



BAUELEMENTE UND SCHALTUNGEN II

# ES1: Bipolartransistor- Grundsaltungen

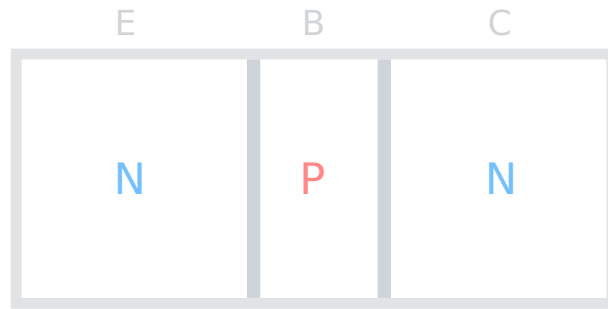
Studien- und Vorbereitungsaufgaben

*Autor:* Richard GRÜNERT

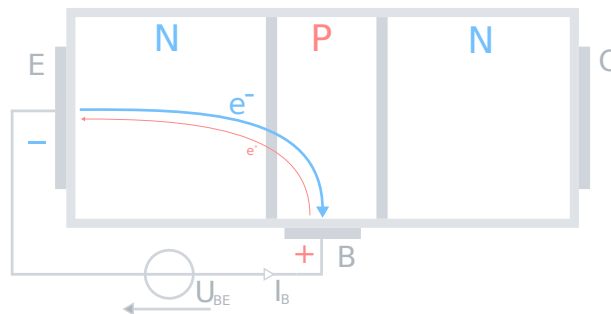
29.4.2020

# 1 Vorbereitungsaufgaben

## 1.1 Funktion des Bipolartransistors

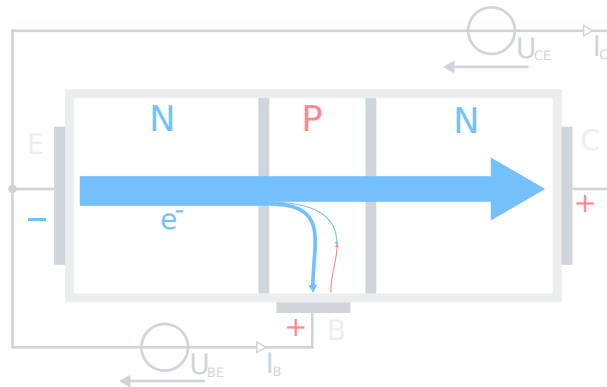


Die Funktion des *Bipolartransistors* basiert auf beiden Ladungsträger -bzw. Halbleiterdotierungsarten. Je nach Transistortyp haben die drei Halbleitergebiete des Bipolartransistors die Dotierfolge NPN oder PNP, die einzelnen Regionen heißen Basis (B), Kollektor (C) und Emitter, welche unterschiedlich dotiert sind.



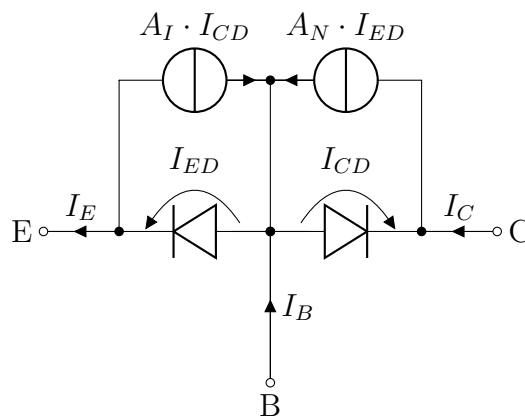
Funktion am Beispiel des NPN-Transistors: Ist die von außen anliegende Spannung  $U_{BE} = 0 \text{ V}$ , sind alle pn-Übergänge in Sperrrichtung und es fließt kein Strom durch den Transistor. Bei einer Spannung von etwa  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$  gerät der Basis-Emitter-Übergang in Durchlassrichtung. Löcher aus dem p-Gebiet (Basis) diffundieren in das n-Gebiet (Emitter)

(vgl. Diode) und rekombinieren mit den dort befindlichen Leitungselektronen. Umgekehrt diffundieren die Elektronen des Emitters ebenfalls in die Basis.



