Schaltungstechnik 1

Kirchhoff-Gesetze

Anwendbarkeit

Konzentriertheitshypothese muss erfüllt sein:
$d << \lambda = \frac{c}{f}$
d: Größe der Schaltung
λ: Wellenlänge

Knotenregel (KCL)

Für jeden Knoten gilt:
Die Summe aller Ströme ist Null.
$\sum\limits_{Knoten} i_j(t) = 0$
(herausfließende Ströme positiv)

Anzahl linear unabhängiger Knotengleichungen: **(n-1)**
n: Anzahl der Knoten

KCL in Matrixform: $\mathbf{A} \cdot \underline{i} = \underline{0}$

Maschenregel (KVL)

Für jede Masche gilt:
Die Summe der Teilspannungen ist Null.
$\sum\limits_{Umlauf} u_j(t) = 0$
(Spannungen in Umlaufrichtung positiv)

Anzahl linear unabhängiger Schleifengleichungen: **b-(n-1)**
b: Anzahl der Zweige
n: Anzahl der Knoten

KVL in Matrixform: $\underline{u} - \mathbf{A}^T \cdot \underline{u_k} = \underline{0} \quad (\mathbf{M} = \mathbf{A}^T)$

Resistive Eintore

Darstellungsformen

Implizit:	$f_F(u,i) = 0$
Explizit:	$u = r(i), i = g(u)$
Parametrisiert:	$u = u(\lambda), i = i(\lambda)$

Eigenschaften

F **ist...**	**Kennlinie von** F**...**
- stromgesteuert	$\exists$ Darstellung $u = r(i)$
- spannungsgesteuert	$\exists$ Darstellung $i = g(u)$
- ungepolt	... ist punktsymmetrisch zu (0/0)
- passiv	... verläuft nur im I. oder III. Quadr.
- aktiv	... ist nicht passiv
- verlustlos	... liegt nur auf den Achsen
- quellenfrei	... geht durch den Ursprung
- streng linear	... ist Ursprungsgerade, Ursprung oder ganze u-i-Ebene
- linear	... ist eine beliebige Gerade
- stückweise linear	... besteht aus Geradenstücken

Umpolung

Punktspiegelung der Kennline am Ursprung
$(u,i) \in F \Leftrightarrow (-u,-i) \in \overline{F}$

Dualität

Für $R_d = 1\Omega$: Spiegelung an der Winkelhalbierenden.
$(u,i) \in F \Leftrightarrow (R_d i, \frac{u}{R_d}) \in F^d$

Widerstände

$u = R \cdot i \quad R = \frac{1}{G} \quad R_1||R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ (Parallel)

Reihenschaltung:	$R_{gesamt} = R_1 + ... + R_i$
Parallelschaltung:	$\frac{1}{R_{gesamt}} = \frac{1}{R_1} + ... + \frac{1}{R_i}$

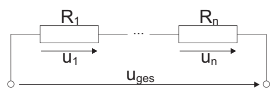
Leitwerte

$i = G \cdot u \quad G = \frac{1}{R} \quad G_1||G_2 = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}$ (Seriell)

Reihenschaltung:	$\frac{1}{G_{gesamt}} = \frac{1}{G_1} + ... + \frac{1}{G_i}$
Parallelschaltung:	$G_{gesamt} = G_1 + ... + G_i$

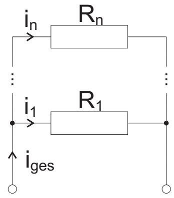
Spannungsteiler / Stromteiler

Spannungsteiler



$$u_i = u_{ges} \cdot \frac{R_i}{R_{ges}} = u_{ges} \cdot \frac{G_{ges}}{G_i}$$
$$R_{ges} = R_1 + ... + R_n$$
$$G_{1+2} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}$$

Stromteiler

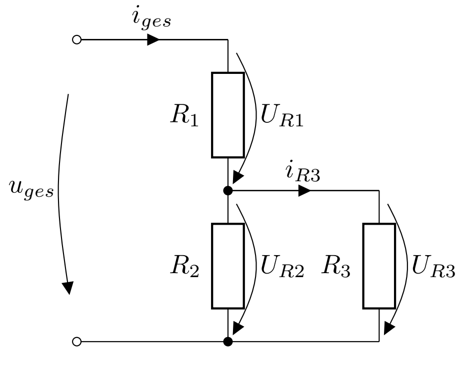


$$i_i = i_{ges} \cdot \frac{R_{ges}}{R_i} = i_{ges} \cdot \frac{G_i}{G_{ges}}$$
$$G_{ges} = G_1 + ... + G_n$$
$$R_{1+2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

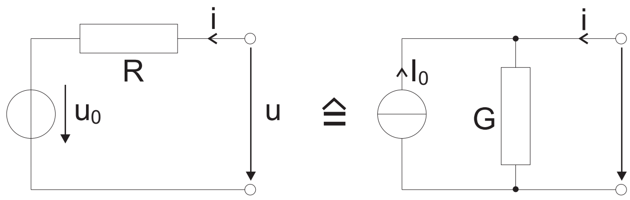
$u_{ges} = R_{ges} i_{ges}$
$R_{ges} = R_2 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

$u_{R1} = \frac{1}{1 + \frac{R_2 R_3}{R_1(R_2+R_3)}} u_{ges}$
$u_{R2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1(R_2+R_3)}{R_2 R_3}} u_{ges}$
$u_{R3} = u_{R2}$

$i_{R1} = i_{ges}$
$i_{R2} = \frac{R_3}{(R_2+R_3)} i_{ges}$
$i_{R3} = \frac{R_2}{(R_2+R_3)} i_{ges}$



Quellwandlung linearer Quellen

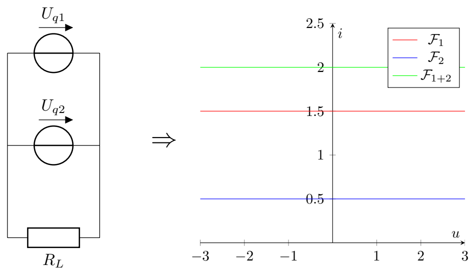


Wichtig: Pfeilrichtung I_0
Für jede lineare Quelle gilt:
$u = R_i \cdot i + U_0$ bzw. $i = G_i \cdot u - I_0$

Kennlinienbestimmung von verschalteten Bauteilen

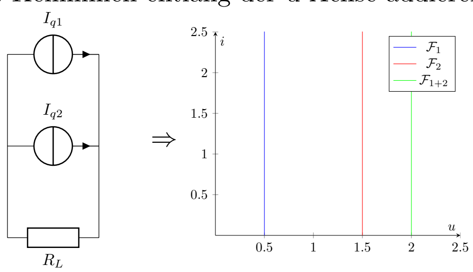
Parallel

Die Spannung ist an jedem Bauteil gleich. Die Ströme werden nach der Knotenregel addiert.
Grafisch: Kennlinien entlang der i-Achse addieren.



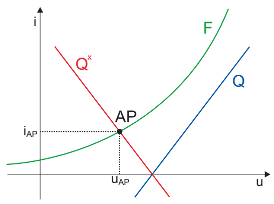
Seriell

Der Strom ist in jedem Bauteil gleich. Die Spannungen werden nach der Maschenregel addiert.
Grafisch: Kennlinien entlang der u-Achse addieren.



