

Versuch: P2-52

Widerstandskennlinien

- Vorbereitung -

Vorbemerkung

Der elektrische Widerstand eines Materials hängt von vielen physikalischen Größen ab. Für die praktische Anwendung modifiziert man Widerstände so, dass sie hauptsächlich nur von einer Größe abhängen, z.B.:

- Temperatur (NTC- bzw. PTC-Widerstand, „negative / positive temperature coefficient“)
- Spannung (VDR-Widerstand, „voltage dependent resistance“)
- Lichteinstrahlung (LDR-Widerstand, „light dependent resistance“)
- Zug bzw. Dehnung (SDR-Widerstand, „strain dependent resistance“)
- Magnetfeld (Feldplatte)

Die Bauform des Widerstandes beeinflusst seine Induktivität und Kapazität, so dass diese ebenfalls Berücksichtigung finden muss (vor allem bei hochfrequentem Wechselstrom).

Inhaltsverzeichnis

1	Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes	2
2	Widerstände von Metallen und Glühbirnen	4
2.1	I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands	4
2.2	Kalt- und Betriebswiderstand einer 60 W-Glühbirne	4
2.3	Kalt- und Betriebswiderstand einer 50 W-Kohlefadenlampe	5
3	I(U)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile	5
3.1	Siliziumdiode (SID)	6
3.2	Zenerdiode (ZED)	6
3.3	Germaniumdiode (GED)	7
3.4	Varistor (VDR)	7
4	Punktweise Messung der Varistor-Kennlinie	7
5	Tunnel diode (TUD)	8
5.1	Punktweise Messung der Kennlinie	8
5.2	Sprungverhalten des Stromes	8
5.3	Oszillographische Darstellung des Sprunges	8

1 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes

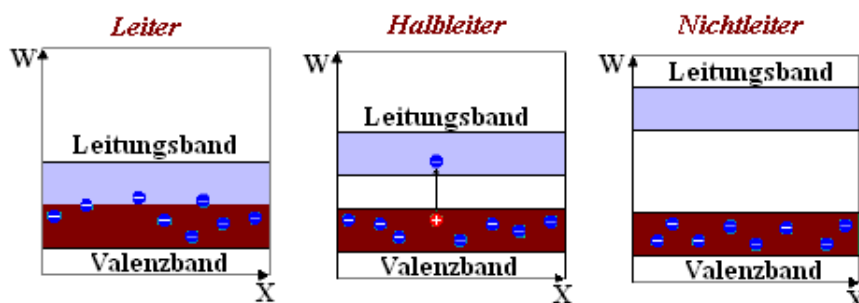
Halbleiter - Grundlagen

Die elektrische Leitfähigkeit eines Halbleiters liegt bei Zimmertemperatur, wie der Name schon andeutet, zwischen der von Leitern und Isolatoren. Erklärbar ist dies durch die Kristallstruktur der Atome:

- **Elektrischer Leiter:** Pro Atom ist im Kristallgitter je ein Elektron frei, da nur vier der fünf Valenz- (oder Außen-)Elektronen zur Bindung benötigt werden. Eine elektrische Spannung an den Enden des Leiters bewirkt eine Kraft auf die freien Elektronen, es kommt zum Stromfluss.
- **Isolator:** Im Kristallgitter von Isolatoren sind keine freien Elektronen vorhanden, weshalb kein Strom fließen kann.
- **Halbleiter:** Eigentlich sind im Kristallgitters eines Halbleiters wie beim Isolator keine freien Elektronen zu finden, sämtliche Valenzelektronen werden zur Bindung des Atoms benutzt. Im Gegensatz zum Isolator ist es bei diesen Materialien aber mit relativ wenig Energieaufwand verbunden, ein Elektron aus dem Kristallgitter herauszulösen. Deshalb kommt es bei Temperaturen oberhalb des absoluten Temperaturnullpunkts durch die Wärmebewegung der Atome immer wieder dazu, dass einzelne freie Elektronen entstehen - der Körper wird leitfähig. Klar ist: je höher die Temperatur, desto größer die Eigenbewegung, also größere Leitfähigkeit des Materials.

Halbleiter im Bändermodell

Im Bändermodell, einem quantenmechanischen Modell zur Beschreibung der Energiezustände der Elektronen in einem Kristall, lässt sich der Halbleiter ebenfalls erklären: jedes Elektron eines Atoms besitzt eine Energie, die mit steigendem Abstand vom Kern zunimmt. Im Kristall sind die Atome verbunden. Durch die Krafteinwirkung der Atome untereinander entstehen Energiebänder, in denen sich die Elektronen aufhalten. Die gebundenen Elektronen befindet sich im sog. Valenzband, die freien Elektronen im Leitungsband.



