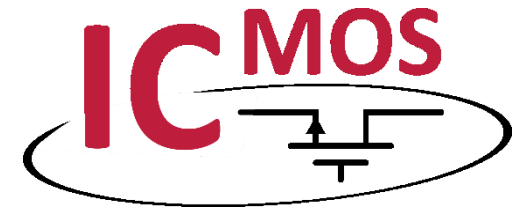




Technische
Universität
Braunschweig



Netzwerke

5. Gesteuerte Quellen

Vadim Issakov

Sommersemester 2024

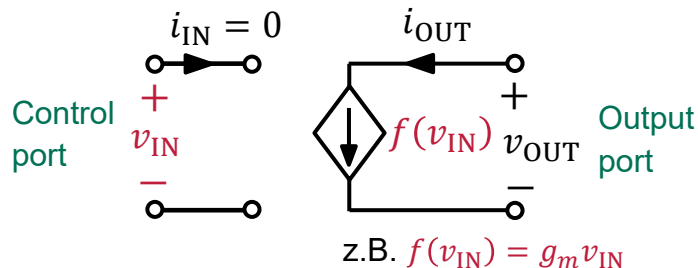
Ungesteuerte (feste) Spannungs- und Stromquelle:

- Feste Vorgabe der Spannung oder des Stroms
- Keine Rückwirkung der Schaltung auf die Quelle
- Werte unabhängig von anderen Strömen und Spannungen des Netzwerks

Gesteuerte Quellen

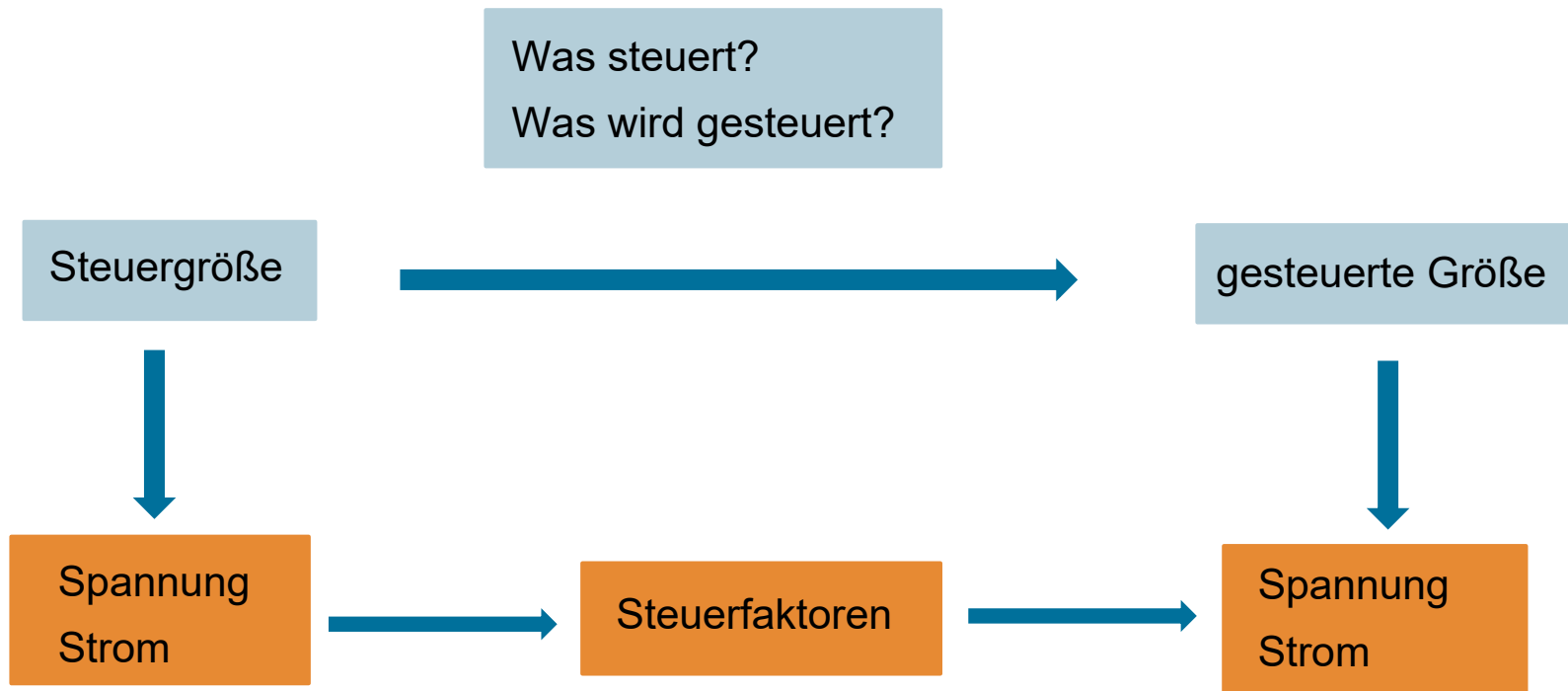
Gesteuerte Quellen:

- werden durch Ströme oder Spannungen **anderer** Zweige gesteuert
- Beispiel MOSFET (Bauteil mit mehreren Klemmenpaaren)
 - Steuernde Spannung zwischen einem Klemmenpaar (v_{IN}) bestimmt Verhalten des MOSFETs zwischen einem anderen Klemmenpaar



