

# Versuch 17

## Elektronik

### Der Transistor

---

Praktikant:            Joscha Knolle  
                             Ole Schumann  
E-Mail:                joscha@zimmer209.eu  
Durchgeführt am:    18.09.2012  
Abgabe:                01.10.2012

Testiert:
-----------

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2. Theorie</b>	<b>2</b>
2.1. Halbleiter . . . . .	2
2.2. Dotierung . . . . .	3
2.3. Bipolare Transistoren . . . . .	3
<b>3. Materialien &amp; Methoden</b>	<b>4</b>
3.1. Kennlinien eines Transistors . . . . .	4
3.2. Schwingkreis mit Transistor . . . . .	5
3.3. Versuchsaufbau . . . . .	5
<b>4. Durchführung</b>	<b>6</b>
4.1. Erste Messreihe . . . . .	6
4.2. Zweite Messreihe . . . . .	6
<b>5. Auswertung</b>	<b>7</b>
5.1. $I_C(U_{EC})$ -Kennlinie . . . . .	7
5.2. $I_C(I_B)$ -Kennlinie . . . . .	7
5.3. Schwingkreis . . . . .	9
<b>6. Diskussion</b>	<b>10</b>
<b>A. Tabellen</b>	<b>I</b>
<b>B. Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>

## 1. Einleitung

In diesem Versuch wollen wir uns mit dem Transistor beschäftigen, welcher vor allem in der Analogelektronik eine wichtige Rolle spielt. Daneben wollen wir uns auch mit der Halbleitertechnik beschäftigen, welche unumgänglich ist, wenn man mit Transistoren arbeitet.

Ziel dieses Versuches ist es, verschiedene Kennlinien des vorliegenden Transistors zu bestimmen und das Verhalten eines Transistors in einem elektrischen Schwingkreis zu untersuchen.

## 2. Theorie

### 2.1. Halbleiter

Nach dem BOHRschen Atommodell wird der positiv geladene Atomkern von den negativ geladenen Elektronen umkreist. Die Elektronen können sich dabei nur in bestimmten Abständen zum Atomkern aufhalten, den Orbitalen. Jedes Orbital entspricht einem Energieniveau, das die Bewegungsenergie der Elektronen auf dem jeweiligen Orbital beschreibt. Ist die Energie eines Elektrons so groß, dass es nicht mehr durch die Anziehungskräfte zum Atomkern gehalten werden kann, verlässt es das Atom und wird zu einem freien *Leitungselektron*. Demgegenüber bezeichnet man ein im Atom gebundenes Elektron als *Valenzelektron*.

Betrachtet man eine Anhäufung vieler Atome, so überlagern sich die Energieniveaus der Elektronen. Man nutzt daher das *Bändermodell* zur Beschreibung elektrischer Leitungsvorgänge. Und zwar fasst man alle Valenzelektronen im Valenzband mit der Energie  $E_V$  und alle Leitungselektronen im Leitungsband mit der Energie  $E_L$  zusammen. Die Energiedifferenz  $\Delta E = E_L - E_V$  wird *Bandabstand* genannt und beschreibt, wie viel Energie ein Valenzelektron durch Wärme, Licht oder elektrische Felder aufnehmen muss, um in das Leitungsband zu wechseln.

Im Energiebereich  $E_V < E < E_L$  können sich folglich keine Elektronen aufhalten. Ist der Bandabstand sehr groß, so liegt ein Isolator vor, da Valenzelektronen nur unter großem Energieaufwand in Leitungselektronen umgewandelt werden können und folglich keine Ladungen durch den Stoff transportiert werden können. Bei einem Leiter hingegen überlappen sich Valenz- und Leitungsband, unter minimalem Energieaufwand können Valenzelektronen in Leitungselektronen umgewandelt werden. Schließlich bezeichnet man als Halbleiter einen Stoff, der einen Bandabstand zwischen dem eines Leiters und eines Isolators hat. Hier reicht schon eine geringe Energieerhöhung, zum Beispiel durch Erwärmung um einige Grad, um Valenzelektronen ins Leitungsband zu heben. [WOL, S. 2 f.]

