

Versuch 62: Transistorverstärker

Physikalisches Institut

Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg

Physiklabor für Anfänger*innen

eingereicht von:



Gruppe 14 & 15
Datum: 19.03.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung	3
1.1	Ziel des Versuchs	3
1.2	Physikalische Grundlagen	3
1.3	Versuchsaufbau	5
1.4	Versuchsdurchführung	6
2	Auswertung	8
2.1	Verstärker, Grundsaltung und Charakterisierung	8
2.2	Verstärkung und Grenzen des Verstärkers	10
2.3	Einfluss des Arbeitswiderstandes	13
2.4	Regenerierung der Signalverstärkung	14
3	Zusammenfassung und Diskussion	15
4	Abbildungen	18
5	Tabellen	18
6	Literatur	18
7	Anhang	19
7.1	Messdaten	19

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Ziel des Versuchs

Mittels eines Transistors in Emitterschaltung soll das Verstärkungsverhalten des Transistors und der Einfluss einzelner Komponenten in der Emitterschaltung auf das Ausgangssignal untersucht werden.

1.2 Physikalische Grundlagen

Grundschaltung und Arbeitsbereich

Um einen Transistor als Verstärker zu benutzen, gibt es drei Arten von Schaltungen die verwendet werden können: die Basisschaltung, Emitterschaltung und die Kollektorschaltung. In diesem Versuch wird eine Emitterschaltung betrachtet, bei der eine hohe Verstärkung des Stroms und der Spannung bewirkt wird. Der Aufbau einer solchen ist in Abbildung 3 zu sehen.

Der Kondensator C_1 in der Emitterschaltung sorgt dafür, dass die angelegte Gleichspannung U_{CC} nicht in den Funktionsgenerator fließt und diesen beschädigt. Mit den Widerständen R_2 und R_1 lässt sich der Strom I_B einstellen, der bei der Basis des Transistors ankommt. An den beiden Widerständen muss die komplette Spannung $U_{CC} = 18\text{V}$ abfallen. Da der Widerstand R_1 ein Potentiometer ist, ist der Widerstandswert hier verstellbar. Dadurch lässt sich einstellen, wie viel Spannung an R_1 abfällt und somit auch wie viel Spannung noch vor dem Widerstand herrscht. Mit dieser Spannung wird ein Offset des Eingangssignals generiert. Eine normale Wechselspannung ohne Offset geht auch in einen negativen Bereich. Negative Spannung kann ein Transistor allerdings nicht verstärken/abschwächen. Daher muss durch diese Widerstände die Spannung so weit nach oben verschoben werden, dass es keine negative Spannung mehr gibt. Mit dem Kondensator C_2 wird am Ende wieder der Offset herausgenommen. Da ein Offset ein konstanter Wert ist, und somit einer Gleichspannung entspricht, ist der Kondensator ein unendlich hoher Widerstand und der Offset wird an ihm komplett verbraucht.

Die Verstärkung am Transistor ist stark von Umwelteinflüssen abhängig, wie z.B. die Temperatur des Transistors, weswegen die Verstärkung weder stabil noch reproduzierbar ist. Daher baut man den Widerstand R_E in die Schaltung ein, was Gegenkopplung genannt wird. Wenn jetzt der Kollektorstrom ansteigt, ist auch der Spannungsabfall am neu eingebauten Widerstand R_E größer, womit sich die Basis-Emitter-Spannung verringert. Dies führt wiederum zu einer Verringerung des Basisstroms, die eine Änderung des Kollektorstroms mit sich zieht. Auf diese Weise wird jede Änderung wieder auf sich selbst zurückgeregelt. Dieser zusätzliche Widerstand erhöht den Lastwiderstand des Transistors, weswegen die Arbeitsgerade flacher wird. Um die Signalverstärkung, die durch den Einbau eines zusätzlichen Widerstands R_E zur besseren Regulierung der Verstärkung vermindert wurde, zu regenerieren, wird ein zusätzlicher Kondensator C_E eingebaut. Wenn wir verschiedene Frequenzen anlegen, kann die Wechselspannung je nach Frequenz durch den Kondensator C_E oder den Widerstand R_E fließen. Hochfrequente Ströme fließen durch den Kondensator durch und erfahren quasi keinen Widerstand, wohingegen niederfrequente Ströme durch den Widerstand R_E müssen. Dabei ist die Zeitkonstante τ mit

$$\tau = RC \quad (1.1)$$

von Interesse. Sie ist ein Maß für die Größenordnung der Frequenz die durch einen Kondensator durchkommt. Die zugehörige Grenzfrequenz erhält man über

$$f_{\text{grenz}} = \frac{1}{\tau}. \quad (1.2)$$

Ein Transistor in Betrieb wird in drei Bereiche eingeteilt. Nur im Arbeitsbereich kann ein Kollektorstrom fließen. Für ihn gilt $U_{CE} > U_{BE}$ und $I_C > 0$. Der Sättigungsbereich ist bei $U_{CE} < U_{BE}$ erreicht. Daher können keine Ladungsträger aus der Sperrschicht austreten und es fließt kein Kollektorstrom. Der Sperrbereich tritt ein, wenn die Basisspannung sehr klein ist ($U_B \approx 0$). Hier findet keine Verstärkung statt.

Kennlinien eines Transistors

Ein Transistor wird am besten Anhand eines Kennliniendiagramms charakterisiert (Abb. 1).