Idealisierte spannungsgesteuerte Stromquelle:

- ein Klemmenpaar als Eingang (control port, steuernder Anschluss)
- ein Klemmenpaar als Ausgang (output port)
- $i_{OUT} = f(v_{IN})$



Spannungsgesteuerte Spannungsquelle - VCVS

a) Spannungsgesteuerte Spannungsquelle (VCVS – voltage-controlled voltage source)



$i_{IN} = 0$, d.h. Eingangswiderstand (Z_{IN}) $\rightarrow \infty$

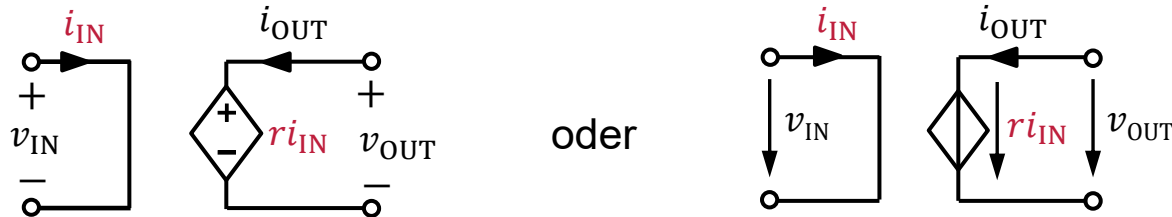
$$v_{OUT} = \mu \cdot v_{IN}$$

μ : Spannungsübertragungsrate (voltage transfer ratio), Spannungsverstärkung, $[\mu] = 1$

Beispiel: Spannungsverstärker, OPAMP

Stromgesteuerte Spannungsquelle - CCVS

b) Stromgesteuerte Spannungsquelle (CCVS – current-controlled voltage source)



$v_{IN} = 0$, d.h. Eingangswiderstand (Z_{IN}) $\rightarrow 0$

$$v_{OUT} = r \cdot i_{IN}$$

r : Transimpedanz, $[r] = \Omega$

Beispiel: Selbsterregter Gleichstromgenerator

Spannungsgesteuerte Stromquelle - VCCS

c) Spannungsgesteuerte Stromquelle (VCCS – voltage-controlled current source)



$i_{IN} = 0$, d.h. Eingangswiderstand (Z_{IN}) $\rightarrow \infty$

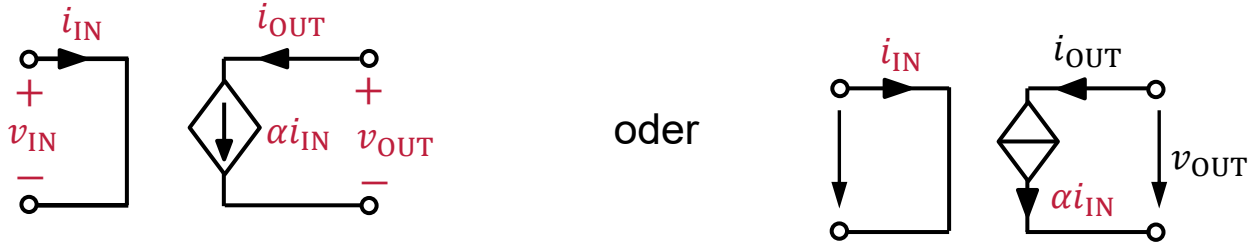
$$v_{OUT} = g \cdot v_{IN}$$

g : Transkonduktanz, $[g] = 1/\Omega$

Beispiel: MOSFET (metal oxide semiconductor field-effect transistor)

Stromgesteuerte Stromquelle - CCCS

d) Stromgesteuerte Stromquelle (CCCS – current-controlled current source)



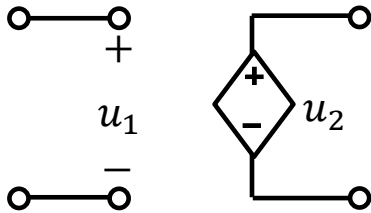
$v_{IN} = 0$, d.h. Eingangswiderstand (Z_{IN}) $\rightarrow 0$

$$i_{OUT} = \alpha \cdot i_{IN}$$

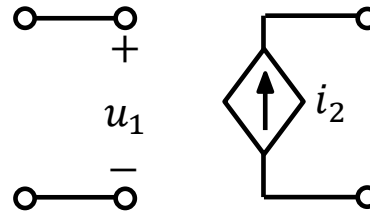
α : Stromübertragungsrate (current transfer ratio), Stromverstärkung, $[\alpha] = 1$

Beispiel: Bipolartransistor (BJT (bipolar junction transistor))