Arbeitspunktbestimmung

Q: Quelleneintor
Q^x: Quelleneintor gespiegelt an der u-Achse
F: Lasteintor



Rechnerisch: $i_Q = -i_F$

Graphisch: $AP = F \cap Q^x$

Linearisierung im Arbeitspunkt

z.B. Leitwertsbeschreibung:

$$\Delta i_F = \left.\frac{\partial i_F}{\partial u_F}\right|_{AP} \cdot \Delta u_F$$

$$(i_F = I_{AP} + \Delta i_F; \quad u_F = U_{AP} + \Delta u_F)$$

$$i_{F,lin} = \left.\frac{\partial i_F}{\partial u_F}\right|_{AP} \cdot (u_F - U_{AP}) + I_{AP}$$

$$i_{F,lin} = \underbrace{\left.\frac{\partial i_F}{\partial u_F}\right|_{AP}}_{g} \cdot u_F \underbrace{- \left.\frac{\partial i_F}{\partial u_F}\right|_{AP} \cdot U_{AP} + I_{AP}}_{I_{0,AP}}$$

Ersatzschaltbilder

Zuerst alle Bauteile im Arbeitspunkt linearisieren. Erhalte $u_1 = U + \Delta u$

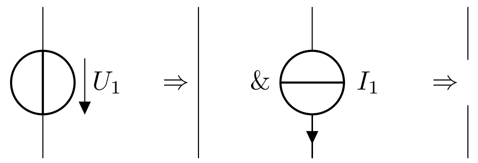
Großsignal

Alle Wechselquellen weglassen. $u_1 = U$

Kleinsignal

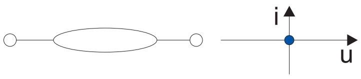
Alle Konstantquellen weglassen. $U_1 = \Delta u$

Ersetzen von Quellen



Bauelemente

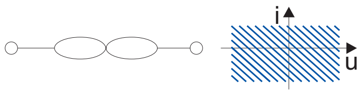
Nullator



$u = 0$
$i = 0$

Strom/spannungsgesteuert, ungepolt, passiv, verlustlos, quellenfrei, streng linear. Dual zu Nullator.

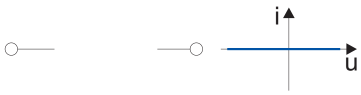
Norator



$u =$ beliebig
$i =$ beliebig

Ungepolt, aktiv, quellenfrei, streng linear. Dual zu Norator.

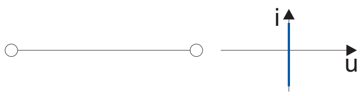
Leerlauf



$u =$ beliebig
$i = 0$

Spannungsgesteuert, ungepolt, passiv, verlustlos, quellenfrei, streng linear. Dual zu Kurzschluss.

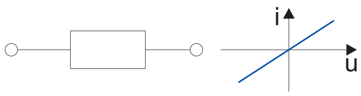
Kurzschluss



$u = 0$
$i =$ beliebig

Stromgesteuert, ungepolt, passiv, verlustlos, quellenfrei, streng linear. Dual zu Leerlauf.

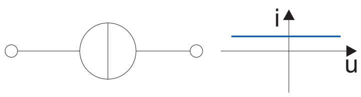
Ohmscher Widerstand



$u = R \cdot i$
$i = G \cdot u$

Spannungs-/Stromgesteuert ($R > 0/G > 0$), ungepolt, passiv für $R \geq 0$, aktiv für $R < 0$, quellenfrei, streng linear. Dual zu Widerstand mit $R_2 = \frac{1}{R_1}$.

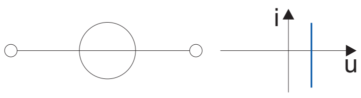
Ideale Stromquelle



$u =$ beliebig
$i = I_0$

Für $I > 0$: Spannungsgesteuert, gepolt, aktiv, nicht verlustlos, nicht quellenfrei, linear. Dual zu Spannungsquelle.

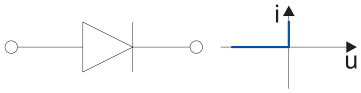
Ideale Spannungsquelle



$u = U_0$
$i = \text{beliebig}$

Für $U > 0$: Stromgesteuert, gepolt, aktiv, nicht verlustlos, nicht quellenfrei, linear. Dual zu Stromquelle.

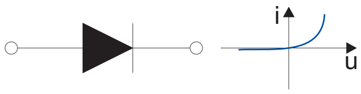
Ideale Diode



$u = 0$ für $i > 0$
$i = 0$ für $u < 0$

Nicht Strom/Spannungsgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei, stückweise linear. Dual zu umgepoltem selbst.

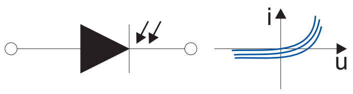
Reale Diode



$u = U_T \cdot ln(\frac{i}{I_S} + 1)$
$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$

Spannungs/Stromgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei, nicht linear.

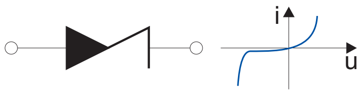
Photodiode



$u(t) = U_T \cdot ln(\frac{i(t)+i_L(t)}{I_S} + 1)$
$i(t) = I_S(e^{\frac{u(t)}{U_T}} - 1) - i_L(t)$

Nicht Strom/Spannungsgesteuert, gepolt, aktiv, nicht linear.

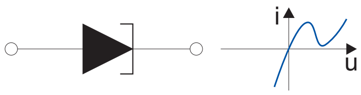
Zenerdiode



leitet bei $u < U_Z$

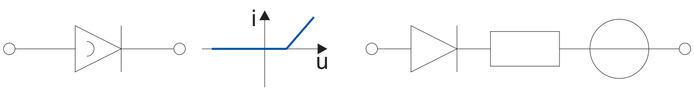
Strom/Spannungsgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei, nicht linear.

Tunneldiode



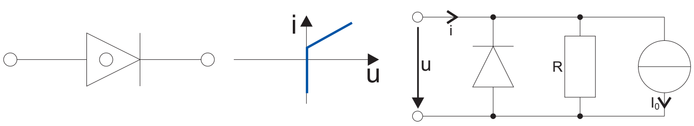
Spannungsgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei, nicht linear.

Konkaver Widerstand



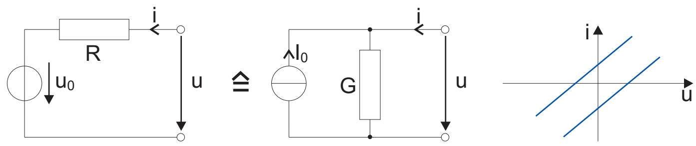
$i = 0$ für $u \leq U_0$
$i = G \cdot (u - U_0)$ für $u \geq U_0$
Spannungsgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei ($U_0 \geq 0$), stückweise linear. Dual zu konvexem Widerstand.

Konvexer Widerstand



$u = 0$ für $i \leq I_0$
$u = R \cdot (i - I_0)$ für $i \geq I_0$
Stromgesteuert, gepolt, passiv, quellenfrei ($I_0 \geq 0$), stückweise linear.

Lineare Quellen



$U_0 = I_0 \cdot R$; $I_0 = U_0 \cdot G$ Spannungs/Stromgesteuert ($R > 0/G > 0$), gepolt, aktiv ($I_0 > 0 \Leftrightarrow U_0 > 0$), linear.

Resistive Zweitore

Darstellungsformen

Implizit

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\mathbf{M} & \mathbf{N}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\underline{u} \\ \underline{i}\end{bmatrix}}_{Kern\begin{bmatrix}\mathbf{M} & \mathbf{N}\end{bmatrix}} = \underline{0}$$ quellenfrei

$$F = Kern\begin{bmatrix}\mathbf{M} & \mathbf{N}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\underline{u_0} \\ \underline{i_0}\end{bmatrix}$$ nicht quellenfrei

Explizit

Größe mit konstantem Nullwert (KS, LL, Nullator) kann keine Steuergröße sein. Größe mit beliebigem Wert (Norator) kann nicht gesteuert werden.

$$\begin{bmatrix}i_1 \\ i_2\end{bmatrix} = \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix}u_1 \\ u_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}g_{11}u_1 + g_{12}u_2 \\ g_{21}u_1 + g_{22}u_2\end{bmatrix}$$ Leitwertsbeschr.

$$\begin{bmatrix}u_1 \\ u_2\end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix}i_1 \\ i_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}r_{11}i_1 + r_{12}i_2 \\ r_{21}i_1 + r_{22}i_2\end{bmatrix}$$ Widerstandsbeschr.

$$\begin{bmatrix}u_1 \\ i_2\end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix}i_1 \\ u_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ h_{21}i_1 + h_{22}u_2\end{bmatrix}$$ hybride Beschr.

$$\begin{bmatrix}i_1 \\ u_2\end{bmatrix} = \mathbf{H'} \cdot \begin{bmatrix}u_1 \\ i_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}h'_{11}u_1 + h'_{12}i_2 \\ h'_{21}u_1 + h'_{22}i_2\end{bmatrix}$$ inverse hybride Beschr.

$$\begin{bmatrix}u_1 \\ i_1\end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix}u_2 \\ -i_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a_{11}u_2 - a_{12}i_2 \\ a_{21}u_2 - a_{22}i_2\end{bmatrix}$$ Kettenbeschr.

$$\begin{bmatrix}u_2 \\ i_2\end{bmatrix} = \mathbf{A'} \cdot \begin{bmatrix}u_1 \\ -i_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a'_{11}u_1 - a'_{12}i_1 \\ a'_{21}u_1 - a'_{22}i_1\end{bmatrix}$$ inverse Kettenbeschr.