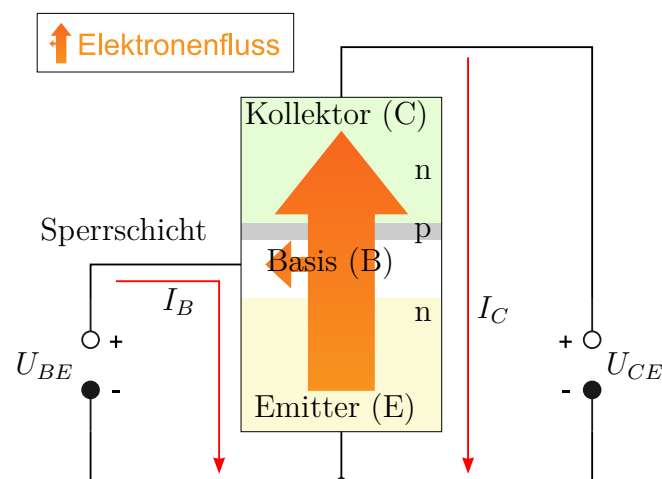
## 2.2. Dotierung

In der Halbleitertechnik werden selten reine Halbleiter eingesetzt, sondern die vorhandenen Materialien durch Einbringen von Fremdatomen „verunreinigt“. Bringt man beispielsweise in ein Siliziumgitter mehrere Arsenatome ein, die ein Valenzelektron mehr als Siliziumatome besitzen, so gibt es einen leichten Überschuss an Elektronen, welche durch eine geringe Energiezufuhr auf das Leiterband gehoben werden können. Aufgrund des Überschusses an negativer Ladung wird diese Art der „Verunreinigung“ n-Dotierung genannt.

Bei der p-Dotierung werden entsprechend Atome eingebracht, welche ein Valenzelektron weniger besitzen als der Ausgangsstoff (hier eignet sich zum Beispiel Gallium) so dass sich positive „Löcher“ bilden. Legt man eine Spannung an, verhalten sich die Löcher wie positive Ladungen, so dass ein Strom fließen kann.

## 2.3. Bipolare Transistoren

Ein bipolarer Transistor besteht aus drei Halbleiterschichten, die abwechselnd dotiert sind. Es gibt also zwei pn-Übergänge und somit können Transistoren als npn-Transistor oder als pnp-Transistor konzipiert werden. Da wir uns in diesem Versuch näher mit einem npn-Transistor beschäftigen wollen, ist in Abbildung 3 der Schaltplan eines npn-Transistors schematisch dargestellt.



**Abbildung 1:** Schaltplan eines Transistors [LP]

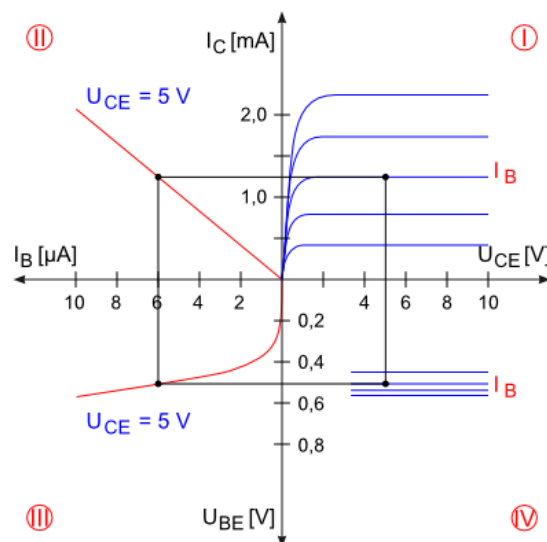
An jede der drei Schichten sind Elektroden angebracht, welche als Emitter E (unterer Anschluss), Basis B (mittlerer Anschluss) und Kollektor C (oberer Anschluss) bezeichnet werden. Je nach Polung der Elektroden bilden sich an den Übergängen Sperrschichten aus oder aber erzeugen einen Leiter. Schaltet man an den B-E Stromkreis das negative Potential an den Emitter und das positive

Potential an die Basis und weiter im C-E Kreis an den Kollektor das positive Potential und erneut das negative an den Emitter, so können Elektronen aus der unteren n-Schicht in die mittlere p-Schicht gelangen und bei genügend kleiner Dicke dieser Schicht auch weiter dem Potentialgefälle in Richtung Kollektor folgen.

