

Physikalisches A-Praktikum

Versuch 21

Der Transistor

Praktikanten: Nils Kanning
Steffen Klemer

Durchgeführt am: 06.02.2007

Gruppe: 6

Assistent: Till Benter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theorie	4
2.1	Das Bändermodell der Festkörper	4
2.2	Störstellenhalbleiter	5
2.3	Die Diode	5
2.4	Der Transistor	6
2.4.1	Die Emitterschaltung	6
2.4.2	Die Kennlinien	7
2.4.3	Die Meißner-Schaltung	8
3	Durchführung	9
4	Auswertung	9
4.1	Die Kennlinie des 1. Quadranten	9
4.2	Die Stromverstärkung – der 2. Quadrant	10
4.3	Die Schwingungsfrequenz	10
5	Einordnung der Ergebnisse	10
A	Tabellen und Grafiken	11

1 Einleitung

Aus dem Alltag von jedem von uns sind Transistoren, auch wenn es auf den ersten Blick vielleicht nicht so scheint, nicht mehr wegzudenken. Ohne sie gäbe es keinen Computer so wie wir ihn heute kennen und auch das Handy, was viele von uns in der Tasche haben, wäre undenkbar. In all diesen Geräten befinden sich Mikrochips welche aus einer Unmenge von Transistoren bestehen.

Auch wenn durch diesen Versuch die weitreichenden Möglichkeiten und Einsatzgebiete von Transistoren nicht deutlich werden können, bietet der Versuch sehr wohl die Möglichkeit die grundlegende Funktionsweise eines einzelnen Transistors zu begreifen und zu charakterisieren.

2 Theorie

2.1 Das Bändermodell der Festkörper

Um die in einem *Transistor* auftretenden Prozesse beschreiben zu können, müssen wir zunächst verstehen wie sich die Bestandteile des Transistors – *Halbleiter* – von Metallen und Isolatoren unterscheiden. Diese Einordnung von Festkörpern ist durch das *Bändermodell* möglich.

Betrachtet man ein einzelnes Atom, so befinden sich die Elektronen auf scharf begrenzten Energieniveaus. In dem Modell eines Festkörpers sind nun viele, zunächst gleichartige, Atome in einem Gitter angeordnet. Durch die Interaktion dieser Atome verschieben sich die Energieniveaus der einzelnen Atome. In den Bereichen in denen zuvor die diskreten Energieniveaus waren, entstehen so sehr viele leicht verschiedene Niveaus. Auf Grund der großen Anzahl an Atomen im Festkörper entstehen beinahe kontinuierliche Bereiche möglicher Energien. Diese werden als *Bänder* bezeichnet. Das oberste Band das ganz oder teilweise mit Elektronen besetzt ist, nennt man *Valenzband*.

Mit diesem Verständnis ist es nun möglich, die unterschiedliche Leitfähigkeit von Metallen und Isolatoren zu erklären. Bei Isolatoren ist dieses Valenzband voll mit Elektronen besetzt. Legt man ein äußeres elektrisches Feld an, so können die Elektronen nicht durch Anregung auf ein anderes Niveau im gleichen Band wechseln. Damit es zur Leitung kommt, müssen die Elektronen somit in das nächst höhere unbesetzte Band – das *Leitungsband* – gehoben werden. Bei Isolatoren besteht zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband eine große *Bandlücke*. Diese kann gewöhnlich nicht durch Anregung überwunden werden.

Bei Leitern ist im Gegensatz zum Isolator das Valenzband nicht voll besetzt und stellt somit gleichzeitig auch das Leitungsband dar. Das heißt Elektronen können innerhalb des Leitungsbandes die Energieniveaus wechseln.