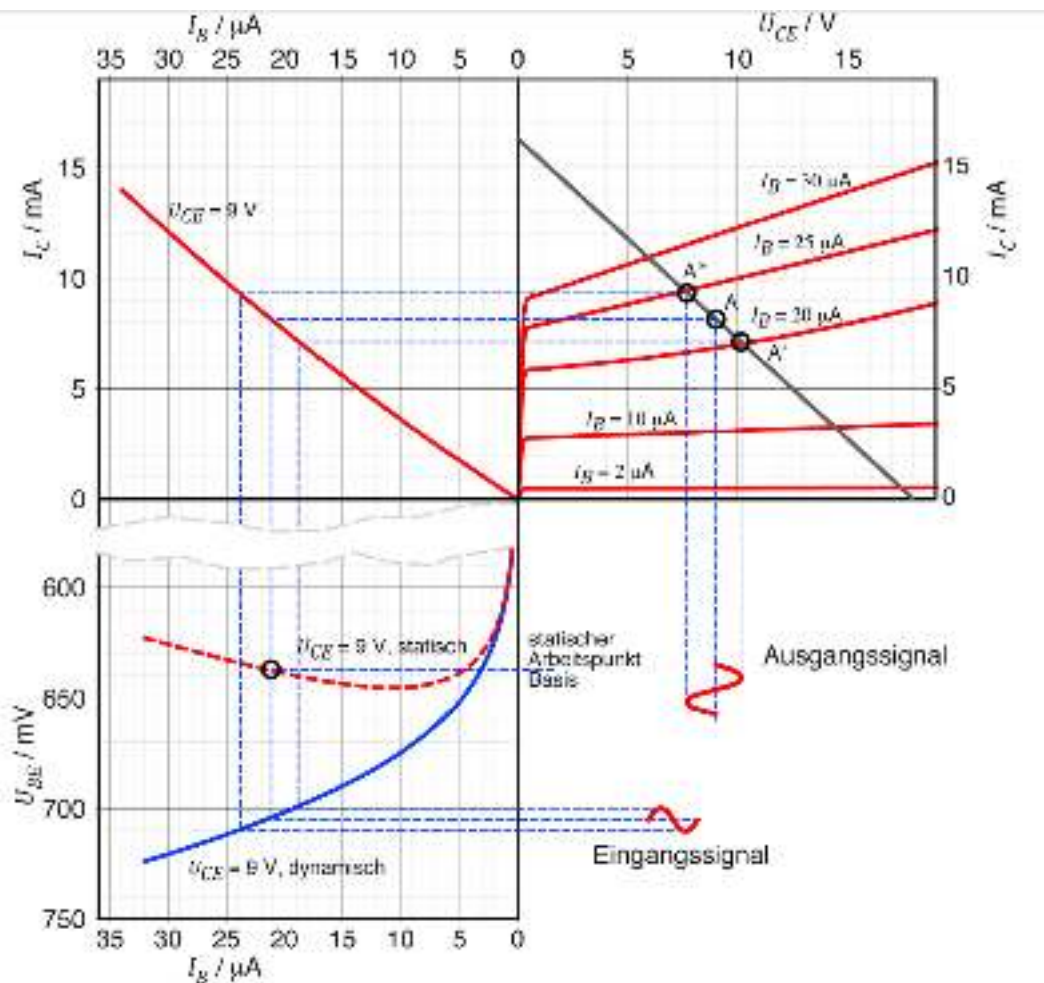


Abb. 1: Kennlinie eines npn-Transistors [Phy2B, Kap. 6.8, S. 52]

Im linken unteren Quadranten des Diagramms ist die Eingangskennlinie eingezeichnet. Sie beschreibt, dass $I_B = f(U_{BE})$ ist. Die Diodenkennlinie wird durch den dynamischen Verlauf beschrieben. Da ein Transistor aber auch schon bei niedrigen Strömen temperaturabhängig ist, beschreibt die statische Linie den realen Verlauf von Eingangsspannung und Strom.

Im linken oberen Quadranten wird die Steuerkennlinie aufgetragen. Hier wird der Zusammenhang $I_C = f(I_B)$ beschrieben. Die Kennlinie gilt jeweils für eine bestimmte Kollektor-Emitter-Spannung.

Im rechts oberen Quadranten wird die Ausgangskennlinie dargestellt. Diese ist für unterschiedliche Kollektor-Emitter-Spannungen bei konstantem Basisstrom in Abhängigkeit des Kollektorstroms definiert.

Die eingezeichnete Linie wird als Arbeitsgerade bezeichnet. Mit ihr wird der Zusammenhang zwischen Kollektor-Emitter-Spannung bei einem Kollektorstrom in Anwesenheit eines Lastwiderstandes verdeutlicht:

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_L \quad (1.3)$$

Die Schnittpunkte dieser mit den Ausgangskennlinien werden als Arbeitspunkte bezeichnet.

Signalverstärkung

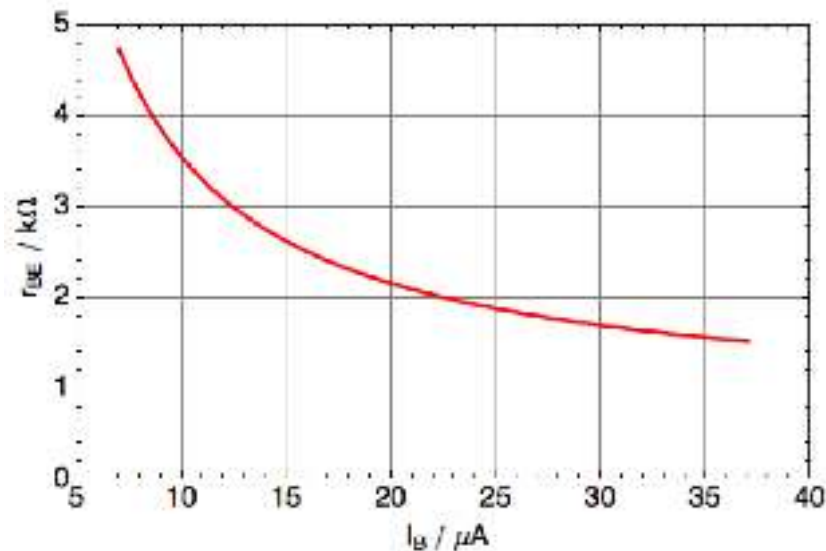


Abb. 2: Typischer Verlauf des differentiellen Eingangswiderstands [Phy2B, Kap. 6.8, S. 55]

Wenn an eine Emitterschaltung neben der Gleichspannung noch eine Wechselspannung mit Gegenkopplung angeschlossen wird, treten Verstärkungseffekte auf:

$$G_0 = \frac{U_{Ausg}}{U_{BE}} = -\beta \frac{R_C}{r_{BE}}$$

β ist die Steigung der Tangente im I_C - I_B -Diagramm bei voreingestelltem Arbeitspunkt A, und r_{BE} ist der differentielle Eingangswiderstand, der bei bekanntem Basisstrom I_B anhand von Abbildung 2 abgelesen werden kann. Der Verlauf dieser Funktion ist vom Transistor abhängig.

Durch den eingebauten Widerstand R_E wird die Verstärkung näherungsweise zu

$$\delta U_{Ausg} \approx -\frac{R_C}{R_E} \delta U_{Eing}. \quad (1.4)$$

1.3 Versuchsaufbau

Ein Funktionsgenerator ist als Signaleingang an die Schaltung (Abb. 3, und ein Oszilloskop an den Signalausgang angeschlossen. Des Weiteren ist der Funktionsgenerator direkt an das Oszilloskop angeschlossen. Ein stabilisiertes Netzgerät liefert konstant 18 V. Als Ampere- und Voltmeter wurden UT51-Multimeter benutzt.

Verstärker, Grundschaltung und Charakterisierung

Die Schaltung wurde nach Abbildung 3 aufgebaut, nur ohne den Kondensator C_E und mit $R_E = 100 \Omega$ und $R_C = 1 k\Omega$.