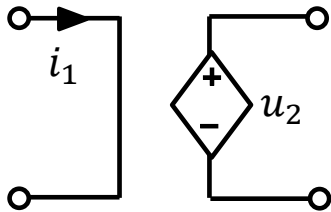
Zusammenfassung Gesteuerte Quellen



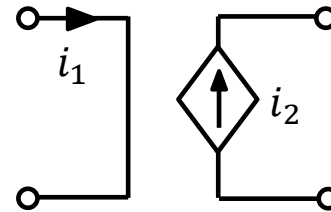
$$u_2 = \mu \cdot u_1$$



$$i_2 = g \cdot u_1$$



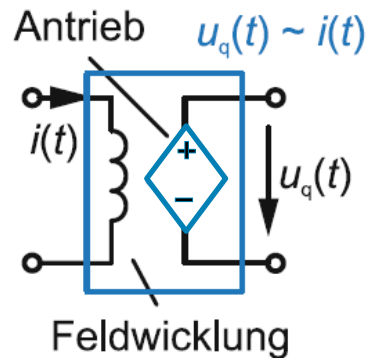
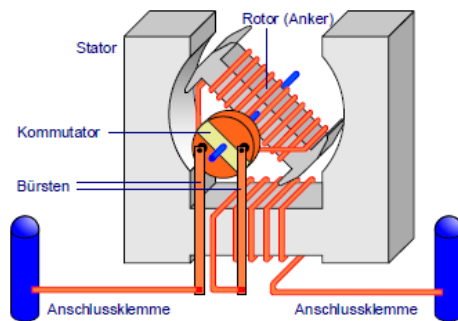
$$u_2 = r \cdot i_1$$



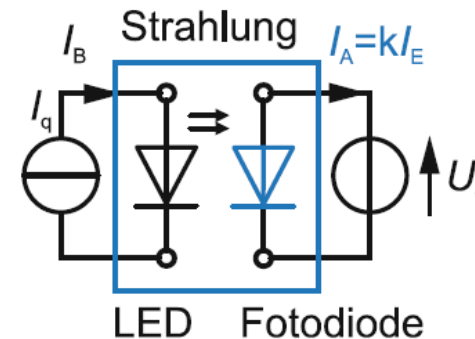
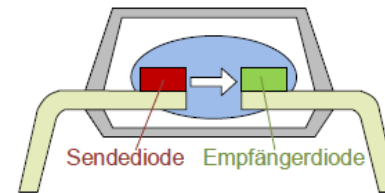
$$i_2 = \alpha \cdot i_1$$

Beispiele gesteuerter Quellen: CCVS und CCCS

Stromgesteuerte Spannungsquelle:
Selbsterregter Gleichstromgenerator

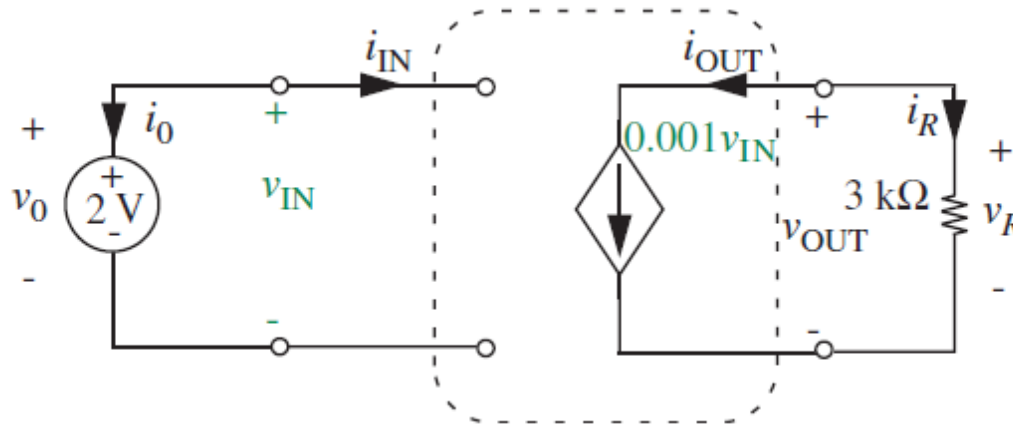


Stromgesteuerte Stromquelle:
Optokoppler



Gesteuerte Quellen – Beispiel VCCS

Beispiel: Analyse des Ausgangs des folgenden Netzwerks mit spannungsgesteuerter Stromquelle



Strom der gesteuerten Quelle: $0,001\text{S} \cdot v_{IN} = 2\text{ mA}$

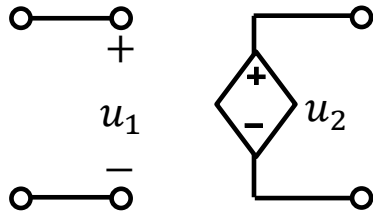
Kirchhoffsche Knotengleichungen: $i_{OUT} = 2\text{ mA}$ und $i_R = -2\text{ mA}$

Zweiggleichung für R : $v_R = 3\text{ k}\Omega \cdot i_R = -6\text{ V}$

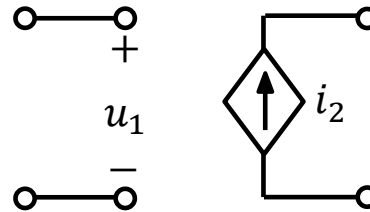
Kirchhoffsche Maschengleichung: $v_{OUT} = v_R = -6\text{ V}$

Gesteuerte Quellen

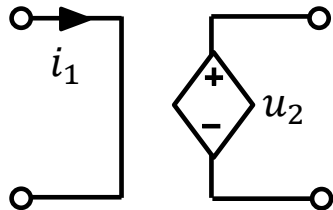
Allgemeine (nichtlineare) gesteuerte Quellen



