

Vorlesung Elektronik - Eine kleine Backmischung

12. Juli 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Grundformeln zur Berechnung	3
2.1	Allgemeine Halbleiterformeln	3
2.2	pn-Übergang/Diode	4
2.3	BJT/Bipolartransistor	4
2.4	Großsignalersatzschaltbild	4
2.4.1	AC-Kleinsignalersatzschaltbild für kleine Frequenzen	4
2.5	FET	6
3	Bipolartransistoren	6
3.1	Emitterschaltung mit eingprägtem Kollektorstrom	6
3.2	Kollektorschaltung mit eingprägtem Emitterstrom	8
4	Literatur	10

1 Einführung

Dieses Dokument erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, es soll nur beim Üben zur Klausur den Anstößen weitergeben.

Folgende Vereinbarungen gelten für das Dokument:

- Es wird bei einer kompletten Aufgabenlösung immer mit dem Grosssignalersatzschaltbild angefangen, sonst sind sehr wahrscheinlich alle Kleinsignalergebnisse falsch!
- Im Grosssignalschaltbild wird nur der Arbeitspunkt berechnet bzw. eingestellt, alle durch Kondensatoren eingekoppelten Wechselspannungen werden vorerst ignoriert.
- Das Kleinsignalersatzschaltbild ist nur für die evtl. zu verstärkende Wechselspannung relevant.
- Ströme, Spannungen usw. mit Grossbuchstaben (I_B, U_{BE}) sind für das Grosssignalschaltbild. Kleinbuchstaben (i_B, u_{BE}) weisen auf Kleinsignalwerte hin.
- Wird dem Index ein A nachgestellt (z.B. U_{BEA}) so wird dieser Wert für den Arbeitspunkt angenommen.
- Die Indizes werden immer in der Richtung vergeben in welcher sie angenommen werden. Also ist U_{BE} die Spannung von der Basis zum Emitter des Bipolartransistors.
- Durchgerechnete Beispiele befinden sich immer am Ende einer Subsection

2 Grundformeln zur Berechnung

2.1 Allgemeine Halbleiterformeln

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad (1)$$

$\approx 25\text{mV}$ bei Raumtemperatur $T = 300\text{K}$

mit

e : Elementarladung $\pm 1,602 \cdot 10^{-19} \text{As}$

k : Boltzmannkonstante $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

T : Absolute Temperatur in $^{\circ}\text{K}$

2.2 pn-Übergang/Diode

2.3 BJT/Bipolartransistor

2.4 Großsignalersatzschaltbild

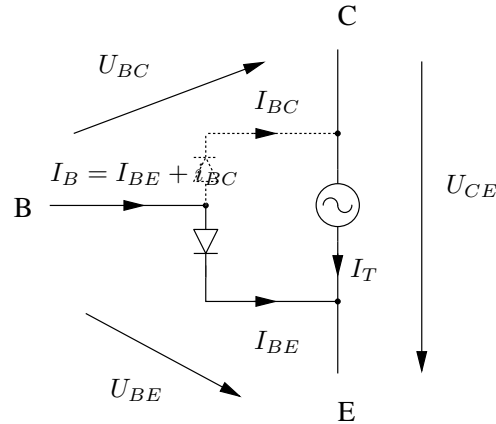


Abbildung 1: Großsignalersatzschaltbild eines Bipolar-Transistors

{fig-bjt-grossign

Das Grosssignalersatzschaltbild wird zur Berechnung des Arbeitspunktes des Transistors benutzt. Dabei wird der Transistor durch zwei Dioden und eine Stromquelle ersetzt, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Gleichungen der Ströme sind hierbei:

$$I_{BC} = \frac{I_S}{B_R} \left(e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I_{BE} = \frac{I_S}{B_F} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_T &= B_F \cdot \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{AF}} \cdot I_{BE} \right) \\ &= -B_R \cdot \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{AF}} \cdot I_{BC} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

mit

U_T : Thermospannung im Zweifel $\approx 25\text{mV}$

B_F : Vorwärts- oder Normalbetriebsverstärkung, meist ≥ 100

B_R : Rückwärts- oder Inversbetriebsverstärkung, meist ≤ 10

I_S : Transferstättigungsstrom, in der Größenordnung einiger 10^{-15} (Femto) Ampere

U_{AF} : Vorwärts Early-Spannung, bewirkt die leichte Steigung der Ausgangskennlinie im Normalbetrieb $\approx 100\text{V}$

Der Transferstrom (der direkt von Kollektor nach Emitter fließende Strom, ohne Basis-Strom Anteile ist)

$$I_T = I_S \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{AF}} \right) \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} \right) \quad (5)$$

Im Normalbetrieb sperrt die Kollektor-Basis-Diode, somit kann diese für den Normalbetrieb meist vernachlässigt werden.

