



ulm university universität  
**uulm**

# Versuch 26: Kennlinien von Glühlampen, Z-Diode und Transistor

Praktikum der Physik

**Oliver Heinrich** <oliver.heinrich@uni-ulm.de>

**Bernd Kugler** <berndkugler@web.de>

L2

08.Juni.2007

Abgabe: 15.Juni 2006

Zweitabgabe: 29.Juni 2007

Drittabgabe: 11.Juli.2007

Betreuer: Matthias Reinboth

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Arten von Leitern . . . . .	3
1.2	Arten von Leitungen . . . . .	3
1.3	Grundlegendes zum Leiter . . . . .	3
1.4	Leitfähigkeitsmodelle . . . . .	4
1.4.1	Drude - Modell . . . . .	4
1.4.2	Bändermodell . . . . .	4
1.5	Halbleiter . . . . .	7
1.5.1	Dotierung . . . . .	7
1.6	Bauteile . . . . .	8
1.6.1	Glühlampe . . . . .	8
1.6.2	Kohlefadenlampe . . . . .	8
1.6.3	Diode . . . . .	9
1.6.4	Zener-Diode . . . . .	9
1.6.5	Transistor . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>11</b>
2.1	Kennlinien von Lampen . . . . .	11
2.2	Diodenkennlinie . . . . .	12
2.3	Spannungsstabilisierungsschaltung . . . . .	12
2.4	Transistorkennlinien . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>14</b>
3.1	Kennlinien von Lampen . . . . .	14
3.1.1	Kennlinie einer Glühlampe . . . . .	14
3.1.2	Kennlinie einer Kohlenfadenlampe . . . . .	16
3.2	Diodenkennlinie . . . . .	18
3.2.1	Durchlassrichtung . . . . .	18
3.2.2	Sperrrichtung . . . . .	19
3.3	Spannungsstabilisierungsschaltung . . . . .	20
3.4	Transistorkennlinien . . . . .	21
3.4.1	$I_{BE} = 5,1 \mu A$ . . . . .	22
3.4.2	$I_{BE} = 10,0 \mu A$ . . . . .	22
3.4.3	$I_{BE} = 15,0 \mu A$ . . . . .	23
3.4.4	$I_{BE} = 20,0 \mu A$ . . . . .	23
3.5	Kurvenschar von $I_{CE}(U_{CE})$ . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Fehlerdiskussion</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Arten von Leitern

Grundsätzlich unterscheidet man drei Arten von Leitern. Der **Isolator** leitet den Strom nicht, der **Leiter** leitet den Strom und der **Halbleiter** leitet unter bestimmten Umständen den Strom. Alle drei Leiterarten finden noch mehr Erwähnung.

## 1.2 Arten von Leitungen

Es gibt vier Arten, wie Ladungstransport stattfinden kann. Die **Ionenleitung** findet z.B. in Flüssigkeiten mit gelösten Ionen statt. Außerdem gibt es noch die **Plasmaleitung**, die **Störleitung** und die **Eigenleitung**.

## 1.3 Grundlegendes zum Leiter

Der elektrische Strom ist definiert als Ladungsänderung pro Zeiteinheit:

$$I := \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Für den ohmschen Widerstand gilt:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

$\rho$  ist der spezifische Widerstand (Materialkonstante),  $l$  steht für die Länge des Leiters und  $A$  für seinen Querschnitt. Für  $\rho$  gilt

$$\rho = \frac{E}{j} \quad (2)$$

, wobei  $j$  für die Stromdichte steht. Legt man an einen Leiter eine Spannung an, so wirkt auf die Ladungsträger eine Kraft  $F$  aufgrund des elektrischen Feldes  $E$ . Die Elektronen bewegen sich mit der Driftgeschwindigkeit  $v_D$ . Die Zeit zwischen zwei Stößen der Ladungen oder Atomen bezeichnet man mit  $\tau$  (Stoßzeit). Es gilt:

$$F = e \cdot E = m \cdot a = m \cdot \frac{v_D}{\tau} \quad (3)$$

Ein Leiter mit Querschnittsfläche  $A$  und Länge  $l$  enthält die Ladung  $Q$ , wobei  $n$  für die Ladungsträgerdichte und  $e$  für die Elementarladung steht:

$$Q = n \cdot A \cdot l \cdot e \quad (4)$$

Ein Elektron benötigt die Zeit  $t$ , um die Strecke  $l$  zurückzulegen:

$$t = \frac{l}{v_D} \quad (5)$$

Setzt man (4) und (5) in (1) ein, so erhält man für den Strom  $I$ :

$$I = n \cdot A \cdot e \cdot v_D$$

Daraus folgt für  $j$ :

$$j = n \cdot e \cdot v_D \quad (6)$$

Setzt man (6) in (3), ergibt sich:

$$F = \frac{m \cdot j}{n \cdot e \cdot \tau} = e \cdot E$$

Und damit für den spezifischen Widerstand  $\rho$ :

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{m}{e^2 \cdot n \cdot \tau}$$

Erhöht man die Temperatur in einem Leiter, so sinkt aufgrund der schnelleren Teilchenbewegung die mittlere Stoßzeit  $\tau$ . Somit wird  $\rho$  größer. Erwärmt man einen Halbleiter, so steigt die Ladungsträgerdichte  $n$ . Daraus resultiert ein kleinerer Widerstand.

## 1.4 Leitfähigkeitsmodelle

### 1.4.1 Drude - Modell

Das **Drude - Modell** ist ein veraltetes Modell, um die Vorgänge eines Leiters während des Stromflusses zu beschreiben. Das Problem dieses Modells ist, dass es keinen Unterschied zwischen einem Leiter und Halbleiter erklären kann. Des Weiteren findet es in der Quantenmechanik keine Anwendung. Deshalb findet es hier keine weitere Erwähnung.

### 1.4.2 Bändermodell

Das **Bändermodell** ist ein geeignetes Modell, um die Leitfähigkeit sowohl eines Leiters, als auch eines Halbleiters zu erklären.

Bei diesem Modell haben die Elektronen nicht nur diskrete Energieniveaus, sondern dicht beieinander liegende Energieniveauunterschiede. Diese werden **Bänder** genannt. Es liegt somit ein *quasi-kontinuierliches Energiespektrum* vor. Die Entstehung der Bänder sei an folgenden Bildern verdeutlicht. Während die Elektronen eines einzelnen Atoms noch diskrete Energien besitzt (vgl. Abbildung 1), sehen die Energien bei zwei dicht beieinander liegenden Atomen bereits aus, wie in Abbildung 2 dargestellt. Setzt man das für mehrere Atome fort, so ergibt sich Bild 3. Die Aufspaltung der Energien erklärt das *Pauli-Prinzip*. Dieses besagt, dass Elektronen, die den gleichen Raum belegen, nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen. Damit Leitung erfolgen kann, müssen die Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband aufsteigen, weil sich die Elektronen in einem vollen Band nicht bewegen können. Will man, dass sich die Elektronen bewegen, muss man ihnen Energie zuführen. Und dann steigen sie ja auf.

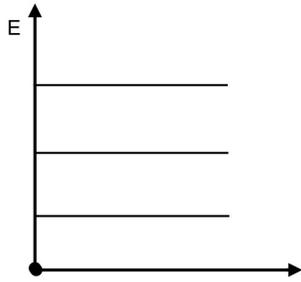


Abbildung 1: Diskretes Spektrum

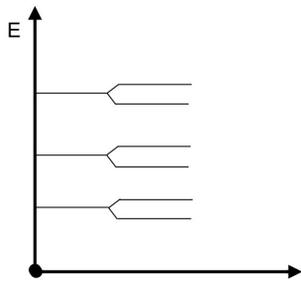


Abbildung 2: Zwei Atome dicht beieinander

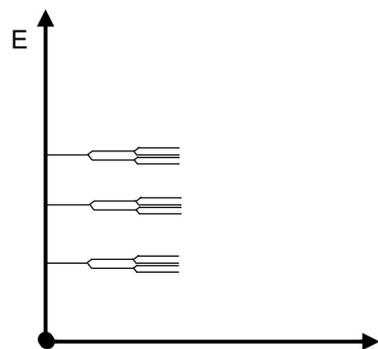


Abbildung 3: Mehrere Atome dicht beieinander

**Der Isolator im Bändermodell** Bei einem Isolator ist der Energieunterschied zwischen dem Valenzband und dem Leiterband größer als 2,5 eV. Das Valenzband ist voll mit Elektronen besetzt. Es gibt also keine freien Elektronen, die zum Ladungstransport beitragen können. Somit fließt kein Strom. Durch solch starkes Erhitzen des Isolators, sodass die Elektronen aufgrund der thermischen Energie ( $\geq 2,5\text{eV}$ ) das Valenzband verlassen können, kann sogar ein Isolator zum Leiter gemacht werden. Die thermische Energie bei Zimmertemperatur beträgt in etwa 40 meV. Umgibt

man den Isolator mit einem starken elektrischen Feld, so können Elektronen aus dem Valenzband aufsteigen und zum Ladungstransport beitragen. Also leitet er.

