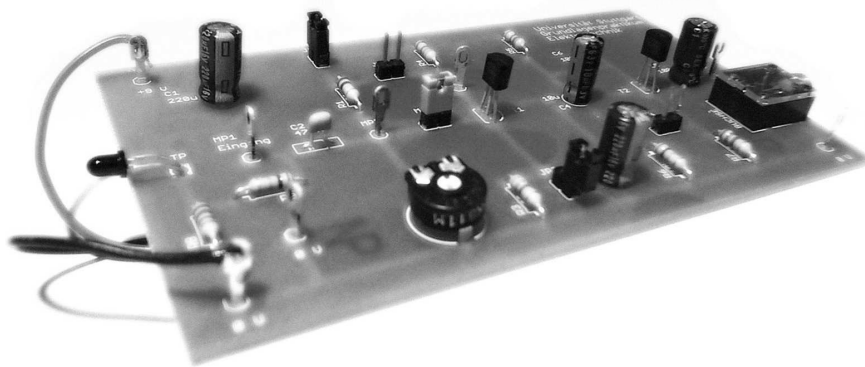


Universität Stuttgart

Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik

Umdruck zum Versuch

Basis 2 Verstärkerschaltung mit Transistoren



Bitte bearbeiten Sie alle Vorbereitungsfragen und bringen Sie einen Taschenrechner zum Versuch mit! Vor dem Versuch wird ein kurzer schriftlicher Test durchgeführt.

Wegbeschreibung siehe letzte Seite.

Stand 23. Juli 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Allgemeines	3
2.1. Transistor als steuerbarer Widerstand	3
2.2. Kondensator als Gleichspannungssperre	4
2.3. Farbkodierung von Widerständen	5
3. Transistorgrundschaltungen	6
3.1. Nichtlineares Verhalten	7
3.2. Emitterschaltung	8
3.3. Basisschaltung	8
3.4. Kollektorschaltung	8
4. Vorverstärker	8
4.1. Arbeitspunkteinstellung	9
4.2. Spannungsgegenkopplung	10
4.3. Stromgegenkopplung	11
4.4. Kleinsignalverstärker	11
5. Ausgangsverstärker	12
5.1. Ausgangswiderstand	12
5.2. Impedanzwandler	12
5.3. Kollektorschaltung für mehr Strom	12
6. Vorbereitungsfragen	13
7. Versuchsdurchführung	15
7.1. Arbeitspunkteinstellung	15
7.2. Wechselstrombetrieb	16
A. Anhang	18
A.1. Bauteileliste	18
A.2. Schalt- und Bestückungsplan	19
A.3. Datenblatt des Transistors BC547	20
A.4. Wegbeschreibung zur Versuchsdurchführung	23

1. Einleitung

In diesem Versuch lernen Sie, einen einfachen Transistorverstärker selbst zu dimensionieren und aufzubauen. Dabei werden Sie schrittweise die Funktion während des Aufbaus an Hand verschiedener Messungen überprüfen. Die aufzubauende Schaltung besteht aus einem zweistufigen NF-Verstärker in Emitter- und Kollektorschaltung, der durch einen Fototransistor zu einem Infrarotempfänger erweitert wird. Zusammen mit einer während des Versuchs vorhandenen Senderschaltung lässt sich so zum Beispiel ein Audiosignal drahtlos übertragen.

2. Allgemeines

2.1. Transistor als steuerbarer Widerstand

Der verständliche Wunschtraum so vieler Winzlinge, endlich einmal gegenüber den Starke das Sagen zu haben, wurde 1948 für den elektrischen Strom Wirklichkeit: Die Herren John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley konstruierten den ersten funktionsfähigen Transistor. Ein großer Laststrom folgt einem kleinen Steuerstrom. Das ist das Grundprinzip, nach dem jeder Bipolartransistor funktioniert. Wir beschäftigen uns in diesem Versuch mit dem Bipolartransistor, welcher drei Anschlüsse hat: Basis (**B**), Kollektor (**C**) und Emitter (**E**). Bei den im Versuch verwendeten Transistoren fließt der Laststrom vom Kollektor zum Emitter und der Steuerstrom von der Basis zum Emitter. Je nach Größe des Stroms, welcher von der Basis zum Emitter fließt, ändert sich der Widerstand und damit auch der Strom zwischen Kollektor und Emitter. Das Wort Transistor setzt sich aus den beiden englischen Wörtern *transfer* und *resistor* zusammen, was man als einen durch einen Strom gesteuerten Widerstand interpretieren kann.

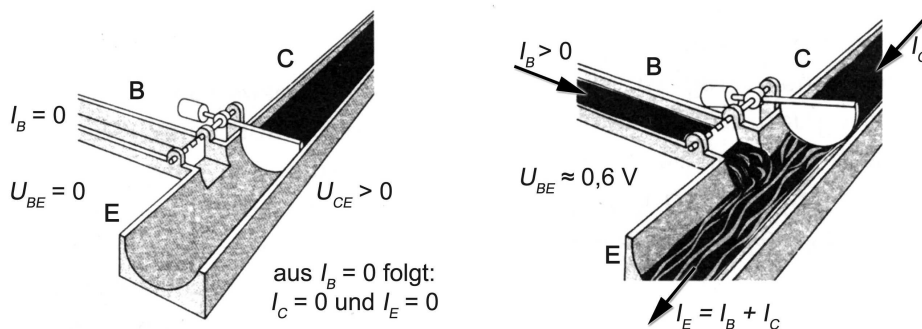


Abbildung 1: Schleusenmodell eines Transistors

Das Schleusenmodell in Abbildung 1 hilft uns, die Funktionsweise des Bipolartransistors zu verstehen: Wir sehen den breiten Kanal von **C** nach **E** und den schmalen Steuerkanal von **B** nach **E**. Solange an **B** nichts fließt, ist die Schleuse durch die Klappe an **C** gesperrt. Sobald aber ein kleiner Strom in die Basis **B** hineinfließt und gegen die Klappe drückt, wird auch

die große Klappe im breiten Kanal geöffnet und der große Strom zwischen Kollektor **C** und Emitter **E** kann fließen.

2.2. Kondensator als Gleichspannungssperre

Vereinfacht kann man einen Kondensator als frequenzabhängigen Widerstand beschreiben, welcher bei der Frequenz $f = 0 \text{ Hz}$ einen unendlich hohen Widerstand besitzt. Wählt man den Kondensator in Abbildung 2 ausreichend groß, werden auch Wechselströme mit niedriger Frequenz den Kondensator passieren können. Ein Gleichstrom kann den Kondensator C jedoch nicht passieren und wird abgeblockt. Im Folgenden soll dieser Zusammenhang an dem einfachen Schaltungsbeispiel in Abbildung 2 erläutert werden:

Die Wechselspannungsquelle $u(t)$ auf der linken Seite in Abbildung 2 erzeuge eine sinusförmige Spannung mit einem Amplitudenwert von 5 Volt und einer Frequenz von einem Kilohertz. Der zeitliche Spannungsverlauf ist in Abbildung 3 auf der linken Seite dargestellt. Die Gleichspannungsquelle U auf der rechten Seite in Abbildung 2 soll einen Wert von 5 Volt besitzen.

Nun interessiert uns der Spannungsverlauf $u_0(t)$ an den Klemmen in der Mitte von Abbildung 2. Nehmen wir an, dass die Wechselspannungsquelle $u(t)$ zuerst ausgeschaltet ist, also $u(t) = 0 \text{ V}$ gilt. Der Kondensator C lädt sich in diesem Fall über den Widerstand R und die als Kurzschluss wirkende Spannungsquelle $u(t)$ auf die Spannung U auf. Wird nun die Wechselspannungsquelle eingeschaltet, überlagern sich die Spannungen der beiden Quellen U und $u(t)$ zu der Spannung $u_0(t)$. In Abbildung 3 ist auf der rechten Seite die Spannung $u_0(t)$ nach dem Einschwingvorgang dargestellt. Mit dieser Schaltung kann man also aus der Wechselspannung $u(t)$ eine Spannung $u_0(t)$ mit einem über U einstellbaren Gleichanteil erzeugen. Im weiteren Verlauf des Praktikums wird der Kondensator als Gleichspannungssperre noch eine wichtige Rolle spielen.

