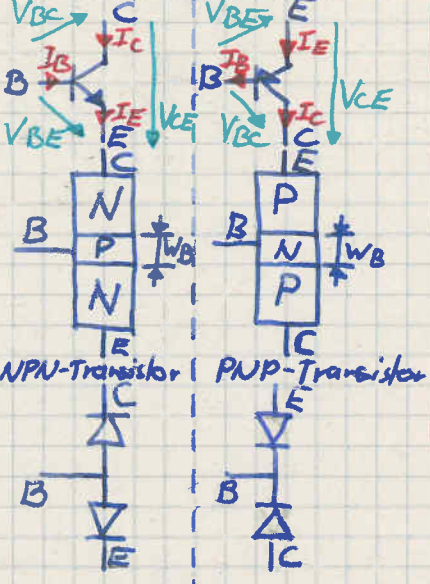


Transistorarten:



C = Kollektor  
 E = Emittler  
 B = Basis  
 WB = Basis-Schicht dicke.  
 Für einen funktionierenden Transistor (Verstärkerwirkung) muss WB sehr dünn sein.

$$I_c = \beta \cdot I_B$$

$$i_c = \beta \cdot i_B$$

$$\beta \approx \beta_{AC} \approx 100 \dots 600$$

$$I_E = I_c + I_B$$

$$i_E = i_c + i_B$$

$$\text{für } \beta \approx \beta_{AC} \gg 100 \Rightarrow I_E \approx I_c$$

$$i_E \approx i_c$$

$I_c$  = Kollektorgleichstrom [A]  
 $I_E$  = Emittiergleichstrom [A]  
 $\beta$  = Stromverstärkungsfaktor  
 $\beta$  = Wechselstromverstärkungsfaktor

$i_B$  ist beim idealen Transistor Null  
 Der Bipolartransistor ist eine Stromgesteuerte Spannungsquelle. Der Basisstrom steuert über Kollektor-Emittlerstrom.

DC-Ersatzschaltung (Verstärkerbet.)

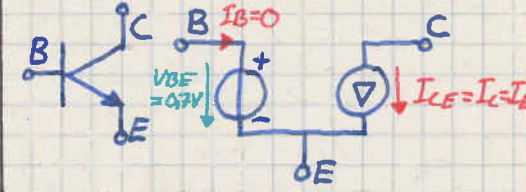
Da die Transistorhersteller meist den Sättigungstrom nicht angeben, kann man nur die Änderung  $\Delta V_{BE}$  rechnen und einen absolutwert.

$$\Delta V_{BE} = V_{temp} \cdot \ln\left(\frac{I_{c2}}{I_{c1}}\right)$$

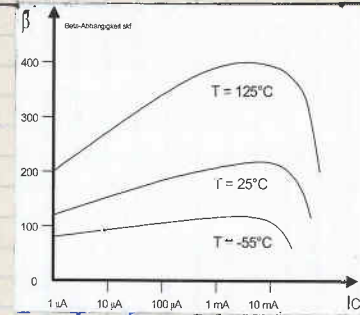
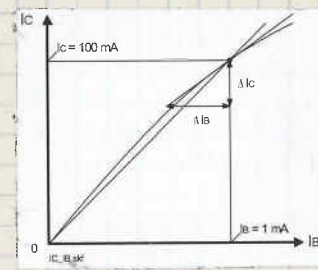
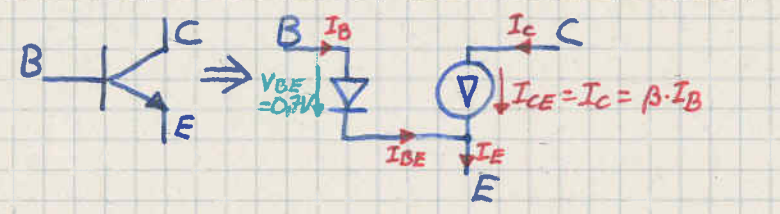
$$\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1}$$

