

Ein einfacher NF-Verstärker

Wir wollen jetzt den Aufbau und die Funktionsweise eines einfachen NF-Verstärkers untersuchen, also eines Verstärkers für niedrige Frequenzen, welche im hörbaren Bereich liegen. Verstärker dieser Art sind im Prinzip in jedem Funkempfänger enthalten, auch wenn für Verstärker heute in vielen Fällen integrierte Schaltungen zum Einsatz kommen.

Ein erster (ungeeigneter) Versuch

Um die Funktionsweise des Verstärkers deutlich zu machen, bauen wir zunächst die (ungeeignete) Schaltung nach Bild 1 auf. Die Kapazität des Kondensators ist hier mit 470 nF angegeben. Der genaue Wert ist aber nicht kritisch.

Hinweis: Der Widerstand von 100 k Ω ist für die eigentliche Demonstration nicht notwendig, aber ohne diesen Widerstand kommt es zu „Zustopf-Effekten“. Der Kondensator würde sich mehr und mehr negativ aufladen, und der Transistor dadurch schon nach kurzer Zeit völlig sperren.

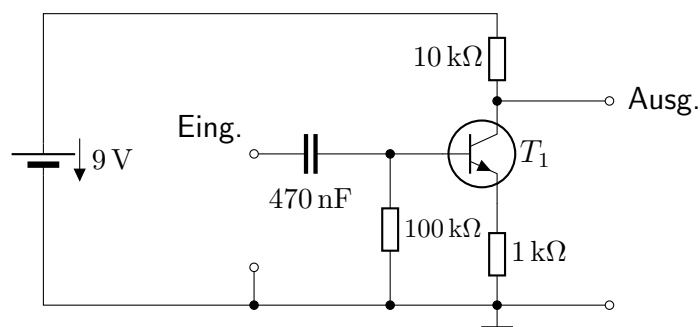


Bild 1: Ein (ungeeigneter) NF-Verstärker

Beschreibung der Funktion

Auf den Eingang der Schaltung geben wir ein Sinussignal aus unserem Signalgenerator mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Amplitude von 2 V. Da der Kondensator ja für Wechselstrom durchlässig ist, gelangt dieser auf die Basis des Transistors.

Aufbauskitze

Bild 2 zeigt nun die Aufbauskitze zu dieser Schaltung. Die Schaltung wird über unsere 9 V-Batterie mit Strom versorgt. Diese Schaltung ist jetzt schon etwas komplizierter, aber wir sind inzwischen ja Experten ☺. Damit sich nicht alle Bauteile an einer Stelle „knubbeln“, wurde eine Verbindung zwischen den beiden Masseschienen vorgesehen (die blaue Leitung ganz links).

Wenn wir uns jetzt aber mal das Ausgangssignal auf dem Oszilloskop ansehen, erkennen wir, dass das Ausgangssignal nicht viel mit einem Sinussignal zu tun hat, sh. Bild 3. Dieser Verstärker funktioniert also nicht. Wieso ist das so?