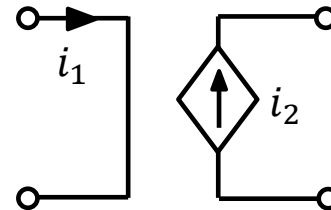
$$u_2 = f(u_1)$$



$$i_2 = f(u_1)$$

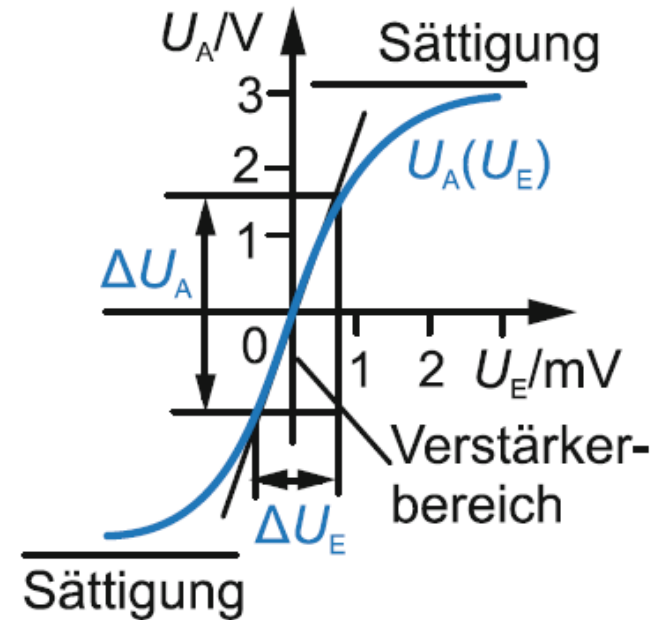
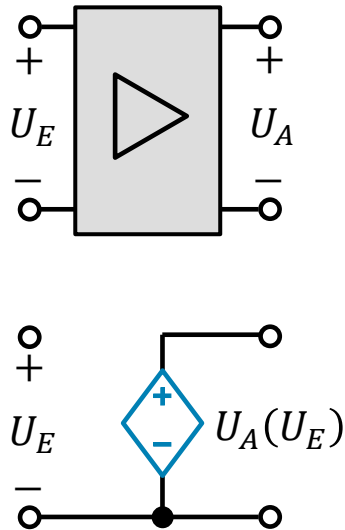


$$u_2 = f(i_1)$$



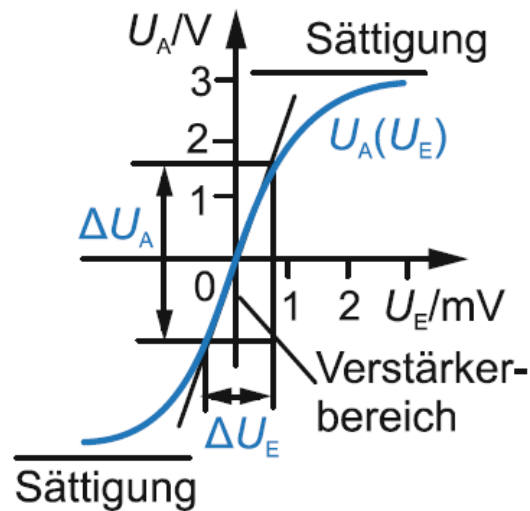
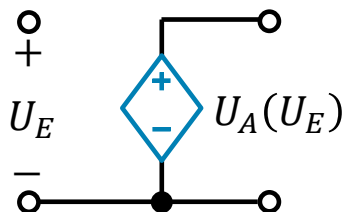
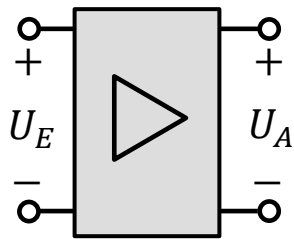
$$i_2 = f(i_1)$$

Gesteuerte Quellen – Beispiel VCVS



- Verstärker als spannungsgesteuerte Spannungsquelle $U_A = f(U_E)$.
- Nichtlineare Übertragungskennlinie $U_A = f(U_E) = U_{max} \tanh(kU_E)$

Gesteuerte Quellen – Beispiel VCVS



Linearisierung VCVS

Linearisierung der Schaltung in einem Arbeitspunkt von $U_A \approx 0V$.

Funktion, die dieses Zweitor realisiert:

$$U_A = f(U_E) = U_{A,max} \tanh(kU_E)$$

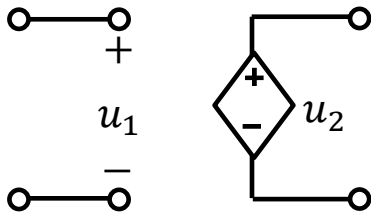
Differenzieren und Einsetzen des Arbeitspunkts:

$$\begin{aligned} u_A &= \left. \frac{\partial}{\partial U_E} (U_{A,max} \tanh(kU_E)) \right|_{U_E = 0} \cdot u_E = U_{A,max} \cdot k \cdot u_E \\ &= A_v \cdot u_E \\ \Rightarrow A_v &= U_{A,max} \cdot k \end{aligned}$$

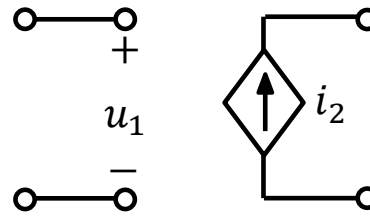
A_v : Spannungsverstärkung

⇒ Schaltung verhält sich für kleine Auslenkungen aus dem Arbeitspunkt wie ein linearer Verstärker.