Man kann die Schaltung in Abbildung 2 in ähnlicher Weise auch verwenden, um einen Gleichspannungsanteil zu blockieren und so eine reine Wechselspannung zu erhalten.

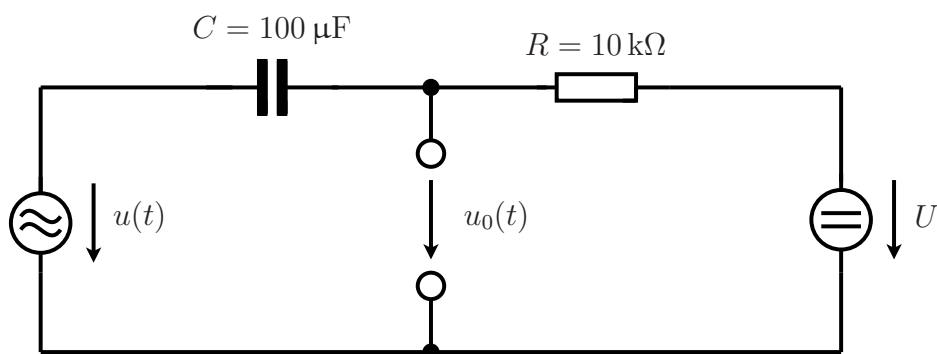


Abbildung 2: Der Kondensator als Gleichspannungssperre

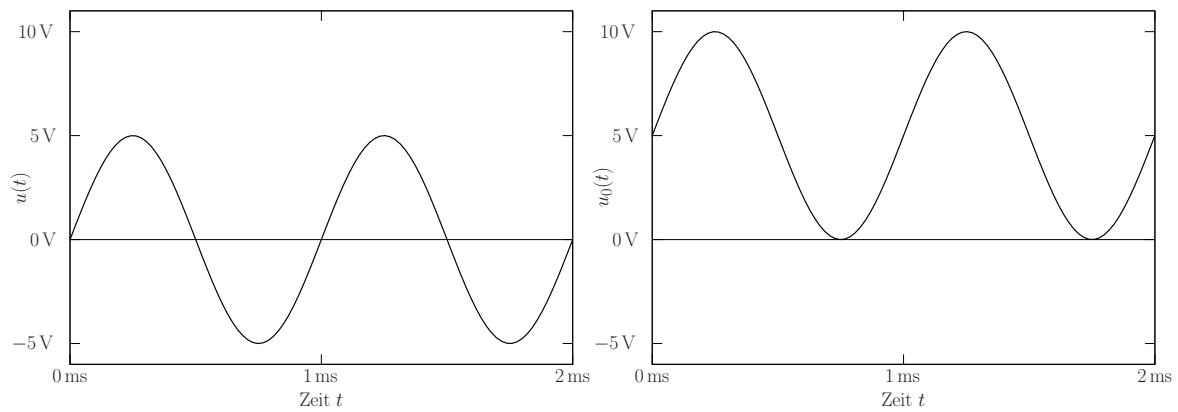


Abbildung 3: links: Sinusspannung der Quelle $u(t)$, rechts: Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung zu $u_0(t)$

2.3. Farbkodierung von Widerständen

Widerstände können durch ihre zylindrische Bauform schlecht mit Text bedruckt werden. Um sie voneinander unterscheiden zu können und von allen Seiten ablesbar zu gestalten, wurde eine Farbkodierung eingeführt. Bei Kohleschichtwiderständen sind vier Farbringe üblich. Die ersten drei Ringe geben Auskunft über den Widerstandswert, der letzte Ring - meist mit größerem Abstand zu den anderen - gibt die Toleranz des Bauteils an. In Tabelle 1 ist die Farbkodierung von Widerständen mit vier Ringen angegeben.

Tabelle 1: Farbkodierung von Widerständen mit vier Ringen

Farbe	Widerstandswert in Ohm			Toleranz
	1. Ring (1. Ziffer)	2. Ring (2. Ziffer)	3. Ring (Multiplikator)	4. Ring
keine	-	-	-	$\pm 20\%$
silber	-	-	10^{-2}	$\pm 10\%$
gold	-	-	10^{-1}	$\pm 5\%$
schwarz	-	0	10^0	-
braun	1	1	10^1	$\pm 1\%$
rot	2	2	10^2	$\pm 2\%$
orange	3	3	10^3	-
gelb	4	4	10^4	-
grün	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$
blau	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$
violett	7	7	10^7	$\pm 0,1\%$
grau	8	8	10^8	-
weiß	9	9	10^9	-

Beispiel: Die Farbringe gelb - violett - rot - braun auf einem Widerstand bedeuten einen Widerstandswert von $47 \cdot 10^2 \Omega$ und eine Toleranz von $\pm 1\%$. Daraus ergibt sich für den Widerstand mit einem Nennwert von $4,7 \text{ k}\Omega$ ein möglicher Toleranzbereich von $4,653 \text{ k}\Omega$ bis $4,747 \text{ k}\Omega$.

Da es nicht sinnvoll ist, jeden durch Tabelle 1 darstellbaren Wert als Bauteil zu produzieren, werden abhängig von der angegebenen Toleranz des Widerstandes nur bestimmte Werte produziert. Für eine Toleranz von $\pm 10\%$ werden nur die in der dritten Zeile von Tabelle 2 angegebenen Werte für die ersten beiden Farbringe verwendet. Für eine Dekade, also zum Beispiel $10 \Omega \leq R < 100 \Omega$ hat man daher die Wahl zwischen 12 verschiedenen Widerstandswerten. Diese 12 Werte werden auch E12-Reihe genannt.

Tabelle 2: Die ersten beiden Ringe eines Widerstands der E3-, E6- und E12-Reihe können nur die in der jeweiligen Zeile angegebenen Werte annehmen

	Mögliche Zahlenkombinationen der ersten beiden Ringe											
E3	10				22				47			
E6	10	15	22	33	47	68						
E12	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82

3. Transistorgrundschaltungen

Es gibt drei verschiedene Transistorgrundschaltungen bei Bipolartransistoren, die nachfolgend in Abbildung 4 dargestellt sind.

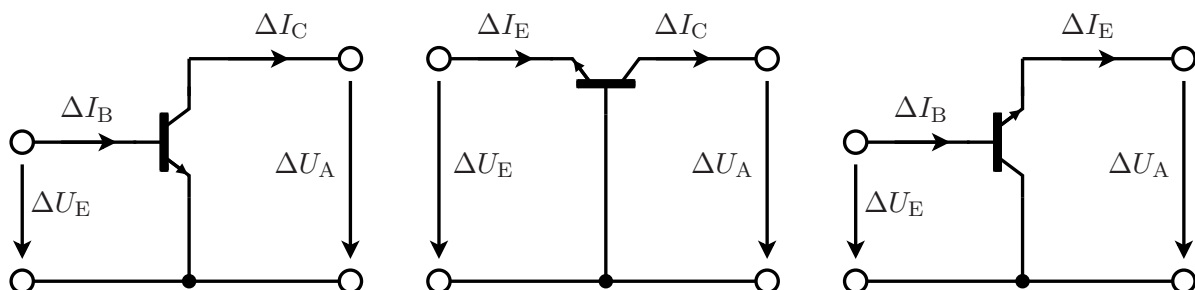


Abbildung 4: Von links nach rechts: Emitterschaltung, Basisschaltung, Kollektorschaltung

Die Namen der Grundschaltungen sind so gewählt, dass der Anschluss des Transistors, welcher gemeinsam mit Eingang und Ausgang der Schaltung verbunden ist, den Namen der Schaltung vorgibt. Die drei Grundschaltungen in Abbildung 4 funktionieren zwar alle nach dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Prinzip, dass ein kleines Steuersignal einen großen Laststrom steuert, sind jedoch grundlegend anders aufgebaut und unterscheiden sich erheblich voneinander durch die in Tabelle 3 angegebenen Eigenschaften.

