

Gleichstrom [DC - direct current; kein Vorzeichenwechsel]

Wechselstrom [AC - alternating current]

Ladung:  $[Q] = 1 \text{ C}$     Strom:  $[I] = 1 \text{ A}$     Spannung:  $[U] = 1 \text{ V}$

Widerstand:  $[R] = 1 \Omega$     Leitwert:  $[G] = 1 \Omega^{-1}$ .

Ein elektronisch positiver Strom fließt von + nach -.

**Masse:** Bezugspunkt für Differenzmessungen des Potentials.

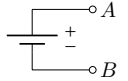


**Erde:** Potential der Erdoberfläche.

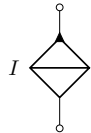
Das ohm'sche Gesetz:

$$R = \frac{U}{I}$$

**Ideale Spannungsquelle:** elektromotorische Kraft  $E = U_{AB}$  unabhängig von Last, Innenwiderstand  $R_i = 0$ .



**Ideale Stromquelle:** Strom  $I_0$  unabhängig von Last, Innenwiderstand  $R_i = \infty$ .



Lineare Systeme [geradlinige  $I$ - $U$ -Kennlinie durch den Ursprung] heißen passiv [keine Verstärkung oder Steuerung] oder aktiv [Steuerung, Verstärkung möglich].

Knoten: Stromaufzweigung möglich.

Anzahl Knoten =  $K$

Zweig: verbindet zwei Knoten durch Zweipolelemente.

Anzahl Zweige =  $Z$

Masche: ein über Zweige geschlossener Umlauf.

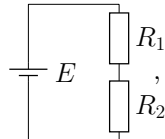
Anzahl Maschen =  $M$

Knotensatz:  $\sum_N I_N = 0$     ,    Maschensatz:  $\sum_N U_N = 0$

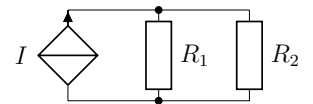
Maschenstromanalyse: Schaltung vereinfachen; Festlegen der Maschen + Umlaufsinn + Stromrichtungen; Spannungsabfälle eintragen; Maschen- und Knotensätze  $\rightarrow$  Gleichungssystem aufstellen; lösen.

[ $\exists K - 1$  linear unabhängige Knoten,  $Z - [K - 1]$  linear unabhängige Maschen]

Spannungsteiler:  $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E$

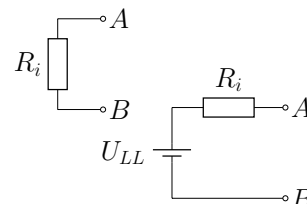
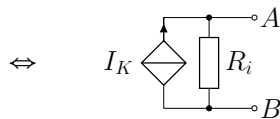


Stromteiler:  $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$



Ersatzschaltbilder: passiv - Innenwiderstandersatzschaltung

aktiv - Leerlaufspannungersatzschaltung



Kurzschlussstromersatzschaltung

$$[U_{LL} = R_i I_K]$$

$\Rightarrow$  Ersatzschaltbilder für reale Strom-/Spannungsquellen!

Für eine reale Spannungsquelle ist die entnommene Leistung maximal wenn  $R_{\text{Last}} = R_i$  .

**Superpositionsprinzip:** (1) Entfernen aller Quellen bis auf eine [Entfernte durch idealen Widerstand ersetzen].

(2) Berechnung der Klemmspannung  $U_{AB}$  mittels der verbliebenen Quelle.

(3) Wiederholung von (1), (2) für alle Quellen.

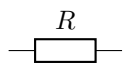
(4)  $U_{AB} = \sum_i U_{AB}^{(i)}$ .

[lineare BE!]

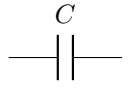
**Widerstand:**

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

, Normreihe  $E_x, x \in \{6, 12, 24, 48, \dots\} \rightarrow x$  Werte je Dekade [ $\sqrt[x]{10^n}, 0 \leq n \leq x$ ]



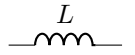
**Kondensator:**  $C = \frac{Q}{U}$  ,  $[C] = F$ . [Plattenkondensator:  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$ ]



Elektrolytkondensator: polaritätsabhängig!