- **Elektrischer Leiter:** Valenzband und Leitungsband überlappen sich, so dass viele freie Elektronen existieren können.
- **Halbleiter und Isolatoren:** Zwischen Valenz- und Leitungsband befindet sich eine verbotene Zone, in der sich keine Elektronen aufhalten können. Einzelne Elektronen können diese Zone allerdings überspringen, wenn sie ausreichend Energie aufgenommen haben. Bei Isolatoren ist der Abstand allerdings so groß, dass dies fast keinem Elektron gelingt. Bei Halbleitern ist der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband nicht ganz so groß, so dass die Wärmebewegung bei Zimmertemperatur ausreicht, dass Elektronen ins Leitungsband gelangen können. Somit haben wir im Leitungsband einen Stromfluß negativer Ladungsträger, während im Kristallgitter durch das fehlende Elektron ein Loch entsteht. Dieses Loch wird von einem benachbarten Elektron gefüllt, sobald eine Spannung angelegt wird, die die Elektronen Richtung Pluspol „zieht“. Hierdurch entsteht wiederum ein Elektronenloch, welches auf die gleiche Weise aufgefüllt wird und so weiter... . Insgesamt wandert also ein Elektronenloch vom Plus- zum Minuspol der Spannungsquelle, was man als „Strom positiver Ladungsträger“ interpretieren kann.

n-Leitung (Elektronenleitung)

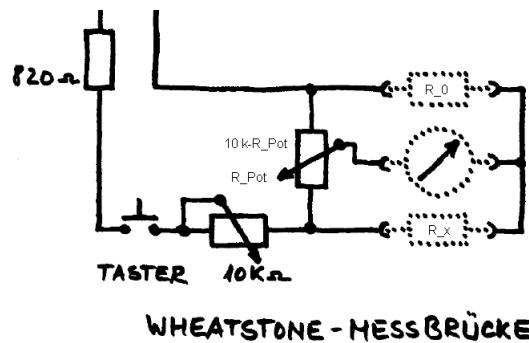
Das oben beschriebene Leitungsverhalten eines Halbleiters lässt sich durch das gezielte Einbringen von Fremdatomen beeinflussen. Fremdatome mit einem zusätzlichen Valenzelektron (genannt Donatoren) flechten sich in das Gitter ein, was zur Folge hat, dass das zusätzliche Elektron für die Bindung nicht benötigt wird. Deshalb ist nur sehr wenig Energie nötig, um es aus dem Gitter herauszulösen - es stehen also sehr viele freie Elektronen für die Leitung zur Verfügung, diese Dotierung wird deshalb als n-Leitung bezeichnet.

p-Leitung (Löcherleitung)

Fremdatome, die über ein Valenzelektron weniger verfügen als die Atome des Gitters (genannt Akzeptoren), können benachbarten Atomen ohne großen Energieaufwand ein Elektron „entreißen“, wodurch zusätzliche Löcher entstehen. Wie oben beschrieben entsteht über das Fortschreiten der Löcher ein Strom positiver Ladungsträger, weshalb man dies als p-Leitung bezeichnet.

Versuch

Im Versuch wird nun ein Halbleiterwiderstand Temperaturen von 20°C bis 200°C ausgesetzt und mittels der Wheatstoneschen Brückenschaltung der Widerstand gemessen. Im Detail wird der zu bestimmende Widerstand R_x zusammen mit einem bekannten Referenzwiderstand R_0 folgendermaßen vor ein 10kΩ-Potentiometer geschaltet:



Das Potentiometer ist nun so einzustellen, dass auf dem eingebauten Strommessgerät selbst im empfindlichsten Bereich kein Strom registriert wird. Der gesuchte Widerstand R_x lässt sich aus dem Verhältnis von Potentiometerstellung und Referenzwiderstand R_0 bestimmen:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_{Pot}}{10 \text{ k}\Omega - R_{Pot}} \quad (1)$$

$$\Rightarrow R_x = \frac{R_{Pot}}{10 \text{ k}\Omega - R_{Pot}} \cdot R_0 \quad (2)$$

Wichtig: Der Messstrom darf nur kurzzeitig und nicht höher als nötig eingestellt werden, da er den Halbleiterwiderstand erwärmt und dadurch die Messung verfälscht, wovon wir uns im Experiment auch überzeugen sollen. Entsprechend der zuvor abgehandelten Theorie ist bei steigenden Temperaturen mit einem abnehmenden Widerstand zu rechnen, und zwar entsprechend der Relation

