



BAUELEMENTE UND SCHALTUNGEN II

# ES1: Bipolartransistor- Grundsaltungen

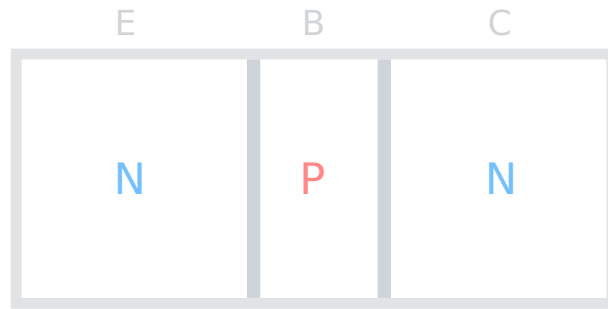
Studien- und Vorbereitungsaufgaben

*Autor:* Richard GRÜNERT

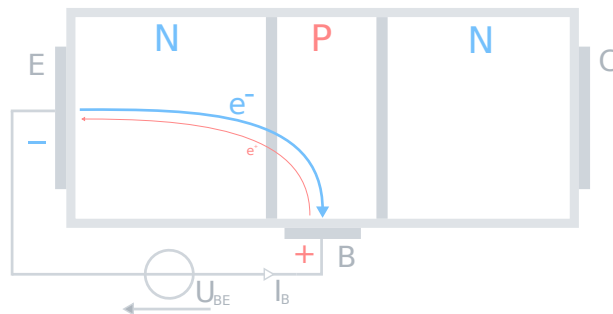
29.4.2020

# 1 Vorbereitungsaufgaben

## 1.1 Funktion des Bipolartransistors

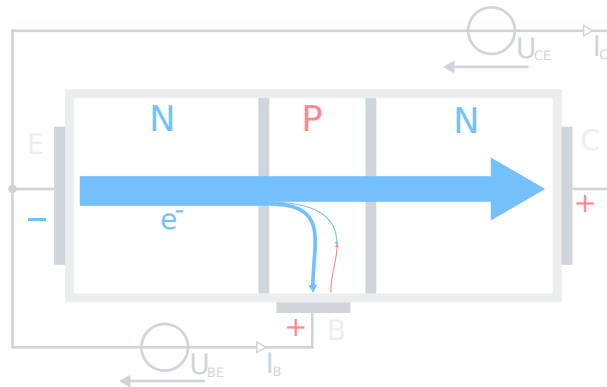


Die Funktion des *Bipolartransistors* basiert auf beiden Ladungsträger -bzw. Halbleiterdotierungsarten. Je nach Transistortyp haben die drei Halbleitergebiete des Bipolartransistors die Dotierfolge NPN oder PNP, die einzelnen Regionen heißen Basis (B), Kollektor (C) und Emitter, welche unterschiedlich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



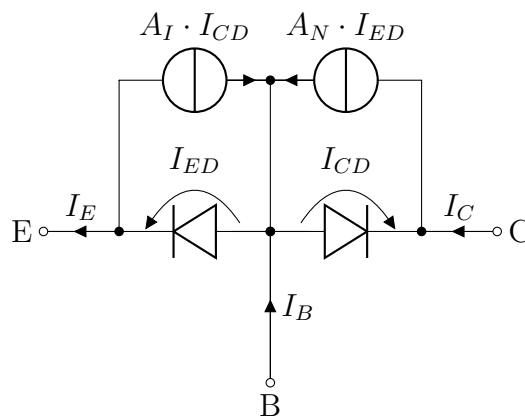
Funktion am Beispiel des NPN-Transistors: Ist die von außen anliegende Spannung  $U_{BE} = 0 \text{ V}$ , sind alle pn-Übergänge in Sperrrichtung und es fließt kein Strom durch den Transistor. Bei einer Spannung von etwa  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$  gerät der Basis-Emitter-Übergang in Durchlassrichtung.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

