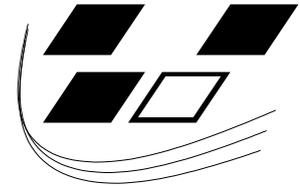


UNIVERSITÄT DES SAARLANDES
Lehrstuhl für Elektronik und Schaltungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Michael Möller



Skriptum zum Praktikum

Elektronik

Transistorgrundschaltungen

Sommersemester 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Ersatzschaltbilder	1
2.1	Einführung	1
2.2	Gleichstromersatzschaltbild	2
2.3	Wechselstromersatzschaltbild	2
2.4	Kleinsignalersatzschaltbild	3
2.5	T-Operator-Ersatzschaltbild	5
3	Transistorgrundschaltungen	7
3.1	Einführung	7
3.2	Eigenschaften der Grundschaltungen	8
3.3	Berechnung der NF-Eigenschaften	8
3.4	Ein- und Ausgangswiderstand	10
3.5	Emittergrundschaltung	11
3.6	Kollektorgrundschaltung	12
3.7	Basisgrundschaltung	12
4	Arbeitspunkt	13
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
5	Übertragungsfunktion	17
5.1	Hochpass	18
5.2	Tiefpass	19
5.3	Phasendrehung	19
5.4	Bandbreite	20
6	Mikrofone	21
6.1	Kondensatormikrofon	21
6.2	Elektretmikrofon	22

7	Vorbereitende Aufgaben	24
8	Messaufgaben	28
9	Ausarbeitung	29
A	Schaltplan und Layout	30

1 Einführung

Dieser Versuchsaufbau erweitert die Funktion unseres MP3-Verstärkers um ein Mikrofon und den zugehörigen Vorverstärker. Dabei wird das Signal des Mikrofons verstärkt und kann an den Line-In Eingang der Leistungsendstufe (Versuch: NF-Leistungsverstärker) angeschlossen werden. Als Mikrofon dient hierbei, wie in der Praxis üblich, eine kompakte Elektretmikrofonkapsel.

Ziel dieses Praktikumabschnitts ist es, die Eigenschaften der Transistorgrundsaltungen anzuwenden.

Um Berechnungen von Transistorgrundsaltungen einfacher zu gestalten, werden zunächst verschiedene Ersatzschaltbilder vorgestellt. Anschließend folgt eine theoretische Beschreibung der einzelnen Grundsaltungen und ein Abschnitt zur Einstellung des Arbeitspunktes. Zu guter Letzt wird die Funktionsweise von Kondensatormikrofonen und speziell dem Elektretmikrofon erläutert.

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

Anforderungen, die an diese Schaltung gestellt werden, sind ein geringer Stromverbrauch sowie ein störfreies Übertragen der Tonsignale an die Endstufe.

2 Ersatzschaltbilder

2.1 Einführung

Ersatzschaltbilder dienen im Allgemeinen dazu, eine Schaltung so zu vereinfachen, dass sie verständlicher und leichter zu berechnen ist. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass nicht jedes der im Folgenden vorgestellten Ersatzschaltbilder (ESB) für die Lösung jeder beliebigen Problemstellung geeignet ist.

2.2 Gleichstromersatzschaltbild

Im Gleichstromfall (Strom und Spannung sind zeitlich unveränderlich) wird nur das statische Verhalten der Bauteile betrachtet ($\omega = 0$). Dadurch werden unnötige frequenzabhängige Formeltermine nicht mitgeschleppt, die von vornherein ausgeklammert werden können. Berechnungen des Arbeitspunktes können beispielsweise durchgeführt und die Schaltung entsprechend den Vorgaben dimensioniert werden. Zum Erstellen eines Gleichstromersatzschaltbildes gibt es folgende Regeln:

- **Ohmscher Widerstand:** Dieser verhält sich sowohl für zeitabhängige, als auch für konstante Ströme immer gleich $R = U/I$.
- **Kapazität:** Eine Kapazität ist, nachdem sie aufgeladen ist, ein Leerlauf. Das bedeutet für hinreichend kleine Kapazitäten kann davon ausgegangen werden, dass sie im Gleichstromfall einem Leerlauf darstellt.
- **Induktivität:** Da der Widerstand einer idealen Induktivität von der zeitlichen Änderung des fließenden Stromes abhängt, ist dieser für konstante Ströme gleich Null, was einem Kurzschluss entspricht.
- **Spannungsquellen:** Eine ideale Wechselspannungsquelle besitzt einen Innenwiderstand von Null Ohm, entspricht einem Kurzschluss.
- **Stromquellen:** Eine ideale Wechselstromquelle besitzt einen unendlich hohen Innenwiderstand, entspricht einem Leerlauf.
- **Transistoren:** Für einen Transistor bietet sich das Kleinsignal-ESB aus Abb. 2.4 an. Man kann auch das Ebers-Moll-ESB, welches aus der Vorlesung zur Elektronik I bekannt ist, verwenden.

Zur Veranschaulichung wird das Gleichstromersatzschaltbild der Schaltung aus Abb. 2.1 erstellt.

2.3 Wechselstromersatzschaltbild

Im Wechselstrombetrieb wird das dynamische Verhalten ($\omega \neq 0$) einer Schaltung untersucht. Für die Bestimmung der Schaltungseigenschaften im Wechselstrombetrieb können einige Vereinfachungen gemacht werden:

1. Gleichstromquellen betrachtet man als Leerlauf (LL),

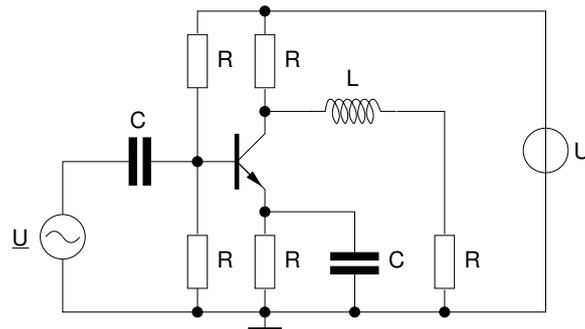


Abb. 2.1: Emittergrundschaltung (EGS) mit induktiver Lastkopplung, Stromgegenkopplungs- und Eingangskondensator.

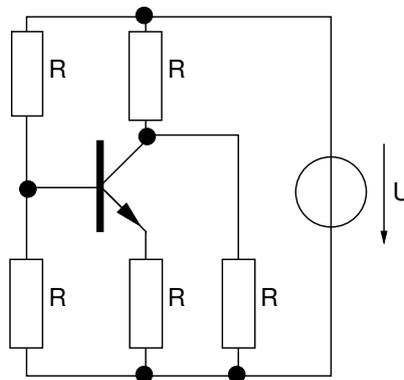


Abb. 2.2: Gleichstromersatzschaltbild der EGS aus Abb. 2.1.