Neben diesen beiden Typen führt man auch noch *Halbleiter* ein. Bei diesen ist die Bandlücke wesentlich geringer. Beim absoluten Nullpunkt befinden sich auch bei Halbleitern keine Elektronen im Leitungsband. Bei steigenden Temperaturen reicht jedoch die thermische Energie bereits aus, um Elektronen ins Leitungsband zu heben. Bei diesem Vorgang entstehen freie Energieniveaus im Valenzband – *Löcher*. Neben den Elektronen als Ladungsträger im Leitungsband können auch diese Löcher als positive Ladungsträger im Valenzband betrachtet werden.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich als eine charakteristische Eigenschaft eines Halbleiters eine mit zunehmender Temperatur steigende Leitfähigkeit.

2.2 Störstellenhalbleiter

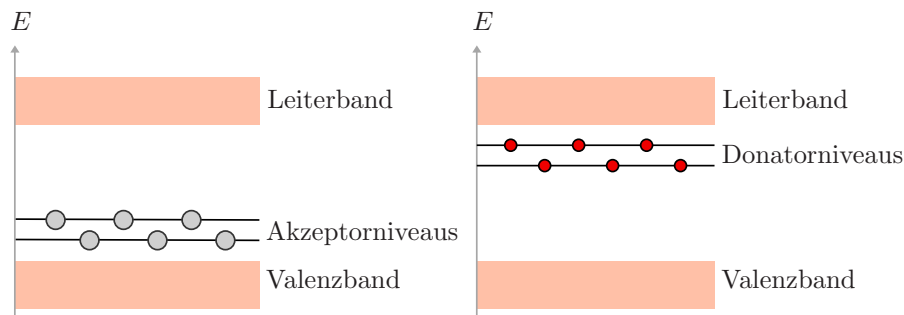


Abbildung 1: Energieniveauschema eines p-Halbleiters (links) und eines n-Halbleiters (rechts)

In technischen Anwendungen verwendet man meist keine *Eigenhalbleiter* – wie die bisher diskutierten Halbleiter auch genannt werden. Stattdessen fügt man in ein Atomgitter einzelne Fremdatome ein. Dieser Vorgang wird als *Dotierung* bezeichnet.

Als Beispiel betrachten wir zunächst Silizium Si , welches bei Zimmertemperatur nicht leitet. Nun fügt man in dieses Atomgitter einzelne Arsenatome As ein. Hierbei wird für die Bindung mit den benachbarten Siliziumatomen eines der Elektronen des Arsens nicht benötigt. Dieses befindet sich in einem, nur wenig unter dem bisher leeren Leitungsband liegenden, Energieniveau. Damit können diese Elektronen leicht in das Leitungsband angeregt werden und so die Leitfähigkeit steigern. Diese Energieniveaus unterhalb des Leiterbandes nennt man *Donatorniveaus* (siehe auch Abb. 1). Den so entstandenen Halbleiter bezeichnet man als *n-Halbleiter* da seine Leitfähigkeit auf den negativ geladenen Elektronen beruht.

Entgegen dem obigen Beispiel kann man Silizium auch mit Gallium Ga dotieren. In diesem Fall fehlt ein Elektron damit ein Galliumatom Bindungen mit den benachbarten Siliziumatomen ausbilden kann. Dieses fehlende Elektron entspricht einem zunächst unbesetzten Energieniveau – einem *Akzeptorniveau* – etwas oberhalb des Valenzbandes (siehe ebenfalls Abb. 1). Nun können Elektronen des Valenzbandes leicht in dieses zusätzliche Niveau angeregt werden. Dadurch entsteht ein Loch im Valenzband. Dieses kann wieder als positiver Ladungsträger aufgefasst werden. Die Leitfähigkeit des entstandenen Stoffes beruht also auf diesen positiven Ladungsträgern und man spricht daher von einem *p-Halbleiter*.

2.3 Die Diode

Eine Diode ist ein Bauelement das Strom nur in eine Richtung leitet. Sie besteht aus zwei aneinander grenzenden n- und p-Halbleitern.

