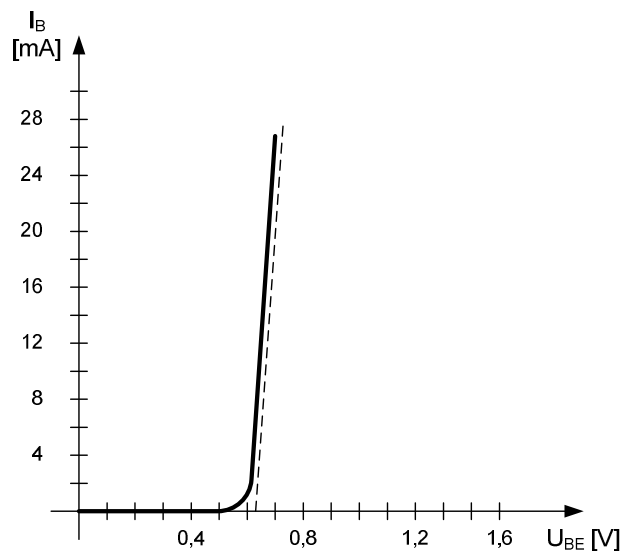


6. Vorverstärkerschaltungen

6.1 Transistorkennlinien und Arbeitsbereich

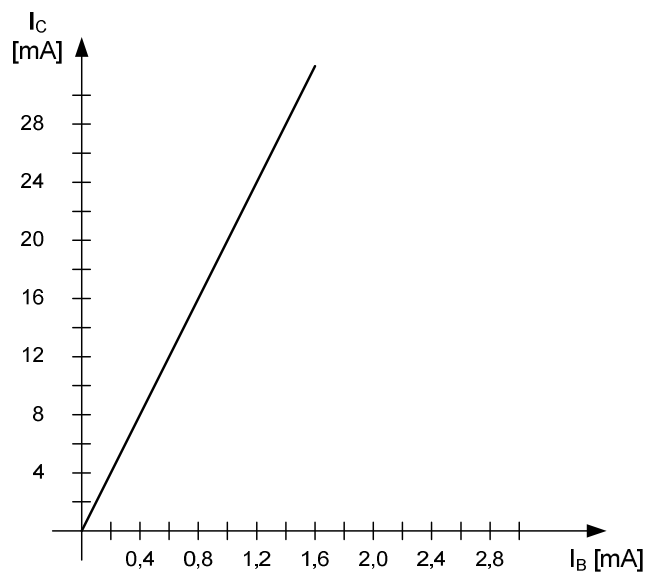
6.1.1 Eingangskennlinie $I_B=f(U_{BE})$ eines NPN-Transistors

Die Eingangskennlinie beschreibt das Verhalten des Transistors zwischen der Basis und dem Emitter. Sie entspricht ohne große Überraschung der Kennlinie einer Diode. Nach dem Überschreiten der Diffusionsspannung von ungefähr 0,65V steigt der Strom rasch an.



6.1.2 Übertragungskennlinie $I_C=f(I_B)$ eines NPN-Transistors

Die Übertragungskennlinie zeigt die Proportionalität zwischen I_C und I_B . Aus diesem Grund wird der Bipolartransistor auch als stromgesteuertes Verstärkerbauteil bezeichnet.

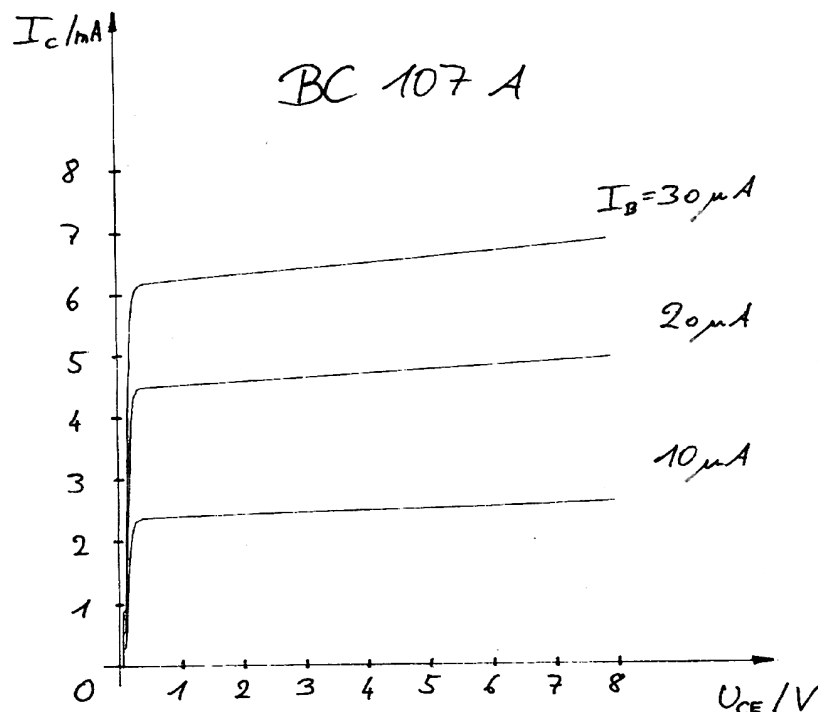


Aufgabe 1:

Bestimme aus der obigen Übertragungskennlinie den Stromverstärkungsfaktor h_{FE} des Transistors.

