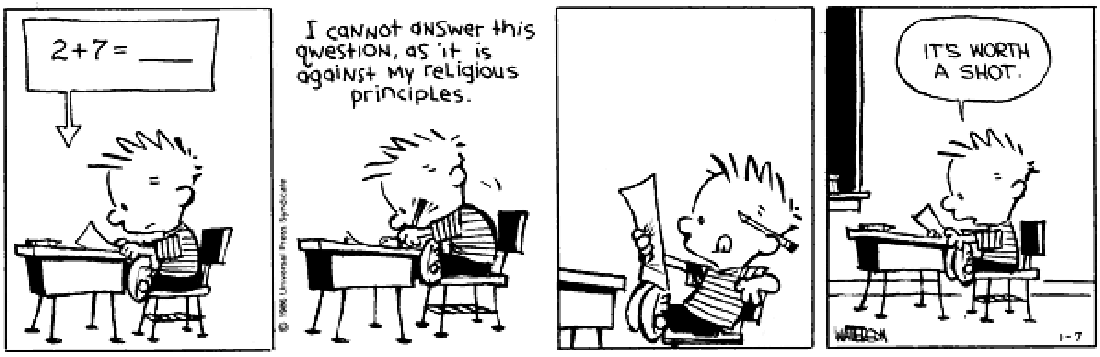
Repetitorium und Formelsammlung

Schaltungstechnik

Teil 1



www.eikon.tum.de/~miro/

Diese Formelsammlung basiert auf dem Skript Schaltungstechnik und dem Repetitorium des „AK Überleb' die ST DVP (1993)“ der Fachschaft EI. Alle Angaben ohne Gewähr.

Jeder Student oder Tutor der diese Formelsammlung verwendet, ist moralisch dazu verpflichtet, dem Autor eine email mit Fehlerkorrekturen und Ergänzungsmöglichkeiten zu senden.

Kirchhoff - Gesetze

- Konzentriertheitshypothese: $\boxed{d \ll \lambda}$ d = Größe der Schaltung; Wellenlänge $\lambda = cT$
- Knotenregel, <u>KCL</u>: $\sum_{Knoten} i_j(t) = 0$ (heraußfließende Ströme positiv)
- Maschenregel, <u>KVL</u>: $\sum_{Umlauf} u_j(t) = 0$ (Spannungen in Umlaufrichtung positiv)
- Knoteninzidenzmatrix: $A' = \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1b} \\ \vdots & & \\ \alpha_{n1} & \cdots & \alpha_{nb} \end{bmatrix}}_{b\ Zweige}$ n *Knoten*

Spaltensummen von A' sind immer = 0
$\Rightarrow$ Zeile des Bezugsknotens streichen $\Rightarrow$
$\boxed{A \cdot \underline{i} = 0}$ (red. Knoteninzidenzmatrix)

$M = A'^T$ mit $u = M' u_k'$ $\Rightarrow$ KVL in Matrixform: $\boxed{\underline{u} - A^T \underline{u_k} = 0}$

Resistive Eintore

- Implizite Darstellung: $f_F(u,i) = 0$
- Parameterdarstellung: $u = u_F(\lambda)$, $i = i_F(\lambda)$
- Explizite Darstellung: $i = g_F(u)$; $u = r_F(i)$
  Leitwertsdarst. ; Widerstandsdarst.

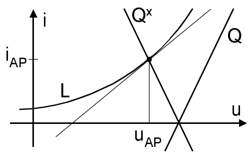
- F ungepolt $\Rightarrow$ Kennlinie punktsymm. zum Urspr.
- F aktiv $\Rightarrow$ mind. 1 Pkt. im II. od. IV. Quadr.
- F verlustfrei $\Rightarrow$ nur auf Koordinatenachsen
- F quellenfrei $\Rightarrow$ enthält den Ursprung
- F streng linear $\Rightarrow$ $(ku, ki) \in F$; $(u_1 + u_2, i_1 + i_2) \in F$

- <u>Umpolung</u>: $\overline{F}$ entsteht durch Punktspiegelung von F am Unsprung: $(\overline{u}, \overline{i}) = (-u, -i) \in \overline{F}$

- <u>Dualität</u>: $(u,i) \in F \Leftrightarrow \left(R_d\, i, \frac{u}{R_d} \right) \in F^d$

- Parallelschaltung von Widerstandsgeraden: $G = G_1 + G_2 \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow \boxed{R = R_1 \| R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$
- Serienschaltung von Widerstandsgeraden: genauso wie Parallelschaltung nur R statt G

- <u>Arbeitspunkt</u> ermitteln:
  1. Schaltung aufteilen in Quelle Q und Last L
  2. Parameterdarstellung $\Rightarrow$ Kennlinien zeichnen
  3. Lösung: Schnittpunkte der Kennlinien! $\Rightarrow$ ist die Funktion im AP stetig und diffbar, kann man sie dort <u>linearisieren</u>



Resistive Zweitore

- <u>Beschreibungsformen</u>:
  - Implizit: $\underline{f}(\underline{u}, \underline{i}) = 0$
  - Parameterisiert: $\begin{bmatrix} \underline{u}(\underline{c}) \\ \underline{i}(\underline{c}) \end{bmatrix} \in F$
  - Explizit:
    G : Leitwertsmatrix
    R : Widerstandsmatrix
    H : Hybridmatrix
    H' : „inverse“ Hybridmatrix
    A : Kettenmatrix
    A' : „inverse“ Kettenmatrix

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}u_2 - a_{12}i_2 \\ a_{21}u_2 - a_{22}i_2 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{G} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}u_1 + g_{12}u_2 \\ g_{21}u_1 + g_{22}u_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{A'} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ -i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11}u_1 - a'_{12}i_1 \\ a'_{21}u_1 - a'_{22}i_1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}i_1 + r_{12}i_2 \\ r_{21}i_1 + r_{22}i_2 \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{H'} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{11}u_1 + h'_{12}i_2 \\ h'_{21}u_1 + h'_{22}i_2 \end{bmatrix}$$

- <u>Aufstellen der Matrix</u> z.B. G: $g_{11} = \frac{i_1}{u_1}\Big|_{u_2=0}$ $g_{12} = \frac{i_1}{u_2}\Big|_{u_1=0}$ $g_{21} = \frac{i_2}{u_1}\Big|_{u_2=0}$ $g_{22} = \frac{i_2}{u_2}\Big|_{u_1=0}$

  oder: R: $r_{11} = \frac{u_1}{i_1}\Big|_{i_2=0}$ $r_{12} = \frac{u_1}{i_2}\Big|_{i_1=0}$ $r_{21} = \frac{u_2}{i_1}\Big|_{i_2=0}$ $r_{22} = \frac{u_2}{i_2}\Big|_{i_1=0}$