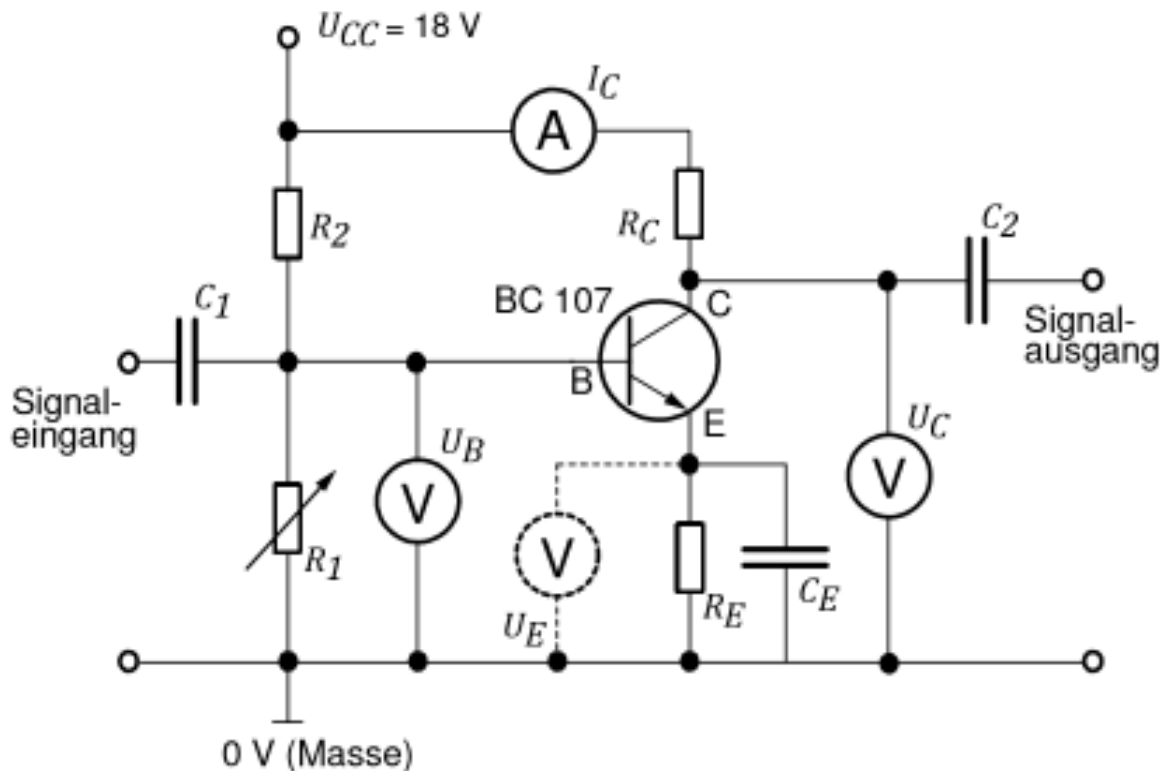


Abb. 3: Schaltbild des degenerierten Transistorverstärkers mit Bypass [Phy2A, Kap. 6.7, S. 112]

Einfluss des Arbeitswiderstandes

Der Widerstand $R_C = 1\text{ k}\Omega$ wurde durch $R_C = 3,3\text{ k}\Omega$ als neuer Arbeitswiderstand ersetzt.

Regenerierung der Signalverstärkung

Es wurde wieder der Widerstand $R_C = 1\text{ k}\Omega$ eingebaut und zusätzlich noch ein Kondensator $C_E = 10\text{ }\mu\text{F}$ hinzugefügt.

1.4 Versuchsdurchführung

Verstärker, Grundschaltung und Charakterisierung

Es wurde eine Spannung U_{CC} von 18 V am Netzgerät eingestellt und mit dem Potentiometer R_1 wurde der Arbeitspunkt so eingestellt, dass die Kollektorspannung U_C 9 V beträgt. In diesem Zustand wurden die Emitterspannung U_E , der Kollektorstrom I_C und die Basisspannung U_B gemessen sowie der eingestellte Kollektorstrom U_C .

Verstärkung und Grenzen des Verstärkers

Am Funktionsgenerator wurde eine sinusförmige Spannung mit $f = 1\text{ kHz}$ und einer Amplitude von 20 mV eingestellt. Diese wurde an den Signaleingang gelegt. Am Oszilloskop wurden Signalausgang und die Direktleitung des eingestellten Signals vom Funktionsgenerator betrachtet. Die am Oszilloskop verstellbaren Empfindlichkeiten waren nun immer so einzustellen, dass die Amplitude des Signalausgangs, die Phase der zwei Kurven relativ zueinander und die Form der Kurven gut erkennbar sind. Nun wird die Frequenz am Funktionsgenerator auf $0,1$, $0,3$, 1 , 3 , 10 , 30 und 100 kHz eingestellt und dabei jeweils die Amplitude gemessen und die relative

Phasenlage betrachtet.

Anschließend wurde der Funktionsgenerator auf 1 kHz mit einer Amplitude von 100 mV eingestellt. Der Arbeitspunkt wurde nun verschoben und dabei die Amplitude U_C , die relative Phase und die Form der Kurve notiert. Der Arbeitspunkt konnte verschoben werden, indem man an dem Poti R_1 dreht. Zur korrekten Messung von U_C muss der Funktionsgenerator jedes Mal kurz von der Schaltung abgekoppelt werden, da sonst nicht der statische sondern der dynamische Wert gemessen wird.

Einfluss des Arbeitswiderstandes

Es wurde wieder ein Arbeitspunkt von 9 V eingestellt. Der Widerstand R_C wird durch einen mit $R_4 = 3,3\text{k}\Omega$ ersetzt. Notiert wurde der neue Arbeitspunkt und die Amplitude, Phasenlage und die Form des Signalausgangs bei einem Eingangssignal von 1 kHz und einer 20 mV Amplitude.

Nun wurde der Arbeitspunkt wieder auf 9 V eingestellt. Es wurden wieder die Emitterspannung U_E , der Kollektorstrom I_C und die Basisspannung U_B sowie die eingestellte Kollektorspannung U_C gemessen. Ebenfalls wurden wieder die Amplitude, die relative Phasenlage und die Form der Kurve notiert.

Regenerierung der Signalverstärkung

Nun wurde der Kondensator $C_E = 10\mu\text{F}$ parallel zu R_E geschaltet. Dabei war zu beachten, dass es sich um einen Elko handelt, was heißt, dass es einen positiven und einen negativen Pol gibt. Der negative Pol wurde an die Masseleitung angeschlossen. Als Widerstand R_E wurde wieder R_3 mit $1\text{k}\Omega$ verwendet und der Arbeitspunkt auf 9 V eingestellt. Die Amplitude wurde bei den Frequenzen 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 und 50 kHz gemessen. Das Wiederholen dieser Messung mit einem anderen Kondensator sowie eine Betrachtung der Phase wurde aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

2 Auswertung

Alle Messergebnisse sind im Anhang zu finden.

2.1 Verstärker, Grundschaltung und Charakterisierung

Die in diesem Versuchsteil gemessenen Größen können Tabelle 1 entnommen werden, wobei hier als Arbeitswiderstand R_C der Widerstand $R_3 = 1\text{ k}\Omega$ verwendet wurde. Die Unsicherheiten der Messergebnisse setzten sich dabei aus dem systematischen Fehler der Messgeräte und einem statistischen Ablesefehler zusammen, sodass sich für die Spannungen ein Fehler von

$$s_U = \sqrt{\left(\frac{0,5 \cdot U/100 + 0,01}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0,005^2} \quad (2.1)$$

und für den Kollektorstrom

$$s_I = \sqrt{\left(\frac{0,8 \cdot I/100 + 0,01}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0,005^2} \quad (2.2)$$

ergibt.

Die Fehler werden hier jedoch nur bei den quantitativen Angaben der Messwerte berücksichtigt. Beim Auftragen in Diagramme sowie beim späteren Ablesen von Werten aus diesen werden die Fehler vernachlässigt, da es um qualitative Zusammenhänge geht, für die die Angabe von Fehlerbalken irrelevant ist.

Die Kollektor-Emitter-Spannung kann aus der Kollektorspannung U_C und der Emitterspannung U_E über

$$U_{CE} = U_C - U_E, \quad (2.3)$$

wobei sich der zugehörige Fehler dann über

$$s_{U_{CE}} = \sqrt{s_{U_C}^2 + s_{U_E}^2} \quad (2.4)$$

ergibt.

