

## 1 Kirchhoff'sche Gesetze

Gültigkeit nur dann gegeben, wenn Bedingung  $d \ll \lambda = \frac{c}{f}$  erfüllt ist ( $d$ : räumliche Ausdehnung der Schaltung,  $c$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Medium,  $f$ : Signalfrequenz).

- **KCL**:  $\sum_{Knoten} i_k(t) = 0$ : in einen Knoten hineinfließende Ströme werden negativ gezählt, andere positiv
- **KVL**:  $\sum_{Maschen} u_m(t) = 0$ : Spannungen in Umlaufrichtung der Masche positiv, andere negativ

## 2 Resistive Eintore (Zweipole)

### 2.1 Beschreibungsformen

- **implizite Darstellung**: (existiert immer, nicht eindeutig): Nullstellenmenge  $f_{\mathcal{F}}(u, i) = 0$ , Beispiel: Diodenkennlinie in impliziter Form  $f_{\mathcal{F}}(u, i) = i - I_s(\exp \frac{u}{U_T} - 1) = 0$
- **parametrisierte Darstellung**: (nicht eindeutig):  $u = u_F(\lambda), i = i_F(\lambda)$
- **explizite Darstellung**: (eindeutig):  $u = r(i), i = g(u)$

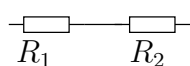
Sofern möglich, stets explizite Funktionsgleichungen verwenden!

### 2.2 Eigenschaften

- **gepolt/ungepolt**: bei ungepolteten Bauteilen ist die Kennlinie punktsymmetrisch zum Ursprung; d.h. falls  $(u, i) \in \mathcal{F} \Rightarrow (-u, -i) \in \mathcal{F}$
- **aktiv/passiv**:  $\mathcal{F}$  heißt aktiv, falls  $\exists (u, i) \in \mathcal{F} : u \cdot i < 0$  (Kennlinie besitzt einen gewissen Teil im zweiten oder vierten Quadranten)  $\mathcal{F}$  heißt passiv, falls  $\forall (u, i) \in \mathcal{F} : u \cdot i > 0$  (Kennlinie verläuft nur im ersten und dritten Quadranten)
- **verlustfrei/verlustbehaftet**:  $\mathcal{F}$  heißt verlustfrei, falls  $\forall (u, i) \in \mathcal{F} : u \cdot i = 0$ ,  $\mathcal{F}$  heißt verlustbehaftet, falls  $\exists (u, i) \in \mathcal{F} : u \cdot i \neq 0$
- **quellenfrei**:  $(u = 0V, i = 0A) \in \mathcal{F}$
- **stromgesteuert**: es existiert eine explizite Beschreibung der Form  $u = r(i)$  (Strom als steuernde Größe für die Spannung)
- **spannungsgesteuert**: es existiert eine explizite Beschreibung der Form  $i = g(u)$  (Spannung als steuernde Größe für den Strom)
- **strenglinear**: Kennlinie des Bauteils ist eine lineare Funktion mit  $(u = 0V, i = 0A) \in \mathcal{F}$
- **linear**: Kennlinie des Bauteils ist eine affine Funktion:  $(u = 0V, i = 0A) \notin \mathcal{F}$  im Allgemeinen
- **dual**: Strom und Spannung ändern ihre Rolle:  $(u, i) \in \mathcal{F} \Rightarrow (R_d i, \frac{u}{R_d}) \in \mathcal{F}_d$ ; graphisch geschieht eine Dualwandlung durch Spiegelung der Kennlinie an der Winkelhalbierenden des ersten und dritten Quadranten (auf richtige Skaleneinteilung achten)

### 2.3 Zusammenschaltung von Eintoren

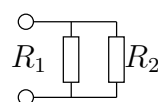
→ **Serienschaltung**:



$$R_{ges} = R_1 + R_2$$

Graphisches Vorgehen: Addition der Spannungswerte bei gleichen Stromwerten (Graphen nebeneinander)

→ **Parallelschaltung**:



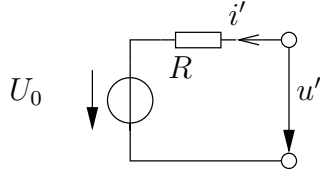
$$R_{ges} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = G_1 + G_2$$

Graphisches Vorgehen: Addition der Stromwerte bei gleichen Spannungswerten (Graphen untereinander)