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (3)$$

mit unbekanntem Koeffizienten a und b , die experimentell bestimmt werden sollen. Hat man eine Reihe (R, T) -Wertepaare bestimmt, so lässt sich durch geschickte Auftragung leicht auf a und b zurückschließen: logarithmieren von (3) liefert nämlich:

$$\ln R = \frac{b}{T} + \ln a \quad (4)$$

Trägt man also den Logarithmus des Widerstands ($\ln R$) über der reziproken Temperatur ($\frac{1}{T}$) auf, so erhält man eine Ausgleichsgerade der Messpunkte mit der Steigung b und dem y-Achsenabschnitt $y = \ln a$, so dass wir nur noch $a = e^y$ berechnen müssen.

2 Widerstände von Metallen und Glühbirnen

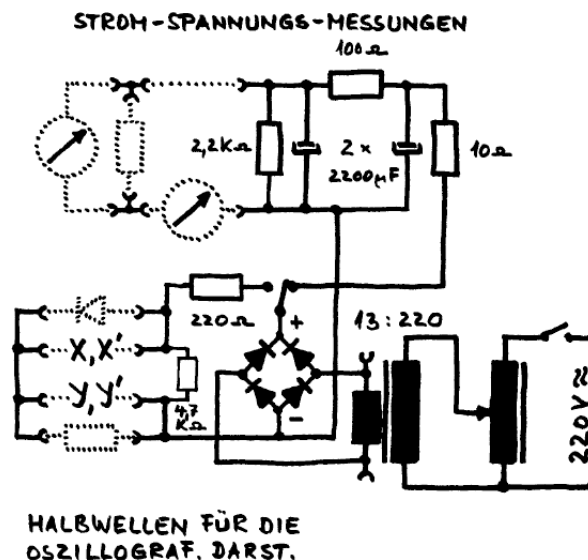
2.1 I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands

Mittels Oszilloskop soll in diesem Versuchsteil die Kennlinie eines Edelmetallwiderstands bei Zimmertemperatur aufgenommen werden. Gemäß dem Ohm'schen Gesetz, das in diesem Fall Gültigkeit besitzt, ist von einem linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung auszugehen. Der Kehrwert des Widerstands R ist gerade die Steigung der Ausgleichsgeraden im I-U-Diagramm:

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \quad (5)$$

Der Einfluss der durch den Messstrom bedingten Erwärmung des Widerstandes auf die Messung soll im Folgenden untersucht werden. Bei Metallen nimmt der Widerstand bei steigenden Temperaturen zu, da die stärkeren Molekularbewegungen Elektronenstöße hervorrufen, die den Stromfluss hemmen. Es ist also mit einer Abflachung der Kurve zu rechnen, die Temperaturabhängigkeit sollte aber lange nicht so stark wie beim Halbleiter aus Aufgabe 1 sein.

Die Realisierung dieses Versuchsteils erfolgt über die Halbwellenschaltung des Experimentiergeräts. Eventuell kann eine Eichung der Oszillographenempfindlichkeit in beiden Richtungen nötig sein, diese lässt sich mit vorher genau zu messenden Wechselspannungen aus dem Experimentiergerät vornehmen.



2.2 Kalt- und Betriebswiderstand einer 60 W-Glühbirne

Mit den Daten $P = 60 \text{ W}$ bei $U = 220 \text{ V}$ lässt sich der Betriebswiderstand bestimmen:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} \quad (6)$$

$$\Rightarrow R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220 \text{ V})^2}{60 \text{ W}} \approx 807 \Omega \quad (7)$$

Der Kaltwiderstand der Glühbirne (Glühwendel aus Wolfram) soll nun mit Hilfe eines Ohmmeters gemessen werden. Metalle sind Kaltleiter, wir erwarten also für den Kaltwiderstand einen deutlich kleineren Betrag als für den oben berechneten Betriebswiderstand. Der Grund dafür, dass die Lampe trotzdem nicht sofort durchbrennt, ist in der Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Wolfram zu finden: der große Einschaltstrom erhitzt den Wolfram-Glühwendel schnell, so dass der mit der Temperatur steigende Widerstand den Strom begrenzt, was ein Durchglühen verhindert.