Größe	Wert mit Unsicherheit
U_{CC} [V]	$18,00 \pm 0,06$
U_C [V]	$9,00 \pm 0,03$
U_B [V]	$1,55 \pm 0,01$
U_E [V]	$0,90 \pm 0,01$
I_C [mA]	$8,99 \pm 0,05$
U_{CE} [V]	$8,10 \pm 0,03$

Tab. 1: Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom

Die Fehler wurden dabei auf die zweite Nachkommastelle gerundet, da die vom Digitalmultimeter gemessenen Ergebnisse nicht genauer angegeben wurden.

Zur graphischen Bestimmung des Basisstroms I_B wird das Kennliniendiagramm aus den gegebenen Physikalischen Grundlagen [Phy2B, Kap. 6.8, S. 52] verwendet, wobei ein paar nicht benötigte eingezeichnete Linien zuvor entfernt wurden.

Dort wird der Wert des Kollektorstroms in das Diagramm eingezeichnet. Durch den Schnittpunkt mit der eingezeichneten Steuerkennlinie kann der zugehörige Basisstrom abgelesen werden. Dies kann in Abbildung 4 nachvollzogen werden. Die in diesem Versuchsteil eingezeichneten

und bestimmten Werte sind dabei in rot dargestellt.

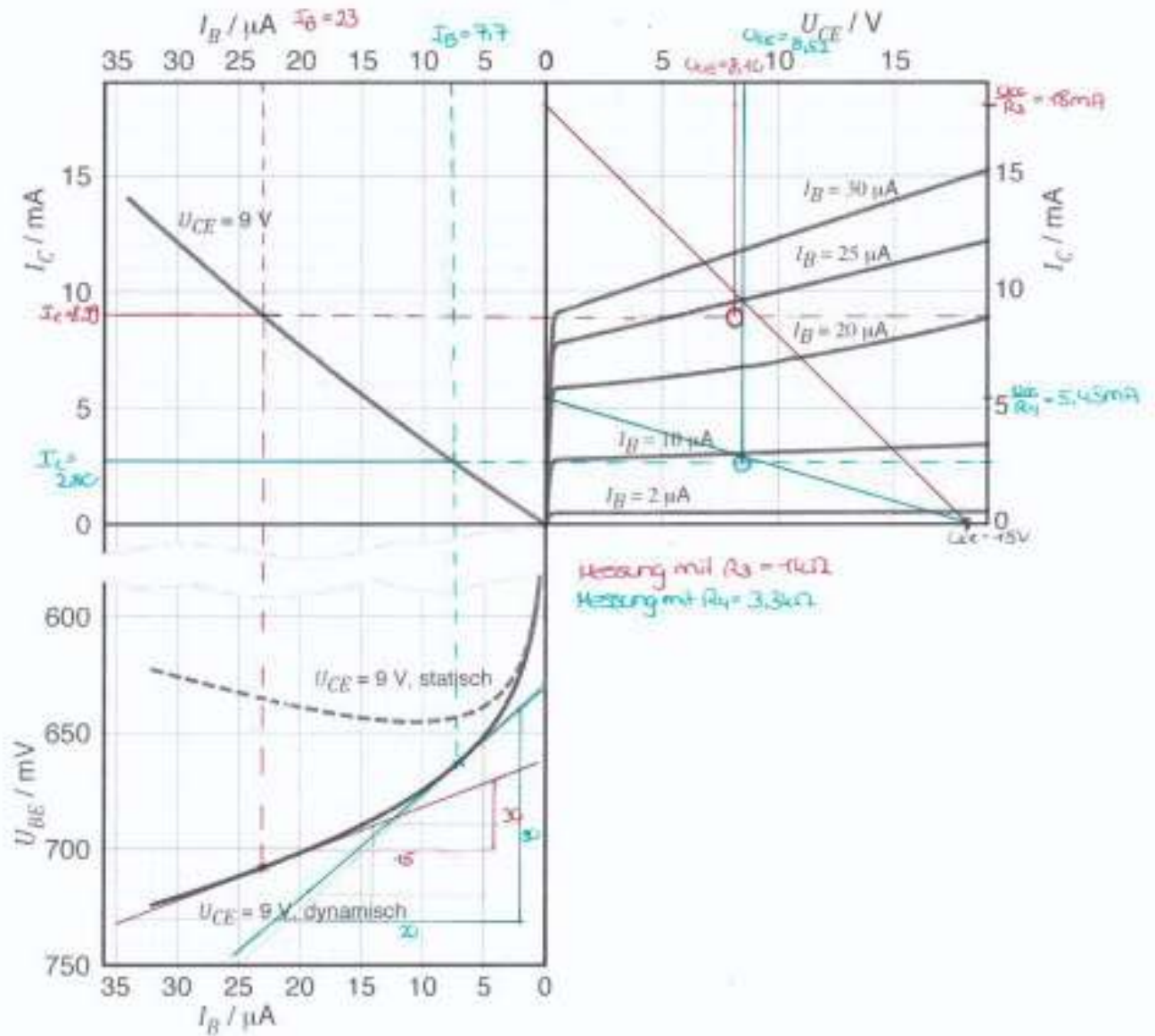


Abb. 4: Grafische Bestimmung des Basisstroms I_B , des Arbeitspunktes und der Arbeitsgeraden sowie des Basis-Emitter-Widerstands r_{BE} . In rot ist dabei die grafische Auswertung dieses Versuchsteils mit R_3 zu sehen, in grün ist dasselbe für einen anderen Widerstand R_4 dargestellt

Der aus dem Schnittpunkt abgelesene Wert für I_B beträgt

$$I_B = (23,0 \pm 0,5) \mu A. \quad (2.5)$$

Der Ablesefehler wurde dabei auf $s_{I_B} = 0,5 \mu A$ abgeschätzt.

Zusätzlich wird im oberen rechten Quadranten der Arbeitspunkt durch die zuvor berechnete Spannung U_{CE} und den gemessene Kollektorstrom I_C eingezeichnet. Zur Ermittlung der Arbeitsgerade wird über Gleichung 1.3 der x- und y-Achsenabschnitt der Arbeitsgerade berechnet,

indem einmal U_{CE} und einmal I_C gleich 0 gesetzt wird und die daraus resultierende Gerade eingezeichnet. U_{CC} ist dabei die angelegte Spannung von $U_{CC} = 18\text{V}$ und bei R_C handelt es sich hier um $R_3 = 1\text{k}\Omega$. Die so bestimmte Arbeitsgerade wird zusätzlich eingezeichnet.

Um den Basis-Emitter-Widerstand r_{BE} zu ermitteln, wird mithilfe des grafisch bestimmten Basisstroms I_B dessen Schnittpunkt mit der dynamischen Eingangskennlinie ermittelt. An diesem Punkt wird dann die Steigung der Tangente bestimmt, die dem gesuchten Widerstand entspricht. Dies ist ebenfalls in Abbildung 4 zu sehen.

Der so erhaltene Basis-Emitter-Widerstand hat den Wert

$$r_{BE} = 2\text{k}\Omega, \quad (2.6)$$

wobei durch die grafische Bestimmung eine gewisse Unsicherheit auf diese Angabe vorhanden ist.

2.2 Verstärkung und Grenzen des Verstärkers

In diesem Versuchsteil wurde die am Funktionsgenerator eingestellte Frequenz von $f = 1\text{kHz}$ und Amplitude des Signals von $U_0 = 100\text{mV}$ konstant beibehalten.