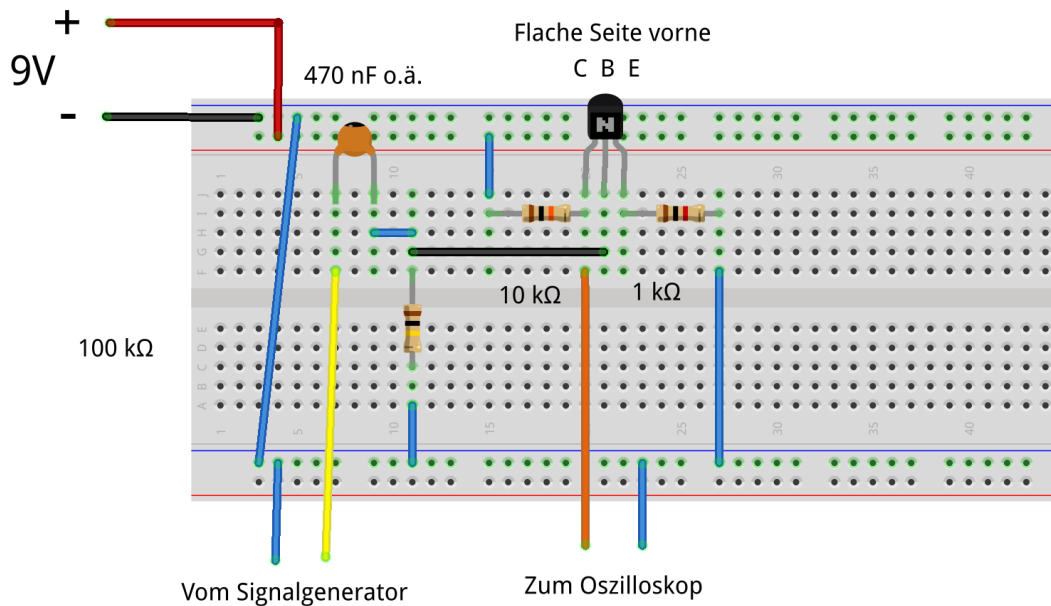


Bild 2: Aufbauskitze für die Schaltung nach Bild 1

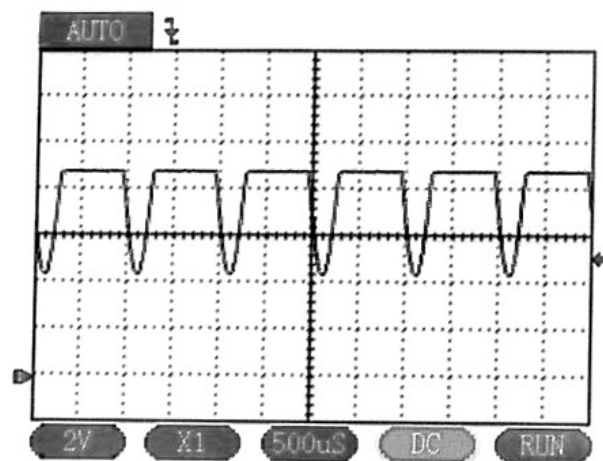


Bild 3: Ausgangssignal des Verstärkers ohne Einstellung des Arbeitspunktes

Die Eingangskennlinie

Dazu schauen wir uns einmal die sog. **Eingangskennlinie** des Transistors an, welche in Bild 4 dargestellt ist. Der Übergang von der Basis zum Emitter ist im Prinzip ja eine normale Diode, und genauso verhält sich der Transistor auch. Wenn wir jetzt das Wechselspannungssignal direkt auf die Basis des Transistors geben, dann liegt die Spannung an der Basis in einem Bereich, in dem der **Transistor nicht vernünftig arbeiten** kann. In Bild 4 ist die Eingangsspannung durch den grünen Doppelpfeil dargestellt.

- Im Falle einer **positiven Halbwelle** beginnt der Transistor erst ab einer **Spannung von 0.7 V** zu leiten. Von unserem Signal sehen wir also nur die Spitzen.
- Und bei der **negativen Halbwelle** ist die Basis-Emitter-Diode gar in **Sperrichtung** gepolt. In diesem Fall leitet der Transistor also gar nicht.

- Und nebenbei bemerkt ist unser **Eingangssignal** in diesem Fall **viel zu groß**. Unser Verstärker wäre in jedem Fall hoffnungslos **übersteuert**.

Es ist also kein Wunder, dass der Verstärker nicht vernünftig arbeitet.

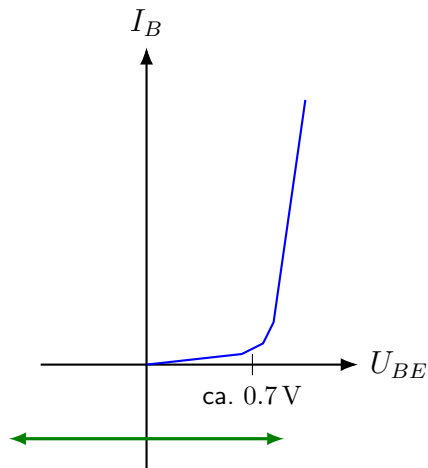


Bild 4: Eingangskennlinie eines Transistors

Eine funktionsfähige Schaltung

Wie schaffen wir es jetzt, dass unser Verstärker vernünftig arbeitet? Dazu schauen wir uns die Schaltung eines funktionsfähigen einfachen NF-Verstärkers in Bild 5 an