6.1.3 Ausgangskennlinienfeld $I_C=f(U_{CE})$ eines NPN-Transistors

Das Ausgangskennlinienfeld beschreibt das Verhalten des Transistors zwischen Kollektor und Emitter. Es fällt auf, dass der Kollektorstrom nach dem Überschreiten der Sättigungsspannung kaum noch ansteigt.

**Aufgabe 2:**

- Bestimme die Stromverstärkung des Transistors im gesättigten Bereich.
- Berechne jeweils den Widerstand R_{CE} bei $I_B = 10 \mu A$, $20 \mu A$ und $30 \mu A$ ($U_{CE} = 4V$).

Aus Punkt b) der vorherigen Aufgaben wird ersichtlich, dass man den Bipolartransistor nicht nur als stromverstärkendes Bauelement betrachten kann, sondern dass man ihn auch als veränderbaren Widerstand interpretieren kann. Der Widerstand zwischen Kollektor und Emitter verändert sich nämlich in Abhängigkeit vom Basisstrom.

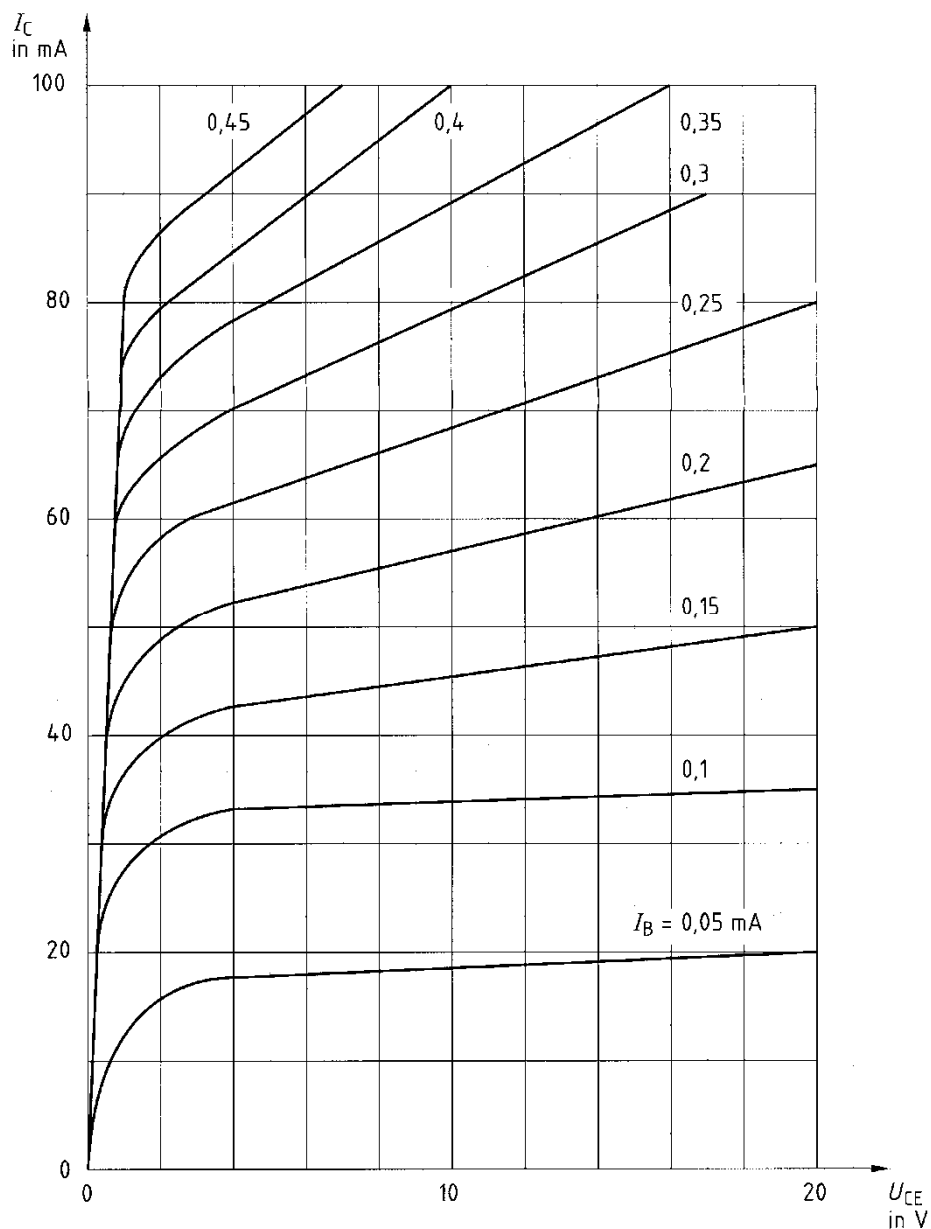
6.1.4 Arbeitsbereich eines NPN-Transistors

Der Arbeitsbereich des Transistors ist der Bereich im Ausgangskennlinienfeld in dem keiner der Transistorgrenzwerte überschritten wird.