Tabelle 3: Eigenschaften der Transistorgrundschaltungen aus Abbildung 4

Schaltung	Emitterschaltung	Basisschaltung	Kollektorschaltung
Eingangswiderstand	100 Ω – 10 kΩ	10 Ω – 100 Ω	10 kΩ – 100 kΩ
Ausgangswiderstand	1 kΩ – 10 kΩ	10 kΩ – 100 kΩ	10 Ω – 100 Ω
Spannungsverstärkung	20 – 100	100 – 1000	≤ 1
Gleichstromverstärkung	10 – 50	≤ 1	10 – 4000
Leistungsverstärkung	sehr groß	mittel	klein
Grenzfrequenz	niedrig	hoch	niedrig
Ausgangssignal	invertiert	nicht invertiert	nicht invertiert
Anwendung	Leistungsverstärker bei niedrigen Frequenzen, Schalter	Verstärker bei hohen Frequenzen	Impedanzwandler

3.1. Nichtlineares Verhalten

Bevor wir detaillierter auf die drei Grundschaltungen aus Abbildung 4 eingehen, muss uns bewusst werden, dass ein wesentliches Merkmal von Transistoren oder Dioden ihr nichtlineares Verhalten ist. Das heißt, dass z.B. der Strom durch eine Diode nicht mehr proportional zur angelegten Spannung ist. Es gilt somit weder das Ohmsche Gesetz $U \sim I$ noch das Superpositionsprinzip. Bei einem Verstärker ist jedoch in der Regel nichtlineares Verhalten unerwünscht, da dadurch neue Frequenzanteile entstehen, die im ursprünglichen Signal nicht enthalten sind. Man spricht dann von nichtlinearen Verzerrungen, wie z.B. Klirr- und Intermodulationsprodukte. Deshalb wird versucht, durch bestimmte Maßnahmen ein möglichst lineares Verhalten zu erreichen. Eine Möglichkeit besteht darin, daß man den Transistor in einem bestimmten Bereich der Kennlinie betreibt und die Aussteuerung durch das Nutzsignal sehr gering hält. Diesen Punkt bezeichnet man als Arbeitspunkt. Um diesen Punkt herum kann nun der Transistor in Näherung als lineares Bauelement betrachtet werden mit dem differentiellen Widerstand

$$r_D = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{AP}$$

Der differentielle Widerstand stellt quasi die Tangente einer Widerstandskennlinie in einem bestimmten Arbeitspunkt AP dar. Somit hängt der Wert von r_D vom gewählten Arbeitspunkt ab, weshalb dieser möglichst stabil gehalten werden soll. In gleicher Weise werden die Verstärkungsfaktoren betrachtet - ein näherungsweise linearer Zusammenhang besteht immer nur in einem festgelegten Arbeitspunkt. Aus diesem Grund sind in Abbildung 4 statt I und U die Bezeichnungen ΔI und ΔU gewählt worden. Denn die Ströme eines NPN-Transistors fließen, wie in Abbildung 1 ersichtlich, immer aus dem Emitter hinaus, der Emitterstrom I_E kann nicht negativ werden. Der differentielle Strom ΔI hingegen kann beide Vorzeichen aufweisen, da er sich immer auf eine Stromänderung im Arbeitspunkt bezieht. Bei den Spannungen verhält es sich analog. Nur unter diesen Voraussetzungen dürfen wir die Transistorschaltung mit einfachen Mitteln berechnen.

3.2. Emitterschaltung

Im niederfrequenten Bereich wird häufig die Emitterschaltung als universale Verstärkerschaltung zur Leistungsverstärkung verwendet. Sie hat den Vorteil, dass sie eine große Stromverstärkung $\Delta I_C / \Delta I_B$, eine große Spannungsverstärkung $\Delta U_A / \Delta U_E$ und somit eine sehr große Leistungsverstärkung besitzt. Die Emitterschaltung weist je nach Dimensionierung einen mittleren bis hohen Eingangswiderstand $\Delta U_E / \Delta I_B$ und Ausgangswiderstand $\Delta U_A / \Delta I_C$ auf. Wird ein niederohmiger Ausgang benötigt, kann dies durch eine nachfolgende Kollektorschaltung mit einem zur Emitterschaltung passenden, hohen Eingangswiderstand aber einem geringen Ausgangswiderstand erreicht werden. Man nennt diese Kollektorschaltung dann Emitterfolger. Ein großer Nachteil der Emitterschaltung ist, dass mit zunehmender Frequenz die Verstärkung schnell geringer wird, d.h. die Schaltung besitzt eine geringe Grenzfrequenz. Weiterhin wird nur bei dieser Schaltung die Ausgangsspannung invertiert.

3.3. Basisschaltung

Eine Schaltung, die den Nachteil der niedrigen Grenzfrequenz nicht hat, ist die Basisschaltung. Sie besitzt eine wesentlich höhere Grenzfrequenz. Allerdings ist die Stromverstärkung $\Delta I_C / \Delta I_E$ der Basisschaltung kleiner als eins. Die Spannungsverstärkung $\Delta U_A / \Delta U_E$ ist groß, falls man einen hochohmigen Lastwiderstand verwendet. Daraus ergibt sich eine mittlere bis große Leistungsverstärkung. Der Eingangswiderstand $\Delta U_E / \Delta I_E$ ist klein, der Ausgangswiderstand $\Delta U_A / \Delta I_C$ sehr groß. Diese Schaltung wird überall dort verwendet, wo es auf eine möglichst hohe Grenzfrequenz und nicht so sehr auf eine hohe Ausgangsleistung ankommt.

3.4. Kollektorschaltung

Als letztes bleibt noch die Kollektorschaltung, welche meist als Impedanzwandler eingesetzt wird, da sie einen kleinen Ausgangswiderstand $\Delta U_A / \Delta I_E$ und einen großen Eingangswiderstand $\Delta U_E / \Delta I_B$ besitzt. Die Stromverstärkung $\Delta I_E / \Delta I_B$ ist groß, jedoch ist die Spannungsverstärkung kleiner als eins, was nur eine geringe Leistungsverstärkung ermöglicht. Die Grenzfrequenz bewegt sich in der gleichen Größenordnung wie bei der Emitterschaltung.

4. Vorverstärker

Für diesen Versuch eignet sich als Vorverstärker am besten die Emitterschaltung, denn diese hat gleichzeitig eine hohe Spannungs- und Stromverstärkung und ihr Eingangswiderstand ist nicht zu gering. Allerdings ist der Ausgangswiderstand der Emitterschaltung zu hoch, um damit zum Beispiel einen Kopfhörer betreiben zu können.

4.1. Arbeitspunkteinstellung

Erinnern wir uns an das Schleusenmodell in Abbildung 1. Dort kann das Wasser zwischen Basis und Emitter nur in eine Richtung fließen. Ähnlich verhält es sich bei dem für den Versuch verwendeten Transistor, welcher nur einen Strom von der Basis zum Emitter verstärken kann. In der Emitterschaltung in Abbildung 5 gelangt die zu verstärkende Spannung, welche zum Beispiel von dem im Versuch verwendeten Funktionsgenerator oder dem Fototransistor erzeugt wird, an die Basis des Transistors T_1 . Wenn dieses Signal jedoch eine reine Wechselspannung ist, kann der Strom nicht immer von der Basis zum Emitter fließen. Mit dieser Schaltung ist es daher nicht ohne weiteres möglich, eine reine Wechselspannung zu verstärken. Wenn wir aber wie in Abschnitt 2.2 beschrieben mit Hilfe eines Kondensators am Eingang der Schaltung aus der reinen Wechselspannung eine Wechselspannung mit einstellbarem Gleichanteil erzeugen können, der groß genug ist, wird der Strom immer von der Basis zum Emitter fließen. Der Strom I_B , welcher ohne Eingangssignal in die Basis hinein fließt, kann über die Widerstände R_1 und R_2 in Abbildung 5 eingestellt werden. Wie groß der Basisstrom gewählt werden muss wird im folgenden Abschnitt erklärt.