### 2.4 Quellwandlungen

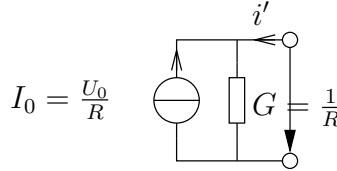
Oftmals kann sich die Analyse einer Schaltung vereinfachen, wenn eine Quellwandlung vorgenommen wird. Insbesondere bei einer Knotenspannungsanalyse ist dieser Schritt sogar erforderlich:

→ **Helmholtz-Thévenin:**



$$u' = U_0 + Ri'$$

→ **Mayer-Norton:**

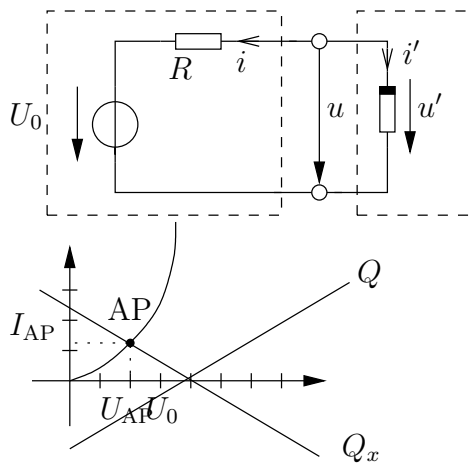


$$I_0 = \frac{U_0}{R}$$

$$i' = Gu' - GU_0 = Gu' - I_0, \text{ mit } G = \frac{1}{R}$$

ACHTUNG! Geänderte Zählpfeilrichtung unbedingt beachten!

### 2.5 Linearisierung von nicht-linearen Bauelementen



1. Arbeitspunktbestimmung (graphisch oder rechnerisch): hierzu ist zunächst eine Aufteilung der Schaltung in Quellen- und Lastentor nötig (wie auch in nebenstehender Graphik veranschaulicht)

- graphische Arbeitspunktbestimmung: hierzu wird in den Graphen des Eintors die externe Quellenkennlinie  $Q_x$  (Quellenkennlinie  $Q$  gespiegelt an der  $u$ -Achse) eingezeichnet; die hierdurch entstehenden Schnittpunkt spezifizieren mögliche APs
- rechnerische Arbeitspunktbestimmung: der Ansatz hierfür besteht in den beiden folgenden Gleichungen, die nach einer passenden Variablen aufgelöst und anschließend in einander eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} u &= u' \\ i &= -i' \end{aligned}$$

2. Linearisierung der Beschreibungsgleichungen  $u = r(i), i = g(u)$  in der Umgebung des AP

- graphische Linearisierung: Errichten einer Tangente an die Eintor-Kennlinie im gemeinsamen AP
- rechnerische Linearisierung: Berechnen der Steigung der Tangente durch Ableiten im AP, Einsetzen in die Punkt-Steigungs-Form ( $y = m(x - x_0) + y_0$ )

$$\begin{aligned} \left. \frac{dr(i)}{di} \right|_{AP} &= r \Rightarrow \Delta u = r(\Delta i - I_{AP}) + U_{AP} \\ \left. \frac{dg(u)}{du} \right|_{AP} &= g \Rightarrow \Delta i = g(\Delta u - U_{AP}) + I_{AP} \end{aligned}$$

2.6 Wichtige Eintore

Bauteilsymbol	Beschreibung	Kennlinie
	<b>Leerlauf:</b> $u = \text{beliebig}, i = 0$	
	<b>Kurzschluss:</b> $u = 0, i = \text{beliebig}$	
	<b>Nullator:</b> $u = 0, i = 0$	
	<b>Norator:</b> $u = \text{beliebig}, i = \text{beliebig}$	
 $R = \frac{1}{G}$	<b>Widerstand:</b> $u = Ri, i = Gu$	
	<b>konkaver Widerstand:</b> beschrieben durch das Parameterpaar $(G, U)$ : Kennlinie besteht demnach aus einer Halbgerade von $(-\infty, U)$ auf der $u$ -Achse sowie einer weiteren Halbgeraden vom Punkt $(U, 0)$ aus und der Steigung $G$ ; kann zur besseren Modellierung einer realen Diode genutzt werden $G$	
	<b>konvexer Widerstand:</b> beschrieben durch das Parameterpaar $(R, I)$ : Kennlinie besteht demnach aus einer Halbgerade von $(-\infty, I)$ auf der $i$ -Achse sowie einer weiteren Halbgeraden vom Punkt $(0, I)$ und der Steigung $1/R$	
 reale Diode  ideale Diode	<b>pn-Diode:</b> $u = U_T(\ln(\frac{i}{I_s} + 1)), i = I_s(e^{u/U_T} - 1)$ <b>ideale Diode:</b> $i_d = 0A$ für $u_D < 0V$ , $i_d = \text{beliebig}$ für $u_D = 0V$ (bei Schaltungsanalyse jeweils Fallunterscheidung nach den beiden Bereichen notwendig)	
	<b>Zenerdiode:</b> unterhalb der Zenerspannung $U_Z$ fließt ein großer Strom (Zener-effekt); häufig zur Spannungsstabilisierung eingesetzt	
	<b>Spannungsquelle:</b> $u = U_0, i = \text{beliebig}$	
	<b>Stromquelle:</b> $u = \text{beliebig}, i = I_0$	