Aufgabe 3:

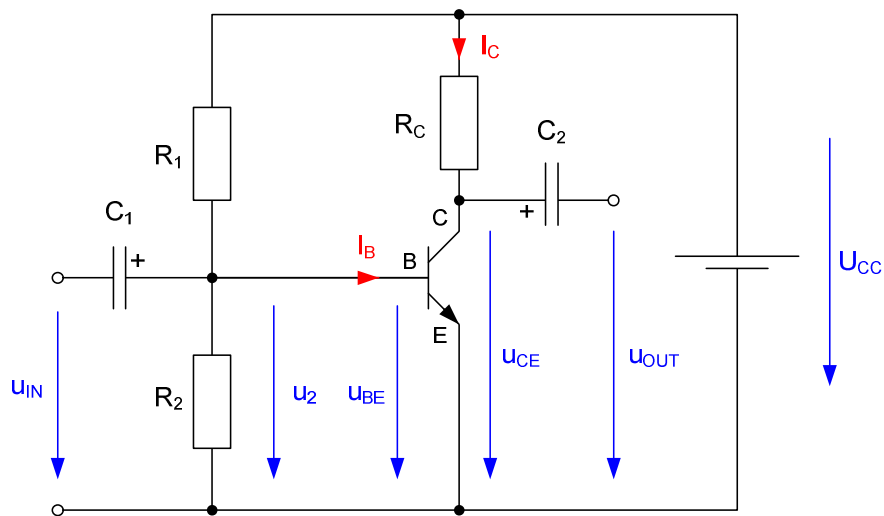
Umrande im folgenden Ausgangskennlinienfeld den Arbeitsbereich eines Bipolartransistors für den gilt:

1. $U_{CE,MAX} = 18V$
2. $I_{C,MAX} = 80mA$
3. $P_{CE,MAX} = 350mW$ ($P_{CE} = U_{CE} \cdot I_C$)



6.2 Die Emitterschaltung

6.2.5 Grundsaltung der Emitterschaltung



Der Name der Schaltung kommt von der Tatsache, dass in der Grundsaltung ($R_E=0\Omega$ et $C_E=0\mu F$) der Emitter direkt mit der Betriebsspannung verbunden ist.

6.2.6 Anwendung

Die Emitterschaltung kann als Vorverstärkerschaltung verwendet werden, da sie einen großen Spannungsverstärkungsfaktor hat. Der Innenwiderstand (mehrere $k\Omega$) ist allerdings zu groß um ausreichend Leistung für die meisten Anwendungen liefern zu können, was die Notwendigkeit einer Endstufe erklärt.

6.2.7 Funktionsweise

Der Transistor formt einen Spannungsteiler mit dem ohmschen Widerstand R_C . Eine leichte Änderung des Basisstroms $i_B(t)$ erzeugt eine große Änderung des Kollektor-Emitterwiderstands R_{CE} des Transistors, welche wiederum eine große Spannungsänderung der Kollektor-Emitterspannung $u_{CE}(t)$ mit sich zieht. Der Spannungsteiler aus R_C und Transistor wandelt also eine kleine Stromänderung an der Basis in eine große Spannungsänderung zwischen Kollektor und Emitter um.

Da ein NPN-Transistor aber nur mit positiven Spannungen funktioniert, muss man die Wechsellspannung am Eingang $u_{IN}(t)$ zunächst in eine rein positive Mischspannung umwandeln. Dies erfolgt durch den Spannungsteiler aus R_1 und R_2 sowie dem Koppelkondensator C_1 . Der Spannungsteiler produziert den Gleichanteil U_2 der Mischspannung $u_2(t)$. Dieser Gleichanteil

liegt um 0,65V. Der Kondensator C_1 bildet mit dem ohmschen Widerstand R_2 ein Hochpassfilter mit einer sehr tiefen Grenzfrequenz ($<16\text{Hz}$). Dieses Filter lässt also alle Wechselspannungen am Eingang in die Schaltung hinein, blockt aber in umgekehrter Richtung den Gleichanteil der Spannung $u_2(t)$ zum Eingang hin ab. Man kann also sagen, dass man mit Hilfe des Kondensators C_1 die Eingangsspannung $u_{IN}(t)$ mit dem Gleichanteil U_2 zur Mischspannung $u_2(t)$ zusammenmischt.

$$u_2(t) = U_2 + u_{IN}(t)$$

Die Mischspannung $u_2(t)$ wird durch den Transistor und den ohmschen Widerstand R_C in eine weitere Mischspannung verstärkt. Gemeint ist die Kollektor-Emitter-Spannung $u_{CE}(t)$. Der Koppelkondensator C_2 bildet mit dem Lastwiderstand R_L erneut ein Hochpassfilter das den Gleichanteil der Spannung $u_{CE}(t)$ zum Ausgang hin abblockt. Am Ausgang steht also die verstärkte Wechselspannung $u_{OUT}(t)$ an.

Mit dem Gleichanteil der Basis-Emitter-Spannung erreicht man, dass sich der Transistor bereits im leitenden Zustand befindet ohne, dass ein Eingangssignal anliegt. Dieser Gleichanteil der Basis-Emitter-Spannung wird auch *Basisvorspannung* genannt. Leider hat das Vorspannen des Transistors eine Erwärmung und somit eine Verlustleistung zur Folge selbst wenn keine Eingangssignal anliegt. Die ist einer der Gründe warum die Emitterschaltung als Leistungsverstärker ausscheidet.