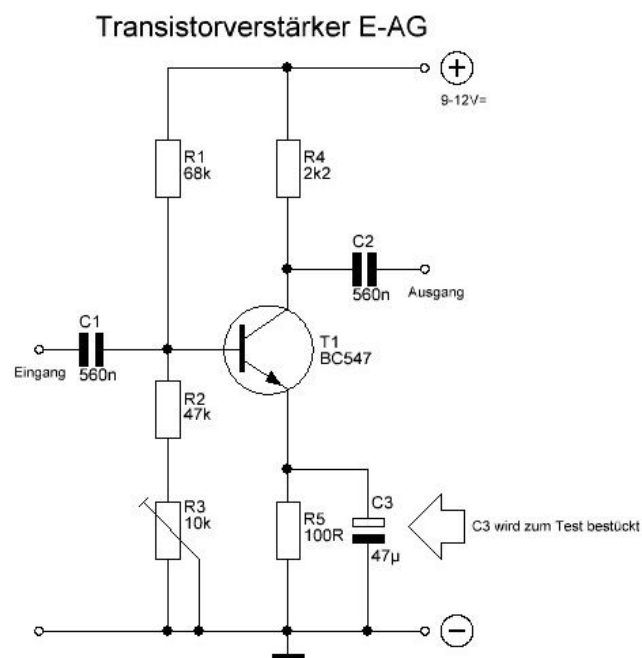


Bild 5: Ein einfacher NF-Verstärker

Der Arbeitspunkt

Das sieht erst einmal kompliziert aus, ist es aber nicht. Um unseren Transistor als Wechselspannungsverstärker verwenden zu können, müssen wir unser **Wechselspannungssignal** in einen Bereich **verschieben**, in dem der **Transistor arbeiten kann**. Da der Strom ja nur **in einer Richtung** durch einen Transistor fließen kann¹, müssen wir dafür sorgen, dass das sichergestellt ist.

Das machen wir, indem wir unserem **Wechselspannungssignal** eine **Gleichspannung überlagern**. Dadurch bleibt das Signal in seiner Form unverändert, es nimmt aber **keine negativen Werte mehr** an. Es fließt nur mal mehr und mal weniger Strom durch den Transistor, aber er fließt **immer in der gleichen Richtung!**

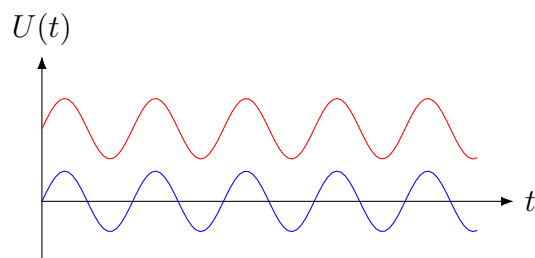


Bild 6: Verschiebung eines Wechselspannungssignals

Wie das dann aussieht, ist in dem Diagramm in Bild 6 dargestellt. Das Signal ist von der Form her unverändert, nur ist es „nach oben“ verschoben. Man nennt diese Verschiebung **den Arbeitspunkt einstellen**.

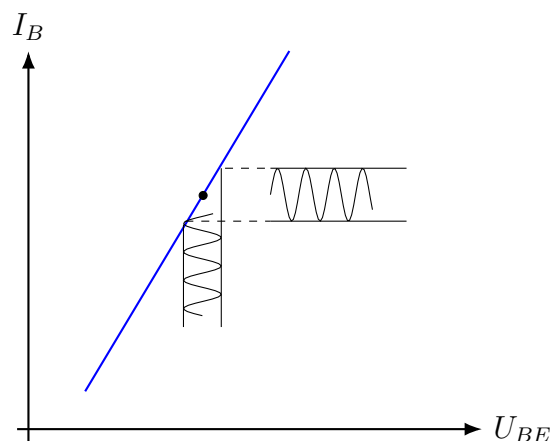


Bild 7: Einstellung des Arbeitspunktes und Verstärkung einer Wechselspannung

Was dabei genau passiert, schauen wir uns anhand des Diagramms in Bild 7 an. Die Eingangskennlinie des Transistors haben wir hier idealisiert als Gerade dargestellt. Für kleine Signale ist das ein übliches Verfahren.

- Wenn wir jetzt eine kleine Wechselspannung auf die Basis des Transistors geben, dann schwankt die Basis-Emitter-Spannung um den Arbeitspunkt herum.
- Dem entsprechend **schwankt** auch **der Basisstrom**, wie das durch die Spiegelung des Signals an der Kennlinie dargestellt ist.

¹Hinweis: Dies gilt auch für Elektronenröhren.

- Der **Strom durch den Transistor** zwischen **Kollektor und Emitter** schwankt dadurch aber noch in einem viel größeren Maße, da der Basisstrom ja durch den Transistor verstärkt wird.
- Der Kollektor des Transistors bildet den Ausgang des Verstärkers.

