

Physik III - Anfängerpraktikum- Versuch 307 - Der Transistor

Sebastian Rollke (103095) und Daniel Brenner (105292)

21. September 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Einleitung	3
2.1 Bändermodell der Energieniveaus	3
2.2 Aufbau eines Halbleiters	3
2.2.1 Dotierte Halbleiter	3
2.3 Anmerkungen zu den benutzten Symbolen	4
2.4 Technische Anwendung der dotierten Halbleiter	4
2.4.1 Die Halbleiter Diode	4
2.4.2 Der pnp-Transistor	5
3 Theorie	6
3.1 Kennlinien eines Transistors	6
3.2 Transistoren und Wechselstrom	7
3.2.1 Verstärkung von Wechselstromamplituden	7
3.2.2 Frequenzabhängigkeit der Stromverstärkung	7
4 Versuchsteil	8
4.1 Messung der Eingangskennlinie	8
4.2 Messung der Ausgangskennlinie	9
4.3 Messung der Stromverstärkungskennlinie	9
4.4 Untersuchung des Einflusses des Arbeitspunktes	10
4.5 Messung des Frequenzganges der Stromverstärkung	10
4.6 Messung der Spannungsverstärkung	11
4.7 Auswertung	11

4.7.1	Eingangskennlinie eines Transistors	11
4.7.2	Der Eingangswiderstand r_{BE}	11
4.7.3	Ausgangskennlinien eines Transistors	13
4.7.4	Stromverstärkungskennlinie eines Transistors	13
4.7.5	Qualitative Untersuchung des Einflusses des Arbeitspunktes	14
4.7.6	Frequenzgang der Stromverstärkung eines Transistors	14
4.8	Spannungsverstärkung einer Emitterschaltung	16

1 Zielsetzung

In dem folgenden Versuch bestimmen wir die Eigenschaften von Transistoren. Unter anderem deren Eingangskennlinien, Ausgangskennlinien, Stromverstärkung sowie die Frequenzabhängigkeit spezieller Transistorschaltungen.

2 Einleitung

2.1 Bändermodell der Energieniveaus

Aus der Quantenmechanik geht hervor, daß Elektronen nur bestimmte Energieniveaus annehmen können. Da es sich bei Elektronen um Teilchen mit halbzahligen Spins handelt, kann jeder dieser Zustände von max. zwei Teilchen besetzt werden. Durch diese Tatsache ergeben sich in Kristallen "Energiebänder" in denen sich die Elektronen aufhalten können. Ist dieses Band voll besetzt, können die Elektronen sich nicht frei bewegen, da alle energetisch höheren Zustände bereits belegt sind (das sog. Valenzband).

Allerdings ergibt sich durch weitere quantenmechanische Eigenschaften, daß es ein weiteres Band oberhalb des Valenzbandes gibt. Das sogenannte Leitungsband. Gelangen Elektronen (z.B. durch thermische Anregung) in dieses Band ist der Stoff leitfähig. Hierbei unterscheidet man zwischen Leiter, Halbleitern und Isolatoren.

[Abb. Bändermodell aus der Anleitung]

2.2 Aufbau eines Halbleiters

Ein Halbleiter ist ein kristalliner Stoff und steht wie der Name bereits impliziert zwischen Leitern und Isolatoren. Valenz und Leitungsband sind zwar deutlich getrennt, jedoch können Elektronen durch Anregung (z.B. thermische Energie) vom Valenz in das Leitungsband wandern, so daß der Halbleiter freie Ladungsträger enthält. Durch die Elektronenwanderung entstehen im Valenzband sog. "Löcher", die als positive Ladungen aufgefasst werden und ebenso wie die Elektronen wandern können. Durch die Entstehung der Löcher ist schnell klar, daß es immer genau so viele Löcher wie Elektronen im Leitungsband gibt.

2.2.1 Dotierte Halbleiter

Bringt man bestimmte Fremdatome (Beispiele hierfür sind u.a. Silizium und Germanium) in die Kristallstruktur des Halbleiters ein (\rightarrow *Dotierung*) verbessert sich seine Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen. Hierbei unterscheidet man zwischen n(egativ)- und p(ositiv)- Dotierung (das Verhalten wird jeweils bei Zimmertemperatur beschrieben).