$$\Delta V_{BE} = 18mV \Rightarrow I_c = 2 \times I_{c1}$$

$$\Delta V_{BE} = 60mV \Rightarrow I_c = 10 \times I_{c1}$$



Vereinfachte Grosssignal-Ersatzschaltung



$$I_{CE} = \beta_F \cdot I_B$$

$$\beta_{DC} = \beta = h_{FE} = \frac{I_c}{I_B}$$

$$\beta = h_{FE} = \frac{dI_c}{dI_B}$$

$$\beta \approx \frac{i_c}{i_B}$$

$\beta_F$  = Stromverstärkungsfaktor in Vorwärtsrichtung [-]  
 $\beta_{DC}$  = Beta als Gleichstromverhältnis [-]  
 $\alpha, A$  = Alpha- oder A-Stromverstärkungsfaktor [-]  
 $\beta$  = statische Stromverstärkung [-]  
 $\beta$  = dynamische Stromverstärkung [-]  
 $I_s$  = Sättigungstrom ( $10^{-17} \dots 10^{-15}$ ) A  
 $q$  = Elementarladung ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  As)

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{dI_c}{dI_E} \approx \frac{i_c}{i_E} ; A = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{I_c}{I_E}$$

$$I_B = \frac{I_s}{\beta_F} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_{temp}}} - 1 \right) \approx \frac{I_s}{\beta_F} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_{temp}}}$$

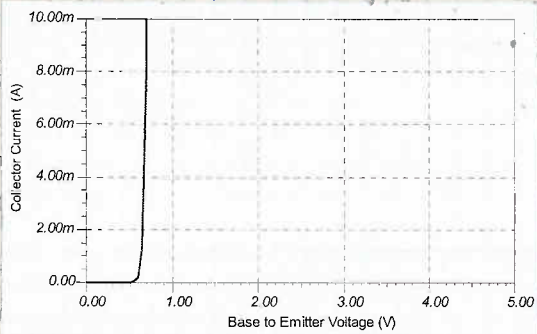
$$V_{BE} = V_{temp} \cdot \ln\left(\frac{\beta_F \cdot I_{BE}}{I_s}\right) ; V_{temp} = \frac{k \cdot T}{q}$$

$$I_s = \frac{q \cdot D_n \cdot n_i^2}{W_B \cdot N_A} \cdot A_E \approx 10^{-17} \dots 10^{-15} A$$

$V_{temp}$  = Temperaturspannung [V] (bei  $T=27^\circ C$ )  $26mV$   
 $k$  = Boltzmannkonstante ( $1,38 \cdot 10^{-23} Ws/K$ )  
 $T$  = Temperatur [K]  
 $D_n$  = Diffusionskonstante für Elektronen ( $38cm^2/s$  für leicht n-dotiertes Si bei  $T=300K$ )  
 $n_i$  = intrinsische Ladungsträgerkonzentration in reinem Silizium ( $1,5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$  bei  $T=300K$ )  
 $W_B$  = Basisweite (Dicke der Basisschicht)  
 $N_A$  = Dotierungsdichte in der Basis (Index A steht für Akzeptoratome  $1/cm^3$  in P-Silizium)  
 $A_E$  = Emittlerfläche (Fläche zwischen E und B)

## Übertragungskennlinie

Die grafische Darstellung von  $I_{CE} = f(V_{BE})$  ist als Übertragungskennlinie des Bipolartransistors bekannt. Sie wird bei  $V_{CE} = \text{konst}$  gemessen.



$$I_{CE} = \beta_F \cdot I_{BE} = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_{temp}}} - 1 \right)$$

$$V_{BE} = V_{temp} \cdot \ln \left( \frac{I_{CE}}{I_S} \right)$$

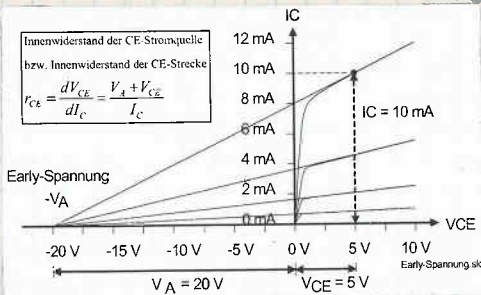
$$V_{BE} = 0,7V \text{ wenn } I_E \approx I_C \approx 10mA$$

$$V_{BE} = 0,6V \text{ wenn } I_E \approx I_C \approx 1mA$$

Bei Leistungstransistoren kann  $V_{BE}$  bis auf 1,5V ansteigen.