Beschreibung der Funktion

Die Einstellung des Arbeitspunktes erfolgt durch einen **Spannungsteiler**², wie das in Bild 5 zu sehen ist. Dieser Spannungsteiler wird hauptsächlich durch die Widerstände R_1 und R_2 gebildet. Zur Demonstration verschiedener Effekte kann in unserer Schaltung der Spannungsteiler über das Potentiometer R_3 variiert werden. Wie die Werte der Widerstände berechnet werden, hängt von den technischen Daten des Transistors und teilweise auch von der Anwendung ab. Zur Berechnung gibt es hierfür (natürlich) entspr. Programme.

Das Signal aus unserem Signalgenerator wird über C_1 eingekoppelt. Wir erinnern uns, dass ein Kondensator Gleichspannung abblockt, Wechselspannung aber durchlässt. Wichtig sind die beiden Widerstände R_4 und R_5 . R_4 ist der sog. **Arbeitswiderstand**. Dieser ist dafür zuständig, einen Kurzschluss im Kollektor-Emitter-Zweig zu verhindern, so dass am Kollektor des Transistors das verstärkte Signal abgegriffen werden kann. Das verstärkte Signal wird über C_2 ausgekoppelt. Auch dieser Kondensator dient wieder zum Abblocken der Gleichspannung. Der Strom durch unseren Transistor ist ja **kein Wechselstrom** sondern ein **schwankender Gleichstrom**. Der Kondensator blockt diesen Gleichstromanteil ab, so dass wir dahinter wieder unser ursprüngliches Wechselspannungssignal ohne Gleichanteil haben.

R_5 ist der sog. **Gegenkopplungswiderstand**. Dessen Funktion wird in Abschnitt „Die Gegenkopplung“ genauer erläutert.

Aufbauskitze

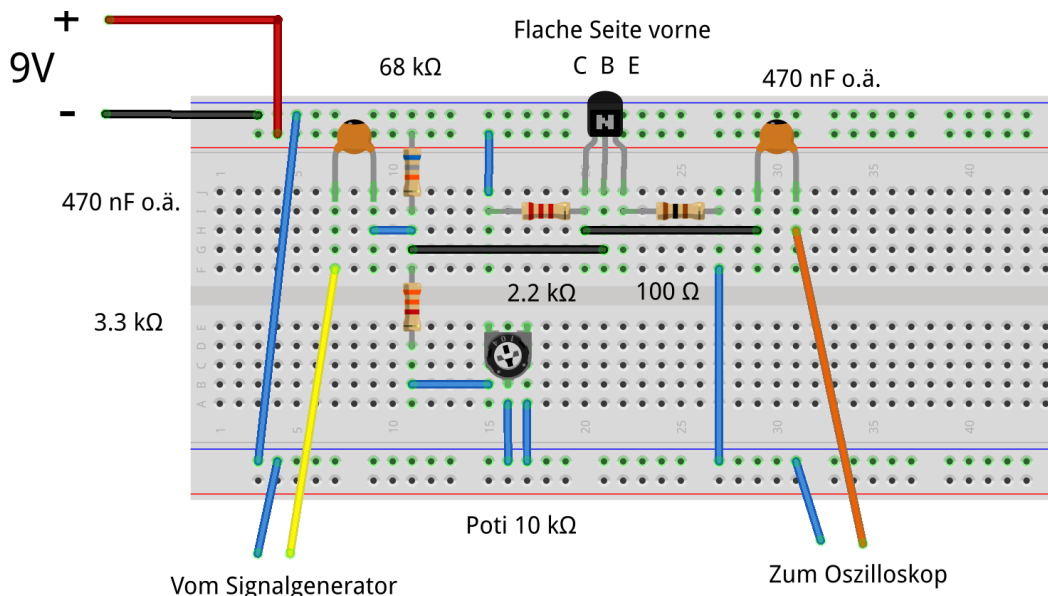


Bild 8: Aufbauskitze für die Schaltung nach Bild 5

²Wir erinnern uns an Kapitel 2: Das Ohmsche Gesetz?

Jetzt wollen wir sehen, ob die Schaltung auch in der Praxis funktioniert. Dazu bauen wir sie auf unserem Steckbrett auf. Die Aufbauskitze dazu zeigt Bild 8. Auch diese Schaltung wird über unsere 9 V-Batterie mit Strom versorgt. Beim Aufbau müssen wir sehr sorgfältig vorgehen, da diese Schaltung doch ein paar Bauteile mehr enthält. Den Kondensator C_3 lassen wir erst einmal weg.