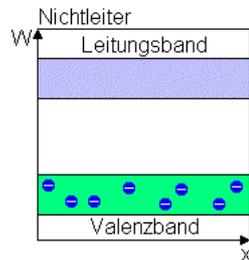


Abbildung 4: Der Isolator im Bändermodell

**Der Leiter im Bändermodell** Bei einem Leiter ist der Energieunterschied zwischen dem Valenzband und Leiterband so gering, dass die Elektronen das Valenzband leicht verlassen können und ins Leiterband gehen. Diese Elektronen sind frei und tragen zum Ladungstransport bei. Die beiden Bänder können direkt aneinander anschließen oder sich sogar überlappen. Leiter haben eine große Ladungsträgerdichte  $n$ .

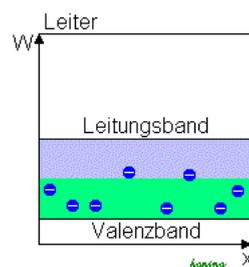


Abbildung 5: Der Leiter im Bändermodell

**Der Halbleiter im Bändermodell** Bei einem Halbleiter ist die Energiedifferenz zwischen dem Valenzband und dem Leiterband kleiner als 1 eV. Beim absoluten Nullpunkt  $T = 0K$  ist das Leiterband nicht besetzt, bei Zimmertemperatur sind nur wenige Elektronen im Leiterband. Die Ladungsträgerdichte  $n$  von Halbleitern ist klein. Halbleiter stehen im Periodensystem in der vierten Hauptgruppe, ein typischer Vertreter ist das *Silizium*.

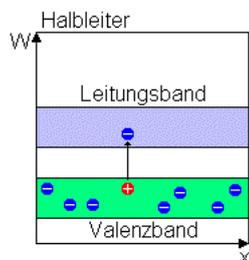


Abbildung 6: Der Halbleiter im Bändermodell

(Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/f/fd/B%C3%A4ndermodell.PNG>)

## 1.5 Halbleiter

### 1.5.1 Dotierung

Das Einlagern eines Fremdatoms in die Atomstruktur eines Halbleiters nennt man **Dotierung**. Man unterscheidet zwei Arten von Dotierung. Zum einen das Einbringen eines Atoms der dritten Hauptgruppe (**p-Dotierung**), zum anderen das Einlagern eines Atoms der fünften Hauptgruppe (**n-Dotierung**). Durch Dotierung eines Halbleiters kann man seine Leitfähigkeit um Zehnerpotenzen erhöhen.

**n-Dotierung** Die n-Dotierung erfolgt durch Einbringen von Atomen der fünften Hauptgruppe, den Donatoren, in den Halbleiter. Diese haben fünf Valenzelektronen von denen vier mit den Halbleiteratomen eine Atombindung eingehen. Vier deshalb, weil die Halbleiter aus Atomen der vierten Hauptgruppe bestehen und sie vier Valenzelektronen besitzen. Daraus resultiert, dass ein Elektron übrig bleibt, dieses ist ein *freies* Elektron. Es ist nur schwach gebunden, sein Energieniveau ist knapp über dem Leiterband.

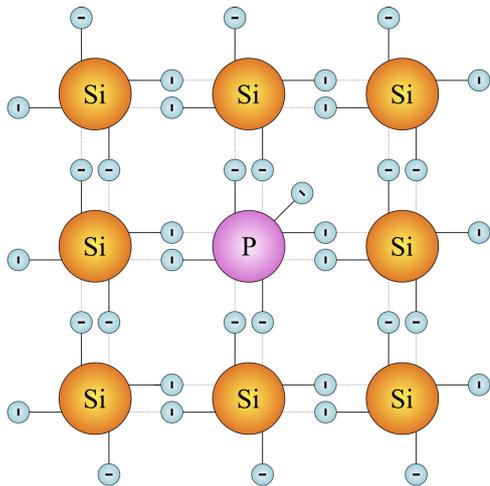


Abbildung 7: n-dotiertes Silizium

(Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/d/df/Silizium-n-Dotiert.png>)

**p-Dotierung** Um die p-Dotierung eines Halbleiters vorzunehmen, bringt man III-wertige Atome, die Akzeptoren, in den Siliziumkristall. Diese Akzeptoren besitzen drei Valenzelektronen. Diese drei Elektronen gehen eine Atombindung mit den Atomen des IV-wertigen Siliziums ein. Bei der vierten Atombindung des Siliziums fehlt ein Elektron. Dieses fehlende Elektron wird *Loch* oder *Defektelektron* genannt. Es verhält sich wie ein freibeweglicher positiver Ladungsträger. Sein Energieniveau ist knapp über dem Valenzband.

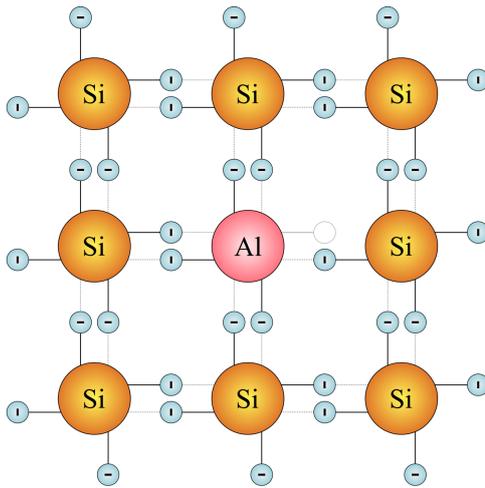


Abbildung 8: p-dotiertes Silizium

(Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/3/3f/Silizium-p-Dotiert.png>)

## 1.6 Bauteile

### 1.6.1 Glühlampe

Die **Glühlampe** besteht aus einem Befestigungssockel, über den der elektrische Strom zugeführt wird, und an dem ein Glühfaden befestigt ist und einem den Glühfaden schützenden Glaskolben. Der Glaskolben schützt sowohl mechanisch den Glühfaden, als auch vor dem Entweichen des Gases (Edelgas), das darin enthalten ist und das der Oxidation des Glühdrahtes entgegen wirkt. Der Glühfaden ist ein metallischer elektrischer Leiter, weshalb man die Glühlampe auch *Metallfadenlampe* nennt. Dieser wird durch eine von außen angelegte Spannung von Strom durchflossen. Dadurch erhitzt sich der Draht so stark, dass er Strahlung emittiert. Ein Teil dieser Strahlung ist im für das menschliche Auge sichtbaren Bereich, wir nehmen es als Licht wahr. Ein typisches Material, aus dem eine Glühwendel besteht, ist Wolfram. Es eignet sich besonders gut aufgrund der hohen Schmelztemperatur von etwa 3000 °C. Preisgünstigere Materialien wie Kupfer eignen sich nicht, aufgrund des geringeren Schmelzpunkts. Damit hängt zusammen, dass die aufgenommene elektrische Leistung zum größten Teil in thermischer Strahlung (Infrarot), also im nicht sichtbaren Bereich, emittiert wird. Für die Leistung einer Glühlampe gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$U \cdot I = P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (7)$$

Das  $\sigma$  ist die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $A$  die Oberfläche des Drahtes und  $T$  die Temperatur.

### 1.6.2 Kohlefadenlampe

Bei einer **Kohlefadenlampe** besteht der Glühfaden aus Kohle. Das Problem solcher Lampen ist, dass sie nur bei geringen Temperaturen betrieben werden können. Dann liegt ihr Emissionsmaximum aber im infraroten Spektrum. Nach dem *Wien'schen Verschiebungsgesetz* wächst die Frequenz des Strahlungsmaximums mit steigender

Temperatur an. Kohlefadenlampen erzeugen gelb-oranges Licht und produzieren dabei viel Wärme.