**Spule:**  $L = \frac{d\Phi}{dt} = A_L N^2$  ,  $[L] = H$ . [Zylinderspule:  $L = \mu_0 \mu_r \frac{A}{l} N^2$ ]



Aufladen eines Kondensators  $C$  über einen Widerstand  $R$  mit angelegter Spannung  $U_E$ :  $U_C(t) = U_E \left[ 1 - e^{-\frac{1}{RC}t} \right]$  .  
 Charakteristische Zeit  $\tau = RC$  ; nach ca.  $5\tau$  Aufladevorgang abgeschlossen [ $\sim 0,7\%$ ].  $I_C(t) = \frac{U_E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}$

Gleichstrom [DC - direct current]

Wechselstrom [AC - alternating current]

Wechselspannungsquelle ; Wechselstromquelle

Widerstand:  $U_R = RI_R(t)$  , Kondensator:  $U_C = \frac{1}{C} \int I_C(t') dt'$  , Spule:  $U_L = L \frac{dI_L}{dt}$  .

Komplexe Beschreibung elektrischer Größen:  $U(t) = U_0 e^{i[\omega t + \varphi_0]}$  [wobei nur  $\text{Re}(U(t))$  physikalisch ist!]  
 $\Rightarrow \frac{d}{dt} \dots = i\omega \dots$  ,  $\int dt \dots = \frac{1}{i\omega} \dots$  [nur für Signale einer Frequenz  $\omega$  gültig!]

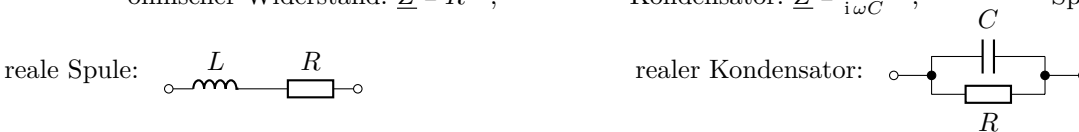
Gleichwert:  $\overline{U(t)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U(t') dt'$  , Gleichrichtwert:  $|\overline{U(t)}| = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |U(t')| dt'$  ,

**Effektivwert:**  $U_{\text{eff}} = \pm \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} U^2(t') dt'}$  .  $U_{\text{eff,sin}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0$   
 $U_{\text{eff,Dreieck}} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_0$

Komplexer Widerstand:  $\underline{Z} = \frac{U}{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} e^{i[\varphi_u - \varphi_i]} = \hat{Z} e^{i\varphi_z} = R + iX$   
 $G$  - Wirkleitwert [Konduktanz]  
 $B$  - Blindleitwert [Suszeptanz]  
 $Y$  - Scheinleitwert [Admittanz]

Komplexe Leistung:  $\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + iQ$  , gemittelt  $\overline{S} = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{S}(t) dt$   
 $P$  - Wirkleistung  
 $Q$  - Blindleistung  
 $S$  - Scheinleistung

ohmscher Widerstand:  $\underline{Z} = R$  , Kondensator:  $\underline{Z} = \frac{1}{i\omega C}$  , Spule:  $\underline{Z} = i\omega L$  .

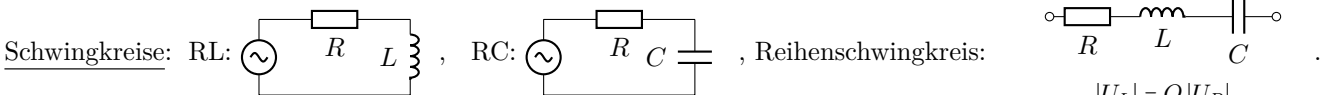


Der Verlustwinkel  $\delta = 90^\circ - \varphi$ ; Die **Güte**  $Q = \frac{1}{\tan(\delta)}$  . Die **Übertragungsfunktion**  $g(\omega) = \frac{U_A}{U_E}$  .

Pegelmaß:  $L = \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right)$  ,  $[L] = 1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$ .

$\pm 3 \text{ dB} \hat{=} U \approx U_0 \sqrt{2}^{\pm 1}$   
 $\pm 20 \text{ dB} \hat{=} U = U_0 10^{\pm 1}$

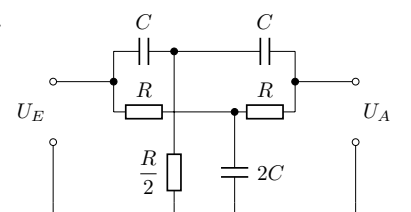
Filterordnung: Anzahl der Blindkomponenten in der Schaltung [ $\Rightarrow L' = nL$ ].