- <u>Linearisierung</u> (implizit): $\Delta f(\Delta u, \Delta i) = M \Delta u + N \Delta i = 0$

$$M := \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \end{bmatrix} \qquad N := \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial i_1} & \frac{\partial f_1}{\partial i_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial i_1} & \frac{\partial f_2}{\partial i_2} \end{bmatrix}$$

- streng linear (= linear und quellenfrei): eine beliebige Linearkomb. zweier Betriebspunkte ist wieder ein BP

$$\begin{bmatrix} \underline{u}^{(1)} \\ \underline{i}^{(1)} \end{bmatrix} \in F \wedge \begin{bmatrix} \underline{u}^{(2)} \\ \underline{i}^{(2)} \end{bmatrix} \in F \Rightarrow \alpha \cdot \begin{bmatrix} \underline{u}^{(1)} \\ \underline{i}^{(1)} \end{bmatrix} + \beta \cdot \begin{bmatrix} \underline{u}^{(2)} \\ \underline{i}^{(2)} \end{bmatrix} \in F ;\ \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

$$\boxed{f(\underline{u}, \underline{i}) = M \underline{u} + N \underline{i} = 0}$$

- Linearisierung (explizit): $\underline{i} = \underline{G}(\underline{u}) = I + \frac{\partial g(\underline{u})}{\partial \underline{u}} \Delta \underline{u} = I + G \underline{u}$ mit $G = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial u_1} & \frac{\partial g_2}{\partial u_2} \end{bmatrix}\Bigg|_{AP}$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix}$$

G ist Jacobimatrix

Taylor: $f_{lin}(x) = f(x_0) + \frac{\partial f(x_0)}{\partial x}\Big|_{x_0} \cdot (x - x_0)$

Nullator	$u=0$ $\quad i=0$		- streng linear; verlustlos - dual zu sich selbst
Norator	$u=$ beliebig $\quad i=$ beliebig		- streng linear; aktiv - dual zu sich selbst
Leerlauf	$u=$ beliebig $\quad i=0$		- streng linear - dual zum Kurzschluss
Kurzschuß	$u=0$ $\quad i=$ beliebig		- streng linear - dual zum Leerlauf
ohmscher Widerstand	$u=R\cdot i$ $\quad i=G\cdot u$	G, R	- streng linear - passiv $\quad R^d=\frac{R_d^2}{R} \quad G^d=\frac{1}{R_d^2 G}$
ideale Stromquelle	$u=$ beliebig $\quad i=i_0$	i_0	- spannungsgesteuert; aktiv; gepolt - linear, dual zur Spannungsquelle
ideale Spannungsquelle	$u=u_0$ $\quad i=$ beliebig	u_0	- stromgesteuert; aktiv; gepolt - linear; dual zur Stromquelle
reale Diode	$u_D=U_T\ln(i_D/I_S+1)$ $i_D=I_S[\exp(u_D/U_T)-1]$		- gepolt; passiv $\quad U_T=25mV$ - quellenfrei $\quad I_S\approx pA$
Photodiode	$i(0)=I_S\cdot[\exp(u(t)/U_T)-1]-i_L(t)$		- gepolt; aktiv
Zenerdiode	$u<U_Z \Rightarrow i$ sehr groß Zehnerdurchbruch	U_Z	- gepolt; passiv - quellenfrei
Tunneldiode			- gepolt; passiv; quellenfrei - inkremental aktiv !
ideale Diode	$u=0$ für $i>0$ $i=0$ für $u<0$		- verlustlos; stückweise linear - dual: umgepolte ideale Diode
Konkaver (G,U) Widerstand	$i=0$ für $u\le U_0$ $i=G(u-U_0)$ für $u\ge U_0$	G, U_0	- stückweie linear - für $U_0>0$, $G>0$: passiv, spannungsgesteuert - dual: konvexer Widerstand
Konvexer (R,I) Widerstand	$u=0$ für $i\le I_0$ $u=R(i-I_0)$ für $i\ge I_0$	I_0, R	- stückweise linear; für $I_0>0$, $R>0$ stromgest. - dual: konkaver Widerstand
Lineare Quellen	R, U_0 $\equiv$ G, I_0	I_0, $-u_0$, u_0, $-I_0$	- linear; aktiv - $U_0=I_0 R$, $\quad I_0=U_0 G$

Spannungs gest. Stromquelle **USI** VCCS	u_1, $i_1=0$, $i_2=gu_1$, u_2	$A=\begin{bmatrix}0 & -1/g\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ $\quad G=\begin{bmatrix}0 & 0\\ g & 0\end{bmatrix}$ $\quad M=\begin{bmatrix}0 & 0\\ -g & 0\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$
Strom gest. Stromquelle **ISI** CCCS	$u_1=0$, i_1, $i_2=\beta\cdot i_1$, u_2	$A=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -1/\beta\end{bmatrix}$ $\quad H=\begin{bmatrix}0 & 0\\ \beta & 0\end{bmatrix}$
Spannungs gest. Spannungsq. **USU** VCVS	u_1, i_1, $i_2=\mu\cdot i_1$, u_2	$A=\begin{bmatrix}1/\mu & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ $\quad H'=\begin{bmatrix}0 & 0\\ \mu & 0\end{bmatrix}$
Strom gest. Spannungsquelle **ISU** CCVS	$u_1=0$, i_1, $i_2=r\cdot i_1$, u_2	$A=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1/r & 0\end{bmatrix}$ $\quad R=\begin{bmatrix}0 & 0\\ r & 0\end{bmatrix}$ $\quad M=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}0 & 0\\ -r & 0\end{bmatrix}$
Nullor quellenfrei, streng linear	u_1, i_1, i_2, u_2	$A=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}=0$ $\quad M=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\end{bmatrix}$
Gyrator, Dualwandler idealer G.: $R_1=R_2=R_d$ verlustlos; $G=-G^T$; $R=-R^T$ **P**ositiv **I**mmittanz **I**nverter $F_{Gyr}=F^d$	u_1, i_1, i_2, u_2 $R_1 : R_2$ $\det A=\det A'=-1$	$A=\begin{bmatrix}0 & R_1\\ 1/R_2 & 0\end{bmatrix}$ $\quad M=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}0 & R_1\\ -R_2 & 0\end{bmatrix}$ $G=\begin{bmatrix}0 & 1/R_2\\ -1/R_1 & 0\end{bmatrix}$ $\quad R=\begin{bmatrix}0 & -R_1\\ R_2 & 0\end{bmatrix}$ $\quad A'=\begin{bmatrix}0 & -R_2\\ -1/R_1 & 0\end{bmatrix}$
Idealer Übertrager verlustlos, reziprok, umkehrbar für $ü=\pm1$ **P**ositiv **I**mmittanz **K**onverter	ü : 1 $\det A=\det A'=+1$	$A=\begin{bmatrix}ü & 0\\ 0 & 1/ü\end{bmatrix}$ $\quad M=\begin{bmatrix}1 & -ü\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}0 & 0\\ ü & 1\end{bmatrix}$ $H=\begin{bmatrix}0 & ü\\ -ü & 0\end{bmatrix}$ $\quad H'=\begin{bmatrix}0 & -1/ü\\ 1/ü & 0\end{bmatrix}$ $\quad A'=\begin{bmatrix}1/ü & 0\\ 0 & ü\end{bmatrix}$
NIK Negativ Immittanz Konverter aktiv, antireziprok, für $\lvert k\rvert=1$ symmetrisch	k = 1 : F ist an der i_1 -Achse gespiegelter Zweipol k = -1 : F ist an der u_1 - Achse gespiegelter Zweipol	$A=\begin{bmatrix}-k & 0\\ 0 & 1/k\end{bmatrix}$ $\quad M=\begin{bmatrix}1 & k\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ $\quad N=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 1/k\end{bmatrix}$ $\quad k\in\mathbb{R}$ $H=\begin{bmatrix}0 & -k\\ -k & 0\end{bmatrix}$ $\quad H'=\begin{bmatrix}0 & -1/k\\ -1/k & 0\end{bmatrix}$ $\quad A'=\begin{bmatrix}-1/k & 0\\ 0 & k\end{bmatrix}$