In Abbildung 5 sehen wir die Arbeitspunkteinstellung einer Emitterschaltung. Der Spannungsteiler aus R_1 und R_2 bestimmt den Basisstrom des Transistors T_1 . Für unseren Fall soll er so gewählt werden, dass die Spannung am Kollektor $U_A = 4\text{ V}$ beträgt. Die im Versuch verwendete Betriebsspannung U_B der Schaltung wird zu $U_B = 9\text{ V}$ gewählt.

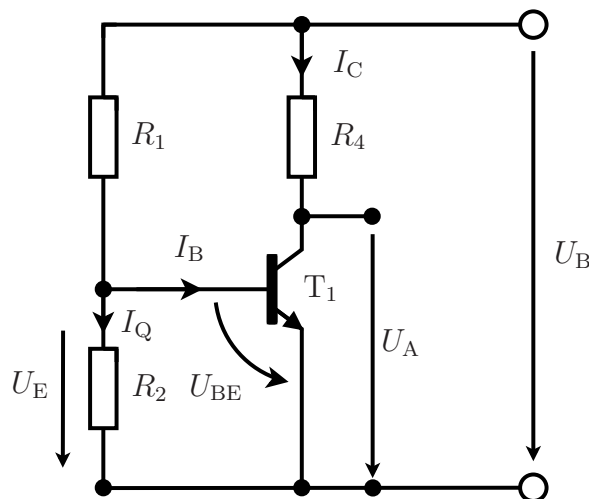


Abbildung 5: Emitterschaltung mit Arbeitspunkteinstellung

Bei festgelegter Kollektorspannung U_A bestimmt somit R_4 den Kollektorstrom I_C im gewählten Arbeitspunkt. Je niedriger er ist, desto mehr Basisstrom ist nötig, um eine fest gewählte Ausgangsspannung U_A zu erhalten. Um die Werte für den Spannungsteiler an der Basis bestehend aus R_1 und R_2 richtig wählen zu können, müssen wir wissen, welcher Basisstrom I_B notwendig ist, um den oben gewählten Kollektorstrom I_C zu erhalten. Den Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom entnehmen wir entweder der Transistorkennlinie

oder wir berechnen den Basisstrom aus dem Quotienten aus Kollektorstrom und Stromverstärkungsfaktor. Die Spannung U_{BE} zwischen Basis und Emitter beträgt auf Grund des pn-Übergangs im Transistor bei Zimmertemperatur etwa 0,6 V und kann aus dem Datenblatt des Transistors abgelesen werden. Die Widerstände R_1 und R_2 werden so gewählt, dass der Querstrom I_Q durch R_2 drei bis zehnmal größer ist als der Basisstrom I_B . Die Gesamtverstärkung der Schaltung ergibt sich unter anderem aus der Stromverstärkung des Transistors, welche von Einflüssen wie Alter und Umgebungstemperatur abhängt und eine große Toleranz aufweist. Die Bauteilewerte der Schaltung in Abbildung 5 müssen daher sehr genau gewählt werden und die Schaltung wird nur unter bestimmten Bedingungen einwandfrei funktionieren.

Wie man die Abhängigkeit der Gesamtverstärkung der Schaltung von der Stromverstärkung des Transistors verringern kann, wird in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben.

4.2. Spannungsgegenkopplung

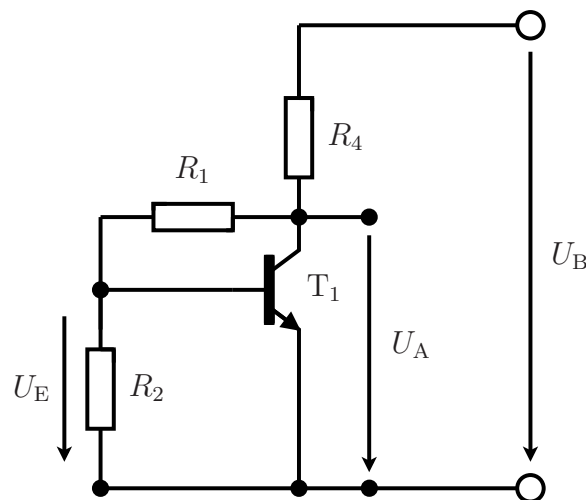


Abbildung 6: Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung

Bei der Spannungsgegenkopplung wird der Spannungsteiler bestehend aus R_1 und R_2 nicht an die Versorgungsspannung U_B angeschlossen, sondern wie in Abbildung 6 dargestellt über den Kollektorwiderstand R_4 versorgt. Werden die Widerstandswerte so gewählt, dass sich wie oben ohne Eingangssignal eine Ausgangsspannung von $U_A = 4\text{ V}$ ergibt, liegt das eine Ende des Spannungsteilers ebenfalls an $U_A = 4\text{ V}$. Erhöht sich nun die Temperatur des Transistors, so fließt ein größerer Strom durch den Kollektor. Daraufhin sinkt aber die Spannung am Kollektor, und mit ihr auch die Spannung an R_1 . Folglich sinkt der Basisstrom und somit auch der Kollektorstrom. Auf diese Weise lässt sich der Arbeitspunkt der Schaltung stabilisieren. Gleichzeitig hängt die Gesamtverstärkung nur wenig vom Stromverstärkungsfaktor des Transistors ab, sondern lässt sich durch die Wahl des Widerstandes R_1 einstellen.

4.3. Stromgegenkopplung

Eine weitere Stabilisierungsschaltung, die als Stromgegenkopplung bezeichnet wird, ist in Abbildung 7 dargestellt. Bei dieser Schaltung wird der Emittor des Transistors nicht direkt auf Masse gelegt, sondern über einen Widerstand R_3 . Steigt nun durch äußere Einflüsse, wie z.B. Temperaturänderungen der Strom durch den Emittor an, steigt auch die Spannung U_{R_3} am Emittorwiderstand R_3 . Dadurch sinkt die Spannung zwischen Basis und Emittor ab und der Strom am Kollektor und damit auch der am Emittor wird geringer.

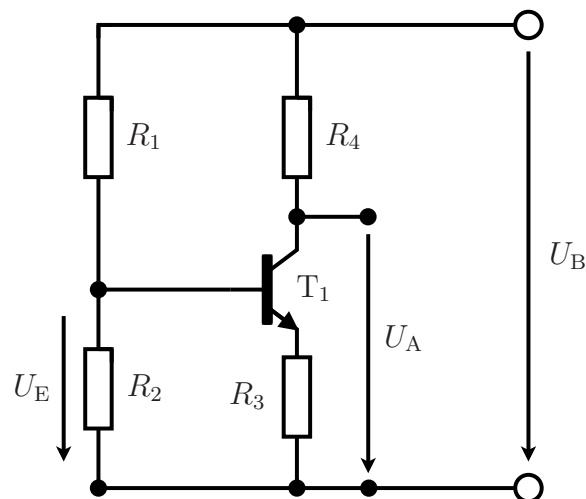


Abbildung 7: Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

4.4. Kleinsignalverstärker

Natürlich ist es langweilig, eine Schaltung zu entwerfen, die lediglich den Arbeitspunkt stabil hält, jedoch kein Signal verstärkt. Das Eingangssignal u_1 überlagern wir deshalb der am Basisanschluss durch R_1 und R_2 eingestellten Vorspannung. Dadurch darf jedoch der Arbeitspunkt des Transistors nicht verändert werden. Dazu wird am Eingang und am Ausgang der Transistorschaltung ein Kondensator C_2 und C_4 eingefügt. Diese verhalten sich für die Wechsellspannungsanteile des Eingangssignals u_1 und des Ausgangssignals u_2 des Transistors am Kollektor wie ein Kurzschluss. Für unseren Verstärker wählen wir die Schaltung mit Stromgegenkopplung über einen Emittorwiderstand aus Abbildung 7. Durch den Emittorwiderstand sinkt die Verstärkung der Schaltung jedoch nicht nur für Gleichanteile, sondern auch für die am Eingang anliegende Wechsellspannung. Um dies zu verhindern, schalten wir parallel zum Emittorwiderstand einen Kondensator C_3 , der für den Wechselanteil der Spannung am Emittor ebenfalls einen Kurzschluss darstellt. Somit bleibt die maximal mögliche Verstärkung für den Wechselanteil erhalten, während der Arbeitspunkt der Schaltung dennoch stabilisiert wird. Mit den zusätzlichen Bauelementen ergibt sich die in Abbildung 8 dargestellte Schaltung unseres Kleinsignalverstärkers.