2. Gleichspannungsquellen als Kurzschluss (KS).

2.4 Kleinsignalersatzschaltbild

Das Kleinsignalersatzschaltbild des Transistors ist immer anzuwenden, wenn die Änderungen, die durch die Signale verursacht werden, den aktuellen Arbeitspunkt des Transistors nur leicht variieren. Das bedeutet, dass nur ein kleiner Abschnitt des linearen Bereiches der Kennlinie des verwendeten aktiven Bauelements angesteuert wird. Dabei wird einzig der Transistor betrachtet. Anstelle des Transistorsymbols wird das Kleinsignalersatzschaltbild des Transistors für den gewünschten Frequenzbereich eingesetzt. Die restlichen Elemente der Schaltung bleiben somit unverändert. 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.

Im Folgenden werden die Kleinsignalersatzschaltbilder für niedrige und hohe Frequenzen vorgestellt. In den Abbildungen der Ersatzschaltbilder sind die Anschlüsse für die Basis, den Emitter und den Kollektor kenntlich gemacht.

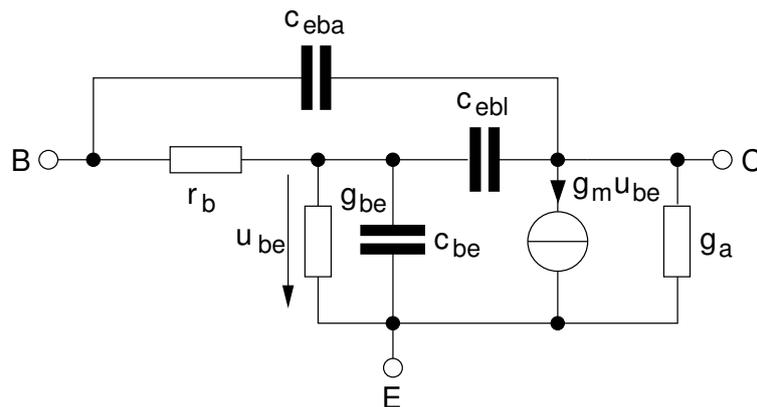


Abb. 2.3: Breitbandiges Kleinsignalmodell des Bipolar-Transistors für hohe Frequenzen.

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 Bereich einiger Femtofarad. Angaben zur genauen Größe finden Sie im Datenblatt (in der Literatur werden unterschiedlichste Bezeichnungen verwendet).

Eine weitere Vereinfachung für den Gebrauch bei niedrigen Frequenzen wird in Abb. 2.4 gemacht: Der Parameter r_b bezeichnet den Basisbahnwiderstand, g_{be} den Eingangsleitwert und g_0 den Ausgangsleitwert. Die Stromquelle beschreibt den Zusammenhang zwischen der Basis-Emitter-Spannung U_{be} und dem Kollektorstrom I_C auf vereinfachte Weise (Gleichung 2.2 beschreibt nicht vereinfachten Zusammenhang), g_m bezeichnet die Steilheit des Transistors (auch Transkonduktanz genannt).

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

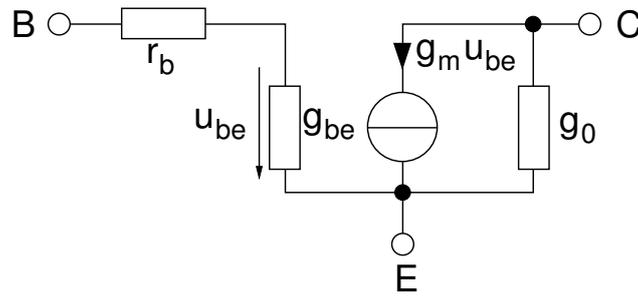


Abb. 2.4: Kleinsignalersatzschaltbild für niedrige Frequenzen.

Mit dem Kollektorstrom

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

folgt

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

Der Gleichstromverstärkungsfaktor B ergibt sich bei einer bestimmten Kollektor-Emitter-Spannung direkt aus dem Basis- und dem Kollektorstrom. Typische Werte liegen zwischen 50 und 500.

Der Faktor β bezeichnet den Zusammenhang zwischen Kollektor- und Basisstrom im Wechselspannungsfall:

$$\underline{I}_C = \beta \cdot \underline{I}_B. \quad (2.4)$$

2.5 T-Operator-Ersatzschaltbild

Dieses Wirkungsersatzschaltbild (stellt die Wirkung des Transistors bei Betrachtung der jeweiligen Kenngröße dar) des Bipolartransistors beschreibt Näherungen für Spannungs- und Stromverstärkung, Ein- und Ausgangswiderstand aller drei Grundschaltungen.

Hier wird der Transistor als Vierpol mit folgenden Eigenschaften betrachtet:

1. Die Spannung am Eingangstor ist gleich der Spannung am Ausgangstor. ($\underline{V}_u = 1$).

2. Zwischen dem Strom \underline{I}_1 und dem Strom \underline{I}_2 besteht der Zusammenhang $\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \cdot T$.
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.

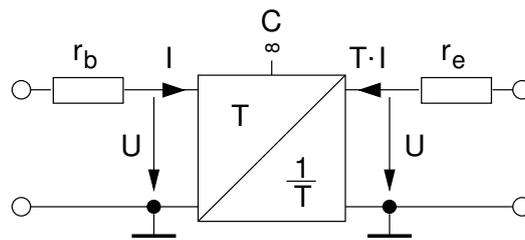


Abb. 2.5:

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 Kleinsignalerersatzschaltbildes setzt man das T-Operator-Ersatzschaltbild für den Transistor in die zu betrachtende Schaltung ein und benutzt die Eigenschaften der Punkte 1-4.

Der Wert des Faktors T hängt von der Betriebsfrequenz des Transistors ab. Für den 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 die Frequenzen im Praktikum (kHz-Bereich) ist die Bedingung $f \ll f_g$ erfüllt.

Die Vorgehensweise wird im Kapitel Transistorgrundschaltungen am Beispiel des Ausgangswiderstandes einer Kollektorgrundschaltung erläutert.

3 Transistorgrundschaltungen

3.1 Einführung

Der Begriff Grundschaltung hat eine wichtige Bedeutung. Denn alle komplexen Transistorschaltungen lassen sich aus diesen Grundschaltungen aufbauen.

