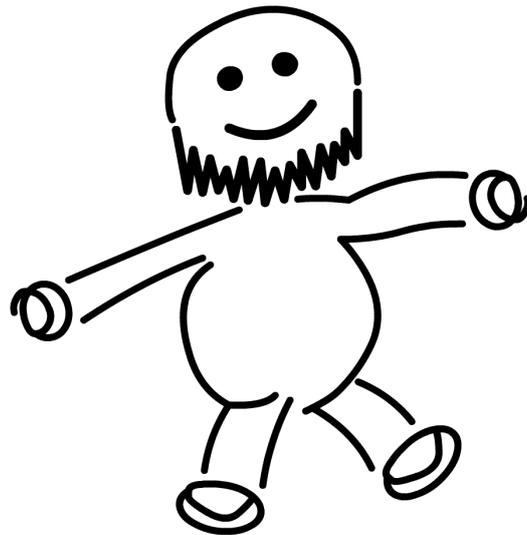


Physikalisches Praktikum für das Hauptfach Physik

Versuch 21

Der Transistor

Wintersemester 2005 / 2006



Name:	Daniel Scholz
Mitarbeiter:	Hauke Rohmeyer
E-Mail:	physik@mehr-davon.de
Gruppe:	B9
Assistent:	André Holz
Durchgeführt am:	08. Februar 2006
Protokoll abgeben:	09. Februar 2006
Protokoll verbessert:	—

Testiert: _____

1 Einleitung

Der Transistor ist das wichtigste Bauelement in den heutigen elektronischen Schaltungen. Es ist diejenige technische Funktionseinheit, die je von der Menschheit in den höchsten Gesamtstückzahlen produziert wurde. In diesem Versuch wollen wir sein Verhalten untersuchen, indem wir seine Kennlinien aufzeichnen und sein Verhalten in einem Schwingkreis beobachten.

2 Theorie

2.1 Elektronen in Festkörpern

Je nach spezifischem Widerstand ϱ eines Festkörpers, teilt man diese in verschiedene Gruppen ein:

- (1) Leiter: $\varrho < 10^{-8} \Omega m$
- (2) Halbleiter: $10^{-8} \Omega m < \varrho < 10^{16} \Omega m$
- (3) Isolatoren: $\varrho > 10^{16} \Omega m$.

Temperatur, Druck und andere äußere Einwirkungen können den spezifischen Widerstand eines Festkörpers verändern. So kann man zum Beispiel die Leitfähigkeit eines Halbleiters durch das Hinzufügen von Fremdatomen erhöhen [siehe 2.3].

Elektronen die an Atome gebunden sind, können sich nur auf diskreten Energieniveaus bewegen. Ab einer bestimmten Elektronenenergie, der **Ionisierungsgrenze** kann das Atom das Elektron nicht mehr an sich binden und das Elektron wird zu einem freien Elektron.

2.2 Das Bändermodell

Haben Atome einen großen Abstand zueinander, so sind ihre Zustände energetisch gleich. Verringert sich der Abstand zwischen ihnen, so entstehen unterschiedliche Zustände, der eine liegt energetisch tiefer, der andere höher als zuvor. Je größer die Anzahl der Atome ist, desto dichter liegen die Niveaus beieinander. In einem Festkörper ist die Anzahl der Atome sehr groß, während ihr Abstand zueinander sehr klein ist. Die Energieniveaus liegen so dicht nebeneinander, dass man sie als **Band** bezeichnet. Es entstehen mehrer Bänder, die energetisch dicht oder weniger dicht beianander liegen können. Sie können sich sogar überlappen.

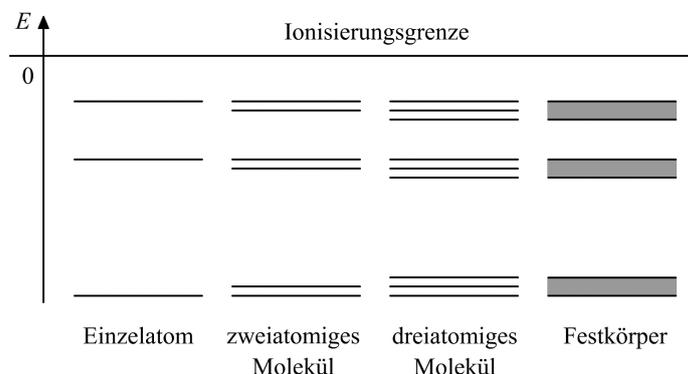


Abbildung 1: Veranschaulichung des Bändermodells.