Aufgabe 4:

Zeichne die typischen Signal-Zeit-Diagramme der Spannungen $u_{IN}(t)$, $u_{BE}(t)$, $u_{CE}(t)$ und $u_{OUT}(t)$ wenn man eine sinusförmige Eingangsspannung anlegt. Beachte die Phasenverschiebung!

6.2.8 Einstellen des Arbeitspunkts

Definition:

Man bezeichnet als *Arbeitspunkt* alle Spannungs- und Stromwerte in einer Schaltung wenn die Eingangsspannung 0V beträgt. Diese Spannungs- und Stromwerte ergeben in jeder Transistorkurve einen Punkt aus dem heraus die Schaltung arbeitet, daher der Name.

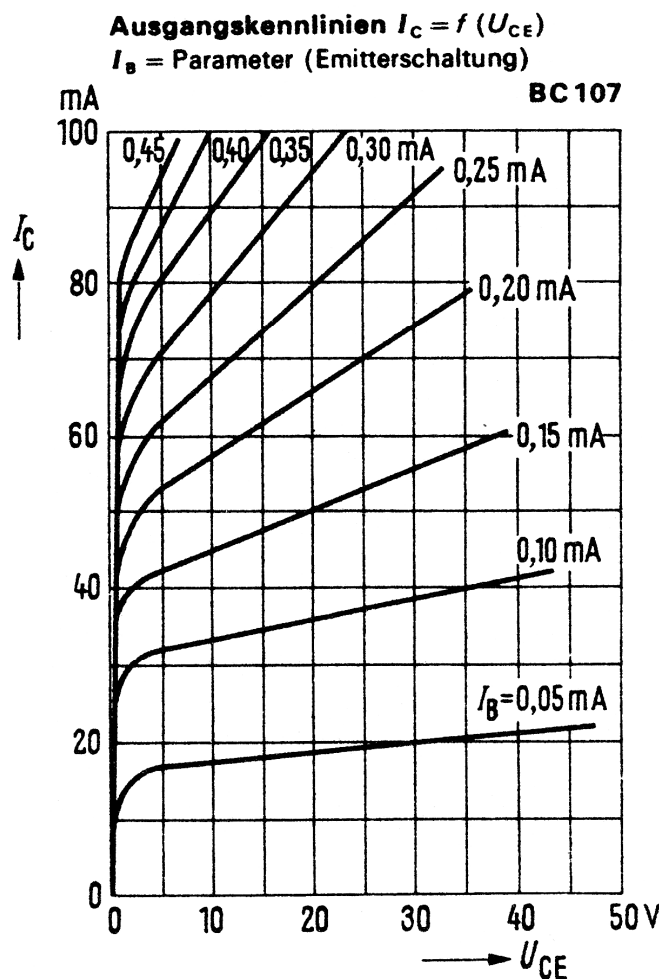
Die Lage des Arbeitspunkts hängt von der Basisvorspannung U_2 , des Kollektorwiderstands R_C und der Betriebsspannung U_{CC} ab. Man kann die Position des Arbeitspunkts graphisch mit Hilfe

der Arbeitsgeraden im Ausgangskennlinienfeld des Transistors bestimmen. Die Arbeitsgerade ist die Gerade die vom Punkt U_{CC} auf der x-Achse zu $I_{C,MAX} = \frac{U_{CC}}{R_C}$ auf der y-Achse des Ausgangskennlinienfelds verläuft. Der Arbeitspunkt kann sich nur auf dieser Gerade bewegen. Mit Hilfe der Basis-Emitter-Vorspannung U_{BE} wird der Arbeitspunkt im Allgemeinen so gelegt, dass gilt: $U_{CE} = 0,5 \cdot U_{CC}$.

Aufgabe 5:

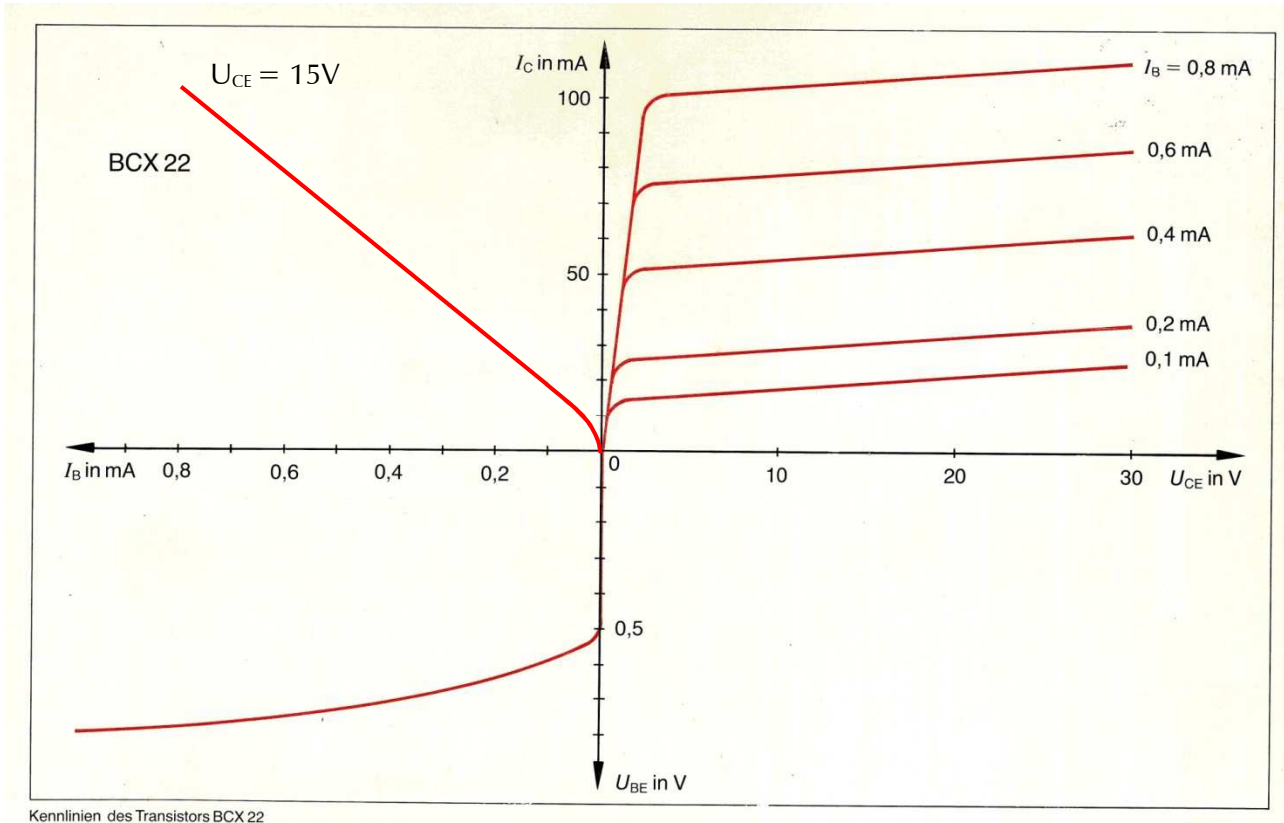
Gegeben ist eine Emitterschaltung mit einem BC107 als Transistor sowie $R_C=500\Omega$, $U_{CC}=40V$, $R_E=0\Omega$ und $C_E=0\mu F$.

- Zeichne die Arbeitsgerade in das folgende Ausgangskennlinienfeld ein.
- Zeichne den typischen Arbeitspunkt in das Ausgangskennlinienfeld ein.
- Gib die Werte von I_C , U_{CE} und I_B im Arbeitspunkt an.
- Beschreibe in welche Richtung sich der Arbeitspunkt auf der Arbeitsgeraden verschiebt wenn man R_2 vergrößert?



6.2.9 Der Prozess der Spannungsverstärkung im 3-Quadranten-Kennlinienfeld

($R_C = 300\Omega$, $U_{CC} = 30V$)



Aufgaben zum Prozess der Spannungsverstärkung in der Emitterschaltung:

1. Was ist die Konsequenz der Erhöhung der Eingangsspannung u_{IN} auf die Ausgangsspannung u_{OUT} ? Begründe deine Antwort mit Hilfe einer Ursache-Wirkungskette.
2. Was ist die Konsequenz des Kontaktverlusts des Emitters zum Rest der Schaltung auf den Spannungswert U_{CC} (CG = collector to ground)? Begründe deine Antwort.
3. Was ist die Konsequenz der Verringerung des Widerstandswerts R_C auf den Spannungsverstärkungsfaktor, wenn U_{CC} unverändert bleibt? Begründe deine Antwort mit Hilfe der Arbeitsgeraden.
4. Was ist die Konsequenz eines Kurzschluss des Kondensators C_2 auf die Spannung u_{OUT} ? Begründe deine Antwort.
5. Was ist die Konsequenz eines Kurzschluss des Widerstands R_2 auf die Spannung u_{OUT} ? Begründe deine Antwort.
6. Sei $U_{CC}=20V$, $\hat{u}_{IN}=10mV$, $G_U=100$ und der Arbeitspunkt sei mittig auf der Arbeitsgeraden platziert.
 - a. Gib die Momentanwerte von $u_{OUT}(t)$ und $u_{CE}(t)$ an, wenn $u_{IN}(t) = 0V$?
 - b. Gib die Momentanwerte von $u_{OUT}(t)$ und $u_{CE}(t)$ an, wenn $u_{IN}(t) = 10mV$?

6.2.10 Einfluss der Temperatur auf den Arbeitspunkt

Beobachtung:

Im Versuch 4 haben wir beobachtet, dass sich die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} im Arbeitspunkt verringert, wenn man den Transistor erwärmt. Der Arbeitspunkt verschiebt sich also auf der Arbeitsgeraden nach oben, was zu Verzerrungen führen kann.