Es ist zunächst wichtig zu wissen, wann man es mit welcher Grundschaltungen zu tun hat. Zur Untersuchung betrachtet man die Transistorschaltung als Vierpol, definiert Ein- und Ausgangstor, so dass sich die drei Anschlüsse des Transistors mit diesen Toren in drei sinnvollen Konfigurationen verbinden lassen:

- Emittergrundschaltung
- Kollektorgrundschaltung
- Basisgrundschaltung

Ein Anschluss des Transistors muss logischerweise gleichzeitig zum Eingangs- und Ausgangstor des Vierpols gehören. Dieser gemeinsame Anschluss zeigt an, welche Grundschaltung vorliegt und ist außerdem der Bezugspunkt, d.h. die Signalmasse („ground“) für Ein- und Ausgangssignal. Zum Beispiel liegt in Abb. 3.1 der Emitter

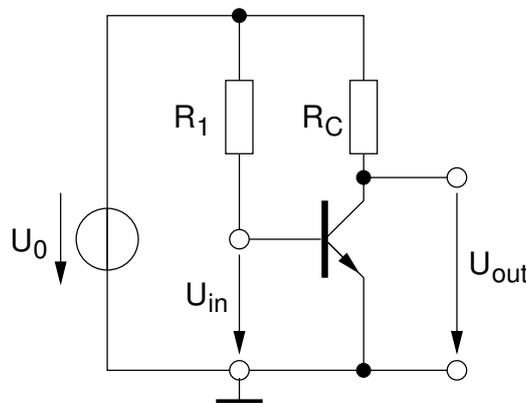


Abb. 3.1: Beispiel einer Emittergrundschaltung.

sowohl am Ein-, als auch am Ausgangstor. Somit handelt sich um 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. Hierbei ist zu beachten, dass diese Verhältnisse nur gegeben sind, wenn der Strom I_C konstant ist. Bei der konkreten Berechnung werden Sie sehen, dass die Eigenschaften der Grundschaltung ebenso immer vom Arbeitspunkt des Transistors abhängen. Tabelle 3.1 gibt eine grobe Übersicht.

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

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Grundschaltungen.

3.3 Berechnung der NF-Eigenschaften

Zur Berechnung der Spannungs- und Stromverstärkung benutzt man das Kleinsignalersatzschaltbild des Transistors. Je nach Gleich- oder Wechselspannungsfall, ist ein Gleich- oder Wechselstromersatzschaltbild erforderlich.

Die Berechnung wird im Folgenden am Beispiel einer einfachen Emittergrundschaltung gemäß Abb. 3.2 vorgeführt.

Setzt man das vereinfachte Kleinsignalersatzschaltbild ein, so ergibt sich das in Abb. 3.3 dargestellte Ersatzschaltbild.

Die Spannungsverstärkung $v_u = \frac{U_{out}}{U_{in}}$ wird folgendermaßen berechnet:
Für die Ausgangsspannung U_{out} ist

$$U_{out} = -I'_C \cdot \frac{1}{G_L + g_0} \quad (3.1)$$

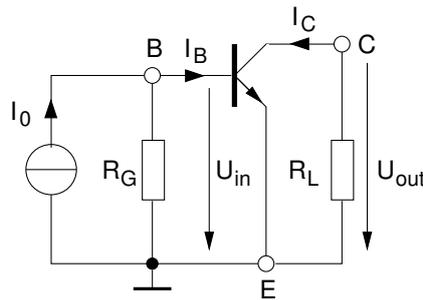


Abb. 3.2: Einfache Emitttergrundschaltung.

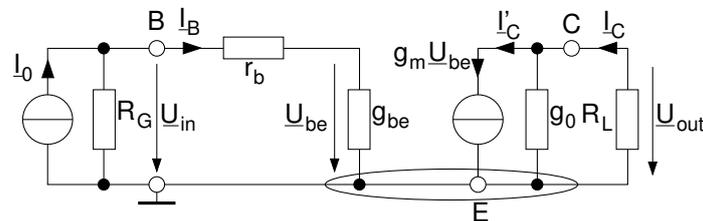


Abb. 3.3: Kleinsignalersatzschaltbild der Emitttergrundschaltung.

gültig und gemäß Ersatzschaltbild gilt für den Kollektorstrom

$$I'_C = g_m \cdot U_{be}. \quad (3.2)$$

Setzt man Gleichung 3.2 in Gleichung 3.1 ein, so folgt:

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

Nun kann dieser Ausdruck noch 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:

$$V_u \cong -g_m \cdot R_L \quad (3.4)$$

Eine Tabelle, die die NF-Eigenschaften der Grundschaltungen enthält, finden Sie im Skript zur Vorlesung Elektronik 2 (S.56), bzw. in vielen Büchern zur Schaltungstechnik (Beachten Sie beim Vergleichen der Werte, von welchem Aufbau der Grundschaltungen 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 deutlich aufwendiger ist, wird die Berechnung in einem Beispiel mittels T-Operator Ersatzschaltbild vorgeführt.

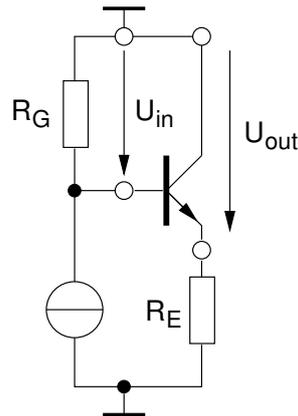


Abb. 3.4: Einfache Kollektorgrundschaltung.

Nach dem Einsetzen des T-Operator Ersatzschaltbild ergibt sich Abb.3.5: Trasformiert

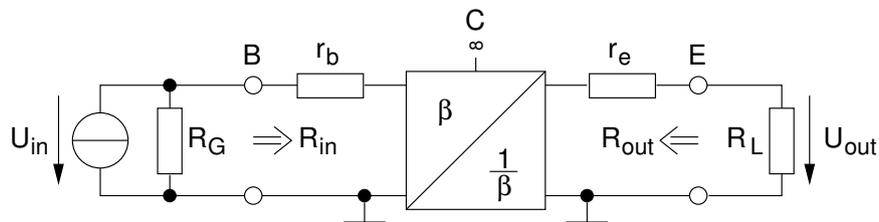


Abb. 3.5: T-Operator Ersatzschaltbild der Kollektorgrundschaltung.

man die Schaltung gemäß der Regeln für den T-Operator (Kapitel 2.5), so kommt Abb. 3.6 zustande. Aus dem Ersatzschaltbild ergibt sich nun der Eingangswiderstand

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

Ein analoges Vorgehen liefert das Ersatzschaltbild in Abb. 3.8 und infolgedessen den

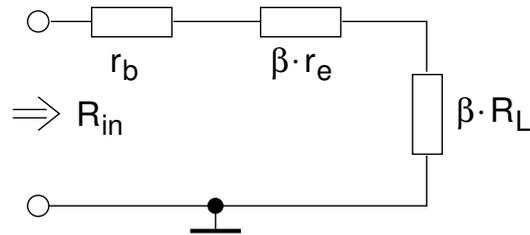


Abb. 3.6: Eingangswiderstand nach Anwenden des T-Operators.