Das energetisch niedrigste von Valenzelektronen vollständig besetzte Band wird **Valenzband** genannt, das energetisch niedrigste Band, in dem noch unbesetzte Zustände vorhanden sind nennt man das **Leitungsband**. Damit ein Strom fließt muss ein Elektron also in ein höheres Niveau gehoben werden. Ist dieses Band jedoch vollständig besetzt ist dies nicht möglich und die Elektronen können die „verbotene Zone“ nicht überspringen. Bei Leitern ist das Leitungsband also teilweise besetzt, oder das leere Leitungsband überlappt mit dem Valenzband, so dass schließlich wieder ein halb gefülltes Leitungsband entsteht. Bei Halbleitern und Isolatoren sind Leitungs- und Valenzband durch eine „verbotene Zone“ getrennt. Die Breite dieser Zone entscheidet über die Leitfähigkeit des Materials.

Bei Halbleitern ist das Leitungsband bei niedrigen Temperaturen leer. Bei Zimmertemperatur befindet sich eine bestimmte Anzahl von Elektronen aufgrund der thermischen Anregung im Leitungsband. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters nimmt also im Gegensatz zu metallischen Leitern mit der Temperatur zu.

2.3 Dotierung

Halbleiter, die in technischen Gebieten Anwendung finden, sind meist keine **Eigenhalbleiter**, bei denen die Leitfähigkeit auf die Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband beruht. Man benutzt sogenannte **dotierte Halbleiter**, bei denen Fremdatome gezielt in die Gitterstruktur des ursprünglichen Halbleiters eingebracht werden.

Abbildung 2 zeigt ein Siliciumgitter, in dem einige Siliciumatome durch Arsenatome ersetzt sind.

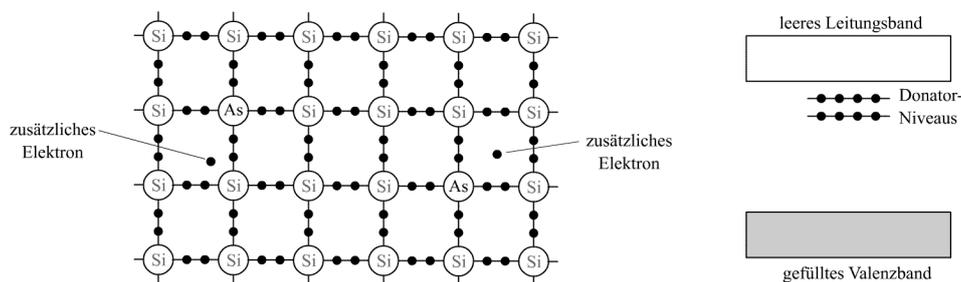


Abbildung 2: n-dotiertes Silicium.

Vier der fünf Valenzelektronen des Arsens werden vom Siliciumgitter gebunden. Das fünfte Elektron ist nur sehr schwach an das Arsenatom gebunden. Die zusätzlichen Elektronen bilden diskrete Energieniveaus dicht unter dem Leitungsband. Man spricht von den **Donator-Niveaus**, da sie durch geringe Energiezufuhr Elektronen in das Leitungsband abgeben. Bereits bei Zimmertemperatur ist die Energie hoch genug und alle zusätzlichen Elektronen befinden sich im Leitungsband. Da der Stromfluss in diesem Fall hauptsächlich auf dem Transport von den negativen Elektronen basiert, spricht man von einem **n-dotierten Halbleiter**.

Bringt man dagegen Fremdatome wie z.B. Gallium in das Gitter ein, die ein Valenzelektron weniger haben als die Grundsubstanz, so wird das „fehlende“ Elektron durch eines aus dem Valenzband ersetzt. Somit sind die dicht über dem Valenzband liegenden Niveaus, die so genannten **Akzeptor-Niveaus**, leer.

