



---

Skriptum zum  
Praktikum  
**Elektronik II**  
– Schaltungstechnik –  
SS 2008

# Transistorgrundschaltungen

Andreas Backes

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Ersatzschaltbilder</b>                    | <b>2</b>  |
| 2.1      | Einführung . . . . .                         | 2         |
| 2.2      | Gleichstromersatzschaltbild . . . . .        | 2         |
| 2.3      | Wechselstromersatzschaltbild . . . . .       | 3         |
| 2.4      | Kleinsignalersatzschaltbild . . . . .        | 3         |
| 2.5      | T-Operator Ersatzschaltbild . . . . .        | 5         |
| <b>3</b> | <b>Transistorgrundschaltungen</b>            | <b>7</b>  |
| 3.1      | Einführung . . . . .                         | 7         |
| 3.2      | Eigenschaften der Grundschaltungen . . . . . | 8         |
| 3.3      | Berechnung der Eigenschaften . . . . .       | 8         |
| 3.4      | Ein- und Ausgangswiderstand . . . . .        | 10        |
| 3.5      | Emittergrundschaltung . . . . .              | 11        |
| 3.6      | Kollektorgrundschaltung . . . . .            | 12        |
| 3.7      | Basisgrundschaltung . . . . .                | 12        |
| <b>4</b> | <b>Arbeitspunkt</b>                          | <b>13</b> |
| 4.1      | Einführung . . . . .                         | 13        |
| 4.2      | Bestimmung des Arbeitspunktes . . . . .      | 13        |
| 4.2.1    | Aus den Kennlinien . . . . .                 | 13        |
| 4.2.2    | Schaltungslesen . . . . .                    | 14        |
| 4.3      | Einfluss der Temperatur . . . . .            | 15        |
| 4.4      | Aussteuerbereich . . . . .                   | 16        |
| <b>5</b> | <b>Übertragungsfunktion</b>                  | <b>18</b> |
| 5.1      | Hochpass . . . . .                           | 18        |
| 5.2      | Tiefpass . . . . .                           | 19        |
| 5.3      | Phasendrehung . . . . .                      | 20        |
| 5.4      | Bandbreite . . . . .                         | 21        |
| <b>6</b> | <b>Mikrofone</b>                             | <b>22</b> |
| 6.1      | Kondensatormikrofon . . . . .                | 22        |
| 6.2      | Elektretmikrofone . . . . .                  | 23        |
| <b>7</b> | <b>Vorbereitende Aufgaben</b>                | <b>25</b> |

|          |                     |           |
|----------|---------------------|-----------|
| <b>8</b> | <b>Messaufgaben</b> | <b>30</b> |
|----------|---------------------|-----------|

|          |                     |           |
|----------|---------------------|-----------|
| <b>9</b> | <b>Ausarbeitung</b> | <b>31</b> |
|----------|---------------------|-----------|

# 1 Einführung

Dieser Versuchsaufbau erweitert die Funktion unseres MP3-Verstärkers um ein Mikrofon und den zugehörigen Vorverstärker. Das Signal des Mikrofons wird somit verstärkt und kann an den Line-In-Eingang der Leistungsendstufe angeschlossen werden. Als Mikrofon wird eine Elektretmikrofonkapsel verwendet, auf deren Funktionsweise im letzten Kapitel näher eingegangen wird.

Hauptziel dieses Teils des Praktikums ist es, die Eigenschaften der Transistorgrundsaltungen anzuwenden. Um Berechnungen von Transistorschaltungen zu vereinfachen, werden zunächst verschiedene Ersatzschaltbilder vorgestellt. Darauf folgt eine theoretische Beschreibung der Grundsaltungen und ein Abschnitt zur Einstellung des Arbeitspunktes.

Am Ende folgt noch ein Abschnitt zum Thema Kondensatormikrofon und speziell zum Elektretmikrofon.

Im praktischen Teil dieses Versuchs wird eine Schaltung zur Verstärkung des Mikrofonsignals aufgebaut. Diese Schaltung soll in den Gesamtaufbau integriert werden. Natürlich soll auch diese Schaltung ihre Betriebsspannung aus dem batteriebetriebenen Netzteil beziehen, welches im Versuch Netzteile aufgebaut wird.

Anforderungen an diese Schaltung sind also ein geringer Stromverbrauch und ein störungsfreies Übertragen der Tonsignale an die Endstufe.

## 2 Ersatzschaltbilder

### 2.1 Einführung

Ersatzschaltbilder dienen im Allgemeinen dazu, eine Schaltung so zu vereinfachen, dass sie leichter zu berechnen oder zu verstehen ist. Dabei ist nicht jedes der im Folgenden vorgestellten Ersatzschaltbilder für die Lösung jeder Problemstellung geeignet.

### 2.2 Gleichstromersatzschaltbild

Wollen wir eine Schaltung im Gleichstromfall betrachten (z.B. zur Berechnung des Arbeitspunktes), so ist es sinnvoll, nur das statische Verhalten der Bauteile zu betrachten, da durch die frequenzabhängigen Terme lediglich unnötige Formeltermine mitgeschleppt werden, die von vornherein ausgeklammert werden können. Zum Erstellen eines Gleichstromersatzschaltbildes befolgen wir die nachfolgenden Regeln.

- **Ohmscher Widerstand:** Dieser verhält sich für zeitabhängige, wie für konstante Ströme immer gleich  $U/I = R$ .
- **Kapazität:** Eine Kapazität ist, nach dem sie aufgeladen ist, ein Leerlauf. Das bedeutet für hinreichend kleine Kapazitäten kann davon ausgegangen werden, dass sie für Gleichstrom einen Leerlauf darstellen.
- **Induktivität:** Da der Widerstand einer idealen Induktivität von der zeitlichen Änderung des fließenden Stroms abhängt, ist dieser für konstante Ströme gleich Null, was einem Kurzschluss entspricht.
- **Spannungsquellen:** Eine ideale Wechselspannungsquelle besitzt einen Widerstand von Null Ohm, entspricht also einem Kurzschluss.
- **Stromquellen:** Eine ideale Wechselstromquelle besitzt einen unendlich großen Innenwiderstand, entspricht also einem Leerlauf.
- **Transistoren:** Für einen Transistor bietet sich das Kleinsignal Ersatzschaltbild aus Abb. 2.4 an. Man kann auch das Ebers-Moll Ersatzschaltbild, das Sie aus der Vorlesung kennen, verwenden.

Erstellt man aus der Schaltung in Abb. 2.1 ein Gleichstromersatzschaltbild, so ergibt sich die Schaltung in Abb. 2.2.

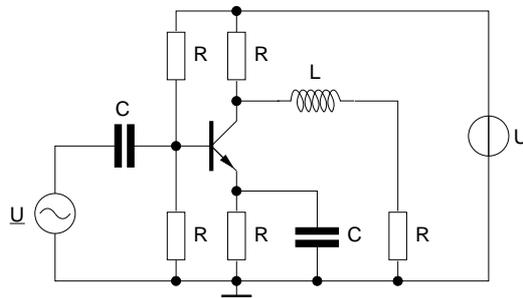


Abb. 2.1: EGS mit induktiver Lastkopplung, Stromgegenkopplungs- und Eingangskondensator

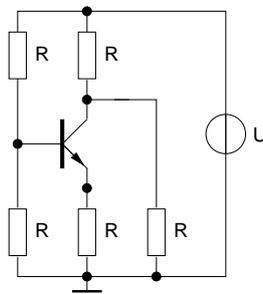


Abb. 2.2: Gleichstromersatzschaltbild der EGS aus Abb. 2.1

## 2.3 Wechselstromersatzschaltbild

Für die Bestimmung der Schaltungseigenschaften im Wechselstrombetrieb können auch einige Vereinfachungen durch die Anwendung folgender Regeln gemacht werden:

1. Gleichstromquellen werden als Leerlauf betrachtet
2. Gleichspannungsquellen als Kurzschluss

## 2.4 Kleinsignalersatzschaltbild

Das Kleinsignal- und das T-Operatorersatzschaltbild, die im nächsten Kapitel vorgestellt werden, sind Vereinfachungen, die nur den Transistor betreffen. Da das Verhalten des Transistors nicht durch eine, sondern durch einen Satz von Gleichungen beschrieben werden kann, enthalten diese Ersatzschaltbilder mehr als nur ein Element.