## Early-Effekt

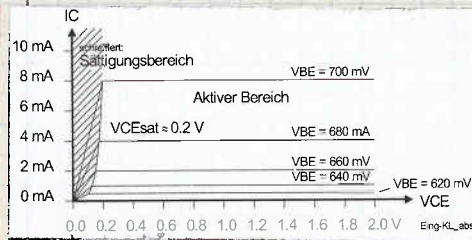
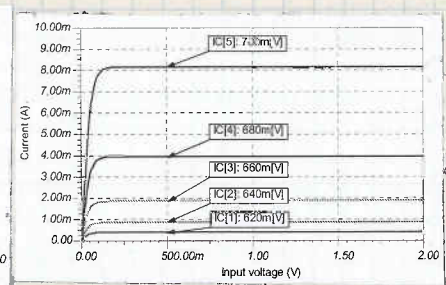
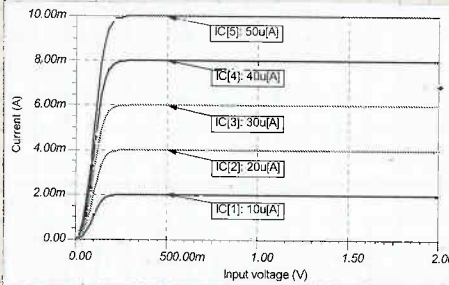
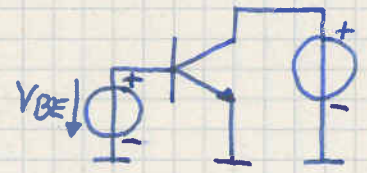
Die ideale Ausgangskennlinie verläuft im aktiven Bereich horizontal, die reale jedoch leicht steigend. Dies aus dem Grund des zwar hohen, aber endlichen parallelwiderstandes  $V_{CE}$   $r_{CE} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} = \frac{V_A}{I_C}$



Da  $V_A$  starke Exemplarstreuungen aufweist, ist es nicht immer im Datenblatt. Dann verwenden wir  $V_A \approx 100V$ .

## Ausgangskennlinie

Die grafische Darstellung von  $I_C = f(V_{CE})$  heißt Ausgangskennlinie. Sie wird bei  $I_B = \text{konst}$  gemessen.



Bei  $V_{CE} < 0,2V$  sagt man, der Transistor sei gesättigt. Bei Kleinsignaltransistoren liegt die Sättigungsgrenze bei  $V_{CEsat} \approx 0,2V$

$V_{CEsat}$  hat einen Temperaturdrift von  $0,3 \dots 1 mV/K$ .

Bei  $V_{CE} \gg V_{CEsat}$  verläuft die Ausgangskennlinie horizontal oder nur wenig ansteigend. Man sagt, der Transistor sei im aktiven Bereich.

## Übersteuerung des Transistors im Schaltbetrieb

Der Zusammenhang  $i_C = \beta \cdot i_B$  ist nur im aktiven Bereich gültig, wenn also  $V_{CE} \gg V_{CEsat}$  ist.

Beim Schaltbetrieb gilt:

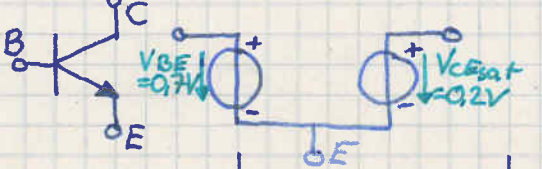
$$m = \frac{\beta \cdot I_B}{I_C} \approx \frac{\beta \cdot I_B}{I_C} \quad m = \text{Übersteuerungsfaktor}$$

bei  $m > 1 \Rightarrow$  Transistor übersteuert (gesättigt)  
 bei  $m = 1 \Rightarrow$  Transistor nicht übersteuert (aktiver Betrieb)