### 3. Materialien & Methoden

#### 3.1. Kennlinien eines Transistors

Die verschiedenen Ströme und Spannungen, die ebenfalls in Abbildung 1 eingezeichnet sind, verhalten sich bei jedem npn-Transistor mit der von uns verwendeten Emitterschaltung auf charakteristische Weise. Dieses Verhalten kann zum Beispiel durch ein Vierquadranten-Kennlinienfeld dargestellt werden, das beispielhaft in Abbildung 2 zu finden ist.



**Abbildung 2:** Vierquadranten-Kennlinienfeld eines Transistors [LP]

Betrachtet man zu erst die *Eingangsgrößen*  $I_B$  und  $U_{BE}$ , so findet man für  $U_{CE} = \text{const.}$  eine Art exponentielle Zunahme des Stroms  $I_B$ , wenn man  $U_{BE}$  erhöht. Diese Linie ist charakteristisch für die Durchlässigkeit des np-Übergangs zwischen Emitter und Basis. In Abbildung 2 ist diese Linie im III. Quadranten eingezeichnet.

Die *Ausgangsgrößen* des Transistors sind der Kollektorstrom  $I_C$  und die Spannung zwischen Emitter und Kollektor  $U_{CE}$ . Die Kennlinien in diesem Bereich hängen von dem Basisstrom  $I_B$  ab und sind im I. Quadranten in Abbildung 2 gezeichnet. Dabei fällt auf, dass anfangs alle Linien gleich verlaufen, unabhängig von  $I_B$ ,

sich danach jedoch eine Sättigung einstellt und der Strom  $I_C$  nicht mehr von der Spannung  $U_{CE}$  abhängig ist, sondern fast ausschließlich durch den konstanten Strom  $I_B$  bestimmt wird.

Der Bereich, indem nur noch  $I_B$  über die Höhe von  $I_C$  entscheidet wird Arbeitsbereich des Transistors genannt; der Bereich, indem  $I_B$  den Verlauf nicht beeinflusst nennt man Sättigungsbereich.

Eine weitere Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Strom  $I_B$  und dem Strom  $I_C$ . Hier wird wieder der Wert  $U_{CE}$  konstant gehalten (im aktiven Bereich). Dabei findet man einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen diesen Größen:

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B. \quad (1)$$

Es gilt daher: Je steiler die Kennlinie, desto höher ist Stromverstärkung. Diese Kennlinie ist in Abbildung 2 im II. Quadranten dargestellt.

### 3.2. Schwingkreis mit Transistor

In unserer Schaltung wird ein LC-Schwingkreis mit dem Kollektor des Transistors verbunden. Da die Spule einen gewissen Eigenwiderstand  $R_{sp.}$  besitzt, wäre ohne Kopplung mit dem Transistor eine gedämpfte Schwingung auf dem Oszilloskop zu erkennen. Da jedoch eine kleinere Spule, die innerhalb der ersten Spule liegt, mit der Basis des Transistors verbunden ist, wird periodisch Energie in den Schwingkreis durch die Gleichspannungsquelle gebracht. So beobachtet man eine ungedämpfte Schwingung, welche sich mit Hilfe der Impedanz  $Z$  des Kondensators quantifizieren lässt: Es gilt

$$Z = \frac{U_C}{I_C} = -\frac{i}{\omega C}, \quad (2)$$

wobei  $U_C$  die Spannung und  $I_C$  der Strom am Kondensator ist. Über  $\omega = 2\pi f$  findet man die Frequenz des Schwingkreises mit den Effektivwerten von Strom und Spannung schließlich

$$f = \frac{I_{C\text{eff}}}{2\pi U_{C\text{eff}} C}. \quad (3)$$

### 3.3. Versuchsaufbau

Der Versuch wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3 aufgebaut. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Spule korrekt gepolt ist, damit der Schwingkreis vermessen werden kann. Des Weiteren bezeichnet der im Schaltplan eingezeichnete

Kondensator einen Block aus mehreren Kondensatoren, von denen immer einer ausgewählt werden kann. In dem Versuchsaufbau liegt die kleinere Spule locker in der Großen und kann für einzelne Versuchsteile herausgezogen werden.