In den Abbildungen der Ersatzschaltbilder sind jeweils die Anschlüsse für Basis, Emitter und Kollektor eingezeichnet. Anstelle des Transistorsymbols wird das Kleinsignalersatzschaltbild für niedrige Frequenzen eingesetzt. Das Kleinsignalersatzschaltbild des Transistors ist immer dann anzuwenden, wenn die Änderungen, die durch die Signale verursacht werden den aktuellen Arbeitspunkt des Transistors nur leicht variieren.

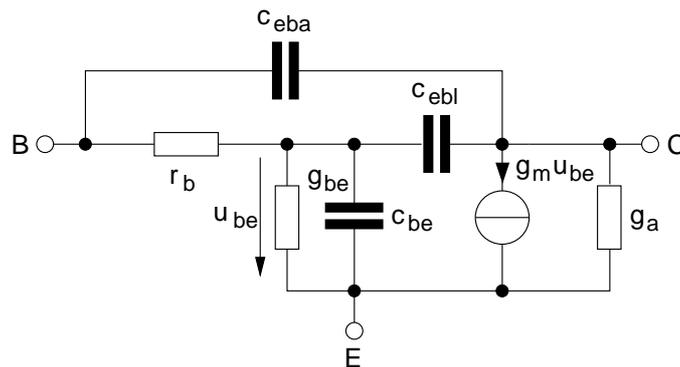


Abb. 2.3: Kleinsignalersatzschaltbild für hohe Frequenzen

Abb. 2.3 zeigt ein breitbandiges Ersatzschaltbild. Eine weitere Vereinfachung für den Gebrauch bei niedrigen Frequenzen sehen Sie in der nächsten Abb. .

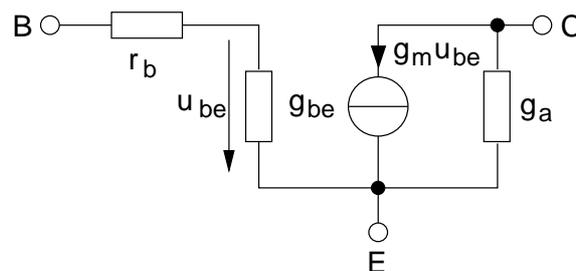


Abb. 2.4: Kleinsignalersatzschaltbild für niedrige Frequenzen

Die Kapazitäten  $C_{cba}$ ,  $C_{cbl}$  und  $C_{be}$  sind keine extern beschalteten Kapazitäten, sondern durch den Herstellungsprozess bedingte parasitäre Elemente. Ihre Größenordnung liegt meist im Femtofarad Bereich. Angaben zur genauen Größe finden Sie im Datenblatt. (hier werden in der Literatur unterschiedlichste Bezeichnungen und auch andere Ersatzschaltbilder verwendet)

Der Wert  $r_b$  bezeichnet den Basisbahnwiderstand,  $g_{be}$  bezeichnet den Eingangsleitwert,  $g_0$  bezeichnet den Ausgangsleitwert. Die Stromquelle beschreibt den Zusammenhang zwischen  $U_{be}$  und Kollektorstrom  $I_C$  auf vereinfachte Weise (siehe Gleichung 2.2 für den nicht vereinfachten Zusammenhang),  $g_m$  bezeichnet die Steilheit des Transistors.

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial U_{be}} \quad (2.1)$$

mit dem Kollektorstrom

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{U_{be}}{U_T}\right) \quad (2.2)$$

folgt

$$g_m = I_S \exp\left(\frac{U_{be}}{U_T}\right) \frac{1}{U_T} = \frac{I_C}{U_T}. \quad (2.3)$$

$\beta$  bezeichnet den Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und Basisstrom und wird deshalb Stromverstärkung genannt.

$$I_C = \beta I_B \quad (2.4)$$

Man nennt  $\beta$  aus diesem Grund Gleichstromverstärkung des Transistors (typische Werte liegen zwischen 50 und 500).

## 2.5 T-Operator Ersatzschaltbild

Hier wird der Transistor als Vierpol mit folgenden Eigenschaften betrachtet:

1. Die Spannung am Eingangstor ist gleich der Spannung am Ausgangstor ( $V_u=1$ ).
2. Zwischen dem Strom  $I_1$  und dem Strom  $I_2$  besteht der Zusammenhang  $I_2 = I_1 T$ .
3. Widerstände auf der Ausgangsseite erscheinen auf der Eingangsseite um den Faktor  $T$  vergrößert.
4. Widerstände auf der Eingangsseite erscheinen auf der Ausgangsseite um den Faktor  $\frac{1}{T}$  verkleinert.

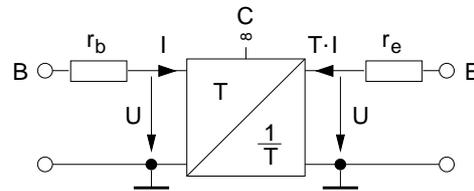


Abb. 2.5: T-Operator Ersatzschaltung

Dieser Vierpol stellt eine vereinfachte Form des Transistors dar. Der Eingangswiderstand des Kollektors wird als sehr hochohmig betrachtet, deshalb wird er hier mit einem Leerlauf gleichgesetzt.

Analog zur Verwendung des Kleinsignalersatzschaltbildes setzt man das T-Operatorersatzschaltbild für den Transistor in die zu betrachtende Schaltung ein und benutzt die Eigenschaften 1-4.

Der Wert des Faktors  $T$  hängt von der Betriebsfrequenz des Transistors ab. Für Niederfrequenzbetrieb  $f \ll f_g$  gilt  $T = \beta$ , für Mittel- und Hochfrequenzbetrieb gilt  $T = \frac{\omega t}{j\omega}$  bzw.  $T = \frac{\omega t}{j\omega} + 1$ . Für unsere Frequenzen im kHz Bereich ist die Bedingung  $f \ll f_g$  erfüllt.

Die Vorgehensweise wird im Kapitel Grundsaltungen wieder am Beispiel des Ausgangswiderstands einer Kollektorgrundsaltung gezeigt.

## 3 Transistorgrundschaltungen

### 3.1 Einführung

Jede Schaltung, die einen Transistor enthält, betreibt diesen in einer der drei Grundschaltungen:

- Emittergrundschaltung
- Kollektorgrundschaltung
- Basisgrundschaltung.

Im Folgenden werden die Eigenschaften der einzelnen Grundschaltungen aufgeführt.

Es ist zunächst wichtig zu wissen, wann man es mit welcher dieser drei Grundschaltungen zu tun hat.

Zur Unterscheidung betrachtet man nun den Transistor als Vierpol. Da der Transistor nur über drei Anschlüsse verfügt, muss logischerweise ein Anschluss des Transistors gleichzeitig zum Eingangs- und zum Ausgangsterminal des Vierpols gehören. Dieser gemeinsame Anschluss zeigt an welche Grundschaltung vorliegt.

Zum Beispiel ist in der Schaltung in Bild 3.1 unten der Emitter dem Ausgang und dem Eingang gemeinsam, es handelt sich also um eine Emittergrundschaltung.

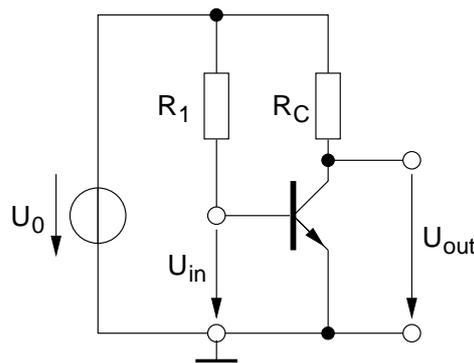


Abb. 3.1: Beispiel für eine Emittergrundschaltung

### 3.2 Eigenschaften der Grundschaltungen

Der Grund für diese Einteilung liegt darin, dass jede Grundschaltung für sie typische Eigenschaften aufweist. Möchte man nun eine neue Schaltung entwerfen oder analysieren, wie ein vorliegender Aufbau funktioniert, ist es hilfreich, die Grundschaltungen und ihre Eigenschaften zu kennen. Tabelle 2.1 gibt eine grobe Übersicht. Hierbei ist zu beachten, dass diese Verhältnisse nur dann gegeben sind, wenn der Strom  $I_C$  konstant ist. Bei der konkreten Berechnung werden Sie sehen, dass die Eigenschaften der Grundschaltung auch immer von dem Arbeitspunkt des Transistors abhängen.

| Eigenschaft          | Grundschaltung   |                |                    |
|----------------------|------------------|----------------|--------------------|
|                      | Emitterschaltung | Basisschaltung | Kollektorschaltung |
| Eingangswiderstand   | mittel           | klein          | hoch               |
| Ausgangswiderstand   | mittel           | hoch           | klein              |
| Spannungsverstärkung | hoch             | hoch           | klein              |
| Stromverstärkung     | hoch             | klein          | hoch               |

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Grundschaltungen

### 3.3 Berechnung der Eigenschaften

Zur Berechnung der Spannungs- und Stromverstärkung nutzt man das Kleinsignalersatzschaltbild des Transistors. Je nach dem ob Gleich- oder Wechselspannungsfall relevant sind, ist ein Gleich- oder Wechselstrom Ersatzschaltbild zu wählen. Die Berechnung wird im Folgenden an einem Beispiel durchgeführt.