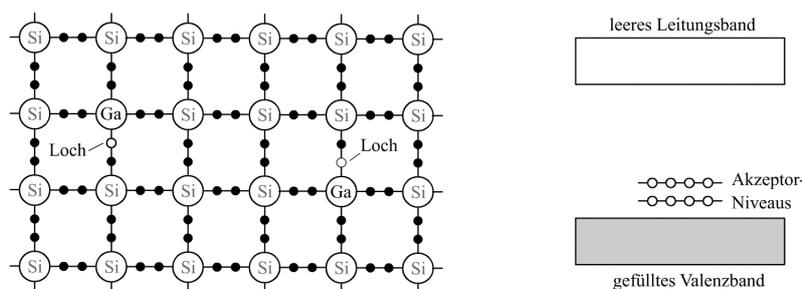


Abbildung 3: p-dotiertes Silicium.

Es entstehen also Löcher im Valenzband, die sich wie positive Ladungsträger verhalten. Deshalb spricht man in diesem Fall von einem **p-dotierten Halbleiter**.

2.4 Die Diode

In einer Diode sind n- und p- Halbleiter miteinander kombiniert. Meist wird hierzu ein Siliciumkristall auf einer Seite mit einem Donator und auf der

anderen Seite mit einem Akzeptor dotiert. Dazwischen befindet sich die sogenannte **Übergangszone**.

Stehen ein n- und ein p-Halbleiter in engem Kontakt, so gleichen sich die unterschiedlichen Konzentrationen von Elektronen und Löchern in beiden Gebieten aus, so dass sich in dem Übergangsgebiet ein Gleichgewichtszustand einstellt. Es entsteht eine Ladungsdoppelschicht, wobei sich negative Ladungen auf der p-Seite und positive Teilchen auf der n-Seite befinden. Die so entstandene Potentialdifferenz verhindert einen weiteren Ladungsfluß.

Wenn der positive Pol einer Spannungsquelle an die p-Seite der Diode angeschlossen ist, so verringert dies die Potentialdifferenz im Übergangsbereich und Strom kann fließen. Die Diode ist in **Durchlassrichtung** gepolt.

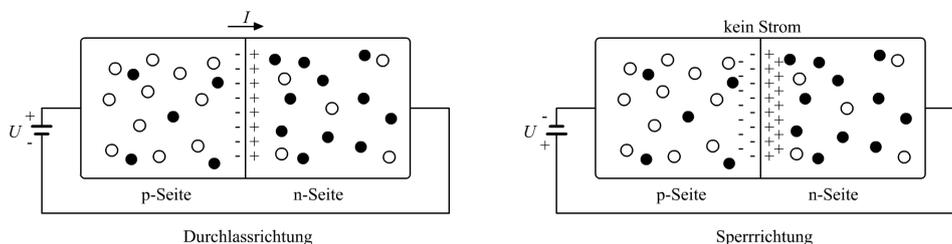


Abbildung 4: Durchlass- und Sperrrichtung bei Dioden.

Ist jedoch der negative Pol der Spannungsquelle an die p-Seite der Diode angeschlossen, so erhöht dies die Potentialdifferenz und die Diffusion der Ladungsträger wird weiterhin unterbunden. Die Diode ist in **Sperrrichtung** gepolt.

2.5 Der Transistor

Bipolarer Transistor

Ein Transistor besteht aus drei unterschiedlich dotierten Schichten. Bei einem pnp Transistor nennt man die oberste p-dotierte Schicht **Kollektor** [C], die darunterliegende sehr dünne n-dotierte Schicht **Basis** [B] und die unterste wiederum p-dotierte Schicht **Emitter** [E]. Bei einem npn Transistor sind die Dotierungen getauscht.

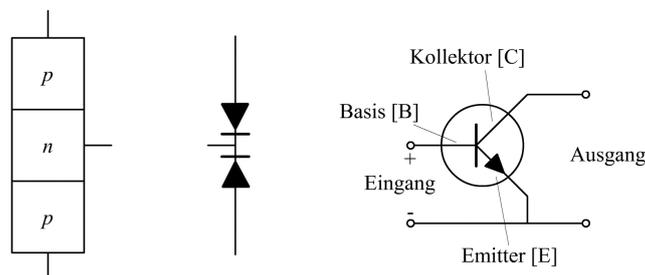


Abbildung 5: Transistor im Aufbau, Ersatzschaltbild und Transistor in Emitterschaltung.