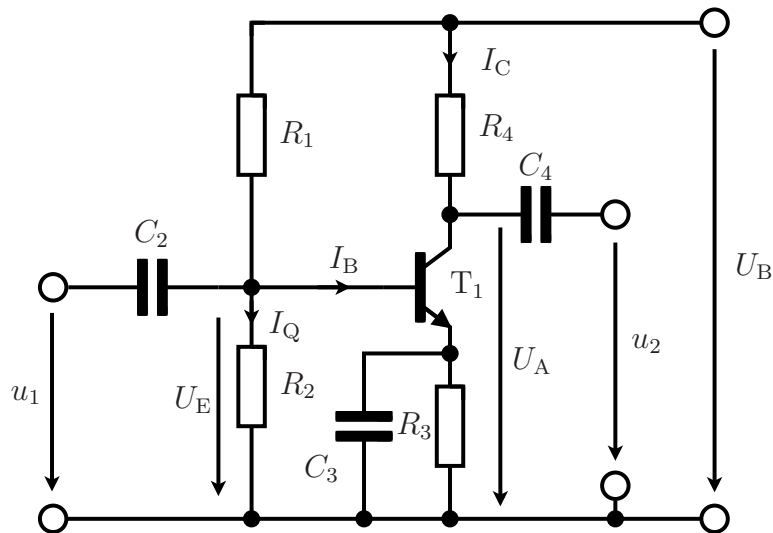


Abbildung 8: Schaltung des Kleinsignalverstärkers

5. Ausgangsverstärker

5.1. Ausgangswiderstand

Wie in Tabelle 3 angegeben, ist der Ausgangswiderstand der Emitterschaltung sehr groß und liegt bei einigen Kiloohm. Möchten wir jedoch einen Kopfhörer an unserem Verstärker betreiben, der nur einen Widerstand von einigen zehn Ohm hat, so müssen wir den Ausgangswiderstand unseres Verstärkers verringern.

5.2. Impedanzwandler

Der Ausgangswiderstand einer Schaltung lässt sich durch einen sogenannten Impedanzwandler verändern. Diese Schaltung verstärkt ein Eingangssignal mit einer Spannungsverstärkung $\Delta U_A / \Delta U_E \approx 1$. Nun könnte man meinen, dadurch nichts gewonnen zu haben. Falsch! Wird der Impedanzwandler so beschaltet, dass sein Ausgangswiderstand gering ist, so können wir einen Verbraucher mit einem geringen Innenwiderstand betreiben. Mit einer solchen Schaltung ist es möglich, zum Beispiel einen Kopfhörer an unseren Verstärker anzuschließen.

5.3. Kollektorschaltung für mehr Strom

In Abbildung 9 sehen wir einen Transistorverstärker in Kollektorschaltung. Prinzipiell unterscheidet diesen von der Emitterschaltung wenig, außer dass der Widerstand am Kollektor entfällt. Der Arbeitspunkt dieser Schaltung regelt sich von selbst, da ein Emitterwiderstand R_7 vorhanden ist. Die Spannung zwischen Basis und Emitter des verwendeten Transistors

beträgt etwa $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$. Daher ist die Ausgangsspannung fast identisch zur Eingangsspannung, und der Arbeitspunkt kann sich durch äußere Einflüsse wie Temperatur oder Alterung kaum verändern. Der Spannungsteiler bestehend aus R_5 und R_6 wird so eingestellt, dass die Spannung am Emitter $U_A = U_B/2 = 4,5 \text{ V}$ beträgt. Der Wechselspannungsanteil u_2 am Ausgang des Vorverstärkers wird über C_4 auf die Basis des Transistors T_2 eingekoppelt und durch die Kollektorschaltung verstärkt. Da die Kollektorschaltung zur Impedanzwandlung meist der Emitterschaltung folgt, nennt man diese auch Emitterfolger.

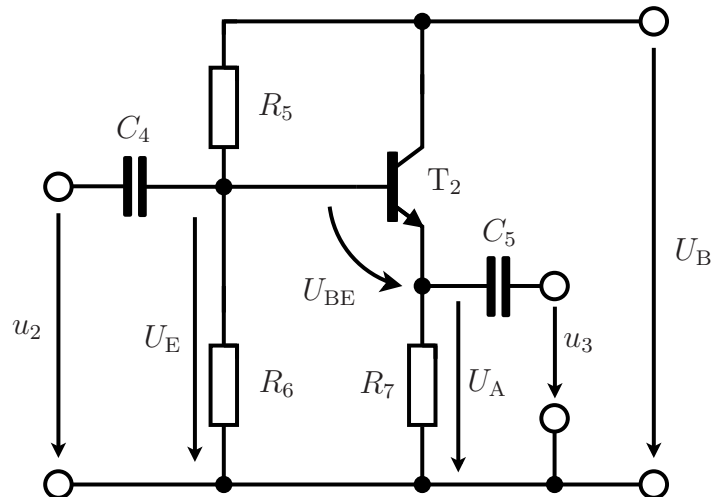


Abbildung 9: Kollektorschaltung

6. Vorbereitungsfragen

Bitte bearbeiten Sie die nachfolgenden Aufgaben und bringen Sie Ihre Ergebnisse zur Versuchsdurchführung mit. Die nachfolgenden Vorbereitungsfragen beziehen sich auf die Emitterschaltung aus Abbildung 5.

Aufgabe 1:

Für die Emitterschaltung wird ein Kollektorwiderstand mit $R_4 = 3,3 \text{ k}\Omega$ vorgegeben. Die Spannung U_A soll $U_A = 4 \text{ V}$ betragen, wenn am Eingang kein Signal anliegt. Die Betriebsspannung der Schaltung beträgt $U_B = 9 \text{ V}$.

Berechnen Sie den Kollektorstrom I_C . Lesen Sie aus Abbildung 3 des Transistordatenblatts im Anhang die ungefähre Gleichstromverstärkung h_{FE} für den oben berechneten Wert von I_C ab. Nehmen Sie dabei für $U_{CE} = 5 \text{ V}$ an.

Aufgabe 2:

Bestimmen Sie aus dem Kollektorstrom I_C und der Gleichstromverstärkung h_{FE} mit Gleichung 1 den Basisstrom I_B .

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B \quad (1)$$

Bestimmen Sie den Querstrom I_Q durch den Widerstand R_2 , wenn I_Q das zehnfache des Basisstroms I_B betragen soll. Wie groß ist der Strom durch den Widerstand R_1 ? Geben Sie diesen als Funktion von I_B und I_Q an.

Aufgabe 3:

An der Basis des Transistors T_1 sollen 0,6 V anliegen. Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Ströme durch R_1 und R_2 die notwendigen Widerstandswerte für die oben angegebene Basisspannung.

Aufgabe 4:

Wählen Sie unter Verwendung der in Tabelle 2 angegebenen Werte für R_1 einen Wert aus der E12-Reihe aus, welcher möglichst wenig von dem berechneten Wert abweicht. Geben Sie für die Widerstände R_1 , $R_3 = 330 \Omega$ und R_4 in der Schaltung die zugehörige Kombination der Farbringe nach Tabelle 1 an!

Aufgabe 5:

Welche Funktion besitzt der Kondensator C_3 in Abbildung 8?