Wir gehen von einer einfachen Emittergrundschaltung gemäß Abb. 3.2 aus.

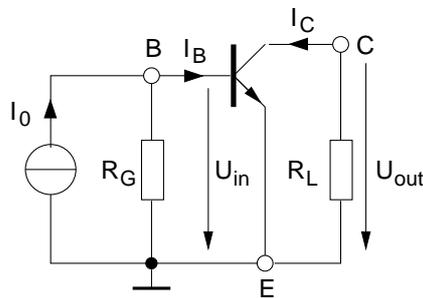


Abb. 3.2: Einfache Emittergrundschaltung

Setzt man unser vereinfachtes Kleinsignalersatzschaltbild ein, so ergibt sich:

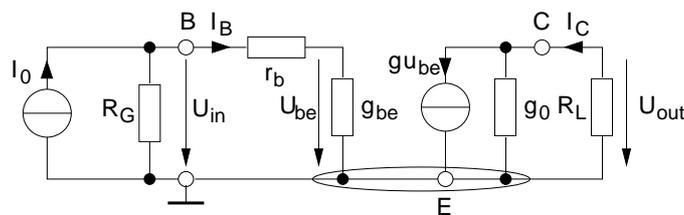


Abb. 3.3: Emitterschaltung nach Einsetzen des Kleinsignalersatzschaltbildes

Uns interessiert also  $V_U = U_{out}/U_{in}$ . Für  $U_{out}$  schreiben wir:

$$U_{out} = -\frac{I_C}{G_L + g_0} \quad (3.1)$$

nach unserem Ersatzschaltbild gilt für  $I_C$

$$I_C = U_{be} g_m \quad (3.2)$$

setzt man nun Gleichung 3.2 in Gleichung 3.1 ein so folgt:

$$U_{out} = -U_{in} \frac{r_{be}}{r_{be} + r_b} \cdot \frac{g_m}{G_L + g_0}. \quad (3.3)$$

Nun kann dieser Ausdruck noch weiter vereinfacht werden, wenn man die in der Praxis oft erfüllten Näherungen  $R_L \ll \frac{1}{g_0}$  und  $r_b \ll r_{be}$  verwendet. Es folgt:

$$V_U \cong -g_m R_L \quad (3.4)$$

Eine Tabelle, die die NF-Eigenschaften der Grundschaltungen enthält, finden Sie im Skript zur Vorlesung Elektronik 2, bzw. auch in vielen Büchern zur Schaltungstechnik (Beachten Sie beim Vergleichen der Werte, von welchem Aufbau der Grundschaltung ausgegangen wird).

### 3.4 Ein- und Ausgangswiderstand

Für die Berechnung der Ein- und Ausgangswiderstände eignet sich das vereinfachte Kleinsignalersatzschaltbild und das T-Operator Ersatzschaltbild. Da die Berechnung mittels Kleinsignalersatzschaltbild etwas aufwendiger ist, wird hier ein Beispiel mittels T-Operator vorgeführt. Abb. 3.4 zeigt eine

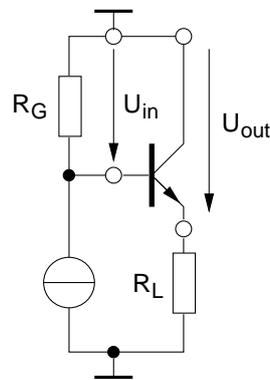


Abb. 3.4: Kollektorgrundschaltung

Kollektorgrundschaltung. Setzt man das T-Operator Ersatzschaltbild ein, so ergibt sich Abb. 3.5.

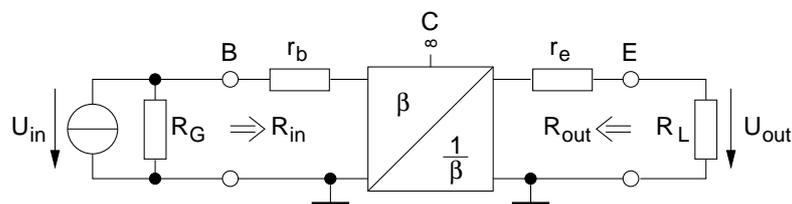


Abb. 3.5: Kollektorgrundschaltung mit T-Operator

Transformiert man nun gemäß der Regeln für den T-Operator (siehe Kapitel 1), so ergibt sich die Abb. 3.6. Aus diesem Ersatzschaltbild ergibt sich der Ein-

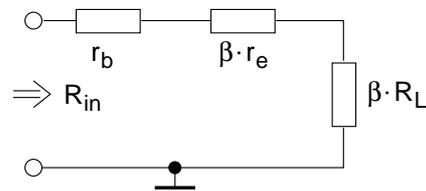


Abb. 3.6: Eingangswiderstand nach Anwenden des T-Operators

gangswiderstand zu

$$R_{in} = r_b + \beta(r_e + R_L) \quad (3.5)$$

Ein analoges Vorgehen für den Ausgang liefert das Ersatzschaltbild in Abb. 3.7 womit sich  $R_{out}$  wie folgt ergibt.

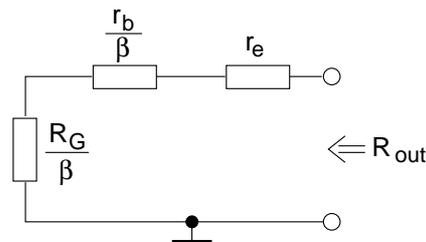


Abb. 3.7: Ausgangswiderstand nach Anwenden des T-Operators

$$R_{out} = r_e + \frac{1}{\beta}(r_b + R_G) \quad (3.6)$$

Zum Vergleich können Sie versuchen, einen dieser Werte mit Hilfe des Kleinsignalersatzschaltbildes herzuleiten. (Beachten Sie dabei, dass Sie am Ende die Vereinfachungen  $R_L \ll 1/g_0$ ,  $R_L \gg r_e$ ,  $\beta \gg 1$  und  $g_0 \ll 1 + \frac{\beta}{R_G + r_b + r_{be}}$  verwenden müssen, um auf die gleichen Werte zu kommen.)

### 3.5 Emittergrundschaltung

Die Emittergrundschaltung ist die am häufigsten verwendete Grundschaltung, da sie die besten Spannungsverstärkungseigenschaften unter den Grundschaltungen besitzt. Betrachtet man die Emittergrundschaltung gemäß Abb. 3.2, so ergibt sich die Spannungsverstärkung zu  $V_U = -g_m R_L$ , die Stromverstärkung ergibt sich aus dem Zusammenhang von  $I_B$  und  $I_C$  zu  $V_I = \beta$ . Mit Hilfe des

T-Operator Ersatzschaltbildes ergeben sich  $R_{in} = \beta r_e + r_b$  und  $R_{out} = \infty$ . In unserem Versuchsaufbau wird die Emitterstufe den Großteil der Spannungsverstärkung übernehmen. Aufgrund ihres hohen Ausgangswiderstandes eignet sie sich jedoch nicht als Ausgang zur Endstufe, da hier ein niederohmiger Abschluss günstiger ist.

Wäre der Ausgangswiderstand hochohmig, so würde ein großer Teil der Signalamplitude über dem Ausgangswiderstand des Vorverstärkers abfallen, da dieser, auf das Signal bezogen, eine Serienschaltung mit dem Eingangswiderstand der Endstufe bildet. Also wird die an die Endstufe übergebene Amplitude der Signalspannung größer, je kleiner der Ausgangswiderstand des Vorverstärkers, im Vergleich zum Eingangswiderstand der Endstufe, wird.

### 3.6 Kollektorgrundschaltung

Die Kollektorgrundschaltung besitzt eine Spannungsverstärkung von näherungsweise 1. Ihre Stromverstärkung ergibt sich zu  $-\beta$ .