Klassifizierung der Zweitore anhand der Kettenmatrix A

- alle vier Einträge gleich Null $\Rightarrow$ Nullor
- drei Einträge gleich Null $\Rightarrow$ gesteuerte Quelle
- zwei Einträge gleich Null $\Rightarrow$ INVERTER / KONVERTER

	INVERTER (z.B. Gyrator)	KONVERTER (z.B. NIK; PIK)
positiv	$\begin{bmatrix} 0 & R \\ 1/R & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1/ü & 0 \\ 0 & ü \end{bmatrix}$
negativ	$\begin{bmatrix} 0 & R \\ -1/R & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix}$
	Strom $\Leftrightarrow$ Spannung	Strom $\Leftrightarrow$ Strom; Spannung $\Leftrightarrow$ Spannung

- Leistung: $p=\underline{u}^T\,\underline{i}$
- Verlustlosigkeit: $\forall \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} \in F:\ \underline{u}^T\,\underline{i}=0$
  bzw. $U^T I + I^T U = 0$
- Passivität: $\forall \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} \in F:\ \underline{u}^T\,\underline{i}\geq 0$
- Aktivität: $\exists \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} \in F:\ \underline{u}^T\,\underline{i}< 0$

- Reziprozität: $U^T I - I^T U = 0;\ G=G^T;\ R=R^T;\ det\,A=1;\ det\,A'=1$
  Netzwerk besteht nur aus R, C, L $\Rightarrow$ reziprok
- Dualität: $\mathcal{F}^d\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \mathcal{F}\begin{bmatrix} 0 & R_d E \\ \frac{1}{R_d}\cdot E & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix}$ $\qquad G^d=\frac{1}{R_d^2}\cdot R \qquad R^d=R_d^2\cdot G$
- Symmetrie: $\mathcal{F}^u\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \mathcal{F}(P\cdot\underline{u}, P\cdot\underline{i})\ \ mit\ \ P=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}=P^{-1}$ $\qquad G=PGP,\ R=PRP,\ A=A'$

  z.B.: $g_{11}=g_{22}$ und $g_{12}=g_{21}$

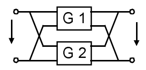
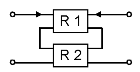
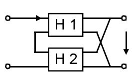
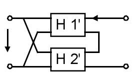
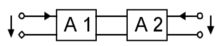
Die Umrechnungstabelle der Zweitor-Matrizen:

	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{H'}$	$\boldsymbol{A}$	$\boldsymbol{A'}$
$\boldsymbol{R}$	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{G}}\begin{bmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}}\begin{bmatrix} \det \boldsymbol{H} & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h'_{11}}\begin{bmatrix} 1 & -h'_{12} \\ h'_{21} & \det \boldsymbol{H'} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{21}}\begin{bmatrix} a_{11} & \det \boldsymbol{A} \\ 1 & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{21}}\begin{bmatrix} a'_{22} & 1 \\ \det \boldsymbol{A'} & a'_{11} \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{G}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{R}}\begin{bmatrix} r_{22} & -r_{12} \\ -r_{21} & r_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}}\begin{bmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} & \det \boldsymbol{H} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h'_{22}}\begin{bmatrix} \det \boldsymbol{H'} & h'_{12} \\ -h'_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{12}}\begin{bmatrix} a_{22} & -\det \boldsymbol{A} \\ -1 & a_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{12}}\begin{bmatrix} a'_{11} & -1 \\ -\det \boldsymbol{A'} & a'_{22} \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{H}$	$\frac{1}{r_{22}}\begin{bmatrix} \det \boldsymbol{R} & r_{12} \\ -r_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{11}}\begin{bmatrix} 1 & -g_{12} \\ g_{21} & \det \boldsymbol{G} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{H'}}\begin{bmatrix} h'_{22} & -h'_{12} \\ -h'_{21} & h'_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{22}}\begin{bmatrix} a_{12} & \det \boldsymbol{A} \\ -1 & a_{21} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{11}}\begin{bmatrix} a'_{12} & 1 \\ -\det \boldsymbol{A'} & a'_{21} \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{H'}$	$\frac{1}{r_{11}}\begin{bmatrix} 1 & -r_{12} \\ r_{21} & \det \boldsymbol{R} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{22}}\begin{bmatrix} \det \boldsymbol{G} & g_{12} \\ -g_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{H}}\begin{bmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} \\ h'_{21} & h'_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{11}}\begin{bmatrix} a_{21} & -\det \boldsymbol{A} \\ 1 & a_{12} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a'_{22}}\begin{bmatrix} a'_{21} & -1 \\ \det \boldsymbol{A'} & a'_{12} \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{A}$	$\frac{1}{r_{21}}\begin{bmatrix} r_{11} & \det \boldsymbol{R} \\ 1 & r_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{21}}\begin{bmatrix} -g_{22} & -1 \\ -\det \boldsymbol{G} & -g_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{21}}\begin{bmatrix} -\det \boldsymbol{H} & -h_{11} \\ -h_{22} & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h'_{21}}\begin{bmatrix} 1 & h'_{22} \\ h'_{11} & \det \boldsymbol{H'} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{A'}}\begin{bmatrix} a'_{22} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{11} \end{bmatrix}$
$\boldsymbol{A'}$	$\frac{1}{r_{12}}\begin{bmatrix} r_{22} & \det \boldsymbol{R} \\ 1 & r_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{12}}\begin{bmatrix} -g_{11} & -1 \\ -\det \boldsymbol{G} & -g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{12}}\begin{bmatrix} 1 & h_{11} \\ h_{22} & \det \boldsymbol{H} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h'_{12}}\begin{bmatrix} -\det \boldsymbol{H'} & -h'_{22} \\ -h'_{11} & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\det \boldsymbol{A}}\begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix}$