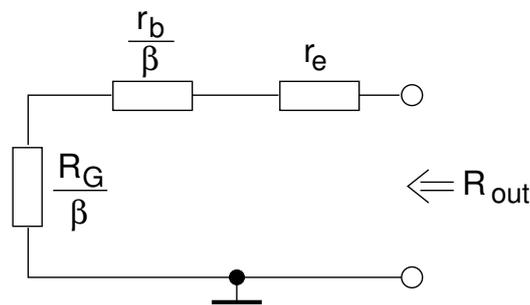


Abb. 3.7: Ausgangswiderstand nach Anwenden des T-Operators.

Ausgangswiderstand

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

Zum Vergleich können Sie versuchen, einen dieser Werte mit Hilfe des Kleinsignalerersatzschaltbildes 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 dieselben Werte zu erlangen).

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 eine Spannungsverstärkung zu $v_u = -g_m \cdot R_L$. Die Stromverstärkung leitet sich aus dem Zusammenhang von I_B und I_C ab zu $v_I = \beta$. Mit Hilfe des T-Operator Ersatzschaltbildes ergeben sich $R_{in} = \beta \cdot r_e + r_b$ und $R_{out} \rightarrow \infty$.

In unserem Versuchsaufbau übernimmt die Emittierstufe den Großteil der Signalverstärkung. Aufgrund ihres hohen Ausgangswiderstandes eignet sie sich jedoch nicht als Ausgang zur Endstufe, da hier ein niederohmiger Abschluss günstiger ist.

Bei einem hochohmigen Ausgangswiderstand 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 den Ein- und Ausgangswiderstand ergeben sich wie in Kapitel 3.4 vorgeführt zu $R_{in} = r_b + \beta \cdot (r_e + R_L)$ und $R_{out} = r_e + \frac{1}{\beta} \cdot (r_b + R_g)$. Kollektorgrundschaltungen eignen sich folglich nicht für Spannungsverstärkungen. Da die Stromverstärkung ein negatives Vorzeichen besitzt, kann sie als Inverter betrieben werden (siehe 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 $v_I = -1$. Mit Hilfe des T-Operators lassen sich die Werte für $v_u = R_L \cdot \frac{1}{r_e + \frac{r_b}{\beta}}$, $R_{aus} \rightarrow \infty$ und $R_{ein} = r_e + \frac{r_b}{\beta}$ leicht nachvollziehen.

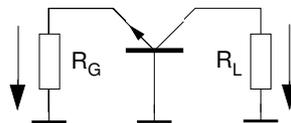


Abb. 3.8: Einfache Basisgrundschaltung.

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 kann der Arbeitspunkt durch Angabe der anliegenden Spannung oder des fließenden Stroms angegeben werden.

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. $I_C = \beta \cdot I_B$, $U_{BE} + U_{CE} = -U_{BC}$, etc.). Daher genügt es, drei der Größen zu kennen, um das System vollständig zu beschreiben.

Der Schaltungstechniker/Ingenieur legt durch die Beschaltung des Transistors den Arbeitspunkt eindeutig fest. Im Folgenden werden einige Methoden zur Berechnung des Arbeitspunktes vorgestellt. Dazu wollen wir den Arbeitspunkt als bekannt annehmen, da wir die Werte von I_C , U_{BE} und U_{CE} kennen.

4.2 Bestimmung des Arbeitspunktes

Im Gleichstromersatzschaltbild nutzt man die Kirchhoff'schen Gesetze, um die Spannungen und Ströme zu berechnen. Hierbei stößt man auf das Problem, dass der nichtlineare Zusammenhang zwischen Kollektorstrom I_C und Basis-Emitter-Spannung U_{BE} dazu führt, dass sich das resultierende Gleichungssystem nur schwer geschlossen lösen lässt. Aus diesem Grund bietet sich eine intuitivere Vorgehensweise an.

4.2.1 Aus den Kennlinien

Der Arbeitspunkt eines Transistors kann aus seinen Kennlinienfeldern abgelesen werden, wenn mindestens drei Größen bekannt sind. Der erste Quadrant des Kennlinienfeldes in Abb.4.1 zeigt $I_C(U_{CE})$ für verschiedene Werte von U_{BE} . Zudem ist dort eine Gerade mit der Steigung $\frac{1}{R_L}$ eingetragen, die man als Lastgerade bezeichnet. Der Schnittpunkt dieser beiden Kennlinien legt den Arbeitspunkt fest. Die Summe der Spannungsabfälle an beiden Bauelementen muss der Batteriespannung U entsprechen.

Im normal-aktiven Bereich schwankt der Wert von U_{BE} nur leicht, sodass man in guter Näherung einen Wert von $U_{BE} = 0,7\text{ V}$ annehmen kann.

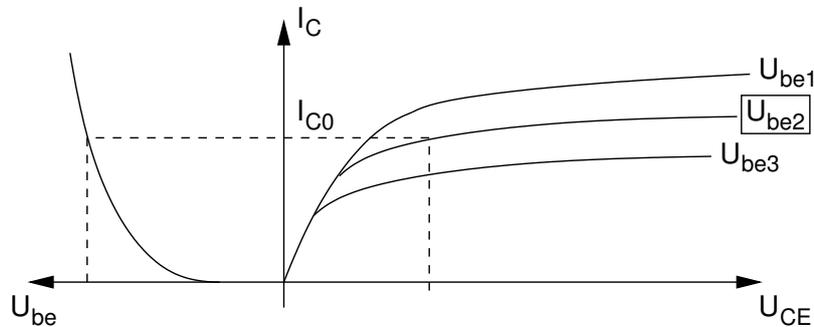


Abb. 4.1: Ausgangskennlinienfeld mit Lastgerade.

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

4.2.2 Schaltungslesen

Ein weiterer Ansatz den Arbeitspunkt zu bestimmen, ist das Verwenden von einigen in der Praxis recht gut erfüllten Näherungen. Die Form der Gleichungen der Maschen und Knotenanalyse wird dadurch stark vereinfacht.