Die Werte für ihren Ein- und Ausgangswiderstand ergeben sich wie oben vorgeführt zu  $R_{in} = r_b + \beta(r_e + R_L)$  und  $R_{out} = r_e + \frac{1}{\beta}(r_b + R_G)$ .

Kollektorgrundschaltungen eignen sich folglich nicht für Spannungsverstärkung. Da die Stromverstärkung ein negatives Vorzeichen besitzt, kann sie als Inverter betrieben werden (Siehe auch Versuch Netzteile).

Für uns ist ihr niedriger Ausgangswiderstand wichtig, um einen guten Abschluss zur Endstufe zu ermöglichen.

### 3.7 Basisgrundschaltung

Die Basisgrundschaltung wird in der Praxis selten verwendet. Sie kann jedoch von Nutzen sein, wenn eine Stufe mit hohem Ausgangswiderstand und niedrigem Eingangswiderstand benötigt wird. Für eine Basisgrundschaltung gemäß Abb. 3.8 folgt ein  $V_U = -1$ . Mit Hilfe des T-Operators lassen sich die Werte für  $V_U = R_L \frac{1}{r_e \frac{\beta}{r_b}}$ ,  $R_{aus} = \infty$  und  $R_{ein} = r_e + \frac{r_b}{\beta}$  leicht nachvollziehen.

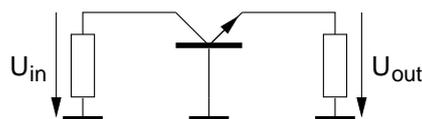


Abb. 3.8: Basisgrundschaltung

## 4 Arbeitspunkt

### 4.1 Einführung

Definition: Der Arbeitspunkt ist der Satz von Größen (Spannungen und oder Strömen), der den Zustand eines Bauelements im statischen Fall eindeutig beschreibt.

Für einen bekannten Widerstand wäre also der Arbeitspunkt durch Angabe der anliegenden Spannung oder des fließenden Stroms gegeben.

Bei einem Transistor ist dies etwas aufwendiger, da es hier drei Spannungen ( $U_{BE}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CE}$ ) und drei Ströme ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ ) gibt. Nicht alle dieser Größen sind unabhängig voneinander (z.B. ist  $I_C = I_B\beta$ ,  $-U_{BC} = U_{BE} + U_{CE}$  usw). So genügt es, nur drei der Größen zu kennen, um das System vollständig zu beschreiben.

Im Folgenden wollen wir den Arbeitspunkt als bekannt annehmen, da wir  $I_C$ ,  $U_{BE}$  und  $U_{CE}$  kennen.

Die Beschaltung des Transistors legt seinen Arbeitspunkt fest. Im Folgenden werden einige der Methoden zur Berechnung des Arbeitspunktes vorgestellt

### 4.2 Bestimmung des Arbeitspunktes

Wenn wir das Gleichstromersatzschaltbild haben, nutzen wir die Kirchhoffschen Gesetze um die Spannungen und Ströme zu berechnen. Hierbei ergibt sich das Problem, dass der nichtlineare Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und  $U_{BE}$  dazu führt, dass sich das resultierende Gleichungssystem nur schwer geschlossen lösen lässt. Aus diesem Grund bietet sich eine etwas intuitivere Vorgehensweise an.

#### 4.2.1 Aus den Kennlinien

Es ist möglich den Arbeitspunkt eines Transistors aus seinen Kennlinien abzulesen. Abb. 4.1 zeigt  $I_C(U_{CE})$  für verschiedene Werte von  $U_{BE}$ . Die Gerade, die in Abb. 4.1 eingezeichnet ist, nennt sich Lastgerade. Die Lastgerade besitzt die Steigung  $\frac{1}{R_L}$ , ihr Schnittpunkt mit der Kennlinie legt den Arbeitspunkt fest. Da der Wert von  $U_{be}$  für normal aktiven Betrieb nur leicht schwankt, kann man ihn in guter Näherung zu  $U_{BE} = 0,7V$  annehmen.

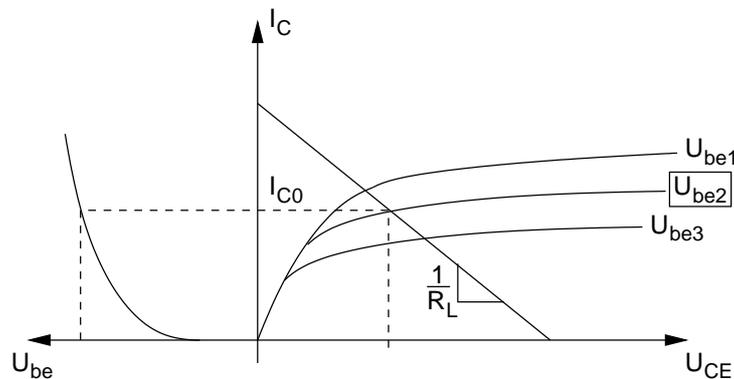


Abb. 4.1: Ausgangskennlinienfeld mit Lastgerade

Extrapoliert man den Wert für  $I_C$  aus dem Graphen von  $I_C(U_{CE})$  in den Graphen für  $I_C(U_{BE})$ , so lässt sich mit dem Näherungswert für  $U_{BE}$  die Spannung  $U_{CE}$  aus dieser Kennlinie ablesen.

#### 4.2.2 Schaltungslesen

Ein weiterer Ansatz um den Arbeitspunkt zu bestimmen ist das Verwenden von einigen in der Praxis recht gut erfüllten Näherungen. Die Form der Gleichungen bei der Maschen- und Knotenanalyse wird somit stark vereinfacht. Da i.a. der Wert von  $\beta \gg 1$  ist, kann man aus

$$0 = I_C + I_B + I_E \quad (4.1)$$

folgern, dass in guter Näherung gilt:

$$I_B \approx 0 \Rightarrow I_C \approx I_E. \quad (4.2)$$

Wird zur Einstellung des Basispotenzials ein Spannungsteiler verwendet, so kann man annehmen, dass  $I_q$  (der Querstrom durch den Spannungsteiler) groß im Vergleich zum Basisstrom ist (Näherung Faktor 5-10). Auch hier ist die Annahme dass  $U_{be}$  ca 0,7V beträgt hilfreich. Für grobe Übersichtsrechnungen genügen diese ersten Werte.

Man sollte nicht vergessen, dass es sich hier nur um eine Näherung handelt. Möchte man den Fehler etwas verringern, kann man auf iterativem Weg zu genaueren Ergebnissen kommen. Ein Beispiel hierfür wäre eine Annahme

für  $\frac{I_q}{I_B} = 10$ . Jetzt berechnet man mit diesem Wert alle sonstigen Spannungen und Ströme und gewinnt hieraus einen Korrekturwert für  $I_B$ .

### 4.3 Einfluss der Temperatur

Der Arbeitspunkt einer Schaltung hängt, neben der Beschaltung, auch von der Temperatur ab. Für den Zusammenhang zwischen  $U_{BE}$  und  $U_T$  gilt:

$$U_{be} \approx U_T \ln \left( \frac{I_C}{I_S} \right) \quad (4.3)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (4.4)$$

mit

$$I_S \cong T^3 \exp \left( -\frac{W_g}{kT} \right) \quad (4.5)$$

durch Umformen von Gleichung 4.3 und Einsetzen von Gleichung 4.4 und Gleichung 4.5 folgt:

$$I_C \cong T^3 \exp \left( -\frac{Const}{kT} \right). \quad (4.6)$$

$I_C$  steigt also mit der Temperatur an. Da  $I_C \gg I_B$ , wird der wesentliche Teil der Verlustleistung im Transistor durch  $I_C \cdot U_{CE}$  beschrieben. Dies bedeutet: ohne eine Gegenmaßnahme steigt der Strom  $I_C$  und damit die Temperatur solange an, bis der Transistor den eingestellten Arbeitspunkt verlässt oder zerstört wird.

Die Kollektorschaltung, die im Versuchsaufbau verwendet wird, zeigt diesen Effekt, wenn ein zu kleiner Emitterwiderstand verwendet wird oder beim Aufbau ein Kurzschluss vom Emitter zur Masse hergestellt wird. Durch diesen Fehler fällt die gesamte Versorgungsspannung über den Transistor ab, somit wird  $I_C$  sehr viel größer, außer wenn er durch den Widerstand  $R_5$  begrenzt wird (vgl. Abb. 7.3 im Abschnitt Vorbereitende Aufgaben).