2.4.1 AC-Kleinsignalersatzschaltbild für kleine Frequenzen

Das Kleinsignalersatzschaltbild wird meist zur Berechnung aller wechselstrommäßigen Vorgänge am Transistor benutzt. Dazu wird der Transistor in der Originalschaltung durch das in Abb. 2 dargestellte

Ersatzschaltbild ersetzt.

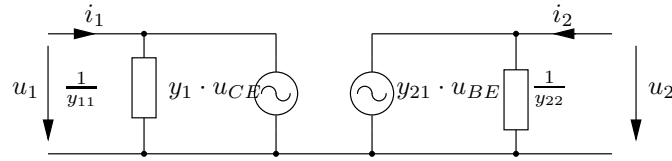


Abbildung 2: AC-Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors

{fig-bjt-kleinsig

Hieraus ergeben sich folgende Vierpolgleichungen, welche zum Berechnen und Herleiten der Signalströme und -spannungen am Transistor benutzt werden können:

$$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \quad (6)$$

$$i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2 \quad (7)$$

Die Leitwert- oder auch y - Parameter werden meist bei der **Spannungssteuerung** benutzt. Diese werden aus den im Grossignalschaltbild ermittelten Strömen und Spannung errechnet. Die Gleichungen hierzu sind

$$y_{11EA} = \frac{I_{BA}}{U_T} \quad (8)$$

$$y_{12EA} = 0 \quad (9)$$

$$y_{21EA} = \frac{I_{CA}}{U_T} \quad (10)$$

$$y_{22EA} = \frac{I_{CA}}{U_{AF} + U_{CEA}} \quad (11)$$

Die Steilheit s und der differentiellen Eingangswiderstand r_{BE} können direkt aus der Leitwertparametern berechnet werden:

$$s = y_{21EA} = \frac{I_{CA}}{U_T} \quad (12)$$

$$r_{BE} = \frac{1}{y_{22EA}} \quad (13)$$

Die Leitwertparameter können auch als Matrix geschrieben werden:

$$y = \begin{pmatrix} y_{11EA} & y_{12EA} \\ y_{21EA} & y_{22EA} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Die Determinante $\det(y)$ kann mit der Sarrus'schen Regel schnell gebildet werden und mit $y_{12} = 0$ deutlich vereinfacht werden:

$$\begin{aligned} \det(y) &= y_{11} \cdot y_{22} - y_{21} \cdot y_{12} \\ &= y_{11} \cdot y_{22} \end{aligned} \quad (15)$$

Weitere Parameter der Emitterschaltung können mittels der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

Betriebs-Eingangsimpedanz	$r_{iB} = \frac{1+y_2R_L}{y_{11}+\det(y)R_q}$
Betriebs-Ausgangsimpedanz	$r_{aB} = \frac{1+y_{11}R_q}{y_{22}+\det(y)R_q}$
Stromverstärkung	$v_i = \frac{i_1}{i_2} = \frac{y_{21}}{y_{22}+\det(y)R_q}$
Spannungsverstärkung	$v'_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{y_{21}R_L}{1+y_{22}R_L}$ $v_u = \frac{u_2}{u_q} = -\frac{y_{21}R_L}{R_q \cdot (y_{11}+\det(y) \cdot R_L) + 1 + y_{22}R_L}$

ACHTUNG: Dies gilt nur für den Transistor mit einem Lastwiderstand und einer Eingangsspannungsquelle mit Innenwiderstand! Der Rest der Schaltung muss bei der Berechnung dieser Parameter mit einbezogen werden! Dennoch empfiehlt es sich diese Werte in der Klausur vorher auszurechnen und dann in die sich ergebenden Gleichungen einzusetzen!