$|U_L| = Q |U_R|$

Äquivalent zur obigen Definition der Güte [ $Q = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{\text{Blindanteil}}{\text{Wirkanteil}}$ ] gilt:  $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{-3\text{dB}}}$  .

TT-Filter:  $g(\omega) = \frac{1 + [i\omega RC]^2}{1 + [i\omega RC]^2 + 4i\omega RC}$



Bändermodell: **Valenzband** - letztes im Grundzustand voll besetztes Band; **Leitungsband** - erstes, im Grundzustand nicht voll besetztes Band; **Bandlücke**  $\Delta E_G$ ; **Fermi-Energie** - höchste im Grundzustand besetzte Energie.

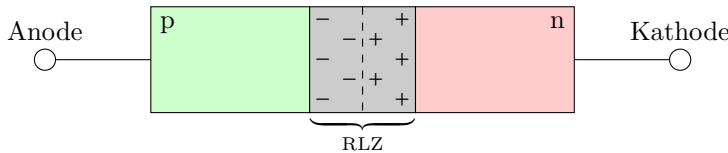
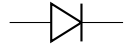
n-Dotierung: wie H-Atom auf Si-Hintergrund.

p-Dotierung: wie „Anit-H-Atom“ auf Si-Hintergrund.

Deren Kerne sind fest im Si-Gitter, die äußeren Ladungsträger jedoch wesentlich weitreichweitiger als die normaler H-Atome [ca. 10 nm] und somit „frei“ beweglich.

p-n-Übergang: Entstehung einer lokalen Verarmungszone freier Ladungsträger in Grenzschicht.

**Diode**: In der rechten Abbildung ist die p-dotierte Schicht links [Anode] und die n-dotierte rechts [Kathode].



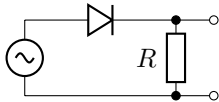
Durchlassrichtung: + an Anode, - an Kathode.  
Sperrrichtung: - an Anode, + an Kathode.

$I_S$  - Sperrstrom [ $\sim 10^{-12}$  A ...  $10^{-6}$  A]

In Durchflussrichtung beschreibt die Shockley-Gleichung die I-U-Kennlinie:

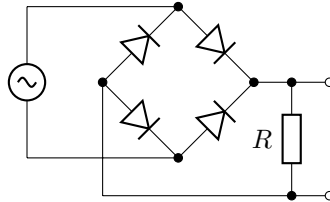
$$I_D = I_S \left[ e^{\frac{e-U_0}{k_B T}} - 1 \right]$$

Einweggleichrichter:



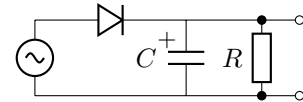
Zweiweggleichrichter:

[Graetz-Schaltung]



Glättung:

[Zeitkonstante  $\tau = RC$ ]

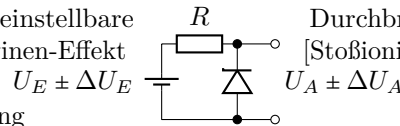


**Kapazitätsdiode**: Kapazität der Sperrschicht künstlich groß gemacht.



**Z-Diode**: In Sperrrichtung bei Produktion einstellbare durch Zener- [ $e^-$ -Tunneln] und Lawinen-Effekt großer Strom bei  $U_Z$  fließt.

Anwendung: Spannungsstabilisierung



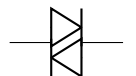
Durchbruchspannung [ $U_Z$ ], bei der [Stoßionisation in RLZ] ein „beliebig“  $U_A \pm \Delta U_A$

Zur Charakterisierung Stabilisierungsfaktor:  $S = \frac{\Delta U_E}{\Delta U_A} = \frac{R + r_d}{r_d}$  in obiger Schaltung mit dem differentiellen Widerstand  $r_d = \frac{dU}{dI}$  der Diode.

**Leuchtdiode**: LED - spezielles Material, dessen Leitungselektronen an der Bandlücke in Durchlassrichtung einen optischen Übergang vollziehen [Impulserhaltung]. Immer Vorwiderstand!



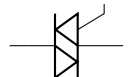
**Diac**: Leitfähig ab dem Überschreiten einer bestimmten Spannung [ $\sim 32$  V], bis wieder umgepolt wird.



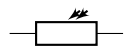
**Thyristor**: steuerbarer Einweggleichrichter.



