

3. Gesteuerte Quellen

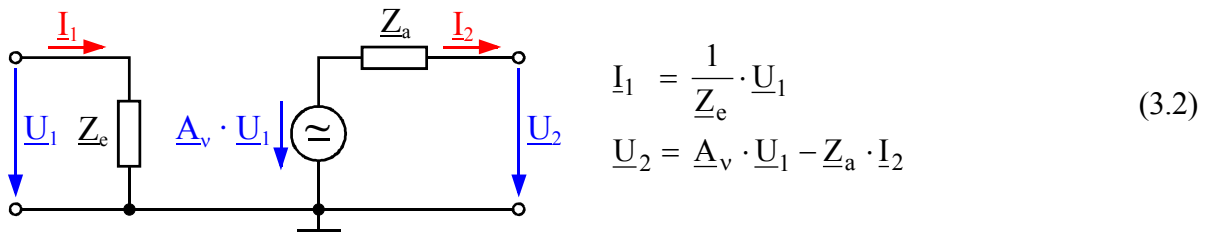
In der Netzwerksynthese werden häufig gesteuerte Quellen verwendet. Diese sind spannungsgesteuerte Spannungsquellen, stromgesteuerte Spannungsquellen, spannungsgesteuerte Stromquellen und stromgesteuerte Stromquellen.

3.1 Spannungsquellen

Eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ausgangsspannung U_2 proportional zur Eingangsspannung U_1 ist. Als Idealisierung verlangt man, dass die Ausgangsspannung vom Ausgangsstrom unabhängig und der Eingangsstrom Null ist. Die Übertragungsgleichungen lauten:

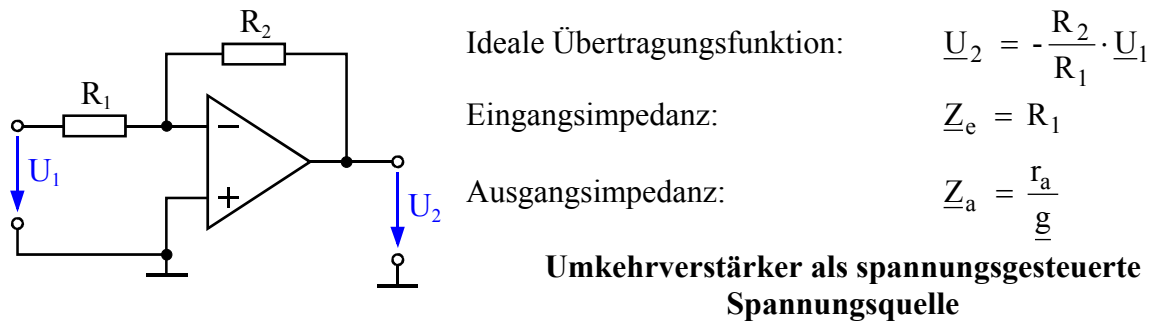
$$\underline{I}_1 = 0 \quad \text{und} \quad \underline{U}_2 = \underline{A}_v \cdot \underline{U}_1 \quad (3.1)$$

In der Praxis lässt sich eine ideale Quelle nur näherungsweise realisieren. Unter Berücksichtigung der meist gut mit Operationsverstärkern erfüllbaren Rückwirkungsfreiheit ergibt sich das Niederfrequenz-Ersatzschaltbild für eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle. Die Übertragungsgleichungen der realen Quelle lauten:

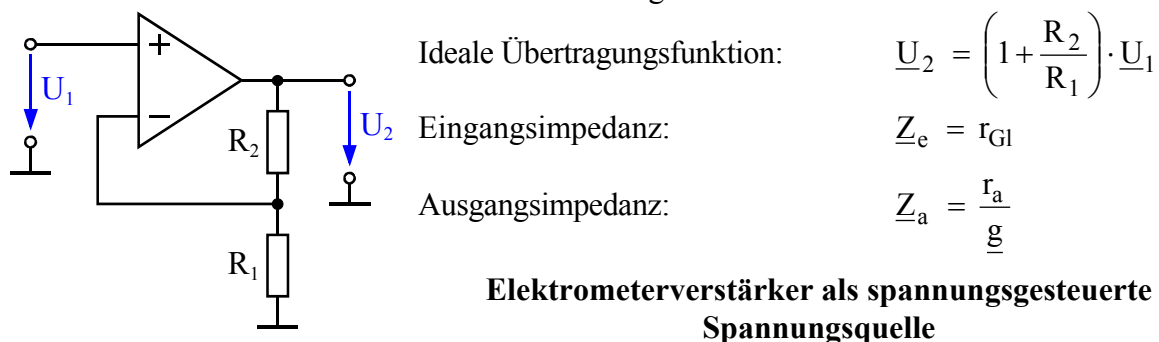


Ersatzschaltbild einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle

Die innere Spannungsquelle $A_v \cdot U_1$ ist dabei als ideal anzusehen. Die Eingangsimpedanz Z_e soll hochohmig und die Ausgangsimpedanz Z_a niederohmig sein. Spannungsgesteuerte Spannungsquellen werden mit einem Umkehrverstärker oder mit einem Elektrometerverstärker realisiert. Die Ausgangsimpedanz liegt deutlich unter 1Ω ; sie hat jedoch induktiven Charakter, wird also mit steigender Frequenz größer.