### 3 Zweitore (Vierpole)

#### 3.1 Beschreibungsformen

→ **Kernbeschreibung:** diese entspricht der impliziten Beschreibung bei Eintoren:  $(\mathbf{M} \quad \mathbf{N}) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{pmatrix} = 0$ ; sind  $\mathbf{M}$  oder  $\mathbf{N}$  invertierbar so lassen sich hieraus auch die entsprechenden expliziten Beschreibungen gewinnen

→ **Bildbeschreibung:**  $\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{c}$ ; die Matrix

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1^{(1)} & u_1^{(2)} \\ u_2^{(1)} & u_2^{(2)} \\ i_1^{(1)} & i_1^{(2)} \\ i_2^{(1)} & i_2^{(2)} \end{pmatrix}$$

ist dabei die Betriebsmatrix, welche stets durch zwei möglichst einfache, linear unabhängige Messungen (z.B. 1. Messung  $u_1^{(1)} = 1V, u_2^{(1)} = 0V$ , 2. Messung:  $u_1^{(2)} = 0V, u_2^{(2)} = 1V$ ) bestimmt werden kann; folglich keine eindeutige Lösung möglich, da beliebig mit Skalar multiplizierbar

→ **explizite Beschreibung:**

- Widerstandsbeschreibung:  $u_1 = r_1(i_1, i_2), u_2 = r_2(i_1, i_2)$
- Leitwertsbeschreibung:  $i_1 = g_1(u_1, u_2), i_2 = g_2(u_1, u_2)$
- Hybridbeschreibung:  $u_1 = h_1(i_1, u_2), i_2 = h_2(i_1, u_2)$
- inverse Hybridbeschreibung:  $i_1 = h'_1(u_1, i_2), u_2 = h'_2(u_1, i_2)$
- Kettenbeschreibung:  $u_1 = a_1(u_2, -i_2), i_1 = a_2(u_2, -i_2)$
- inverse Kettenbeschreibung:  $u_2 = a'_1(u_1, -i_1), i_2 = a'_2(u_1, -i_1)$

#### 3.2 Umrechnen der Zweitormatrizen

Tabelle zur Umrechnung siehe letzte Seite dieser Formelsammlung.

#### 3.3 Eigenschaften

→ **verlustlos:**  $\forall t : p_1(t) + p_2(t) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{i} = 0$ ; anderenfalls ist das Zweitor verlustbehaftet

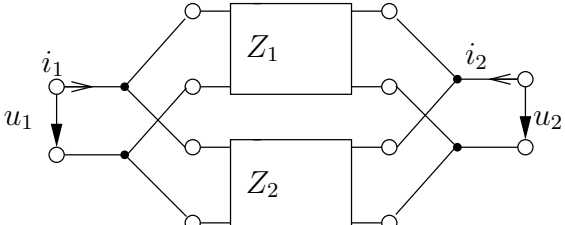
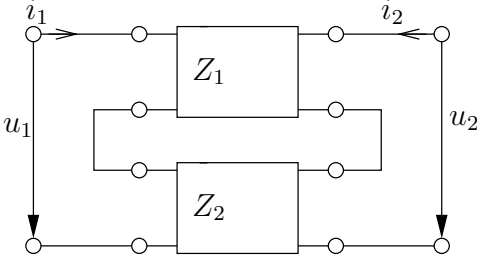
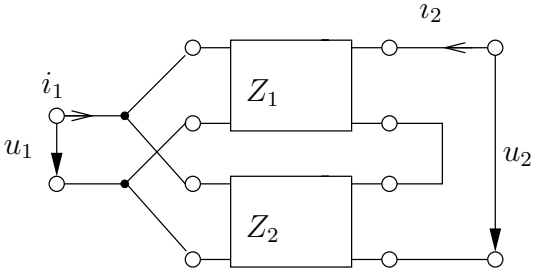
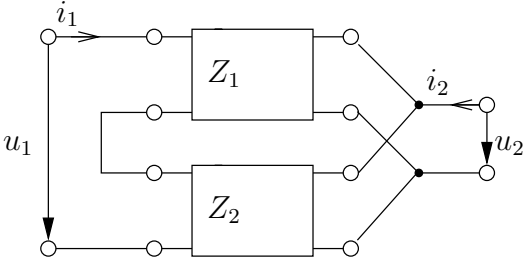
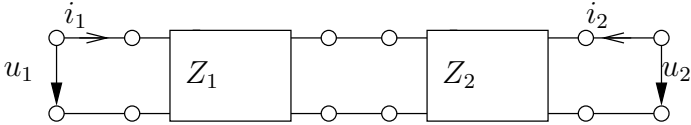
→ **aktiv/passiv:**  $\mathcal{F}$  heißt aktiv, falls  $\exists \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{pmatrix} \in \mathcal{F} : \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{i} < 0$ ; der Fall eines passiven Zweitores liegt also vor wenn  $\forall \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{pmatrix} \in \mathcal{F} : \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{i} \geq 0$ ; Aktivität und Verlustlosigkeit schließen demnach einander aus!