Eine genauere Betrachtung der Temperaturabhängigkeit und Möglichkeiten zur schaltungstechnischen Vorbeugung der daraus folgenden negativen Effekte, finden Sie im Skript zur Elektronik 2.

#### 4.4 Aussteuerbereich

Hierunter versteht man die Größe der Signalamplitude, die von einer Verstärkerschaltung noch linear verstärkt wird. Linear bedeutet hier, die Form des Signals bleibt erhalten. Dies ist für unseren Aufbau ein sehr wichtiger Punkt, da wir das Signal des Mikrofons verstärken und nicht verzerren möchten.

In Abb. 4.2 sehen Sie die Ausgangskennlinie  $I_C(U_{BE})$  eines Transistors. Die eingezeichneten Sinuskurven  $U_{in1}$  und  $U_{in2}$  zeigen die Schwankung von  $U_{BE}$  an, die durch das Eingangssignal verursacht wird. Übertragen sich diese Schwankung nun auf die Ausgangskennlinie, so sehen Sie, der Kollektorstrom steigt und fällt auch in Form einer Sinuswelle (für  $U_{in1}$ ). Wird jedoch die Amplitude des Eingangs zu groß ( $U_{in2}$ ), so wird der Strom maximal und das Signal wird zwar verstärkt, aber die obere Welle der Sinuskurve ist nun abgeschnitten.

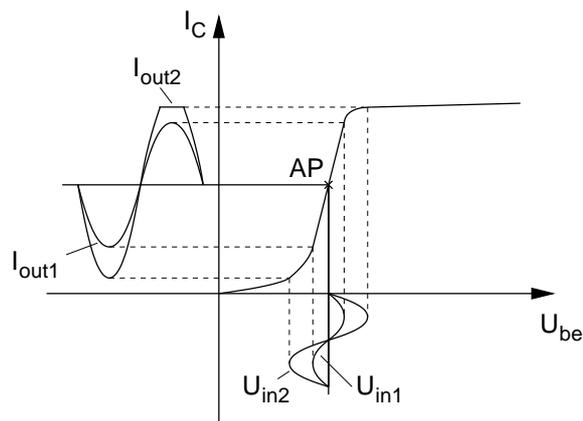


Abb. 4.2:  $U_{in1}$  korrekte Aussteuerung um den Arbeitspunkt,  $U_{in2}$  zu große Amplitude

Es ist also wichtig, einen passenden Transistor im korrekten Arbeitspunkt zu wählen.

Auch ist zu berücksichtigen, wo der Arbeitspunkt im linearen Bereich liegt. Für ein symmetrisches Signal sollte er möglichst in der Mitte liegen. Was passiert, wenn der Arbeitspunkt der Schaltung zu weit in Richtung der Sättigung verschoben wird, zeigt Abb. 4.3.

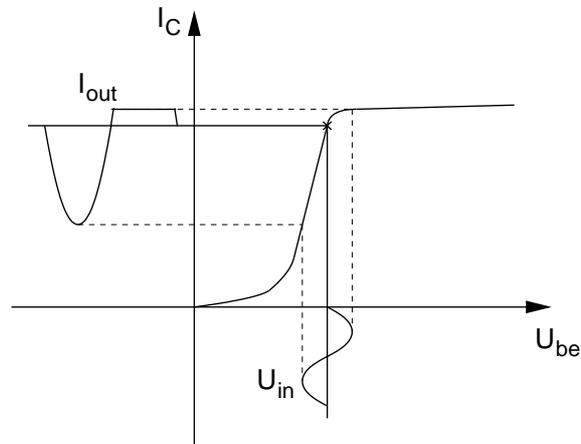


Abb. 4.3: Arbeitspunkt zu nahe am Sättigungsbereich

Man muss also bei der Wahl des Arbeitspunktes auch darauf achten, dass der Arbeitspunkt weit genug im linearen Bereich liegt um eine lineare Übertragung des Signals zu ermöglichen.

Im Versuch Netzteil wird dieser, hier nachteilige Effekt, übrigens genutzt um eine rechteckförmige Spannung aus einem Sinussignal zu erzeugen.

## 5 Übertragungsfunktion

In allen vorherigen Betrachtungen wurde der Einfluss der Kapazitäten vernachlässigt, da stets der statische oder quasistatische Fall relevant war. Jedoch muss unser Vorverstärker auch Signale übertragen, die im Frequenzbereich von mehreren Kiloherz liegen.

Für diese Betrachtungen gilt allgemein das Wechselspannungersatzschaltbild und speziell für den Transistor das Kleinsignalersatzschaltbild für niedrige Frequenzen. Niedrige Frequenzen bedeutet hier, dass die Frequenz des Signals klein gegenüber der Transitfrequenz des verwendeten Transistors ist.

### 5.1 Hochpass

Ein Hochpass ist allgemein ein Vierpol, dessen Übertragungsfunktion  $f = \frac{U_2}{U_1}$  für hohe Frequenzen gegen Eins geht und für niedrige Frequenzen gegen Null.

Abb. 5.1 zeigt einen einfachen Hochpass.

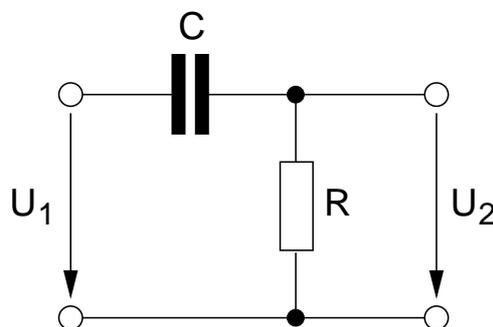


Abb. 5.1: Hochpass

Wichtig für die Signalübertragung ist das Verhältnis der beiden Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  in Abhängigkeit von der Frequenz. Für den Widerstand einer Kapazität gilt:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (5.1)$$

$\omega$  bezeichnet hier die Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$ . Nach allgemeiner Konvention

werden Wechselstromgrößen durch komplexe Zahlen beschrieben (daher das  $j\omega C$ ). Berechnet man nun nach den altbekannten Regeln das Verhältnis von  $U_2$  und  $U_1$ , so ergibt sich:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega CR}} \quad (5.2)$$

Betrachtet man die Grenzwerte dieser Funktion für sehr kleine und sehr große  $\omega$ , so erkennt man für  $\omega$  gegen Null ergibt sich ein Verhältnis nahe Null (dieses Ergebniss entspricht dem Ersetzen eines Kondensators durch einen Leerlauf). Für sehr große Frequenzen ergibt sich eine Verstärkung von Eins (was einem Kurzschluss anstelle der Kapazität entsprechen würde).

## 5.2 Tiefpass

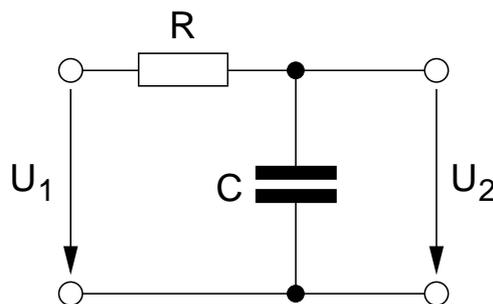


Abb. 5.2: Tiefpass

Abb. 5.2 zeigt den Aufbau eines Tiefpasses mit den gleichen Bauteilen des Hochpasses in Abb. 5.1. Nutzt man nun wieder Gleichung 5.1, so erhält man für die Übertragungsfunktion:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + j\omega CR} \quad (5.3)$$

Die Grenzwertbetrachtung der Gleichung 5.3 zeigt ein genau entgegengesetztes Verhalten wie Gleichung 5.2.