Aufgabe 6:

Der Kondensator C_4 soll bei einer Frequenz von $f = 100 \text{ Hz}$ einen Blindwiderstand kleiner als $X_C = 200 \Omega$ besitzen. Berechnen Sie mit der Gleichung 2 die benötigte Kapazität des Kondensators. Kondensatoren werden ähnlich wie Widerstände nur mit bestimmten Kapazitätswerten hergestellt. Zum oben berechneten Wert X_C gibt es keinen passenden Kondensator. Würden Sie einen Kondensator mit einem größeren oder kleineren Wert wählen? Begründen Sie Ihre Antwort.

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (2)$$

Aufgabe 7:

Die Spannung am Widerstand $R_7 = 220 \Omega$ der Kollektorschaltung in Abbildung 9 betrage $4,5 \text{ V}$, wenn kein Signal am Eingang der Schaltung anliegt. Welche Verlustleistung P_{T_2} entsteht im Transistor T_2 , wenn zur Vereinfachung angenommen wird, dass $I_E \approx I_C$ ist. Zeigen Sie unter Verwendung des Datenblattes im Anhang, dass der Kollektorstrom I_C und die Verlustleistung P_{T_2} des Transistors T_2 nicht die maximal zulässigen Werte überschreiten.

7. Versuchsdurchführung

7.1. Arbeitspunkteinstellung

Aufgabe 1: Aufbau der Emitterschaltung

Bauen Sie nur die Emitterschaltung um T_1 nach Abbildung 8 auf. Bestücken Sie nur die nachfolgend angegebenen Bauteile:

- Steckbrücken: JP_1 bis JP_4
- Messpunkte: MP_1 bis MP_5
- vier Stromversorgungsklemmen
- Widerstände: R_1, R_2, R_3, R_4
- Kopfhörerbuchse
- Kondensatoren: C_1
- Transistoren: T_1

Um die Stromgegenkopplung des Transistors T_1 kurzzuschließen, überbrücken Sie vorerst den Widerstand R_3 mit der Drahtbrücke JP_3 . Ebenso werden die Brücken JP_1 geschlossen und JP_2 geöffnet, um die Spannungsgegenkopplung auszuschalten. Die Drahtbrücke JP_4 kann offen oder geschlossen sein.

Aufgabe 2: Arbeitspunkteinstellung

Schließen Sie das für eine Strommessung eingestellte Multimeter an die Messpunkte MP_3 an. Stellen Sie die Versorgungsspannung des Netzgerätes auf 9 V ein und schließen Sie die Schaltung an. Stellen Sie den Arbeitspunkt der Emitterschaltung so ein, dass am Kollektor von T_1 (MP_4) etwa 4 V anliegen. Verwenden Sie zur Spannungsmessung das Oszilloskop. Berechnen Sie den Kollektorstrom I_C aus der am Widerstand R_4 anliegenden Spannung und messen Sie den Basisstrom I_B . Bestimmen Sie aus den Messergebnissen die Gleichstromverstärkung $B = I_C/I_B$ des Transistors.

Erwärmen Sie den Transistor, indem Sie die Spitze des LötKolbens in die Nähe des Transistorgehäuses bringen und beobachten Sie die Kollektorspannung. Was könnte der Grund für die Spannungsänderung sein?

Aufgabe 3: Stabilisierung durch Spannungsgegenkopplung

Nehmen Sie die Spannungsgegenkopplung in Betrieb, indem Sie die Steckbrücke von JP_1 auf JP_2 umstecken. Stellen Sie den Arbeitspunkt der Emitterschaltung erneut so ein, dass am Kollektor von T_1 etwa 4 V anliegen. Erwärmen Sie den Transistor mit dem LötKolben und beobachten Sie die Kollektorspannung. Was ändert sich im Vergleich zu Aufgabe 2?

Aufgabe 4: Stabilisierung durch Stromgegenkopplung

Entfernen Sie die Spannungsgegenkopplung, indem Sie die Brücke von JP_2 nach JP_1 umstecken. Schalten Sie den Emitterwiderstand R_3 für die Stromgegenkopplung hinzu, indem Sie die Brücke JP_3 entfernen. Stellen Sie erneut den Arbeitspunkt so ein, dass am Kollektor von T_1 etwa 4 V anliegen. Bleibt der Arbeitspunkt der Schaltung jetzt bei einer Temperaturerhöhung stabil?

7.2. Wechselstrombetrieb

Vorbereitung

Entfernen Sie das Amperemeter und schließen Sie die Messbrücke MP_3 kurz.

Verbinden Sie für die folgenden Versuche den Ausgang des Funktionsgenerators mit dem ersten Eingang des Oszilloskops und dem Eingang MP_1 der Schaltung. Verwenden Sie für die nachfolgenden Messungen den zweiten Eingang des Oszilloskops. Da jetzt gleichzeitig Ein- und Ausgangssignal des Verstärkers auf dem Bildschirm des Oszilloskops betrachtet werden können, lassen sich die beiden Signale besonders leicht vergleichen.

Stellen Sie den Funktionsgenerator auf eine Sinusspannung mit einer Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ ein.

Aufgabe 5: Kleinsignalverstärkung mit Gegenkopplung

Erweitern Sie nun die Schaltung um die beiden Koppelkondensatoren C_2 und C_5 , welche den Gleichstromanteil der Emitterschaltung vom Ein- und Ausgang abblocken. Überbrücken Sie mit der Drahtbrücke JP_4 die Kollektorschaltung. Stellen Sie am Funktionsgenerator einen Spitze-Spitze-Wert von 10 mV an MP_1 ein und betrachten Sie das Ausgangssignal am Messpunkt MP_5 der Schaltung auf dem Oszilloskop.

Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung der Schaltung $v = \hat{U}_{MP_5} / \hat{U}_{MP_1}$.

Aufgabe 6: Kleinsignalverstärkung ohne Gegenkopplung

Eliminieren Sie die Stromgegenkopplung für das Wechselstromsignal, indem Sie parallel zum Widerstand R_3 die Kapazität C_3 einlöten.

Bestimmen Sie erneut die Spannungsverstärkung v .

Aufgabe 7: Ausgangsimpedanz der Emitterschaltung

Stellen Sie die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators so ein, dass an MP₅ ein Spitze-Spitze-Wert von 1,0 V anliegt. Vergleichen Sie das Signal vor und nach Einstecken des Kopfhörers. Erklären Sie den Unterschied.

Aufgabe 8: Kollektorschaltung

Nehmen Sie die Kollektorschaltung in Betrieb, indem Sie die Drahtbrücke JP₄ entfernen und den Transistor T₂, die Widerstände R_5 bis R_7 und die Kondensatoren C_4 und C_6 einlöten. Der Kondensator C_6 verringert die Grenzfrequenz und verhindert so bei hohen Frequenzen ein Schwingen der Schaltung. Führen Sie erneut Aufgabe 7 durch. Was hat sich jetzt geändert?

Aufgabe 9: Frequenzgang

Stellen Sie mit dem Funktionsgenerator bei ausgestecktem Kopfhörer wiederum eine Spannung von 1 Volt Spitze-Spitze an MP₅ ein und verändern Sie die Frequenz von 10 Hz bis 10 MHz. Beobachten Sie dabei die Spannungsverstärkung v der Schaltung. Warum sinkt die Verstärkung für sehr niedrige und hohe Frequenzen?

Ermitteln Sie den Übertragungsbereich der Schaltung, der den Bereich des Frequenzgangs umfasst, der zwischen unterer und oberer 3-dB-Grenzfrequenz liegt. Die 3-dB-Grenzfrequenz ist diejenige Frequenz, bei der die Ausgangsleistung um 50 % eingebrochen ist beziehungsweise die Spannungsverstärkung v auf das $1/\sqrt{2}$ -fache seines Maximums abgefallen ist.