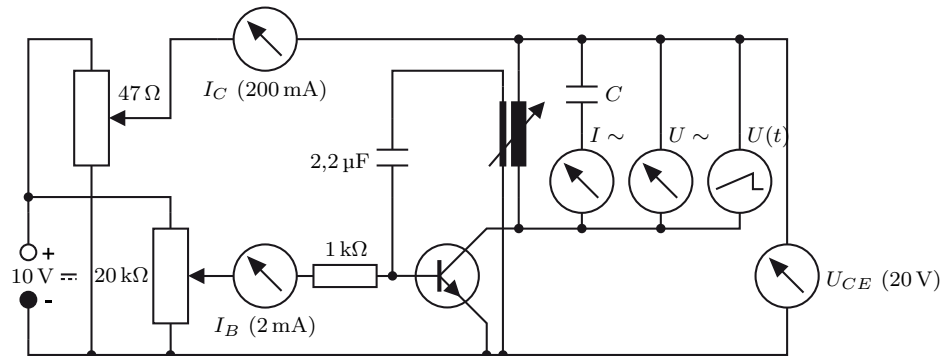


Abbildung 3: Schaltplan des Versuchsaufbaus [LP]

## 4. Durchführung

### 4.1. Erste Messreihe

Zuerst wurde die gesamte Schaltung aufgebaut und auf ihre Funktionalität geprüft. Dann wurde die Rückkopplungsspule herausgezogen und die Kennlinie  $I_C(U_{CE})$  für die fünf Basisströme  $I_B$  aus 0,1 mA, 0,2 mA, 0,3 mA, 0,4 mA und 0,5 mA aufgenommen. Dazu wurde zunächst der Basisstrom über das eine Potentiometer eingestellt, und dann mit dem anderen Potentiometer der Kollektorstrom  $I_C$  und die Spannung  $U_{CE}$  variiert. In kleinen Schritten wurden so für jeden Basisstrom viele Messwerte aufgenommen. Sofern sich der Basisstrom während der Messung änderte, wurde er am ersten Potentiometer nachgeregelt.

### 4.2. Zweite Messreihe

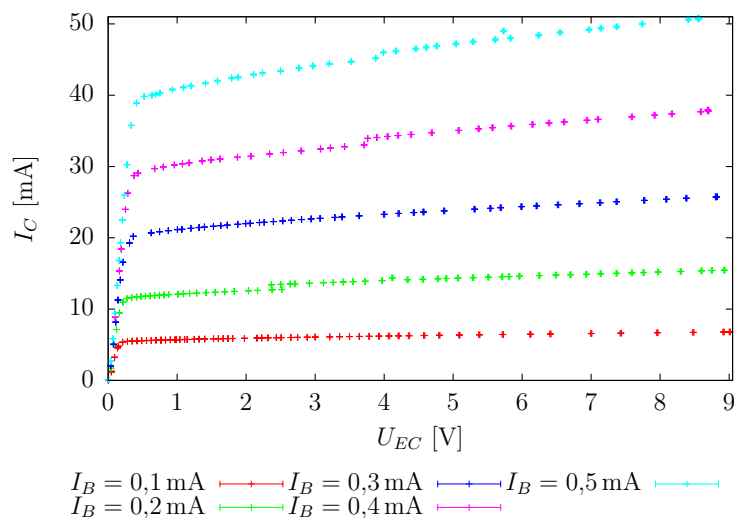
Für die zweite Messreihe wird bei weiterhin ausgeschalteter Schwingung der Arbeitspunkt  $I_B = 0,4$  mA,  $U_{CE} = 8$  V eingestellt, indem die beiden Potentiometer geregelt wurden. Dann wurde die Rückkopplungsspule eingeführt und der entstandene Schwingkreis gemessen. Dazu wurden verschiedene Kondensatoren mit den angegebenen Kapazitäten  $C$  aus 0,11  $\mu$ F, 0,23  $\mu$ F, 0,51  $\mu$ F, 0,67  $\mu$ F, 0,96  $\mu$ F, 1,3  $\mu$ F und 2,1  $\mu$ F in Serie zum Wechselstromamperemeter geschaltet und als Werte die Wechselstromspannung  $U_0$  sowie die Wechselstromstärke  $I_0$  an den jeweiligen Messgeräten abgelesen. Zusätzlich wurde die vom Oszilloskop berechnete Frequenz notiert.