**Triac**: 2 antiparallele Thyristoren mit gemeinsamen Gateschalter  $\rightarrow$  steuerbarer Zweiweggleichrichter.



**Fotowiderstand**: Photonen heben Elektronen in höheren Energiezustand an  $\rightarrow$  erhöhen Leitfähigkeit proportional zur Intensität [Ladungen absaugen!, langsam  $\tau \sim$  ms, Mindestintensität nötig].



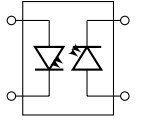
**Photodiode**: Als Photodiode in Sperrrichtung mit Hilfsspannung und Vorwiderstand [ $\tau \sim$  ns ...  $\mu$ s,  $U_{Sperr}^{max} < 30$  V] oder als Photoelement [Solarzelle] nutzbar.



Pin-Diode: Räumlich: p-dotierte Schicht, Isolator mit hoher Spannungsfestigkeit, n-dotierte Schicht

$\Rightarrow U_{Sperr}^{max}$  bis 500 V,  $f_{max} \sim 10 \dots 20$  GHz.

Optokoppler: galvanische Trennung der Signalübertragung.

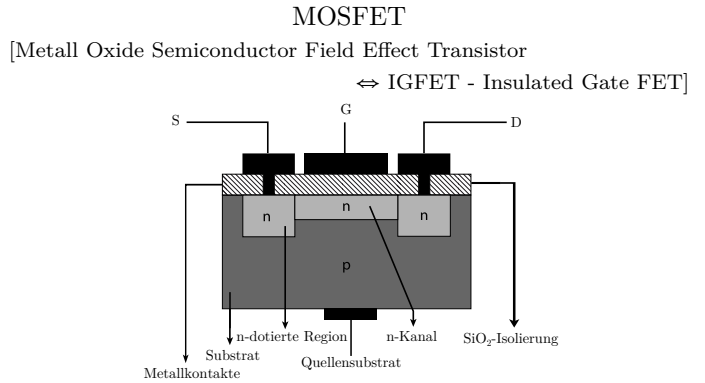
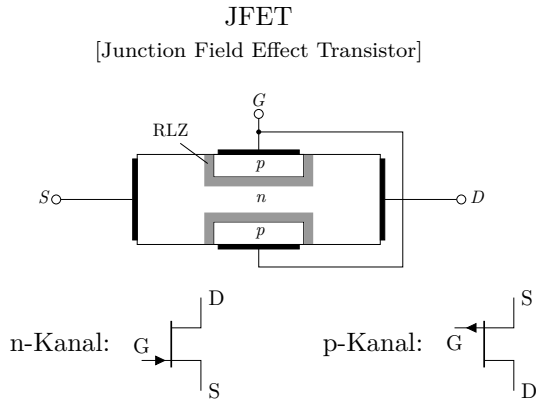


**Unipolartransistor:**

↳ 1 Ladungsträgerart

Feldeffekttransistoren [FET]

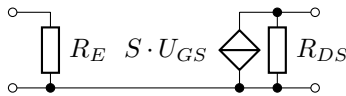
Isoliertes Gate steuert durch das von der angelegten Spannung induzierte elektrische Feld den Widerstand  $R_{DS}$ .  
 p-/n-Kanal: leitende Schicht p-/n-dotiert.



Abschnüren des Kanals durch  $U_{DS}$  mit  $U_{GS} = 0V$   
 $\Rightarrow U_{DS} = U_{PO}$  - Pinch-Off-Spannung.

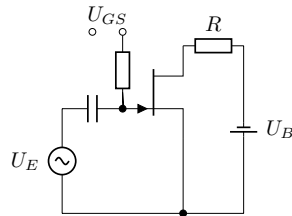
Steilheit: 
$$S = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{AP}$$

Ersatzschaltbild eines n-JFET's:



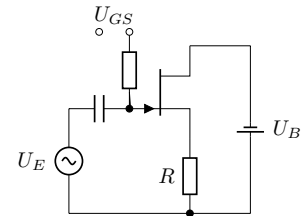
Source-Schaltung:

$$V_U = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_E} = -RS > 1.$$



Drain-Schaltung:

$$V_U = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_E} = \frac{RS}{1+RS} \leq 1.$$