Zunächst werden die in Kästchen am Oszilloskop abgelesenen Amplituden mit der eingestellten Empfindlichkeit des Oszilloskops multipliziert, um auf den Spannungswert zu kommen. Da es sich hierbei noch um die spitze-spitze Spannung handelt, muss diese noch halbiert werden, um die einfache Spannungsamplitude zu erhalten.

Um die durch den Transistor erhaltene Verstärkung G zu ermitteln, wird der so erhaltene Spannungswert durch die am Funktionsgenerator eingestellte Amplitude U_0 , die den ganzen Messdurchgang über konstant war, geteilt, sodass sich für die Verstärkung ergibt:

$$G = \frac{U}{U_0}. \quad (2.7)$$

Die Verstärkung wird anschließend über die semilogarithmisch gewählte Frequenzskala aufgetragen. Dies ist in Abbildung 5 zu sehen, in der zusätzlich schon die Verstärkungen der späteren Messreihen zu finden ist. Der in diesem Versuchsteil berechnete Verstärkungsverlauf ist in blau eingezeichnet.

Dazu lässt sich die theoretische Vergrößerung über die eingebauten Widerstände durch Gleichung (1.4) berechnen. Dies führt zu einem Vergrößerungswert von

$$G = \frac{R_C}{R_E} = \frac{1000\Omega}{100\Omega} = 10. \quad (2.8)$$

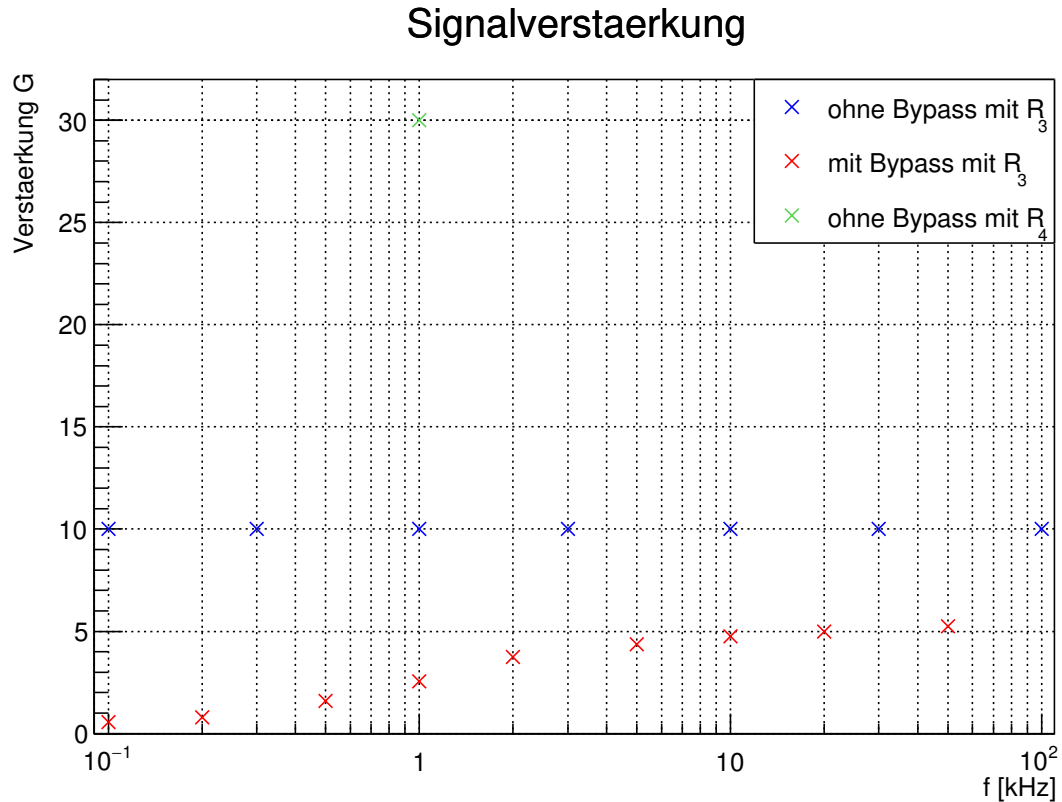


Abb. 5: Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz; in blau ist dabei die Verstärkung ohne zusätzlichen Kondensator mit dem Widerstand $R_C = R_3 = 1\text{ k}\Omega$, in rot die Verstärkung mit zusätzlichem Kondensator und Widerstand R_3 und in grün die Verstärkung ohne Kondensator mit verändertem Arbeitswiderstand $R_C = R_4 = 3,3\text{ k}\Omega$ zu sehen

Auffällig war dabei zusätzlich, dass der am Oszilloskop gemessene Spannungsverlauf gegenüber dem eingestellten Signal um π verschoben war.

Als Nächstes wird der Einfluss des eingestellten Arbeitspunktes auf die durch den Transistor entstehende Verstärkung beobachtet. Dazu wird die Amplitude auf $U_0 = 100\text{ mV}$ erhöht. Anschließend wird der am Potentiometer eingestellte Widerstand so verändert, dass dies deutliche Auswirkungen auf die Arbeitspunktspannung sowie den am Oszilloskop zu sehenden Spannungsverlauf hat. Zur qualitativen Beobachtung wurden dabei einige relevante Punkte gemessen, indem die Amplitude in Kästchen gemessen und wie zuvor über die eingestellte Empfindlichkeit umgerechnet wurde. Über die Division der so erhaltenen Spannungen mit der am Funktionsgenerator eingestellten einfachen Amplitude U_1 , erhält man so wie zuvor schon durchgeführt die Verstärkung G . Diese wird über die Arbeitspunktspannung U_C aufgetragen, um den Arbeitsbereich grafisch zu verdeutlichen, zu sehen in Abbildung 6. In rot sind dabei zu Grenzen des Arbeitsbereichs zu sehen. Für niedrige Arbeitsspannungen wird der Sperrbereich erreicht und für hohe der Sättigungsbereich. In schwarz ist der für die restlichen Versuchsteile gewählte Arbeitspunkt zu sehen.

Auch hier kann über Gleichung (1.4) die theoretische Vergrößerung ermittelt werden, die den Wert

$$G = \frac{R_C}{R_E} = \frac{3300\Omega}{100\Omega} = 33 \quad (2.9)$$

hat.