Liegt nun eine Spannung U_{CE} zwischen Emitter und Kollektor an, so führt dies nicht zum Stromfluss, solange kein Basisstrom I_B fließt. Stellt man sich den Transistor als zwei hintereinander geschaltete Dioden vor¹, so sperrt die Diode Basis-Kollektor. Liegt jedoch auch eine Spannung U_{BE} zwischen Emitter und Basis an, so werden die Elektronen vom Emitter zur Basis so stark beschleunigt, dass sie genügend kinetische Energie besitzen, um durch die dünne Basis zum Kollektor zu gelangen. Es fließt also ein Kollektorstrom I_C . Ist die Basis positiv gepolt, so werden einige Elektronen von dieser „abgesogen“. Der Großteil gelangt jedoch vom Emitter zum Kollektor. Es fließt also ein kleiner Basisstrom und ein großer Kollektorstrom. Erhöht man U_{CE} , so erhöht sich auch I_C bis zu einem Sättigungsstrom.

Emitter- Basis und Kollektorschaltung

Man kann den Transistor auf verschiedene Arten in einen Stromkreis einbauen. Die jeweilige Schaltung hat jeweils einen Ein- und einen Ausgang. Je nachdem ob Emitter, Basis oder Kollektor sowohl Ein- als auch Ausgang ist, wird die Schaltung benannt. In Abbildung 5 handelt es sich demnach um eine Emitterschaltung.

Kennlinien des Transistors

Bei der Emitterschaltung steuert der Basis-Emitter-Strom I_B den Stromverstärkungsfaktor β , welcher das Verhältnis

$$I_C = \beta I_B$$

bei konstantem U_{CE} beschreibt. Trägt man nun I_C gegen I_B auf, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Dies ist die **Stromverstärkungskennlinie**.

¹ In der Praxis kann man einen Transistor aufgrund der so resultierenden dicken Basis nicht durch zwei Dioden ersetzen.

Die **Ausgangskennlinie** ist das Verhältnis von I_C zu U_{CE} mit dem Parameter I_B . Abbildung 6 zeigt charakteristische Kennlinien des Transistors.

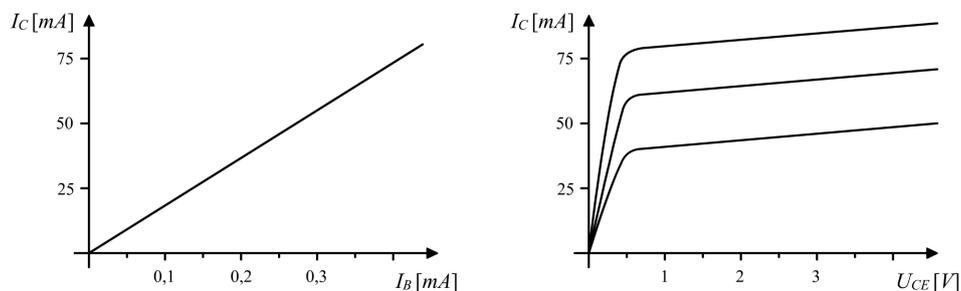


Abbildung 6: Stromverstärkungs- und Ausgangskennlinie in Emitterschaltung.

Den Bereich in der Ausgangskennlinie in dem I_C mit U_{CE} stark ansteigt, nennt man **Sättigungsbereich**. Der Bereich in dem I_C mit U_{CE} kaum noch ansteigt, jedoch stark von I_B abhängt ist der so genannte **aktive Bereich**. Verstärkerschaltungen arbeiten in diesem Bereich, damit das Ausgangssignal nicht zu stark verzerrt wird. Ein typischer Verstärker wie zum Beispiel in einem Walkman, besteht aus mehreren in Reihe geschalteten Transistoren. Damit lässt sich das sehr kleine Spannungssignal des Tonkopfes soweit verstärken, dass der Kopfhörer angesteuert werden kann.

Feldeffekttransistor

Der Feldeffekttransistor [FET] ist ein **unipolarer Transistor**. Im Gegensatz zum bipolaren Transistor transportiert der FET je nach Typ nur Löcher oder Elektronen. Zur Unterscheidung vom bipolaren Transistor nennt man Emitter Basis und Kollektor beim FET Source [S], Gate [G] und Drain [D]. Der Vorteil des FET ist, dass am Gate kein Strom I_G fließt, der in der Mikroelektronik unerwünscht ist. Ein Isolator verhindert den Stromfluss zwischen Source und Gate. Das durch eine Spannung U_G erzeugte elektrische Feld regelt den Source-Drain-Strom I_{SD} .

