



Physikalisches A-Praktikum

Versuch 17.2

Der Transistor

Praktikanten:	Julius Strake	Betreuer:	Johannes Schmidt
	Niklas Bölter	Durchgeführt:	11.09.2012
Gruppe:	B006	Unterschrift:	_____

E-Mail: niklas.boelter@stud.uni-goettingen.de
julius.strake@stud.uni-goettingen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theorie	4
2.1	Bipolare Transistoren	4
2.2	Vierquadrantenkennlinienfeld	5
2.3	Meißner-Schaltung	6
3	Durchführung	6
4	Auswertung	7
5	Diskussion	9
A	Tabellen und Grafiken	10

1 Einleitung

In diesem Versuch wird das Verhalten eines bipolaren npn-Transistors unter verschiedenen Eingangsströmen und -spannungen untersucht. Der Transistor ist als elementarer Grundbaustein von Integrierten Schaltkreisen eine der wichtigsten Entwicklungen überhaupt und milliardenfach in jedem modernen Computer verbaut.

2 Theorie

2.1 Bipolare Transistoren

Bei einem *bipolaren* Transistor handelt es sich um einen Halbleiter, der aus zwei pn-Übergängen besteht. Diese werden durch *Dotierungen* des Materials (meist Silizium) mit verschiedenen *Fremdatomen* hergestellt. Im Versuch wird ein npn-Transistor verwendet, nur dieser soll hier näher betrachtet werden.

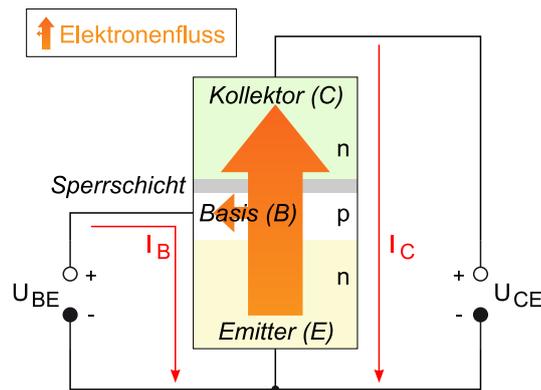


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines bipolaren Transistors. (Prior und Grosse-Knetter)

Wie in Abbildung 1 dargestellt, kann man verschiedene Ströme und Spannungen zwischen den verschiedenen dotierten Bereichen anlegen. Zwischen Basis (B) und Emitter (E) liegt die Eingangs- oder *Basisspannung* an, zwischen Kollektor (C) und Emitter die Ausgangsspannung. An der Basis wird mittels Basisstrom I_B ein Steuersignal angelegt, welches bestimmt, wie groß der Kollektorstrom I_C ist.

Dies wird dadurch erreicht, dass ein negatives Potential der p-dotierten Basisschicht gegenüber der n-dotierten Emitterschicht dazu führt, dass die beiden Dioden in Sperrrichtung geschaltet sind, also kein Strom fließen kann.

Liegt stattdessen ein positives Potential der Basisschicht gegenüber der Emitterschicht an, so können Elektronen von dieser in jene Schicht gelangen und bei ausreichend großer freier Weglänge die (meist dünne) p-dotierte Schicht vor einer Rekombination mit den dortigen Löchern überwinden. Sie werden in der n-dotierten Kollektorschicht von der Spannung U_{CE} „abgesaugt“, sodass ein Stromfluss zustande kommt.

Bei einem idealen Transistor gilt

$$\frac{I_B}{I_C} = \text{const.} \quad (1)$$

Außerdem sollte die Verstärkung des Stroms unabhängig von der zwischen Kollektor und Emitter angelegten Spannung U_{CE} sein.

2.2 Vierquadrantenkennlinienfeld

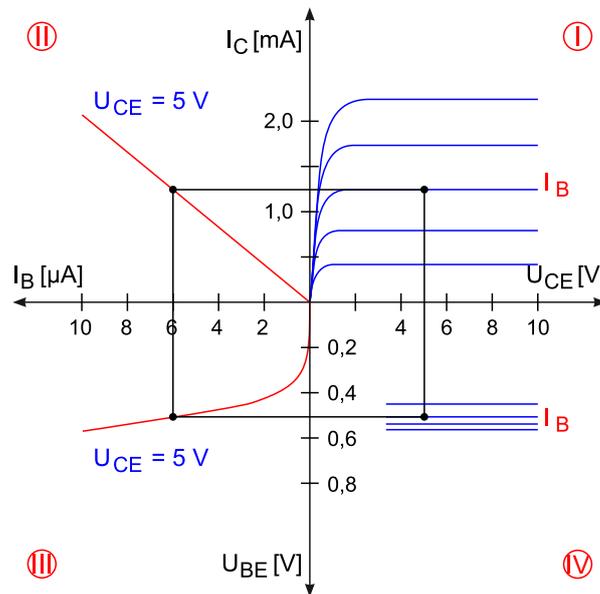


Abbildung 2: Vierquadrantenkennlinienfeld eines idealisierten Transistors. (Prior und Grosse-Knetter)