Zunächst sind die Prozesse an der Grenzzone beider Halbleitermaterialien von Interesse. Dabei liegt noch kein äußeres elektrisches Feld an. Im n-Gebiet ist die Konzentration an negativen Ladungsträgern höher als im p-Gebiet. Entsprechend ist im p-Gebiet die Konzentration der positiven Ladungsträger höher. Durch einen Diffusionvorgang gibt es nun eine Tendenz zum Ausgleich dieser Konzentrationen. Daher bewegt sich positive Ladung im Bereich der Grenzschicht aus dem p- in das n-Gebiet – und umgekehrt. Dies hat den Aufbau einer Spannung – der *Driftspannung* – zur

Folge. Diese ist dem Diffusionsstrom entgegen gerichtet. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. In diesem Fall hindert die Spannung weitere Ladungsträger an dem Übergang ins jeweils anders dotierte Gebiet.

Nun betrachten wir die Situation mit einer äußeren Spannungsquelle. Dabei sei zunächst der positive Pol der Spannungsquelle mit dem n-Halbleiter verbunden – der negative Pol entsprechend mit dem p-Halbleiter. Bei dieser Beschaltung verstärkt die äußere Spannung die bereits bestehende Driftspannung zwischen den Halbleiterschichten. Die Ladungsträger werden weiterhin an der Diffusion ins jeweils anders dotierte Gebiet gehindert. Da es so zu keinem Stromfluss durch die Diode kommt, spricht man in diesem Fall von einer in *Sperrrichtung* geschalteten Diode (siehe Abb. 2).

Legt man hingegen den positiven Pol der Spannungsquelle an den p-Halbleiter, so wirkt die äußere Spannung der Driftspannung entgegen. Damit überwiegt nun die Diffusion der Ladungsträger im Vergleich zu der Spannung zwischen den Grenzflächen und es kommt somit zu einem Stromfluss (Abb. 2). Die Diode ist in *Durchlassrichtung* geschaltet.

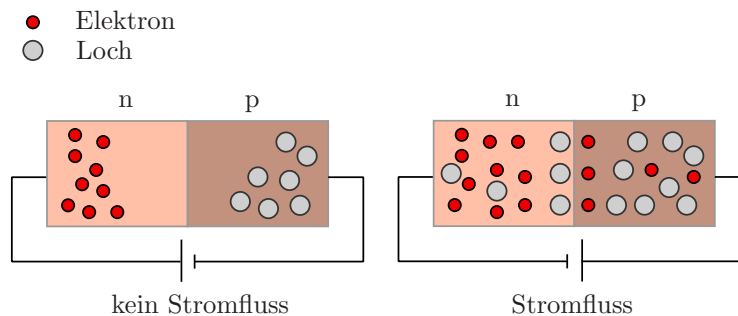


Abbildung 2: Diode in Sperrrichtung (links) und Durchlassrichtung (rechts)

2.4 Der Transistor

Ein Transistor ist ein Bauelement zum Schalten und Verstärken von Strömen und Spannungen.

Man unterscheidet zwei grundlegende Arten von Transistoren. *Unipolare Transistoren* werden durch eine Spannung gesteuert. Dagegen sind *bipolare Transistoren* stromgesteuert. Wir werden hier auf den bipolaren Transistor eingehen. Dieser besteht aus drei aneinander gereihten Halbleitern von denen der mittlere entgegen den beiden Äußeren dotiert ist. Dieses mittlere Halbleiterelement ist dünn im Vergleich zu den Äußeren und wird *Basis* genannt. Die verbleibenden Kontakte nennt man *Emitter* und *Kollektor*, wobei sich der Emitter durch eine stärkere Dotierung auszeichnet. Man unterscheidet weiter *npn-* und *pnp-Transistoren* und gibt mit dieser Bezeichnung die Dotierung der einzelnen Schichten an.

2.4.1 Die Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist ein typisches Beispiel bei dem ein Transistor zur Verstärkung eines Stromes verwendet wird. Wir diskutieren hier die in Abb. 3 zu sehende Schaltung mit einem pnp-Transistor.