Legt man eine zusätzliche Spannung an die Kollektor-Emitter-Strecke, so ist das elektrische Feld der Raumladungszone des Basis-Kollektorübergangs so gerichtet, dass sich die Elektronen des Emitters in Richtung Kollektor bewegen (Drift). Außerdem rekombinieren diese nicht in der Basis, da die Basisweite sehr gering ist. Es fließt ein Elektronenstrom zwischen Kollektor und Emitter, der durch einen deutlich geringeren Basisstrom gesteuert wird.

Ein mathematisches Modell zur Beschreibung des statischen Verhaltens des Bipolartransistors bietet das *Ebers-Moll-Modell*:



Knotengleichung am Emitter:

$$I_E = I_{ED} - A_I \cdot I_{CD}$$

$$I_E = I_{ES} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - A_I \cdot I_{CS} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$

Knotengleichung am Kollektor:

$$I_C = I_{CD} - A_N \cdot I_{ED}$$

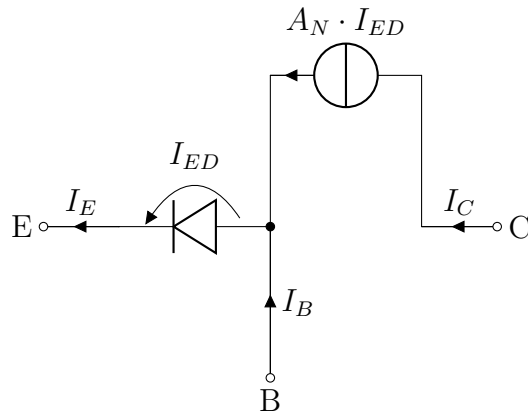
$$I_C = I_{CS} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right) - A_N \cdot I_{ES} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

Basis:

$$I_B = I_E - I_C$$

$$I_B = (1 - A_N) \cdot I_{ES} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - (1 - A_I) \cdot I_{CS} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$

Im Normalbetrieb (Basis-Emitter-Übergang in Durchlass-, Basis-Kollektor-Übergang in Sperrrichtung) können die inversen Anteile des Modells vernachlässigt werden und es vereinfacht sich zu:

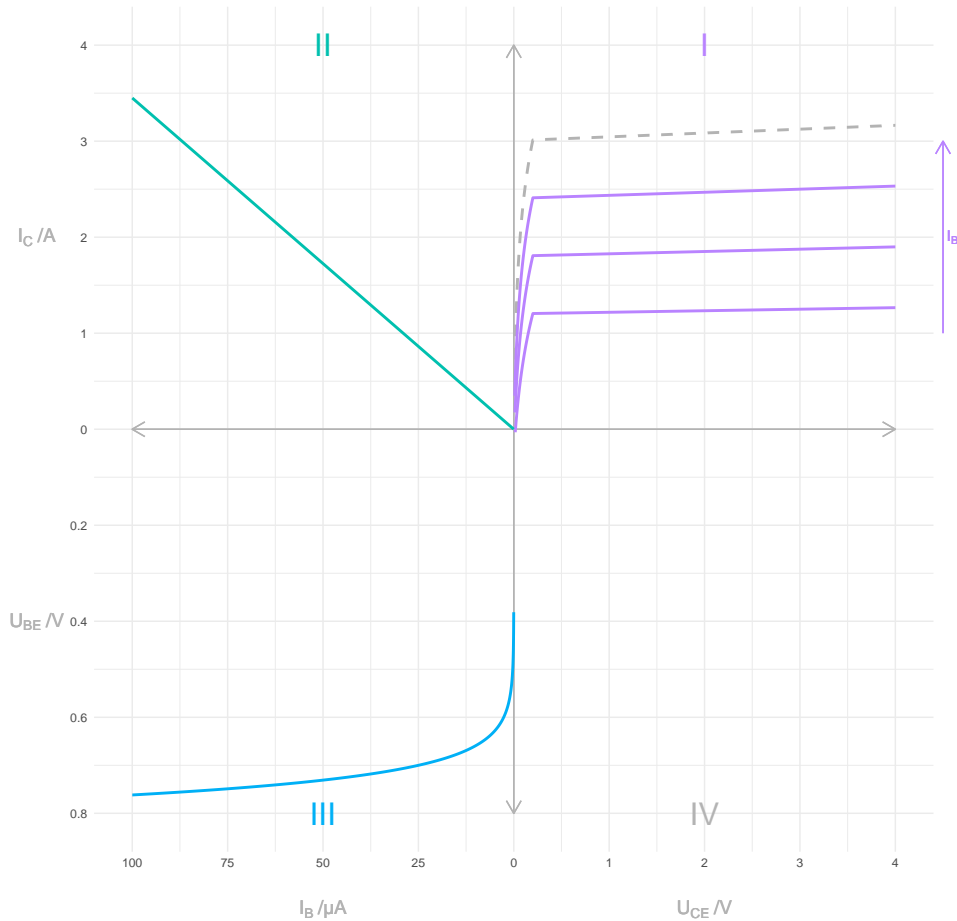


$$I_E = I_{ED}$$

$$I_C = A_N \cdot I_E$$

$$I_B = \frac{1 - A_N}{A_N} \cdot I_C$$

## 1.2 Vierquadrantenkennlinienfeld



### 1.2.1 I: Ausgangskennlinienfeld

**Quadrant I** stellt die Abhängigkeit des Kollektorstroms  $I_C$  von der Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  dar. Da diese zusätzlich vom Basisstrom  $I_B$  abhängig ist, können einzelne Kennlinien nur für ausgewählte Werte von  $I_B$  angegeben werden, es ergibt sich das Ausgangskennlinienfeld. Das Kennlinienfeld beginnt bei fortlaufender Kollektorspannung mit dem Transistor im Sättigungsbetrieb, da die Basis-Emitter-Spannung  $> 0$  V und die Basis-Kollektor-Spannung ebenfalls  $> 0$  V ( $U_{BC} = U_{BE} - U_{CE}$ ) ist. Beide

pn-Übergänge sind in Durchlassrichtung gepolt, wodurch der Kollektorstrom mit kleiner werdender Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  abnimmt. Dies ist nicht der Normalbetriebsfall, weshalb die statische Stromverstärkung  $B_N$  in diesem Bereich nicht gilt. Den Bereich ab etwa  $U_{CE} = 0.6\text{ V}$  bezeichnet man als aktiven Vorwärtsbetrieb.

### 1.2.2 II: Stromsteuerkennlinie

Quadrant II zeigt den Zusammenhang zwischen Eingangsstrom  $I_B$  und Ausgangsstrom  $I_C$ . Das Verhalten ist bis auf die Bereiche sehr großer und sehr niedriger Ströme annäherungsweise linear. Der statische Verstärkungsfaktor  $B_N$  (Gleichstromverstärkungsfaktor) kann daher als

$$B_N = \frac{I_C}{I_B}$$

ausgedrückt werden (gilt nur für *einen* statisch eingestellten Arbeitspunkt).

### 1.2.3 III: Eingangskennlinienfeld

Im Quadranten III kann durch Verfolgen der Eingangsgrößen Basis-Spannung  $U_{BE}$  und -Strom  $I_B$  das Diodenverhalten des Basis-Emitter-pn-Übergangs erkannt werden.

### 1.2.4 IV: Rückwirkungskennlinienfeld

Quadrant IV stellt die Rückwirkung der Kollektor-Emitter-Spannung auf die Basis-Emitter-Spannung dar, meist beschränkt man sich jedoch auf die Quadranten I, II und III.