- Bei einer **n-Dotierung** werden in die Kristallstruktur des Halbleiters sogenannte Donatoratome eingebracht, die mehr Valenzelektronen besitzen. Deren Elektronen können somit leicht (ihr Energieniveau liegt sehr nahe an dem des Leitungsbandes) in das Leitungsband des Halbleiters "wandern", so daß es dort zu einer Elektronenleitung kommt.
- Bei einer **p-Dotierung** werden sogenannte Akzeptoratome in die Struktur des Halbleiters eingebracht. Diese liegen energetisch sehr nahe bei dem Valenzband des Halbleiters und besitzen weniger Valenzatome. Elektronen aus dem Valenzband des Halbleiters können so leicht in das des Fremdatomes wechseln, wodurch im Halbleiter Löcher entstehen. Eine Lochleitung im Valenzband wird nötig.
- Der **p-n-Übergang** entsteht wenn ein Halbleiter mit beiden Materialien dotiert wird. Dort wo sich die beiden Fremdatome treffen, rekombinieren Löcher und Elektronen und es entsteht eine an freien Ladungsträgern verarmte (praktisch nicht leitfähige) Zone.

2.3 Anmerkungen zu den benutzten Symbolen

Im folgenden verwenden wir die folgenden Abkürzungen:

U_{BE} bezeichnet die Spannung zwischen Basis und Emitter

U_{CE} bezeichnet die Spannung zwischen Kollektor und Emitter

I_B bezeichnet den Basistrom

I_C bezeichnet den Kollektorstrom

r_{BE} bezeichnet den Eingangswiderstand

r_{CE} bezeichnet den Kollektor-Emitterwiderstand

2.4 Technische Anwendung der dotierten Halbleiter

2.4.1 Die Halbleiter Diode

Die Halbleiter Diode besteht aus einem dotierten Halbleiter mit dem oben erwähnten p-n-Übergang. Legt man nun eine Spannung an die Diode an, wird ihr Verhalten durch deren Polarität bestimmt. Sie wird entweder durchlässig oder sperrt sich gegen den Strom.

Der Grund dafür liegt darin, daß sich zwischen den beiden Grenzschichten eine Potentialdifferenz ausbildet, die von den Ladungsträgern überwunden werden muß. Die Anzahl der Ladungsträger, die dazu in der Lage sind ist dabei proportional zum Boltzmann-Faktor $\exp(e_0(U - U_D)/kT)$ und hängen somit von der Temperatur und der Spannung ab, die angelegt wird. Dabei unterscheidet man

noch einmal zwischen Sperr- und Durchlassbereich. Wobei im Sperrbereich die Spannung gegen Null geht und sich im Durchlassbereich gemäß dem Boltzmannfaktor ansteigt. Woraus sich (näherungsweise) die Strom-Spannungcharakteristik $I(U) = I_0(\exp(e_0U/\alpha kt) - 1)$ ergibt.

Je nach Polarität der Spannung wird entsprechend die Potentialsperrschicht zwischen den beiden Schichten vergrößert oder verkleinert, woraus dann das charakteristische Verhalten der Diode resultiert.

Dioden haben somit die Wirkung elektrischer Gleichrichter, die Strom nur in eine Richtung und ab einer gewissen Grenzspannung fließen lassen.

2.4.2 Der pnp-Transistor

Der Transistor besteht aus zwei p-dotierten Schichten (Emitter und Kollektor) die von einer n-dotierten Schicht (Basis) getrennt werden. Wobei die Dicke der n-dotierten Schicht sehr gering gegen die der p-dotierten ist. Transistoren werden je nach Schaltung in der sie eingesetzt werden z.B. zur Verstärkung von Strom oder Spannung eingesetzt oder finden als elektronische Schalter Verwendung.

Die Emitter-Schaltung Legt man eine Spannung U_{BE} an Basis und Emitter und eine weitere Spannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter an (vgl. auch Schaltskizze Skript S.233). Dadurch entsteht ein Strom von Löchern vom Emitter zur Basis, wo sie zum Teil mit Elektronen rekombinieren (ein von U_{EB} abhängiger Basisstrom ist die Folge). Dadurch ist es nun den Löchern möglich, in das Kollektorgebiet zu gelangen, wo sie dann durch das anliegende elektrische Feld beschleunigt werden.