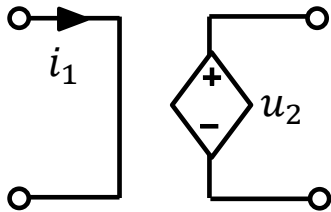
Linearisierte gesteuerte Quellen



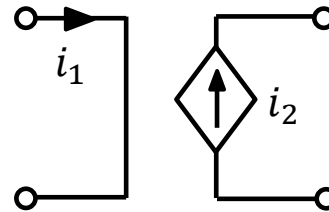
$$u_2 = \left. \frac{\partial f(U_1)}{\partial U_1} \right|_{AP} \cdot u_1$$



$$i_2 = \left. \frac{\partial f(U_1)}{\partial U_1} \right|_{AP} \cdot u_1$$



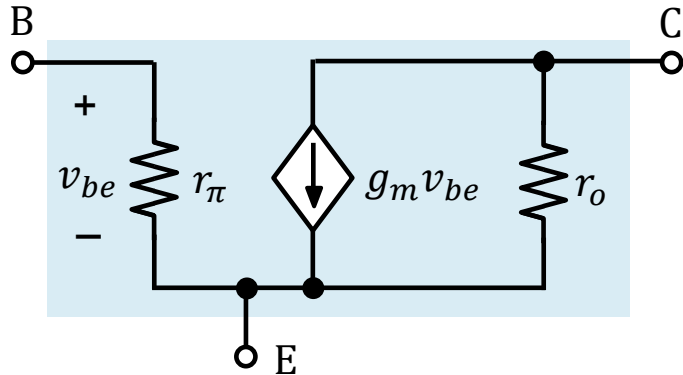
$$u_2 = \left. \frac{\partial f(I_1)}{\partial I_1} \right|_{AP} \cdot i_1$$



$$i_2 = \left. \frac{\partial f(I_1)}{\partial I_1} \right|_{AP} \cdot i_1$$

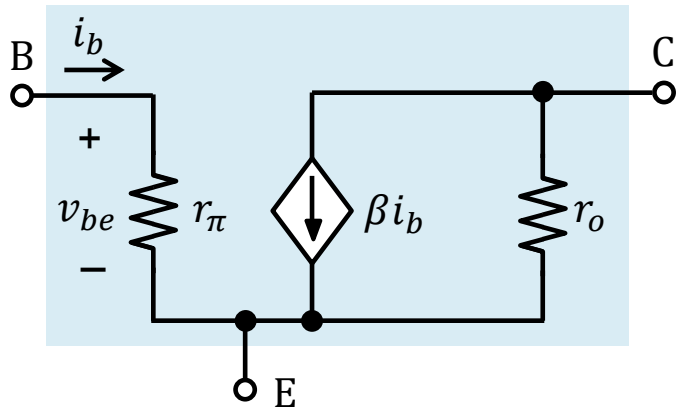
Gesteuerte Quellen

Beispiel: Kleinsignalersatzschaltbild des BJTs in zwei alternativen Darstellungen

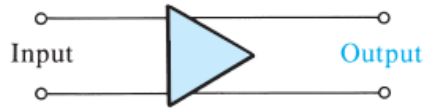


Transkonduktanz-Verstärker, repräsentiert durch

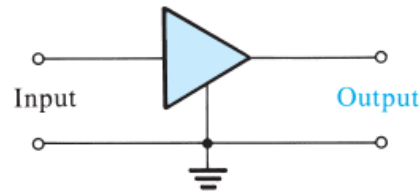
- Eingangswiderstand zwischen B und E (r_π)
- Kurzschluss-Transkonduktanz g_m
- Ausgangswiderstand r_o



Beispiel: Verstärker

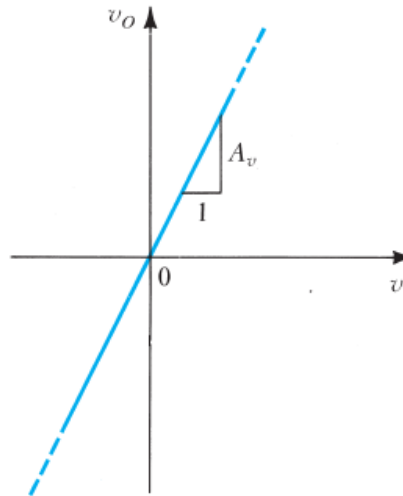
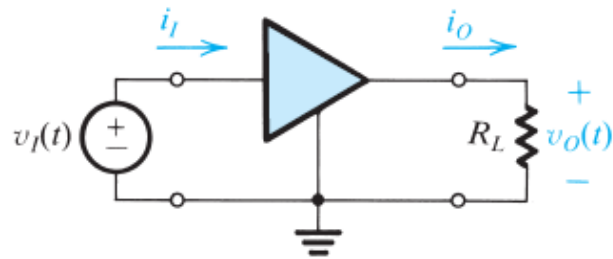


