

## 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.

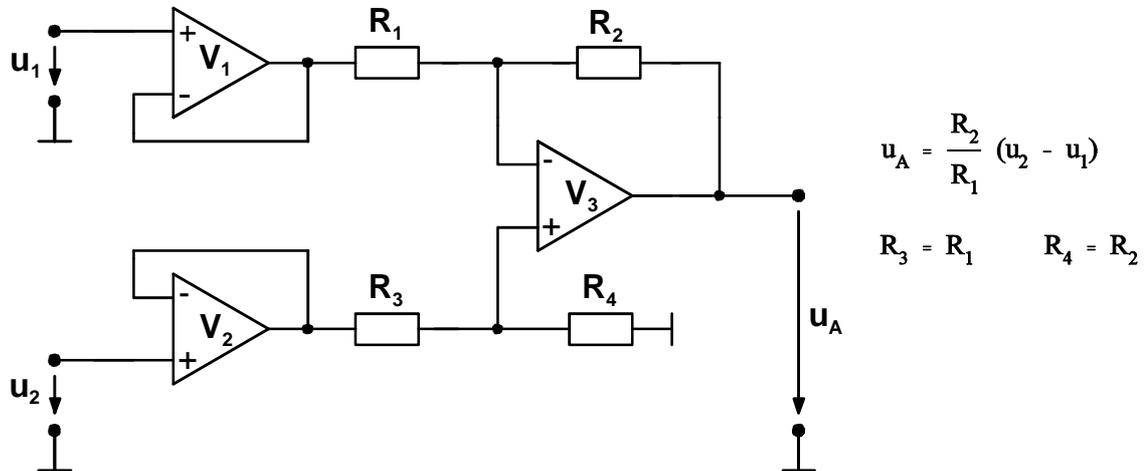


Bild 2.26 Elektrometerverstärker

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

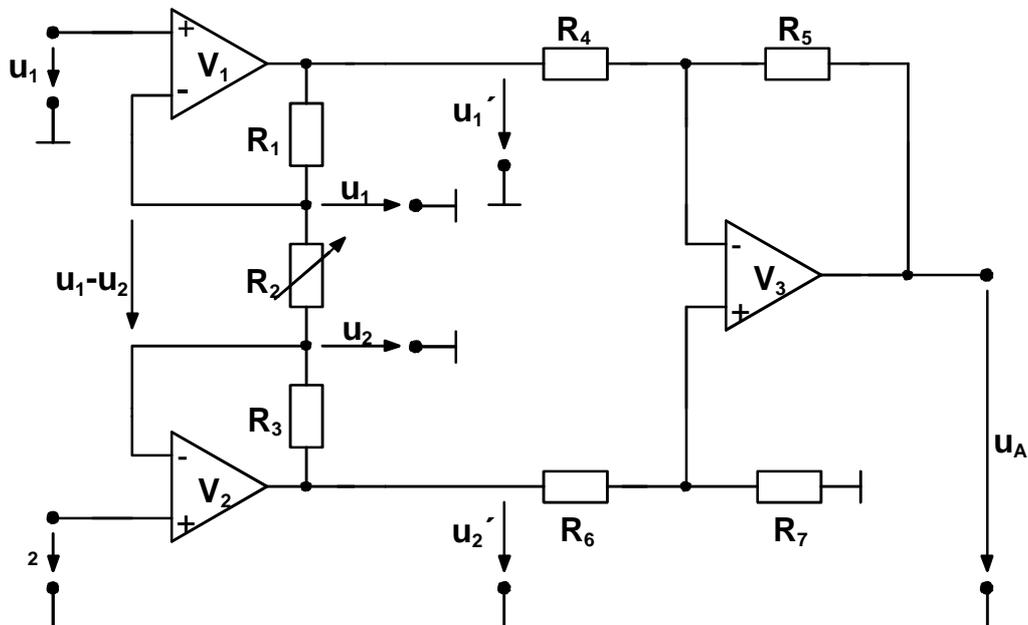
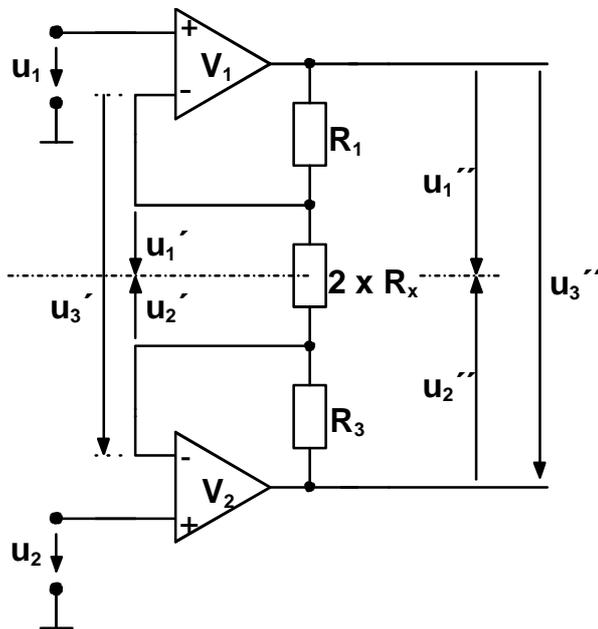