Der Umkehrverstärker kann besonders bei niederohmigen Signalquellen angewendet werden, weil dann der Eingangswiderstand R_1 praktisch keinen Fehler verursacht. Bei dieser Schaltung entstehen keine Fehler durch Gleichtaktaussteuerung.

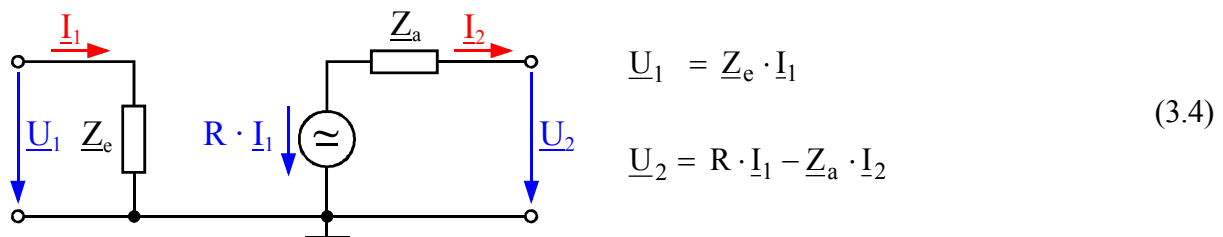


Beim Elektrometerverstärker ist der Eingangswiderstand sehr hoch. Man erreicht bei tiefen Frequenzen leicht Werte im GΩ-Bereich. Bei hohen Frequenzen muss die Eingangskapazität berücksichtigt werden. Der konstante Eingangsruhestrom I_B kann einen zusätzlichen Fehler verursachen, wenn der Innenwiderstand der Signalquelle hoch ist. In kritischen Fällen sind Operationsverstärker mit JFET-Eingang zu verwenden. Wird beim Elektrometerverstärker der Widerstand $R_2 = 0$ gewählt, dann entsteht der klassische Spannungsfolger. R_1 ist dann praktisch ein Lastwiderstand.

Das Ersatzschaltbild der stromgesteuerten Spannungsquelle entspricht weitgehend dem Ersatzschaltbild der spannungsgesteuerten Spannungsquelle. Der Eingangsstrom ist jetzt die Steuerquelle.

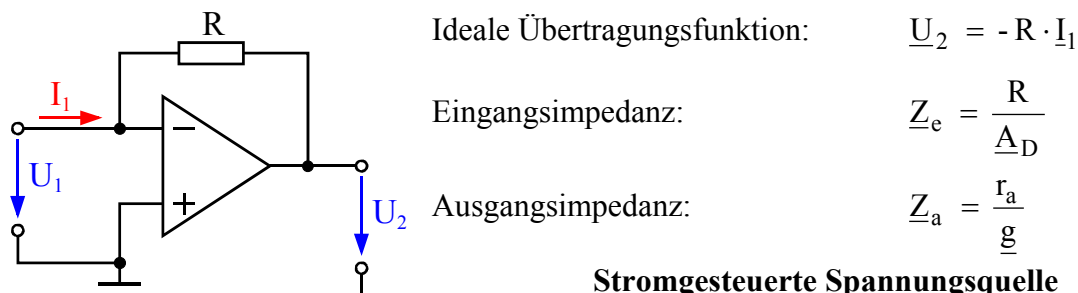
$$\underline{U}_1 = 0 \quad \text{und} \quad \underline{U}_2 = R \cdot \underline{I}_1 \quad (3.3)$$

Die Übertragungsgleichungen für die reale stromgesteuerte Spannungsquelle lauten unter Vernachlässigung der Rückwirkung:



Ersatzschaltbild einer stromgesteuerten Spannungsquelle

Bei der Realisierung der stromgesteuerten Spannungsquelle nutzt man die Tatsache aus, dass der Summationspunkt eines Umkehrverstärkers eine virtuelle Masse darstellt. Dadurch ergibt sich die geforderte niedrige Eingangsimpedanz. Wenn der Eingangsruhestrom gegenüber dem Strom I_1 vernachlässigt werden kann, gelten nachstehende Beziehungen:



Bei der stromgesteuerten Spannungsquelle können durch die Offsetspannung zusätzliche Fehler entstehen. Sie sind vom Innenwiderstand R_g der Signalquelle abhängig. Die Offsetspannung wird mit dem Faktor $(1 + R/R_g)$ verstärkt.