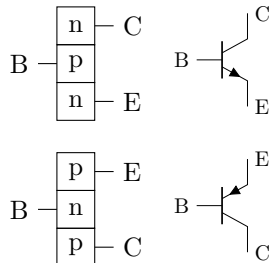
**Bipolartransistor:**

↳ 2 Ladungsträgerarten

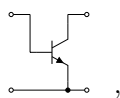
Basis, Collector, Emitter

$$U_B > U_E$$

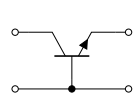
$$U_B < U_E$$



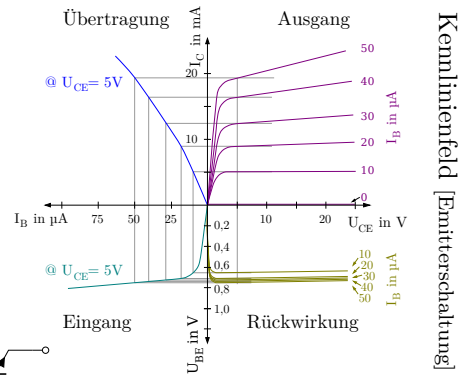
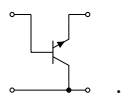
Emitterschaltung:



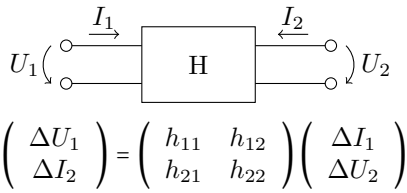
Basisschaltung:



Kollektorschaltung:

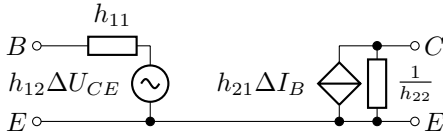


Matrixformalismus: [in linearer Näherung am Arbeitspunkt - Kleinsignalfall; mit Hybridmatrix]

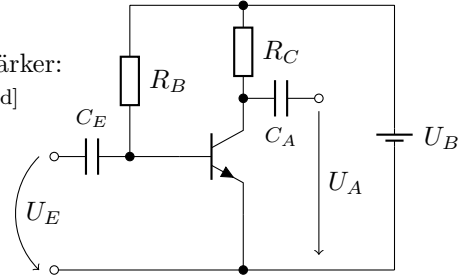


- $h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$  bei  $\Delta U_2 = 0$  - Kurzschlussingangswiderstand
- $h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$  bei  $\Delta I_1 = 0$  - Leerlaufspannungsrückwirkung
- $h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$  bei  $\Delta U_2 = 0$  - Kurzschlussvorwärtsstromverstärkung
- $h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}$  bei  $\Delta I_1 = 0$  - Leerlaufausgangsleitwert

AC-Ersatzschaltung der Emitterschaltung:

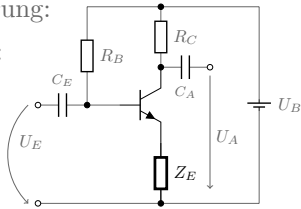


AC-Verstärker: [invertierend]



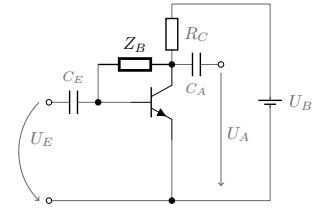
Spannungsverstärkung:  $V_U = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \left[ R_C \parallel R_L \parallel \frac{1}{h_{22}} \right]$   
 effektiv:  $R_{\text{Eing.}} = h_{11} \parallel R_B$  ,  $R_{\text{Ausg.}} = R_C \parallel \frac{1}{h_{22}}$ .

Temperaturstabilisierung:  
Stromgegenkopplung:



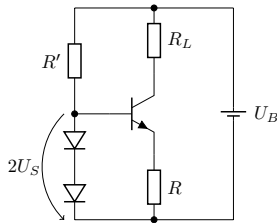
Spannungsgegenkopplung:

Mit  $Z_E$ , bzw.  $Z_B$  einem Bandpass entsprechenden Widerstand für das interessante Frequenzintervall.



[Kollektorschaltung:  $V_I = h_{21}$  - Stromverstärkung]

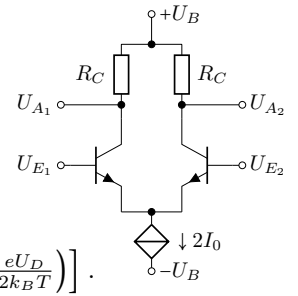
Konstantstromquelle:



$I_L = \frac{2U_S - U_{BE}}{R} \approx \frac{U_S}{R} = \text{const.}$

Differenzverstärker:

Gleichtaktspannung:  $U_{G1} = \frac{U_{E1} + U_{E2}}{2}$  ,  
 Differenzspannung:  $U_D = U_{E1} - U_{E2}$  ,  
 Ausgangss.:  $U_{A1/2} = U_B - I_0 R_C \left[ 1 \pm \tanh \left( \frac{eU_D}{2k_B T} \right) \right]$ .