→ **Dualität:** wie auch bei Eintoren tauschen hier  $\mathbf{u}$  und  $\mathbf{i}$  über die Dualitätskonstante  $R_d$  ihre Rollen:  $\mathbf{U} = R_d \cdot \mathbf{I}_d, \mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}_d}{R_d}$

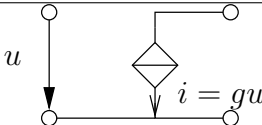
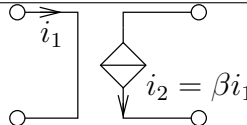
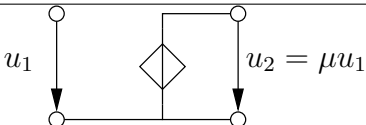
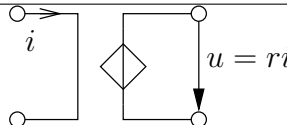
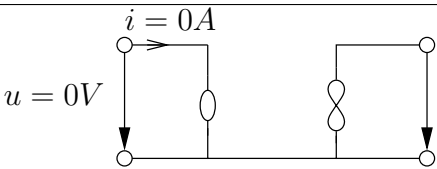
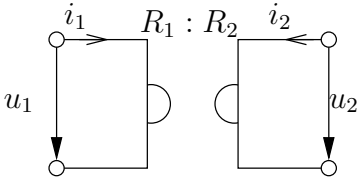
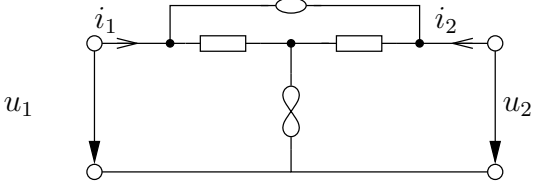
→ **Umkehrbarkeit:** ein Vertauschen der beiden Tore hat keinen Einfluss auf den Betriebsraum;  $\mathbf{R} = \mathbf{PRP}, \mathbf{G} = \mathbf{PGP}, \mathbf{H} = \mathbf{PH'P}, \mathbf{A} = \mathbf{A'}$ , wobei  $\mathbf{P}$  die sog. Permutationsmatrix  $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  bezeichnet

→ **Reziprozität:** Übertragungssymmetrie:  $\mathbf{G} = \mathbf{G}^T, \mathbf{R} = \mathbf{R}^T, \det \mathbf{A} = \det \mathbf{A}' = 1$

3.4 Verschaltung von Zweitoren

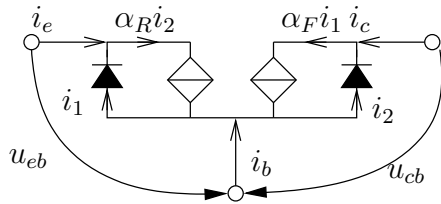
<p><b>Parallelschaltung:</b></p>  <p><math>G_{ges} = G_{Z_1} + G_{Z_2}</math></p>	<p><b>Serienschaltung</b></p>  <p><math>R_{ges} = R_{Z_1} + R_{Z_2}</math></p>
<p><b>Parallelserienschaltung:</b></p>  <p><math>H'_{ges} = H'_{Z_1} + H'_{Z_2}</math></p>	<p><b>Serienparallelschaltung</b></p>  <p><math>H_{ges} = H_{Z_1} + H_{Z_2}</math></p>
<p><b>Kettenschaltung</b></p>  <p><math>A_{ges} = A_{Z_1} \cdot A_{Z_2}</math> oder <math>A'_{ges} = A'_{Z_2} \cdot A'_{Z_1}</math></p>	