2.5 FET

3 Bipolartransistoren

3.1 Emitterschaltung mit eingepprägtem Kollektorstrom

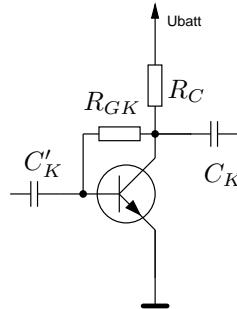


Abbildung 3: Beispielschaltung für eingepprägten Kollektorstrom in Emitterschaltung

{fig-bjt-emitter-

Diese Schaltung eignet sich aufgrund der Regelung von I_C und damit auch U_{CE} festgelegt sind für NF-Verstärkerschaltungen, höhere Frequenzen sind aufgrund der starken Wirkung der paristären Kapazitäten nicht gut vertärkt.

Für die weitere Rechnung wird ein unendlich großer Lastwiderstand am Auskopplungskondensator angenommen und der Innenwiderstand der Signalquelle sei ≈ 0 .

Der Kollektorstrom ergibt sich über die Berechnung der Masche I wie folgt für den Arbeitspunkt:

$$\begin{aligned} 0 &= -U_{Batt} + I_{CA} \cdot R_C + U_{CEA} \\ \Rightarrow I_{CA} &= \frac{U_{Batt} - U_{CEA}}{R_C} \end{aligned}$$

Damit kann dann mit dem Zusammenhang ?? der Basistrom mit der Grossignal-Stromverstärkung $\hat{=}$ Grossignal-Vorwärtsverstärkung (B_F) berechnet werden:

$$I_{BA} = \frac{I_{CA}}{B_N} | B_N = B_F$$

Der Gegenkopplungswiderstand kann durch Umformung einer im Script gegebenen Gleichung für die eingepprägte Kollektorspannung berechnet werden:

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{U_{Batt} - 0,7V}{R_C + \frac{R_{GK}}{B_N}} \\ \Rightarrow R_{GK} &= \left(\frac{U_{Batt} - 0,7V}{I_{CA}} \right) \cdot B_N \end{aligned}$$

Der Transfersättigungsstrom kann nun berechnet werden da $I_{BCA}, B_N \hat{=} B_F, U_{BEA}$ und U_T ¹ bekannt sind:

$$\begin{aligned} I_{BE} &= \frac{I_S}{B_F} \left(e^{\frac{U_{BEA}}{U_T}} - 1 \right) \\ \Rightarrow I_S &= \frac{I_{BCA} \cdot B_F}{e^{\frac{U_{BEA}}{U_T}} - 1} \end{aligned}$$

¹Im Zweifel, wenn U_T nicht Gegeben ist und auch keine Temperatur, so kann mit $U_T \approx 25mV$ gerechnet werden. Siehe

Der Strom I_{BC} ergibt sich aus der Gleichung

$$I_{BC} = \frac{I_S}{B_R} \left(e^{\frac{U_{BCA}}{U_T}} - 1 \right)$$

Ist die Rückwärtsverstärkung $B_R = 0$ so kann $I_{BC} = 0$ angenommen werden.

Beim Übergang ins Kleinsignal-(Wechselstrom-)Schaltbild werden die Kopplelkondensatoren kurzgeschlossen, die Gleichstromquellen wegen ihren unendlichen Innenwiderstandes entfernt und die Spannungsquellen kurzgeschlossen. Daraus ergibt sich in diesem Beispiel das Kleinsignalersatzschaltbild aus Abb. ??:

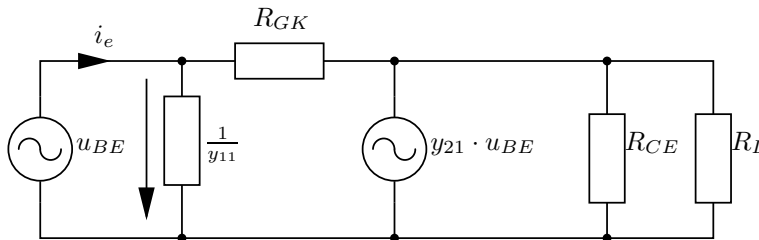


Abbildung 4: Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild des Schaltung aus Abb. 3

Der Übergang zum Kleinsignalersatzschaltbild ist bei allen Emitterschaltungen vom Ablauf her gleich: Der Transistor wird durch einen Vierpol ersetzt. Die Leitwert-(Spannungssteuerungs-)Parameter können aus den Spannungen und Strömen am Transistor für den Arbeitspunkt errechnet werden. Die Gleichungen ?? werden verwandt um die Leitwertparameter Matrix der Emitterschaltung am Arbeitspunkt² aufzustellen.