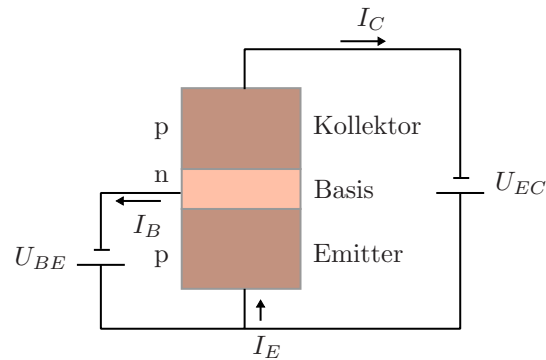


Abbildung 3: pnp-Transistor in Emitterschaltung

Zwischen dem Emitter E und dem Kollektor C liegt eine Spannung U_{EC} an. Diese ist so gepolt, dass der Übergang zwischen Emitter und Basis – aufgefasst als Diode – in Durchlassrichtung geschaltet ist. Dies impliziert einen in Sperrichtung geschalteten Basis-Kollektor-Übergang.

Auf Grund des in Durchlassrichtung geschalteten Emitter-Basis-Übergangs und der Spannung U_{EC} gelangen nun Ladungsträger aus dem Emitter in die Basis. Es fließt der Strom I_E . Da der Emitter ein p-Halbleiter ist, handelt es sich hierbei um positive Ladungsträger – Löcher. Auf Grund der geringen Dicke der Basis gelangen viele dieser Löcher durch die Basis hindurch in den Kollektor und es kommt zu einem Kollektorstrom I_C . Allerdings rekombinieren einige der Löcher in der Basis. Dadurch erhöht sich die Anzahl der positiven Ladungsträger in der Basis. Weitere Löcher werden am Durchqueren der Basis gehindert und der Kollektorstrom I_C kommt unverzüglich zum Erliegen.

Um den Kollektorstrom I_C aufrecht zu erhalten, muss der Überschuss an positiven Ladungen in der Basis reduziert werden. Hierzu legen wir zwischen Basis und Emitter die Spannung U_{BE} an. Diese ist so gepolt, dass der Ladungsüberschuss abgebaut wird und damit ein Basisstrom I_B fließt.

Bei dieser Schaltung ist der Kollektorstrom I_C nahezu genauso groß wie der Emitterstrom I_E . Die Differenz ist durch den kleinen Basisstrom I_B zu erklären. Bei dieser Betrachtung kann man den Kollektorstrom als Funktion des Basisstroms angeben:

$$I_C = \beta I_B$$

Hierbei ist β eine konstante des Transistors – der *Stromverstärkungsfaktor*.

Zusammenfassend ermöglicht es uns diese Schaltung somit den Strom I_C durch den sehr viel kleineren Strom I_B zu regulieren.

2.4.2 Die Kennlinien

Das Verhalten eines Transistors wird durch verschiedene Kennlinien charakterisiert. Eine kompakte Möglichkeit diese darzustellen bietet das in Abb. 4 zu sehende *Vierquadranten-Kennlinienfeld*. Dieses soll nun kurz erläutert werden.

- 1. Quadrant** Der Kollektorstrom I_C wird gegen die Spannung U_{EC} aufgetragen. Da diese Größen bei der Emitterschaltung den Ausgang charakterisieren, spricht