Aufgabe 10: Betrieb als Infrarotempfänger

Löten Sie die Widerstände R_8 , R_9 sowie den Fototransistor PT in die Schaltung ein. Dabei ist der längere Anschlussdraht des Fototransistors in Richtung Masse einzulöten. Nehmen Sie den Infrarotsender in Betrieb und richten Sie den Fototransistor auf die Infrarotdiode des Senders aus. Sie können das durch die Schaltung verstärkte Signal am Messpunkt MP₅ messen und am Kopfhörer hören.

Halten Sie den Empfänger in das Licht einer Leuchtstofflampe. Beträgt die Frequenz des Brummens 50 Hz oder 100 Hz? Begründen Sie die Antwort.

Betrachten Sie das Signal einer Fernbedienung auf dem Oszilloskop.

A. Anhang

A.1. Bauteileliste

Tabelle 4: Bauteileliste des Praktikumsversuchs

Bauteil	Bezeichnung	Wert
R_1	Widerstand	100 k Ω
R_2	Potentiometer	25 k Ω
R_3	Widerstand	330 Ω
R_4	Widerstand	3,3 k Ω
R_5	Widerstand	8,2 k Ω
R_6	Widerstand	10 k Ω
R_7	Widerstand	220 Ω
R_8	Widerstand	2,2 k Ω
R_9	Widerstand	10 k Ω
C_1	Kondensator	220 μ F
C_2	Kondensator	470 nF
C_3	Kondensator	220 μ F
C_4	Kondensator	10 μ F
C_5	Kondensator	100 μ F
C_6	Kondensator	100 pF
T_1	Transistor	BC 548 B
T_2	Transistor	BC 548 B
PT	Fototransistor	SFH 309
Buchse	Klinkenbuchse 3,5 mm	
-	9 Volt Batterieclip	
JP ₁ bis JP ₄	Drahtbrücken	
MP ₁ bis MP ₅	Messpunkte	
-	Stromversorgungsklemmen	

A.2. Schalt- und Bestückungsplan

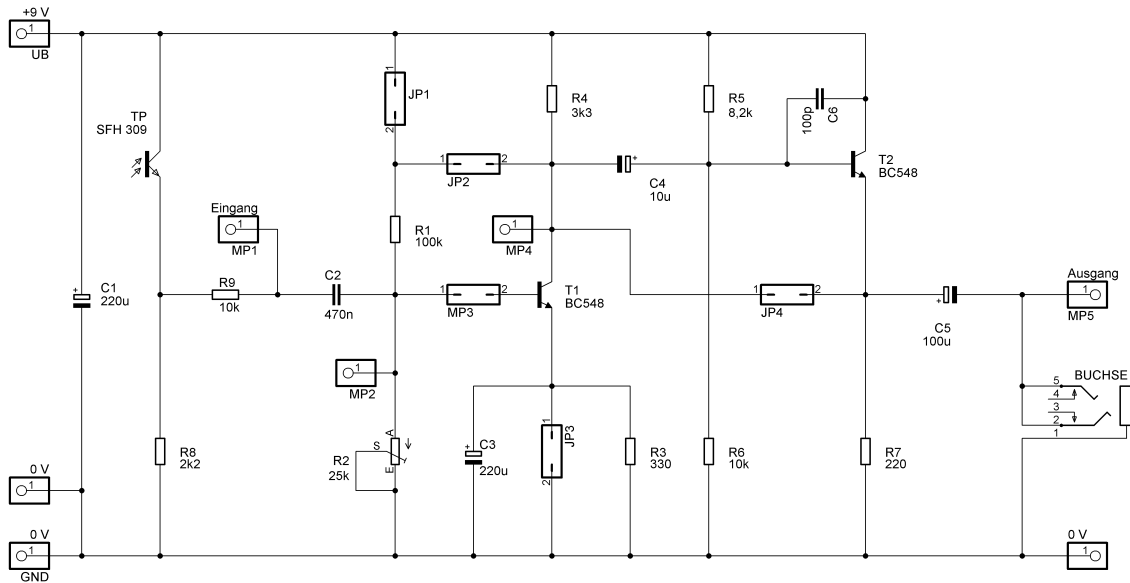


Abbildung 10: Schaltplan des Praktikumsversuchs

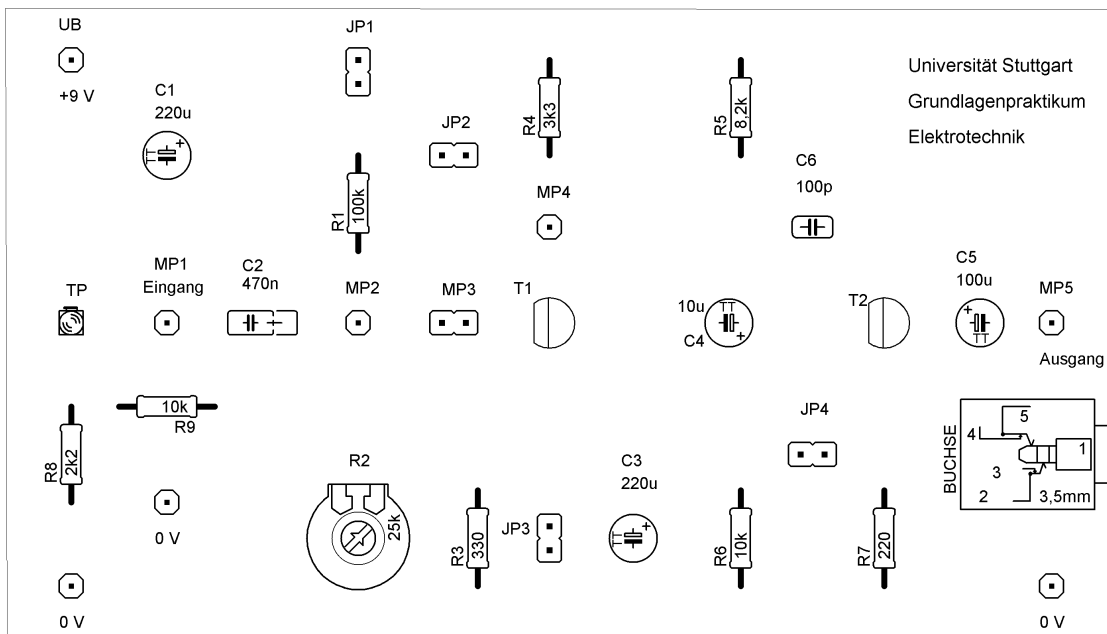


Abbildung 11: Bestückungsplan der Platine

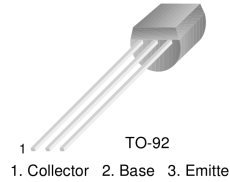
A.3. Datenblatt des Transistors BC547

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

BC546/547/548/549/550

Switching and Applications

- High Voltage: BC546, $V_{CE0}=65V$
- Low Noise: BC549, BC550
- Complement to BC556 ... BC560



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BC546	80	V
	: BC547/550	50	V
	: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BC546	65	V
	: BC547/550	45	V
	: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage : BC546/547	6	V
	: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ C$