Das Potentiometer stellen wir zunächst auf die Mittelstellung. Dann geben wir ein Signal mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Amplitude 100 mV auf den Eingang des Verstärkers. Zur Kontrolle messen wir das Eingangssignal mit dem Oszilloskop nach. Dann messen wir das Ausgangssignal. Wir werden feststellen, dass wir hier ein Signal mit einer Amplitude von ca. 2 V messen können, sh. Bild 9. Wir haben unser Eingangssignal also deutlich verstärkt!

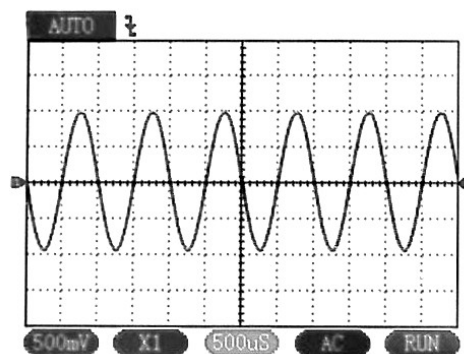


Bild 9: Ausgangssignal des Verstärkers mit korrektem Arbeitspunkt

Verändern des Arbeitspunktes

Jetzt drehen wir das Potentiometer langsam nach rechts. Im Schaltplan würde das bedeuten, dass wir den Schleifer der Potentiometers immer weiter nach oben schieben und das Potentiometer dadurch mehr und mehr überbrücken.

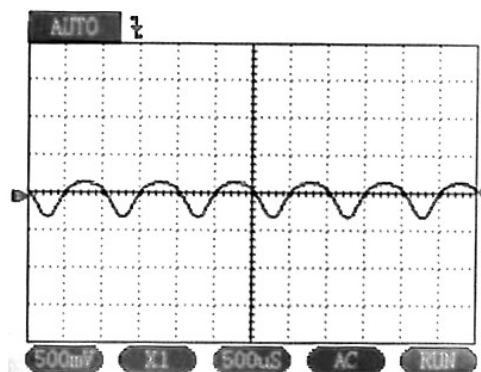


Bild 10: Ausgangssignal des Verstärkers mit schlecht eingestelltem Arbeitspunkt

Dadurch verändern wir aber den Spannungsteiler und **verringern** die Spannung an der Basis des Transistors. Wir **verschieben** also den **Arbeitspunkt** mehr und mehr in den **Knick der Kennlinie**. Auf dem Oszilloskop erkennen wir, dass sich das verstärkte Signal mehr und mehr verformt. Der Verstärker arbeitet also nicht mehr richtig. Diesen Zustand wollen wir normalerweise nicht haben³.

³Rockmusiker arbeiten teilweise absichtlich mit falsch eingestellten oder übersteuerten Verstärkern, um ihren speziellen „Sound“ zu erzeugen.

Für Experten und solche, die es werden wollen

Die Invertierung des Signals

Vielleicht ist Euch beim Betrachten des Bildes 3 etwas aufgefallen. Wir haben ja gesagt, dass der Transistor nur bei den positiven Halbwellen unseres Eingangssignals leitet. Da hätten wir ja jetzt eigentlich auch verstärkte positive Halbwellen erwartet. Statt dessen bekommen wir dieses komische Bild mit den Spitzen „nach unten“.

Dazu muss man wissen, dass es verschiedene Arten gibt, wie Transistoren (bzw. früher auch Röhren) in Schaltungen eingesetzt werden. Bei dieser für normale Verstärker am häufigsten eingesetzten Schaltung wird das Signal **invertiert**. D.h. es wird an der **waagrechten Achse gespiegelt**, so wie das in Bild 11 dargestellt ist. Aus positiven Halbwellen werden negative und umgekehrt. Das ist ein normales Verhalten und stört in den meisten Fällen nicht, muss aber ggf. beim Schaltungsentwurf berücksichtigt werden.