Um sich die Funktionsweise eines Transistors zu vergegenwärtigen, ist es sinnvoll, sich ein sogenanntes *Vierquadrantenkennlinienfeld* zu erstellen. Dieses zeigt die Abhängigkeit der verschiedenen Ströme und Spannungen voneinander. In Abbildung 2 ist ein solches Kennlinienfeld für einen Beispieltransistor dargestellt.

Der erste Quadrant stellt die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei verschiedenen Basisströmen I_B dar. Es fällt auf, dass der Strom I_C ab einer gewissen Spannung U_{CE} kaum noch Abhängigkeit hiervon zeigt, dafür aber wesentlich I_B -abhängiger wird. Diesen Bereich nennt man den *aktiven Bereich*, da Transistoren meist in diesem betrieben werden. Der sogenannte *Sättigungsbereich* hingegen zeigt eine starke Abhängigkeit des Kollektorstrom von U_{CE} , wenn dieses ausreichend klein ist.

Die Stromverstärkungskennlinie bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung ist im zweiten Quadranten zu sehen.

Im dritten Quadranten ist die Eingangskennlinie zu sehen, die prinzipiell der Kennlinie der Basis-Emitter-Diode entspricht.

Der vierte Quadrant zeigt, dass im aktiven Bereich die Ausgangsspannung keinen Einfluss auf die Eingangsspannung hat.

2.3 Meißner-Schaltung

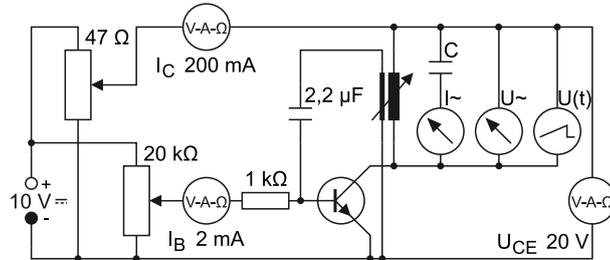


Abbildung 3: Schaltplan des Versuchsaufbaus mit Meißner-Schaltung. (Prior und Grosse-Knetter)

Im Prinzip handelt es sich bei der in Abbildung 3 enthaltenen MEISSNER-Schaltung um einen LRC-Schwingkreis. Statt jedoch, wie bei einem realen Schwingkreis üblich, mit der Zeit durch Dämpfung Energie aus dem System zu verlieren, wird durch die Zuschaltung des Transistors die „verlorene“ Energie wieder dem Schwingkreis zugeführt. So erhält man einen realen ungedämpften Schwingkreis.

Betrachtet man die Impedanz des Kondensators (siehe auch Versuch 14 - „Wechselstromwiderstände“), so findet man folgenden Zusammenhang (Meschede, 2006, S. 403):

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{1}{i\omega C}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\langle Z_K^2 \rangle} = \frac{U_{K,\text{eff}}}{I_{K,\text{eff}}} = \frac{1}{\omega C}. \quad (2)$$

3 Durchführung

Zunächst wird die in Abbildung 3 dargestellte Schaltung aufgebaut. Während der ersten Messungen muss die Rückkopplungsspule aus der Luftspule entnommen werden. Für Basisströme $I_B \in \{0.1 \text{ mA}, 0.2 \text{ mA}, 0.3 \text{ mA}, 0.4 \text{ mA}, 0.5 \text{ mA}\}$ werden nun die jeweiligen Kennlinien für die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C von der Emitter-Kollektor-Spannung U_{EC} gemessen. U_{EC} sollte hierbei von 0 V bis 8 V variiert werden. Dabei ist auf eine gute Auflösung vor allem in Bereichen starker Steigung und Steigungsänderung zu achten.

Jetzt wird die Emitter-Kollektor-Spannung auf $U_{EC} = 8 \text{ V}$ eingestellt und die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C vom Basisstrom I_B für Basisströme zwischen 0 mA und 0.5 mA notiert.