Parametrisiert

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\underline{u} \\ \underline{i}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{U} \\ \mathbf{I}\end{bmatrix} \cdot \underline{c}}_{Bild\begin{bmatrix}\mathbf{U} \\ \mathbf{I}\end{bmatrix}} = \begin{bmatrix}\underline{u^{(1)}} & \underline{u^{(2)}} \\ \underline{i^{(1)}} & \underline{i^{(2)}}\end{bmatrix} \cdot \underline{c}$$ quellenfrei

$$F = Bild\begin{bmatrix}\mathbf{U} \\ \mathbf{I}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\underline{u_0} \\ \underline{i_0}\end{bmatrix}$$ nicht quellenfrei

mit $\frac{1}{V}\underline{u}$, $\frac{1}{A}\underline{i}, \underline{c} \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ und $\frac{1}{V}\mathbf{U}$, $\frac{1}{A}\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n\times n}$

Eigenschaften

F **ist...**	**wenn...**
- passiv	$\forall \begin{bmatrix}\underline{u}\\ \underline{i}\end{bmatrix} \in F : P = \underline{u}^T \cdot \underline{i} \geq 0$
- aktiv	$\exists \begin{bmatrix}\underline{u}\\ \underline{i}\end{bmatrix} \in F : P = \underline{u}^T \cdot \underline{i} < 0$
- verlustlos	$\forall \begin{bmatrix}\underline{u}\\ \underline{i}\end{bmatrix} \in F : \underline{u}^T \cdot \underline{i} = 0$ $\mathbf{U}^T\mathbf{I} + \mathbf{I}^T\mathbf{U} = \mathbf{0}$ $\mathbf{R} = -\mathbf{R}^T; \quad \mathbf{G} = -\mathbf{G}^T$
- umkehrbar Symmetrisch	$\mathbf{G} = \mathbf{P}\cdot\mathbf{G}\cdot\mathbf{P}; \; \mathbf{R} = \mathbf{P}\cdot\mathbf{R}\cdot\mathbf{P}; \; \mathbf{A} = \mathbf{A'}$ $\mathbf{P} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{bmatrix}$ „Zeilentausch + Spaltentausch“
- reziprok	$\mathbf{U}^T\mathbf{I} - \mathbf{I}^T\mathbf{U} = \mathbf{0}; \mathbf{G} = \mathbf{G}^T; \mathbf{R} = \mathbf{R}^T$ $det(\mathbf{A}) = det(\mathbf{A'}) = 1$ Netzwerk besteht nur aus R, C und L
Dualität	$\begin{bmatrix}\mathbf{U}\\ \mathbf{I}\end{bmatrix}^d = \begin{bmatrix}R_d\mathbf{I}\\ \frac{1}{R_d}\mathbf{U}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & R_d\mathbf{1}\\ \frac{1}{R_d}\mathbf{1} & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{U}\\ \mathbf{I}\end{bmatrix}$ $\mathbf{G}^d = \frac{1}{{R_d}^2}\mathbf{R}; \; \mathbf{R}^d = {R_d}^2\mathbf{G}$

Berechnung Beschreibungsmatrix

Bei quellenbehafteten Zweitoren:

z.B. $\underline{i} = \mathbf{G}\cdot\underline{u} + \underline{I_0}$

1) Setze interne Quellen zu Null (Spannungsquelle → KS; Stromquelle → LL) → bestimme Funktionen der Matrix (hier: $\underline{i} = \mathbf{G}\cdot\underline{u}$)

2) Setze Steuergrößen zu Null → bestimme Quellenvektor (hier: $\underline{i} = \underline{I_0}$ für $\underline{u} = 0$)).

Kurzschluss/Leerlauf-Methode

Jeweils eine steuernde Größe auf Null setzen (Spannungsquelle → KS; Stromquelle → LL).

G	$g_{11} = \frac{i_1}{u_1}\Big\vert_{u_2=0}$	$g_{12} = \frac{i_1}{u_2}\Big\vert_{u_1=0}$
	$g_{21} = \frac{i_2}{u_1}\Big\vert_{u_2=0}$	$g_{22} = \frac{i_2}{u_2}\Big\vert_{u_1=0}$
R	$r_{11} = \frac{u_1}{i_1}\Big\vert_{i_2=0}$	$r_{12} = \frac{u_1}{i_2}\Big\vert_{i_1=0}$
	$r_{21} = \frac{u_2}{i_1}\Big\vert_{i_2=0}$	$r_{22} = \frac{u_2}{i_2}\Big\vert_{i_1=0}$
H	$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}\Big\vert_{u_2=0}$	$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}\Big\vert_{i_1=0}$
	$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}\Big\vert_{u_2=0}$	$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}\Big\vert_{i_1=0}$
H'	$h'_{11} = \frac{i_1}{u_1}\Big\vert_{i_2=0}$	$h'_{12} = \frac{i_1}{i_2}\Big\vert_{u_1=0}$
	$h'_{21} = \frac{u_2}{u_1}\Big\vert_{i_2=0}$	$h'_{22} = \frac{u_2}{i_2}\Big\vert_{u_1=0}$
A	$a_{11} = \frac{u_1}{u_2}\Big\vert_{i_2=0}$	$a_{12} = -\frac{u_1}{i_2}\Big\vert_{u_2=0}$
	$a_{21} = \frac{i_1}{u_2}\Big\vert_{i_2=0}$	$a_{22} = -\frac{i_1}{i_2}\Big\vert_{u_2=0}$
A'	$a'_{11} = \frac{u_2}{u_1}\Big\vert_{i_1=0}$	$a'_{12} = -\frac{u_2}{i_1}\Big\vert_{u_1=0}$
	$a'_{21} = \frac{i_2}{u_1}\Big\vert_{i_1=0}$	$a'_{22} = -\frac{i_2}{i_1}\Big\vert_{u_1=0}$

Linearisierung im AP

Explizit

z.B. Leitwertsbeschreibung:
$i_{lin}(u) = G_{lin}(u - U_{AP}) + I_{AP}$,
$G_{lin} = \frac{\partial i}{\partial u}]$ mit $u = U_{AP}$ einsetzen.

$\underline{\Delta i} = \mathbf{J}\cdot\underline{\Delta u}$
$(\underline{i} = \underline{I} + \underline{\Delta i}; \quad \underline{u} = \underline{U} + \underline{\Delta u})$

$$\begin{bmatrix}i_1\\ i_2\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}\frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2}\\ \frac{\partial g_2}{\partial u_1} & \frac{\partial g_2}{\partial u_2}\end{bmatrix}\Bigg\vert_{AP}}_{\mathbf{J}(Jacobimatrix)} \cdot \begin{bmatrix}\Delta u_1\\ \Delta u_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}I_1\\ I_2\end{bmatrix}$$

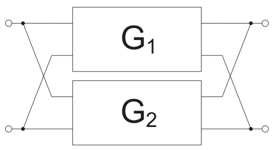
Implizit

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2}\\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2}\end{bmatrix}\Bigg\vert_{AP}}_{\mathbf{M}} \cdot \begin{bmatrix}\Delta u_1\\ \Delta u_2\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial i_1} & \frac{\partial f_1}{\partial i_2}\\ \frac{\partial f_2}{\partial i_1} & \frac{\partial f_2}{\partial i_2}\end{bmatrix}\Bigg\vert_{AP}}_{\mathbf{N}} \cdot \begin{bmatrix}\Delta i_1\\ \Delta i_2\end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

Zusammenschaltung von Zweitoren

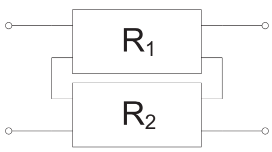
Es muss immer darauf geachtet werden, dass die Torbedingungen eingehalten werden (außer bei Kettenschaltung)!