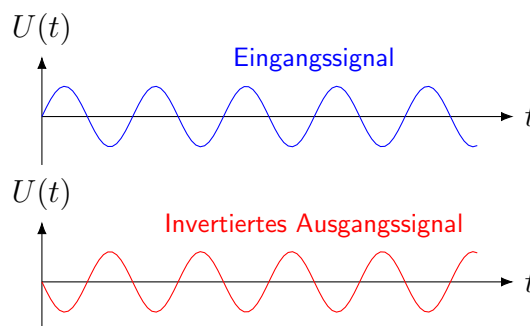


Bild 11: Invertierung des Ausgangssignal relativ zum Eingangssignal

Wodurch kommt dieser Effekt zustande? Wir betrachten uns dazu nochmal Bild 3. Das Oszilloskop arbeitet im Gleichspannungsmodus (Einstellung „DC“, 2. Button von rechts). Unsere Nulllinie liegt dann auf der ersten Linie von unten (kleiner Pfeil links an der Seite). Die höchste Spannung, die wir messen, sind knapp 4.5 Kästchen. Bei 2 V pro Kästchen sind das 9 V, also unsere Batteriespannung.

Wenn der Transistor nicht leitet, dann wirkt das wie eine Unterbrechung. Am Kollektor liegt dann praktisch die volle Betriebsspannung. Wir messen die 9 V. Wenn der Transistor bei der positiven Halbwelle aber leitend wird, dann **verringert** sich die **Spannung** am Kollektor, weil ja der Gesamtwiderstand nach Masse bestehend aus dem dem Widerstand der Kollektor-Emitter-Strecke und R_5 geringer wird. Wir haben auch hier wieder einen Spannungsteiler! Dadurch kommen die negativen Spitzen und die Invertierung zustande.

Im normalen Verstärkerbetrieb fällt das nicht auf. Wir können es nur mit einem 2-Kanal-Oszilloskop messen, welches das Ein- und das Ausgangssignal zeitsynchron misst.

Die Gegenkopplung

In Abschnitt „[Beschreibung der Funktion](#)“ hatten wir ja den **Gegenkopplungswiderstand** erwähnt. Wozu ist dieser nun genau gut?

Die Gegenkopplung hilft, den **Arbeitspunkt** zu **stabilisieren**. Dazu betrachten wir uns mal den Ausschnitt der Schaltung mit der Basis-Emitter-Diode und dem Gegenkopplungswiderstand. Eingezeichnet sind hier die Spannungen an den Bauteilen.

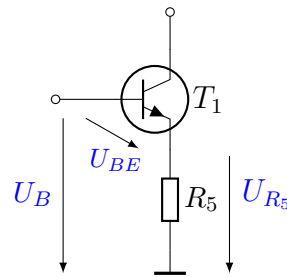


Bild 12: Zur Erläuterung der Gegenkopplung

Über dem Gegenkopplungswiderstand R_5 haben wir einen Spannungsabfall U_{R_5} , welcher sich aus dem Wert des Widerstand und dem Strom durch Transistor und Widerstand nach dem Ohmschen Gesetz $U = R \cdot I$ berechnet. Durch die Einstellung des Arbeitspunktes auf dem steilen Ast der Kennlinie fließt immer ein wenig Strom durch den Transistor⁴.

Wir wissen ja, dass sich Spannungen addieren. Die Spannung an der Basis des Transistors U_B ist also gleich der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} **plus** dem Spannungsabfall an R_5 . Es gilt also:

$$U_B = U_{BE} + U_{R_5} \quad (1)$$

Stellen wir uns jetzt vor, dass sich durch unser überlagertes Wechselsignal die Spannung an der Basis von T_1 ein wenig vergrößert. Dadurch steigt aber die Spannung zwischen Basis und Emitter des Transistors ein wenig an, was einen größeren Basisstrom zur Folge hat. Dieser **größere Basisstrom** bewirkt nun aber auch einen **deutlich größeren Strom** im Kollektor-Emitter-Zweig und **durch den Widerstand R_5** , wodurch sich an R_5 ein **höherer Spannungsabfall** ergibt.

Wenn jetzt aber U_{R_5} größer wird und U_B ungefähr gleich bleibt – wir geben ja eine relativ kleines Wechselspannungssignal auf die Basis – bleibt nach Gleichung (1) nur die Möglichkeit übrig, dass sich die Basis-Emitterspannung verringert. Dadurch rutscht der Arbeitspunkt auf der Kennlinie nach Bild 4 ein wenig nach unten, wodurch der Basisstrom wieder geringer wird.

Es stellt sich ein **Gleichgewicht** ein zwischen dem Basisstrom und dem erhöhtem Spannungsabfall an R_5 ein. Dieser Effekt wirkt aber dem ursprünglichen Eingangssignal **entgegen** und reduziert die Verstärkung. Daher wird dies als **Gegenkopplung** bezeichnet.