Anschließend wird der Basisstrom auf $I_B = 0.4 \text{ mA}$ eingestellt. Die Emitter-Kollektor-Spannung verbleibt bei $U_{EC} = 8 \text{ V}$. Danach wird die Rückkopplungsspule vorsichtig in die Luftspule geschoben, bis an den Wechselstrommessgeräten ein Ausschlag zu

sehen ist. Mit Hilfe des Oszilloskops kann nun die Spule dergestalt verschoben werden, dass sich eine sinusförmige Schwingung einstellt. Es ist darauf zu achten, dass der Spannungsaus Schlag möglichst nur die Hälfte des Vollausschlags beträgt. Für jeden der verfügbaren Kondensatoren wird nun der Wechselstrom I_{\sim} , die Wechselspannung U_{\sim} und die Frequenz ν der Schwingung notiert. Sowohl die verwendeten Kapazitäten als auch der Transistortyp sind schließlich zu notieren.

4 Auswertung

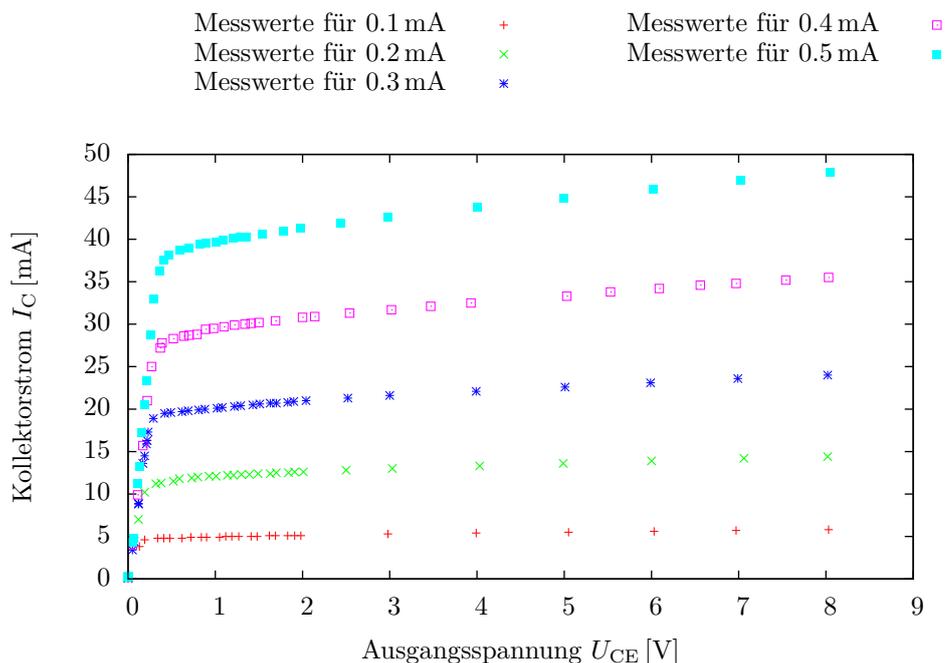


Abbildung 4: Kennlinie $I_C(U_{EC})$ für fünf Basisströme

In Abb. 4 wurde die Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Ausgangsspannung für fünf verschiedene Basisströme aufgetragen. Eine Detailansicht des Sättigungsbereichs wurde in Abb. 7 aufgetragen, da die dicht gedrängten Messwerte zu Unübersichtlichkeit geführt haben.

Die Abhängigkeit von Kollektor- und Basisstrom wurde in Abb. 5 aufgetragen. Aus der quadratischen Regression¹ $I_{C, \text{Regr}}(I_B)$ lässt sich der Stromverstärkungsfaktor an der Stelle $I_B = 0.4 \text{ mA}$ berechnen:

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{dI_{C, \text{Regr}}}{dI_B}(0.4 \text{ mA}) = 125.2 \pm 2.8.$$

Die mit Oszilloskop gemessenen Frequenzen und die Kapazitäten wurden in Abb. 6 doppellogarithmisch aufgetragen. Außerdem wurde die Frequenz theoretisch mittels Formel (2) und den gemessenen Effektivwerten für Spannung sowie Stromstärke vorhergesagt. Die relative Abweichung der Messwerte vom theoretischen Wert beträgt im Mittel 3.5%.