Beschreibungsformen:

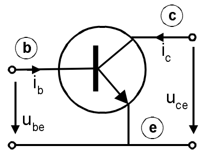
	implizite Darstellung	Parameterdarstellung	explizite Darst.
streng linear	$F=Kern[M\,N]=\left\{\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} \middle\vert\ [M\,N]\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix}=0\right\}$ $Rang[\,M\,N\,]=p$	$F=Bild\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix}=\left\{\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} \middle\vert\ \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix}\cdot\underline{c},\ \underline{c}\in\mathbb{R}^2\right\}$ $Rang\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix}=p$ Betriebsmatrix: $\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \underline{u}^{(1)} & \underline{u}^{(2)} \\ \underline{i}^{(1)} & \underline{i}^{(2)} \end{bmatrix}$	$\underline{i}=G\,\underline{u}$ $\underline{u}=R\,\underline{i}$
nicht quellenfrei	$F=Kern[\,M\,N\,]+\begin{bmatrix} \underline{u}_0 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix}$	$F=Bild\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \underline{u}_0 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix}$	$\underline{i}=G\,\underline{u}+\underline{i}_g$ $\underline{u}=R\,\underline{i}+\underline{u}_r$ usw.

Zusammenschaltung von Zweitoren:

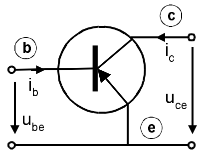
Parallel-schaltung		$\underline{g}_{ges}=\underline{g}_1+\underline{g}_2 \qquad G_{ges}=G_1+G_2 \qquad R=R_1(R_1+R_2)$
Serien-schaltung		$\underline{r}_{ges}=\underline{r}_1+\underline{r}_2 \qquad R_{ges}=R_1+R_2 \qquad G=G_1(G_1+G_2)$
Hybride Verschaltung	 	$\underline{h}_{ges}=\underline{h}_1+\underline{h}_2 \qquad \underline{h'}_{ges}=\underline{h'}_1+\underline{h'}_2$ $H_{ges}=H_1+H_2 \qquad H'_{ges}=H'_1+H'_2$
Kettenschatung		$\underline{a}_{ges}=\underline{a}_1\cdot\underline{a}_2 \qquad A_{ges}=A_1\cdot A_2 \qquad A'_{ges}=A'_1\cdot A'_2 \qquad \begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix}=\underline{a}_{ges}\begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}=\underline{a}_1\left(\underline{a}_2\begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}\right)$

Transistoren

- Der Strom zur jeweiligen Bezugsklemme kommt nicht vor! (z.B. i_e)
- Diodenrichtung: p ⊕—▶|—⊖ n
- Transistoren sind immer passiv!



npn in Emitterschaltung



pnp in Emitterschaltung

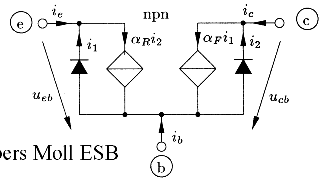
In Emitterschaltung gilt:

$$i_b = I_S \left(\exp\left(\frac{u_{be}}{U_T} \right) - 1 \right)$$

$$i_c = \beta i_b$$

$$u_{be} = U_T \ln\left(1 + \frac{i_b}{I_s} \right)$$

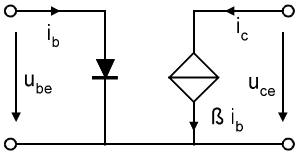
Ersatzschaltungen:



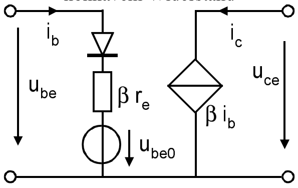
Ebers Moll ESB

$\boxed{u_{cb} > 0}$ npn Transistor in Emitterschaltung, Vorwärtsbetrieb!
(pnp: Diode umdrehen! Kleinsignal ESB sind für pnp und npn identisch!)

Grossignal ESB I:



ESB II : Stückweise linear mit konkavem Widerstand

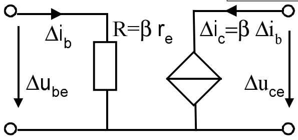


Hybridmatrix H der Emitterschaltung:

r_e : Eingangswiderstand
β : Stromverstärkung
μ : Spannungsrückwirkung
g : Ausgangsleitwert

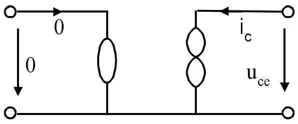
$$\begin{bmatrix} \Delta u_{be} \\ \Delta i_c \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} r_e = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta i_b} & \mu = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta u_{ce}} \\ \beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} & g = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{ce}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_b \\ \Delta u_{ce} \end{bmatrix}$$

lin. Kleinsignal ESB: $\boxed{u_{be} > 0}$



$\Rightarrow$ $\beta \to \infty$

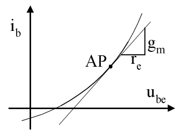
Dreipolnullor:



Kenngrößen des Transistors:

- Stromverstärkung: $\boxed{\beta = v_i = \frac{i_c}{i_b}}$
- Verlustleistung: $\boxed{P_V = U_{be} I_b + U_{ce} I_c \approx I_c U_{ce}}$
- Eingangswiderstand $r_e = \frac{1}{g_m}$: $\boxed{\frac{\Delta i_b}{\Delta u_{be}} = \frac{g_m}{\beta} \Rightarrow r_e = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta i_b} = \frac{U_T}{-i_e}}$
  (Transferwiderstand)
- Kleinsignalverstärkung: $\boxed{v_u = \frac{\Delta u_{out}}{\Delta u_{in}}}$
  (Spannungsverstärkung)
- Leistungsverstärkung: $\boxed{v_p = v_u \cdot v_i = \beta_F = \frac{\Delta u_{out} \cdot \Delta i_{out}}{\Delta u_{in} \cdot \Delta i_{in}}}$
- Kleinsignalleitwert / Steilheit: $g_m = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{be}} \Big|_{AP}$

Eingangskennlinie:



Arbeitspunktbestimmung:

- Kirchhoffgleichungen aufstellen (meist $u = u'$, $i = -i'$) (u', i') sind Quellenkenngrößen
- (u', i') eleminieren, durch (u, i) ersetzen
- in Koodinatensystem eintragen, Schnittpunkt der Kennlinien ist AP.