2.6 Schwingkreis und Rückkopplung

Durch die Parallelschaltung von Spule und Kondensator bekommen wir einen LC Schwingkreis. Um diesen normalerweise gedämpften Schwingkreis als ungedämpft behandeln zu können, muss dem System im richtigen Zeitpunkt Energie zugeführt werden. Dies wird durch Rückkopplung erreicht. Der Transistor wird im Versuch über die Sekundärspule mit dem Schwingkreis gekoppelt. Durch die Kapazität des Rückkopplungskreises wird der Strom etwas verzögert. So wird mit Hilfe des Transistors dem System die durch die Dämpfung verlorene Energie wieder zurückgegeben. Die Impedanz

des Kondensators ist gegeben durch

$$Z_C = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}.$$

Mit $\omega = 2\pi f$ kann die Frequenz f des Schwingkreises berechnet werden. Es gilt

$$f = \frac{I}{2\pi C U}. \quad (1)$$

Diese Formel wird in der Auswertung benötigt.

3 Durchführung

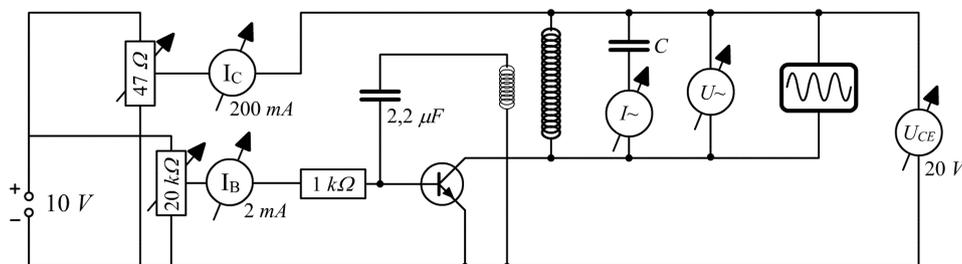


Abbildung 7: Versuchsaufbau.

- (1) Aufbau der Schaltung, siehe Abbildung 7.
- (2) Aufnahme der Kennlinien von I_C in Abhängigkeit von U_{CE} für die Basisströme $I_B = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5 \text{ mA}$. Es sollten besonders viele Messpunkte für kleine U_{CE} aufgenommen werden.
- (3) Aufnahme der Kennlinie von I_C in Abhängigkeit von I_B bei konstantem $U_{CE} = 8 \text{ V}$.
- (4) Einstellung des Arbeitspunktes $I_B = 0.4 \text{ mA}$ und $U_{CE} = 8 \text{ V}$ bei ausgeschalteter Schwingung.
- (5) Rückkopplung einschalten [Einführung der Rückkopplungsspule in die große Luftspule. Der Schwingungseinsatz wird am Ausschlag des Wechselstrominstrumentes beobachtet]. Mit dem Oszilloskop wird überprüft, ob die Schwingung sinusförmig verläuft. Tut sie dies nicht, so muss die Rückkoppelspule umgepolt werden.
- (6) Für 7 Kondensatoren [$C \approx 0.09; 0.24; 0.50; 0.71; 0.96; 1.40; 2.12 \mu\text{F}$] sind Wechselstrom I_{\sim} und Wechselspannung U_{\sim} des Schwingkreises zu messen. Es ist darauf zu achten, dass die Messgeräte für Wechselstrom und Wechselspannung jeweils nur die Hälfte des Vollausschlages

anzeigen. Die Rückkopplung muss also für jeden Kondensator neu eingestellt werden. Mit Hilfe des Oszilloskopes wird die jeweilige Schwingungsfrequenz oder Periodendauer der Schwingung bestimmt.

- (7) Die genauen Kapazitäten der verwendeten Kondensatoren werden gemessen.

4 Auswertung

4.1 Ausgangskennlinie

Für die fünf verschiedenen Basisströme sind die Messwerte von I_C in Abhängigkeit von U_{CE} in Abbildung 8 aufgetragen.