¹via gnuplot, $\chi_{\text{red}}^2 = 0.02$

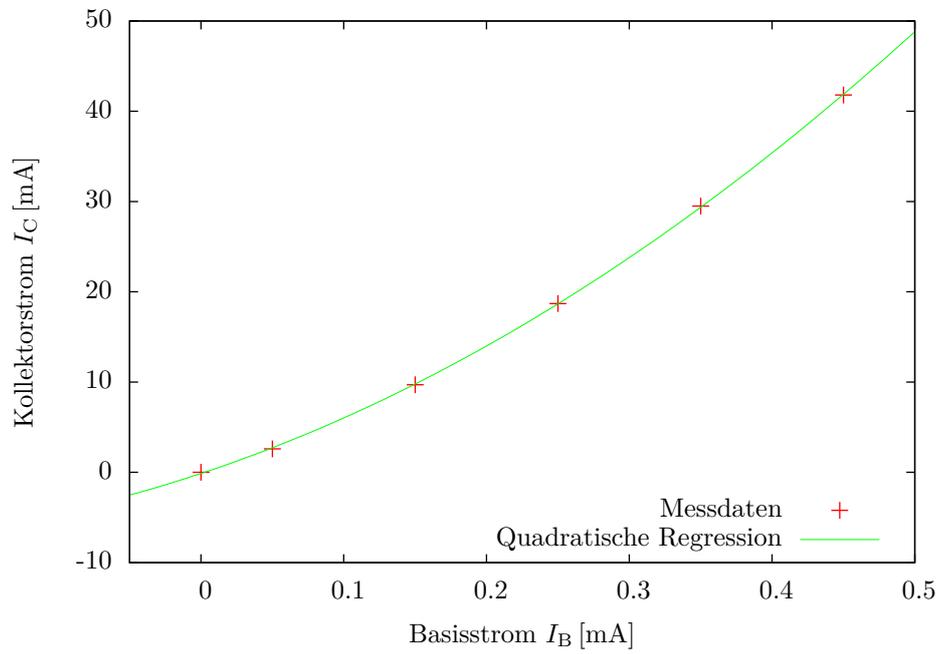
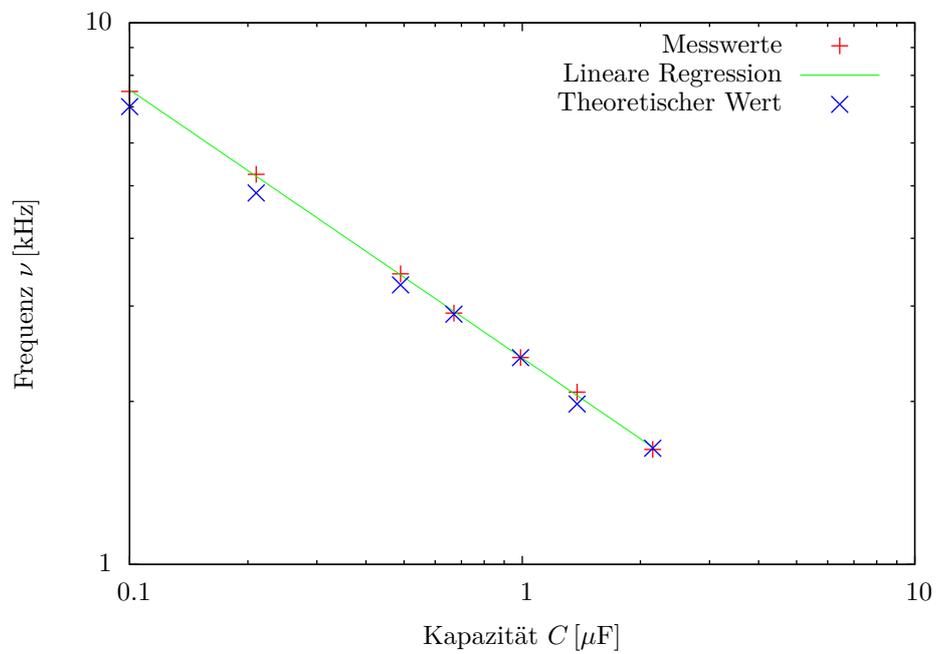
Abbildung 5: Kennlinie $I_C(I_B)$ für $U_{CE} = 8\text{ V}$ 

Abbildung 6: Abhängigkeit von Schwingungsfrequenz und Kapazität

5 Diskussion

Zunächst fällt der Unterschied der Abbildungen 4 und 5 zu den ersten beiden Quadranten des in Abbildung 2 dargestellten Vierquadrantenkennlinienfeld eines idealisierten Transistors auf.