$$y = \begin{pmatrix} y_{11EA} & y_{12EA} \\ y_{21EA} & y_{22EA} \end{pmatrix}$$

Die Parameter ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} y_{11EA} &= \frac{I_{BA}}{U_T} \\ y_{12EA} &= 0 \\ y_{21EA} &= \frac{I_{CA}}{U_T} \\ y_{22EA} &= \frac{I_{CA}}{U_{AF} + U_{CEA}} \end{aligned}$$

Die Steilheit s und der differentiellen Eingangswiderstand r_{BE} können direkt aus der Leitwertparametern berechnet werden:

$$\begin{aligned} s &= y_{21EA} = \frac{I_{CA}}{U_T} \\ r_{BE} &= \frac{1}{y_{22EA}} \end{aligned}$$

Soll nun beispielweise die Verstärkung von Eingangsstrom zu Ausgangsspannung berechnet werden, so folgt dafür aus dem Kleinsignalersatzschaltbild für die Spannung U_{BE} welche wir zum Berechnen der Ausgangsspannung benötigen:

$$u_{BE} = \frac{1}{y_{11EA}} \cdot i_{BE}$$

²Daher die Indizes E (Emitter) A (Arbeitspunkt)

Der Basisstrom i_{BE} ergibt sich über einen Stromteiler:

$$i_{BE} = i_e \cdot \frac{R_{GK} + r_{CE}}{r_{BE} + R_{CE} + R_{GK}}$$

Setzt man nun die letzte Gleichung in die Gleichung für u_{BE} ein, ergibt sich für u_{BE} :

$$\begin{aligned} u_{BE} &= i_e \cdot \frac{1}{y_{11EA}} \cdot \frac{R_{GK} + r_{CE}}{r_{BE} + R_{CE} + R_{GK}} \\ &= i_e \cdot \frac{1}{y_{11EA}} \cdot \frac{R_{GK} + r_{CE}}{\frac{1}{y_{22EA}} + R_{CE} + R_{GK}} \end{aligned}$$

Die Gleichung für u_a ergibt sich aus dem Ersatzschaltbild:

$$u_a = u_{BE} \cdot y_{21EA} = u_{BE} \cdot s$$

Daraus folgt für u_a mit der Gleichung für u_{BE} :

$$\begin{aligned} u_a &= i_e \cdot \frac{1}{y_{11EA}} \cdot \frac{R_{GK} + r_{CE}}{\frac{1}{y_{22EA}} + R_{CE} + R_{GK}} \cdot y_{21EA} \\ \Rightarrow \frac{u_a}{i_e} &= \frac{1}{y_{11EA}} \cdot \frac{R_{GK} + r_{CE}}{\frac{1}{y_{22EA}} + R_{CE} + R_{GK}} \cdot y_{21EA} \end{aligned}$$

3.2 Kollektorschaltung mit eingepprägtem Emitterstrom

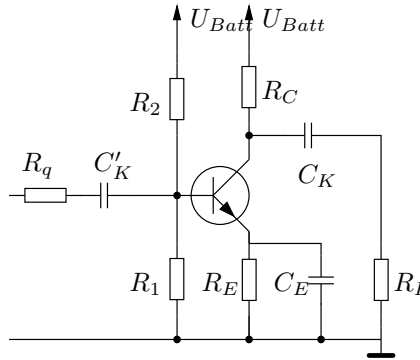


Abbildung 5:

Auch diese Grundsaltung eignet sich aufgrund ihrer Eigenschaften als NF-Verstärker. Es sei die Early-Spannung U_{AF} , die Vorwärtsverstärkung B_F , die Rückwärtsverstärkung B_R , der Transfersättigungsstrom I_S , der Innenwiderstand der Signalquelle R_q , der Lastwiderstand R_L gegeben. Des weiteren Sei der Arbeitspunkt durch die Spannung über dem Emitterwiderstand U_E , der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und die Batteriespannung U_{Batt} gegeben.

Der Spannungsabfall über dem Transistor sollte i.d.R. $U_{CE} \leq \frac{U_{Batt}}{2}$ gewählt werden, $U_{CE} \approx 0,1 \dots 0,2 \cdot U_{Batt}$ wird empfohlen. Des weiteren ist in dieser Schaltung der Strom durch den Widerstand R_1 zwischen $I_{R1} = I_{Quer} = 3 \dots 10 \cdot I_B$ gewählt werden.