Somit ist mit dieser Anordnung möglich den Kollektorstrom I_C durch Änderung der Spannung U_{CE} zu steuern.

Für die Anwendung des Transistors als Stromverstärker ist dann der folgende Ausdruck maßgeblich:

$$\beta = \lim_{\Delta I_B \rightarrow 0} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1)$$

Weiterhin, kann durch Hinzufügen eines Widerstandes (vgl. Skript Abb.6) auch eine Spannungsverstärkung realisieren. Diese ist dann gegeben durch:

$$V := \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}} \quad (2)$$

Wobei sich dann ΔU_{CE} am Kollektorwiderstand abgreifen lässt. Da

$$\Delta U_{BE} = \Delta I_B r_{BE}$$

und

$$\Delta U_{CE} = \Delta I_C R_C$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen folgt dann (zumindest näherungsweise, da in der Realität U_{BE} auch geringfügig von U_{CE} abhängt):

$$V = \frac{R_C}{r_{BE}} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta \frac{R_{CE}}{r_{BE}}$$

Die Basis Schaltung Die Basis Schaltung (vgl. Abb.7 aus dem Skript) findet lediglich bei Höchstfrequenzschaltungen Anwendung, da sie einen sehr geringen Eingangswiderstand aufweist.

Die Kollektor Schaltung Technisch bedeutsamer ist hingegen die Kollektor Schaltung (vgl. Abb.8 aus dem Skript). Eine Spannungsverstärkung ist mit dieser Schaltung jedoch nicht möglich. Ihr Einsatzzweck liegt darin, daß sie einen sehr hohen Eingangswiderstand jedoch einen sehr geringen Ausgangswiderstand hat. Sie liefert somit die Spannung einer hochohmigen Signalquelle nahezu ohne Teilung an einen niederohmigen Verbraucher. Somit hat die Kollektorschaltung die Funktion eines Impedanzwandlers.

3 Theorie

3.1 Kennlinien eines Transistors

Kennlinien geben die Abhängigkeit von Spannung und Strom am Kondensator wieder.

Hierbei unterscheidet man zwischen

Eingangskennlinien geben das Verhältnis von I_B in Abhängigkeit von U_{BE} wieder. Die Messungen der Werte erfolgt dabei bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} . Da die Emitter Basis Strecke quasi eine Halbleiterdiode darstellt, läßt sich der Verlauf der Kennlinie annähernd durch Gleichung (1) beschreiben. Durch Differentiation dieser Gleichung erhalten wir:

$$\frac{1}{r_{BE}} = I_0 \frac{e_0}{\alpha k t} \exp\left(\frac{e_0 U_{BE}}{\alpha k t}\right) \approx \frac{e_0}{\alpha k t} I_B \quad (3)$$

Ausgangskennlinien geben den Zusammenhang zwischen Kollektor-Emitter-Spannung und Kollektorstrom wieder. Konstanter Parameter ist hier U_{BE} . Nach überschreiten einer Sättigungsspannung ist U_{Sat} ist der Kollektorstrom nur wenig von U_{CE} abhängig. D.h.

$$r_{CE} := \left(\frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right)$$

ist ziemlich groß. Trägt man Kollektor- gegen Basisstrom auf erhält man die sog. Stromverstärkungskennlinie.

3.2 Transistoren und Wechselstrom

3.2.1 Verstärkung von Wechselstromamplituden

Bei der Verstärkung von Wechselstromamplituden legt man Wert auf möglichst hohe Linearität. Jedoch zeigt ein Blick auf eine Stromverstärkungskennlinie (vgl. Abb. 10 aus dem Skript), daß diese gekrümmt ist. Die Verstärkung ist somit nicht "Verzerrungsfrei".

Man kann lediglich ein Intervall (den Aussteuerungsbereich) um einen sog. Arbeitspunkt festlegen, in dem die Abweichung von der Linearität einen gewissen Prozentsatz nicht überschreitet. Wobei jedoch der Arbeitspunkt nicht auf $I_B = 0$ gelegt werden darf, da $I_B < 0$ aufgrund der Gleichrichterwirkung nicht existiert. Ein Arbeitspunkt $I_B > 0$ kann man durch eine Gleichstromquelle erreichen (vgl. Abb. 11 aus dem Skript).