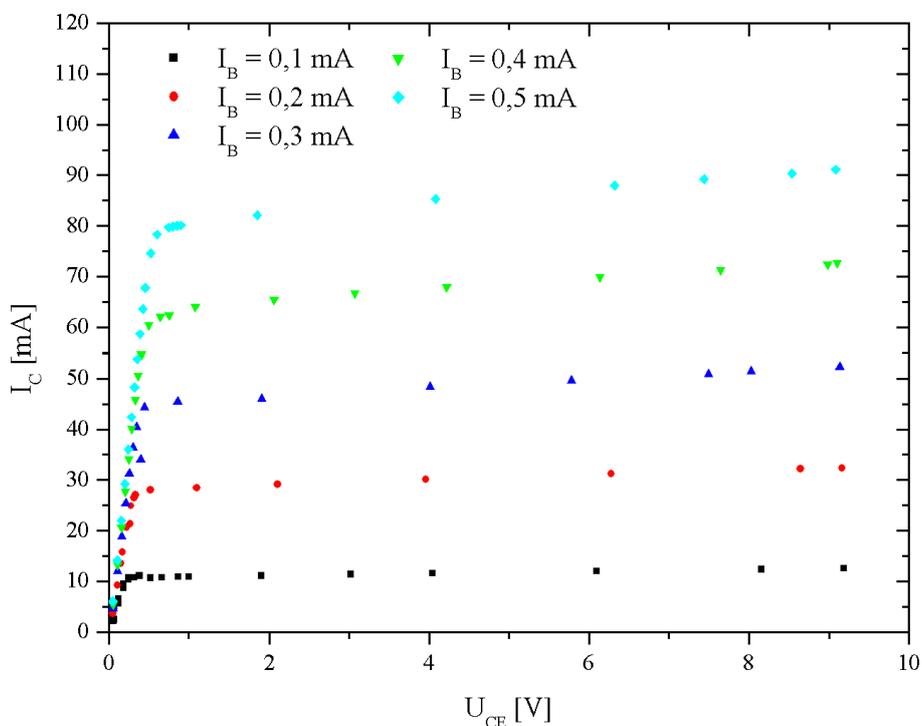


Abbildung 8: Messwerte für die Ausgangskennlinien.

4.2 Stromverstärkung

Um die Stromverstärkung $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ am Arbeitspunkt [$I_B = 0,4$ mA und $U_{CE} = 8$ V] zu berechnen, tragen wir I_C gegen I_B in Abbildung 9 auf. Die Stromverstärkung lässt sich dann an der Steigung einer Regressionsgeraden ablesen.

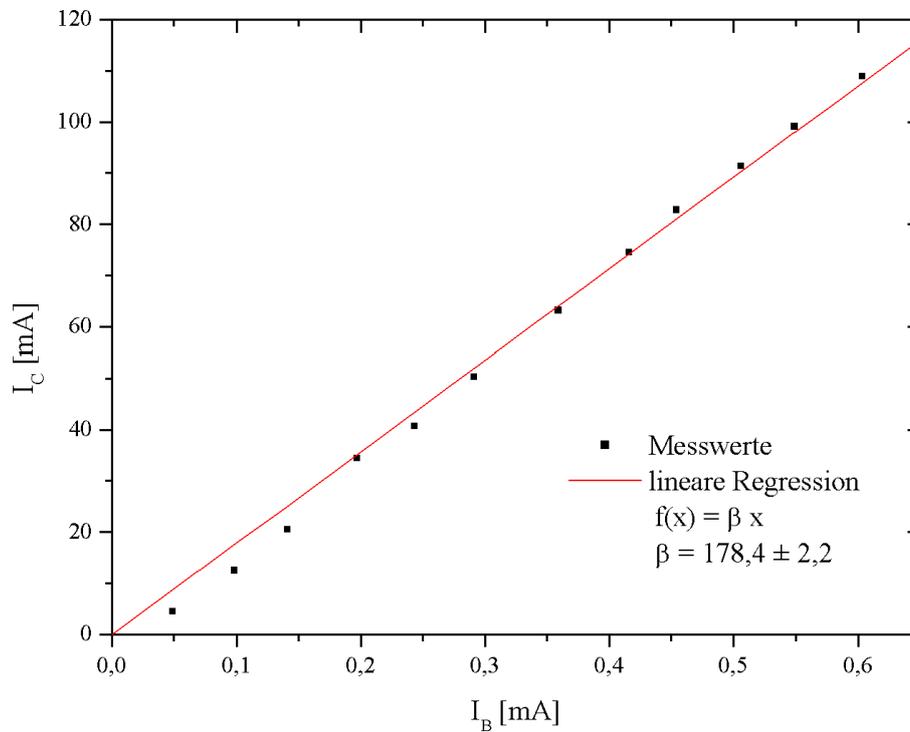


Abbildung 9: Stromverstärkungskennlinie.