Grenzen des Arbeitsbereichs

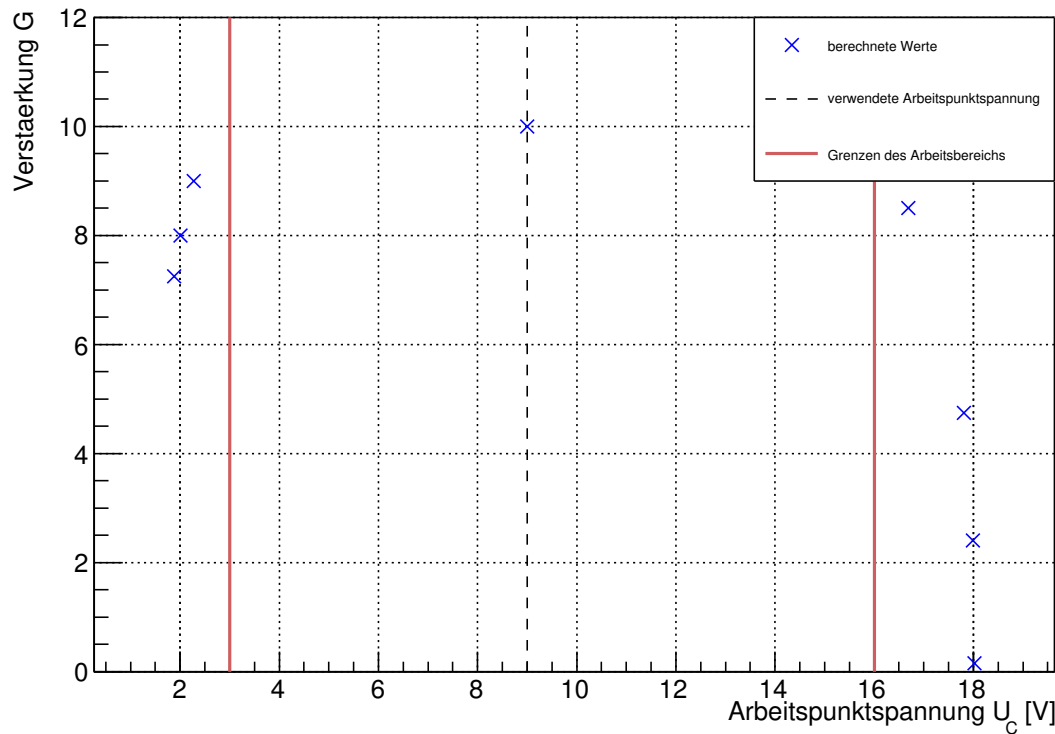


Abb. 6: Darstellung des Arbeitsbereichs durch Auftragen der Verstärkung über der Arbeitspunktspannung. In schwarz ist dabei der für die restlichen Versuchsteile gewählte Arbeitspunkt zu sehen, in rot sind die abgeschätzten Grenzen des Arbeitsbereichs zu sehen

Qualitativ kann dazu gesagt werden, dass der Arbeitsbereich der Bereich ist, für den der Transistor sinnvolle Verstärkungen des Signals erreichen kann. Die Arbeitspunktspannung sollte daher in diesem Bereich liegen. Ist sie zu niedrig, wird die Vergrößerung nach unten hin abgeschnitten, sodass dort eher ein Plateau statt eines eindeutigen Maximums erreicht wird, was daran liegt, dass hier nahezu kein Strom mehr durchgeht, der Kollektorstrom ist also beinahe 0, und es somit nicht weiter abgeschwächt werden kann. Dies wird Sperrbereich genannt.

Ist die eingestellte Arbeitspunktspannung dagegen zu groß, befindet man sich im Sättigungsbereich und es geschieht das gleiche umgekehrt analog und das verstärkte Signal ist oben abgeflacht, da der Kollektorstrom so groß ist, dass die Kollektorspannung unter die Basis-Emitter-Spannung fällt und innerhalb des Transistors keine Ladungsträger mehr aus der Sperrschicht beschleunigt werden können.

Der Verlauf der Verstärkung für die unterschiedlichen Arbeitspunkte ist skizzenhaft in Abbildung 7 dargestellt, wobei der Sättigungsbereich oben zu sehen ist und der Sperrbereich unten. Mittig ist der Verlauf bei einem optimalen gewählten Arbeitspunkt zu sehen, bei dem eine sinnvolle Verstärkung möglich ist.

Für die restlichen Messreihen wurde daher eine Arbeitspunktspannung von $U_C = 9\text{V}$, die in mitten des Arbeitsbereiches liegt, und somit sinnvolle Ergebnisse liefert.

Auch hier konnte für alle eingestellten Spannungen beobachtet werden, dass das verstärkte Signal gegenüber dem eingestellten um eine halbe Periode verschoben ist, die beiden Signale

sind somit phasenverschoben.

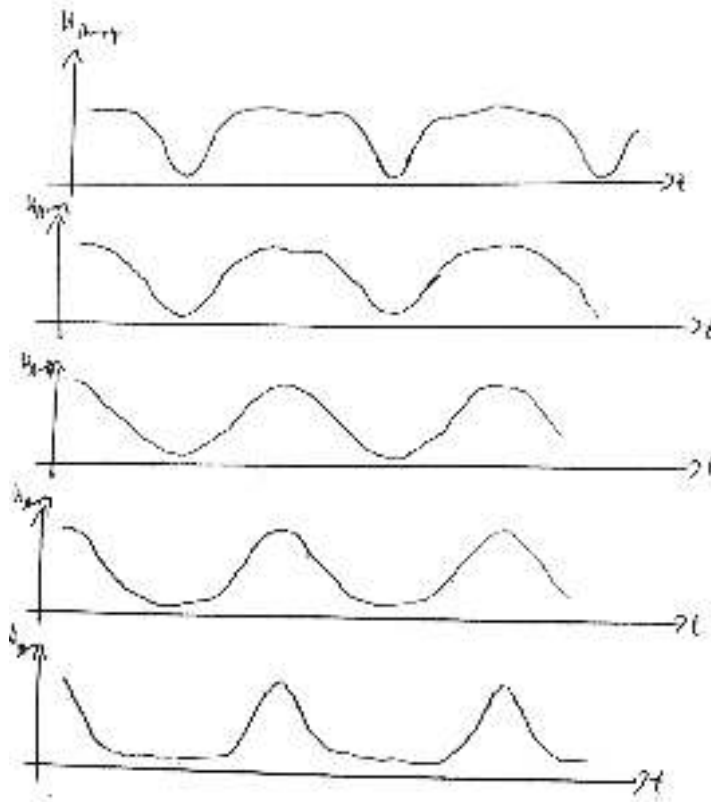


Abb. 7: Qualitative Kurvenformen der Ausgangssignale in Nähe des Sättigungs- und Speerbereichs

2.3 Einfluss des Arbeitswiderstandes

Hierbei wurde zunächst der Arbeitswiderstand größer gewählt, sodass dieser nun $R_C = R_4 = 3,3\text{k}\Omega$ ist. Frequenz und eingestellte Amplitude wurde dabei beibehalten mit $f = 1\text{kHz}$ und $U_0 = 20\text{mV}$.

Danach musste der eingestellte Arbeitspunkt korrigiert werden, da dieser aufgrund des erhöhten Widerstands nicht mehr im gewünschten Bereich lag. Durch den größeren Widerstand fällt dort mehr Spannung ab, sodass der Kollektor-Emitter-Strom kleiner wird und im Verhältnis zum Basis-Emitter-Strom zu klein ist. Dadurch wird der Sättigungsbereich erreicht. Um das auszugleichen, wird der Widerstand des Potentiometers R_1 verkleinert, um den Offset zu verkleinern und den Arbeitsbereich wieder zu erreichen, in dem sinnvolle Werte gemessen werden können. Anschließend wurden der Kollektorstrom und die verschiedenen Spannungen neu gemessen und können Tabelle 2 entnommen werden.