Die Verzerrung der Stromverstärkung führt zur Produktion von Oberschwingungen, was sich nachteilig in der Verstärkertechnik auswirkt. Ein Maß für die Verzerrung ist hierbei der sog. Klirrfaktor

$$k := \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4)$$

Wobei I_n jeweils die n-te Oberschwingung mit der Frequenz $n \nu$ darstellen.

3.2.2 Frequenzabhängigkeit der Stromverstärkung

Ein Transistor stellt im Prinzip auch eine Art Kondensator da (zwei leitende Bereiche, getrennt durch einen nicht leitenden), was natürlich dazu führt, daß es zu einer frequenzabhängigen Phasenverschiebung des Stroms kommt. Die Stromverstärkung nimmt aufgrund dieses Effektes mit stiegender Frequenz ab. Der Transistoreingang verhält sich somit wie ein Netzwerk, daß aus der Parallelschaltung einer Kapazität und eines ohmschen Widerstands besteht (vgl. Abb. 12 aus dem

Skript).

Somit muß die Stromverstärkung $\tilde{\beta}$ als komplexe Größe angenommen werden. Man erhält für $\tilde{\beta}$

$$\tilde{\beta} = \beta \frac{1}{1 + j\omega r_{BE} c_{BE}} \quad (5)$$

Daraus folgt dann der Betrag

$$|\tilde{\beta}| = \beta \frac{1}{\sqrt{1 + j\omega^2 r_{BE}^2 c_{BE}^2}} \quad (6)$$

Also eine asymptotisch gegen Null abfallende Funktion. Man definiert nun noch

Die Grenzfrequenz bei der $|\tilde{\beta}|$ auf den Wert $1/\sqrt{2}\beta$ abgefallen ist. Also:

$$\nu_g = \frac{1}{2\pi r_{BE} c_{BE}} \quad (7)$$

Die Transitfrequenz ist diejenige Frequenz bei der $\tilde{\beta}$ den Wert 1 erreicht. Transistoren mit hoher Sperrschichtkapazität können Ströme daher kaum noch verstärken.

4 Versuchsteil

4.1 Messung der Eingangskennlinie

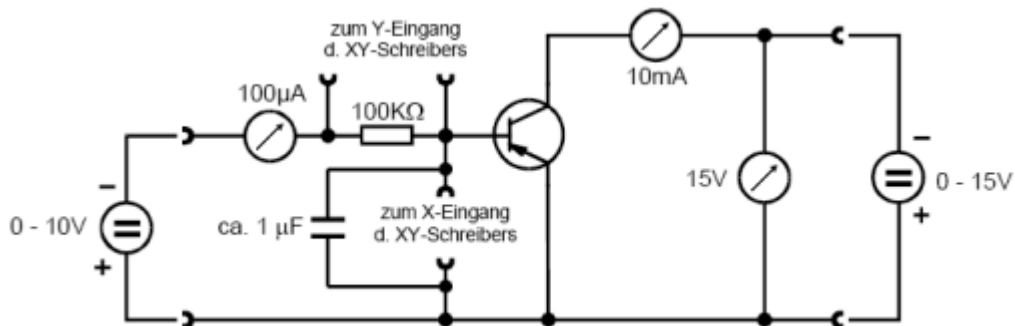


Abbildung 1: Schaltung zur Aufnahme von Eingangs-Kennlinien

Die Schaltung wird nach Abbildung 13 aufgebaut. Da uns kein x-y Schreiber zur Verfügung stand wurde ein Millivoltmeter seiner statt angeschlossen um die verschiedenen Werte aufzunehmen. Gemessen wird in zwei Versuchsreihen bei jeweils konstanten Werten für U_{CE} vom 0V bzw. 5V. Zur Messung variieren wir die Basis-Emitter-Spannung und messen so den Basis-Strom.

4.2 Messung der Ausgangskennlinie

Die Schaltung wird diesmal nach Abbildung 14 aufgebaut, der x-y Schreiber wird natürlich wieder durch ein Millivoltmeter ersetzt. Gemessen wird auch wieder in zwei Versuchsreihen bei konstanten Werten von jeweils I_B von $30 \mu\text{A}$ und $50 \mu\text{A}$.