## Das Phänomen der CE-Restspannung $V_{CEsato}$

Wenn man über einen Bipolartransistor z.B. ein Kondensator entladen möchte, wird wegen  $V_{CEsat}$  immer eine Restspannung im Kondensator bleiben  $\Rightarrow V_{CEsato}$  (bei FET nicht)

DC-Ersatzschaltung für Sättigungsbetrieb (Schalter)

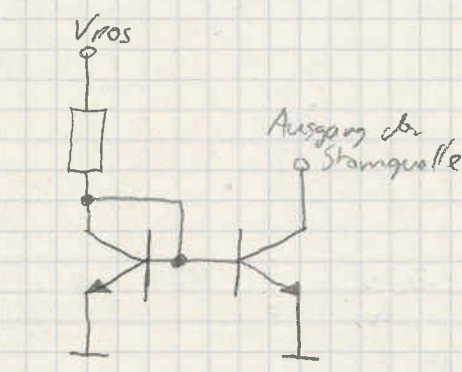


	Aktiver Betrieb	Sättigungsbetrieb
Anwendung	Verstärker	Schalter
V <sub>CE</sub>	$\gg V_{BE} \approx 0,7V$	$< V_{BE} \approx 0,7V$ $V_{CE(sat)} = 0,2V$ $V_{CE(sat_0)} = 2...5mV$ Temp.-drift $V_{CE(sat)}$ : $\Rightarrow 0,3...1mV/K$
I <sub>C</sub>	$I_C = \beta \cdot I_B; i_c = \beta \cdot i_B$	I <sub>C</sub> von R <sub>C</sub> und R <sub>E</sub> abhängig
$r_{CE} = dV_{CE}/dI_C$	$\infty \Omega$	$0 \Omega$
$m = \beta \cdot I_B / I_C$	$m = 1$	$m > 1$

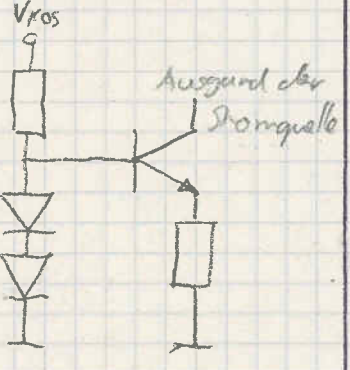
Im gesättigten Zustand beträgt die statistische Verlustleistung des Transistors:

$$P = I_C \cdot V_{CE(sat)} + I_B \cdot V_{BE}$$

Stromspiegel:

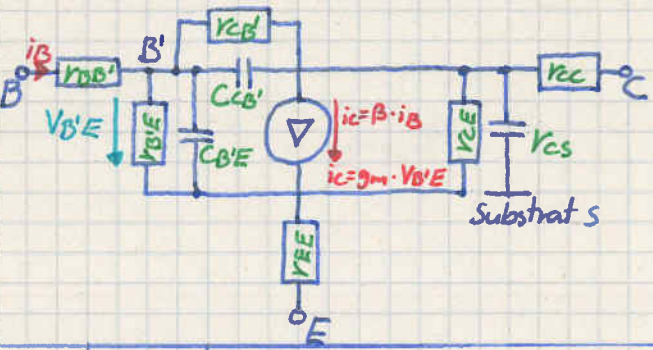


Stromquelle:



Kleinsignal-Ersatzschaltung

Mit Hilfe der Kleinsignalersatzschaltung linearisieren wir eine gegebene Originalschaltung im Arbeitspunkt.