Parallelschaltung



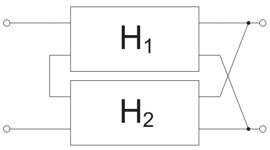
$\mathbf{G}_{ges} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2$

Serienschaltung



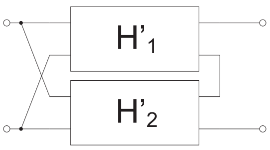
$\mathbf{R}_{ges} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2$

Hybride Verschaltung



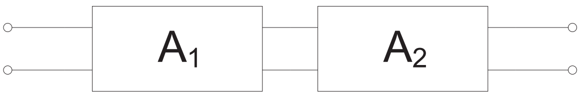
$$\mathbf{H}_{ges} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$$

Inverse hybride Verschaltung



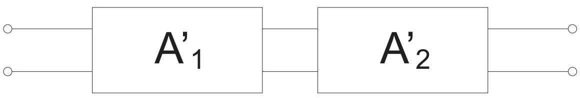
$$\mathbf{H'}_{ges} = \mathbf{H'}_1 + \mathbf{H'}_2$$

Kettenschaltung



$$\mathbf{A}_{ges} = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2$$

Inverse Kettenschaltung



$$\mathbf{A'}_{ges} = \mathbf{A'}_2 \cdot \mathbf{A'}_1$$

Umrechnung der Zweitor-Matrizen

Implizit → explizit

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M} & \mathbf{N}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\underline{u} \\ \underline{i}\end{bmatrix} = \underline{0} \quad |M^{-1}\cdot \qquad \begin{bmatrix}\mathbf{M} & \mathbf{N}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\underline{u} \\ \underline{i}\end{bmatrix} = \underline{0} \quad |N^{-1}\cdot$$

$$\underline{u} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} \cdot \underline{i} = \underline{0} \qquad \mathbf{N}^{-1}\mathbf{M} \cdot \underline{u} + \underline{i} = \underline{0}$$

$$\underline{u} = \underbrace{-\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{i} \qquad \underline{i} = \underbrace{-\mathbf{N}^{-1}\mathbf{M}}_{\mathbf{G}} \cdot \underline{u}$$

Explizit → implizit

$$\underline{u} = \mathbf{R} \cdot \underline{i} \qquad \underline{i} = \mathbf{G} \cdot \underline{u}$$

$$\underbrace{\mathbf{1}}_{\mathbf{M}} \cdot \underline{u} \underbrace{-\mathbf{R}}_{\mathbf{N}} \cdot \underline{i} = \underline{0} \qquad \underbrace{-\mathbf{G}}_{\mathbf{M}} \cdot \underline{u} + \underbrace{\mathbf{1}}_{\mathbf{N}} \cdot \underline{i} = \underline{0}$$

Parametrisiert → explizit

$$\begin{bmatrix}\underline{u} \\ \underline{i}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{U} \\ \mathbf{I}\end{bmatrix} \cdot \underline{c} \quad \Rightarrow \quad \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = \frac{\mathbf{U} \cdot \underline{c}}{\mathbf{I} \cdot \underline{c}}$$

$$\underline{i} = \mathbf{I} \cdot \underline{c} \quad |\mathbf{I}^{-1}\cdot \qquad \underline{u} = \mathbf{U} \cdot \underline{c} \quad |\mathbf{U}^{-1}\cdot$$

$$\Rightarrow \mathbf{I}^{-1} \cdot \underline{i} = \underline{c} \qquad \Rightarrow \mathbf{U}^{-1} \cdot \underline{u} = \underline{c}$$

$$\Rightarrow \underline{u} = \underbrace{\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^{-1}}_{R} \cdot \underline{i} \qquad \Rightarrow \underline{i} = \underbrace{\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}^{-1}}_{G} \cdot \underline{u}$$

Explizit → parametrisiert

$$\underline{u} = \mathbf{R} \cdot \underline{i} \qquad \underline{i} = \mathbf{G} \cdot \underline{u}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{1} \qquad \mathbf{U} = \mathbf{1}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{G}$$

Implizit → parametrisiert

$$\mathbf{U} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{1} \quad \text{oder} \quad \mathbf{U} = \mathbf{1}; \quad \mathbf{I} = -\mathbf{N}^{-1}\mathbf{M}$$

Parametrisiert → implizit

$$\mathbf{M} = -\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}^{-1}; \quad \mathbf{N} = \mathbf{1} \quad \text{oder} \quad \mathbf{M} = \mathbf{1}; \quad \mathbf{N} = -\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^{-1}$$

Explizit → explizit

$$\underline{i} = \mathbf{G} \cdot \underline{u} + \underline{I}_0 \quad |\mathbf{R}\cdot \qquad \underline{u} = \mathbf{R} \cdot \underline{i} + \underline{U}_0 \quad |\mathbf{G}\cdot$$

$$\mathbf{R} \cdot \underline{i} = \underbrace{\mathbf{R} \cdot \mathbf{G}}_{\mathbf{1}} \cdot \underline{u} + \mathbf{R} \cdot \underline{I}_0 \qquad \mathbf{G} \cdot \underline{u} = \underbrace{\mathbf{G} \cdot \mathbf{R}}_{\mathbf{1}} \cdot \underline{i} + \mathbf{G} \cdot \underline{U}_0$$

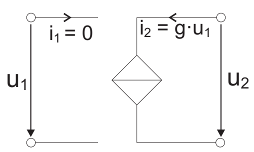
$$\underline{u} = \mathbf{R} \cdot \underline{i} - \mathbf{R} \cdot \underline{I}_0 \qquad \underline{i} = \mathbf{G} \cdot \underline{u} - \mathbf{G} \cdot \underline{U}_0$$

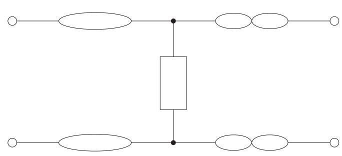
	R	**G**	**H**
R	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{det(\mathbf{G})} \begin{bmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}} \begin{bmatrix} det(\mathbf{H}) & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{bmatrix}$
G	$\frac{1}{det(\mathbf{R})} \begin{bmatrix} r_{22} & -r_{12} \\ -r_{21} & r_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} & det(\mathbf{H}) \end{bmatrix}$
H	$\frac{1}{r_{22}} \begin{bmatrix} det(\mathbf{R}) & r_{12} \\ -r_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -g_{12} \\ g_{21} & det(\mathbf{G}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$
H'	$\frac{1}{r_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -r_{12} \\ r_{21} & det(\mathbf{R}) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{22}} \begin{bmatrix} det(\mathbf{G}) & g_{12} \\ -g_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{det(\mathbf{H})} \begin{bmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$
A	$\frac{1}{r_{21}} \begin{bmatrix} r_{11} & det(\mathbf{R}) \\ 1 & r_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{21}} \begin{bmatrix} -g_{22} & -1 \\ -det(\mathbf{G}) & -g_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{21}} \begin{bmatrix} -det(\mathbf{H}) & -h_{11} \\ -h_{22} & -1 \end{bmatrix}$
A'	$\frac{1}{r_{12}} \begin{bmatrix} r_{22} & det(\mathbf{R}) \\ 1 & r_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{12}} \begin{bmatrix} -g_{11} & -1 \\ -det(\mathbf{G}) & -g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{12}} \begin{bmatrix} 1 & h_{11} \\ h_{22} & det(\mathbf{H}) \end{bmatrix}$