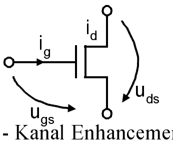
$$\left. \begin{array}{ll} U_{be} = U_0 + R_i i_e : & \text{Quellenkennlinie } Q \\ U_{be} = U_0 - R_i i_e : & \text{externe Quellenkennlinie } Q^x \end{array} \right\} \Rightarrow \overset{(LL)}{U_{BE} = 0} \Rightarrow \overset{(KS)}{U_0 = R_i i_0} \ (bei\, Q^x) \Rightarrow i_0 = \frac{R_i}{u_0}$$

$\Rightarrow$ Punkte $(U_0, 0)$ und $(0, i_0)$ einzeichnen und als Gerade verbinden(Q^x)

- Schnittpunkt Q^x mit Transistorkennlinie ist **AP**
- im Eingangskennlinienfeld haben kleine Änderungen der Steigung von Q^x eine große Verschiebung des AP zur Folge!

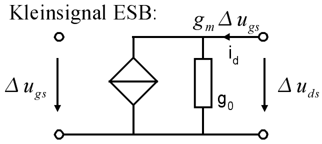
Unipolartransistoren: FET

$i_g = 0$



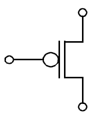
n - Kanal Enhancement

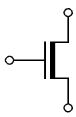
Kleinsignal ESB:



Innenleitwert: $g_0 = \frac{\partial i_d}{\partial u_{ds}} \Big|_{AP}$

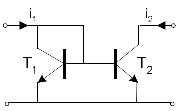
Steilheit: $g_m = \frac{\partial i_d}{\partial u_{gs}} \Big|_{AP}$

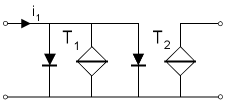

p - Kanal Enhancement


n - Kanal Depletion

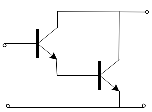
Stromspiegel:

ideal: $u_1 = 0$
$i_1 = i_2$

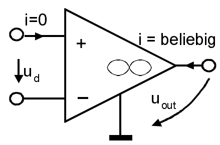




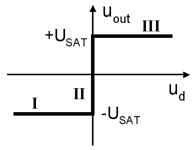
Darlington Transistor:



Operationsverstärker

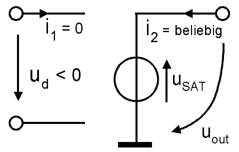


Kennlinie des <u>idealen</u> OpAmps:

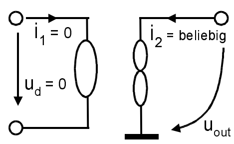


- In den Sättigungsbereichen kennt man u_{out} immer: $u_{out}=\pm U_{Sat}$
- Wird der OpAmp im <u>streng linearen</u> Bereich betrieben, sofort ESB II verwenden!!

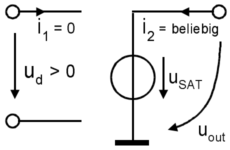
ESB I: $u_d < 0;\ u_{out}=-U_{Sat}$



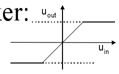
ESB II: $u_d = 0;\ |u_{out}|\le|U_{Sat}|$

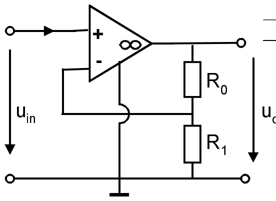


ESB III: $u_d > 0;\ u_{out}=U_{Sat}$



Nichtinvertierender Verstärker:

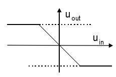


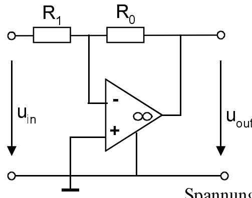


$$u_{out}=\left(1+\frac{R_0}{R_1}\right)u_{in}$$

Spannungsverstärkung: $v_u=1+\dfrac{R_0}{R_1}$

Invertierender Verstärker:





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

Spannungsverstärkung: $v_u=\dfrac{R_0}{R_1}$

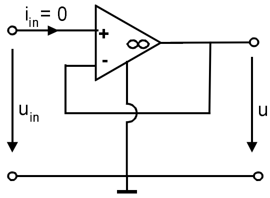
Addierer:

Mehrfacheinkopplung: $u_{out}=-R_0\sum_i \dfrac{u_i}{R_i}$

Spannungsfolger:

= Nicht invertierender Verstärker mit $v_u=1$

= Impedanzwandler

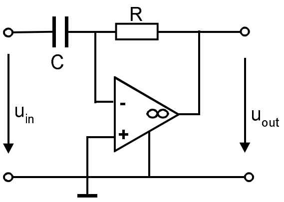


$u_{out}=u_{in}$

$v_u=1$

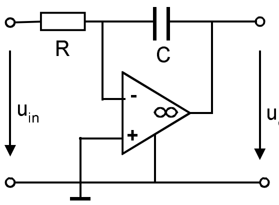
Eingang: nicht belastet $i_{in}=0$
Ausgang: hohe Ströme

Differenzierer:



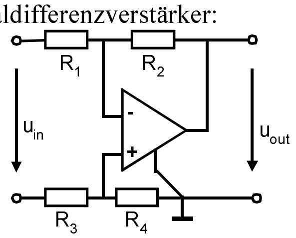
$$u_{out}=-RC\cdot\dot{u}_{in}$$

Integrierer:



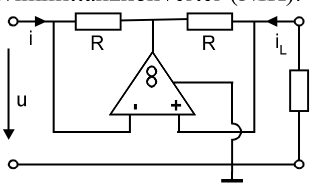
$$u_{out}=-u_c(t_0)-\frac{1}{RC}\int_{t_0}^{t_1}u_{in}\,dt$$

Potentialdifferenzverstärker:

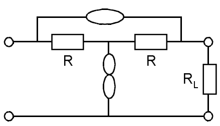


$$u_{out}=\frac{-R_2}{R_1}u_{in}=\frac{-R_4}{R_3}u_{in}\quad \text{Bed. } \frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4}$$