### 1.6.3 Diode

Eine Diode ist ein Bauteil mit zwei Anschlüssen, bei dem ein p-dotierter und ein n-dotierter Halbleiter verbunden sind. Das Besondere einer Diode ist, dass sie in eine Richtung Stromfluss ermöglichen kann und in die andere Richtung nicht.

Verbindet man einen p-dotierten Halbleiter mit einem n-dotierten, so wandern die freien Elektronen aus dem n-dotierten Halbleiter in den p-dotierten. Die Löcher des p-dotierten Halbleiters werden mit Überschusselektronen des n-dotierten Halbleiters aufgefüllt. Somit ergibt sich ein Ausgleichsstrom beim Verbinden der beiden Halbleiter. Es bildet sich so eine Grenzschicht, die *Raumladungszone*. Diese ist auf der Seite der p-Dotierung negativ geladen und auf der Seite der n-Dotierung positiv. Beim Verbinden verlassen so viele Elektronen den n-dotierten Halbleiter bis die Raumladungszone so groß geworden ist, also die p-Seite so negativ geworden ist, dass sie die Potentialdifferenz nicht mehr überwinden können.

**Sperrrichtung** Will man die Diode so schalten, dass *kein* Strom durch diese fließen kann, so schließt man die Kathode der Spannungsquelle an die p-Schicht und die Anode an die n-Schicht. Dadurch wird die Raumladungszone größer, welche es den Elektronen erschwert, diese zu durchqueren. Der Stromfluss ist somit gesperrt. Erhöht man die äußere Spannung so stark ( $\sim 100$  V), so wirkt eine solch große Kraft auf die freien Elektronen, dass diese zur Anode beschleunigt werden. Dabei reißen sie aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie weitere Elektronen mit. Es entsteht der sogenannte **Lawineneffekt**, der die Diode zerstört.

**Durchlassrichtung** Schließt man die Anode an die p-Schicht und die Kathode an die n-Schicht der Diode, so wird ein Stromfluss ermöglicht. Die Sperrschicht zwischen den beiden Halbleitern wird kleiner, da die Löcher in der p-Schicht von Elektronen der n-Schicht aufgefüllt werden. Diese werden dann schließlich von der Anode abgesaugt und die Kathode liefert immer neue Elektronen nach. Die Sperrschicht verschwindet völlig.

### 1.6.4 Zener-Diode

Das Besondere der **Zener-Diode** ist die geringe Dicke der Raumladungszone. Sie kann als Spannungsstabilisator oder als Überspannungsschutz verwendet werden. In Durchlassrichtung zeigt die Zener-Diode das typische Verhalten einer Diode, jedoch weist sie in Sperrrichtung ab einer bestimmten Spannung, der Durchbruchspannung, einen geringen Widerstand auf. Den Effekt, dass Strom in Sperrrichtung fließen kann wird **Zener-Effekt** genannt.

Ein Anwendungsbeispiel ist der Fahrraddynamo. Da die induzierte Spannung durch schnelleres Treten zunimmt und die Glühlampe nur eine Spannung von etwa 5 V aushält, schaltet man parallel dazu eine Zener-Diode. Diese sperrt bis 5 V den Strom und hat über 5 V einen kleinen Widerstand, sodass ein Großteil des Stromes durch die Diode fließt und so den Motor nicht schädigt.

([http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kennlinie\\_Z-Diode.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kennlinie_Z-Diode.jpg))

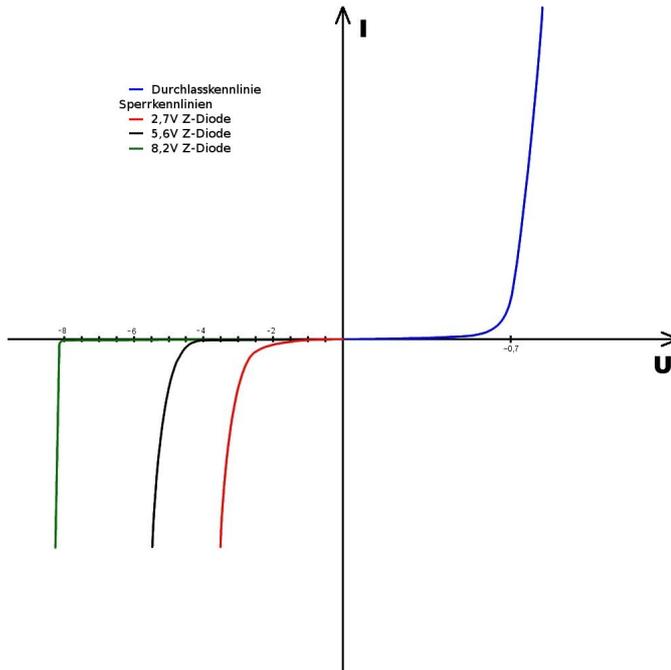


Abbildung 9: Kennlinie der Zenerdiode

### 1.6.5 Transistor

Der Transistor ist ein Bauteil, das aus zwei hintereinander geschalteten pn-Übergängen (Dioden) besteht. Es gibt folglich den pnp- und den npn-Transistor. Die drei Halbleiterschichten werden mit Kollektor (C), Basis (B) und Emmitter (E) bezeichnet, wobei die dünne Basis zwischen dem Emmitter und dem Kollektor liegt. Im Folgenden dient der npn-Transistor als Beispiel. In den nachfolgenden Bildern stellen die kleinen Kreise die beweglichen Ladungsträger dar (Elektronen  $-$ / Defektelektronen  $+$ ).

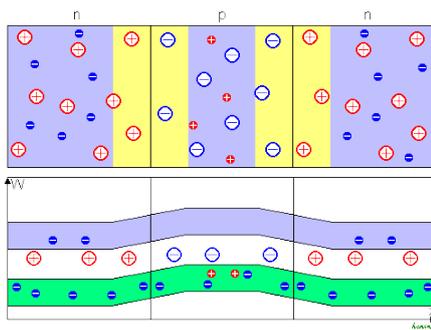


Abbildung 10: npn-Transistor

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bipolartransistor1.PNG>)

Schließt man eine Spannungsquelle an den Transistor, positiv am Kollektor, negativ am Emmitter, entspricht dies zwei Dioden von denen eine gesperrt ist. Es fließt also nur ein kleiner Strom, welcher genau so groß wie der Sperrstrom der B-C-Diode ist. Die angelegte Spannung verkleinert zwar die B-E-Sperrschicht, vergrößert jedoch die C-B-Sperrschicht.

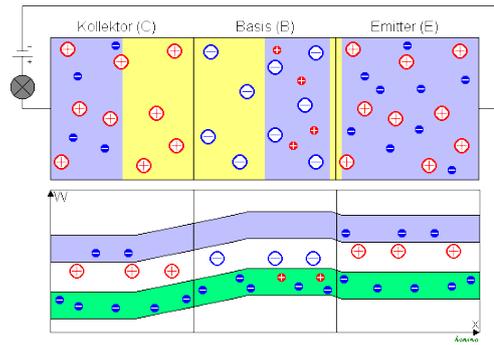


Abbildung 11: Spannung an CE

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bipolartransistor2.PNG>)

Durch Schließen des B-E-Stromkreises, + an der Basis, - am Emittter, wird die B-E-Diode leitend. Es gelangen Elektronen aus dem Emittter in die Basis. Wegen der geringen Dicke der Basis können die meisten Elektronen auf die Seite der C-B-Sperrschicht gelangen, von der aus diese keine potenzielle Barriere, sondern ein Gefälle darstellt. Aufgrund des positiv geladenen Kollektorkontaktes, werden die Elektronen in Richtung Kollektor beschleunigt und dort von der Spannungsquelle aufgenommen. Somit fließt ein Strom im C-E-Stromkreis.

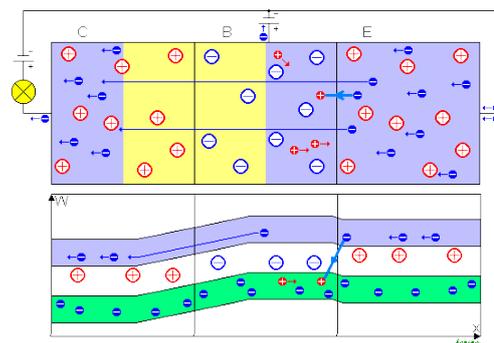


Abbildung 12: Spannung an CE und BE

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bipolartransistor3.PNG>)

## 2 Versuchsbeschreibung

### 2.1 Kennlinien von Lampen

Bei diesem Versuchsteil bauten wir einen Stromkreis auf, in den wir einmal eine Glühlampe und einmal eine Kohlefadenlampe schalteten. Zusätzlich schlossen wir ein Voltmeter parallel zur Lampe und ein Amperemeter in Serie dazu (Abbildung 13). Dann maßen wir in 10 V-Schritten von 0..230 V den Strom. Die nachfolgenden Bilder stammen aus dem Begleitheft zum Praktikum.