Anschließend wurden noch mit einem Multimeter die genauen Kapazitäten der sieben verwendeten Kondensatoren gemessen.

## 5. Auswertung

### 5.1. $I_C(U_{EC})$ -Kennlinie

Die Messwerte für die aufgenommenen Kennlinien  $I_C(U_{EC})$  bei verschiedenen Basisströmen  $I_B$  ist in Abbildung 4 aufgetragen. Für die Fehler der am Multimeter abgelesenen Stromstärke und Spannung haben wir je eine Skaleneinheit angenommen. Da am Digital-Multimeter der Messbereich automatisch eingestellt wurde, variieren die Fehler zwischen 0,01 mA und 0,1 mA für  $\sigma_I$  und zwischen 0,1 mV und 10 mV für  $\sigma_U$ .



**Abbildung 4:** Messwerte für die  $I_C(U_{EC})$ -Kennlinie

### 5.2. $I_C(I_B)$ -Kennlinie

Zur weiteren Auswertung wollen wir die Kennlinie  $I_C(I_B)$  bei  $U_{EC} = 8\text{ V}$  fitten. Da wir hierzu keine Messwerte direkt aufgenommen haben, müssen wir uns der Werte aus der ersten Messreihe bedienen. Wir wählen dazu für jedes  $I_B$  die beiden Wertepaare aus  $U_{EC}$  und  $I_C$  mit dem größten  $U_{EC} < 8\text{ V}$  beziehungsweise dem kleinsten  $U_{EC} > 8\text{ V}$ .

Da in diesem Bereich die  $I_C(U_{EC})$ -Kennlinie linear verläuft, können wir die Kollektorstromstärke  $I_C$  bei  $U_{EC} = 8\text{ V}$  durch lineare Fortsetzung der beiden



ausgewählten Wertepaare, die wir als  $I_1, U_1$  und  $I_2, U_2$  bezeichnen wollen, erhalten. Man approximiert also

$$I_C = \frac{I_2 - I_1}{U_2 - U_1} (8\text{ V} - U_1) + I_1, \quad (4)$$

wobei sich der Fehler nach dem Gesetz zur Fehlerfortpflanzung zu

$$\sigma_{I_C} = \left[ \sigma_{I_1}^2 \left( 1 - \frac{8\text{ V} - U_1}{U_2 - U_1} \right)^2 + \sigma_{U_1}^2 \left( \frac{I_2 - I_1}{U_2 - U_1} \right)^2 \left( \frac{8\text{ V} - U_1}{U_2 - U_1} - 1 \right)^2 + \sigma_{I_2}^2 \left( \frac{8\text{ V} - U_1}{U_2 - U_1} \right)^2 + \sigma_{U_2}^2 \frac{(I_2 - I_1)^2}{(U_2 - U_1)^2} (8\text{ V} - U_1)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ergibt. Die so erhaltenen Messwerte sind in Tabelle A aufgeführt und in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Zusätzlich wurde mit `gnuplot` ein  $\chi^2$ -Fit auf den linearen Zusammenhang