	H'	**A**	**A'**
R	$\frac{1}{h'_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -h'_{12} \\ h'_{21} & det(\mathbf{H}') \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{21}} \begin{bmatrix} a_{11} & det(\mathbf{A}) \\ 1 & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{21}} \begin{bmatrix} a'_{22} & 1 \\ det(\mathbf{A'}) & a'_{11} \end{bmatrix}$
G	$\frac{1}{h'_{22}} \begin{bmatrix} det(\mathbf{H}') & h'_{12} \\ -h'_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{12}} \begin{bmatrix} a_{22} & -det(\mathbf{A}) \\ -1 & a_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{12}} \begin{bmatrix} a'_{11} & -1 \\ -det(\mathbf{A}') & a'_{22} \end{bmatrix}$
H	$\frac{1}{det(\mathbf{H}')} \begin{bmatrix} h'_{22} & -h'_{12} \\ -h'_{21} & h'_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{22}} \begin{bmatrix} a_{12} & det(\mathbf{A}) \\ -1 & a_{21} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{11}} \begin{bmatrix} a'_{12} & 1 \\ -det(\mathbf{A}') & a'_{21} \end{bmatrix}$
H'	$\begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} \\ h'_{21} & h'_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{11}} \begin{bmatrix} a_{21} & -det(\mathbf{A}) \\ 1 & a_{12} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{22}} \begin{bmatrix} a'_{21} & -1 \\ det(\mathbf{A}') & a'_{12} \end{bmatrix}$
A	$\frac{1}{h'_{21}} \begin{bmatrix} 1 & h'_{22} \\ h'_{11} & det(\mathbf{H}') \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{det(\mathbf{A}')} \begin{bmatrix} a'_{22} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{11} \end{bmatrix}$
A'	$\frac{1}{h'_{12}} \begin{bmatrix} -det(\mathbf{H}') & -h'_{22} \\ -h'_{11} & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{det(\mathbf{A})} \begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix}$

Spezielle Zweitore

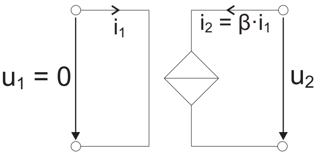
VCCS Spannungsgesteuerte Stromquelle





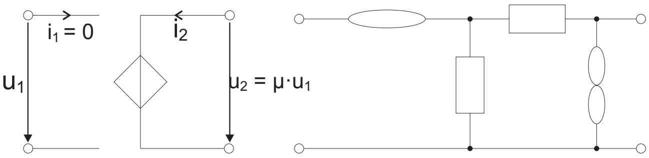
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -g & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

CCCS Stromggesteuerte Stromquelle



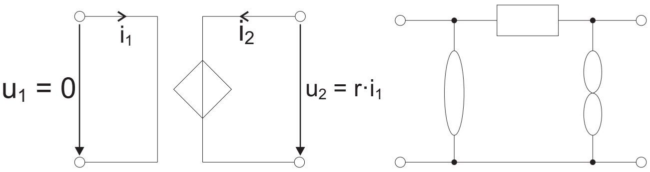
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\beta} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta & 0 \end{bmatrix}$$

VCVS Spannungsgesteurte Spannungsquelle



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H'} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \mu & 0 \end{bmatrix}$$

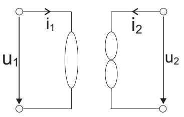
CCVS Stromgesteuerte Spannungsquelle



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -r & 0 \end{bmatrix}$$

Nullor

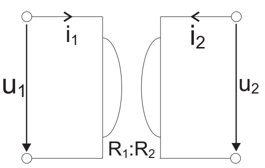
Quellenfrei, streng linear



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Gyrator

Dualwandler, Positiv-Immittanz-Inverter (PII)



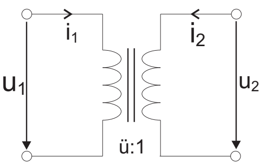
Verlustlos ($R_1 = R_2 = R_d$)
Pfeilrichtung $\to$ für R_d
$\mathbf{G} = -\mathbf{G}^T$
$\mathbf{R} = -\mathbf{R}^T$
$det(\mathbf{A}) = det(\mathbf{A}') = -1$
$F_{Gyr} = F^d$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_1} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -R_1 \\ R_2 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & R_1 \\ \frac{1}{R_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A'} = \begin{bmatrix} 0 & -R_2 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & R_1 \\ -R_2 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Idealer Übertrager

Positiv-Immittanz-Konverter (PIK)



Verlustlos
Reziprok
Umkehrbar für ü = ±1
$det(\mathbf{A}) = det(\mathbf{A}') = 1$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \ddot{u} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\ddot{u}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A'} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\ddot{u}} & 0 \\ 0 & \ddot{u} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & \ddot{u} \\ -\ddot{u} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H'} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\ddot{u}} \\ \frac{1}{\ddot{u}} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -\ddot{u} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \ddot{u} & 1 \end{bmatrix}$$

NIK

Negativ-Immittanz-Konverter (NIK)

Aktiv, antireziprok, für $|k| = 1$ symmetrisch

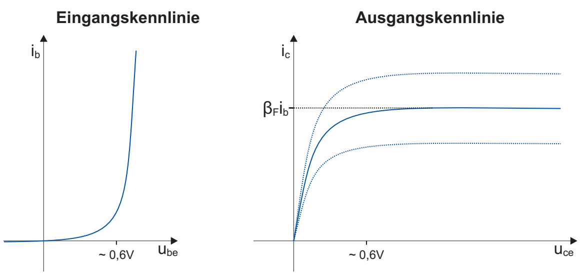
$k = 1$ F ist an der i_1-Achse gespiegelter Zweipol
$k = -1$ F ist an der u_1-Achse gespiegelter Zweipol

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A'} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{k} & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & -k \\ -k & 0 \end{bmatrix}$$

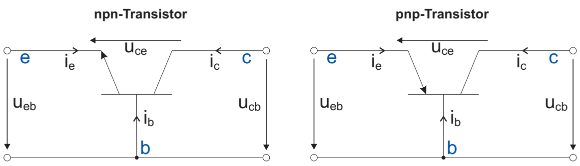
$$\mathbf{H'} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{k} \\ -\frac{1}{k} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & k \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & \frac{1}{k} \end{bmatrix}$$

Bipolar-Transistoren

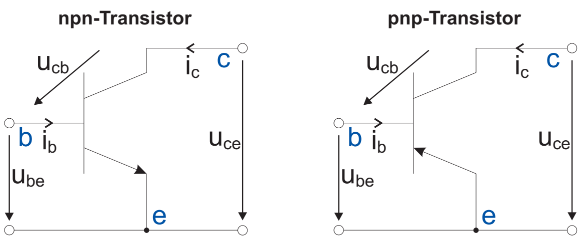
Kennlinien eines npn-Transistors



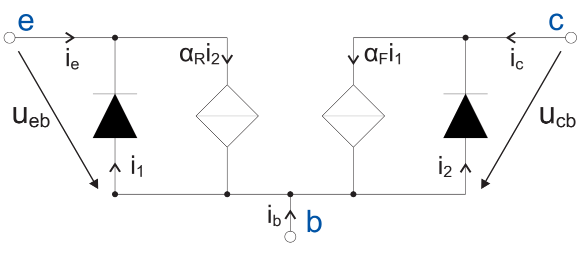
Basisschaltung



Emitterschaltung



Ebers-Moll-Modell (Basisschaltung, npn)



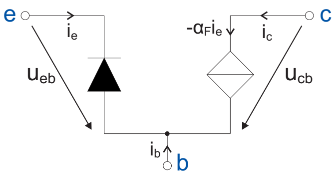
$$i_e = -I_{es}\cdot(e^{-\frac{u_{eb}}{U_T}}-1)+\alpha_R I_{cs}\cdot(e^{-\frac{u_{cb}}{U_T}}-1)$$

$$i_c = \alpha_F I_{es}\cdot(e^{-\frac{u_{eb}}{U_T}}-1)-I_{cs}\cdot(e^{-\frac{u_{cb}}{U_T}}-1)$$