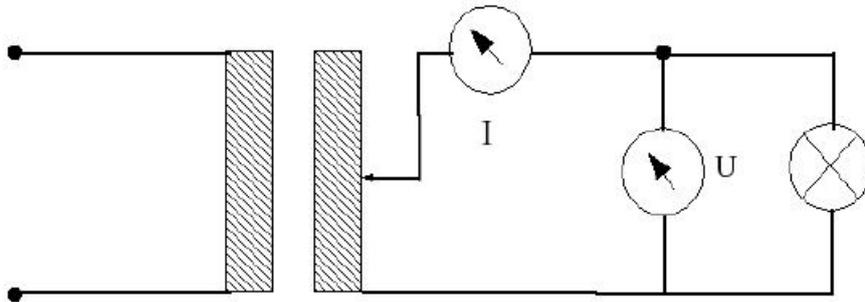


Abbildung 13: Kennlinien von Lampen

## 2.2 Diodenkennlinie

Um die Diodenkennlinie zu erhalten, bauten wir eine Schaltung (Abbildung 14), in der sich eine Zener-Diode befindet. Wir maßen wieder die Strom-Spannungs-Wertepaare, wobei zu beachten war, dass der Strom 100 mA und die Leistung 250 mW nicht übersteigt. Dies machten wir sowohl in Durchlassrichtung (Durchlasskennlinie), als auch in Sperrrichtung (Arbeitskennlinie).

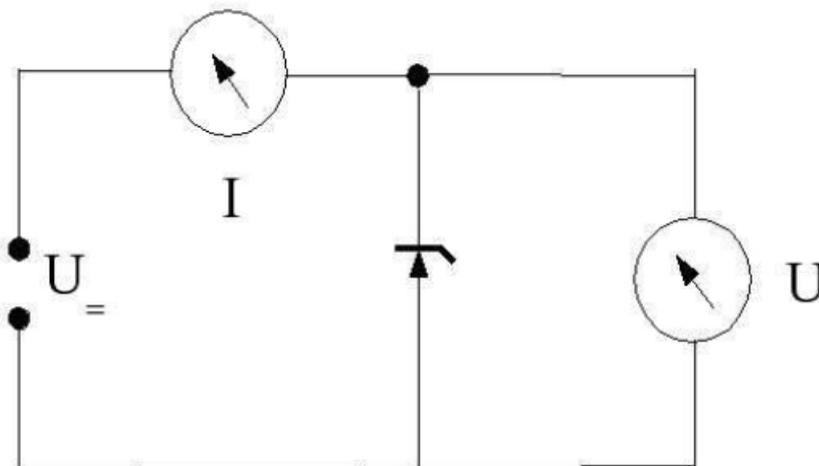


Abbildung 14: Diodenkennlinie

## 2.3 Spannungsstabilisierungsschaltung

Bei diesem Versuchsteil bauten wir die Schaltung aus Abbildung 15 nach. Der Widerstand  $R$  wird in (3.3) berechnet werden. Wir mussten nun die auch gemessene Spannung  $U_0$  von 5 V bis 20 V in 1 V-Schritten vergrößern und dabei jeweils  $U_Z$  und  $I$  messen.

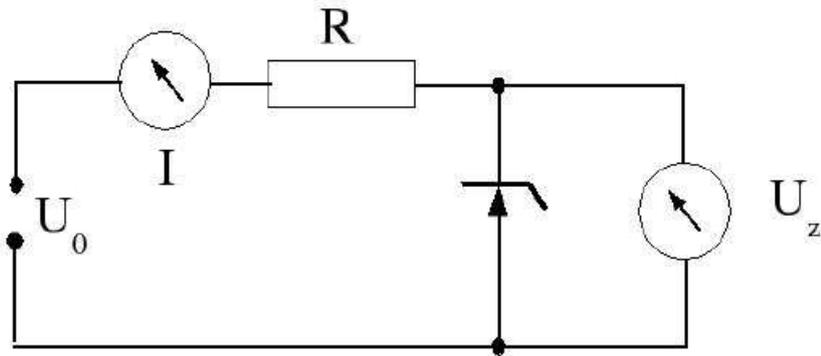


Abbildung 15: Spannungsstabilisierungsschaltung

## 2.4 Transistorkennlinien

Für die Transistorkennlinien bauten wir die Schaltung gemäß Abbildung 16, wobei wir noch einen Widerstand von 1 M $\Omega$  in den Basis-Emitter-Kreis schalteten. Hierbei führten wir vier Messungen durch. Wir maßen bei einem konstanten Basis-Emitter-Strom  $I_{BE}$  die  $U_{CE}$ -  $I_{CE}$ -Kennlinie. Hierbei war auf die Maximalwerte von  $I_{CE_{max}} = 30\text{mA}$ ,  $U_{CE_{max}} = 20\text{V}$  und  $P_{max} = 360\text{mW}$ .

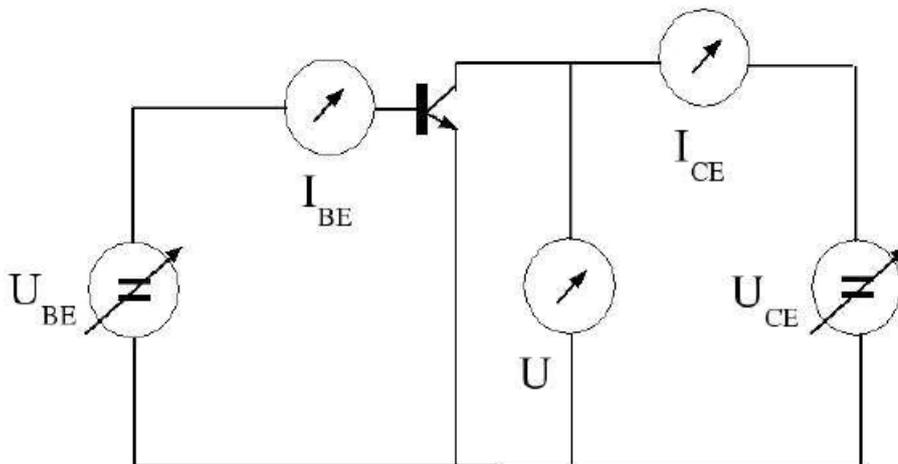


Abbildung 16: Transistorkennlinien

### 3 Versuchsauswertung

#### 3.1 Kennlinien von Lampen

Die Fehler bei beiden Messungen betragen 1 V bei U und 1 mA bei I.

##### 3.1.1 Kennlinie einer Glühlampe

$U$ in V	$I$ in A	$\sqrt[4]{U \cdot I}$	$\Delta I$	$\Delta U$	$\frac{\Delta U}{\Delta I}$
0	0,025	0,000			
10	0,076	0,934	0,051	10	196,078
20	0,095	1,174	0,019	10	526,316
30	0,107	1,339	0,012	10	833,333
40	0,120	1,480	0,013	10	769,231
50	0,132	1,603	0,012	10	833,333
60	0,143	1,711	0,011	10	909,091
70	0,153	1,809	0,010	10	1000,000
80	0,163	1,900	0,010	10	1000,000
90	0,173	1,986	0,010	10	1000,000
100	0,183	2,068	0,010	10	1000,000
110	0,191	2,141	0,008	10	1250,000
120	0,200	2,213	0,009	10	1111,111
130	0,209	2,283	0,009	10	1111,111
140	0,217	2,348	0,008	10	1250,000
150	0,225	2,410	0,008	10	1250,000
160	0,233	2,471	0,008	10	1250,000
170	0,240	2,527	0,007	10	1428,571
180	0,248	2,585	0,008	10	1250,000
190	0,254	2,636	0,006	10	1666,667
200	0,262	2,690	0,008	10	1250,000
210	0,268	2,739	0,006	10	1666,667