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

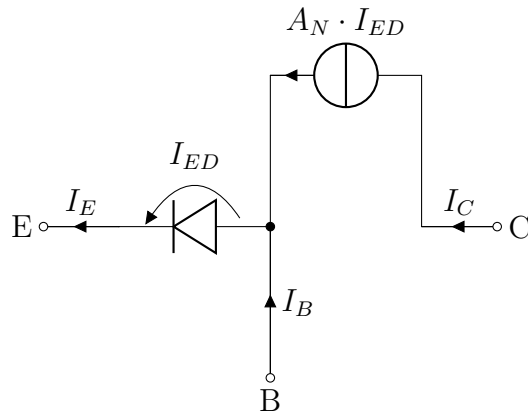
$$I_C = I_{CS} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right) - A_N \cdot I_{ES} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

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:

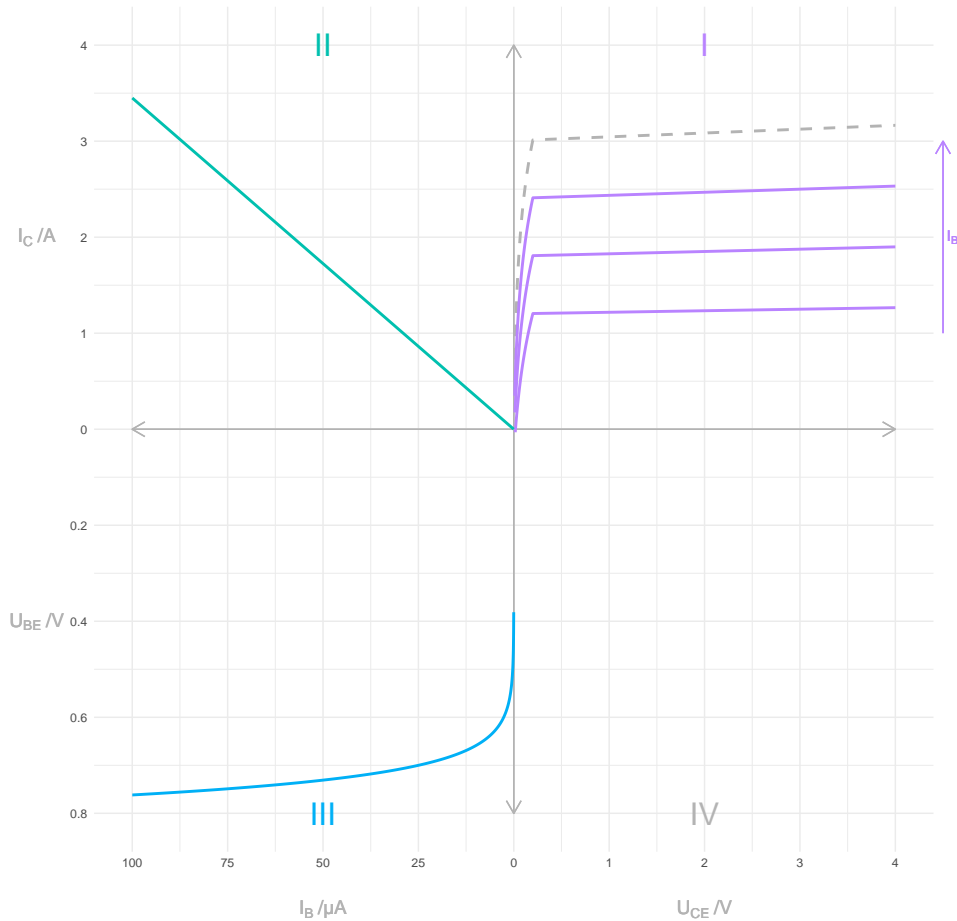


$$I_E = I_{ED}$$

$$I_C = A_N \cdot I_E$$

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

## 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.

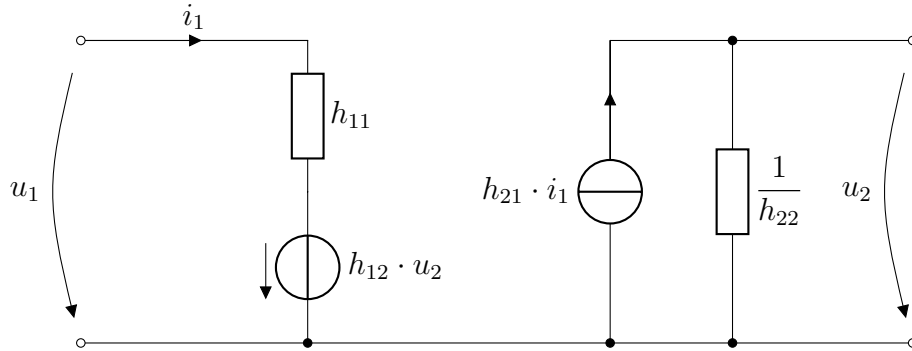


Abbildung 1: Hybridparametermodell

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

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

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

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

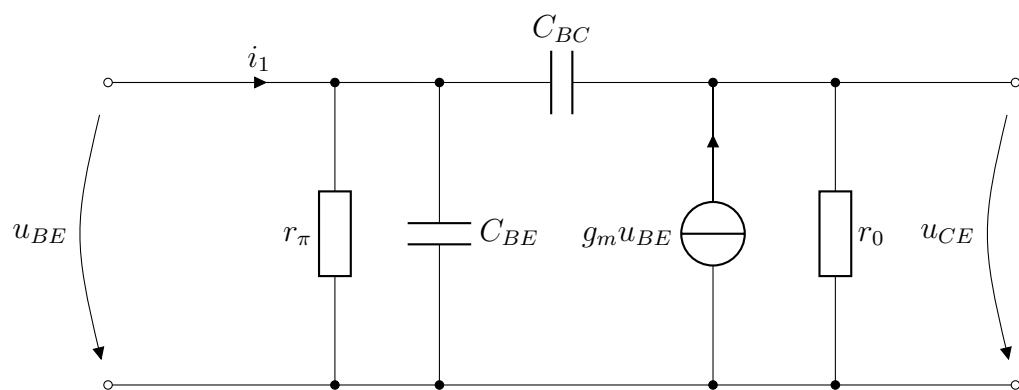


Abbildung 2: Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors

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:

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

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

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

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

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



$$h_{12} = 0$$

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

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

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

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

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

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

$$h_{22} := \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

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

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

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

Die drei Grundschaltungen des Transistors werden nach dem der Ausgangs- und Eingangsspannung gemeinsamen Potential benannt. Demnach exis-

tieren Emitter-, Kollektor- und Basisschaltung. Zum Entfernen der Gleichanteile des Ein- und Ausgangssignals werden Kondensatoren vor die Eingänge geschaltet, welche so dimensioniert sind, dass sie für die Wechselanteile der Signale einen Kurzschluss darstellen.

Bei der Arbeitspunkteinstellung werden die Kondensatoren entfernt und die Widerstände im gewünschten Arbeitspunkt ( $I_C, U_{CE}$ ) ermittelt.