### 5.3 Phasendrehung

Es gibt einen weiteren Unterschied zwischen den Größen am Eingang eines Wechselstrom Vierpols und denen am Ausgang. Die Phase der Spannungen und Ströme muss nicht zwangsläufig erhalten bleiben. Die Phase der Spannungen oder auch der Ströme ist definiert als der Abstand der gleichsinnigen Nulldurchgänge, bezogen auf die Wellenlänge.  $\sin(x)$  und  $\cos(x)$  besitzen beispielsweise eine Phasenverschiebung von  $\pi$  viertel. Die Phasenverschiebung berechnet sich analog zur Phase zwischen zwei komplexen Zahlen in der Mathematik. So gilt für die Phasenverschiebung über einem Hochpass:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right) \quad (5.4)$$

Der Punkt an dem  $\varphi$  den Wert  $45^\circ$  erreicht, nennt man auch Grenzfrequenz. Hier gilt die wichtige Beziehung:

$$\left|\frac{U_1}{U_2}\right| = \sqrt{2} \quad (5.5)$$

In dB entspricht dies einem Abfall von 3dB. Die Frequenz bei der dieser Abfall genau 3dB beträgt, wird auch Grenzfrequenz einer Schaltung genannt. Für den Hochpass findet man:

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.6)$$

für einen Tiefpass ergibt sich beides analog zu:

$$\varphi = \arctan(\omega RC). \quad (5.7)$$

Hier ist die Phase an der 3dB Grenzfrequenz gleich  $-45^\circ$ . Für die Grenzfrequenz gilt

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.8)$$

## 5.4 Bandbreite

Übertragen wir nun die Eigenschaften von Hoch- und Tiefpass auf einen mehrstufigen Verstärker wie er in Abb. 9.1 gezeigt ist, so bilden die Koppelkondensatoren je einen Hochpass mit dem Eingangswiderstand der Folgestufe und dieser Hochpass legt die untere Grenzfrequenz fest. Die obere Grenzfrequenz kommt durch die Basis-Emitterkapazitäten zustande. Für steigende Frequenzen werden diese immer niederohmiger und senken so  $U_{BE}$ , was die Funktion der Schaltung zum Erliegen bringt.

Abb. 5.3 zeigt den Verlauf der Übertragungsfunktion über die Zeit.

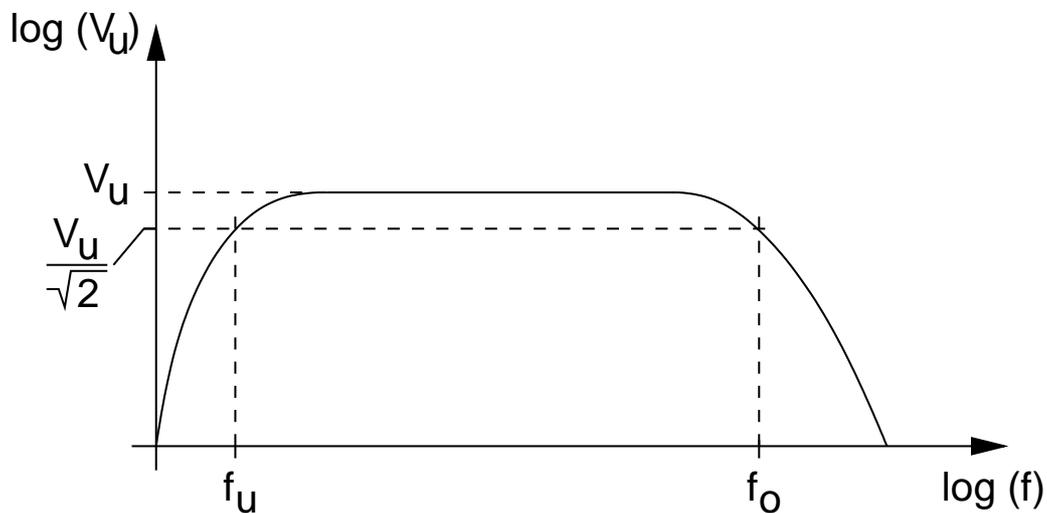


Abb. 5.3: Spannungsverstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

Die markierten Frequenzen geben die untere- ( $f_u$ ) und die obere- ( $f_h$ ) Grenzfrequenz an.

Als Bandbreite eines Verstärkers bezeichnet man den Abstand der beiden Werte.

$$b = \omega_h - \omega_u \quad (5.9)$$

## 6 Mikrofone

Mikrofone wandeln Schall in ein elektrisches Signal um. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten die Druckwellen des Schalls in elektrische Signale zu wandeln. Der nachfolgende Überblick bietet keine vollständige Auflistung dieses interessanten Gebietes.

### 6.1 Kondensatormikrofon

Durch die Änderung einer Kapazität wird ein Strom bzw. eine Spannung erzeugt. Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0}. \quad (6.1)$$

Verändert man nun eine der Größen  $\varepsilon_r$ ,  $A$  oder  $d_0$ , so wird sich die Kapazität verändern. Bei einem Kondensatormikrofon ist es aus technischer Sicht am Einfachsten den Plattenabstand durch die Schallwelle zu ändern. Dies wird dadurch erreicht, dass eine der beiden Kondensatorplatten schwingfähig aufgehängt wird.

Für die Änderung der Kapazität ergibt sich:

$$\Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A \frac{d - d_0}{dd_0}. \quad (6.2)$$

wobei  $d$  den Plattenabstand im ausgelenkten Zustand beschreibt.

Hält man nun die Spannung über der Kapazität konstant, so folgt mit der Definition der Kapazität:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{1}{U} \quad (6.4)$$

Mit der Definition des elektrischen Stroms

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (6.5)$$

ergibt sich ein Strom, wenn sich der Plattenabstand verändert.

Vorteilhaft hierbei ist, dass der Betrag des Ausgangsstroms nur von der Auslenkung der Platten, nicht aber von deren Beschleunigung oder Geschwindigkeit, abhängt (wie es z.B. bei induktiven Mikrofonen der Fall ist). Dies ist auch einer der Gründe, warum sich Kondensatormikrofone meist durch eine hohe Tonqualität auszeichnen. Nachteilig ist es jedoch, dass der Aufbau meist sehr empfindlich gegen Erschütterungen ist und dass die konstante Spannung (in der Tontechnik als Phantomspannung bezeichnet) extern bereit gestellt werden muss.

## 6.2 Elektretmikrofone

Im Gegensatz zum Kondensatormikrofon muss bei einem Elektretmikrofon keine externe Spannung bereitgestellt werden.

Bei einem Elektretmikrofon ist die ruhende Platte mit einem sogenannten Elektret beschichtet. Der Name stammt von der Eigenschaftsverwandschaft zum Magnet. Elektrete sind Dielektrika, die jedoch eine Nettoladung tragen. Diese Ladung bleibt auch nach dem Anlegen eines externen elektrischen Feldes erhalten. Analog zur Magnetisierung eines Permanentmagneten stellt ein Elektret das elektrische Äquivalent zum Diamagneten dar. Festkörpertheoretisch zählen diese Stoffe zu den Ferroelektrika. (Genauerer zu ferroelektrischen Werkstoffen finden Sie in der Vorlesung Werkstoffe der Elektrotechnik.) Diese Eigenschaft erübrigt nun das Anlegen einer Spannung an den Kondensator, da diese durch das Elektret erzeugt wird. Die Oberflächenladung des Elektrets erzeugt auf der beweglichen Platte eine Influenzladung entgegengesetzter Größe. So liegt nun eine konstante Spannung an, die nur durch die Bauform und die Materialeigenschaften des Elektrets bestimmt ist. Da aber die anliegende Spannung jetzt auch vom Abstand abhängt, ist der Zusammenhang zwischen Auslenkung und Ausgangsstrom nicht mehr linear.

Eine externe Stromversorgung wird jedoch weiterhin benötigt, da das Ausgangssignal des Elektretmikrofons weiter verstärkt werden muss. Dies wird meistens über eine integrierte Verstärkerschaltung realisiert. Diese Verstärkerstufe benötigt lediglich wenige mA an Stromversorgung, wohingegen ein Standard-Kondensatormikrofon eine Spannung von 42 Volt benötigt.

Durch die Verwendung von Elektreten wird eine kleine und kostengünstige Bauform des gesamten Mikrofons möglich. Im Handel sind Größen von 1mm bis 1cm Kapseldurchmesser erhältlich.

Einzigster Nachteil dieses Mikrofontyps ist seine geringe Qualität. Elektretmikrofone bilden die weit verbreitetste Mikrofonklasse, da sie klein, billig und von ausreichender Qualität für den Großteil der mobilen Anwendungen sind. So finden sie z.B. in jedem Handy ein Elektretmikrofon.

## 7 Vorbereitende Aufgaben

- Grundsaltungen

1. Abbildung 9.1 zeigt den Gesamtaufbau unseres Mikrofonvorverstärkers. Geben Sie an in welcher Grundsaltung die drei Transistoren betrieben werden. Begründen sie ihre Antwort.

Die Zeichnungen 7.1, 7.2 und 7.3 zeigen die einzelnen Transistorstufen. Für Ihre Berechnungen nehmen Sie im Folgenden  $U_0$  zu 6 V bzw.  $V_1 = 6V$  und  $V_2 = -6V$  an.