Im Allgemeinen gilt $\beta \gg 1$. Demnach kann man aus

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

folgern, dass in guter Näherung

$$I_C \approx I_E \quad (4.2)$$

erfüllt ist. Wird zur Einstellung des Basispotenzials ein Spannungsteiler verwendet, kann angenommen werden, dass I_q (der Querstrom durch den Spannungsteiler) groß im Vergleich zum Basistrom ist (Näherung: Faktor 5–10). Auch hier ist die Annahme dass $U_{BE} \approx 0,7\text{ V}$ beträgt hilfreich. Für grobe Überschlagsrechnungen genügen diese ersten Werte.

Dennoch sollte man nicht vergessen, dass es sich hier nur um eine Näherungen handelt. Möchte man den Fehler verringern, kann man auf iterativem Wege (z.B. leichte

Variation von I_q) zu genaueren Ergebnissen kommen. Ein Beispiel hierfür wäre eine Annahme für $\frac{I_q}{I_B} = 10$. Anschließend 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. Die Temperatur des Transistors kann sich entweder durch äußere Einflüsse ändern (Umgebungstemperatur) oder durch die in Wärme umgesetzte Verlustleistung. Für den Zusammenhang zwischen U_{BE} und U_T gilt:

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

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

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 stark mit der Temperatur an. Dies hat zur Folge, dass die Verlustleistung des Transistors ($P_V = I_B \cdot U_{BE} + I_C \cdot U_{CE} \approx I_C \cdot U_{CE}$) von I_C bestimmt wird und somit ansteigt.

Dies bedeutet: ohne eine geeignete Gegenmaßnahme steigt der Strom und damit die Temperatur solange an, bis der Transistor den eingestellten Arbeitspunkt verlässt oder letztendlich zerstört wird.

Die Kollektorschaltung, die im Versuchsaufbau verwendet wird, zeigt diesen Effekt, wenn ein zu kleiner Emitterwiderstand R_E verwendet wird oder beim Aufbau ein Kurzschluss vom Emitter zur Masse hergestellt wird. Durch diesen Fehler fällt die gesamte Versorgungsspannung über dem Transistor ab und I_C würde sehr stark ansteigen. Dem kann mit einem geeigneten Emitterwiderstand entgegengewirkt werden (vgl. Widerstand R_5 in Abb. 7.3 im Abschnitt Vorbereitende Aufgaben).

Eine genauere Betrachtung der Temperaturabhängigkeit, Möglichkeiten zur Kompensation (z.B. „Prinzip der halben Versorgungsspannung“) und der daraus folgenden negativen Effekte, finden Sie im Skript zur Vorlesung 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 lediglich 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. Überträgt man diese Schwankung nun auf die Ausgangskennlinie, so stellt man fest, dass der Kollektorstrom auch in Form einer Sinuswelle (U_{in1}) steigt und fällt. Wird jedoch die Amplitude des Eingangs zu groß (U_{in2}), so wird der Strom maximal und das Signal verstärkt, aber die obere Welle der Sinuskurve ist nun abgeschnitten. Es ist also wichtig, einen passenden Transistor im

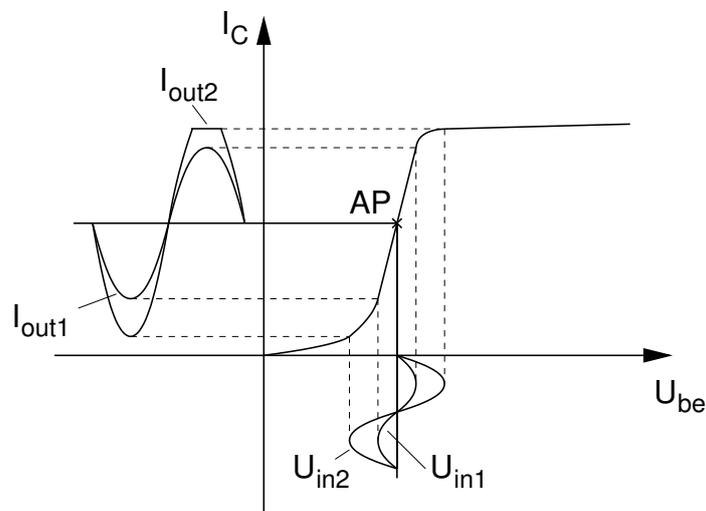


Abb. 4.2: Korrekte Aussteuerung U_{in1} um den Arbeitspunkt, U_{in2} mit zu großer Amplitude.

richtigen Arbeitspunkt zu wählen. Ebenso zu berücksichtigen ist die Lage des Arbeitspunktes. Für ein symmetrisches Signal sollte dieser möglichst in einem Bereich liegen, in dem bei einer geringen Aussteuerung eine nahezu lineare Änderung vollzogen wird. Was passiert, wenn der Arbeitspunkt der Schaltung zu weit in Richtung der Sättigung verschoben wird, zeigt Abb. 4.3.

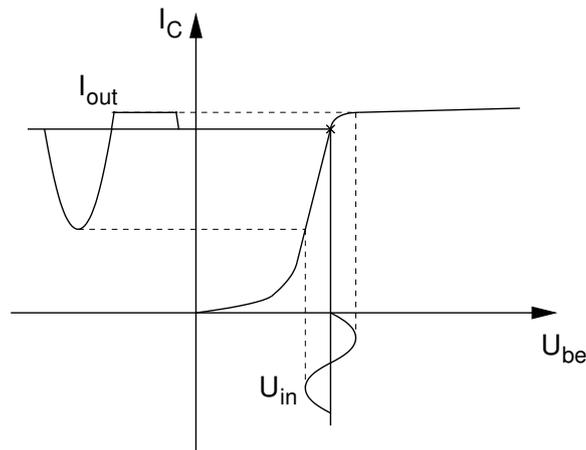


Abb. 4.3: Arbeitspunkt in der Nähe des Sättigungsbereichs.

Bei der Wahl des Arbeitspunktes muss somit beachtet werden, dass dieser weit genug im linearen Bereich liegt, um eine lineare Übertragung zu ermöglichen.

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

5 Übertragungsfunktion

In allen vorangegangenen 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 kHz liegen.

Für diese Betrachtung gilt allgemein das Wechselstromersatzschaltbild und das Kleinsignalersatzschaltbild für den Transistor im NF-Bereich. Niedrige Frequenz 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.

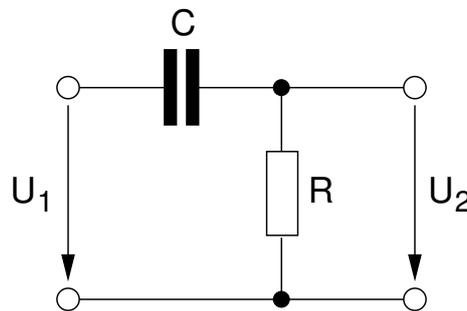


Abb. 5.1: Hochpass.