Erklärung:

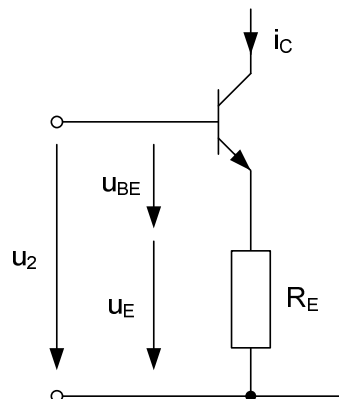
Im Allgemeinen verringert sich der Widerstand eines Halbleiters wenn man ihn erwärmt. Aus dem gleichen Grund verringert sich R_{CE} , was zur Folge hat, dass U_{CE} sich verringert und I_C sich erhöht.

6.2.11 Stromgegenkopplung

Beobachtung:

Im Versuch 4 haben wir beobachtet, dass man den Einfluss der Temperatur auf den Arbeitspunkt mit einem Emitterwiderstand R_E verringern kann. Leider verringert dies auch den Spannungsverstärkungsfaktor G_U . Gleichzeitig werden aber etwaige Verzerrungen unterdrückt.

Erklärung:



Wenn sich der Kollektorstrom vergrößert (z.B. weil sich die Temperatur erhöht hat), dann vergrößert sich auch die Spannung u_E am Emitterwiderstand weil $u_E = R_E \cdot i_C$. Dies verringert die Basis-Emitter-Spannung u_{BE} weil $u_{BE} = u_2 - u_E$ und weil u_2 unverändert ist. Die Verringerung von u_{BE} verringert i_B was der anfänglichen Erhöhung von i_C entgegenwirkt.

Regelkreis:

$$i_C(t) \nearrow \Rightarrow u_E(t) \nearrow \Rightarrow u_{BE}(t) \searrow \Rightarrow i_B(t) \searrow \Rightarrow i_C(t) \searrow$$

Problem:

Der soeben beschriebene Regelkreis wird als Stromgegenkopplung bezeichnet. Diese ist aber aktiv unabhängig davon ob sich der Kollektorstrom durch Temperaturerhöhung oder durch Erhöhung des Eingangssignals vergrößert hat. Dies erklärt weshalb die Stromgegenkopplung nicht nur den Arbeitspunkt stabilisiert sondern, leider auch den Spannungsverstärkungsfaktor verringert.

Lösung:

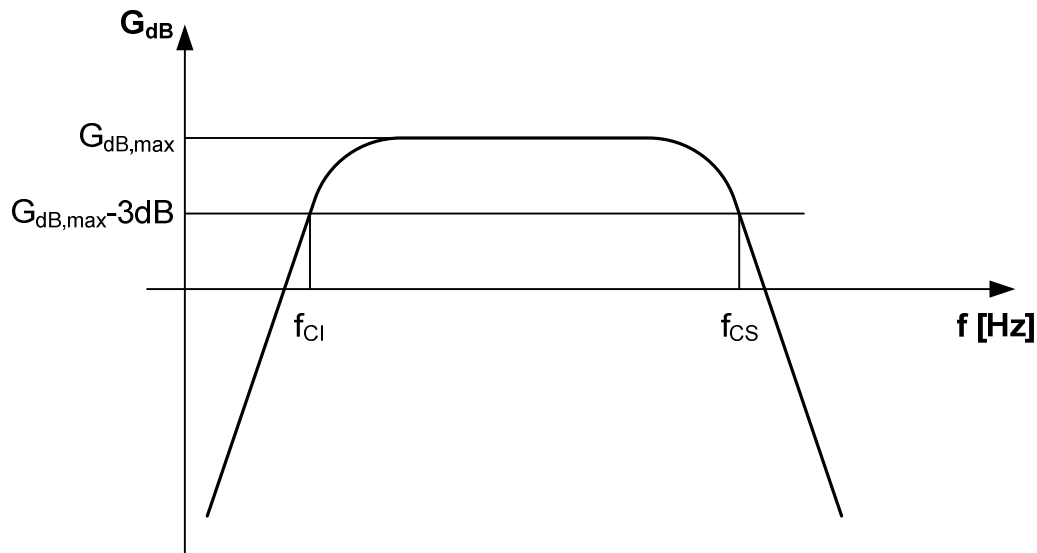
Temperatur- und Eingangssignalschwankungen unterscheiden sich durch ihre Frequenz. Um zu verhindern, dass sich G_U verringert, muss man einfach dafür sorgen, dass die "hochfrequenten" Änderungen von $i_C(t)$ am Emitterwiderstand R_E vorbeigeführt werden. Dies erreicht man durch den Kondensator C_E der den Emitterwiderstand R_E für alle Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz ($f_G \approx 16\text{Hz}$) kurzschließt.

Da die Kapazität des Emitterkondensators C_E oft recht hoch sein muss, handelt es sich meist um einen Elektrolytkondensator. Also beachte die Polarität!

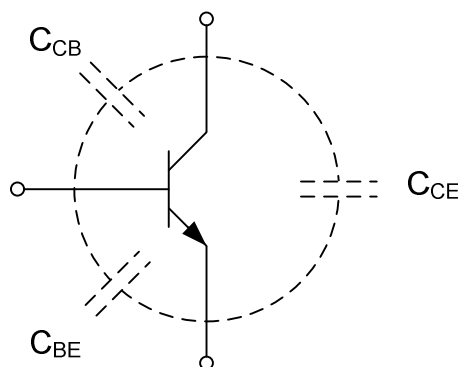
6.2.12 Amplitudengang

(siehe auch Versuch 5)

Der Amplitudengang der Emitterschaltung entspricht dem eines aktiven Bandpass.