Bild 2.27 Elektrometerverstärker mit einstellbarer Verstärkung

Allgemeine Berechnung nach dem Überlagerungsprinzip:

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

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

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

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

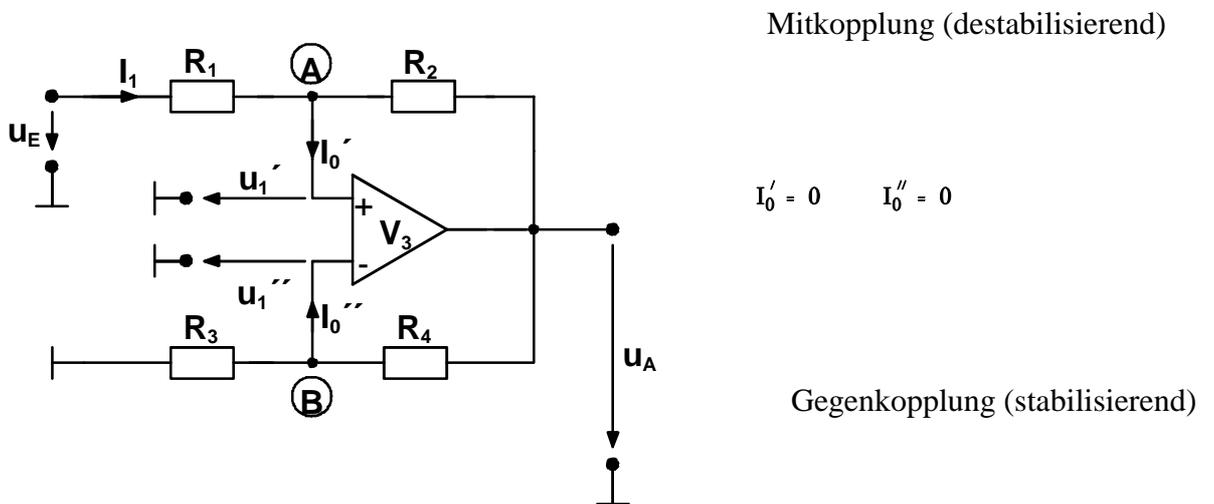


Bild 2.28 Beschaltung für Mit- und Gegenkopplung

Stromsumme für die Knoten:

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

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

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

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

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

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

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

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

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  $R_4 = R_2$

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

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  $\beta$ :

$R_2 > R_1$  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):

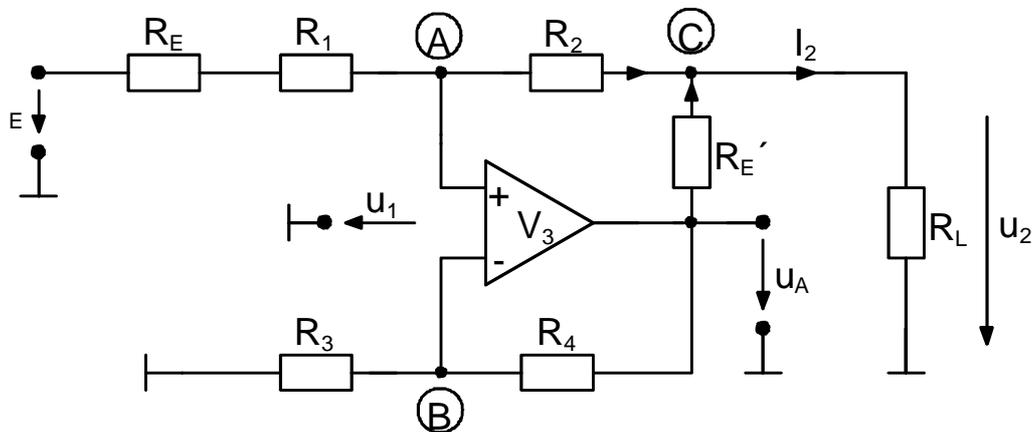


Bild 2.29 Spannungsgesteuerte Stromquelle, Lastwiderstand gegen Masse

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.