Von Interesse für die Signalübertragung ist das Verhältnis der beiden Spannungen \underline{U}_1 und \underline{U}_2 in Abhängigkeit von der Frequenz. Für den Widerstand einer Kapazität gilt

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

Die Kreisfrequenz ω ist definiert durch: $\omega = 2\pi f$. Nach allgemeiner Konvention werden Wechselstromgrößen durch komplexe Zahlen beschrieben.

Das Spannungsverhältnis $\frac{U_2}{U_1}$ kann mit Hilfe des Spannungsteilers berechnet werden:

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega CR}}. \quad (5.2)$$

Betrachtet man den Grenzwert dieser Funktion für sehr kleine Frequenzen, so strebt dieser gegen Null (dieses Ergebnis entspricht dem Ersetzen des Kondensators durch einen Leerlauf). Für sehr große Frequenzen hingegen strebt dieser gegen Eins (was einem Kurzschluss anstelle der Kapazität entsprechen würde). Ein Hochpass lässt demzufolge nur hohe Frequenzen passieren.

5.2 Tiefpass

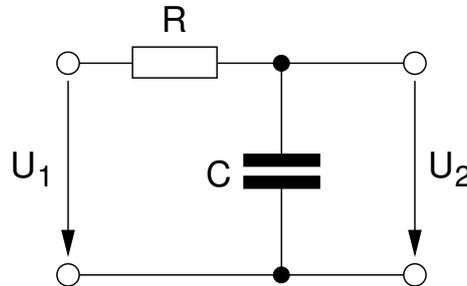


Abb. 5.2: Tiefpass.

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

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

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 Wechselstromvierpols und von denen am Ausgang. Die Phase der Spannungen und Ströme muss nicht zwangsläufig erhalten bleiben. Somit kann es zu einer Phasenverschiebung zwischen Ein- und Ausgangssignal kommen, indem z.B. eine Induktivität, Kapazität, etc. eingebaut wird. Eine Phasenverschiebung liegt aber auch dann schon vor, wenn zwei Signale der gleichen Frequenz zu unterschiedlichen Zeiten den Nulldurchgang durchqueren ($\sin(x)$ und $\cos(x)$ besitzen eine Phasenverschiebung von 90°). Diese Phasenverschiebung errechnet sich aus dem Gangunterschied der jeweiligen Signale. So gilt für die Phasenverschiebung eines Hochpasses:

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

Der Punkt an dem φ den Wert 45 erreicht, nennt man auch Grenzfrequenz. Hier gilt die wichtige Beziehung:

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

In dB entspricht dies einem Abfall von 3 dB. Für den Hochpass findet man:

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

Für einen Tiefpass ergibt sich analog:

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

Hier ist die Phasenverschiebung an der 3 dB Grenzfrequenz gleich -45° . 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 Bild A.1 abgebildet ist, so bilden die Koppelkondensatoren je einen Hochpass mit dem Eingangswiderstand der Folgestufe. Dieser Hochpass legt dabei die untere Grenzfrequenz fest. Die obere Grenzfrequenz hingegen kommt durch die Basis-Emitter-Kapazitäten zustande. Für steigende Frequenzen werden diese immer niederohmiger und senken U_{BE} , was die Funktion der Schaltung zum Erliegen bringt.

Abb. 5.3 zeigt den Verlauf der Übertragungsfunktion über der Frequenz. Die markierten Frequenzen geben die untere- (f_u) und die obere- (f_h) Grenzfrequenz an.

Als Bandbreite eines Verstärkers bezeichnet man die Differenz der beiden Werte.

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

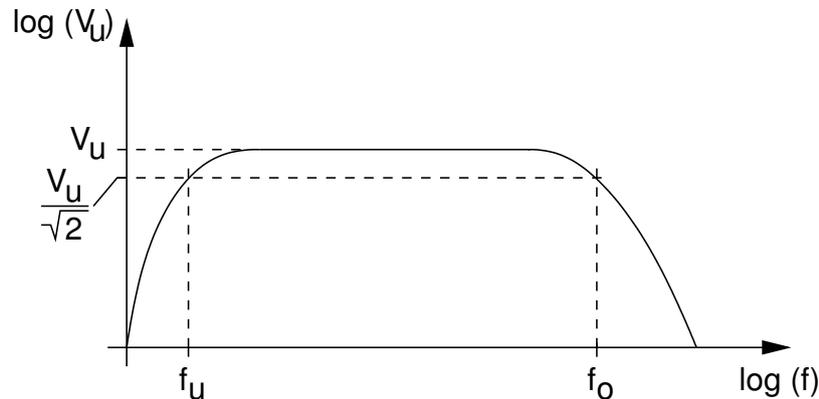


Abb. 5.3: Spannungsverstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz.

6 Mikrofone

Mikrofone wandeln akustische Signale (Schall) in elektrische Signale um. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, Druckwellen des Schalls in elektrische Signale zu wandeln. Der nachfolgende Überblick beschränkt sich auf das Kondensator- und das Elektretmikrofon.

6.1 Kondensatormikrofon

Das Mikrofon basiert auf der Funktionsweise eines Kondensators und ist auf eine elektrische Betriebsspannung zwischen den Kondensatorplatten angewiesen. Eintreffender Schall verursacht eine Änderung des Plattenabstandes d der beiden Kondensatorfolien, indem dieser die beiden schwingfähig aufgehängten Kondensatorplatten zum Schwingen bringt. Dies bewirkt eine Kapazitätsänderung, welche einen Strom bzw. eine Spannung hervorruft.

Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt:

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

Für die Änderung der Kapazität durch den Parameter d ergibt sich somit:

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

wobei d den Plattenabstand im ausgelenkten Zustand und d_0 den Plattenabstand im nicht ausgelenkten Zustand charakterisiert.

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

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

und für deren zeitl. Änderung

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

Mit der Definition des elektrischen Stroms

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

ergibt sich ein Strom, sobald der Plattenabstand variiert.

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. Ein Nachteil dieser Mikrofone ist die Empfindlichkeit des Aufbaus gegenüber Erschütterungen. Überdies muss die konstante Spannung (in der Tontechnik auch Phantomspannung genannt) extern bereitgestellt werden.

6.2 Elektretmikrofon

Im Gegensatz zum Kondensatormikrofon muss bei einem Elektretmikrofon (Elektret-Kondensatormikrofon) keine äußere Spannung angelegt werden.