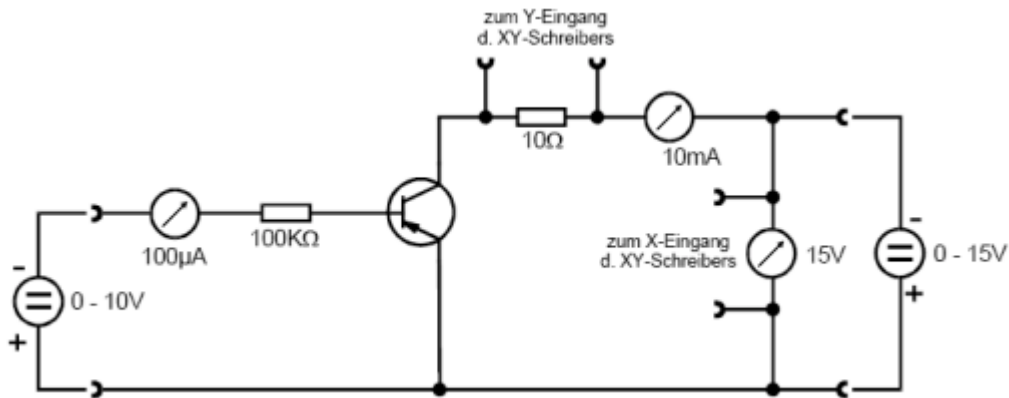


Abbildung 2: Schaltung zur Aufnahme von Ausgangs-Kennlinien

4.3 Messung der Stromverstärkungskennlinie

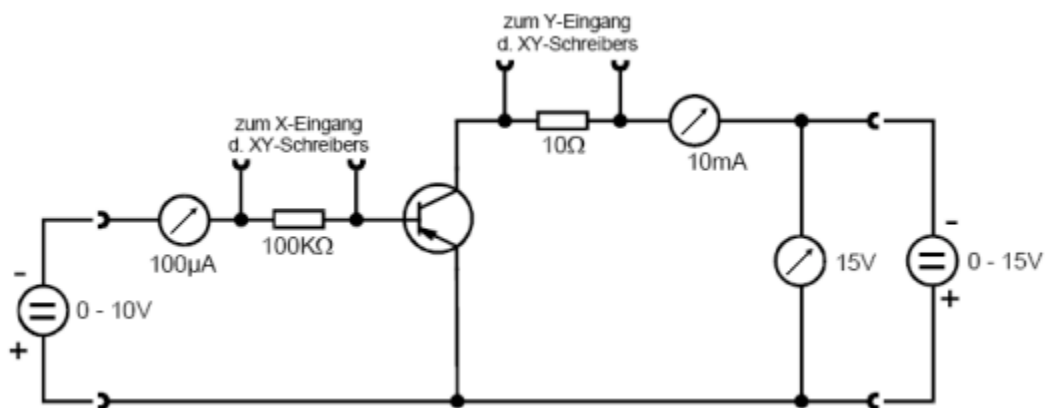


Abbildung 3: Schaltung zur Aufnahme einer Stromverstärkungskennlinie

Zur bestimmung dieses Wertes haben wir die Schaltung nach Abbildung 15 aufgebaut. Die Messung erfolgt analog zu Messung der Eingangskennlinie doch wird hier nicht I_{BE} sondern I_C gemessen.

4.4 Untersuchung des Einflusses des Arbeitspunktes

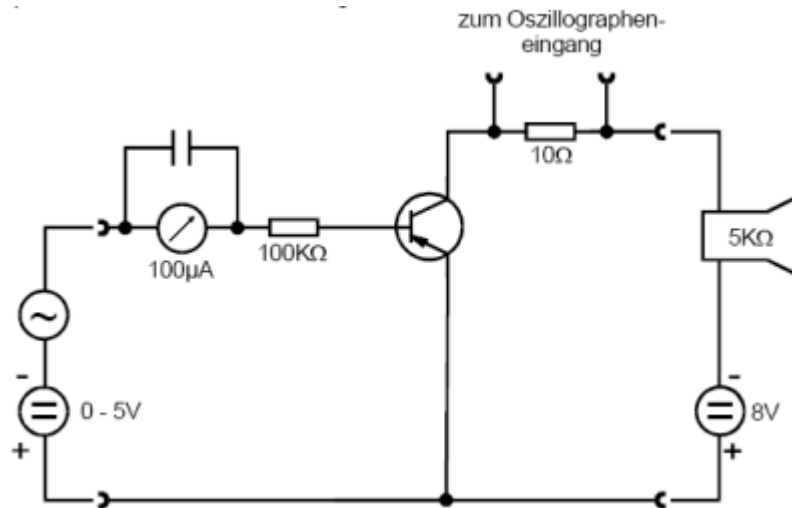


Abbildung 4: Schaltung zur Untersuchung des Arbeitspunktes auf einen Transistorverstärker