Es ergibt sich eine Stromverstärkung von

$$\beta = 178,4 \pm 2,2.$$

4.3 Rückkopplungsschwingkreis

Nach Gleichung (1) gilt

$$f = \frac{I}{2\pi CU}.$$

Damit können wir die Frequenz des Schwingkreises berechnen. Die berechneten und gemessenen Werte stellen wir in Tabelle 1 dar.

In einem ungedämpften Schwingkreis gilt

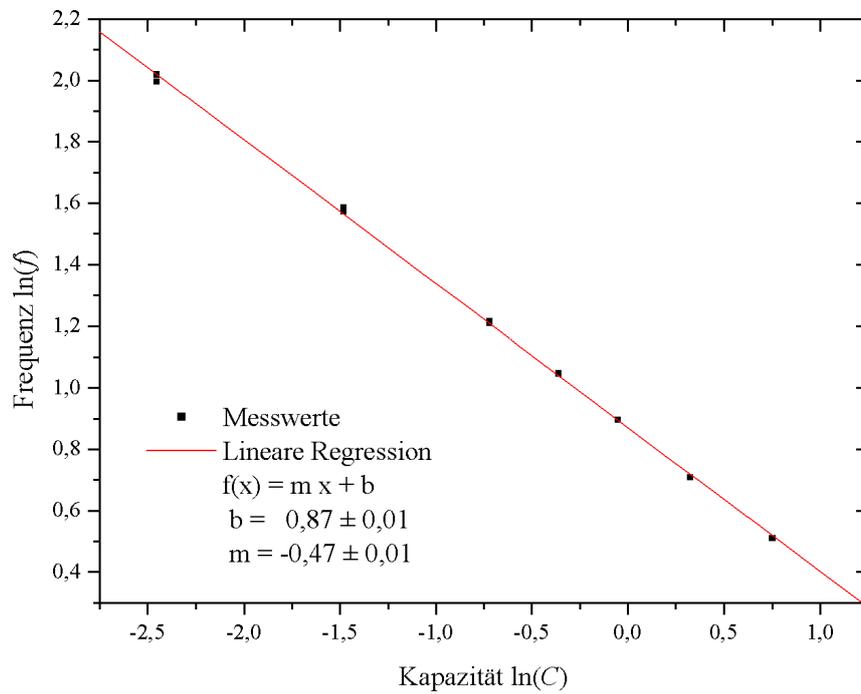
$$f = \frac{I}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ln(f) &= \ln\left(\frac{I}{2\pi\sqrt{LC}}\right) = \ln\left(\frac{I}{2\pi\sqrt{L}}\right) - \ln(\sqrt{C}) \\ &= -\frac{1}{2}\ln(C) + \ln\left(\frac{I}{2\pi\sqrt{L}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$C [\mu F]$	$U \sim [V]$	$I \sim [mA]$	$f [kHz]$	f berechnet $[kHz]$
0,086	6,12	43,6	7,53	13,18
0,086	6,09	56	7,36	17,01
0,227	5,96	61,6	4,82	7,246
0,227	5,2	62	4,88	8,360
0,487	4,82	81,4	3,35	5,519
0,487	3,95	58	3,37	4,799
0,696	4,95	84	2,85	3,881
0,95	2,7	50	2,45	3,102
1,386	2,7	56	2,03	2,382
2,118	2,8	72	1,666	1,933

