E} + \frac{u_E - u_1}{R_E + R} \\ &= \frac{u_1}{R_E} + \frac{R(u_E - u_1)}{R_E(R_E + R)} + \frac{u_E - u_1}{R_E + R} \\ &= u_1 \left(\frac{1}{R_E} - \frac{R}{R_E(R_E + R)} - \frac{1}{R_E + R} \right) + u_E \left(\frac{R}{R_E(R_E + R)} + \frac{1}{R_E + R} \right) \\ &= u_1 \left(\frac{R_E + R}{R_E(R_E + R)} - \frac{R}{R_E(R_E + R)} - \frac{R_E}{R_E(R_E + R)} \right) \\ & \quad \quad \quad \downarrow \\ & \quad \quad \quad 0 \\ &+ u_E \left(\frac{R}{R_E(R_E + R)} + \frac{R_E}{R_E(R_E + R)} \right) \end{aligned}$$

$$I_2 = \frac{u_E}{R_E}$$

2.4 Filter

Das Kapitel wird mit den relevanten Schaltungen vorgetragen.