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units	
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30V, I_E=0$			15	nA	
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	110		800		
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		90	250	mV	
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		200	600	mV	
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		700		mV	
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		900		mV	
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	580	660	700	mV	
		$V_{CE}=5V, I_C=10mA$			720	mV	
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5V, I_C=10mA, f=100MHz$		300		MHz	
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB}=10V, I_E=0, f=1MHz$		3.5	6	pF	
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB}=0.5V, I_C=0, f=1MHz$		9		pF	
NF	Noise Figure	: BC546/547/548	$V_{CE}=5V, I_C=200\mu A$		2	10	dB
		: BC549/550	$f=1KHz, R_G=2K\Omega$		1.2	4	dB
		: BC549	$V_{CE}=5V, I_C=200\mu A$		1.4	4	dB
		: BC550	$R_G=2K\Omega, f=30\sim 15000MHz$		1.4	3	dB

h_{FE} Classification

Classification	A	B	C
h_{FE}	110 ~ 220	200 ~ 450	420 ~ 800

Typical Characteristics

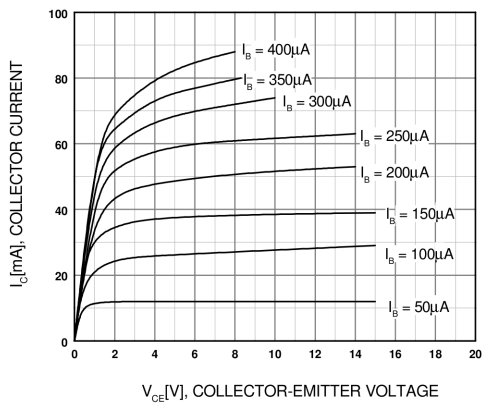


Figure 1. Static Characteristic

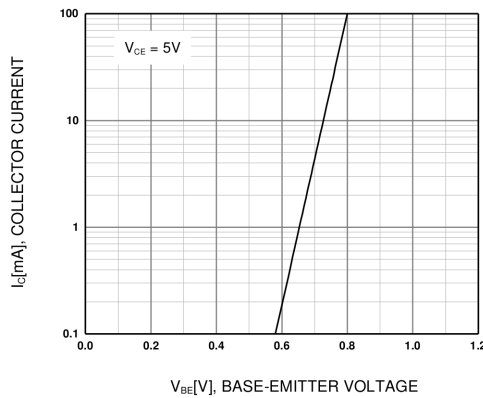


Figure 2. Transfer Characteristic

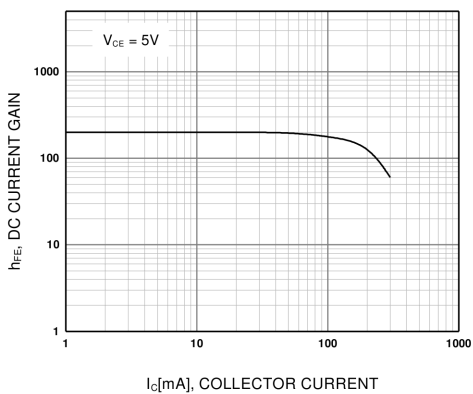


Figure 3. DC current Gain

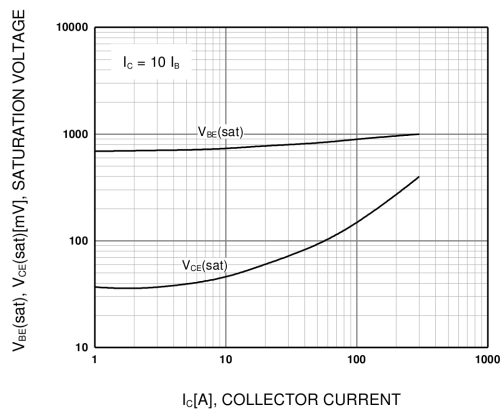


Figure 4. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

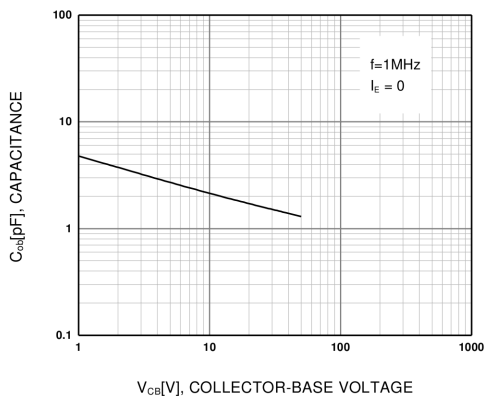


Figure 5. Output Capacitance

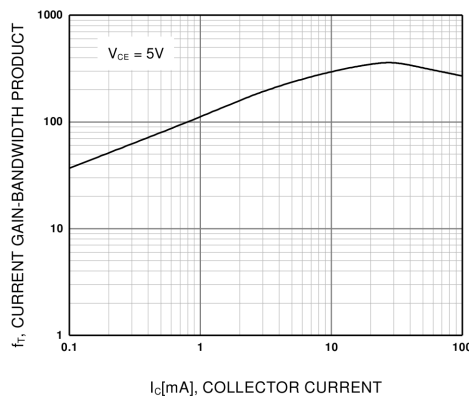
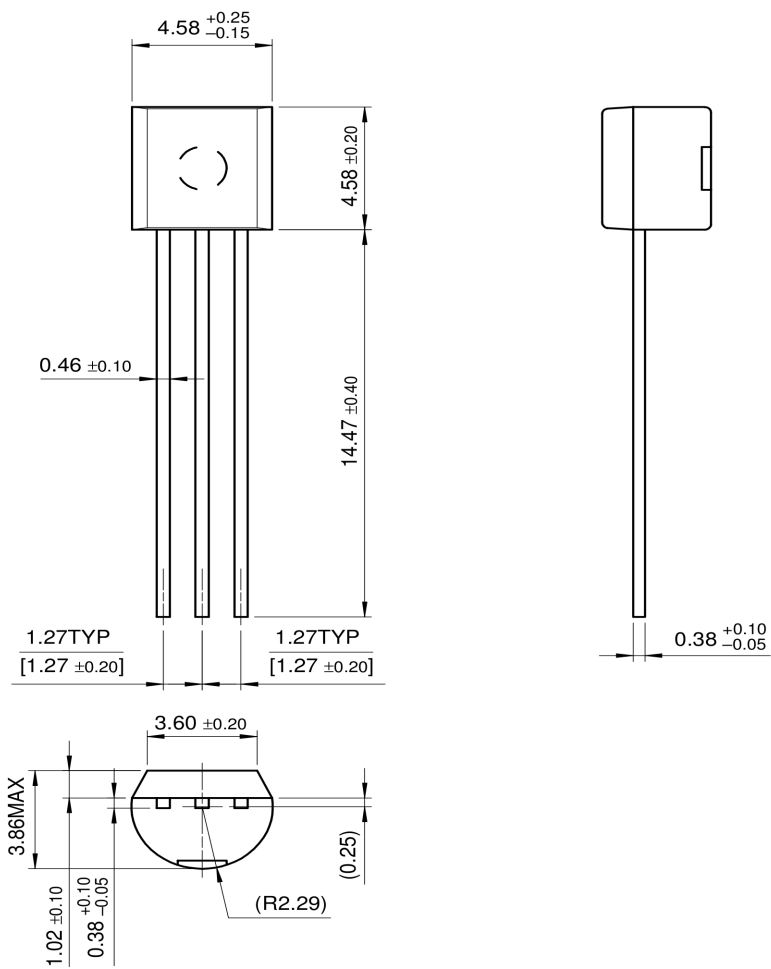


Figure 6. Current Gain Bandwidth Product

Package Dimensions

TO-92



Dimensions in Millimeters

BC546/547/548/549/550

A.4. Wegbeschreibung zur Versuchsdurchführung

Versuchsdurchführung am Institut für Hochfrequenztechnik

Der Versuch findet im Raum 3.275 "Grundlagenpraktikum" des Instituts für Hochfrequenztechnik statt. Dieser Raum befindet sich im 3. Stock des Gebäudes Pfaffenwaldring 47.

Versuchsdurchführung am Institut für Nachrichtenübertragung

Der Versuch findet im Raum 2.310 "Praktikum Übertragungstechnik" des Instituts für Nachrichtenübertragung statt. Dieser Raum befindet sich im 2. Stock des Gebäudes Pfaffenwaldring 47, unmittelbar hinter der Durchgangstür mit der Aufschrift "Elektrotechnische Institute 2" am Übergang vom älteren in den neueren Gebäudeteil.

Versuchsdurchführung am Institut für Großflächige Mikroelektronik

Die Versuchsdurchführung findet direkt am Institut für Großflächige Mikroelektronik statt. Verwenden Sie den Lageplan zur besseren Orientierung. Die Adresse lautet Allmandring 3b. Da die Türen des Labors aus Sicherheitsgründen immer abgeschlossen sind, melden Sie sich im Sekretariat (Tel.: 66922) wenn Sie ankommen. Ein Hausteleson befindet sich am Eingang.