3.5 Wichtige Zweitore

<p><b>USI</b></p>  <p><math>\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ g &amp; 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 &amp; \frac{-1}{g} \\ 0 &amp; 0 \end{pmatrix}</math></p>	<p><b>ISI</b></p>  <p><math>\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ \beta &amp; 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ 0 &amp; -\frac{1}{\beta} \end{pmatrix}</math></p>
<p><b>USU</b></p>  <p><math>\mathbf{H}' = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ \mu &amp; 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} &amp; 0 \\ 0 &amp; 0 \end{pmatrix}</math></p>	<p><b>ISU</b></p>  <p><math>\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ r &amp; 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ \frac{1}{r} &amp; 0 \end{pmatrix}</math></p>
<p><b>Nullor</b></p>  <p><math>\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 &amp; 0 \\ 0 &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ 1 &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ 0 &amp; 0 \end{pmatrix}</math></p>	
<p><b>Gyrator</b></p>  <p>Beschreibungsgleichungen: <math>u_1 = -i_2 R_1, u_2 = i_1 R_2</math></p> <p><math>\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 &amp; 0 \\ 0 &amp; 1 \end{pmatrix} \mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 &amp; R_1 \\ -R_2 &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 &amp; \frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_1} &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 &amp; -R_1 \\ R_2 &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 &amp; R_1 \\ \frac{1}{R_2} &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 0 &amp; -R_2 \\ -\frac{1}{R_1} &amp; 0 \end{pmatrix}</math></p> <p><i>Bedeutung/Aufgabe:</i> Anwendung als Dualwandler (Kapazität ↔ Induktivität, Stromquelle ↔ Spannungsquelle)</p>	
<p><b>NIK (Negativer Immitanz Konverter)</b></p>  <p><math>\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 &amp; k \\ 0 &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 &amp; 0 \\ 1 &amp; \frac{1}{k} \end{pmatrix} \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 &amp; -k \\ -k &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{H}' = \begin{pmatrix} 0 &amp; -\frac{1}{k} \\ -\frac{1}{k} &amp; 0 \end{pmatrix} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -k &amp; 0 \\ 0 &amp; \frac{1}{k} \end{pmatrix} \mathbf{A}' = \begin{pmatrix} -\frac{1}{k} &amp; 0 \\ 0 &amp; k \end{pmatrix}</math></p> <p><i>Bedeutung/Aufgabe:</i> Realisation eines negativen Widerstands</p>	

## 4 Bipolartransistoren

### 4.1 Ebers-Moll-Modell

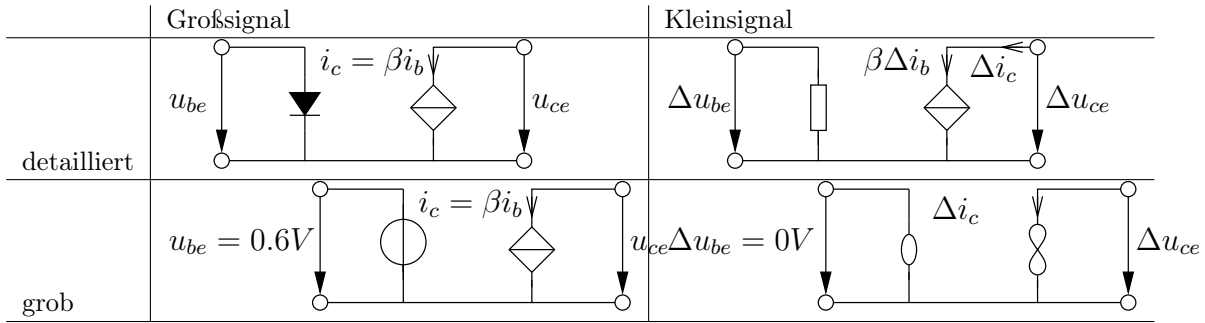


Vorwärtsbetrieb (normaler Betriebsmodus), npn-Typ:

→  $u_{cb} \geq 0$ : Kollektor-Basis-Diode sperrt

→  $u_{be} \geq 0$ : Emittter-Basis-Diode in Durchlassrichtung

### 4.2 Vereinfachende ESBs für Emitterschaltung



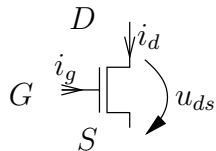
## 5 Feldeffekt-Transistoren, MOSFETS

→ **MOSFET**: Metall Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

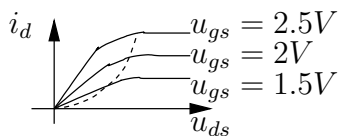
→ **CMOS**: Complementary Metall Oxide Semiconductor, d.h. Verwendung komplementärer Bauteile in einer Schaltung (p-MOS, n-MOS); Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass in den beiden Hauptbetriebsbereichen  $u = U_B$  und  $u = 0V$  kaum eine Stromentnahme aus der Quelle stattfindet

### 5.1 Shichman-Hodges-Modell

→ **n-Kanal-Enhancement** (normally-off)



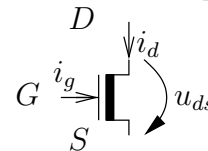
$$U_{th} \geq 0$$



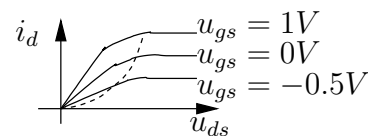
$$i_g = 0A$$

$$i_d = \begin{cases} 0, & u_{gs} - U_{th} \leq 0 \quad (\text{Sperrbereich}) \\ \beta \left( (u_{gs} - U_{th})u_{ds} - \frac{1}{2}u_{ds}^2 \right) (1 + \lambda u_{ds}), & 0 \leq u_{gs} - U_{th} \leq u_{ds} \quad (\text{linearer Bereich}) \\ \frac{1}{2}\beta (u_{gs} - U_{th})^2 (1 + \lambda u_{ds}), & 0 \leq u_{gs} - U_{th} \leq u_{ds} \quad (\text{Sättigungsbereich}) \end{cases}$$

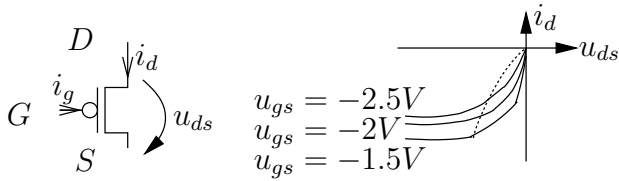
→ **n-Kanal-Depletion** (normally-on)



$$U_{th} \leq 0$$



→ **p-Kanal-Enhancement** (p-Kanal-Depletion findet in der Praxis keine Anwendung):



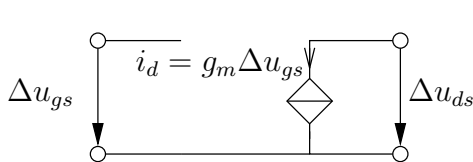
$$i_g = 0A$$

$$i_d = \begin{cases} 0, & u_{gs} - U_{th} \geq 0 \quad (\text{Sperrbereich}) \\ -\beta \left( (u_{gs} - U_{th})u_{ds} - \frac{1}{2}u_{ds}^2 \right) (1 - \lambda u_{ds}), & 0 \geq u_{gs} - U_{th} \geq u_{ds} \quad (\text{linearer Bereich}) \\ -\frac{1}{2}\beta(u_{gs} - U_{th})^2(1 - \lambda u_{ds}), & 0 \geq u_{gs} - U_{th} \geq u_{ds} \quad (\text{Sättigungsbereich}) \end{cases}$$

Der Term  $1 + \lambda u_{ds}$  beschreibt die sog. Kanallängenmodulation, also eine Bauteilspezifische Eigenart. Diese Erweiterung kann in der Regel vernachlässigt werden.

### 5.2 Kleinsignal-ESB

→ **Sättigung:**

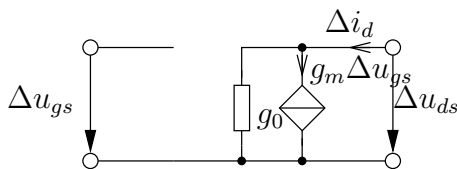


$$i_d = \frac{1}{2}\beta(u_{gs} - U_{th})^2$$

$$\left. \frac{\partial i_d}{\partial u_{gs}} \right|_{AP} = \beta(u_{gs} - U_{th}) = g_m$$