#### 1.4.1 Emitterschaltung

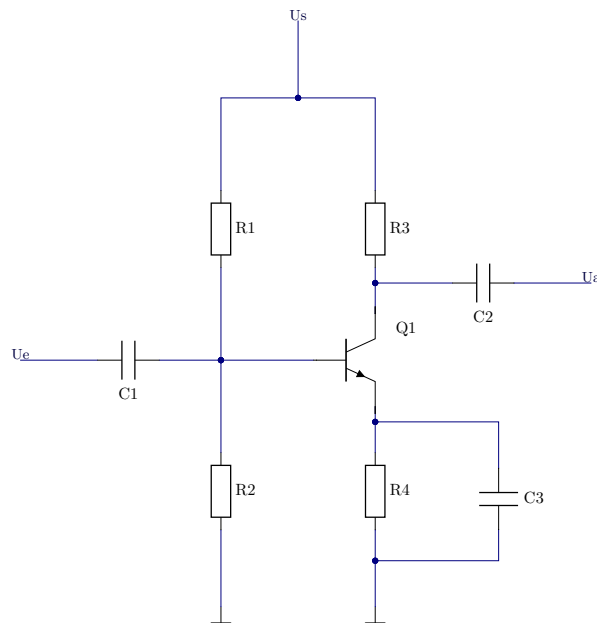


Abbildung 3: Emitterschaltung

Mithilfe der Stromgegenkopplung durch den Widerstand  $R_4$  lässt sich der Arbeitspunkt gegenüber Änderungen der Stromverstärkung stabilisieren, er verringert jedoch die Verstärkung und erhöht den Eingangs- und Ausgangswiderstand. Man kann einen Kondensator ( $C_3$ ) parallel schalten, um die negative Auswirkung des Widerstands für Wechsignale zu unterdrücken. Allgemein besitzt die Emitterschaltung eine hohe Spannungsverstärkung sowie einen hohen Ein- und Ausgangswiderstand.

### 1.4.2 Kollektorschaltung (Emitterfolger)

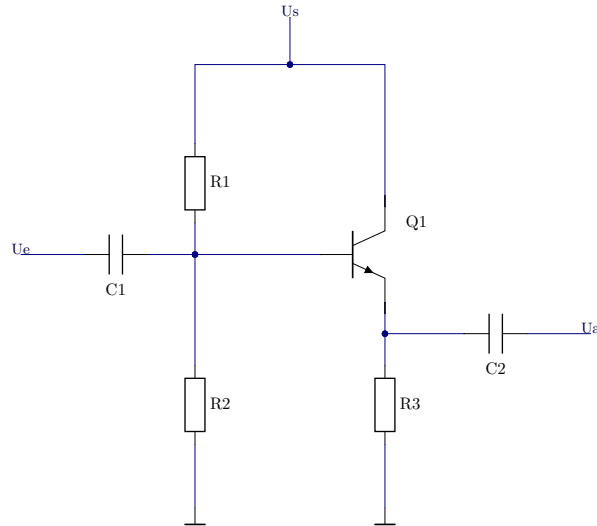


Abbildung 4: Kollektorschaltung

Das Ausgangsspannungssignal der Kollektorschaltung folgt etwa dem Eingangssignal ( $-0.7\text{ V}$ ), die Spannungsverstärkung ist 1, der Ausgangsstrom ist jedoch deutlich höher als der Eingangsstrom. Der Eingangswiderstand der Schaltung ist daher sehr hoch, der Ausgangswiderstand ist umgekehrt proportional der Steilheit des Transistors, also in der Regel sehr gering, weshalb sich die Schaltung gut als Impedanzwandler eignet.

Die Arbeitspunkteinstellung ist analog der Arbeitspunkteinstellung bei der Emitterschaltung. Zusätzlich kann, wie bei der Emitterschaltung, ein Kollektorwiderstand eingeführt werden, welcher dann über einen, ebenfalls zusätzlichen, vom Kollektor an Masse geführten Kondensator wechsellspannungsmäßig kurzgeschlossen wird.