Schaltsymbol eines Verstärkers



Verstärker mit gemeinsamen Anschluss zwischen Eingang und Ausgang

Spannungsverstärker

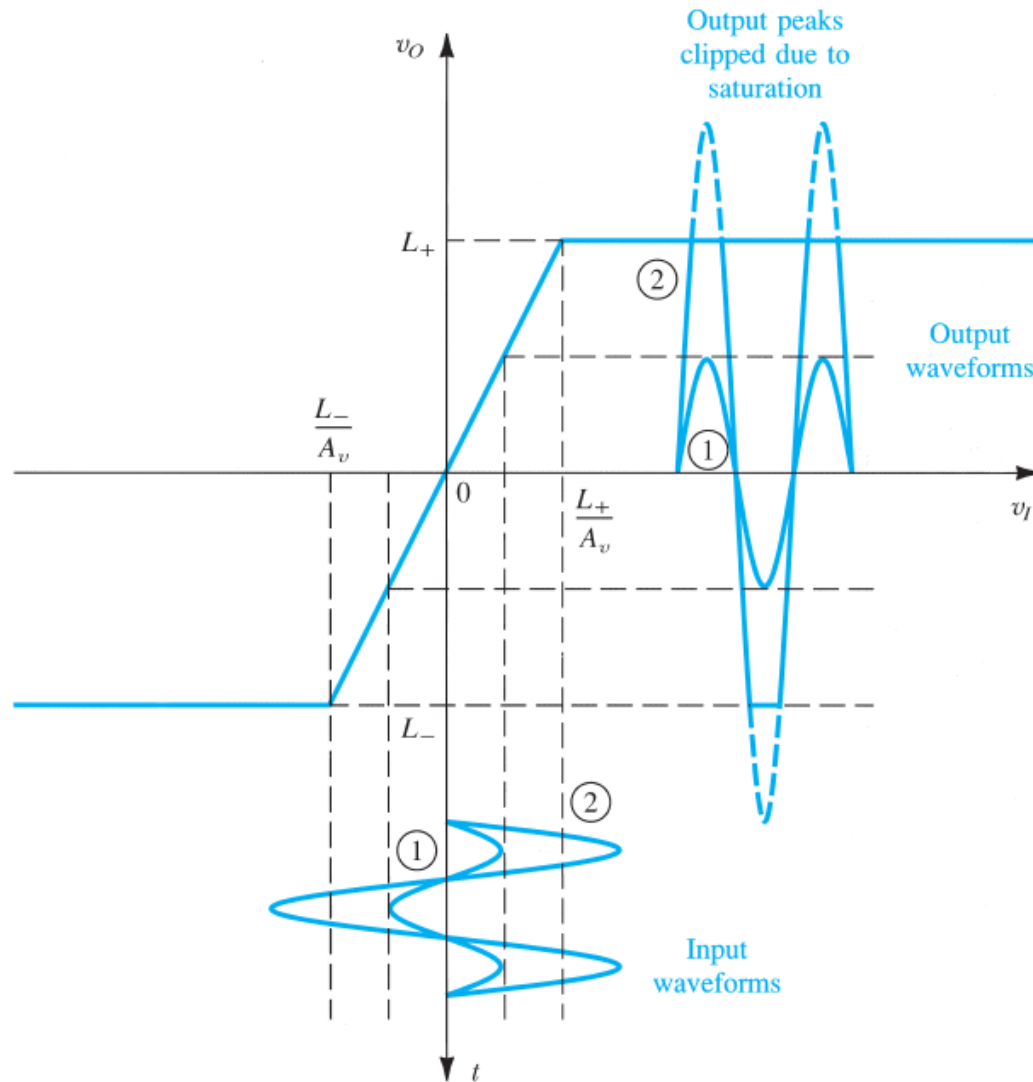


Spannungsverstärkung

$$A_v = \frac{v_O}{v_I}$$

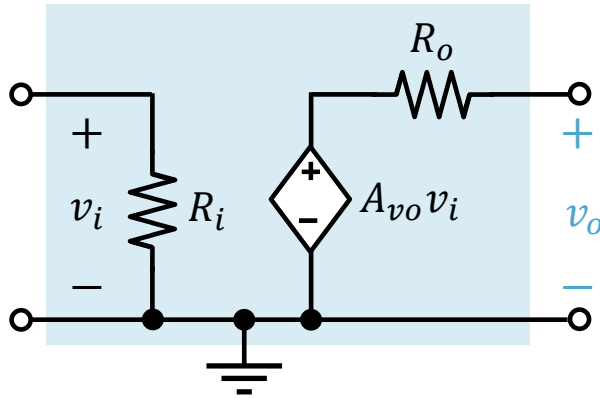
Übertragungseigenschaften eines linearen Spannungsverstärkers mit Spannungsverstärkung A_v