$$\left. \frac{\partial i_d}{\partial u_{ds}} \right|_{AP} = 0$$

→ **linearer Bereich:**



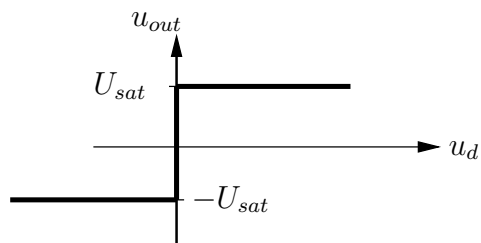
$$i_d = \beta \left( (u_{gs} - U_{th})u_{ds} - \frac{1}{2}u_{ds}^2 \right)$$

$$\left. \frac{\partial i_d}{\partial u_{gs}} \right|_{AP} = \beta U_{ds} = g_m$$

$$\left. \frac{\partial i_d}{\partial u_{ds}} \right|_{AP} = \beta(u_{gs} - U_{th}) - \beta U_{ds} = g_0$$

### 6 Operationsverstärker

→ **Kennlinie eines idealisierten Operationsverstärkers** (mit unendlicher Verstärkung):

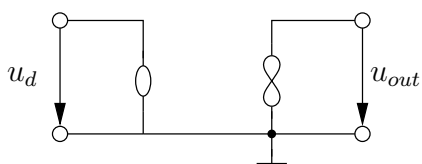


$$u_{out} = -U_{sat}, u_d < 0V$$

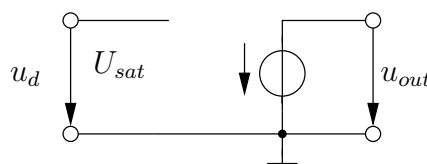
$$u_{out} = 0V, u_d = 0V \quad (\text{Nullmodell})$$

$$u_{out} = +U_{sat}, u_d > 0V$$

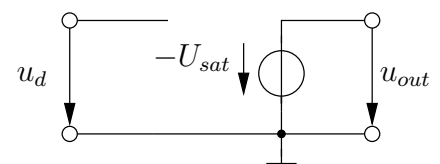
→ **ESB:**



Nullmodell, d.h.  $u_d = 0V$



positive Sättigung



negative Sättigung



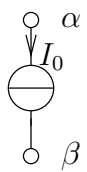
## 7 Knotenspannungsanalyse

### 7.1 Generelles Vorgehen

1. Linearisierung
2. nicht-spannungsgesteuerte Elemente (Spannungsquelle, ISI, ISU) ersetzen (z.B. mittels Gyrator, Quellwandlung vornehmen,  $R$  und  $-R$  in Reihe)
3. Knoten bis auf Masse nummerieren
4. einzelne Elemente wie unten gezeigt in Knotenspannungsmatrix  $\mathbf{Y}_K$  eintragen

### 7.2 Eintragung von Bauelementen

#### Quellen:



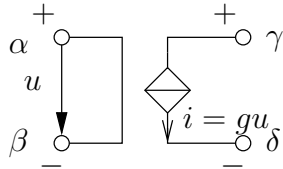
$$\mathbf{i}_q = \begin{matrix} \vdots \\ \alpha \begin{pmatrix} -I_0 \\ \vdots \\ I_0 \\ \vdots \end{pmatrix} \\ \beta \end{matrix}$$

#### Widerstände:



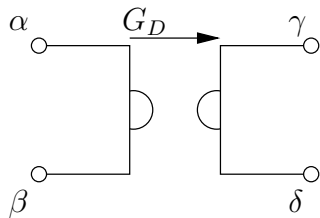
$$\mathbf{Y}_K = \begin{matrix} \alpha & \beta \\ \alpha \begin{pmatrix} \dots & G & \dots & -G & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta \begin{pmatrix} \dots & -G & \dots & G & \dots \end{pmatrix} \end{matrix}$$

#### USI:



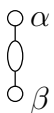
$$\mathbf{Y}_K = \begin{matrix} \alpha(+), \beta(-) \\ \gamma(+), \delta(-) \\ \begin{pmatrix} \dots & g & \dots & -g & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & -g & \dots & g & \dots \end{pmatrix} \end{matrix}$$

#### Gyrator:



$$\mathbf{Y}_K = \begin{matrix} \dots & \alpha & \dots & \beta & \dots & \gamma & \dots & \delta \\ \alpha \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & G_D & \dots & -G_D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -G_D & \dots & G_D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma \begin{pmatrix} \dots & -G_D & \dots & G_D & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \delta \begin{pmatrix} \dots & G_D & \dots & -G_D & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \end{matrix}$$