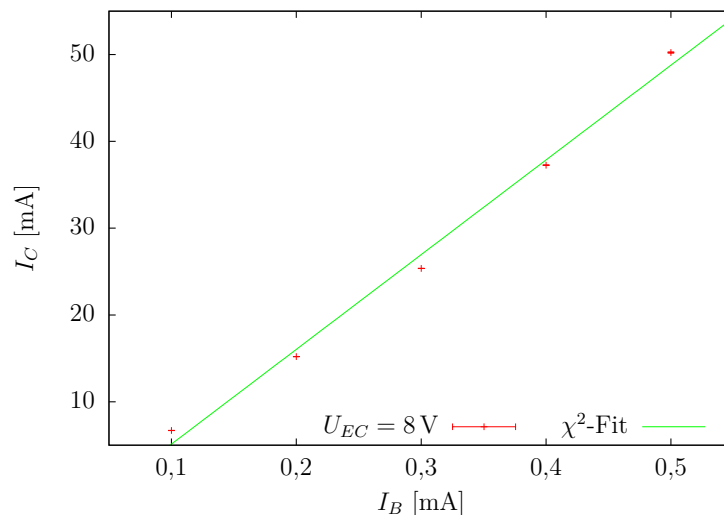
$$I_C = \alpha + \beta I_B \quad (6)$$

durchgeführt. Die Fitparameter und ihre Fehler werden durch `gnuplot` mit

$$\alpha = (-5,8 \pm 1,8) \text{ mA}, \quad (7)$$

$$\beta = 109 \pm 6 \quad (8)$$

angegeben. Man identifiziert nach Gleichung (1) mit  $\beta$  die Stromverstärkungskonstante  $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ .



**Abbildung 5:** Messwerte für die  $I_C(I_B)$ -Kennlinie

### 5.3. Schwingkreis

Aus Gleichung (3) können wir mit Hilfe der gemessenen Werte  $U_C$  und  $I_C$  die Frequenz des Schwingkreises bei verschiedenen Kondensatoren berechnen. Dabei haben wir den Fehler für die Spannung beim Ablesen des analogen Messgeräts auf  $\sigma_U = 0,05 \text{ V}$  geschätzt und den Fehler beim Ablesen des Strom auf  $\sigma_I = 0,5 \text{ mA}$ . Daraus ergibt sich für die Frequenz  $f$  ein Fehler von

$$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U_C}\right)^2}. \quad (9)$$

Weiter gilt für die Frequenz  $f$  des Schwingkreises

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (10)$$

so dass bei doppelt logarithmischer Auftragung von  $f$  gegen  $C$  der Zusammenhang

$$\ln(f) = -\frac{1}{2} \ln(C) + \ln\left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L}}\right) \quad (11)$$

gilt. Für den Fehler ergibt sich nach der Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_{\ln f} = \frac{\sigma_f}{f}. \quad (12)$$

In Abbildung 6 ist nun der Logarithmus der Frequenz  $f$  gegen den Logarithmus der Kapazität  $C$  aufgetragen. Es befinden sich in dem Diagramm sowohl die Frequenzen, die nach Gleichung (3) aus den abgelesenen Messwerten bestimmt wurden, als auch die Frequenzen, die am Oszilloskop abgelesen wurden. Zusätzlich wurden von `gnuplot` zwei  $\chi^2$ -Fits auf lineare Zusammenhänge durchgeführt, welche ebenfalls eingezeichnet sind. Der  $y$ -Achsenabschnitt ist hier ein konstanter Term, der durch die Induktivität  $L$  der Spule bestimmt wird.

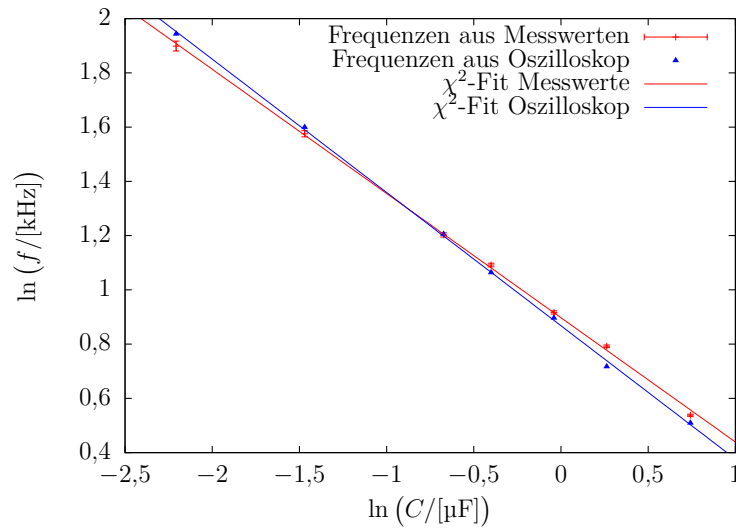
Der eingezeichnete  $\chi^2$ -Fit der ersten Messreihe liefert für die Steigung einen Wert von

$$m_1 = -0,458 \pm 0,005, \quad (13)$$

wohingegen die Steigung für die Oszilloskopwerte von `gnuplot` zu

$$m_2 = -0,492 \pm 0,005 \quad (14)$$

bestimmt wurde, was der Erwartung  $-0,5$  in etwa entspricht.