Aus den gegebenen Werten kann direkt der Strom I_{BE} berechnet werden. Es gilt

$$I_{BEA} = \frac{I_S}{B_F} \left(e^{\frac{U_{BEA}}{U_T}} - 1 \right)$$

Aus einem Maschenumlauf um den Transistor ergibt sich:

$$U_{BC} = U_{BE} - U_{CE}$$

Damit kann die Strom I_{BC} errechnet werden:

$$I_{BCA} = \frac{I_S}{B_R} \left(e^{\frac{U_{BCA}}{U_T}} - 1 \right)$$

Da U_{BCA} meist negativ ist ist diesr Wert meist sehr klein gegenüber I_{BEA} und kann damit vernachlässigt werden. Allgemein gilt für I_B

$$I_B = I_{BC} + I_{BE}$$

Dies kann aber unter der Annahme $I_{BC} \ll I_{BE}$ mit guter Näherung vereinfacht werden zu

$$I_B \approx I_{BE} = \frac{I_S}{B_F} \left(e^{\frac{U_{BEA}}{U_T}} - 1 \right)$$

Nun kann der Transferstrom $I_T \approx I_C \approx I_E$ über den Zusammenhang

$$I_E \approx I_C = I_B \cdot B_N$$

errechnet werden. So ist die Widerstand R_E vollständig bestimmt:

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

Aus dem Maschenumlauf über die Widerstände R_C , R_E und der Kollektor-Basis-Strecke des Transistors folgt für die Spannung über R_C :

$$U_C = U_{Batt} - U_{CE} - U_E$$

Somit ist auch R_C bestimmbar:

$$R_C = \frac{U_C}{I_C}$$

Zur Bestimmung der Widerstände R_1 und R_2 wird zuerst eine Masche um R_1 , R_E und der Emitter-Baisstrecke aufgestellt:

$$0 = -U_E - U_{BE} + U_{R_1} \quad (16)$$

$$\Rightarrow U_{R_1} = U_E + U_{BE} \quad (17)$$

Ist das Verhältnis zwischen I_B und I_{Quer} gegeben, kann über den Spannungsabfall $U_{R_1} = U_E + U_{BE}$, und den Strom I_{Quer} der Widerstand R_1 bestimmt werden:

$$R_1 = \frac{U_E + U_{BE}}{I_{Quer}}$$

Aus einem Maschenumlauf über U_{Batt} , R_1 und R_2 ergibt sich für R_1 :

$$\begin{aligned} 0 &= -U_{Batt} + U_{R_2} + U_{R_1} \\ \Rightarrow U_{R_2} &= U_{Batt} - U_{R_1} \\ &= U_{Batt} - U_E + U_{BE} \end{aligned}$$

Stellt man nun eine Knotengleichung für die Basis auf, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} 0 &= I_{R_2} - I_B - I_{R_1} \mid \text{mit } I_{R_1} = I_{Quer} = n \cdot I_B \\ \Rightarrow I_{R_2} &= (n + 1) \cdot I_B \end{aligned}$$

Damit ergibt sich R_2 zu:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{U_{R_2}}{I_{R_2}} \\ &= \frac{U_{Batt} - U_E + U_{BE}}{(n + 1) \cdot I_B} \end{aligned}$$

4 Literatur

Literatur

- [1] Elektronik Labor; Versuchsbeschreibung 2; Fachhochschule Giessen-Friedberg; Fachbereich IEM
- [2] Kories/Schmidt-Walter; Taschenbuch der Elektrotechnik; 6. Auflage; Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a.M. 2004, ISBN 3-817-11734-5
- [3] Joachim Grehn und Joachim Krause (Hrsg.); Metzler Physik; Schroedel Verlag 1998; 3.Auflage; ISBN 3-507-10700-7
- [4] Klaus Beuth; Elektronik 2 - Bauelemente; Vogel Fachbuch; 17. Auflage 2003; ISBN 3-8023-1957-5
- [5] Klaus Beuth, Wolfgang Schmusch; Elektronik 3 - Grundsaltungen; Vogel Fachbuch; 15. Auflage 2003, ISBN 3-8023-1970-2
- [6] Arnold Führer, Klaus Heidemann, Wolfgang Nerreter; Grundgebiete der Elektrotechnik 1; 7. Auflage ; Hanser Verlag, München 2003; ISBN 3-446-22306-1