Die Schaltung wird nach Abbildung 16 aufgebaut, der Sinusgenerator mit einem Wert von 300Hz eingestellt, die Amplitude des Signals auf 1 V. Zur Messung wird das Signal der Gleichspannungsquelle variiert und am angeschlossenen Oszillator sowie dem Lautsprecher lassen sich optisch und akkustisch die Einflüsse erkennen.

4.5 Messung des Frequenzganges der Stromverstärkung

Wir verwenden eine Schaltung gemäß Abb. 17 und varrieren die Frequenz des Wechselstroms von 1 kHz bis 200 kHz und messen die an dem 100kΩ abfallende Spannung. Daraus berechnet sich dann über das ohmsche Gesetz der fließende Strom.

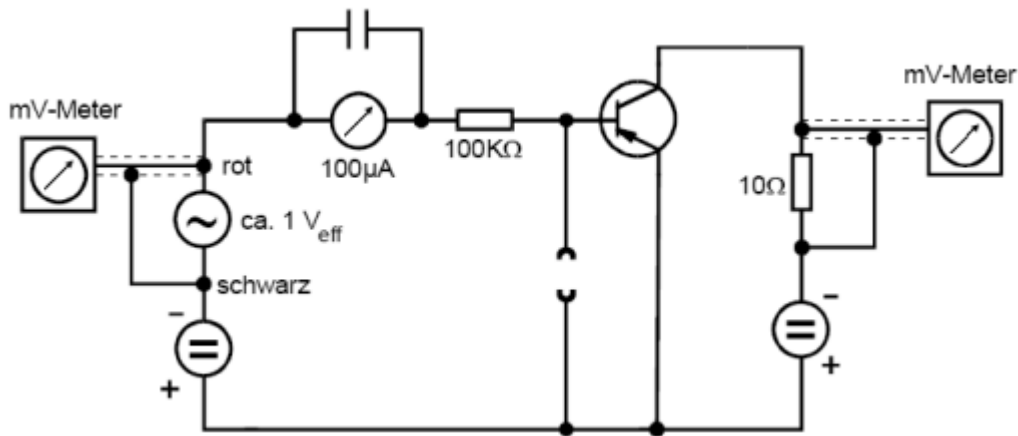


Abbildung 5: Schaltung zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Stromverstärkung

4.6 Messung der Spannungsverstärkung

Wir ersetzen den 10Ω Widerstand durch einen mit $1k\Omega$ und messen die Werte von U_{CE} und U_{BE} .

4.7 Auswertung

Zur Fehlerabschätzung: Die Fehler der verschiedenen Messreihen ergeben sich durch die Fehler der Ausgleichsrechnung und die absoluten fehler der dazugehörigen Größen dann durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung.

4.7.1 Eingangskennlinie eines Transistors

Die Messung U_{BE1} fand dabei bei $U_{CE} = 0V$ statt. Die Messung U_{BE1} hingegen bei $U_{CE} = 5V$

Das Diagramm (siehe Anhang) zeigt Messwerte sowie (jeweils) eine Ausgleichsfunktion der Form $ae^{(bx)}$.

4.7.2 Der Eingangswiderstand r_{BE}

Der Eingangswiderstand r_{BE} berechnet sich nach der bereits bekannten Formel

$$r_{BE} := \left(\frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \right)$$

$I_B[\mu A]$	$U_{BE1}[V]$	$U_{BE2}[V]$
0	-0,0363	0,0447
2	0,0067	0,1034
5	0,0152	0,1323
6	0,019	0,1375
10	0,0336	0,1534
15	0,0445	0,1666
20	0,053	0,1759
30	0,065	0,1895
40	0,074	0,1992
50	0,0812	0,205
60	0,087	0,209
70	0,092	0,213
80	0,0965	0,215
90	0,1005	0,219
100	0,1043	0,222