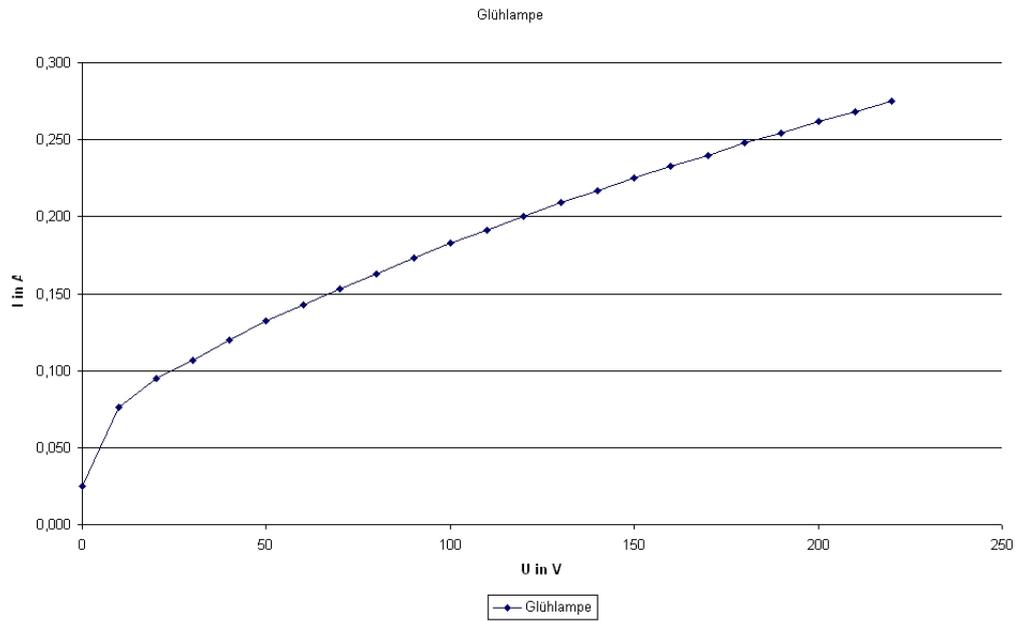


Abbildung 17: Kennlinie der Glühlampe

Man sieht, dass der Widerstand der Glühlampe sich ab etwa 25 V linear zur Spannung verhält.

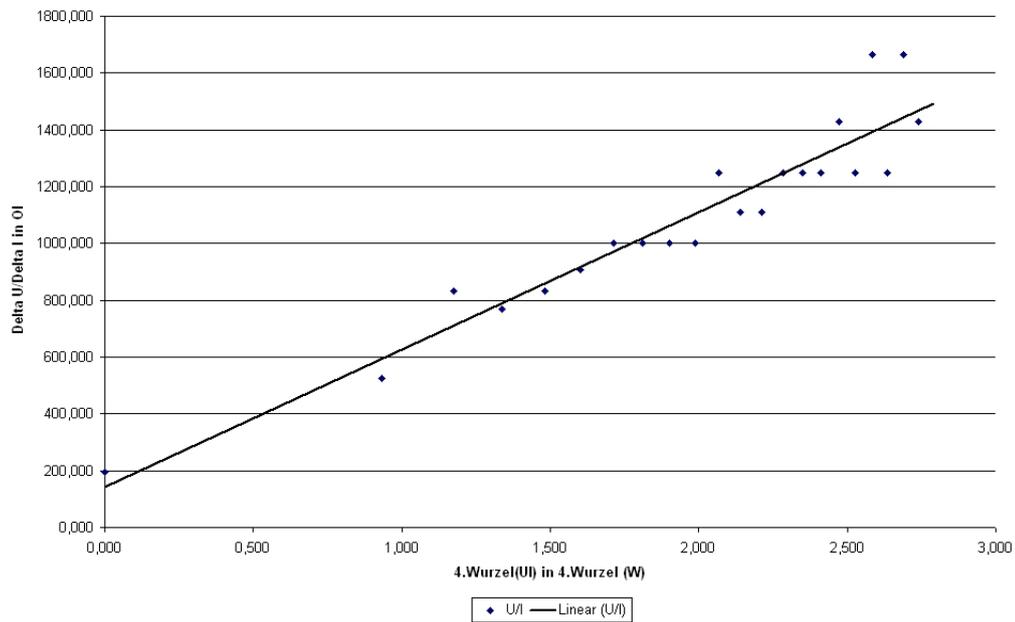


Abbildung 18: 1.2

Man sieht hier, dass sich  $\sqrt[4]{U \cdot I}$  zu  $R(T) = \frac{\Delta U}{\Delta I}$  nur mit größerem Fehler linear verhält. Es gilt:  $\sqrt[4]{U \cdot I} \propto T$  und somit  $T \propto R$ . Also nimmt der Widerstand mit zunehmender Temperatur zu.

## 3.1.2 Kennlinie einer Kohlefadenlampe

$U$ in V	$I$ in A	$\Delta U$	$\Delta I$	$\sqrt[4]{U \cdot I}$	$\frac{\Delta U}{\Delta I}$	$\ln\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right)$
0	0,001			0,000		
10	0,013	10	0,012	0,600	833,333	-6,725
20	0,025	10	0,012	0,841	833,333	-6,725
30	0,038	10	0,013	1,033	769,231	-6,645
40	0,052	10	0,014	1,201	714,286	-6,571
50	0,067	10	0,015	1,353	666,667	-6,502
60	0,082	10	0,015	1,489	666,667	-6,502
70	0,097	10	0,015	1,614	666,667	-6,502
80	0,115	10	0,018	1,742	555,556	-6,320
90	0,139	10	0,024	1,881	416,667	-6,032
100	0,147	10	0,008	1,958	1250,000	-7,131
110	0,163	10	0,016	2,058	625,000	-6,438
120	0,181	10	0,018	2,159	555,556	-6,320
130	0,199	10	0,018	2,255	555,556	-6,320
140	0,217	10	0,018	2,348	555,556	-6,320
150	0,237	10	0,02	2,442	500,000	-6,215
160	0,257	10	0,02	2,532	500,000	-6,215
170	0,276	10	0,019	2,617	526,316	-6,266
180	0,296	10	0,02	2,702	500,000	-6,215
190	0,318	10	0,022	2,788	454,545	-6,119
200	0,337	10	0,019	2,865	526,316	-6,266
210	0,359	10	0,022	2,947	454,545	-6,119
220	0,382	10	0,023	3,028	434,783	-6,075

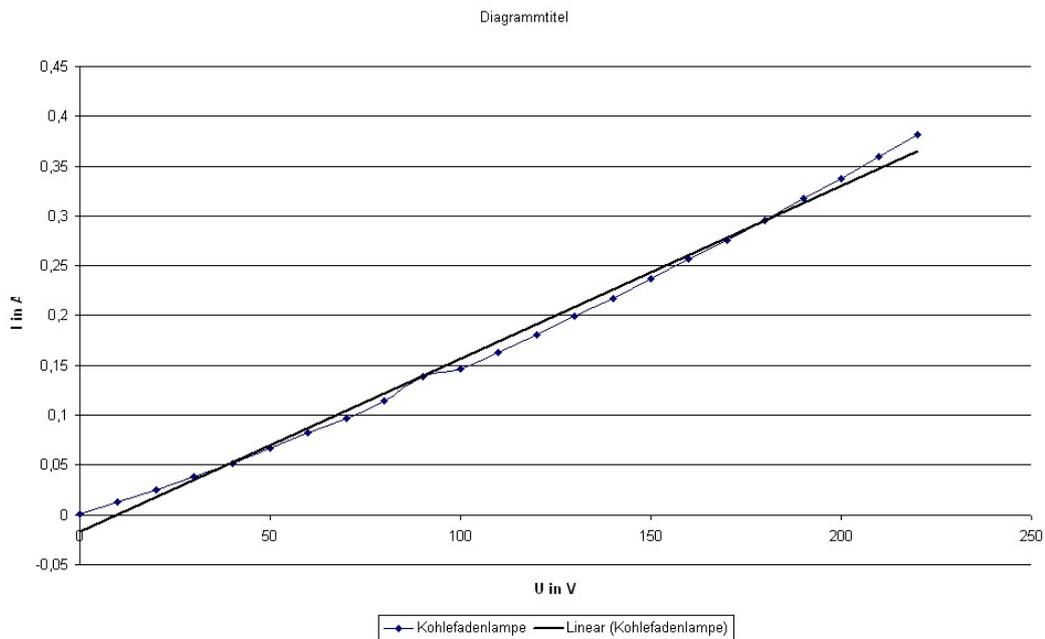


Abbildung 19: Kennlinie der Kohlefadenlampe

Die Kennlinie der Kohlefadenlampe weist ein weitestgehend lineares Schaubild

auf.