$$R_{\text{ein}} \approx r_{\pi}(1 + g_m \cdot R_3)$$

$$R_{\text{aus}} \approx \frac{1}{g_m}$$

### 1.4.3 Basisschaltung

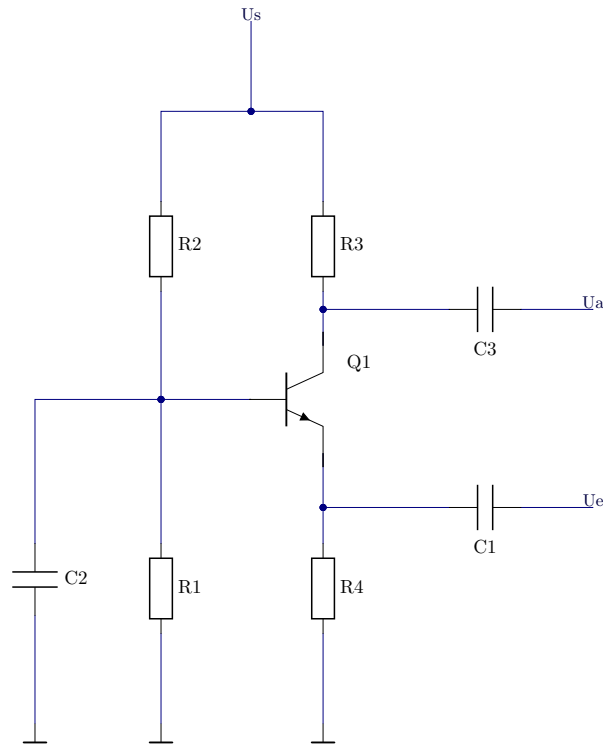


Abbildung 5: Basisschaltung

Die Basisschaltung kennzeichnet sich durch einen sehr geringen Eingangswiderstand, einen hohen Ausgangswiderstand sowie eine hohe Spannungsverstärkung. Auch hier geschieht die Arbeitspunkteinstellung über das 4-Widerstandsnetzwerk aus  $R_2$ ,  $R_1$ ,  $R_3$  und  $R_4$ . Der Kondensator  $C_2$  schließt im Kleinsignalersatzschaltbild die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  kurz und bringt die Transistorbasis auf Massepotential.

$$R_{ein} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$R_{aus} \approx r_0$$

## 1.5 Dimensionierung einer Emitterstufe

Die Spannung über dem Emitterwiderstand  $U_{R_4}$  wird gewählt

$$U_{R_4} = 1 \text{ V}$$

Damit ergibt sich die Spannung  $U'$  am Basisspannungsteiler zu

$$U' = 1 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 1.7 \text{ V}$$

Der Querstrom durch den Spannungsteiler wird so hoch gewählt, dass dieser bezüglich des Basisstroms als unbelastet angesehen werden kann.

$$I_{R_1} = 8 \cdot I_B$$

Der Basisstrom

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4.5 \text{ mA}}{158} = 27.22 \text{ }\mu\text{A}$$

führt zu den Widerstandswerten des Basisspannungsteilers

$$R_2 = \frac{U'}{8 \cdot I_B} = \frac{1.7 \text{ V}}{8 \cdot 27.22 \text{ }\mu\text{A}} = 7.87 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_s - U'}{9 \cdot I_B} = \frac{10.3 \text{ V}}{244.98 \text{ }\mu\text{A}} = 42.2 \text{ k}\Omega$$

Die verbleibenden Widerstände sind

$$R_4 = \frac{U_{R_4}}{I_{C,A}} = \frac{1 \text{ V}}{4.3 \text{ mA}} = 232 \text{ }\Omega$$

$$R_3 = \frac{U_s - U_{R_4} - U_{CE,A}}{I_{C,A}} = \frac{5 \text{ V}}{4.3 \text{ mA}} = 1.15 \text{ k}\Omega$$

Die Widerstandswerte wurden so gerundet, dass sie jeweils in eine E-Reihe passen.

Der Kondensator parallel zu  $R_3$  kann so gewählt werden, dass seine Reaktanz  $X_C$  bei der niedrigsten Signalfrequenz gleich  $1/10 R_3$  ist.

## 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 mit Stromgegenkopplung oder die Einstellung des Emittersstroms durch eine Stromquelle erreicht.

## 1.7 Bestimmung der Grundschaltungsparameter

Die Parameter werden nach dem physikalischen Ersatzschaltbild des Bipolartransistors ohne parasitäre Kapazitäten bestimmt. Bei der Kleinsignalanalyse werden alle Kapazitäten sowie Spannungsquellen als Kurzschlüsse behandelt.

### 1.7.1 Emitterschaltung

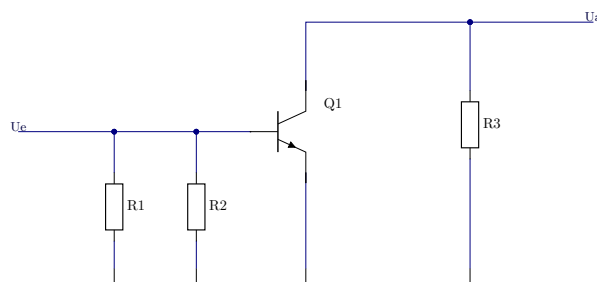


Abbildung 6: Kleinsignalersatzschaltbild der Emitterschaltung (Abb. 3)