Tabelle 1: Messungen für die Eingangskennlinien eines Transistors

Den Wert für r_{BE} bekommen wir dabei durch die Ausgleichsrechnung mit folgender Gleichung:

$$r_{BE} = \frac{1}{bx}$$

Durch die Ausgleichsrechnung erhalten wir folgende Parameter (für $U_{BE} = 5$ V):

a	b
$0,0268758 \pm 0,006415$	$37,0136 \pm 1,11$

Tabelle 2: Parameter der Eingangskennlinien

Somit ergibt sich dann $r_{BE} = 900,57 \pm 0,0081\Omega$

Mit dem Fehler aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach:

$$s = \sqrt{s_b^2 \frac{1}{b^2}}$$

4.7.3 Ausgangskennlinien eines Transistors

Die in der Tabelle dargestellten Werte I_{C_x} ergeben sich durch das ohmsche Gesetz aus dem Basistrom und dem Spannungsabfall an dem ohmschen Widerstand. Die Messungen erfolgten für $x = 1$ bei $I_B = 30\mu A$ und für $x = 2$ bei $I_B = 50\mu A$. r_{CE} berechnet sich dabei durch:

$$r_{CE} := \left(\frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right)$$

Wir benutzen als Ausgleichsfunktion eine Gerade der Form $f(x) = a \cdot x + b$. Diese gilt jedoch nur für die Werte nach dem Sättigungsbereich (nur diese sind jedoch auch im Diagramm aufgetragen). Mit den Parametern:

Der Widerstand r_{CE} ist nun die reziproke Steigung der Ausgleichsgeraden. Wir er-

	a	b
$I_B = 30\mu A$	$0,000218167 \pm 1,195 \cdot 10^{-5}$	$0,00287942 \pm 7,765 \cdot 10^{-5}$
$I_B = 50\mu A$	$0,000399688 \pm 1,851 \cdot 10^{-5}$	$0,00602797 \pm 1,203 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 3: Parameter der Ausgangskennlinien

halten somit für den Basistrom $I_B = 30\mu A$ einen Widerstand von $r_{CE} = 4583,65 \pm 15,85\Omega$ und für $I_B = 50\mu A$ einen Widerstand von $r_{CE} = 2501,96 \pm 10,76\Omega$. Die Fehler ermittelten wir aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung mittels:

$$s = \sqrt{s_a \cdot \frac{1}{a^2}}$$

Wobei a die Steigung der Ausgleichsgeraden und s_a deren Fehler darstellt. Die Messwerte sind in Tabelle 4.7.3 auf der nächsten Seite enthalten.

4.7.4 Stromverstärkungskennlinie eines Transistors

Die Messung der Werte erfolgten bei $U_{CE} = 5V$. Das Diagramm mit der parabolischen Ausgleichsfunktion der Form $f(x) = ax^2 + bx + c$ ist im Anhang zu finden. Die Parameter ergeben sich zu:

Der Stromverstärkungsfaktor β ergibt sich dann durch die Ableitung dieser Funktion im Punkt $I_B = 30\mu A$ und folgt somit zu $\beta \approx 158,9 \pm 5,81$.

Der Fehler hierbei ergab sich auch wieder aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach der Formel:

$$s = \sqrt{s_a^2 \cdot 2x^2 + s_b^2}$$

Wobei s_a und s_b jeweils die Fehler der Parameter und x die Messstelle ($I_B = 30\mu A$).

$U_{CE}[V]$	$U_{\Omega_1}[V]$	$I_{C1}[A]$	$U_{\Omega_1}[V]$	$I_{C1}[A]$
0,5	0,031	0,0031	0,0638	0,00638
1	0,032	0,0032	0,0658	0,00658
1,5	0,0329	0,00329	0,0675	0,00675
2	0,0336	0,00336	0,0691	0,00691
3	0,035	0,0035	0,072	0,0072
4	0,0367	0,00367	0,075	0,0075
5	0,038	0,0038	0,078	0,0078
7	0,041	0,0041	0,0848	0,00848
9	0,0488	0,00488	0,0939	0,00939
11	0,0525	0,00525	0,104	0,0104
12,5	0,0585	0,00585	0,115	0,0115

Tabelle 4: Messungen für die Ausgangskennlinie eines Transistors

a	b	c
$594308 \pm 6.546 \cdot 10^4$	$123.264 \pm 4, 286$	$-4.03748 \cdot 10^{-5} \pm 4.87 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 5: Parameter der Stromverstärkungskennlinie

4.7.5 Qualitative Untersuchung des Einflusses des Arbeitspunktes

Veränderten wir die Frequenz der Spannungsquelle und entfernten uns vom Arbeitspunkt, merkten wir das der Ton höher wurde. Dies ist zurückzuführen auf das entstehen von Oberwellen, die auch am Oszillograph zu erkennen waren.