Bei einem Elektretmikrofon ist die ruhende Platte mit einem sogenannten Elektret beschichtet. Der Name stammt von der Eigenschaftsverwandtschaft des Magneten. Elektrete sind Dielektrika, die quasi permanent gespeicherte elektrische Ladungen oder quasi permanent ausgerichtete elektrische Dipole enthalten. Diese Ladung bleibt auch nach Anlegen eines externen elektrischen Feldes erhalten. Der Vorteil des Elektretmikrofons gegenüber dem Kondensatormikrofon ist, dass es statt einer Phantomspannungsquelle den Effekt einer dauerhaft elektrostatischen Polarisierung durch eine Elektretfolie als Kondensatorvorspannung nutzt. Festkörpertheoretisch zählen diese Stoffe zu den Ferroelektrika.

Die Ladung des Elektrets erzeugt auf der beweglichen Platte eine Influenzladung entgegengesetzter Größe. Es liegt nun eine konstante Spannung an, die nur durch die Bauform und die Materialeigenschaften des Elektrets bestimmt ist. Da sich die anliegende Spannung nun auch mit dem Abstand ändert, ist der Zusammenhang zwischen Auslenkung und Ausgangsstrom nicht mehr linear.

Eine externe Stromversorgung wird dennoch benötigt, um das Ausgangssignal des Elektretmikrofons weiter zuverstärken. Dies wird meistens mit einer integrierten Verstärkerschaltung realisiert. Diese Verstärkerstufen kommen mit wenigen mA Stromversorgung aus (ein Kondensatormikrofon benötigt im Vergleich eine Spannung von 42 Volt).

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

Elektretmikrofone bilden die am weit verbreiteste Mikrofonklasse, da sie klein, billig und von ausreichender Qualität für den Großteil von mobilen Anwendungen sind. Elektretmikrofone sind nahezu in der gesamten Multimedia-Branche wiederzufinden (z.B. Handy, Fernseher, etc.).

7 Vorbereitende Aufgaben

- Grundsaltungen In Abb. A.1 ist der Gesamtaufbau des Mikrofonvorverstärkers dargestellt.
 1. Die Abbildungen 7.1, 7.2 und 7.3 zeigen die einzelnen Transistorstufen in diesem Teil des Praktikums. Geben Sie an, in welcher Grundsaltung die drei Transistoren betrieben werden. Begründen Sie ihre Antwort. Für die Berechnungen nehmen Sie von nun $U_0 = 6\text{ V}$, $V_1 = 6\text{ V}$ und $V_2 = -6\text{ V}$ an.

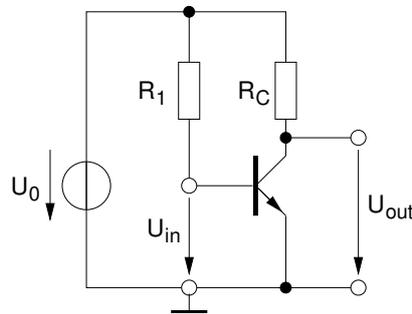


Abb. 7.1: Teilschaltung 1.

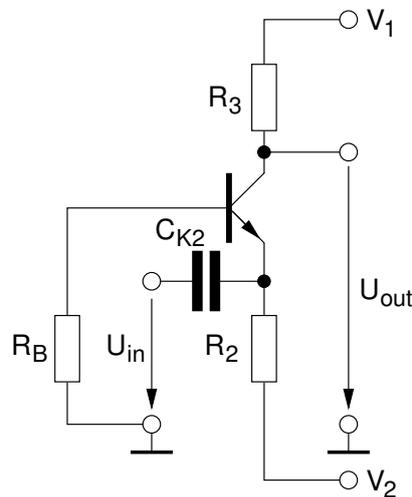


Abb. 7.2: Teilstufe 2.

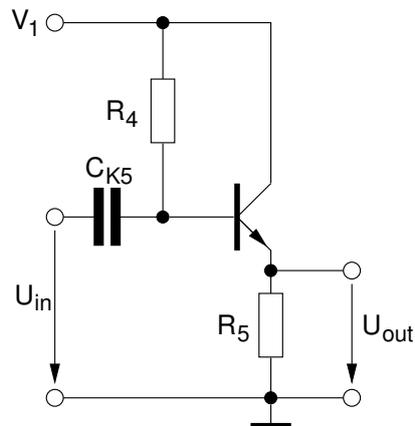


Abb. 7.3: Teilstufe 3.

2. Betrachten Sie nun jede Stufe des Verstärkers separat. Zeichnen Sie sowohl ein Gleich-, als auch ein Wechselstromersatzschaltbild für alle drei Stufen in Abb. 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
 - Abb. 7.1 ($U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $I_C = 30 \text{ mA}$, $U_{CE} = 2 \text{ V}$)
 - Abb. 7.2 ($U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $I_C = 1,5 \text{ mA}$, $U_{CE} = 3 \text{ V}$)
 - Abb. 7.3 ($U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $I_C = 10 \text{ mA}$, $U_{CE} = 2 \text{ V}$)

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 über R_2 und R_3 die gleiche Spannung abfällt.)

- Arbeitspunkt
 1. Besorgen Sie sich Datenblätter für die Transistoren BC 109C und BC 108B.
 2. Bestimmen Sie die Werte der Widerstände $R_1 - R_5$, sowie R_B und R_C für diese Arbeitspunkte. Falls Sie den ein oder anderen Wert auf den Datenblättern nicht finden, gehen Sie von $\beta = 400$ und $r_b = 1 \Omega$ aus.

Widerstand	Formel	Wert
R_1		
R_2		
R_3		
R_4		
R_5		
R_B		
R_C		

- Elektretmikrofon
 1. Besorgen Sie sich ein Datenblatt für das MCE-101.
 2. Angenommen, die Kondensatorplatte des MCE-101 hätte einen Kondensatorplattendurchmesser von 1 cm und einen Plattenabstand von 2 mm. Wie groß muss die auf das Elektret aufgeprägte Spannung sein, damit bei einer Auslenkung von 2 mm ein Strom von 1 mA fließt?
(Gehen Sie davon aus, dass die auf dem Elektret aufgeprägte Spannung gleich der Spannung über dem Kondensator ist.)
 3. Dimensionieren Sie den Widerstand R_M in Abb. 7.4 so, dass ein Strom von 0,5 mA fließt. V_1 beträgt 6 V. Wie groß ist die Spannung über dem Mikrofon MCE-101?

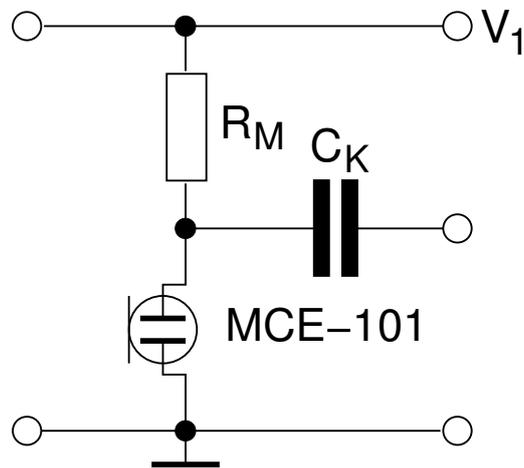


Abb. 7.4: Beschaltung des Mikrofons.