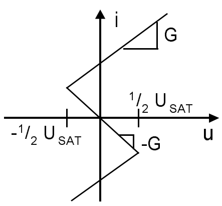
Negativimmittanzkonverter (NIK):



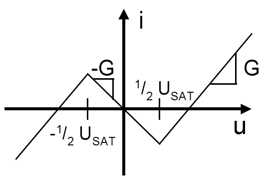
Nullormodell:



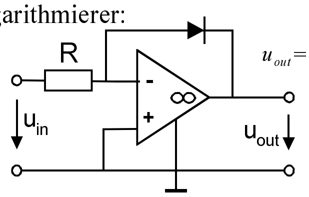
$$u=-R_L\,i$$



Umpolung des OpAmp:

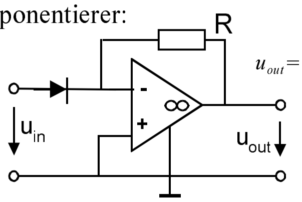


Logarithmierer:



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

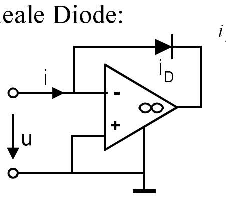
Exponentierer:

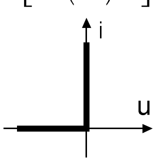


$$u_{out}=-R\cdot I_S\cdot\exp\left(\frac{u_{in}}{U_T}\right)$$

Ideale Diode:

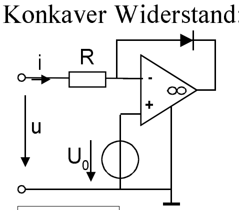
$$i_D=I_S\cdot\left[\exp\left(\frac{u_{in}}{U_T}\right)-1\right]$$

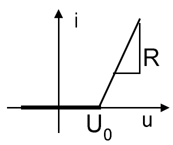




Umgepolte ideale Diode: pn - Diode umpolen

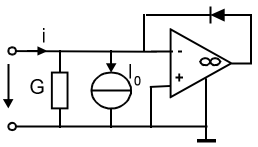
Konkaver Widerstand:

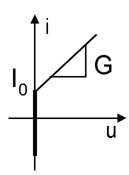




$\boxed{U_0<U_{Sat}}$

Konvexer Widerstand:





$\boxed{I_0<G\cdot U_{Sat}}$

Gyrator:

Parallelschaltung zweier USI <u>oder</u>
Serienschaltung zweier ISU
<u>oder</u>:
Kettenschaltung eines NIK $(k=-1)$ mit einem NII

USU mit $\mu>1$ = Nichtinvertierender Verstärker
$\mu<0$ Invertierendem Verstärker und Spannungsfolger in Kette

ISU mit $r<0$ = Invertiernder Verstärker ohne R_1
$r>0$ zusätzlich invertierenden Verstärker mit $v_u=-1$ nachschalten

Analyseverfahren

A Knoteninzidenzmatix
B Schleifeninzidenzmatrix

Verbindungsmehrtor:

$$Rang\begin{bmatrix} B' & 0 \\ 0 & A' \end{bmatrix} = Rang[\,M\,N\,] = b$$

Jede Knotenpunktsgleichung steht auf jeder Schleifengleichung senkrecht: $A'\,B'^T = 0$

Eigenschaften des Verbindungsmehrtors:
n Knoten (Nodes)
b Anzahl der Kanten (Zweige, Branches) = Anz. der Tore p
Zeit**in**variant, streng linear, <u>verlustlos</u>, <u>reziprok</u>

$\Leftrightarrow$ $\boxed{U^T\,I = 0}$ Tellegenscher Satz

Jeder Torspannungsvektor des VMT steht auf jedem Torstomvektor des VMT senkrecht

<u>Baumkonzept</u> (= Schleifenanalyse, oder Schnittmengenanalyse)

- <u>Netzwerkgraph zeichnen</u>: Baum muß folgende drei Eigenschaften erfüllen:
  Baum ist ein zusammenhängender Graph - Er enthält alle Knoten - und hat keine Schleifen
  Erst Baumzweige, dann Verbindungskanten fortlaufend nummerieren.
  Es gibt $det(A\,A^T)$ verschiedenen Bäume im Netzwerkgraphen.

  Anzahl der Baumzweige: $(n-1)$
  Anzahl der Verbindungskanten: $s = b-(n-1)$ = Anzahl der linear unabh. Schleifengleichungen
  b Gleichungen

- <u>Aufstellen der linear unabh. Maschengleichungen</u>:
  Eine Schleife enthält nur **eine** Verbindungskante, sonst nur Baumzweige

  $$\Rightarrow \quad B\cdot \underline{u} = [B_b \;\; E_S]\begin{bmatrix} \underline{u}_b \\ \underline{u}_v \end{bmatrix} = 0$$

- <u>Aufstellen der linear unabh. Knotengleichungen</u>:
  Superknoten enthält nur <u>eine</u> Baumkante, sonst nur Verbindungskanten

  $$\Rightarrow \quad [E_{n-1} \;\; -B_b^T]\begin{bmatrix} \underline{i}_b \\ \underline{i}_v \end{bmatrix} = 0$$

vollständige Beschr. des Verbindungsmehrtors:

$$\begin{bmatrix} B_b & E_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{n-1} & -B_b^T \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} \underline{u}_b \\ \underline{u}_v \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Knotenspannungsanalyse:

$$\begin{bmatrix} -A^T & E_b & 0 \\ 0 & 0 & A \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u}_k \\ \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$b+(n-1)$ Gleichungen

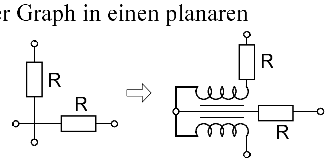
- $(n-1)$ zusätzliche Kanten zwischen Bezugsnoten und übrigen $(n-1)$ Knoten
- diese sind unbeschaltet und dienen ausschließlich als Meßtore.
- Das Aufstellen des Baumes entfällt
- A kann durch Augenschein aufgestellt werden (A = Knoteninzidenzmatrix)
- gut bei stark vermaschten Netzwertken $(b \gg n)$

Maschenstromanalyse:

$$\begin{bmatrix} B & 0 & 0 \\ 0 & E_b & -B^T \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \\ \underline{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$(b+s)$ Gleichungen

- nur bei planaren Netzwerken!
- durch ideale Übertrager $(\ddot{u}=1)$ kann ein nichtplanarer Graph in einen planaren Graph überführt werden, dabei steigt die Anzahl der Kanten um zwei pro idealem Übertrager
- gut bei schwach vermaschten Netzwerken $(b \approx n)$