Die Dämpfung der tiefen Frequenzen ist bedingt durch die passiven Hochpässe welche aus C_1 und R_2 , C_2 und R_L sowie C_E und R_E geformt werden. Die obere Grenzfrequenz wird durch die Bauweise des verwendeten Transistors bestimmt. Die sogenannten *Parasitären-Kapazitäten* zwischen den Anschlüssen überbrücken den Transistor bei sehr hohen Frequenzen und bilden somit Tiefpässe.



Aufgabe 6:

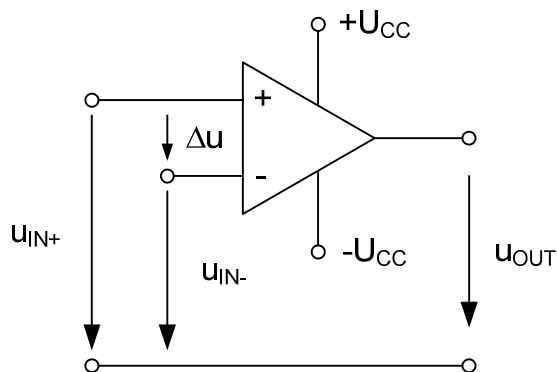
Zwei Hochpässe mit einer Grenzfrequenz von 16Hz sind kaskadiert. Wird die Grenzfrequenz der zwei gesamten Schaltung größer, kleiner oder gleich der Teilgrenzfrequenzen sein? Begründe deine Antwort.

6.3 Operationsverstärker (Wiederholung)

6.3.1 Einleitung

Alternativ zur Emitterschaltung kann auch ein Operationsverstärker als Audio-Vorverstärker zum Einsatz kommen.

Schaltzeichen:



Bauform:



Quelle: <http://www.aliexpress.com>

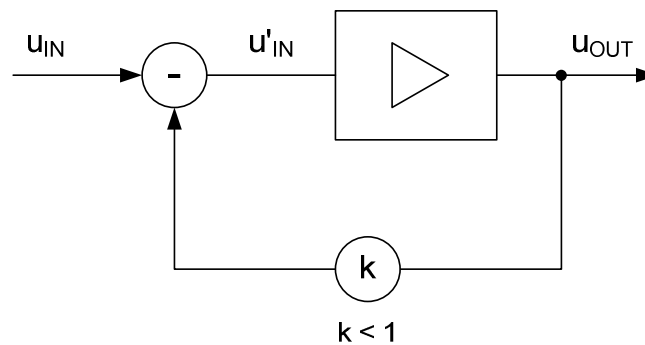
Der Operationsverstärker ist ein Differenzverstärker, das heißt er verstärkt die Differenz zwischen den beiden Eingangsspannungen.

$$u_{\text{OUT}} = G_U \cdot \Delta u \quad \text{mit} \quad \Delta u = (u_{\text{IN}+} - u_{\text{IN}-})$$

Der Spannungsverstärkungsfaktor G_U eines idealen OPs ist unendlich groß. Real OPs erreichen Spannungsverstärkungsfaktor von 10^8 . Die Hauptanwendungen des OPs sind die Spannungsverstärkung sowie der Schmitt-Trigger, er wird aber auch als analoger Differenzierer, Integrierer, Addierer oder Subtrahierer verwendet.

Die sehr hohen Verstärkungsfaktoren von OPs führen dazu, dass die Ausgangsspannung bereits bei geringsten Spannungsunterschieden an den Eingängen auf $+U_{CC}$ oder $-U_{CC}$ ausschlägt. In dieser Form dient der OP bestenfalls als Komparator. Für alle anderen Anwendungen wird die Gesamtspannungsverstärkung der Schaltung mit Hilfe einer Gegenkopplung auf ein technisch "sinnvolles" Maß reduziert.

6.3.2 Das Prinzip der Gegenkopplung



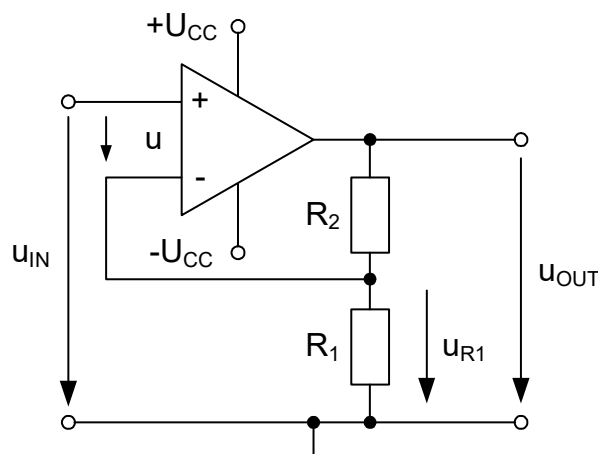
Man versteht unter Gegenkopplung den Fakt einen Teil des Ausgangssignals u_{OUT} an den Eingang zurückzuführen und das zurückgeführte Signal vom Eingangssignal abzuziehen. Dies führt dazu, dass das Signal u'_{IN} am Eingang des Verstärkers reduziert wird. Diese Reduzierung von u'_{IN} erscheint nach Außen wie eine Verringerung des Spannungsverstärkungsfaktors. des Verstärkers.