2.3 Kalt- und Betriebswiderstand einer 50 W-Kohlefadenlampe

Der Betriebswiderstand der Kohlefadenlampe ergibt sich aus den Nenndaten $P = 50 \text{ W}$ und $U = 220 \text{ V}$ analog zu Formel (7):

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220 \text{ V})^2}{50 \text{ W}} = 968 \Omega \quad (8)$$

Kohlenstoff ist ein Heißleiter, d.h. bei höheren Temperaturen ist der Widerstand geringer als bei niedrigen. Folglich dürfte der per Ohmmeter zu messende Kaltwiderstand deutlich über dem Betriebswiderstand (8) liegen. Im Gegensatz zum Wolfram-Glühwendel aus Aufgabe 2.2 ist also kein anfänglich hoher Einschaltstrom zu erwarten - im Gegenteil, die Kohlefadenlampe glüht erst langsam auf.



Historische Kohlefadenlampe

(Quelle: <http://www.deutsches-museum-bonn.de/ausstellungen/faszinationlicht/bilder/gluehbirne.jpg>)

Die Kohlefadenlampe sendet weniger Strahlung im sichtbaren Bereich aus als die Wolfram-Glühbirne, da ihr charakteristisches Spektrum weiter im von den Augen nicht wahrnehmbaren Bereich liegt. Somit ist die Kohlefadenlampe bei gleicher elektrischer Leistung dunkler. Die Konsequenz daraus ist, dass Glühbirnen heutzutage aus Wolfram hergestellt werden, und nicht mehr aus Kohlenstoff wie früher.

3 I(U)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile

Halbleiterdiode - Grundlagen

Durch die Verbindung eines n- und eines p-leitenden Halbleiters kommt es an der Grenzschicht, dem sog. p-n-Übergang, zu einer Auffüllung der Löcher der p-Schicht mit freien Elektronen der n-Schicht. Die Grenzschicht ist dementsprechend ladungsarm, wirkt also als Isolator und verhindert einen Stromfluss. Es werden aber nicht alle Löcher der p-Schicht mit Elektronen gefüllt, wie man evtl. erwarten könnte, denn: zu beiden Seiten der Grenzschicht entstehen Raumladungen (also elektrische Felder), in der p-Schicht negative und in der n-Schicht positive, die den Ladungsfluss hemmen, so dass sich letztendlich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dann entspricht die resultierende Spannung des elektrischen Felds gerade der Bewegungsenergie der freien Ladungsträger, weshalb diese Spannung auch Diffusionsspannung genannt wird. Je nach Polung der äußeren Spannung ergibt sich ein anderes Verhalten:

- p-Schicht am Minuspol und n-Schicht am Pluspol \Rightarrow positive und negative Ladungsträger werden auseinandergezogen, was zu einer Verbreiterung der Sperrschicht führt. Der Widerstand der Diode steigt stark an, das Bauteil wirkt als Isolator.
- p-Schicht am Pluspol und n-Schicht am Minuspol \Rightarrow Die Ladungsträger werden aufeinander zu gedrückt, so dass die Sperrschicht verschwindet und der Strom relativ ungehindert durch das Halbleiterelement fließen kann, sobald die Diffusionsspannung überwunden ist. Ab einer gewissen Schwellenspannung leitet die Diode in dieser Polung also hervorragend.

3.1 Siliziumdiode (SID)

Mittels Oszillograph ist zunächst die Kennlinie (also I über U) einer Siliziumdiode aufzunehmen. Hierfür ist eine Halbwellenspannung erforderlich, weil sich mit symmetrischen Wechselspannungen Durchlass- und Sperrichtung nicht getrennt beobachten lassen. Der Verlauf der Kennlinie sollte folgendermaßen aussehen:

- In **Sperrrichtung** sollte sich lediglich der sehr kleine Sperrstrom feststellen lassen, der auch bei zunehmender Spannung annähernd konstant bleibt.
- In **Durchlassrichtung** sollte sich bis zu einer Schwellspannung von ca. 0,6 V ebenfalls kein nennenswerter Strom feststellen lassen, bei höheren Spannungen müsste er allerdings stark ansteigen, da dann die Diffusionsspannung überwunden ist.

In einer Diodengleichrichterschaltung ist deshalb zu beachten: um zu verhindern, dass unter der Schwellspannung liegende Anteile abgeschnitten werden, muss man die Eingangsspannung mit einer Gleichspannung überlagern. Diese muss genau so eingestellt werden, dass bereits ohne Signal an der Si-Diode eine Spannung von 0,6 V anliegt. Dann werden nämlich auch kleinere Eingangs-Wechselspannungen gleichgerichtet.

Qualitativ gilt es anschließend die Temperaturabhängigkeit der Diode zu untersuchen, wobei die Diode mit warmer Luft erhitzt werden soll.