8 Messaufgaben

Am Versuchstag durchzuführen

1. Messen Sie die Stromverstärkung der Transistoren mit dem Multimeter nach. Sollten die Werte von denen im Datenblatt abweichen, rechnen Sie nach, ob es erforderlich ist, andere Widerstände zu verwenden.
2. Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. A.1 auf. Verwenden Sie die Widerstände, die Sie in den vorbereitenden Aufgaben berechnet haben. Beachten Sie, dass Sie die Jumper (JP1, JP2, JP3) zunächst nicht schließen.
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. Schließen Sie nun die Jumper (JP1, JP2, JP3).
9. Messen Sie Spannungsverstärkung, Frequenzgang und den Ausgangswiderstand des Gesamtverstärkers.

9 Ausarbeitung

Zum Abschluss des Versuchs soll eine schriftliche Ausarbeitung angefertigt werden. Diese sollte die nachstehenden Punkte enthalten:

- Die vorbereitenden Aufgaben
- Alle gemessenen Werte, sowie eine kurze Beschreibung, wie diese Werte aufgenommen wurden (mit welchem Messgerät, etc.)
- Ein Vergleich der gemessenen und berechneten Werte (vorbereitende Aufgaben). Begründen Sie mögliche Abweichungen, falls vorhanden.
- Fertigen Sie für die gemessenen Frequenzgänge Grafiken mit sinnvoller Beschriftung an. Markieren Sie dabei die 3 dB Grenzfrequenzen.

Die Ausarbeitung kann handschriftlich oder mit dem Computer erfolgen und soll spätestens zwei Wochen nach Versuchsdurchführung abgegeben werden.

Die Abgabe kann per Email erfolgen: benjamin.meyer@eus.uni-saarland.de oder am Lehrstuhl für Elektronik und Schaltungstechnik bei Herrn Martin Müller, Zimmer 8.03, abgegeben werden.

A Schaltplan und Layout

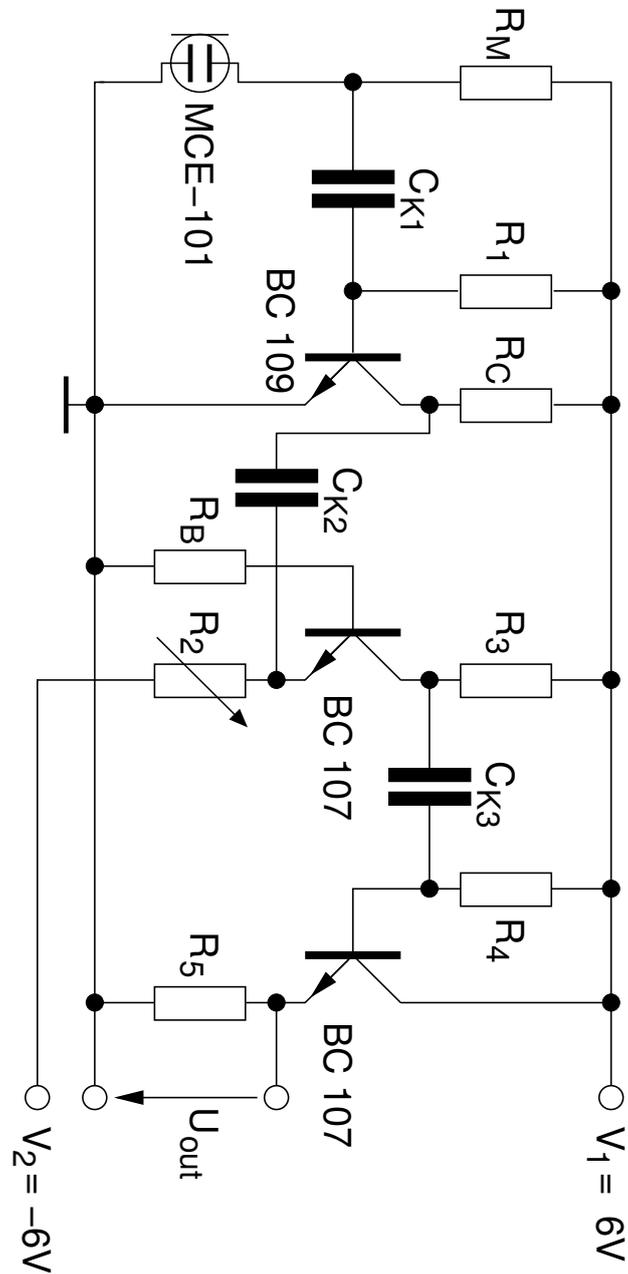


Abb. A.1: Gesamtaufbau des Mikrofonvorverstärkers.

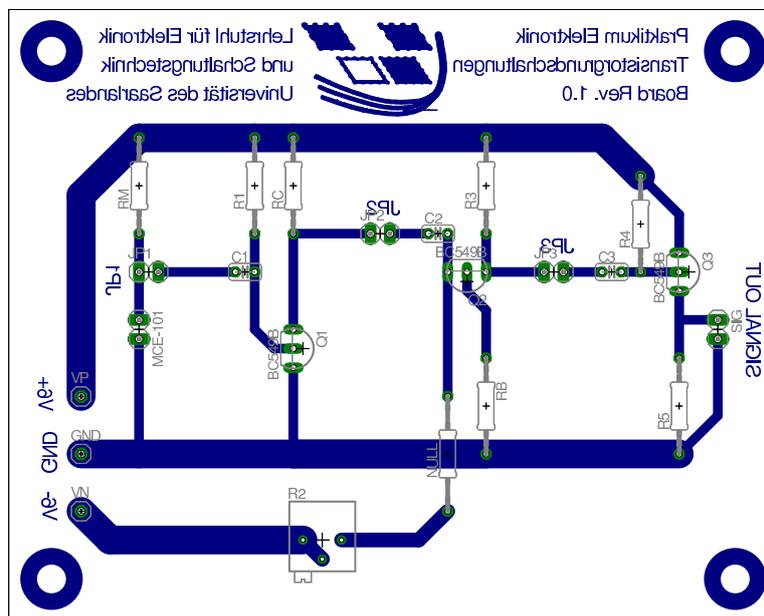


Abb. A.2: Platinenlayout