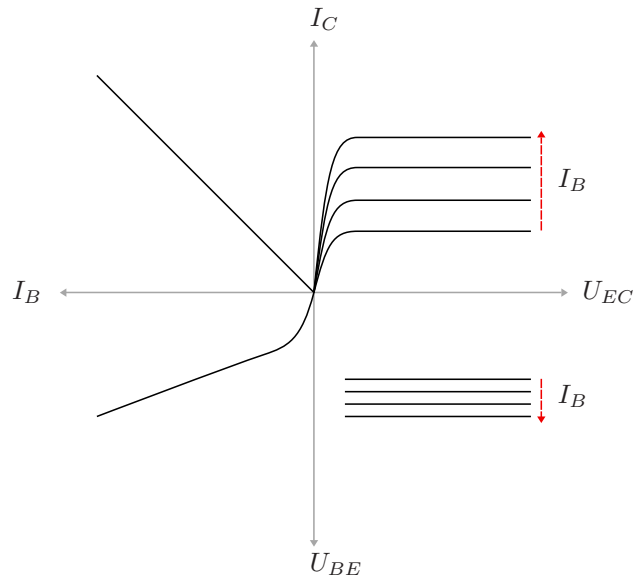


Abbildung 4: Vierquadranten-Kennlinienfeld Transistors

man von der *Ausgangskennlinie*. Der Bereich, in dem eine starke Abhängigkeit zwischen I_C und U_{EC} besteht, heißt *Sättigungsbereich*. Dem schließt sich der *aktive Bereich* an. Hier ist I_C nahezu unabhängig von U_{EC} . Die Spannung U_{EC} hängt damit nur noch von dem, in der Abbildung als Parameter aufgetragenen, Basisstrom I_B ab. Aus diesem Grund werden Transistoren in Verstärkerschaltungen in diesem Bereich betrieben.

- 2. Quadrant** Es ist der Kollektorstrom I_C gegen den Basisstrom I_B aufgetragen. An der Steigung der sich ergebenden Geraden kann somit der bereits angesprochene Stromverstärkungsfaktor β abgelesen werden.
- 3. Quadrant** Diese Kennlinie zeigt den Basisstrom I_B in Abhängigkeit von der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung U_{EC} . Diese Größen charakterisieren den Eingang einer Verstärkerschaltung. Folglich spricht man von der *Eingangskennlinie*. Diese hat praktisch die Gestalt der Kennlinie der Basis-Emitter-Diode.
- 4. Quadrant** Hierbei handelt es sich um die *Rückwirkungskennlinie*. Sie gibt an wie sich die Eingangs- also die Basis-Emitter-Spannung als Funktion der Ausgangs- oder Emitter-Kollektor-Spannung verhält. Im aktiven Bereich sind beide Größen unabhängig. Man sagt es liegt keine Rückwirkung vor.

Die Punkte in dem Kennlinienfeld, die die momentane Konfiguration des Transistors widerspiegeln, werden als *Arbeitspunkt* bezeichnet. Dabei ist der Arbeitspunkt durch die Angabe von zwei der vier möglichen Größen U_{BE} , U_{EC} , I_B und I_C eindeutig bestimmt.

2.4.3 Die Meißner-Schaltung

Die Meißner-Schaltung besteht zunächst aus einem *LCR*-Schwingkreis. Auf Grund des ohmschen Widerstands R kommt es zu einer gedämpften Schwingung. Um die

Dämpfung der Schwingung zu unterbinden, muss dem Schwingkreis periodisch die abgegebene Energie wieder zugeführt werden. Dies wird über eine induktive Rückkopplung und einen Transistor in Emitterschaltung realisiert. Der Basisstrom wird induktiv mit dem Schwingkreis gekoppelt. Durch eine zusätzlich angeschlossene, externe Gleichspannungsquelle wird nun, reguliert durch den Transistor, dem Schwingkreis periodisch die benötigte Energie zugeführt.

Wir können die Frequenz ω dieser Schaltung durch die Spannung U_C und den Strom I_C am Kondensator des Schwingkreises bestimmen. Hierzu betrachten wir die Impedanz Z_C des Kondensators:

$$Z_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{-i}{\omega C}$$

Wir betrachten nur die Beträge und erhalten somit eine Gleichung für die Effektivwerte:

$$\frac{U_{C,\text{eff}}}{I_{C,\text{eff}}} = \frac{1}{\omega C}$$

Ist außerdem die Kapazität C bekannt, ermöglicht dies die Bestimmung der Frequenz ω .