Tableaugleichungen:

$$\begin{array}{l} KVL \\ KCL \\ Nwel. \end{array}\begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & A \\ M & N \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{e} \end{bmatrix}\begin{array}{c} s \\ (n-1) \\ b \end{array}$$

Gleichungen: $2b$

lin. Netzwerkelemente $\Rightarrow$ $M\,u + N\,i = e$
$\underline{e}$: Erregungsvektor aller unabhängiger Quellen
eindeutige Lösung des Tableaugleichungssystems wenn $det\,T(t_0) \neq 0$

- Knotentableausystem:

$$\begin{array}{l} KVL \\ KCL \\ Nwel. \end{array}\begin{bmatrix} -A^T & E_b & 0 \\ 0 & 0 & A \\ 0 & M & N \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u}_k \\ \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{e} \end{bmatrix}\begin{array}{c} b \\ (n-1) \\ b \end{array}$$

Gleichungen: $2b+(n-1)$

- Maschentableausystem:

$$\begin{array}{l} KVL \\ KCL \\ Nwel. \end{array}\begin{bmatrix} B & 0 & 0 \\ 0 & E_b & -B^T \\ M & N & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \\ \underline{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{e} \end{bmatrix}\begin{array}{c} s \\ b \\ b \end{array}$$

Gleichungen: $2b+s$

- Nichtlineares Tableaugleichungssystem: $\begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{i} \end{bmatrix} = \underline{0}$ $\quad h(u,i,t)=0$ je p Gleichungen in 2p Variabelen

Reduzierte Knotenspannungsanalyse / Maschenstromanalyse:

Umformen des Knotentableausystems:

- red. Knotenleitwertsmatrix Y_k: $\boxed{Y_k = A\,Y\,A^T} = A(-N^{-1}M)A^T$
- Knoten-Stromquellenvektor $\underline{i}_q$: $\boxed{\underline{i}_q = -A\,\underline{i}_0}$ $\boxed{Y_k\,\underline{u}_k = \underline{i}_q}$

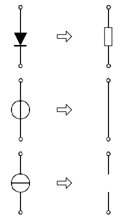
Y = <u>Kanten</u>leitwertsmatix
$Y_k = (n-1)$ Gleichungen

Umformen des Maschentableausystems:

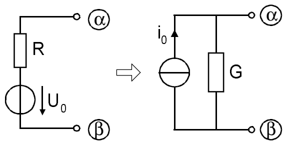
- Maschenwiderstandsmatrix Z_m: $\boxed{Z_m = B(-M^{-1}N)B^T}$
- Maschen-Stromquellenvektor $\underline{u}_q$: $\underline{u}_q = -B\,\underline{u}_0 = -B\,M^{-1}\,\underline{e}$ $\boxed{Z_m\,\underline{i}_m = \underline{u}_q}$

$Z_m = s$ Gleichungen

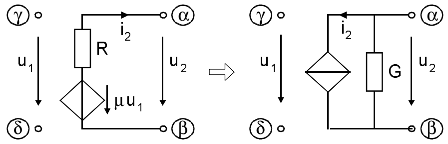
Direktes Aufstellen der reduzierten Knotenleitwertsmatrix (komplexe KSA)



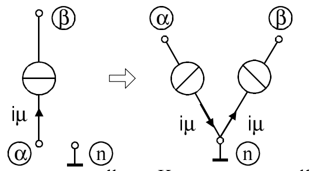
1. Nichtspannungsgesteuerte Elemente erstzen!
2. Schrittweise Knotenleitwertsmatrix Y aufstrellen: $\boxed{Y_k \underline{u_k} = \underline{i_q}}$
   - Bezugsknoten weglassen!
   - komplex $j\omega C$ und $1/j\omega L$ Im Prinzip wie G und R
3. Gesteuerte Quellen: Steuerleitwerte eintragen.
4. Gyrator einbauen (entsprechende Zeile / Spalte streichen!)
6. Knotenstromquellenvektor $\underline{i_q}$ aufstellen



$G = \frac{1}{R}$ $i_0 = U_0 \frac{1}{R}$

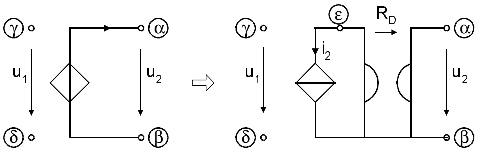


$G = \frac{1}{R} = g_m$ $i_2 = -g_m \mu u_1$



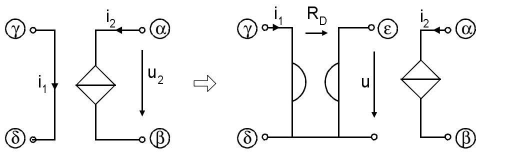
Kantenstromquelle -> Knotenstromquelle

USU
⇒ USI:



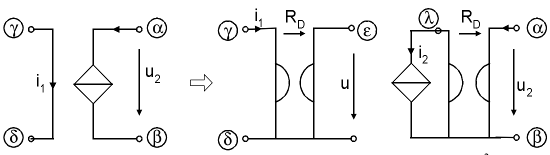
$u_2 = \mu u_1$ $i_2 = -g_m \mu u_1$ $g_m R_D = 1$

ISI:
⇒ USI:



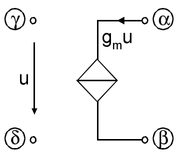
$i_2 = \beta i_1$ $u = R_D i_1$ $g_m R_D = 1$ $i_2 = \beta g_m u$

ISU
⇒ USI



$u_2 = \beta i_1$ $u = R_D i_1$ $g_m R_D = 1$ $i_2 = g_m u$ $u_2 = -g_m R_D^2 i_1$

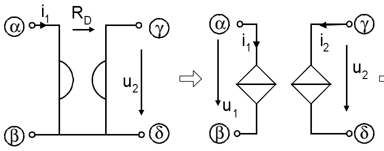
USI:



$$
Y_v = \begin{array}{c} \\ \alpha \\ \beta \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cc} \gamma & \delta \end{array} \\
\begin{bmatrix} \cdots & g_m & -g_m & \cdots \\ \cdots & -g_m & g_m & \cdots \end{bmatrix}
\end{array}
$$

Stromrichtung beachten !!!