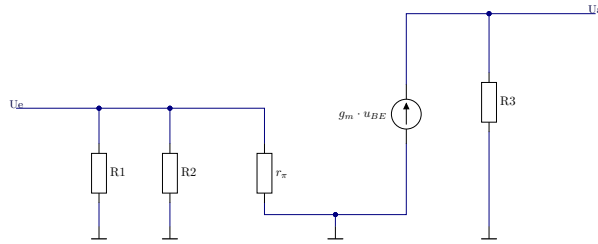


Abbildung 7: ESB Abb. 6, Transistor durch phys. ESB ersetzt

Eingangswiderstand:

$$r_e = \frac{U_e}{I_e} \big|_{U_a=0} = R_1 // R_2 // r_\pi$$

Ausgangswiderstand:

$$r_a = \frac{U_a}{I_a} \big|_{U_e=0} = r_0 // R_3$$

Spannungsverstärkung:

$$V_u = \frac{U_a}{U_e}$$

$$U_2 = g_m \cdot u_{BE} \cdot (r_0 // R_3) = g_m \cdot U_1 \cdot (r_0 // R_3)$$

$$V_u = g_m \cdot (r_0 // R_3)$$

Stromverstärkung:

### 1.7.2 Kollektorschaltung

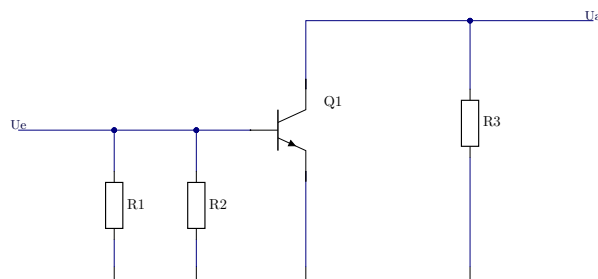


Abbildung 8: Kleinsignalersatzschaltbild der Kollektorschaltung (Abb. 4)



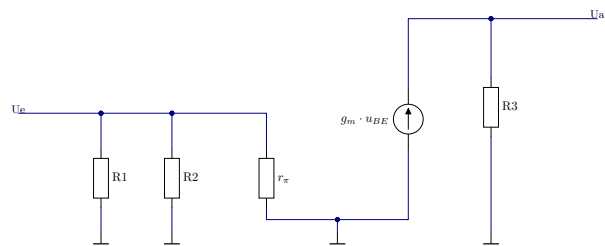


Abbildung 9: ESB Abb. 8, Transistor durch phys. ESB ersetzt

### 1.7.3 Basisschaltung

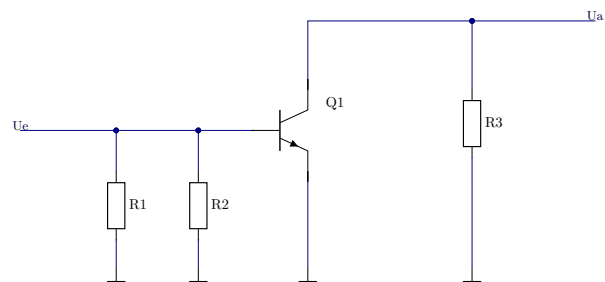


Abbildung 10: Kleinsignalersatzschaltbild der Basisschaltung (Abb. 5)

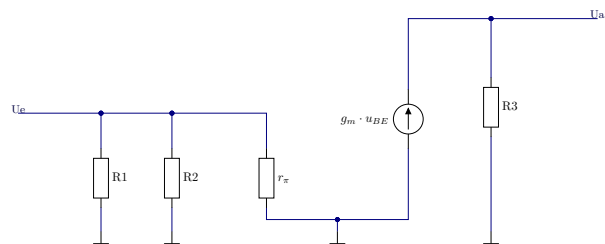


Abbildung 11: ESB Abb. 10, Transistor durch phys. ESB ersetzt

## 1.8

Bootstrapping ist eine Art der positiven Rückkopplung