Die Gegenkopplung erfüllt in Verstärkerschaltungen drei wichtige Aufgaben.

1. Einstellung der Verstärkung.

Über die Widerstände R_4 und R_5 in Bild 5 wird die Verstärkung der Schaltung eingestellt. Die Stromverstärkungsfaktoren von Transistoren weisen sehr starke Toleranzen auf und können beim gleichen Transistortyp durchaus im Bereich von 400 bis 800 schwanken.

Damit ließe sich kein Verstärker mit reproduzierbaren Eigenschaften aufbauen. Der eine wäre brüllend laut, der andere flüsterleise. Widerstände sind aber mit deutlich geringeren Toleranzen verfügbar, wenn es sein muss 1%. Dadurch kann der Verstärkungsfaktor der Schaltung nun relativ genau und reproduzierbar eingestellt werden.

⁴Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es auch andere Verstärkerschaltungen gibt, bei denen das nicht so ist. Bei Verstärkern für große Leistungen würde sonst zu viel Energie an den Bauteilen „verbraten“.

Für den Verstärkungsfaktor v gilt⁵:

$$v = \frac{R_4}{R_5},$$

In unserer Schaltung mit $R_4 = 2200 \Omega$ und $R_5 = 100 \Omega$ sollte der Verstärkungsfaktor also ungefähr 22 sein, was wir ja auch gemessen haben.

2. Stabilisierung des Arbeitspunktes.

Die Eigenschaften von Halbleitern sind **stark temperaturabhängig**. Mit **steigender Temperatur erhöht** sich die **Leitfähigkeit** von Halbleitern teilweise deutlich. Dies würde ein „Weglaufen“ des Arbeitspunktes bedeuten.

Auch diesem Effekt wirkt die Gegenkopplung entgegen. Ein durch höhere Temperaturen erhöhter Kollektor-Emitter-Strom bedeutet wieder einen höheren Spannungsabfall an R_5 und damit eine geringere Basis-Emitter-Spannung, wodurch der Basisstrom und damit auch der Kollektor-Emitter-Strom wieder sinken.

Bei Schaltungen für höhere Leistungen, z. B. bei geregelten Netzteilen, müssen sogar spezielle Vorkehrungen zur Strombegrenzung getroffen werden. Eine höhere Temperatur würde eine höhere Leitfähigkeit, d. h. einen geringeren Widerstand, der Regeltransistoren bewirken, was wiederum einen höheren Strom bewirkt. Ein höherer Strom wiederum bewirkt eine stärkere Erwärmung, was wieder zu einem geringeren Widerstand führt ... Ein Teufelskreis ☹.

3. Linearisierung der Kennlinie.

In der Praxis ist eine Kennlinie leider keine exakte Gerade, sondern immer leicht gekrümmt. Das bedeutet, dass unser **Signal nicht exakt verstärkt** wird, sondern es wird immer etwas **verformt**, so ähnlich, wie wenn wir in einen Zerrspiegel gucken.

Diese Signalverformung eines Verstärkers wird als **Klirrfaktor** bezeichnet und macht sich bei Sprache oder Musik im Radio als knarrender, kratzender oder kreischender Unterton bemerkbar. Klirrfaktoren unter 1%, d. h. 1% dessen, was aus dem Lautsprecher kommt, war im ursprünglichen Signal nicht vorhanden, hört man im täglichen Leben nicht. Moderne Verstärker erreichen problemlos Klirrfaktoren von 0.1% oder sogar deutlich weniger.

Weitere Voraussetzungen, einen niedrigen Klirrfaktor zu erreichen, sind eine gute Einstellung des Arbeitspunktes und die Vermeidung der Übersteuerung.

Man opfert also einen nicht unerheblichen Teil der möglichen Verstärkung des Transistors, um die drei genannten Ziele zu erreichen.

Der Gegenkopplungswiderstand kann auch fehlen. Die Verstärkung wird dann durch den Widerstand R_4 und den Widerstand der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors bestimmt. Bei einfachen Verstärkerschaltungen für kleine Signale und wenn keine großen Temperaturunterschiede zu erwarten sind, wird das gelegentlich so gemacht.

Messung der Basis-Emitterspannung

Die Stabilisierung der Basis-Emitterspannung und damit des Arbeitspunktes können wir bei unserer Schaltung auch messen. Dazu fügen wir zwei zusätzliche Leitungen in unsere Schaltung ein, wie das in Bild 13 mit der pinkfarbenen und der grünen Leitung dargestellt ist.