Gyrator:

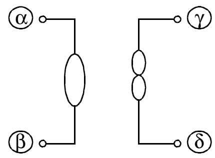


$$
\begin{array}{c|cccc}
 & \gamma & \delta & \alpha & \beta \\
\hline
\gamma & & & G & -G \\
\delta & & & -G & G \\
\alpha & -G & G & & \\
\beta & G & -G & &
\end{array}
$$

$i_1 = G_D u_2$ $i_2 = -G_D u_1$ $G_D = \frac{1}{R_D}$

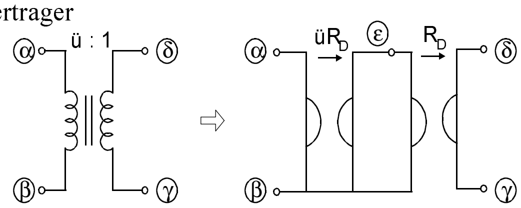
Nullor (für OpAmp):

- Nullator: Spalten addieren
- Norator: Zeilen addieren
- falls mit Masse verbunden: Spalte bzw. Zeile streichen!

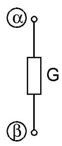


Nullator Norator

Idealer Übertrager



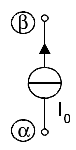
Widerstand



$$
Y_v = \begin{array}{c} \\ \alpha \\ \beta \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cc} \alpha & \beta \end{array} \\
\begin{bmatrix} \cdots & G & -G & \cdots \\ \cdots & -G & G & \cdots \end{bmatrix}
\end{array}
$$

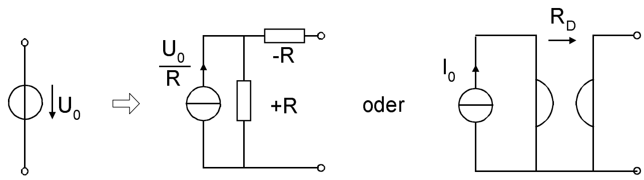
nur Leitwerte in Knotenleitwertsmatrix!

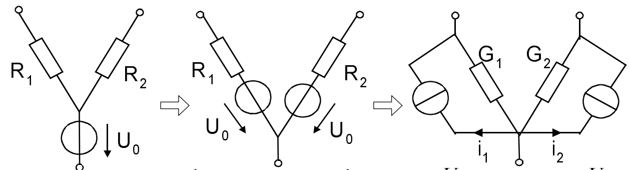
Stromquelle



$$
\begin{array}{c} \alpha \\ \beta \end{array}
\begin{bmatrix} \cdots & -i_0 & \cdots \\ \cdots & i_0 & \cdots \end{bmatrix}
$$

im Quellenvektor!
was in Knoten <u>rein</u>fließt <u>positiv</u>
was rausfließt negativ



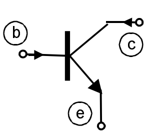


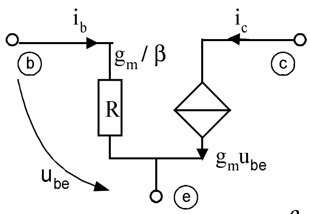
$G_1 = \frac{1}{R_1}$ $G_2 = \frac{1}{R_2}$ $i_1 = \frac{U_0}{R_1}$ $i_2 = \frac{U_0}{R_2}$

Transistor:

$\beta = \frac{i_c}{i_b}$

$g_m = \frac{\partial i_c}{\partial u_{be}}$





$i_c = \beta \cdot i_b = \frac{\beta \cdot u_{be}}{R}$

$$
\begin{array}{c|ccc}
 & b & c & e \\
\hline
b & (g_m/\beta) & 0 & -(g_m/\beta) \\
c & g_m & 0 & -g_m \\
e & -(g_m/\beta) - g_m & 0 & (g_m/\beta) + g_m
\end{array}
$$

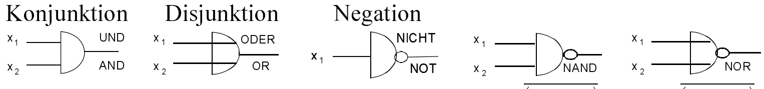
$$
\begin{array}{c} b \\ c \\ e \end{array}
\begin{bmatrix} & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}
$$

Logik

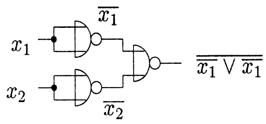
De Morgansche Gesetze:

$$\overline{x_1 \wedge x_2} = \overline{x_1} \vee \overline{x_2}$$
$$\overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1} \wedge \overline{x_2}$$

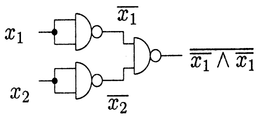
Konjunktion | Disjunktion | Negation



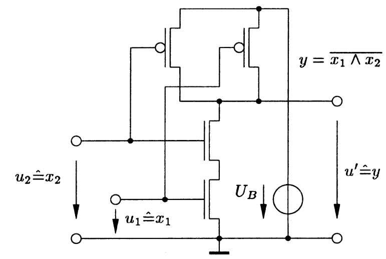
$y = x_1 \wedge x_2$ | $y = x_1 \vee x_2$ | $y = \overline{x}$ | $y = \overline{(x_1 \wedge x_2)}$ | $y = \overline{(x_1 \vee x_2)}$



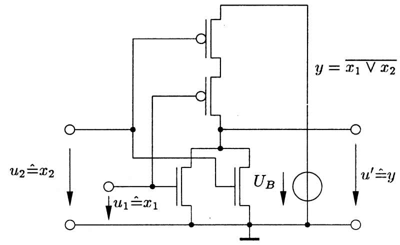
AND mit NOR



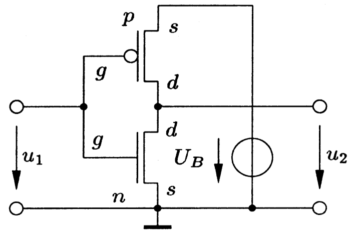
OR mit NAND



CMOS - NAND

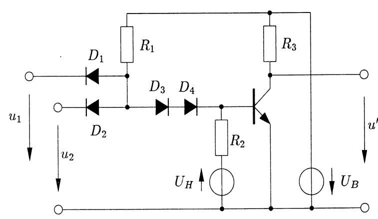


CMOS - NOR

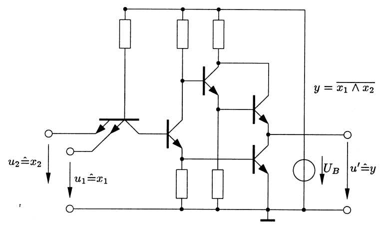


CMOS - Inverter

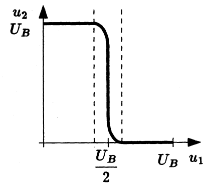
<u>CMOS AND / OR</u> : p- und n- Kanal Transistoren vertauschen!



DTL - NAND



TTL - NAND



CMOS - Übertragungscharakteristik