Vereinfachung für Vorwärtsbetrieb (npn)

Bedingung für den Vorwärtsbetrieb: $u_{be}>0\wedge u_{cb}\geq 0$

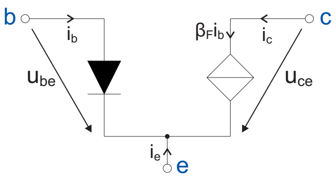
Basisschaltung



$$i_e = -I_{es}\cdot(e^{-\frac{u_{eb}}{U_T}}-1)$$

$$i_c = -\alpha_F i_e$$

Emitterschaltung



$$i_b = \overbrace{\underbrace{(1-\alpha_F)}_{\approx\frac{1}{\beta_F}}\cdot I_{es}}^{\approx I_S}\cdot(e^{\frac{u_{be}}{U_T}}-1)$$

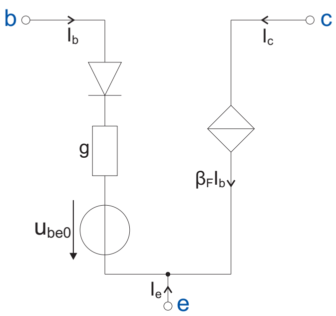
$$i_c = \beta_F i_b$$

$$i_c = \overbrace{\underbrace{\alpha_F}_{\approx 1}\cdot I_{es}}^{\approx\beta_F\cdot I_S}\cdot(e^{\frac{u_{be}}{U_T}}-1)$$

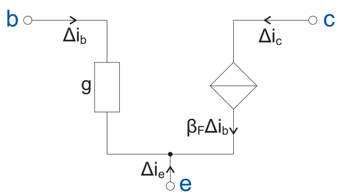
Linearisierung

(Emitterschaltung, Vorwärtsbetrieb, npn)

Großsignal-ESB:



Kleinsignal-ESB:



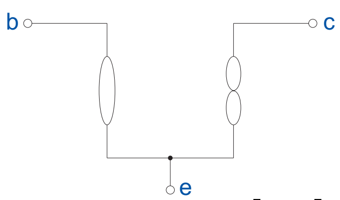
$\beta_F = \frac{i_c}{i_b} = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F}$

$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1+\beta_F}$

$g = \frac{\partial i_b}{\partial u_{be}}\Big|_{AP} \approx -\frac{I_e}{\beta_F\cdot U_T}$

$g \approx \frac{I_b}{U_T} = \frac{I_c}{\beta_F\cdot U_T}$

Wenn $\beta_F\to\infty$:

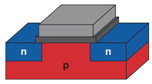


Dreipol Nullor $\mathbf{A} = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$.

Wie normaler Nullor.

Feldeffekt-Transistoren (FET)

nMOS



Guter Pull-Down
Source am niedrigeren Potential ($u_{DS}>0$)

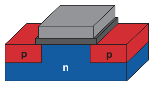
$i_G = 0A$

$$i_D = \begin{cases} 0 & u_{GS}<U_t(aus) \\ & \wedge\, u_{DS}\geq 0 \\ \beta\left(u_{GS}-U_t-\frac{u_{DS}}{2}\right)u_{DS} & u_{GS}>U_t \text{ (linear)} \\ & \wedge\, 0<u_{DS}<u_{GS}-U_t \\ \frac{\beta}{2}\left(u_{GS}-U_t\right)^2 & u_{GS}>U_t \text{ (Sättigung)} \\ & \wedge\, 0<u_{GS}-U_t<u_{DS} \end{cases}$$

Enhancement-Typ (selbssperrend): $U_t\approx 1V$
Depletion-Typ (selbstleitend): $U_t\approx -1V$

Kanallängenmodulation: $i_D' = i_D\cdot(1+\lambda\cdot u_{DS})$

pMOS



Guter Pull-Up
Source am höheren Potential ($u_{DS}<0$)

$i_G = 0A$

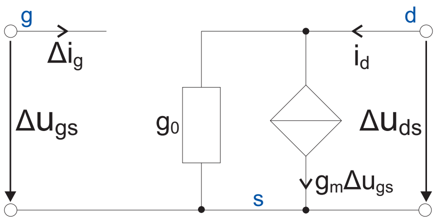
$$i_D = \begin{cases} 0 & u_{GS}>U_t(aus) \\ & \wedge\, u_{DS}\leq 0 \\ -\beta\left(u_{GS}-U_t-\frac{u_{DS}}{2}\right)u_{DS} & u_{GS}<U_t \text{ (linear)} \\ & \wedge\, 0>u_{DS}>u_{GS}-U_t \\ \frac{-\beta}{2}\left(u_{GS}-U_t\right)^2 & u_{GS}<U_t \text{ (Sättigung)} \\ & \wedge\, 0>u_{GS}-U_t>u_{DS} \end{cases}$$

Enhancement-Typ (selbstsperrend): $U_t\approx -1V$

Kanallängenmodulation: $i_D' = i_D\cdot(1-\lambda\cdot u_{DS})$

Kleinsignal-Ersatzschaltbilder (nMOS)

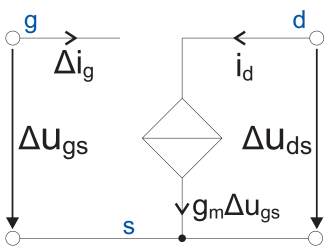
Linearer Bereich



$g_m = \frac{\partial i_d}{\partial u_{gs}}\Big|_{AP} = \beta\cdot U_{ds}$

$g_0 = \frac{\partial i_d}{\partial u_{ds}}\Big|_{AP} = \beta\cdot(U_{gs}-U_T-U_{ds})$

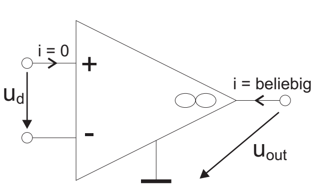
Sättigungsbereich

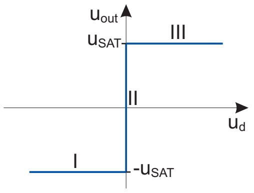


$g_m = \frac{\partial i_d}{\partial u_{gs}}\Big|_{AP}$

$g_m = \beta\cdot(U_{gs}-U_T)$

Operationsverstärker

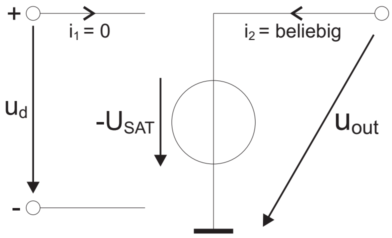




Operationsverstärker müssen immer über ihren invertierenden Eingang rückgekoppelt werden, da sich sonst eine Z-Kennlinie ergibt und der Arbeitspunkt somit nicht mehr eindeutig ist.