Für die dargestellten gesteuerten Spannungsquellen ist die Ausgangsimpedanz \underline{Z}_a gleich. Die darin auftretende Schleifenverstärkung \underline{g} ist von der Leerlaufverstärkung \underline{A}_D und vom Rückkoppelfaktor \underline{k} und damit vom Innenwiderstand R_g der Signalquelle abhängig.

$$\underline{g} = \underline{k} \cdot \underline{A}_D = \frac{R_g}{R + R_g} \cdot \underline{A}_D \quad (3.5)$$

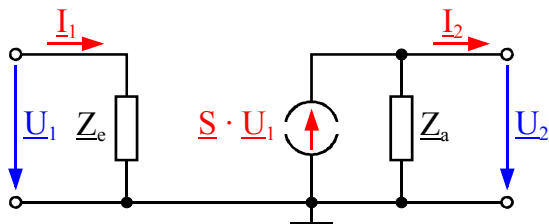
In der Messtechnik werden häufig stromgesteuerte Spannungsquellen mit erdfreiem Eingang benötigt. In der Literatur [1] werden solche Messschaltungen ausführlich beschrieben.

3.2 Stromquellen

Spannungsgesteuerte Stromquellen sollen einem Verbraucher einen Strom I_2 einprägen, der von der Steuerspannung U_1 bestimmt wird und von der Ausgangsspannung U_2 unabhängig ist. Es soll gelten:

$$I_1 = 0 \quad \text{und} \quad I_2 = \underline{S} \cdot U_1 \quad (3.6)$$

In der Praxis lässt sich diese Forderung nur näherungsweise erfüllen. Unter Berücksichtigung der gut realisierbaren Rückwirkungsfreiheit gelten für eine spannungsgesteuerte Stromquelle die Übertragungsgleichungen:



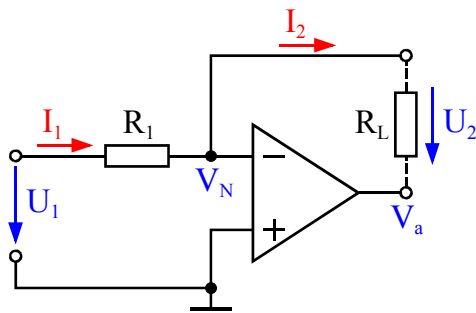
$$I_1 = \frac{1}{Z_e} \cdot U_1$$

$$I_2 = \underline{S} \cdot U_1 - \frac{1}{Z_a} \cdot U_2 \quad (3.7)$$

Ersatzschaltbild einer spannungsgesteuerten Stromquelle

Für $Z_e \rightarrow \infty$ und $Z_a \rightarrow \infty$ erhält man die ideale Stromquelle. Der Parameter \underline{S} wird als Steilheit oder Übertragungsleitwert bezeichnet.

Als spannungsgesteuerte Stromquelle für erdfreie Verbraucher kann der Umkehrverstärker oder der Elektrometerverstärker verwendet werden. Der Gegenkopplungswiderstand wird bei der Stromquelle durch den erdfreien Verbraucher ersetzt.



Ideale Übertragungsfunktion:

$$I_2 = \frac{U_1}{R_1}$$

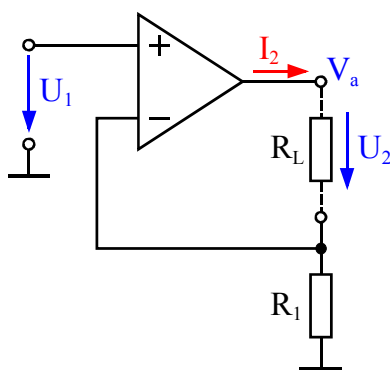
Eingangsimpedanz:

$$Z_e = R_1$$

Ausgangsimpedanz:

$$Z_a = \underline{A}_D \cdot R_1$$

Umkehrverstärker als spannungsgesteuerte Stromquelle



Ideale Übertragungsfunktion:

$$I_2 = \frac{U_1}{R_1}$$

Eingangsimpedanz:

$$Z_e = r_{GI}$$

Ausgangsimpedanz:

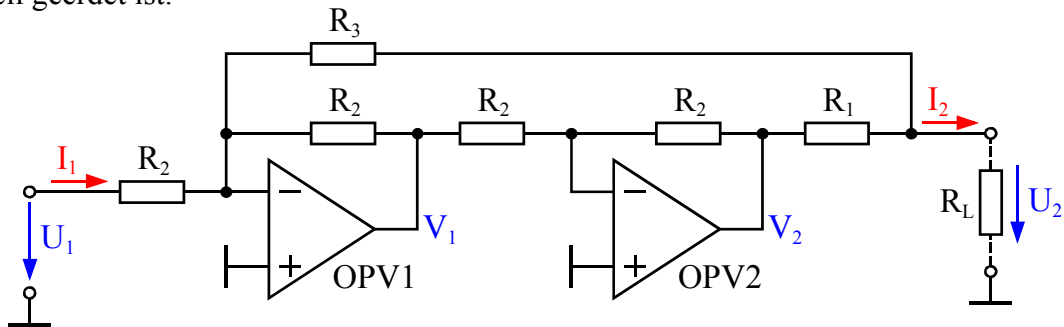
$$Z_a = \underline{A}_D \cdot R_1$$

Elektrometerverstärker als spannungsgesteuerte Stromquelle

Vom Standpunkt der elektrischen Daten her gesehen sind diese beiden Schaltungen für viele Anwendungsfälle geeignet. Der Verbraucher R_L darf nicht einseitig an ein festes Potential angeschlossen werden, da sonst entweder der Verstärkerausgang mit dem Potential V_a oder der N-Eingang mit dem Potential V_N kurzgeschlossen wird.

Spannungsgesteuerte Stromquellen für geerdete Verbraucher besitzen diesen Nachteil nicht. Besonders günstige Verhältnisse lassen sich mit einer Schaltung mit zwei Operationsverstärkern erreichen, da hier keine Gleichtaktaussteuerung auftritt.

Bei der spannungsgesteuerten Stromquelle für geerdete Verbraucher ohne Gleichtaktaussteuerung ist der Eingangsstrom unabhängig von der Spannung U_2 , da der Vorwiderstand R_2 virtuell geerdet ist.



Spannungsgesteuerte Stromquelle für geerdete Verbraucher ohne Gleichtaktaussteuerung

Zur Berechnung des Ausgangsstromes gilt entsprechend der Schaltung für diese Stromquelle:

$$V_2 = -V_1 = U_1 + \frac{R_2}{R_3} \cdot U_2 \quad (3.8)$$

Die Anwendung der Knotenregel auf den Ausgang liefert:

$$\frac{V_2 - U_2}{R_1} - \frac{U_2}{R_3} - I_2 = 0 \quad (3.9)$$

Durch Einsetzen von Gl. 3.8 in Gl. 3.9 wird V_2 eliminiert.

$$I_2 = \frac{U_1}{R_1} + \frac{R_2 - R_3 - R_1}{R_1 \cdot R_3} \cdot U_2 \quad (3.10)$$

Der Ausgangsstrom wird von der Ausgangsspannung unabhängig, wenn die Abgleichbedingung $R_3 = R_2 - R_1$ erfüllt ist. Für die spannungsgesteuerte Stromquelle für geerdete Verbraucher ohne Gleichtaktaussteuerung gilt:

Ideale Übertragungsfunktion: $I_2 = \frac{U_1}{R_1}$ für $R_3 = R_2 - R_1$

Eingangsimpedanz: $Z_e = R_2$

Ausgangsimpedanz: $Z_a \rightarrow \infty$ für $R_3 = R_2 - R_1$

Das Ersatzschaltbild der stromgesteuerten Stromquelle ist nahezu identisch mit dem der spannungsgesteuerten Stromquelle. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass jetzt der Eingangsstrom als Steuergröße verwendet wird. Er soll durch die Schaltung möglichst wenig beeinflusst werden. Das ist ideal für $Z_e = 0$ gegeben. Die Übertragungsgleichungen lauten bei vernachlässigbarer Rückwirkung.

$$\begin{aligned} \text{real} & \quad \underline{U}_1 = \underline{Z}_e \cdot \underline{I}_1 & \Rightarrow & \quad \text{ideal, } \underline{Z}_e = 0, \underline{Z}_a \rightarrow \infty & \quad \underline{U}_1 = 0 \\ \underline{I}_2 = \underline{A}_I \cdot \underline{I}_1 - \frac{1}{\underline{Z}_e} \cdot \underline{U}_2 & & \Rightarrow & & \quad \underline{I}_2 = \underline{A}_I \cdot \underline{I}_1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Stromgesteuerte Stromquellen lassen sich einfach mit der Reihenschaltung aus stromgesteuerter Spannungsquelle und spannungsgesteuerter Stromquelle realisieren. Die einfachste Realisierung ergibt sich, wenn man einen CC-OPV einsetzt, bei dem der nichtinvertierte Eingang an Masse liegt.

Von besonderem Interesse sind stromgesteuerte Stromquellen mit Vorzeichenumkehr ($I_1 = -I_2$). Sie werden als Stromspiegel bezeichnet.