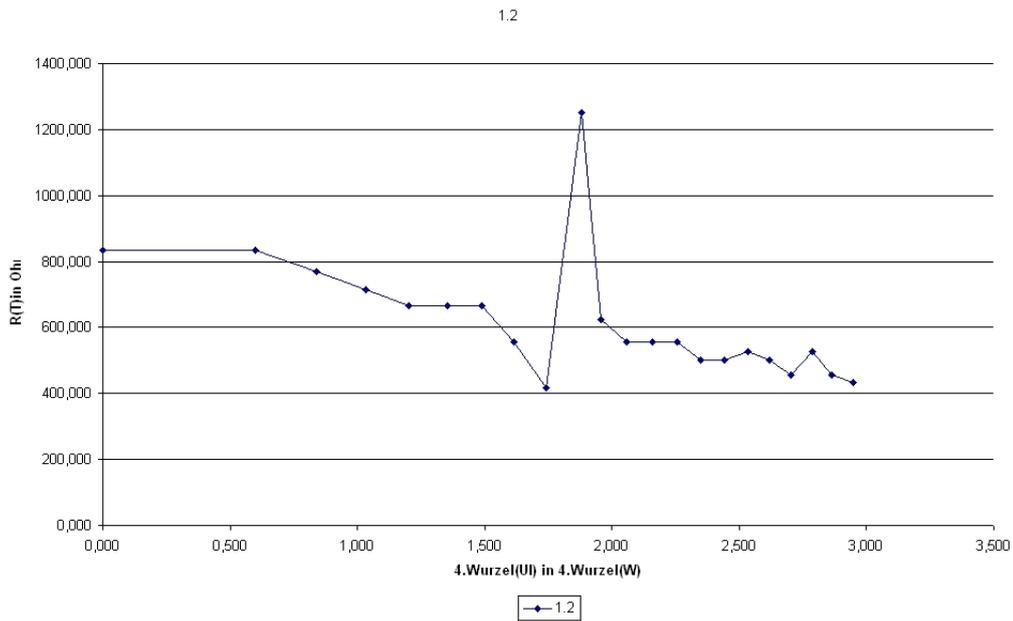


Abbildung 20: 1.2

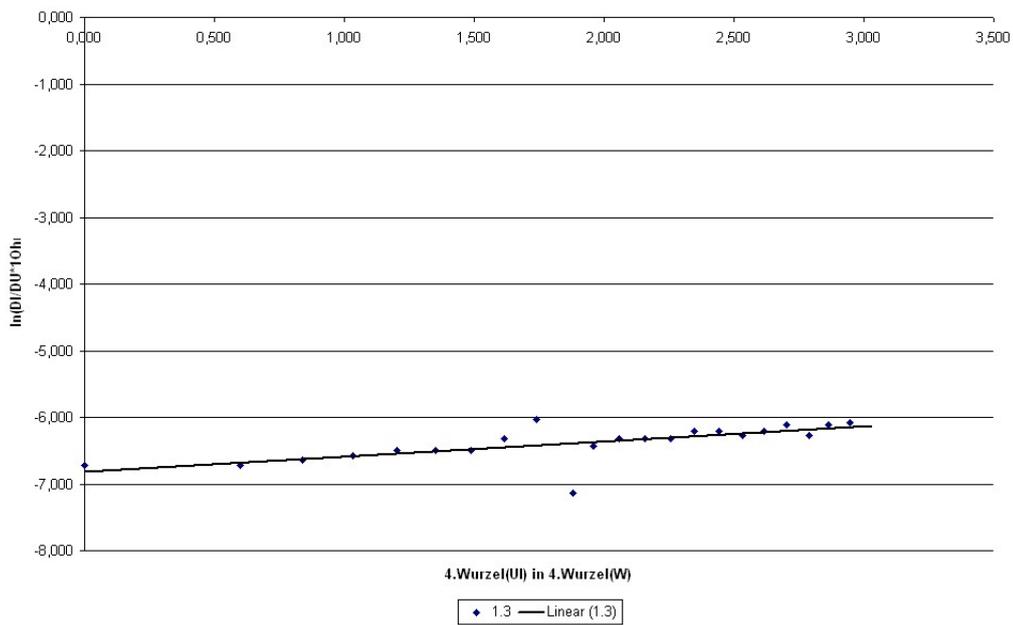


Abbildung 21: 1.3

Auf diesem Schaubild ist zu sehen, dass sich  $\sqrt[4]{U} \cdot I$  bei einer Kohlefadenlampe bis auf Fehler proportional zu  $\ln \frac{\Delta I}{\Delta U}$  verhält. Also nimmt der Widerstand exponentiell mit zunehmender Temperatur ab.

### 3.2 Diodenkennlinie

Trägt man die Durchlass- und Arbeitskennlinie mit ihren Verlustleistungshyperbeln in ein Schaubild, ergibt sich Folgendes:

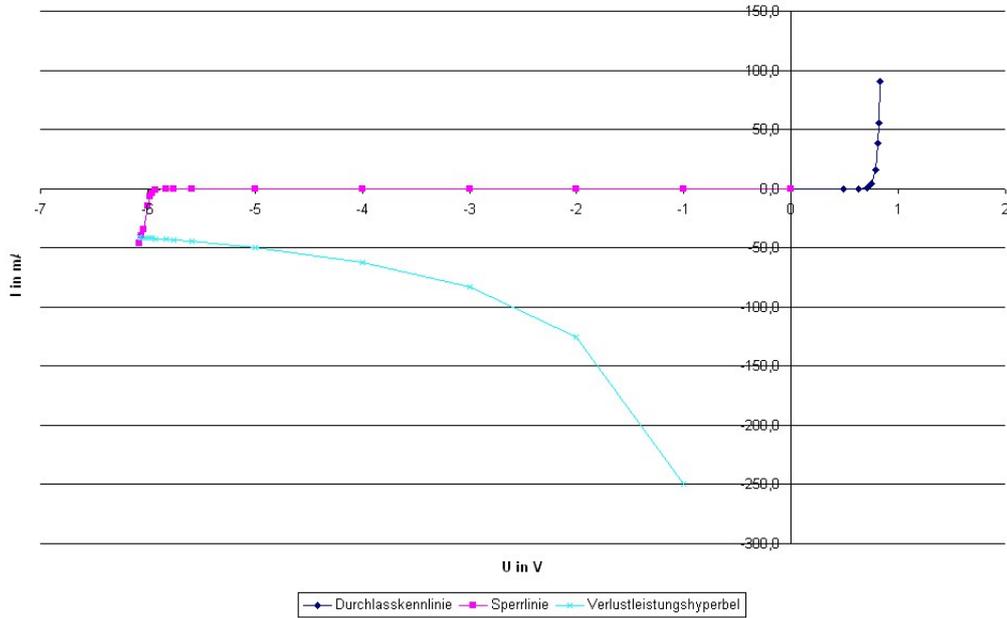


Abbildung 22: Diodenkennlinie

#### 3.2.1 Durchlassrichtung

$U$ in V	$I$ in mA	$\ln(I/\text{mA})$
0	0,0	-
0,49	0,0	-
0,63	0,1	-2,303
0,71	1,0	0,000
0,72	1,6	0,470
0,75	3,9	1,361
0,79	15,7	2,754
0,81	38,6	3,653
0,82	55,6	4,018
0,83	90,4	4,504