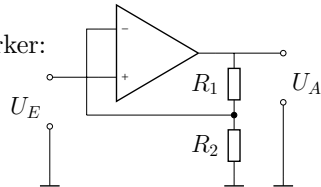
**Operationsverstärker [OPV]:**

$U_+$  nichtinvertierender Eingang ,  $U_-$  invertierender Eingang ,  $U_A = V [U_+ - U_-]$

[idealer OPV:  $V \rightarrow \infty$ , Signalanstiegszeit [→ slew rate] → 0, Eingangswiderstand  $R_E \rightarrow \infty$ , Ausgangswiderstand  $R_A \rightarrow 0$ , unendliche Bandbreite, kein Offset, Gleichaktunterdrückung → ∞]. Gegenkopplung für sinnvollen Betrieb nötig!

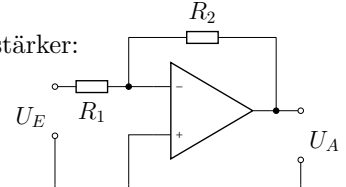
Nichtinvertierender Verstärker:

$V = 1 + \frac{R_1}{R_2}$



Invertierender Verstärker:

$V = -\frac{R_2}{R_1}$



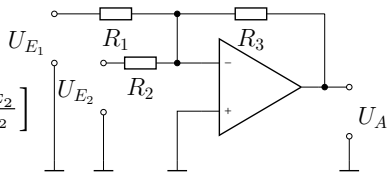
Statt reellen  $R_1, R_2$  kann man auch komplexe  $X_1, X_2$  wählen [⇒ Bandpass], dann gilt:  $V(\omega) = 1 + \frac{X_1}{X_2}$  respektive  $V(\omega) = -\frac{X_2}{X_1}$  .

Bestimmungsvorschrift bei Gegenkopplung:

1. OPV gedanklich entfernen;
2.  $U_E, U_A$  als gegeben annehmen; damit  $U_+, U_-$  ausrechnen;
3.  $U_+ = U_-$  fordern  $\Rightarrow U_A = f(U_E)$  .

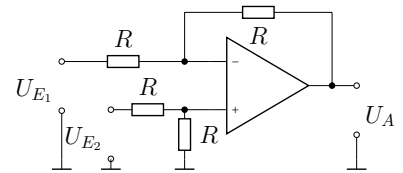
Addierer:

$$U_A = -R_3 \left[ \frac{U_{E1}}{R_1} + \frac{U_{E2}}{R_2} \right]$$



Subtrahierer:

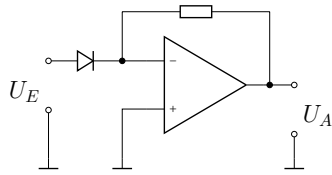
$$U_A = U_{E2} - U_{E1}$$



Multiplikation/Division: Rückführung auf Addition/Subtraktion über  $a \cdot b = e^{\ln(a) + \ln(b)}$  ,  $a/b = e^{\ln(a) - \ln(b)}$  .

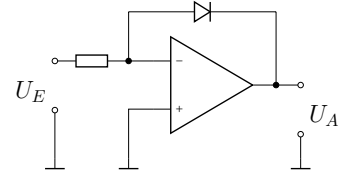
Exponentierer:

$$U_A = -R I_S e^{\frac{e^{-U_E}}{k_B T}}$$



Logarithmierer:

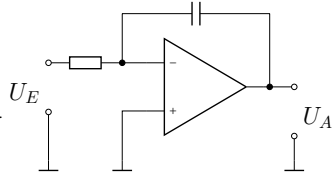
$$U_A = \frac{k_B T}{e^{-}} \ln \left( \frac{U_E}{R I_S} \right)$$



[ $I_S$  - Sperrstrom der Diode]

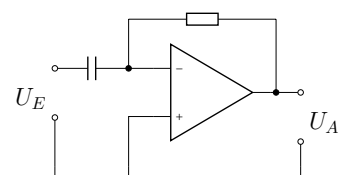
Integrierer:

$$U_A = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_E(\tau) d\tau$$



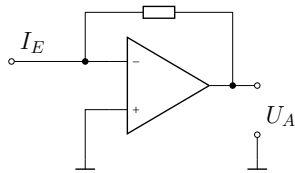
Differenzierer:

$$U_A = -RC \frac{dU_E}{dt}$$



Transimpedanzwandler:

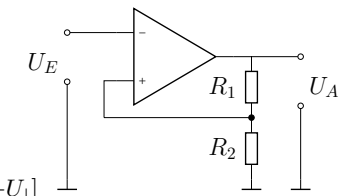
$$U_A = -R I_E$$



Schmitt-Trigger:

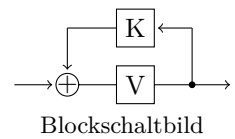
$$U_A = \begin{cases} +U_B & , U_+ > U_- \\ -U_B & , U_+ < U_- \end{cases}$$

Hysteresis!  $[U_{\downarrow} = \frac{R_2}{R_1+R_2} U_B, U_{\uparrow} = -U_{\downarrow}]$

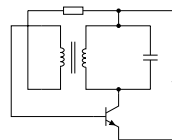


**Oszillatoren:**

Barkhausen'sche Anschwingbedingung:  $\underline{K} \underline{V} = |\underline{K}| |\underline{V}| \underbrace{e^{i[\varphi_K + \varphi_V]}}_{=1} \geq 1$  .



Prinzip: Dämpfungskompensation [z.B.: Meißner-Schaltung



, Hartley-Schaltung, Colpitts-Schaltung.]

Frequenz jedoch fest bei  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

RC-Oszillatoren: Frequenz  $\omega_0$  durch R und C einstellbar [Phasenschieber-Oszillator, Wien-Robinson-Oszillator].

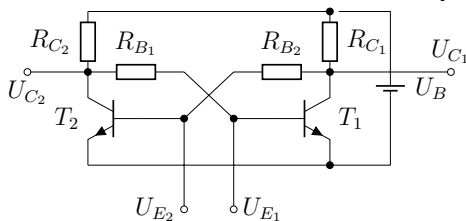
Quarzoszillatoren: hochgenaue Schwingung [Piezo-Effekt,  $\frac{\Delta f}{f} \approx 10^{-10}$ ].



**Multivibratoren:**

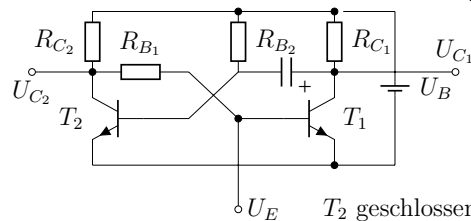
Bistabiler Multivibrator:

[Flip-Flop]



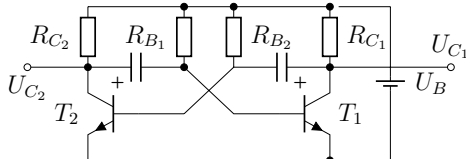
Monostabiler Multivibrator:

[Mono-Flop]



T2 geschlossen ist stabil.

Astabiler Multivibrator:



Die Transistoren funktionieren wie Schalter [offen → nichtleitend/ geschlossen → leitend].

Die stabilen Zweige erhalten sich im jeweiligen Zustand.

Schaltzeit der instabilen Zweige:  $\tau_1 \approx \ln(2) R_{B2} C_2$  .

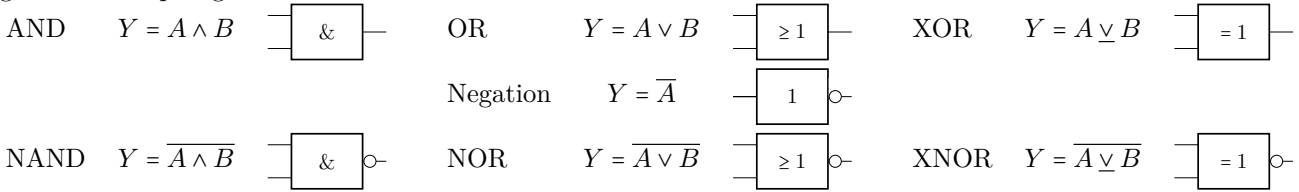
$$\tau_2 \approx \ln(2) R_{B1} C_1$$

[ $\tau_1$  - Zeit, dass T1 sich wieder öffnet.]