## 1.3 Vierpolersatzschaltbild

Das Vierpolersatzschaltbild dient zur Kleinsignalbeschreibung des Bipolartransistors. Die Kapazitäten im physikalischen Ersatzschaltbild führen

zu einer Frequenzabhängigkeit der Vierpolparameter.

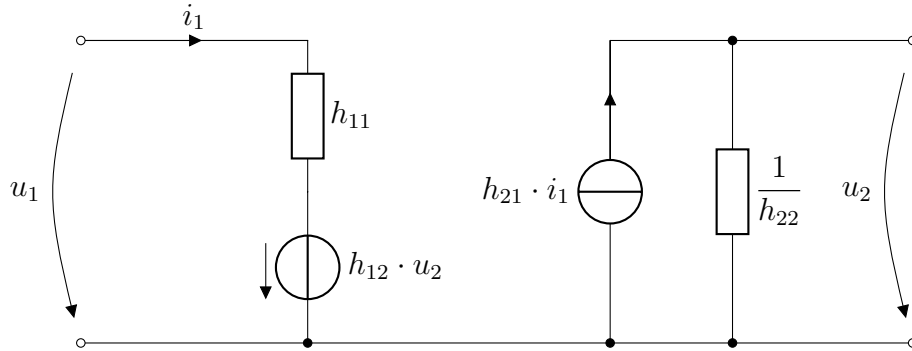


Abbildung 1: Hybridparametermodell

$$h_{11} := \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

$$h_{12} := \frac{u_1}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

$$h_{21} := \frac{i_2}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

$$h_{22} := \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

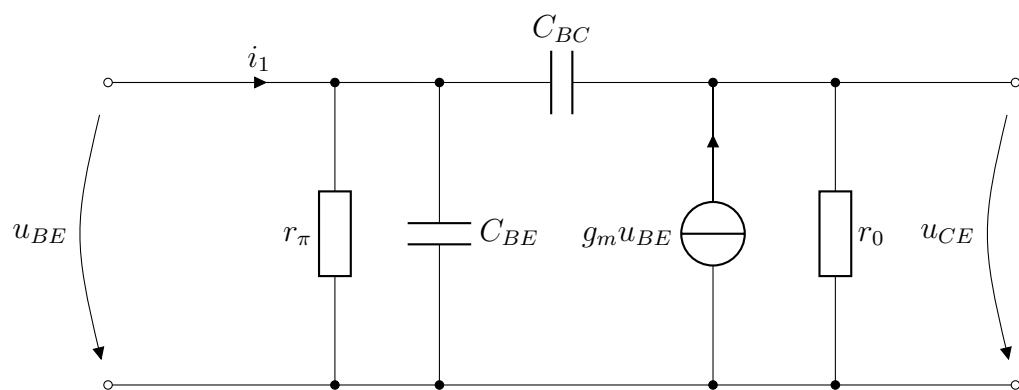


Abbildung 2: Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors

Steilheit/Übertragungsleitwert:

$$g_m = \frac{dI_C}{dU_{BE}} = \frac{I_{C,A}}{U_T}$$

Eingangswiderstand:

$$r_\pi = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\beta_N}{g_m} = \frac{\beta_N \cdot U_T}{I_{C,A}}$$

Ausgangswiderstand ( $U_{AN}$  : Early-Spannung):

$$r_0 = \frac{dU_{CE}}{dI_C} = \frac{U_{AN} + U_{CE,A}}{I_{C,A}}$$

Rückwärtssteilheit:

$$\frac{dI_B}{dU_{CE}} \approx 0$$

$C_{BC}$ : Sperrschichtkapazität (dominiert im normalen Verstärkerbetrieb)