Beispiel: Verstärker

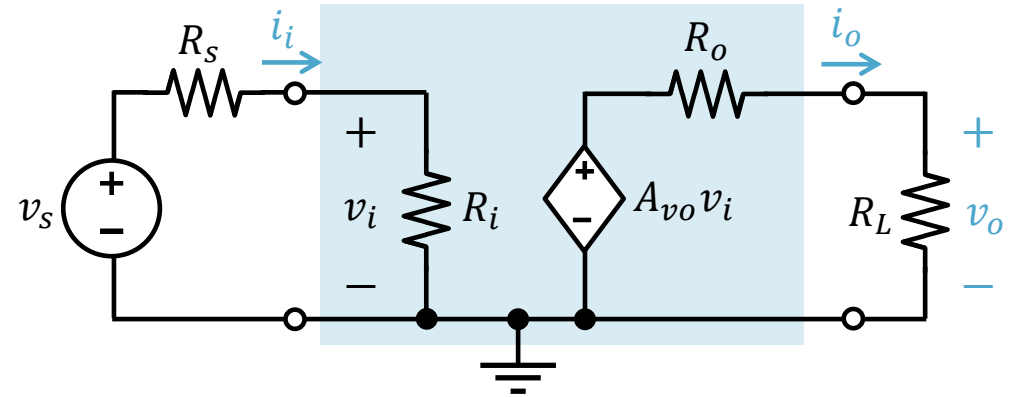


Beispiel für gesteuerte Quelle: Spannungsverstärker

Ersatzschaltbild



Spannungsverstärker mit Eingangsquelle und Lastwiderstand



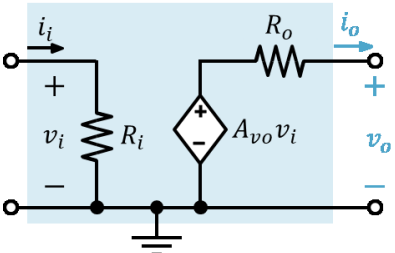
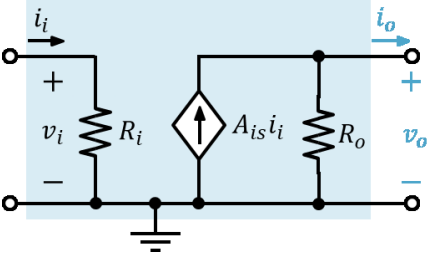
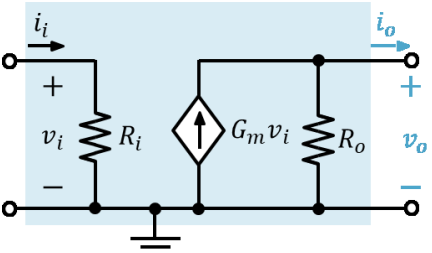
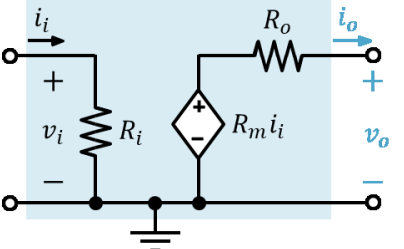
$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$v_o = A_{vo}v_i \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

Spannungsverstärkung

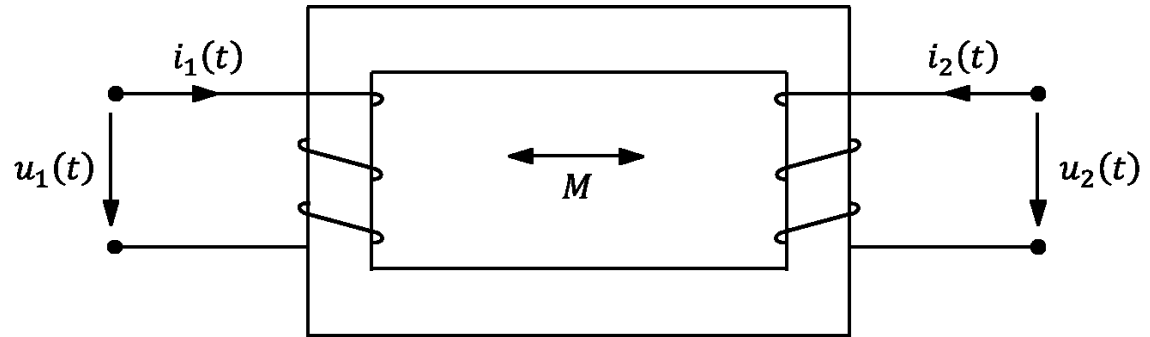
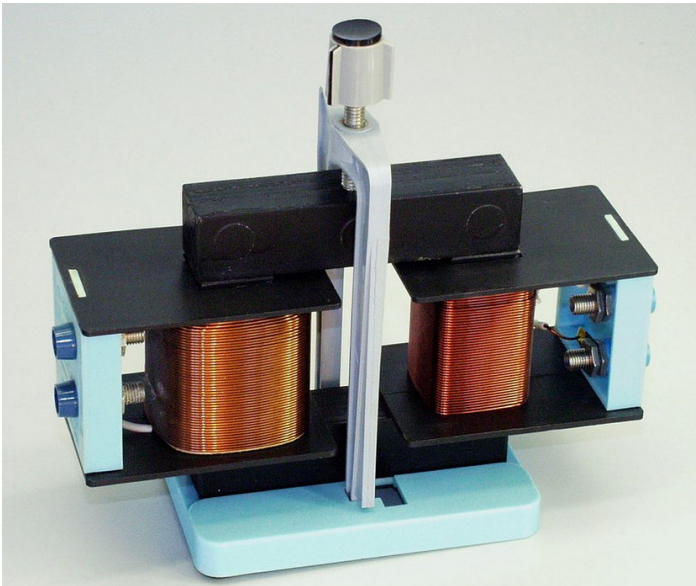
$$\frac{v_o}{v_s} = A_{vo} \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