3 Durchführung

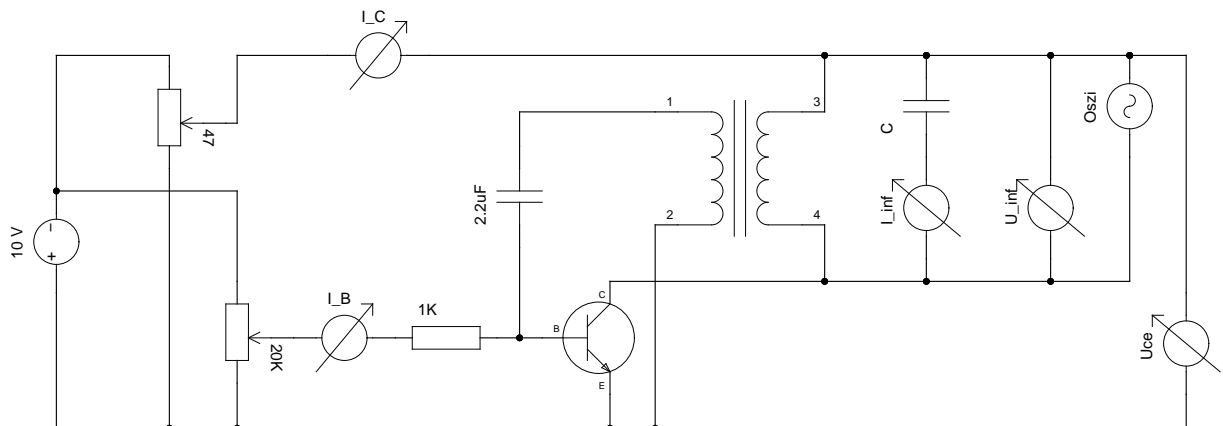


Abbildung 5: Schema des Messaufbaus

Wir vermessen einen Transistor mit der Schaltung in Abb. 5. Zuerst nehmen wir die $I_C(U_{EC})$ Kennlinien für die Basisströme $I_B = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5mA$ bei ausgeschalteter Schwingung auf. Nun stellen wir den Arbeitspunkt bei $I_B = 0.4mA, U_{EC} = 8V$ ein, schalten die Rückkopplung ein und vermessen für 7 Kondensatoren $C \approx 0.09, 0.24, 0.50, 0.71, 0.96, 1.40, 2.12\mu F$ Wechselstrom und Wechselspannung. Außerdem bestimmen wir mit dem Oszilloskop die Frequenz der Schwingung.

4 Auswertung

4.1 Die Kennlinie des 1. Quadranten

Im Abb. 6 haben wir die Kennlinien für die 5 vermessenen Basisströme geplottet.

4.2 Die Stromverstärkung – der 2. Quadrant

Nun haben wir in Abb. 7 die Kennlinie $I_C(I_B)$ bei festen U_{EC} aufgetragen. Dadurch haben wir eine Ausgleichsgerade

$$f(x) = \beta x + c$$

gelegt und linear gefittet. Es ergibt sich ein Anstieg von:

$$\beta = 136(7)$$

Dieser Wert ist die *Stromverstärkung*.

4.3 Die Schwingungsfrequenz

Mit Hilfe von Gl. 1 haben wir zunächst die Frequenz bei den verschiedenen Kondensatoren bestimmt. Das Ergebnis ist in Tab. 1 zu finden. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist mit bis zu 15% aber recht groß. Der Fehler der Oszilloskopmessung ist geschätzt, die Fehler der anderen Frequenzen basieren auf dem Fehler der Kondensatormessung, da dieser den größten Anteil hat.