6.3.3 Die nicht-invertierende Operationsverstärkerschaltung

Die nicht-invertierende Operationsverstärkerschaltung ist die einfachste Art und Weise eine Gegenkopplung zu realisieren. Man kann zeigen, dass der Spannungsverstärkungsfaktor der gesamten Schaltung nur von den zwei Widerstandswerten abhängig ist:

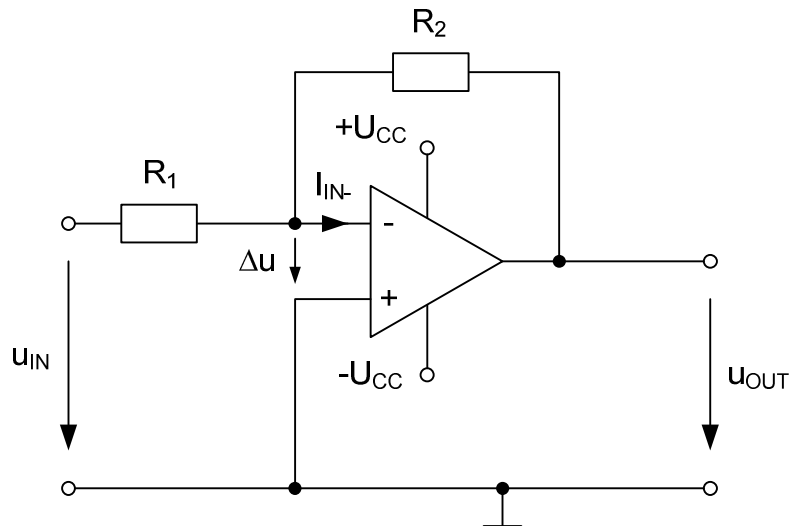
$$G_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Man beachte, den Spannungsverstärkungsfaktor G_U der Schaltung nicht mit dem Spannungsverstärkungsfaktor G_U des OP zu verwechseln. Die Schaltung wird nicht-invertierend genannt, weil die Eingangs- und Ausgangsspannung in Phase sind.



6.3.4 Die invertierende Operationsverstärkerschaltung

Bei manche Anwendungen ist es nötig die Verstärkung auch unter 1 verringern zu können (siehe aktive Filter). In diesem Fall kann man die invertierende Operationsverstärkerschaltung verwenden.



Für diese Schaltung gilt:

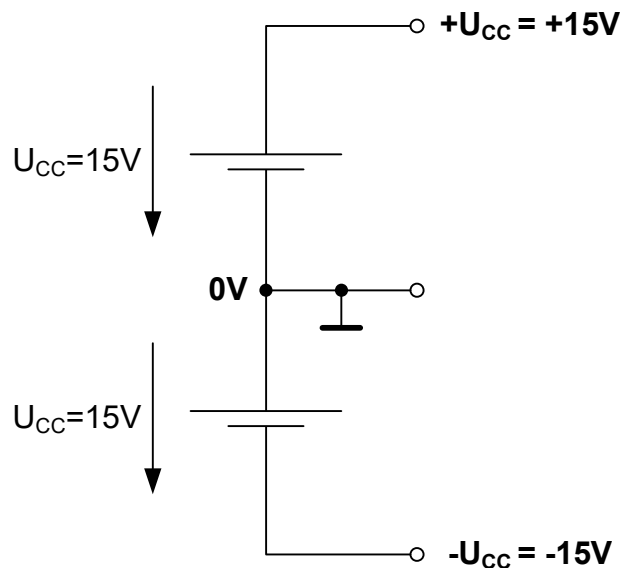
$$G_U = \frac{R_2}{R_1}$$

Die Ausgangsspannung ist zur Eingangsspannung invertiert, also um 180° phasenverschoben.

6.3.5 Spannungsversorgung von Operationsverstärkern

Da die Operationsverstärker sowohl positive als auch negative Spannungen am Ausgang abgeben sollen, müssen diese auch mit einer positiven und einer negativen Betriebsspannung versorgt werden. Eine solche Spannungsversorgung nennt man auch symmetrische Spannungsversorgung und kann mit zwei Spannungsquelle in Reihe realisiert werden.

Schaltung einer symmetrischen Spannungsversorgung:



Aufgabe 7:

- Dimensioniere die Widerstände R_1 et R_2 einer nicht-invertierende Operationsverstärkerschaltung so, dass ein Spannungsverstärkungsfaktor von 20 erreicht wird. Wähle die Werte so, dass der Ausgang des OP nicht zu stark belastet wird.
- Dimensioniere die Widerstände R_1 et R_2 einer invertierende Operationsverstärkerschaltung so, dass ein Spannungsverstärkungsfaktor von 20 erreicht wird. Wähle die Werte so, dass der Ausgang des OP nicht zu stark belastet wird.