Größe	Wert mit Unsicherheit
U_{CC} [V]	$18,00 \pm 0,06$
U_C [V]	$8,80 \pm 0,03$
U_B [V]	$0,93 \pm 0,01$
U_E [V]	$0,28 \pm 0,01$
I_C [mA]	$2,80 \pm 0,02$
U_{CE} [V]	$8,52 \pm 0,03$

Tab. 2: Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom mit erhöhtem Arbeitswiderstand

Auch hier wird mithilfe des gemessenen Kollektorstroms I_C analog zum ersten Aufgabenteil der Basisstrom I_B anhand des Kennliniendiagramms bestimmt, was in Abbildung 4 eingesehen werden. Ebenso wird der Basis-Emitter-Widerstand r_{BE} auf die selbe Weise wie zuvor bestimmt. Zusätzlich wird auch hier der Arbeitspunkt sowie die zugehörige Arbeitslinie analog zum ersten Teil eingezeichnet und kann ebenfalls Abbildung 4 entnommen werden. Alle in diesem Aufgabenteil eingezeichneten Größen sind dabei in der Abbildung in grün dargestellt.

Die Arbeitsgerade hier verläuft dabei flacher als die vom vorherigen Versuchsteil.

Zusätzlich wird hier analog zu den vorherigen Aufgabenteilen die Verstärkung aus der eingestellten Frequenz und abgelesenen Amplitude berechnet und als einzelner Messpunkt in Abbildung 5 eingezeichnet.

2.4 Regenerierung der Signalverstärkung

Um die Signalverstärkung, die durch den Einbau eines zusätzlichen Widerstands R_E zur besseren Regulierung der Verstärkung vermindert wurde, zu regenerieren, wird ein zusätzlicher Kondensator eingebaut. Dieser wird parallel zu R_E geschaltet. Qualitativ gesagt sorgt dieser Kondensator dafür, dass hohe Frequenzen den Weg über den Kondensator nehmen, da ein Kondensator für große Frequenzen nahezu keinen Widerstand hat. Niedrige Frequenzen jedoch kommen nicht über den Kondensator und müssen somit über den Widerstand R_E gehen.

Hierbei wurde zusätzlich wieder der kleinere Arbeitswiderstand mit $R_C = 1\text{ k}\Omega$ verwendet.

Anschließend wurden Amplitude und Phase für verschiedene eingestellte Frequenzen beobachtet. Hierbei wurde analog zum zweiten Aufgabenteil vorgegangen und aus den gemessenen Amplituden die Verstärkung berechnet. Der Verstärkungsverlauf ist dabei zusammen mit den anderen beiden Verstärkungen aus den anderen Aufgabenteilen in Abbildung 4 im ersten Teil zu sehen.

Zu den Phasen kann dabei hier keine Aussage getroffen werden, da diese Messreihe nicht durchgeführt wurden.

Die Zeitkonstante τ kann über (1.1) berechnet werden. Somit ergibt sich dafür

$$\tau = RC = 0,001\text{s}. \quad (2.10)$$

Die zugehörige Grenzfrequenz f_{grenz} ist damit

$$f_{\text{grenz}} = \frac{1}{\tau} = 1000\text{Hz} = 1\text{kHz}. \quad (2.11)$$

3 Zusammenfassung und Diskussion

Verstärker, Grundschaltung und Charakterisierung

Die durch den Transistor verstärkten Signale sind durch die beiden Kondensatoren gegenüber dem Eingangssignal des Funktionengenerators um π verschoben.

Die hier erhaltenen Werte für die gemessenen Spannungen und den Kollektorstrom können Tabelle 3 entnommen werden.

Größe	Wert mit Unsicherheit
U_{CC} [V]	$18,00 \pm 0,06$
U_C [V]	$9,00 \pm 0,03$
U_B [V]	$1,55 \pm 0,01$
U_E [V]	$0,90 \pm 0,01$
I_C [mA]	$8,99 \pm 0,05$
U_{CE} [V]	$8,10 \pm 0,03$

Tab. 3: Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom

Der mithilfe des Kennliniendiagramms bestimmte Basisstrom ist

$$I_B = (23,0 \pm 0,5) \mu\text{A} , \quad (3.1)$$

wobei der Fehler hier die Ableseunsicherheit angibt und abgeschätzt wurde, da die grafische Bestimmung nicht sehr genau ist.

Der durch die Steigung der Eingangskennlinie ermittelte Wert für den Basis-Emitter-Widerstand ist

$$r_{BE} = 2 \text{ k}\Omega . \quad (3.2)$$

Auch bei diesem Wert handelt es sich aufgrund der grafischen Bestimmung um einen eher ungenauen Wert.

Verstärkung und Grenzen des Verstärkers

Signalverstärkung

Aus den über die Frequenzen aufgetragenen Verstärkungen lässt sich beobachten, dass die Verstärkung ohne den zusätzlichen Kondensator als Bypass konstant und somit frequenzunabhängig ist.

Vergleicht man die im Diagramm sichtbare Verstärkung mit der theoretisch berechneten von

$$G = 10 , \quad (3.3)$$

sieht man, dass die aus den Messgrößen berechnete Verstärkung mit der theoretischen übereinstimmt.

Bei einer Erhöhung des Arbeitswiderstands kann man zusätzlich beobachten, dass die Verstärkung wesentlich größer ist. Dem Diagramm kann eine Verstärkung von $G = 30$ entnommen werden. Verglichen mit einem theoretisch berechneten Wert von

$$G = 33 \quad (3.4)$$

entsprechen die Werte einander relativ gut, sofern dies ohne Fehlerangaben gesagt werden kann. Die relative Abweichung beträgt 9%.

Wird ein zusätzlicher Kondensator eingebracht, ist die Verstärkung für hohe Frequenzen größer, da für diese der Kondensator fast keinen Widerstand hat, sodass diese den Weg über den Kondensator und nicht über den parallel dazu geschalteten Widerstand gehen. Für niedrige Frequenzen dagegen ist der Widerstand des Kondensators groß, sodass diese über den Widerstand gehen und dementsprechend abgeschwächt und somit weniger verstärkt werden.

Jedoch sollte der Verstärkungsverlauf bei der gleichen Verstärkung wie die Schaltung mit R_3 und ohne Kondensator beginnen und dann mit dem selben Verlauf ansteigen. Der zusätzliche Kondensator sorgt nicht dafür, dass die Verstärkung geringer als ohne Kondensator ist, sondern dass hohe Frequenzen mehr verstärkt werden als niedrige. Selbst für eine sehr niedrige Frequenz müsste die Verstärkung bei etwa 10 liegen. Eine wahrscheinliche Ursache dafür wäre, dass eventuell unbeabsichtigt eine andere Frequenz eingestellt wurde, als gefordert war, jedoch mit dem geforderten Wert gerechnet wurde.

Grenzen des Arbeitsbereichs

Aus der Variation des Arbeitspunktes lassen sich die Grenzen des Arbeitsbereichs beobachten. Ist die Arbeitspunktspannung zu gering, wird der Sperrbereich erreicht, in dem der Strom und die Spannung so gering ist, dass bei der Verstärkung die Amplitude nach unten hin abflacht und ein Plateau statt eines Maximums bei der Sinus-Schwingung zu sehen ist. Bei zu hohen Arbeitspunktspannungen ist die Signalförm nach oben hin abgeschnitten ist. Dieser Bereich ist der Sättigungsbereich.

Nur bei Arbeitspunktspannungen, die sich im Bereich zwischen diesen Grenzen befinden, können sinnvolle Verstärkungen erreicht werden, die noch die Form einer Sinusschwingung haben.