**Abbildung 6:** Doppelt logarithmische Auftragung der Frequenz  $f$  gegen die Kapazität  $C$

## 6. Diskussion

In diesem Versuch konnten die grundlegenden Transistoreigenschaften experimentell nachgewiesen werden. Dabei ist es uns gelungen, die quantitativen Verläufe der Kennlinien korrekt wiederzugeben und für die Schwingkreise den theoretischen Zusammenhang zu bestätigen.

Bei den  $I_C(U_{CE})$ -Kennlinien ist gut zu erkennen, dass im ersten Bereich die Stromstärke  $I_B$  kaum eine Rolle spielt und das Verhalten durch die Spannung  $U_{CE}$  bestimmt wird. Wie durch die Theorie vorhergesagt, wird je nach Stromstärke  $I_B$  ein gewisser Sättigungswert erreicht, welcher in etwa linear ansteigt.

In den Messkurven sind teilweise Sprünge zu erkennen (z. B. bei  $I_B = 0,2\text{ mA}$ ,  $U_{CE} = 2,3\text{ V}$ ), welche durch ein Nachregulieren des Stroms  $I_B$  entstanden sind. Dieser wurde bei größeren Spannungen um insgesamt ca.  $0,01\text{ mA}$  kleiner, jedoch genügte diese kleine Abweichung, um die Kennlinie maßgeblich zu beeinflussen.

Die  $I_C(I_B)$ -Kennlinie weist den erwarteten linearen Zusammenhang auf und liefert mit  $\beta \approx 119$  einen realistischen Verstärkungsfaktor. Hier wäre es besser gewesen, eine explizite Messreihe durchzuführen und nicht die aus der ersten Messreihe gewonnenen Daten wiederzuverwenden. Leider sah die Anleitung dies nicht explizit vor, so dass wir diese Messung nicht extra durchgeführt haben. Da jedoch der Fehler des  $\chi^2$ -Fits für die Steigung bei nur ungefähr 6% liegt, nehmen wir unseren Wert und insbesondere die Methode zur Bestimmung dieses Wertes als vernünftig an.

Im dritten Teil konnten wir letztlich die vom Oszilloskop bestimmten Werte für die Frequenz  $f$  mit den von uns berechneten Werten aus Strom  $I$  und Spannung  $U$  vergleichen. Dabei liefert das Oszilloskop wohl leicht bessere Werte, da hier der Fit eine Steigung näher  $-0,5$  aufweist.

## A. Tabellen

$I_B$ [mA]	$I_1$ [mA]	$U_1$ [V]	$I_2$ [mA]	$U_2$ [V]	$I_C$ [mA]
0,1	$6,69 \pm 0,01$	$7,96 \pm 0,01$	$6,74 \pm 0,01$	$8,48 \pm 0,01$	$6,694 \pm 0,010$
0,2	$15,20 \pm 0,01$	$7,97 \pm 0,01$	$15,28 \pm 0,01$	$8,30 \pm 0,01$	$15,207 \pm 0,010$
0,3	$25,25 \pm 0,01$	$7,77 \pm 0,01$	$25,41 \pm 0,01$	$8,09 \pm 0,01$	$25,365 \pm 0,009$
0,4	$37,20 \pm 0,01$	$7,92 \pm 0,01$	$37,38 \pm 0,01$	$8,17 \pm 0,01$	$37,258 \pm 0,010$
0,5	$50,0 \pm 0,1$	$7,74 \pm 0,01$	$50,6 \pm 0,1$	$8,41 \pm 0,01$	$50,23 \pm 0,08$

**Tabelle A:** Berechnung der Stromstärke  $I_C$  für  $U_B = 8\text{ V}$

## B. Literaturverzeichnis

- [WOL] Christian Wolff. *Halbleitertechnik*. Online im Internet: <http://www.radartutorial.eu/druck/Halbleiter.pdf>, abgerufen am 11.08.12, 20:26 Uhr.
- [LP] Lehrportal Physik. *Der Transistor*. Online im Internet: <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/4274>, abgerufen am 11.08.12, 18:13 Uhr.