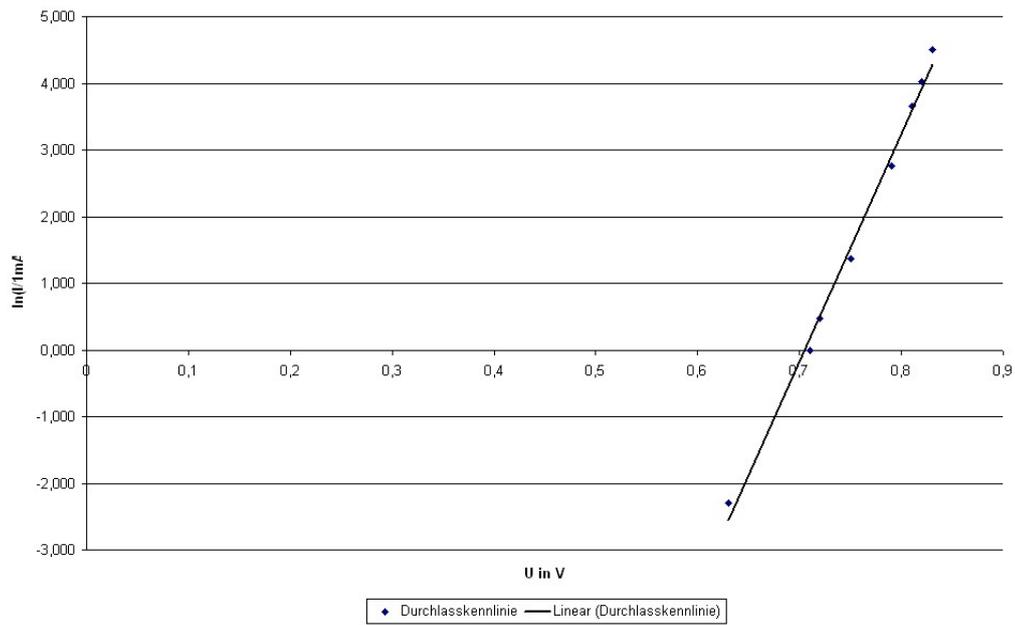


Abbildung 23: Durchlasskennlinie der Zenerdiode

### 3.2.2 Sperrrichtung

U in V	I in mA	$\ln(I/mA)$
0,00	0,00	-
-1,00	0,00	-
-2,00	0,00	-
-3,00	0,00	-
-4,00	0,00	-
-5,00	0,00	-
-5,59	0,00	-
-5,76	-0,20	-1,609
-5,83	-0,30	-1,204
-5,93	-0,80	-0,223
-5,96	-3,90	1,361
-5,98	-7,00	1,946
-6,00	-14,40	2,667
-6,04	-34,06	3,528
-6,06	-40,30	3,696
-6,08	-46,06	3,830

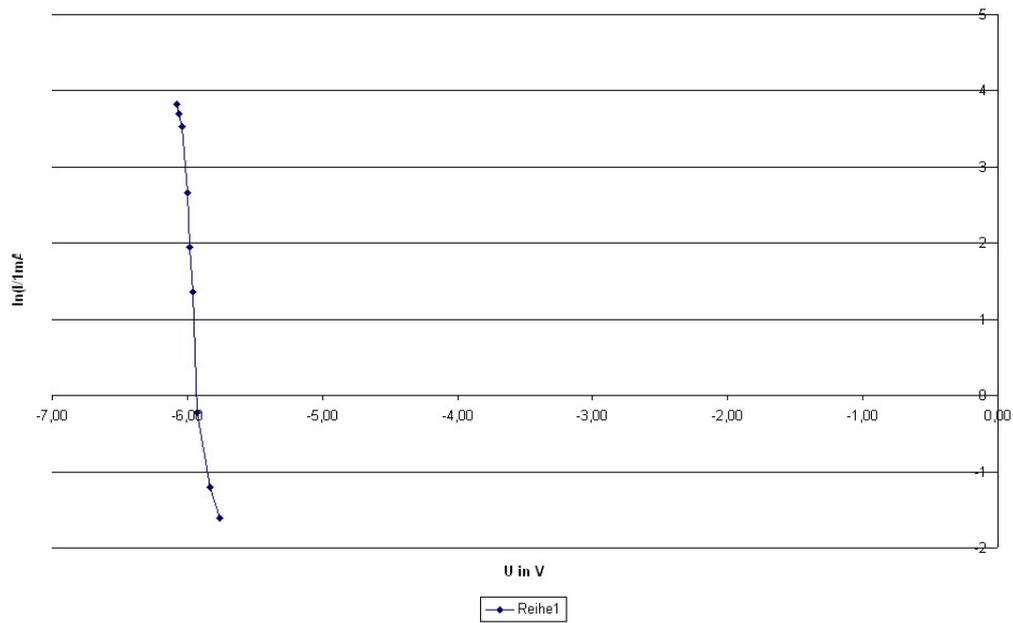
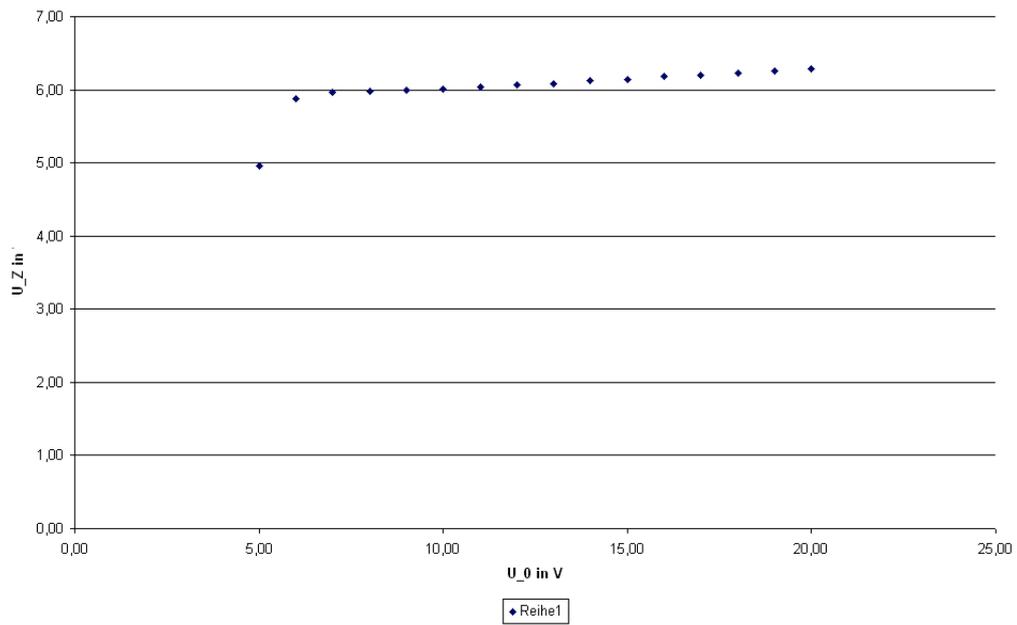
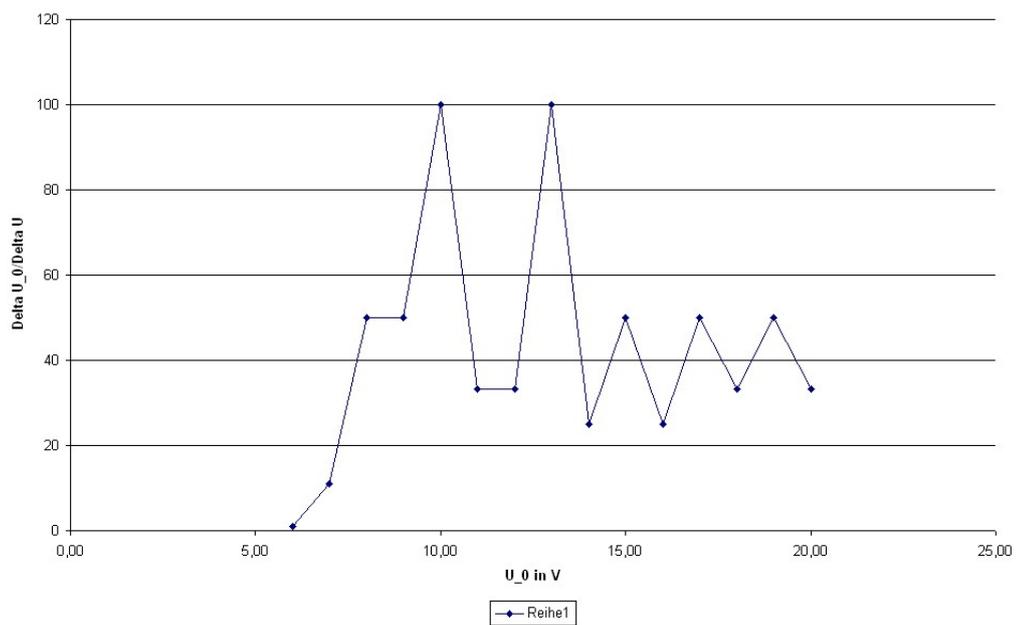


Abbildung 24: Arbeitskennlinie der Zenerdiode

### 3.3 Spannungsstabilisierungsschaltung

Der Widerstand  $R$  betrug  $300 \Omega \pm 10 \Omega$ .  $\frac{\Delta U_0}{\Delta U_z}$  bezeichnet den Stabilisierungsfaktor der Spannungsstabilisierungsschaltung.