#### Nullator:



Addition der Spalten  $\alpha$  und  $\beta$ ; Ergebnis hiervon wird z.B. in Spalte  $\alpha$  zusammengefasst, Spalte  $\beta$  wird gestrichen – entsprechendes geschieht mit  $u_{k\beta}$  im  $\mathbf{u}_K$  Vektor; ist einer der beiden Knoten der Bezugsknoten, so wird die betreffende Spalte komplett gestrichen

#### Norator:



Addition der Zeilen  $\alpha$  und  $\beta$ ; Ergebnis hiervon wird z.B. in Zeile  $\alpha$  zusammengefasst, Zeile  $\beta$  wird gestrichen – entsprechendes geschieht mit  $i_{q\beta}$  im  $\mathbf{i}_q$  Vektor; ist einer der beiden Knoten Bezugsknoten, so wird die betreffende Zeile komplett gestrichen

	<b>R</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>H'</b>	<b>A</b>	<b>A'</b>
<b>R</b>	$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\det \mathbf{G}} \begin{pmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}} \begin{pmatrix} \det \mathbf{H} & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h'_{11}} \begin{pmatrix} 1 & -h'_{12} \\ h'_{21} & \det \mathbf{H}' \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a_{21}} \begin{pmatrix} a_{11} & \det \mathbf{A} \\ 1 & a_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a'_{21}} \begin{pmatrix} a'_{22} & 1 \\ \det \mathbf{A}' & a'_{11} \end{pmatrix}$
<b>G</b>	$\frac{1}{\det \mathbf{R}} \begin{pmatrix} r_{22} & -r_{12} \\ -r_{21} & r_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \begin{pmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} & \det \mathbf{H} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h'_{22}} \begin{pmatrix} \det \mathbf{H}' & h'_{12} \\ -h'_{21} & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a_{12}} \begin{pmatrix} a_{22} & -\det \mathbf{A} \\ -1 & a_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a'_{12}} \begin{pmatrix} a'_{11} & -1 \\ -\det \mathbf{A}' & a'_{22} \end{pmatrix}$
<b>H</b>	$\frac{1}{r_{22}} \begin{pmatrix} \det \mathbf{R} & r_{12} \\ -r_{21} & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{g_{11}} \begin{pmatrix} 1 & -g_{12} \\ g_{21} & \det \mathbf{G} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\det \mathbf{H}'} \begin{pmatrix} h'_{22} & -h'_{12} \\ -h'_{21} & h'_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a_{22}} \begin{pmatrix} a_{12} & \det \mathbf{A} \\ -1 & a_{21} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a'_{11}} \begin{pmatrix} a'_{12} & 1 \\ -\det \mathbf{A}' & a'_{21} \end{pmatrix}$
<b>H'</b>	$\frac{1}{r_{11}} \begin{pmatrix} 1 & -r_{12} \\ r_{21} & \det \mathbf{R} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{g_{22}} \begin{pmatrix} \det \mathbf{G} & g_{12} \\ -g_{21} & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\det \mathbf{H}} \begin{pmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} h_{11} & h'_{12} \\ h_{21} & h'_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a_{11}} \begin{pmatrix} a_{21} & -\det \mathbf{A} \\ 1 & a_{12} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{a'_{22}} \begin{pmatrix} a'_{21} & -1 \\ \det \mathbf{A}' & a'_{12} \end{pmatrix}$
<b>A</b>	$\frac{1}{r_{21}} \begin{pmatrix} r_{11} & \det \mathbf{R} \\ 1 & r_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{g_{21}} \begin{pmatrix} -g_{22} & -1 \\ -\det \mathbf{G} & -g_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h_{21}} \begin{pmatrix} -\det \mathbf{H} & -h_{11} \\ -h_{22} & -1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h'_{21}} \begin{pmatrix} 1 & h'_{22} \\ h'_{11} & \det \mathbf{H}' \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\det \mathbf{A}'} \begin{pmatrix} a'_{22} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{11} \end{pmatrix}$
<b>A'</b>	$\frac{1}{r_{12}} \begin{pmatrix} r_{22} & \det \mathbf{R} \\ 1 & r_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{g_{12}} \begin{pmatrix} -g_{11} & -1 \\ -\det \mathbf{G} & -g_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h_{12}} \begin{pmatrix} 1 & h_{11} \\ h_{22} & \det \mathbf{H} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{h'_{12}} \begin{pmatrix} -\det \mathbf{H}' & -h'_{22} \\ -h'_{11} & -1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\det \mathbf{A}} \begin{pmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{pmatrix}$