4.7.6 Frequenzgang der Stromverstärkung eines Transistors

Wir erhalten durch die oben beschriebenen Versuchsanordnung die folgenden Messwerte:

Den Faktor $\beta(\nu)$ erhält man als Quotient aus I_C und dem konstanten Basisstrom $I_B = 30\mu A$.

Die in dem Diagramm (siehe Anhang) benutzte Ausgleichsfunktion ergibt sich durch die im Skript angegebene Gleichung:

$$\beta(\nu) = \beta(0) \frac{1}{\sqrt{1 + \nu^2 c}}$$

Als $\beta(0)$ verwendeten wir die Messung bei 1 kHz. Dadurch ergibt sich das c zu $0,00162127 \pm 6.545 \cdot 10^{-5}$.

Damit errechnet sich die Grenzfrequenz durch einsetzen von $\frac{\beta(0)}{\sqrt{2}}$ zu

$$\nu_g = \frac{1}{\sqrt{c}} = 24,84 \pm 2,11 \cdot 10^{-9} \text{ kHz}$$

$I_B [mA]$	$I_C [mA]$
0	0,1
0,0020	0,3
0,0050	0,6
0,0060	0,7
0,0010	1,2
0,0015	1,9
0,0020	2,6
0,0030	4,2
0,0040	5,9
0,0050	7,7
0,0060	9,4
0,0062	9,9

Tabelle 6: Messungen für die Stromverstärkungskennlinie

ν [kHz]	I_C [A]	$\beta(\nu)$
1	0,00160	160
2	0,00160	160
3	0,00160	160
5	0,00155	155
10	0,00145	145
20	0,00125	120
30	0,00100	100
50	0,00073	73
75	0,00052	52
100	0,00040	40
150	0,00028	28
200	0,00022	20

Tabelle 7: Messwerte für die Frequenzabhängigkeit

Der Fehler ergab sich auch hier wieder durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung nach:

Mit den gegebenen Werten läßt sich nun C_{BE} berechnen zu:

$$\nu_g = \frac{1}{2\pi r_{BE} C_{BE}}$$

Daraus ergibt sich dann:

$$C_{BE} = \frac{1}{2\pi \mu_g r_{BE}}$$

Durch einsetzen der bekannten Werte erhält man dann $C_{BE} = 1,19 \cdot 10^{-6} F$. Sicherlich ist dieser Wert fehlerbehaftet. Der Fehler ergibt sich allerdings nach Gauß zu:

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi r_{BE}^2 \nu_g}\right)^2 s_r^2 + \left(\frac{1}{2\pi r_{BE} \nu_g^2}\right)^2 s_\nu^2}$$

Und ergibt sich dann zu einer Größenordnung von ca. 10^{-12} , so daß Bauteiltoleranzen und Messungenauigkeiten erheblich größere Fehler liefern dürfte.

4.8 Spannungsverstärkung einer Emitterschaltung

Wir messen einen Spannungsverstärkerfaktor V von ca. 86.

Wir erhalten als gerechneten Spannungsverstärkungsfaktor:

$$V = \beta \frac{R_C}{r_{BE}}$$

Mit den bekannten Werten erhalten wir damit für $V = 177,67$. Dieser Wert ist natürlich durch die nicht exakte Bestimmung von r_{BE} fehlerbehaftet (nach Gauß), jedoch liegt dieser in der Größenordnung von 10^{-7} , so daß (leider unbekannt) Toleranzen der Messgeräte bzw. Bauteile erheblich schwerer wiegen dürften.

Man erkennt (wie vorhergesagt) eine deutliche Diskrepanz (um ca. den Faktor 2) zwischen den Werten, was jedoch wohl darauf beruht, daß die verwendete Gleichung lediglich eine sehr grobe Näherung darstellt und wie bereits erwähnt nicht alle Fehler bekannt sind.