Nun haben wir die Frequenz der Oszilloskopmessung doppelt-logarithmisch gegen die Kapazität aufgetragen, da für die Frequenz im ungedämpften Schwingkreis gilt:

$$\begin{aligned} f &= \frac{I}{2\pi\sqrt{LC}} \\ \Rightarrow \ln f &= -\frac{1}{2} \ln C + \underbrace{\ln \frac{I}{2\pi\sqrt{L}}}_{\text{const.}} \end{aligned}$$

Der so vermutete lineare Zusammenhang stellte sich tatsächlich ein und ein linearer Fit in Abb. 8 liefert den Anstieg

$$m = -0.476(3)$$

der sehr dicht bei dem berechneten Wert $-\frac{1}{2}$ liegt.

5 Einordnung der Ergebnisse

Die Kennlinie des ersten Quadranten zeigt sehr deutlich das geforderte Verhalten. Nach einem kurzen Sättigungsbereich steigt der Kollektorstrom im aktiven Bereich nur noch sehr gering mit der Emitter-Kollektor-Spannung an.

Auch die Bestimmung der Stromverstärkung verlief erfreulich.

Die Werte der Meißner-Schaltung können recht gut überzeugen. Die Frequenzen liegen nicht so weit auseinander und der berechnete lineare Zusammenhang der doppelt-logarithmischen Auftragung konnte gut bestätigt werden.

A Tabellen und Grafiken

Abbildung 6: I_C gegen U_{CE} für verschiedene Basisströme I_B

Abbildung 7: I_C gegen I_B für $U_{CE} = 8\text{ V}$

	$C_{0.09}$	$C_{0.24}$	$C_{0.50}$	$C_{0.71}$
$f_{gemessen}$ [Hz]	6578(50)	4672(50)	3226(50)	2840(50)
$f_{berechnet}$ [Hz]	5905(230)	4174(144)	2803(140)	2538(114)
	$C_{0.96}$	$C_{1.40}$	$C_{2.12}$	
$f_{gemessen}$ [Hz]	2380(50)	1980(50)	1626(50)	
$f_{berechnet}$ [Hz]	2153(87)	1811(68)	1490(52)	

Tabelle 1: Die gemessenen und berechneten Frequenzen im Vergleich

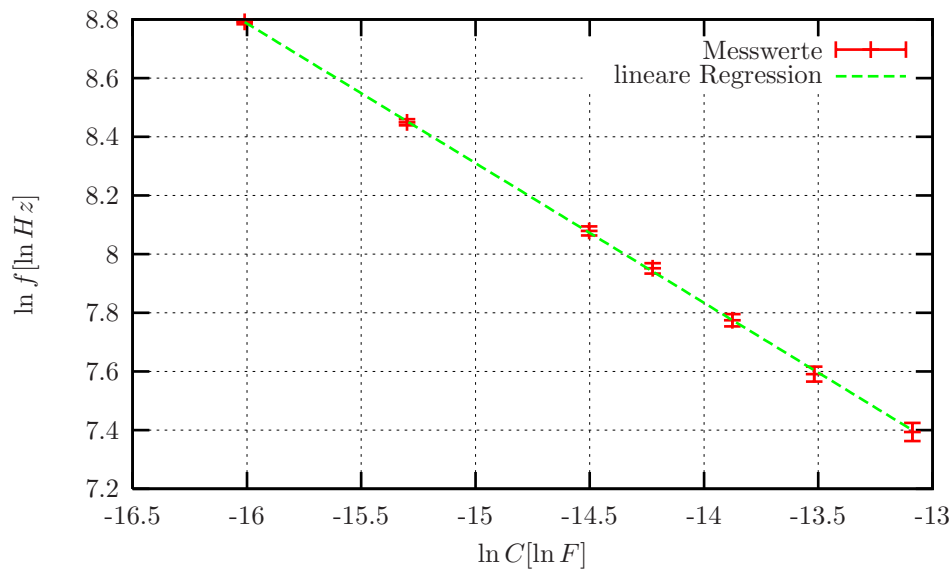


Abbildung 8: Doppelt logarithmische Auftragung der Frequenz gegen die Kapazität