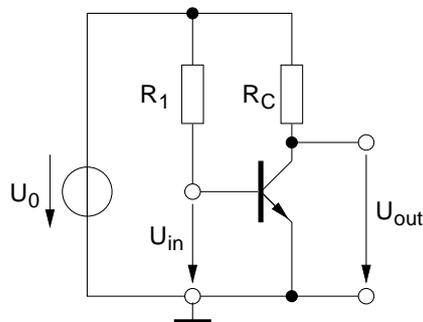


Abb. 7.1: Teilschaltung 1

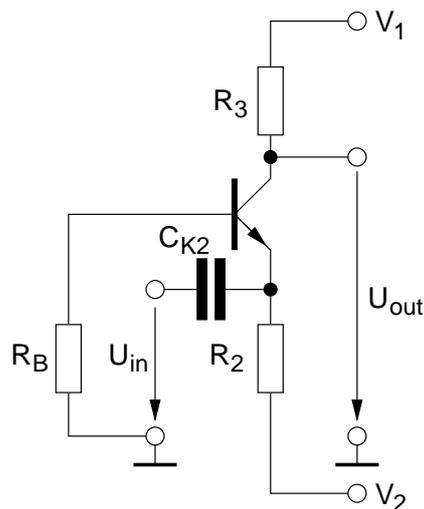


Abb. 7.2: Teilschaltung 2

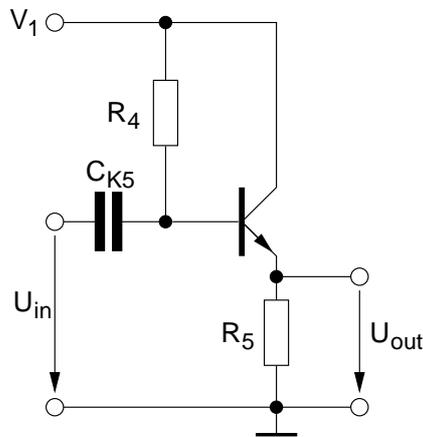


Abb. 7.3: Teilschaltung 3

2. Betrachten Sie nun jede Stufe des Verstärkers separat. Zeichnen Sie ein Gleich- sowie ein Wechselstromersatzschaltbild für jede der drei Zeichnungen 7.1, 7.2 und 7.3.
3. Berechnen sie die Spannungs- und Stromverstärkung sowie Eingangs- und Ausgangswiderstände der einzelnen Stufen. Nehmen Sie die Arbeitspunkte
  - Abbildung 7.1 ( $U_{BE}=0,7\text{V}$ ,  $I_C=30\text{mA}$ ,  $U_{CE} = 2\text{V}$ )
  - Abbildung 7.2 ( $U_{BE}=0,7\text{V}$ ,  $I_C=1,5\text{mA}$ ,  $U_{CE} = 3\text{V}$ )
  - Abbildung 7.3 ( $U_{BE}=0,7\text{V}$ ,  $I_C=0,1\text{mA}$ ,  $U_{CE} = 2\text{V}$ )

für die jeweilige Schaltung an.

(Tipp: Es genügen die genäherten Ergebnisse, die mittels Schaltungslesen oder T-Operator gewonnen werden können. Für die Berechnung der Basisgrundschaltung gehen sie davon aus, dass an  $R_3$  und  $R_4$  die gleiche Spannung abfällt.)

- Arbeitspunkt

1. Besorgen Sie sich Datenblätter für die Transistoren BC 109C und BC107B
2. Bestimmen Sie die Werte der Widerstände  $R_1 - R_5$ , sowie  $R_B$  und  $R_C$  für diese Arbeitspunkte. Sollten Sie auf den Datenblättern den ein oder anderen Wert nicht finden, gehen sie von  $\beta = 200$ ,  $r_b=1\text{Ohm}$  aus

- Elektretmikrofon

1. Besorgen sie sich ein Datenblatt für das MCE-101
2. Angenommen die Kondensatorplatte des MCE-101 hätte einen Kondensatorplattendurchmesser von 1cm und einen Plattenabstand von 2mm. Wie groß muss die auf das Elektret aufgeprägte Spannung sein, damit bei einer Auslenkung von  $0,2 \frac{mm}{ms}$  einen Strom von 1mA fließt (Gehen Sie davon aus, dass die auf dem Elektret aufgeprägte Spannung gleich der Spannung über dem Kondensator ist)
3. Erklären Sie, wieso das Ausgangssignal von der Frequenz abhängt. Im Datenblatt finden Sie eine Angabe zum Frequenzbereich in dem das Mikrofon arbeitet. Berechnen Sie den minimalen, sowie den maximalen Ausgangstrom pro dB.
4. Dimensionieren Sie den Widerstand  $R_M$  in Bild 7.4 so, dass ein Strom von 0,5mA fließt,  $V_1$  beträgt 6V. Wie groß ist die Spannung über dem MCE-101?

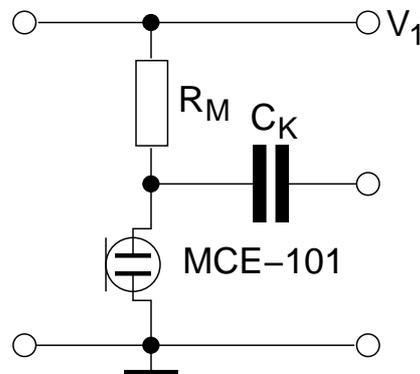


Abb. 7.4: Beschaltung des Mikrofons

- Versuchsaufbau

1. Auf der nächsten Seite finden Sie eine vergrößerte Abbildung der Platine auf die Sie den Versuchsaufbau aufbauen sollen. Zeichnen Sie auf der Platine die Anordnung der Bauteile der Schaltung in Abbildung 9.1. Beachten Sie, dass die Anschlüsse der Kondensatoren aufgrund ihrer Bauform nur eine Leiterbahn auseinander

liegen. Außerdem sind die Anschlüsse von R2 direkt auf benachbarten Bahnen.

Lesen Sie zuvor die Messaufgaben und überlegen Sie sich, an welchen Punkten der Schaltung Sie Messanschlüsse benötigen und zeichnen Sie diese auch ein.

(Tipp: Nutzen Sie den gesamten Platz aus um die Schaltung so übersichtlich wie möglich zu gestalten. Sie können auch Leiterbahnen auftrennen wenn Sie es für sinnvoll halten)

Die bereits eingezeichneten schwarzen Punkte sind für Platinenverbinder gedacht, um im 5. Versuch die Einzelplatinen zu einem Gesamtaufbau miteinander zu verbinden. Wenn Sie ihren Aufbau im 5. Versuch dem Gesamtaufbau hinzufügen möchten, so achten Sie darauf dass für die Anschlüsse von +6V, Masse, -6V und ihrem Signalausgang noch Platz ist, d.h. sie sollten alle auf derselben Seite der Platine liegen und möglichst nahe beieinander.