$U_0$ in V	$U_Z$ in V	$I$ in mA	$\Delta U_0$ in V	$\Delta U_Z$ in V	$\frac{\Delta U_0}{\Delta U_Z}$
5,00	4,96	0,00			
6,00	5,87	0,40	1,00	0,91	1,10
7,00	5,96	4,00	1,00	0,09	11,11
8,00	5,98	8,20	1,00	0,02	50,00
9,00	6,00	13,60	1,00	0,02	50,00
10,00	6,01	18,90	1,00	0,01	100,00
11,00	6,04	27,30	1,00	0,03	33,33
12,00	6,07	39,20	1,00	0,03	33,33
13,00	6,08	49,60	1,00	0,01	100,00
14,00	6,12	60,40	1,00	0,04	25,00
15,00	6,14	71,90	1,00	0,02	50,00
16,00	6,18	87,80	1,00	0,04	25,00
17,00	6,20	97,60	1,00	0,02	50,00
18,00	6,23	107,10	1,00	0,03	33,33
19,00	6,25	118,10	1,00	0,02	50,00
20,00	6,28	129,30	1,00	0,03	33,33

Abbildung 25:  $U_Z$  über  $U_0$ Abbildung 26: Stabilisierungsfaktor über  $U_0$ 

### 3.4 Transistorkennlinien

Der Widerstand  $R$  betrug für alle Messungen  $1\text{ M}\Omega$ .  $\beta$  steht für die Kleinstromverstärkung und berechnet sich so:  $\beta = \frac{\Delta I_{CE}}{\Delta I_{BE}}$ .

**3.4.1**  $I_{BE} = 5,1 \mu A$ 

$U_{CE}$ in V	$I_{CE}$ in mA
0,00	0,0
0,06	0,1
0,08	0,3
0,10	0,5
0,16	1,1
0,27	1,2
0,54	1,2
2,66	1,2
3,63	1,2
4,00	1,2
5,00	1,2
6,00	1,2
7,00	1,2
8,00	1,2
9,00	1,2
10,00	1,2
11,00	1,2
11,12	1,2
16,13	1,3

Für den Ausgangswiderstand gilt:  $R = (8333,333 \pm 0,009)\Omega$

**3.4.2**  $I_{BE} = 10,0 \mu A$ 

$U_{CE}$ in V	$I_{CE}$ in mA
0,03	0,1
0,05	0,3
0,07	0,6
0,10	1,1
0,11	1,4
0,13	1,7
0,14	1,9
0,17	2,1
0,18	2,2
0,24	2,3
0,72	2,3
1,08	2,2
1,52	2,3
2,08	2,3
3,40	2,3
4,00	2,2
5,00	2,2
6,00	2,2
7,00	2,2
7,58	2,0
11,09	2,0

Für die Kleinstromverstärkung  $\beta$  gilt:  $\beta = 163,26 \pm 3,46$ .

Für den Ausgangswiderstand gilt:  $R = 5000,000 \pm 0,00525\Omega$ .

**3.4.3**  $I_{BE} = 15,0 \mu A$ 

$U_{CE}$ in V	$I_{CE}$ in mA
0,00	0,0
0,04	0,2
0,06	0,7
0,08	1,2
0,09	1,5
0,11	1,9
0,13	2,5
0,14	2,7
0,17	3,3
0,25	3,5
0,50	3,5
1,00	3,5
2,00	3,5
2,54	2,9
3,90	2,9
5,70	2,9
10,76	3,0
14,59	3,0

Für die Kleinstromverstärkung gilt:  $\beta = 200 \pm 24$ . Der

Ausgangswiderstand nimmt folgenden Wert an:  $R = (3333,333 \pm 0,0034)\Omega$

**3.4.4**  $I_{BE} = 20,0 \mu A$ 

$U_{CE}$ in V	$I_{CE}$ in mA
0,00	0,0
0,03	0,3
0,05	0,6
0,07	1,2
0,08	1,7
0,10	2,2
0,12	3,1
0,14	3,7
0,16	4,2
0,17	4,3
0,19	4,5
0,49	4,8
0,58	3,9
0,70	3,9
2,95	4,1
6,30	4,2
9,93	4,2
13,00	4,3
15,80	4,4

Hier gilt:  $\beta = 240 \pm 24,8$ . Der Ausgangswiderstand nimmt

folgenden Wert an:  $R = (2380,952 \pm 0,002)\Omega$ .

### 3.5 Kurvenschar von $I_{CE}(U_{CE})$

$I_{BE}$  stellt den Scharparameter dar.

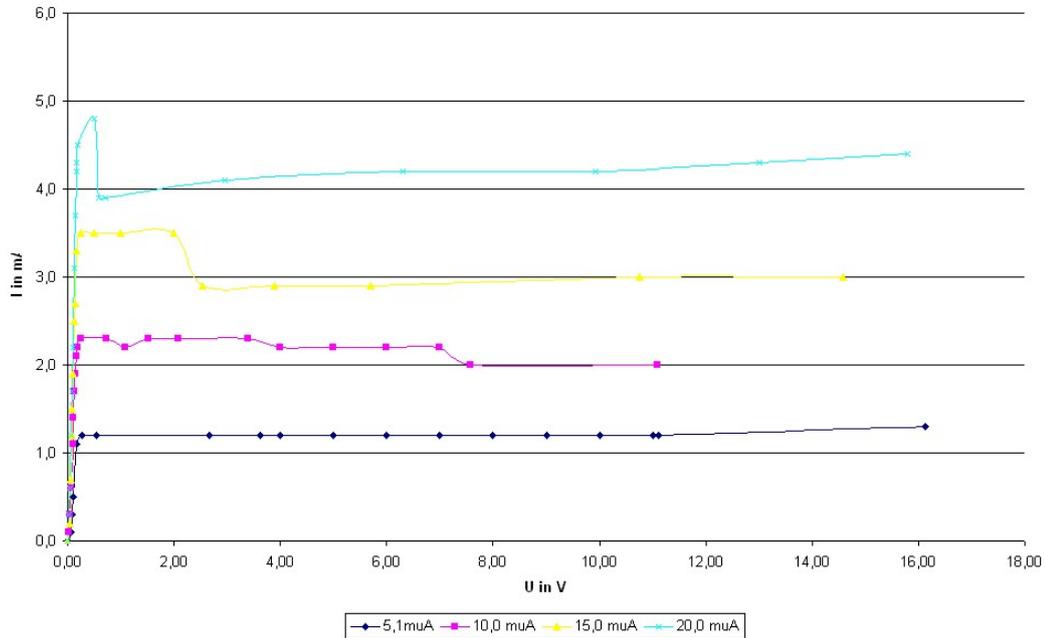


Abbildung 27: Kurvenschar  $I_{CE}(U_{CE})$

## 4 Fehlerdiskussion

Da wir alle Messwerte mit einem Digitalmultimeter maßen, ist hier schon einmal der erste Fehler zu suchen. Zunächst hat das Gerät selber eine Ungenauigkeit, die sich aber in Grenzen hält. Ein viel größeres Problem stellte das Schwanken der Werte da. So war es uns nur schwer möglich, den „richtigen“ Wert zu notieren. Besondere Probleme bereitete uns die Transistorkennlinie. Hierbei schwankte der Strom im Kollektor-Emitter-Kreis ungewöhnlich stark. Vor allem bei größerem Strom im Basis-Emitter-Kreis ergaben sich nicht allzu sinnvolle Werte. Bei anderen Versuchs- teilen kann man die Übereinstimmung von Theorie und Praxis sehr schön sehen.

## 5 Literaturverzeichnis

[http://www.uni-ulm.de/mp-physik/Grundpraktikum/Dokumente\\_SS07/Anleitungen\\_Teil2.pdf](http://www.uni-ulm.de/mp-physik/Grundpraktikum/Dokumente_SS07/Anleitungen_Teil2.pdf)  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Bipolartransistor>  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Pauli\\_Prinzip](http://de.wikipedia.org/wiki/Pauli_Prinzip)