Einfluss des Arbeitswiderstandes und Arbeitsgeraden

Die Verwendung eines größeren Arbeitswiderstandes sorgt für eine größere Verstärkung des Signals, was auch den theoretisch berechneten Werten der Vergrößerung entnommen werden kann. Für den kleineren Arbeitswiderstand $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ergibt sich eine Vergrößerung von

$$\boxed{G = 10} \quad (3.5)$$

und für den größeren Widerstand $R_3 = 3,3 \text{ k}\Omega$

$$\boxed{G = 33}. \quad (3.6)$$

Wird der Arbeitswiderstand erhöht, ist die resultierende Arbeitsgerade flacher, da der höhere Widerstand zu einer Erhöhung des Lastwiderstands des Transistors führt. Der dadurch entstehende Kollektorstrom ist bei einem höheren Widerstand niedriger, weswegen der y-Achsenabschnitt der Arbeitsgerade kleiner und die Gerade somit flacher als bei einem kleineren Arbeitswiderstand ist.

Regenerierung der Signalverstärkung

Durch das Einbauen eines zusätzlichen Kondensators wird die durch den Einbau eines Widerstands R_E verminderte Leistung wieder verstärkt. Diese ist dann allerdings frequenzabhängig, sodass hohe Frequenzen stark verstärkt werden und niedrige dagegen kaum. Dies liegt daran, dass für hohe Frequenzen der Kondensator fast keinen Widerstand hat, sodass diese kaum vermindert durchkommen, während niedrige Frequenzen nicht über den Kondensator kommen und mit durch den Widerstand abgeschwächt werden.

Die zugehörige Zeitkonstante ist dabei

$$\boxed{\tau = 0,001 \text{ s}} \quad (3.7)$$

mit einer sich daraus ergebenden Grenzfrequenz von

$$\boxed{f_{\text{grenz}} = 1 \text{ kHz}}. \quad (3.8)$$

Diese Frequenz gibt an, für welche Frequenzen welcher der genannten Fälle zutrifft. Frequenzen ab der Grenzfrequenz und höher können den Kondensator passieren und die größere Verstärkung tritt ein. Für niedrigere Frequenzen tritt der andere Fall ein und sie werden hier weniger verstärkt.

4 Abbildungen

1	Kennlinie eines npn-Transistors [Phy2B, Kap. 6.8, S. 52]	4
2	Typischer Verlauf des differentiellen Eingangswiderstands [Phy2B, Kap. 6.8, S. 55]	5
3	Schaltbild des degenerierten Transistorverstärkers mit Bypass [Phy2A, Kap. 6.7, S. 112]	6
4	Grafische Bestimmung des Basisstroms I_B , des Arbeitspunktes und der Arbeitsgeraden sowie des Basis-Emitter-Widerstands r_{BE} . In rot ist dabei die grafische Auswertung dieses Versuchsteils mit R_3 zu sehen, in grün ist dasselbe für einen anderen Widerstand R_4 dargestellt	9
5	Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz; in blau ist dabei die Verstärkung ohne zusätzlichen Kondensator mit dem Widerstand $R_C = R_3 = 1\text{ k}\Omega$, in rot die Verstärkung mit zusätzlichem Kondensator und Widerstand R_3 und in grün die Verstärkung ohne Kondensator mit verändertem Arbeitswiderstand $R_C = R_4 = 3,3\text{ k}\Omega$ zu sehen	11
6	Darstellung des Arbeitsbereichs durch Auftragen der Verstärkung über der Arbeitspunktspannung. In schwarz ist dabei der für die restlichen Versuchsteile gewählte Arbeitspunkt zu sehen, in rot sind die abgeschätzten Grenzen des Arbeitsbereichs zu sehen	12
7	Qualitative Kurvenformen der Ausgangssignale in Nähe des Sättigungs- und Speerbereichs	13

5 Tabellen

1	Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom	8
2	Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom mit erhöhtem Arbeitswiderstand	13
3	Messergebnisse für die verschiedenen Spannungen und den Kollektorstrom	15

6 Literatur

- [Phy2A] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2; Teil A Hinweise und Versuchsanleitungen*, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- [Phy2B] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2; Teil B Physikalische Grundlagen*, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

7 Anhang

7.1 Messdaten

Abschnitt 6.2 19.03.18

6.1) Arbeitspunkt

$U_{be} = 18.00V$ (Messgerät 0.5% Absolut: $0.09V$
Relativ: $\pm 0.5\% \cdot 18.00V = \pm 0.09V$)

$U_c = 8.9.00V$

$U_{b3} = 14.22V \pm 0.07V$

$I_c = 3.89mA$ (Relativ: $\pm 0.5\% = \pm 0.02mA$)
Absolut: $\pm 0.02mA$

$U_{be} = 0.90V$

2. Verstärkung und Gewinn des Verstärkers

a) Signalverstärkung Frequenzgang

$f = 1kHz$, $U = 20mV$ Amplitude zum Generator

Frequenz / kHz	Amplitude / V (Signal-Generator)	Frequenz / kHz	Messbereich:
0.1	4	5	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
0.3	4	3.4	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
1	4	2	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
3	4	3.4	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
10	4	5	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
30	4	3.4	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
100	4	4.9	Spannung: $10mV$ bis $100V$ Zeit: $1ms$ bis $1s$ div. Stellung
2000			Amplitude des Frequenzgangs

c) $f = 1kHz$ Ampl. = 2 ermitteln (entfalten)

Amplitude (ss) 50%	Phasenlage %	Form	Messbereich	U_c / V
3.4 4.5 1.9	2.1 (um π verschoben)		$\frac{50mV}{div}$ $\frac{25\mu s}{div}$	16.69
4.8 0.6	5 (um π verschoben)		$\frac{50mV}{div}$ $\frac{25\mu s}{div}$	17.51
4.8	2 (um π verschoben)		$\frac{50mV}{div}$ $\frac{25\mu s}{div}$	17.99
0.6	um π verschoben		$\frac{50mV}{div}$ $\frac{25\mu s}{div}$	18.02
2.9	um π versch.		$\frac{50mV}{div}$	1.88
3.2	um π versch.		$\frac{50mV}{div}$	2.01
3.6	um π versch.		$\frac{50mV}{div}$	2.28
4	um π versch.		$\frac{50mV}{div}$	9.06

3 Einfluss des Arbeitswiderstands

R_L getet 3.3k Ω

- a) funktioniert nicht mehr, liegt nicht mehr im Arbeitsbereich
(unten abgeschnitten)
- b) Korrektur notwendig, um wieder in den Arbeitsbereich zu kommen
→ Poti verstellen

$$U_F = \text{GGB } 0.25V$$

$$U_B = 0.93V$$

$$I_C = 2.8mA$$

$$U_C = 8.80V$$

(funkt wieder)

Amplitude	Phasenlage	Form
6 $\left(\frac{50mV}{div}\right)$	um π versch.	

4. Regenerierung der Signalverstärkung

b)	f / kHz	Amplitude _{eff} / V	Nachbereich	Filter	Form
	0,1	4,4	5mV div 1	//	sinus
	0,2	3,2	5mV div 1		sinus
	0,5	3,2	20mV div 1		sinus
	1	5,1	20mV div 1		sinus
	2	3	50mV div 1		sinus
	5	3,5	50mV div 1		sinus
	10	3,8	50mV div 1		sinus
	20	4	50mV div 1		sinus
	50	4,2	50mV div 1		sinus

Ablesfehler Cosinekop $\frac{1}{2}$ digits
Multimeter 0,5 digits

VT 10.1.18
F.P.