Vier Verstärkertypen

Verstärkertyp	Ersatzschaltbild	Verstärkungsparameter	Ideale Eigenschaften
Spannungs- verstärker		Leerlaufspannungsverstärkung $A_{vo} \equiv \left. \frac{v_o}{v_i} \right _{i_o=0} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{V}} \right]$	$R_i = \infty$ $R_o = 0$
Strom- verstärker		Kurzschlussstromverstärkung $A_{is} \equiv \left. \frac{i_o}{i_i} \right _{v_o=0} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{A}} \right]$	$R_i = 0$ $R_o = \infty$
Transkonduktanz- Verstärker		Kurzschluss-Transkonduktanz $G_m \equiv \left. \frac{i_o}{v_i} \right _{v_o=0} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{V}} \right]$	$R_i = \infty$ $R_o = \infty$
Transresistenz- verstärker		Leerlauf-Transresistanz $R_m \equiv \left. \frac{v_o}{i_i} \right _{i_o=0} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{A}} \right]$	$R_i = 0$ $R_o = 0$

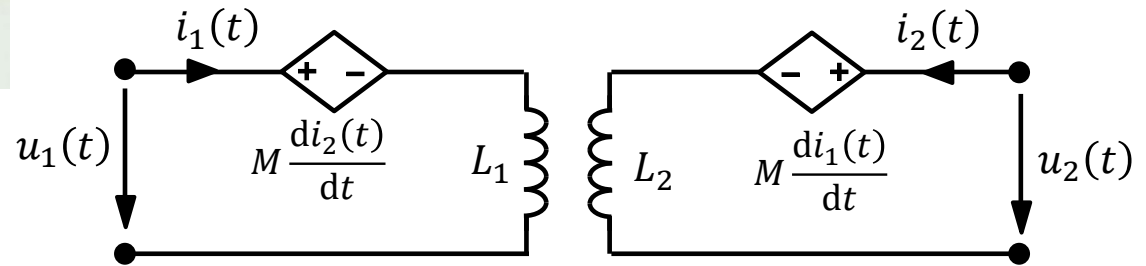
Gesteuerte Quellen mit zeitabgeleiteter Steuerung

Beispiel: Gekoppelte verlustlose Spulen, verlustloser Transformator



Annahmen: Ohmsche Verluste vernachlässigbar, niedrige Frequenzen

Ersatzschaltbild



Gleichungen im Zeitbereich:

$$u_1(t) = L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + M \cdot \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$u_2(t) = M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt}$$

Gleichungen bei Anwendung der KWR:

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2$$

$$U_2 = j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2$$

Gesteuerte Quellen mit zeitabgeleiteter Steuerung

Bei allen vier Arten der gesteuerten Quellen kann eine nach der Zeit abgeleitete Größe (Spannung oder Strom) steuern.

Um anzuzeigen, dass die steuernde Größe abgeleitet wird: Index “ d ” bei den konstanten Faktoren.

VCVS:

$$v_{OUT}(t) = \mu_d \cdot \frac{dv_{IN}(t)}{dt}$$

CCVS:

$$v_{OUT}(t) = M \cdot \frac{di_{IN}(t)}{dt}$$



M - Mutual inductance (Beispiel Trafo)

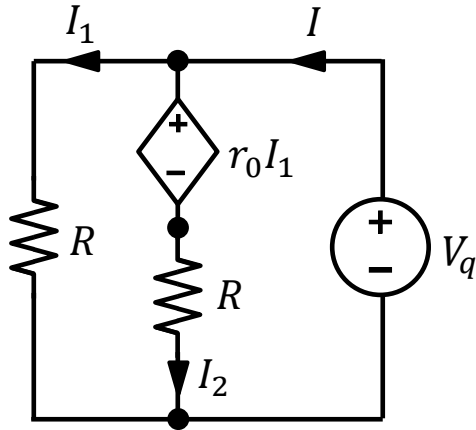
VCCS:

$$i_{OUT}(t) = g_d \cdot \frac{dv_{IN}(t)}{dt}$$

CCCS:

$$i_{OUT}(t) = \alpha_d \cdot \frac{di_{IN}(t)}{dt}$$

Superposition bei gesteuerter Quelle



Mit Kirchhoffscher Knotengleichung,
 $V_q = r_0 I_1 + R I_2$ und $I_1 = \frac{1}{R} V_q$ folgt

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V_q}{R} + \frac{1}{R} \left(V_q - \frac{r_0}{R} V_q \right) = \frac{1}{R} \left(2 - \frac{r_0}{R} \right) V_q$$

Superpositionsregel **falsch** angewendet ergibt:

$$r_0 I_1 = 0, V_q \neq 0$$

$$r_0 I_1 \neq 0, V_q = 0$$

$$I = \frac{2}{R} V_q + 0$$

Falsches Ergebnis!

Korrekte Berücksichtigung einer gesteuerten Quelle mit dem Superpositionsprinzip:

- 1) Zunächst Ersetzen der gesteuerten Quelle durch feste Quelle: $r_0 I_1 \rightarrow V_1$
- 2) Berechnung von I und steuernder Variable I_1 per Superposition

$$I = \frac{2}{R} V_q - \frac{1}{R} V_1, \quad I_1 = \frac{1}{R} V_q + 0$$

- 3) Nachträgliche Berücksichtigung der gesteuerten Quelle ($V_1 = r_0 I_1$);
 Einsetzen des Ergebnisses für I_1 , Einsetzen in das Ergebnis für I

$$I = \frac{2}{R} V_q - \frac{1}{R} r_0 I_1 = \frac{2}{R} V_q - \frac{r_0}{R} \frac{V_q}{R} = \frac{1}{R} \left(2 - \frac{r_0}{R} \right) V_q$$