Ersatzschaltbilder

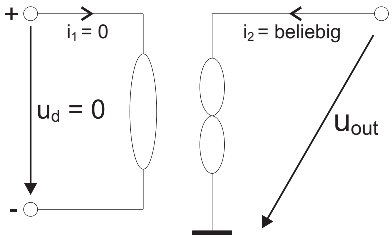
ESB I



$u_d < 0$

$u_{out} = -U_{SAT}$

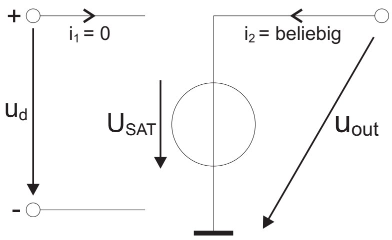
ESB II



$u_d = 0$

$|u_{out}| \leq |U_{SAT}|$

ESB III

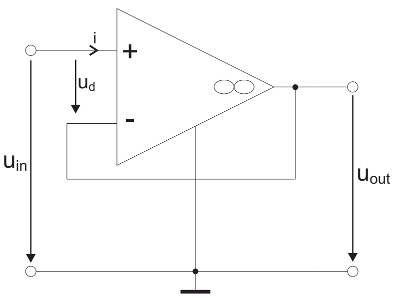


$u_d > 0$

$u_{out} = U_{SAT}$

OP-Schaltungen

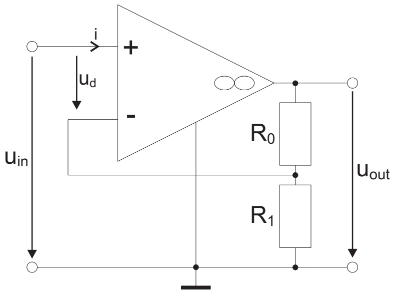
Spannungsfolger (Impedanzwandler)



$u_{out} = u_{in}$

$v_u = 1$

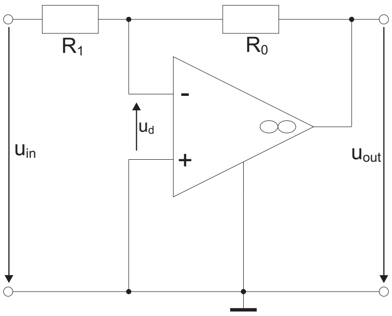
Nichtinvertierender Verstärker



$u_{out} = (1 + \frac{R_0}{R_1}) \cdot u_{in}$

$v_u = 1 + \frac{R_0}{R_1}$

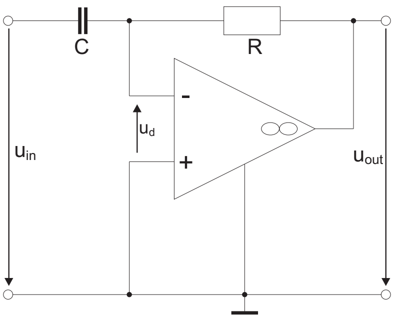
Invertierender Verstärker



$u_{out} = -\frac{R_0}{R_1} \cdot u_{in}$

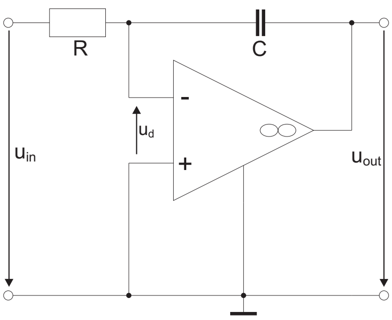
$v_u = \frac{R_0}{R_1}$

Differenzierer



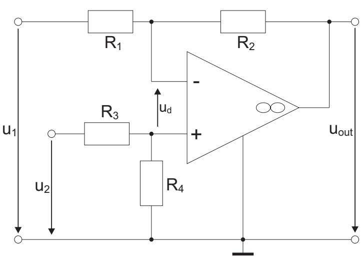
$u_{out} = -RC \cdot \dot{u}_{in}$

Integrierer



$$u_{out} = -u_c(t_0) - \frac{1}{RC} \cdot \int_{t_0}^{t_1} u_{in} dt$$

Differenzverstärker/Subtrahierer

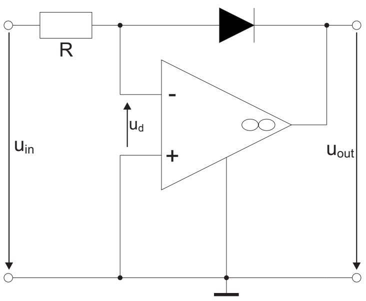


Bedingung:
$R_1 = R_3;\ \ R_2 = R_4$

$u_{out} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (u_2 - u_1)$

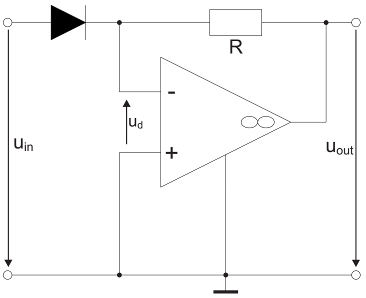
$u_{out} = \frac{R_4}{R_3} \cdot (u_2 - u_1)$

Logarithmierer



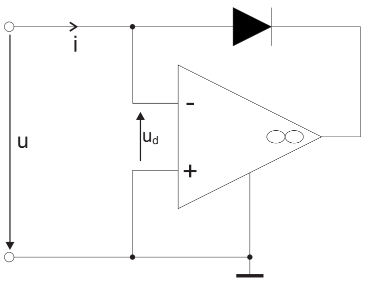
$$u_{out} = -U_T \cdot ln(\frac{u_{in}}{R \cdot I_S})$$

Exponentierer

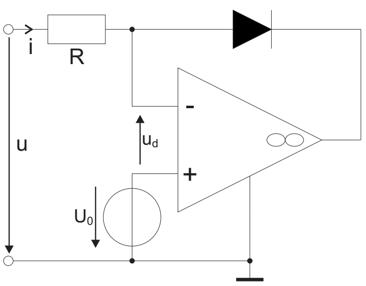


$$u_{out} = -R \cdot I_S \cdot e^{\frac{u_{in}}{U_T}}$$

Ideale Diode

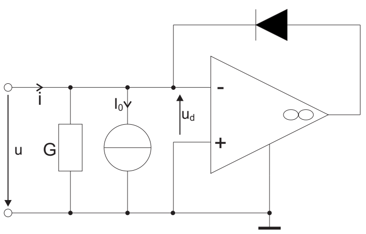


Konkaver Widerstand



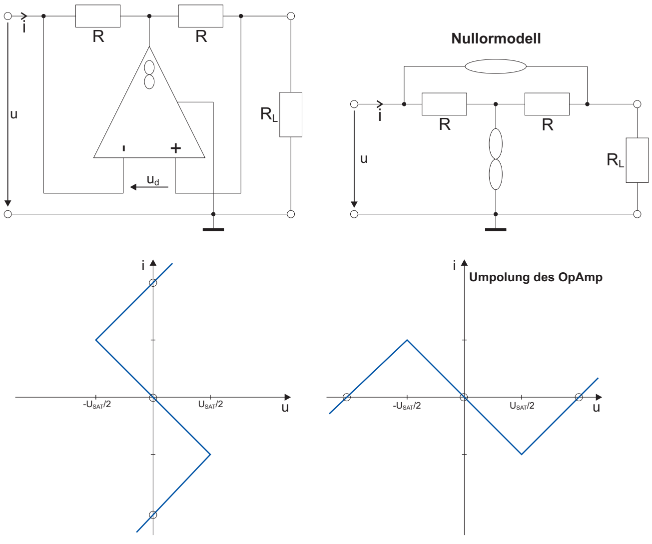
$$U_0 < U_{SAT}$$

Konvexer Widerstand



$$I_0 < G \cdot U_{SAT}$$

NIK



VCVS Voltage Controlled Voltage Source

$\mu \geq 1$	Nichtinvertierender Verstärker
$\mu < 0$	Spannungsfolger und invertierender Verstärker hintereinander
$0 < \mu < 1$	Spannungsfolger und zwei invertierende Verstärker hintereinander

CCVS Current Controlled Voltage Source

$r < 0$	Invertierender Verstärker mit $R_1 = 0\Omega$
$r > 0$	Zusätzlich invertierenden Verstärker mit $v_u = -1$ nachschalten

Gyrator

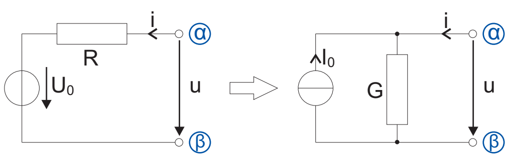
- Parallelschaltung zweier VCCS
- Serienschaltung zweier CCVS
- Kettenschaltung eines NIK ($k = -1$) mit einem NII

Knotenspannungsanalyse (KSA)

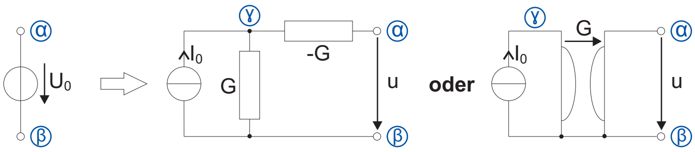
$\mathbf{Y}_k \cdot \underline{u}_k = \underline{i}_q$