⁵Die Berechnung dazu ist nicht schwierig, erfordert aber einiges an Theorie und würde daher an dieser Stelle zu weit führen.

Natürlich müssen wir sehr hier **vorsichtig** sein, um **keinen Kurzschluss** zu verursachen. Das Stecken der beiden Leitungen sollte daher nur bei **abgeklemmter Stromversorgung** erfolgen!

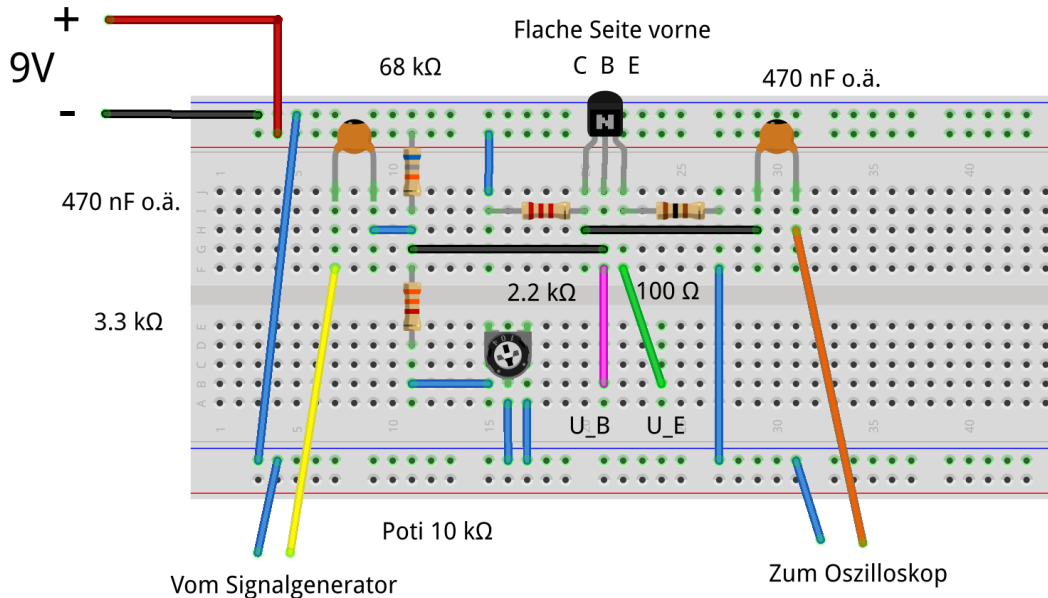


Bild 13: Aufbauskitze für die Messung der Basis-Emitter-Spannung

Über diese beiden Leitungen können wir nun die Spannung zwischen Basis und Emitter messen. Wenn wir jetzt an dem Potentiometer drehen, werden wir feststellen, dass sich die Basis-Emitter-Spannung nur wenig ändert. Unser Arbeitspunkt ist also relativ stabil.

Überbrückung des Gegekopplungswiderstands

In dem Schaltbild in Bild 8 ist jetzt noch C_3 eingezeichnet, den wird zuerst einmal weggelassen hatten. C_3 ist parallel zum Gegenkopplungswiderstand R_5 geschaltet. Dies ist ein häufig verwendeter Trick, um die gleichspannungsmäßigen Vorteile der Gegenkopplung mit einer erhöhten Verstärkung für Wechsellspannung zu kombinieren.

Ein Kondensator ist ja für Wechsellspannung durchlässig, d. h. für Wechsellspannung ist R_5 überbrückt, und wir erhalten eine deutlich höhere Verstärkung für Wechsellspannung, ohne die Vorteile der Arbeitspunktstabilisierung zu verlieren.

© Alle Rechte beim DARC OV I07 bzw. den Autoren. Für Ausbildungs- und Lehrzwecke frei verwendbar. Die gewerbliche oder kommerzielle Nutzung bedarf der schriftlichen Genehmigung. Nicht referenzierte Bilder von DJ1FC, DK7AU oder vom Autor. Dokument erstellt mit \LaTeX unter Verwendung der Pakete TikZ und CircuiTikZ sowie fritzing.

*** Elektrischer Strom ist kein Spielzeug. Beachtet unsere Sicherheitshinweise. ***
 *** Ihr findet sie, wie diese Schaltung, auf unserer Webseite. ***