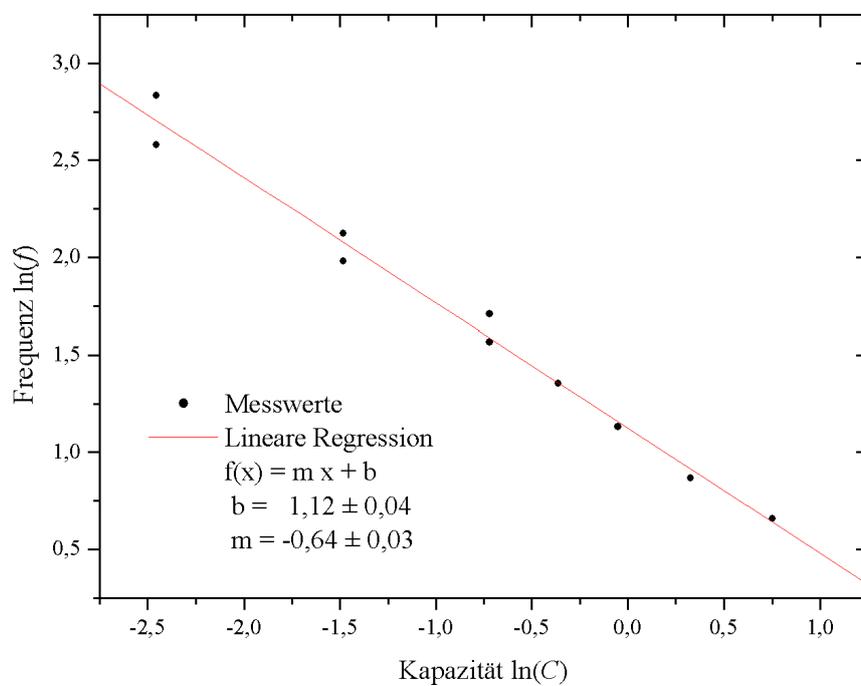
Tabelle 1: Berechnung der Frequenz des Schwingkreises.

Tragen wir nun die Schwingungsfrequenz f doppeltlogarithmisch gegen die Kapazität C des verwendeten Kondensators auf und führen eine lineare Regression durch, so erwarten wir wie in Gleichung (2) abzulesen ist, dass die Regressionsgrade eine Steigung von $-0,5$ hat.

Abbildung 10: Abhängigkeit von f und C - gemessene Werte.

Wir erhalten eine Steigung von

$$m = -0,47 \pm 0,01.$$

Abbildung 11: Abhängigkeit von f und C - berechnete Werte.

Bei den berechneten Werten von f erhalten wir eine Steigung von

$$m = -0,64 \pm 0,03.$$

5 Diskussion

5.1 Ausgangskennlinie

Wie erwartet zeigt sich in der Ausgangskennlinie für kleine U_{CE} ein stark nichtlineares Verhältnis von I_C und U_{CE} . Mit zunehmender Spannung wird das Verhältnis nahezu linear.

5.2 Stromverstärkung

Es ergibt sich eine große Stromverstärkung mit kleinem Fehler. Es hat sich gelohnt abweichend vom Praktikumsskript mehr Messwerte aufzunehmen.

5.3 Rückkopplungsschwingkreis

Die starken Abweichungen der berechneten Frequenzen von denen mit dem Oszilloskop gemessenen Frequenzen können wir nur auf Ableseungenauigkeiten von $U \sim$ und $I \sim$ zurückführen. Die Steigungen der Regressionsgraden bestätigen, dass die am Oszilloskop gemessenen Werte genauer sind. Der erwartete Wert von $m = -0,5$ liegt leider nicht im Fehlerbalken unserer Messung. Dies liegt wohl an den Messungenauigkeiten des Oszilloskops.

Eigene Kommentare

[Gut, dass man sich beim Aufbau von Schaltkreisen immer schön auf Hauke verlassen kann :). Versuch sonst etwas langweilig, aber Theorie recht interessant und Auswertung recht einfach.]_{Daniel}

[Ja, die Schaltung aufzubauen ist tatsächlich immer das Highlight eines jeden Versuches. Heute war mal wieder Fingespitzengefühl gefragt, weil sich die Potentiometer nur sehr schlecht genau einstellen ließen. Die Auswertung war ein Traum, so könnte es öfter sein. Da ist der Lerneffekt auch gleich viel größer, wenn man sich nicht mit einer ewig langen Auswertung rumplagen muss. Und sogar bei der Theorie hab ich ne Menge gelernt.]_{Hauke}