1. Nichtspannungsgesteuerte Elemente ersetzen

Ideale Spannungsquelle

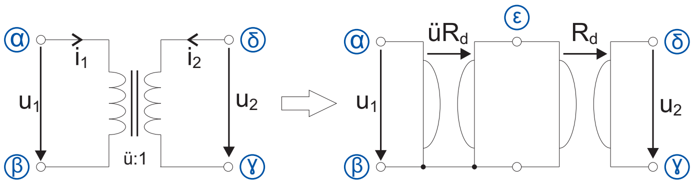


$I_0 = \frac{U_0}{R}$

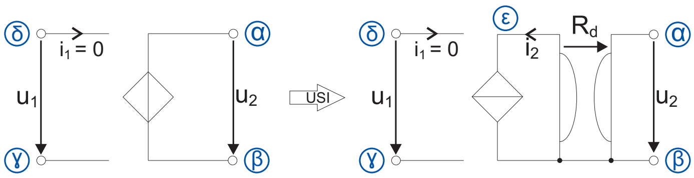


$I_0 = G \cdot U_0$

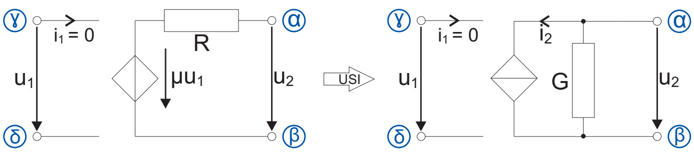
Idealer Übertrager



VCVS Voltage Controlled Voltage Source

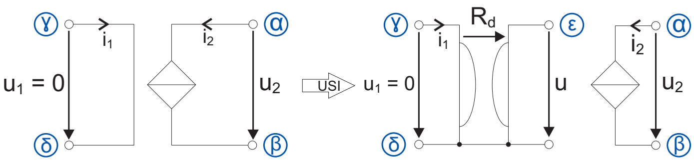


$u_2 = \mu \cdot u_1 \qquad i_2 = -\frac{\mu \cdot u_1}{R_D}$



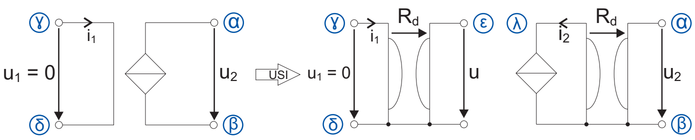
$i_2 = -G \cdot \mu \cdot u_1$

CCCS Current Controlled Current Source



$i_2 = \beta \cdot i_1 \qquad u = R_d \cdot i_1 \qquad i_2 = \frac{\beta \cdot u}{R_d}$

CCVS Current Controlled Voltage Source



$u_2 = \beta \cdot i_1 \qquad u = R_d \cdot i_1 \qquad i_2 = \frac{u}{R_d} \qquad u_2 = -R_d \cdot i_1$

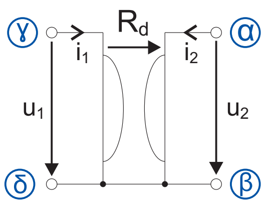
2. Knotenspannungsvektor U_k aufstellen

3. Knotenleitwertsmatrix Y_k aufstellen

Leitwert

$$\mathbf{Y}_k = \begin{array}{c} \\ \alpha \\ \beta \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & \alpha & \beta & \end{array} \\ \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & G & -G & \dots \\ \dots & -G & G & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \end{array}$$

Gyrator



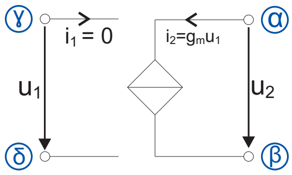
$$\mathbf{Y}_k = \begin{array}{c|cccc} & \gamma & \delta & \alpha & \beta \\ \hline \gamma & & & G & -G \\ \delta & & & -G & G \\ \alpha & -G & G & & \\ \beta & G & -G & & \end{array}$$

Wenn δ und β auf GND sind:

$$\mathbf{Y}_k = \begin{array}{c|cc} & \gamma & \alpha \\ \hline \gamma & 0 & G \\ \alpha & -G & 0 \end{array}$$

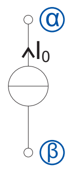
Pfeilrichtung wichtig. $i_1 = Gu_2$, $i_2 = -Gu_1$

VCCS Voltage Controlled Current Source



$$\mathbf{Y}_k = \begin{array}{c|cccc} & & \gamma & \delta & \\ \hline & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha & \dots & g_m & -g_m & \dots \\ \beta & \dots & -g_m & g_m & \dots \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

4. Quellvektor I_q aufstellen



$$\mathbf{Y}_k = \begin{array}{c} \\ \alpha \\ \beta \\ \\ \end{array} \begin{bmatrix} \dots \\ i_q \\ -i_q \\ \dots \end{bmatrix}$$

5. Reduzierte Knotenleitwertsmatrix Y_k

Nullator

In $\mathbf{Y}_k$ die entsprechenden Spalten addieren und eine davon streichen **UND** entsprechenden Eintrag im $\underline{u}_k$-Vektor streichen.
Falls mit Masse verbunden: Spalte und $\underline{u}_k$-Eintrag streichen.

Norator

In $\mathbf{Y}_k$ die entsprechenden Zeilen addieren und eine davon streichen **UND** entsprechenden Eintrag im $\underline{i}_q$-Vektor streichen.
Falls mit Masse verbunden: Zeile und $\underline{i}_q$-Eintrag streichen.

Sonstiges

Tellegenscher Satz

Der Spannungsvektor steht immer senkrecht zum Stromvektor ($\mathbf{AB}^T = \mathbf{0}$ bzw. $\mathbf{BA}^T = \mathbf{0}$).

Tableau-Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} \\ \mathbf{M} & \mathbf{N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \\ \underline{e} \end{bmatrix}$$

Superpositionsprinzip

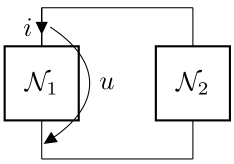
Gilt für unabhängige Quellen in linearem Netzwerk für u, i.

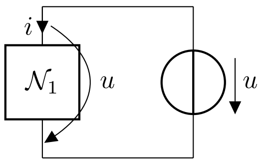
1) Jeweils alle Quellen bis auf eine auf Null setzen.

2) Gesuchte Größe u_{ai} berechnen.

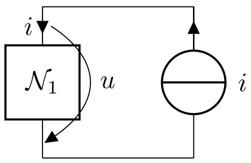
3) Resultierende Größe ist $u_a = u_{a1} + ... + u_{an}$

Substitutionsprinzip





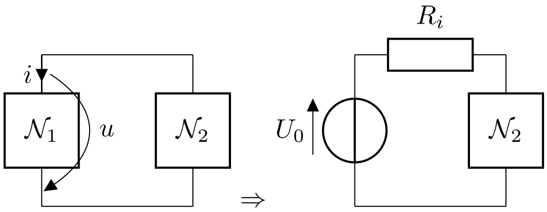
$\mathcal{N}_1$ Spannungsgesteuert $\rightarrow$



$\mathcal{N}_1$ Stromgesteuert $\rightarrow$

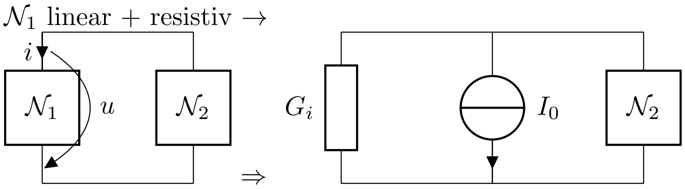
Helmholtz/Thévenin

$\mathcal{N}_1$ linear + resistiv $\rightarrow$



Mayer/Norton

$\mathcal{N}_1$ linear + resistiv $\rightarrow$



Newton-Raphson

TODO