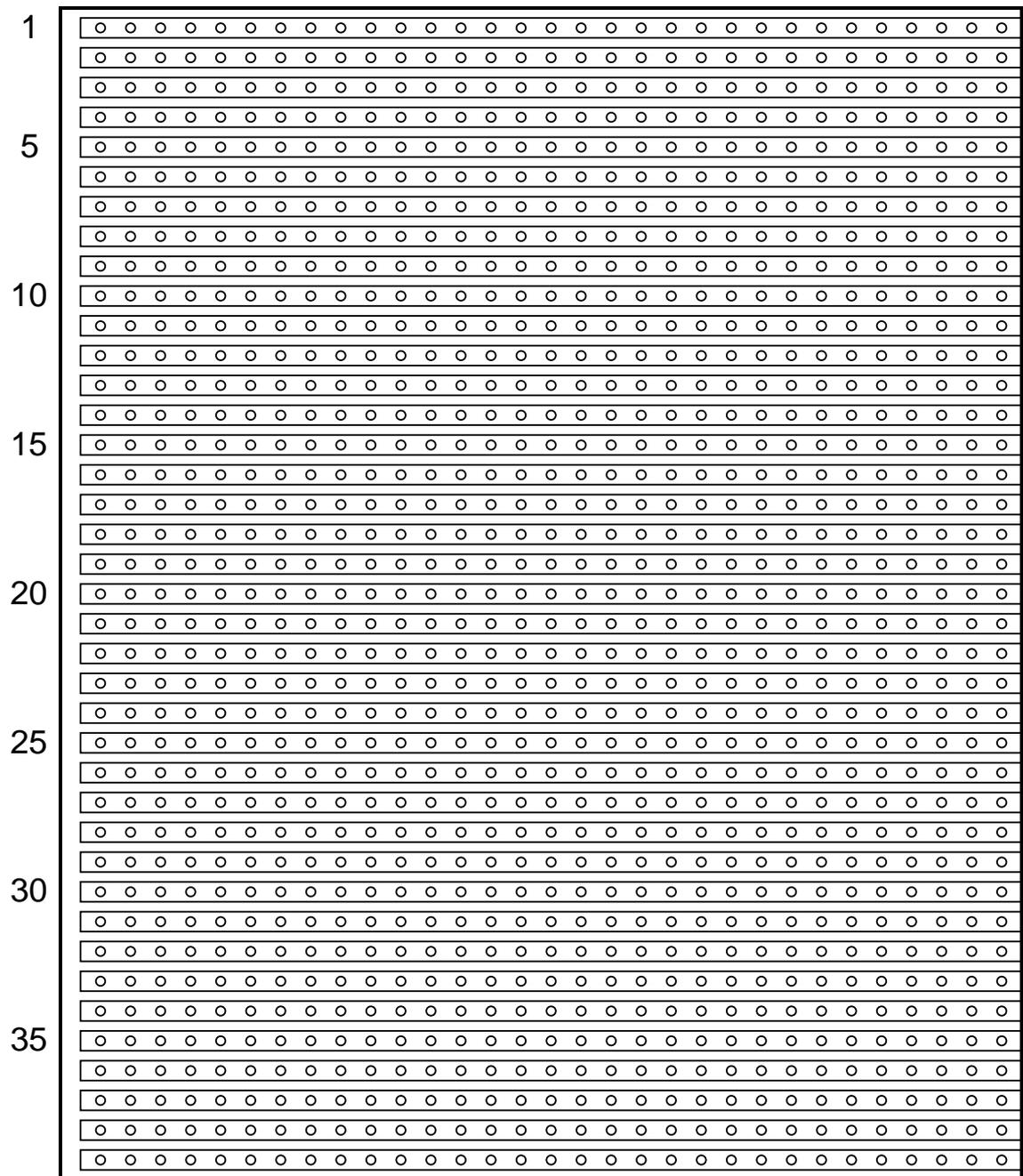


Abb. 7.5: Streifenraster Platine (vergrößert)

## 8 Messaufgaben

*Am Versuchstag durchzuführen*

1. Messen Sie die Stromverstärkung ihrer Transistoren mit dem Multimeter nach. Sollten die Werte von dem Wert im Datenblatt abweichen, so rechnen Sie nach, ob es erforderlich ist, andere Widerstände zu verwenden
2. Bauen Sie die Schaltung gemäß Bild 9.1 auf, die Kondensatoren  $C_k$ ,  $C_{k2}$  und  $C_{k3}$  werden zunächst nicht eingebaut. Verwenden Sie die Widerstände, die Sie in den vorbereitenden Aufgaben berechnet haben
3. Schließen Sie eine Spannungsversorgung an und prüfen Sie, ob die Arbeitspunkte richtig eingestellt sind
4. Überprüfen Sie die Funktion des Mikrofons
5. Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung sowie den Frequenzgang der 1. Stufe
6. Messen Sie Spannungsverstärkung und Frequenzgang der 2. Stufe
7. Messen Sie Spannungsverstärkung und Frequenzgang der 3. Stufe
8. Löten Sie  $C_{k2}$  und  $C_{k3}$  ein
9. Messen Sie Spannungsverstärkung, Frequenzgang und Ausgangswiderstand des Gesamtverstärkers

## 9 Ausarbeitung

Um den Versuch abzuschließen, fertigen sie eine schriftliche Ausarbeitung an. Diese sollte enthalten:

- Die vorbereitenden Aufgaben
- Alle gemessenen Werte, sowie eine kurze Beschreibung wie die Werte aufgenommen wurden (mit welchem Messgerät usw.).
- Fertigen Sie für jeden dieser Werte einen Vergleich mit dem von Ihnen berechneten Wert an. Begründen Sie Abweichungen, falls vorhanden.
- Für die gemessenen Frequenzgänge fertigen Sie Grafiken mit sinnvoller Beschriftung an und markieren Sie die 3dB Grenzfrequenzen.

Ob Sie die Ausarbeitung handschriftlich oder mit dem Computer anfertigen, bleibt Ihnen überlassen.

Sie können die Ausarbeitung per E-Mail an [s9anback@stud.uni-saarland.de](mailto:s9anback@stud.uni-saarland.de) oder am Lehrstuhl bei Herrn Martin Müller, Zi 8.03, abgeben.

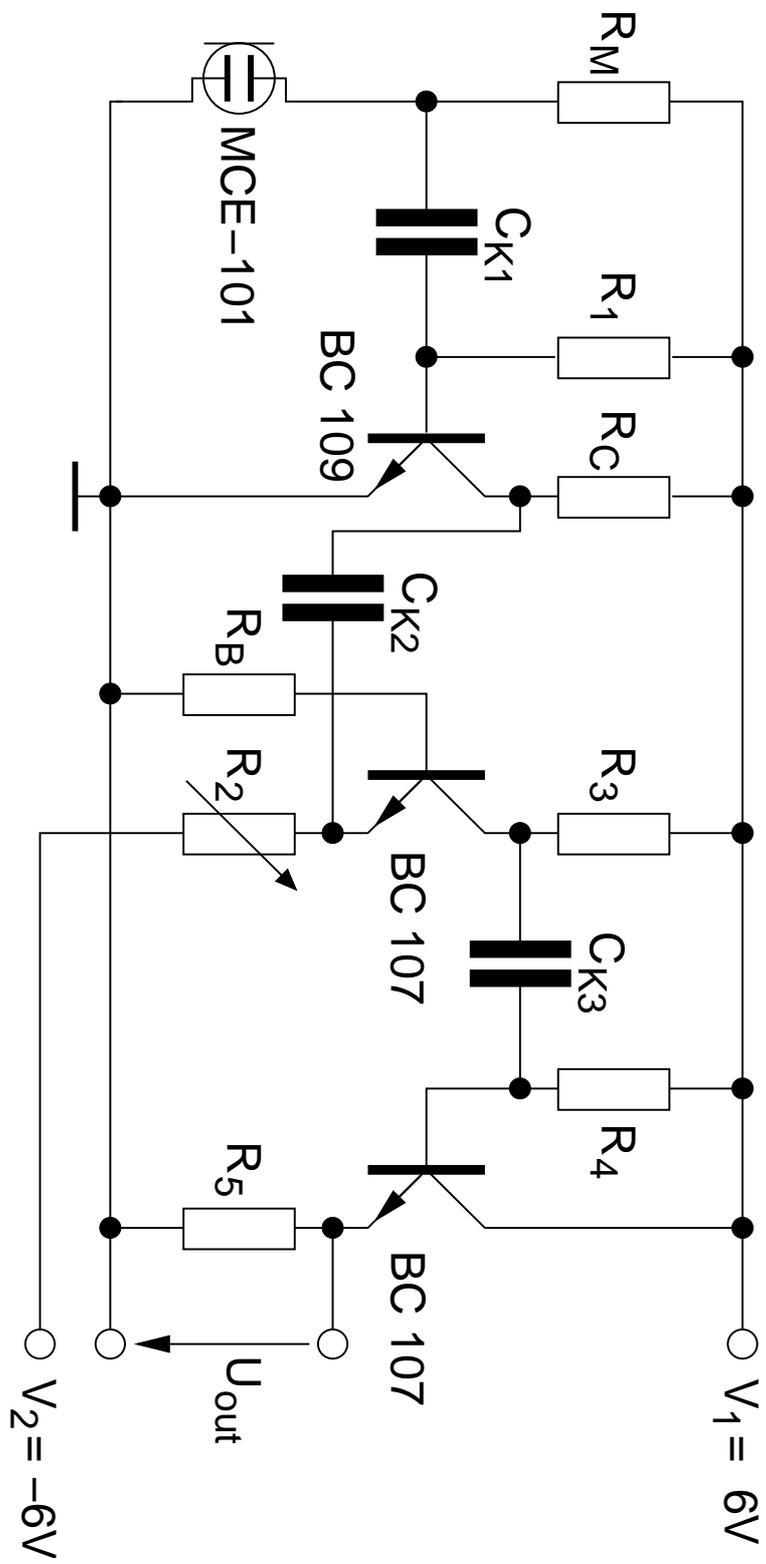


Abb. 9.1: Gesamtaufbau