**Digitalelektronik:**

2 Zustände [0, 1], elektronisch 2 Zustandsbereiche mit verbotenen Bereich dazwischen [→ Spannungen!].

Logische Verknüpfungen:



Zur Bool'schen Algebra:

Algebraische Struktur  $B = \{a, b, \dots\}$ , Operationen „ $\vee$ “, „ $\wedge$ “, Gesetze:

- |    |   |  |                                     |
|----|---|--|-------------------------------------|
| 1. | $a \vee b = b \vee a$   | $a \wedge b = b \wedge a$                              | Kommutativität                      |
| 2. | $[a \vee b] \vee c = a \vee [b \vee c]$   | $[a \wedge b] \wedge c = a \wedge [b \wedge c]$        | Assoziativität                      |
| 3. | $\vee a^m = a$  | $\wedge a^m = a$                                       | Idempotenz [Absorptionsgesetz]      |
| 4. | $a \vee [b \wedge c] = [a \vee b] \wedge [a \vee c]$  | $a \wedge [b \vee c] = [a \wedge b] \vee [a \wedge c]$ | Distributivität                     |
| 5. | $\exists 0 \in B : a \vee 0 = a$  | $\exists 1 \in B : a \wedge 1 = a$                     | $\forall a \in B$ Neutrale Elemente |
| 6. | $a \vee \bar{a} = 1$  | $a \wedge \bar{a} = 0$                                 | unitäre Operation $\bar{a}$         |
| 7. | $\exists$ Gleichung $G$ in $B \Rightarrow \exists \bar{G}$ mit  |  | Dualitätsprinzip [de Morgan]        |
|    | $\left\{ \begin{array}{l} \wedge \rightarrow \vee \\ \vee \rightarrow \wedge \\ 0 \rightarrow 1 \\ 1 \rightarrow 0 \end{array} \right.$ |  |                                     |

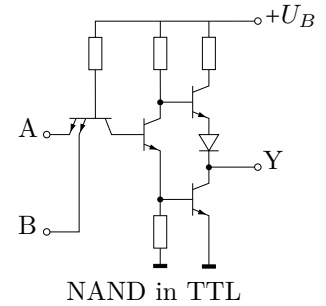
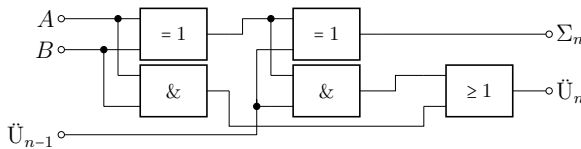
Zur elektronischen Schaltungsrealisierung: Schalter, Relais, Dioden [, Röhren], Transistoren.

Technologien:

Widerstandstransistorlogik [RTL,  $R$  zur Strombegrenzung,  $T$  zur Steuerung], Diodentransistorlogik [Diodenlogik mit strombegrenzenden Widerständen, Transistor als Endstufe], Transistor-Transistor-Logik [TTL, Bipolartransistoren zum Schalten, Widerstände zur Strombegrenzung, Dioden zum Sicherstellen der Spannungsbereiche], CMOS-Logik [CMOS-Transistoren], Emittergekoppelte Logik [ECL, „heiß und schnell“].

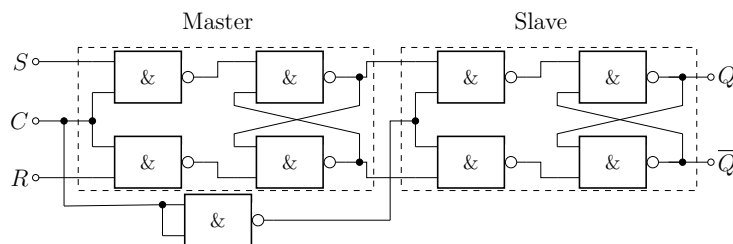
Alle logischen Verknüpfungen sind durch NAND [bzw. NOR] realisierbar; nur eine Grundverknüpfung nötig.

Volladdierer: Addition mit Übertrag



Subtraktion über Addition des Zweierkomplements [Zweierkomplement von  $B$  ist  $\bar{B} + 1$ ].

Master-Slave-Flip-Flop [flankengesteuert]:



$C = 1 \Rightarrow$  Daten  $S$  in Master gespeichert;  $C = 0 \Rightarrow$  Daten vom Master zum Slave kopiert.

[Aus diesem kann man mit zwei weiteren AND-Verknüpfungen und einer Rückführung des Ausgangssignals einen Frequenzhalbierer der an  $C$  anliegenden Rechteckspannung konstruieren.]