$C_{BE}$ : Diffusionskapazität

Hybridparameter:

$$h_{11} := \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

$$h_{11} = \frac{r_\pi \cdot \frac{1}{j\omega(C_{BE}+C_{BC})}}{r_\pi + \frac{1}{j\omega(C_{BE}+C_{BC})}} = \frac{r_\pi}{j\omega r_\pi (C_{BE} + C_{BC}) + 1}$$

$$h_{11} = r_\pi \cdot \frac{1}{1 + j\omega r_\pi (C_{BE} + C_{BC})}$$

$$h_{12} := \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

$$i_1 = 0 \rightarrow i_B = 0 \rightarrow \beta_N \cdot i_B = 0 \rightarrow u_2 = 0$$



$$h_{12} = 0$$

$$h_{21} := \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

$$i_1 = \frac{u_{BE}}{r_\pi // \left( \frac{1}{j\omega(C_{BC} + C_{BE})} \right)}$$

$$i_2 = i_c = g_m \cdot u_{BE} = \frac{\beta_N}{r_\pi} \cdot u_{BE}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_{21}} &= \frac{\frac{\frac{u_{BE}}{r_\pi \cdot \frac{1}{j\omega(C_{BC} + C_{BE})}}}{r_\pi + \frac{1}{j\omega(C_{BC} + C_{BE})}}}{\frac{\beta_N}{r_\pi} \cdot u_{BE}} = \frac{\frac{\frac{1}{j\omega(C_{BC} + C_{BE})}}{r_\pi + \frac{1}{j\omega(C_{BC} + C_{BE})}}}{\beta_N} = \frac{\frac{1}{r_\pi \cdot j\omega(C_{BC} + C_{BE}) + 1}}{\beta_N} \\ &= \frac{1}{\beta_N \cdot \frac{1}{r_\pi \cdot j\omega(C_{BC} + C_{BE}) + 1}} \end{aligned}$$

$$h_{21} = \beta_N \cdot \frac{1}{1 + j\omega r_\pi (C_{BC} + C_{BE})}$$

$$(\omega \rightarrow 0 \rightarrow h_{21} = \beta_N)$$

$$h_{22} := \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_{22}} &= r_0 // \left( \frac{1}{j\omega C_{BC}} + (r_\pi // \frac{1}{j\omega C_{BE}}) \right) \\ &= r_0 // \left( \frac{1}{j\omega C_{BC}} + \frac{1}{\frac{1}{r_\pi} + j\omega C_{BE}} \right) \\ &= \frac{r_0 \cdot \left( \frac{1}{j\omega C_{BC}} + \frac{1}{\frac{1}{r_\pi} + j\omega C_{BE}} \right)}{r_0 + \left( \frac{1}{j\omega C_{BC}} + \frac{1}{\frac{1}{r_\pi} + j\omega C_{BE}} \right)} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{h_{22}} = \frac{r_0}{1 + \frac{r_0}{\left( \frac{1}{j\omega C_{BC}} + \frac{1}{\frac{1}{r_\pi} + j\omega C_{BE}} \right)}}$$

y-Parameter:

$$y_{11} = \frac{1}{h_{11}}$$

$$y_{12} = \frac{-h_{12}}{h_{11}}$$

$$y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}$$

$$y_{22} = \frac{\det H}{h_{11}}$$

## **1.4 Transistorgrundschaltungen**

## **1.5 Emitterstufe**

## **1.6 Temperaturabhängigkeiten**

Temperaturänderungen stellen für den Transistor als Halbleiterbauelement eine externe Energiezufuhr und damit eine Störung des thermodynamischen Gleichgewichts dar. Die Ladungsträgerdichten der einzelnen Bereiche erhöhen sich, die Weiten der Raumladungszonen verringern sich und der Transistor wird insgesamt leitfähiger. Dadurch erhöht sich auch der Stromverstärkungsfaktor  $\beta$ , was z.B. den Arbeitspunkt, der bei der Schaltungsdimensionierung angenommen wurde, verschieben kann. Da dieser zusätzlich fertigungsbedingt abweichen kann, strebt man einen Arbeitspunkt an, der möglichst unabhängig von der Stromverstärkung ist. Dies wird z.B. durch die Arbeitspunkteinstellung mit einem 4-Widerstandsnetzwerk oder die Einstellung des Emitterstroms durch eine Stromquelle erreicht.

Bootstrapping ist eine Art der positiven Rückkopplung