Norm	Engl. Symbole	Bezeichnung
$r_{BE}$	$r_{\pi}$	BE-Widerstand
$r_{CB'}$	$r_{\mu}$	CB-Widerstand
$r_{CE}$	$r_o$	CE-Widerstand
$g_m$	$g_m$	Steilheit = Transkonduktanz
$r_{BB'}$	$r_b$	Basisband-Widerstand
$r_{EE}$	$r_{e\epsilon}$	Emitterbahn-Widerstand
$r_{CC}$	$r_c$	Kollektorbahn-Widerstand

Für eine Handrechnung sind nur diese Werte relevant:

$$r_{CE} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \approx \frac{V_A}{I_C}$$

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_{temp}}} \cdot \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_{temp}} \approx \frac{I_E}{V_{temp}}$$

$$r_E = \frac{1}{g_m}$$

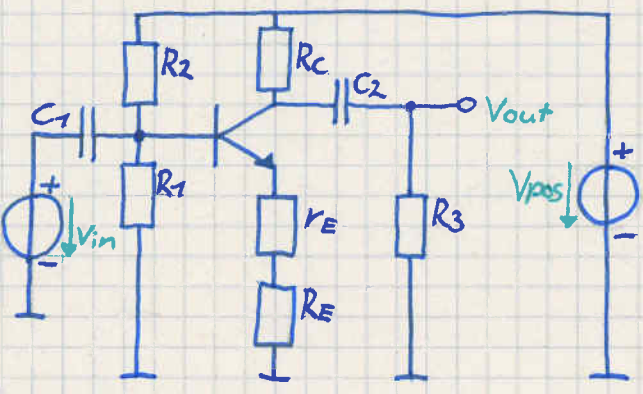
$$r_{BE} = \frac{V_{temp}}{I_B} = (\beta + 1) \cdot r_E$$

$$r_{CB'} \approx \beta \cdot r_{CE} \rightarrow \infty$$

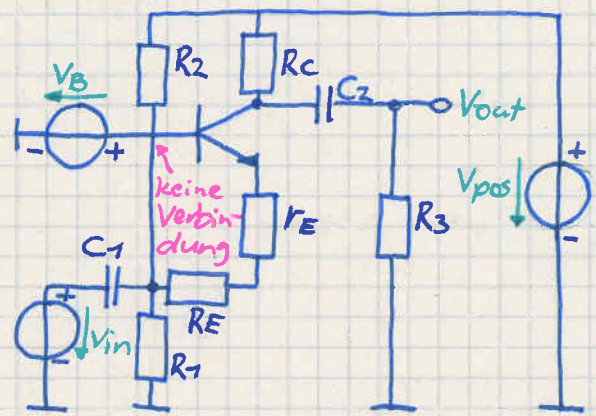
$r_E$  = innerer Emitterwiderstand [Ω]  
 $V_A$  = Early-Spannung [V]

# Grundsaltungen des Bipolar-Transistors

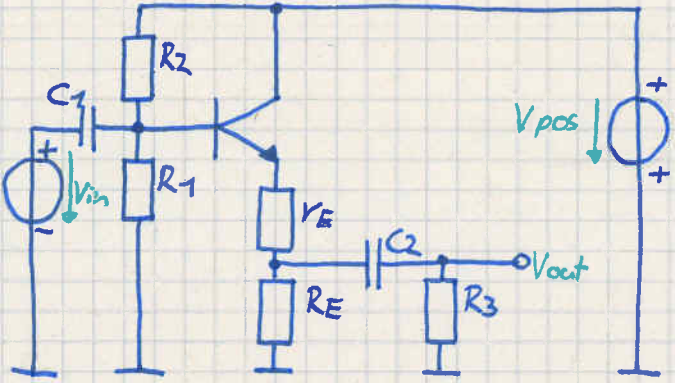
## Emitterschaltung



## Basisschaltung



## Kollektorschaltung



Der für die Schaltung Namensgebender Anschluss ist weder Eingang noch Ausgang der Schaltung.

Grundsaltung	Anwendung	Ein-Ausgangs-widerstände		Verstärkung (Spannung, Strom)	
		$r_{in}$	$r_{out}$	$A_v$	$A_i$
Emitterschaltung	Verstärkung für tiefe bis mittlere Frequenzen	gross	gross	gross	gross
Basisschaltung	Verstärkung für hohe Frequenzen (HF-Verstärker)	klein	gross	gross	$\approx 1$
Kollektorschaltung (Emitterfolger)	Impedanzwandler, Leistungstreiber	gross	klein	$\approx 1$	gross