Der im ersten Quadranten dargestellte Zusammenhang sollte im aktiven Bereich einen möglichst konstanten Kollektorstrom zeigen, die Messung ergab jedoch vor allem für größere Basisströme eine nicht zu vernachlässigende Proportionalität zwischen Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und Kollektorstrom I_C (siehe auch Abb. 4). Ein Grund dafür ist vielleicht der Betrieb des Transistors weit unterhalb seiner Leistungsgrenzen, laut Datenblatt (ON Semiconductor) schaltet der Transistor typischerweise Kollektorströme von 5 A, welche zwei Größenordnungen von den hier vorhandenen Strömen entfernt sind. Aber der Vergleich mit dem Datenblatt zeigt auch im Arbeitsbereich eine klare Proportionalität, so dass das idealisierte Bild des Vierquadrantenkennlinienfelds in dieser Hinsicht falsch ist.

Auch der Zusammenhang zwischen Basis- und Kollektorstrom bei fester Spannung U_{CE} wurde bei unserer Messung als eindeutig quadratisch und konvex festgestellt.² Hier ist der Betrieb unterhalb des Arbeitspunktes für die Anomalie verantwortlich, statt einer Verstärkung der Steigung ist eigentlich eine Abschwächung zu erwarten, welche sich aber laut Datenblatt erst ab $I_C = 200$ mA einstellt.

Ansonsten zeigen die Messungen eine erfreuliche Genauigkeit und Übereinstimmung mit der Theorie. Man beachte vor allem die gute Erkennbarkeit von aktivem und Sättigungsbereich der U_{CE} - I_C -Kennlinie und die geringe Abweichung der gemessenen Schwingungsfrequenzen bei verschiedenen Kapazitäten vom theoretisch ermittelten Wert.

²Lineare Regression: $\chi_{\text{red}}^2 \approx 4.95$, Quadratische Regression: $\chi_{\text{red}}^2 \approx 0.02$ (beide via gnuplot).

A Tabellen und Grafiken

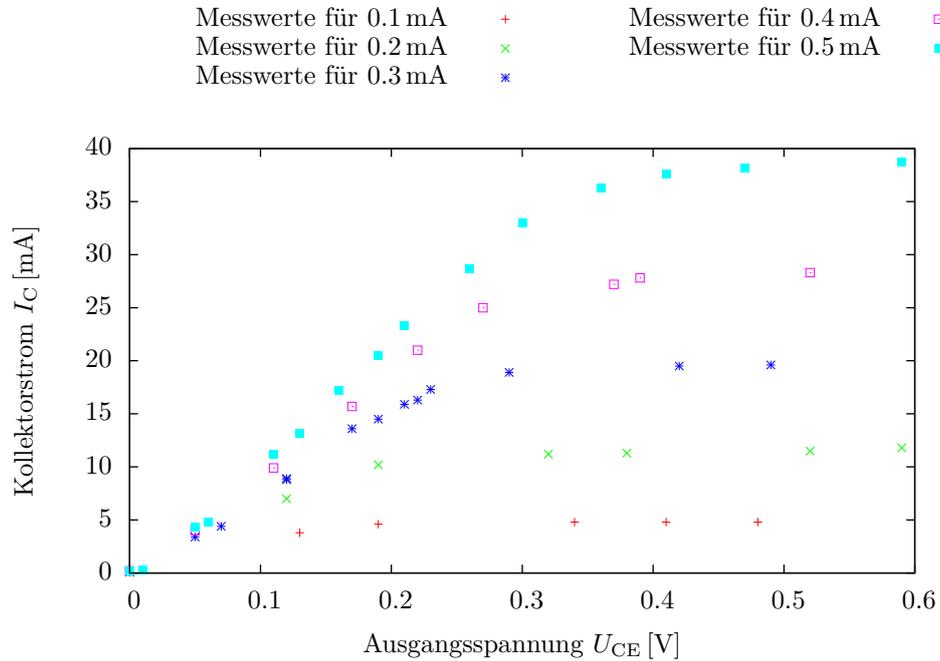


Abbildung 7: Kennlinie $I_C(U_{EC})$ für fünf Basisströme (Detail)

Literatur

- [Meschede 2006] MESCHEDÉ, Dieter: *Gerthsen Physik*. 23. Ausgabe. Springer, 2006
- [ON Semiconductor] ON SEMICONDUCTOR: *2N3055: 15 A, 60 V NPN Bipolar Power Transistor*. – URL <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=2N3055>. – Zugriffsdatum: 2012-10-03
- [Prior und Grosse-Knetter] PRIOR, Mira ; GROSSE-KNETTER, Jörn: *LP - Der Transistor*. – URL <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/4274>. – Zugriffsdatum: 2012-09-17