3.2 Zenerdiode (ZED)

Zenerdioden sind Silizium-Dioden mit einer besonders starken Dotierung im Bereich der Kontaktfläche. Diese bewirkt, dass die Diode auch in Sperrpolung ab einer gewissen Spannung sehr gut leitend wird. Der Grund dafür ist, dass sich durch die starke Dotierung große elektrische Raumladungen bzw. Feldstärken aufbauen und dass, falls ein kritischer Wert der Feldstärke erreicht wird, aufgrund des starken Feldes Elektronen aus den Kristallbindungen herausgelöst werden. Diesen Vorgang nennt man Zener effekt, durch ihn stehen nun freie Elektronen zur Verfügung.

Diese neuen freien Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt und kollidieren mit anderen, bis jetzt noch gebundenen Elektronen. Durch die Kollision werden diese aus dem Kristallgitter befreit, so dass nun noch mehr Elektronen zur Verfügung stehen, die wiederum weitere gebundene Elektronen aus dem Gitter heraus schlagen können. Aufgrund dieses „lawinenartigen“ Verhaltens wird dieser Prozess Lawineneffekt genannt.

Zener- und Lawineneffekt überfluten die sperrende Grenzschicht mit freien Ladungsträgern, so dass die Sperrwirkung verloren geht und die Diode auch in Sperrrichtung leitet. Dies ist im Versuch durch das Aufnehmen einer Kennlinie zu verifizieren. Zusammengefasst erwarten wir also:

- In **Sperrrichtung** sollte sich bei kleinen Spannungen zunächst nur der sehr kleine Sperrstrom feststellen lassen. Nach Erreichen der Durchbruchspannung müsste der oben beschriebene Zener effekt in Verbindung mit dem Lawineneffekt dafür sorgen, dass sich der Widerstand der Diode stark erniedrigt, also ein hoher Strom relativ ungehindert fließen kann.
- In **Durchlassrichtung** sollte sich bis zu einer Schwellspannung von ca. 0,6 V wie bei der Si-Diode kein nennenswerter Strom feststellen lassen, bei höheren Spannungen müsste er allerdings stark ansteigen.

Insgesamt ist also die Spannung der Diode über einen großen Bereich konstant, weshalb die Zenerdiode zur Spannungsstabilisierung eingesetzt werden kann. Hierzu schaltet man die Zenerdiode zusammen mit einem Vorwiderstand parallel zum Verbraucher bzw. zum Ausgang der Spannungsquelle. Der Vorwiderstand muss so gewählt sein, dass an der Zenerdiode die richtige Spannung anliegt, d.h. bei ausgeschaltetem Verbraucher gerade der Bereich der Durchbruchspannung. Die Zenerdiode hält nun auch bei einer Belastung des Stromkreises die Spannung konstant, da sie parallel zum Verbraucher geschaltet ist fällt auch an diesem eine konstante Spannung ab.

3.3 Germaniumdiode (GED)

Die Kennlinie der Germaniumdiode hat in etwa den Verlauf der Siliziumdiode. Die Diffusionsspannung kann man am Schnittpunkt zwischen U-Achse und der verlängerten Asymptote der Kennlinie ablesen. Zu rechnen ist mit einem Wert im Bereich von $\sim 0,3\text{V}$. Aufgrund ihrer geringeren Schwellenspannung findet die Germaniumdiode häufigere Anwendung als die Siliziumdiode. Während die SID einen Sperrstrom von einigen Nanoampère aufweisen müsste, ist die Sperrwirkung der GED allerdings lange nicht so gut: ihr Sperrstrom liegt bei $\sim \mu\text{A}$, also einige Größenordnungen höher.

Die Temperaturabhängigkeit bis 80°C der Germaniumdiode soll in diesem Versuchsteil ebenfalls untersucht werden.

3.4 Varistor (VDR)

Ein Varistor ist aus vielen kleinen Silizium-Karbid-Kristallen aufgebaut, welche wie parallel und seriell geschaltete Dioden wirken. Die Stromflussrichtung ist egal, da die „kleinen Dioden“ aufgrund ihrer zufälligen Anordnung insgesamt keine Vorzugsrichtung besitzen. Wir erwarten also einen symmetrischen Verlauf unserer Kennlinie, die wieder mit dem Oszilloskop aufgenommen werden soll. Für kleine Spannungen lässt der Varistor keinen Strom durch, erst bei größeren Spannungen (deren Richtung ja wie gerade begründet egal ist) werden durch das sich bildende elektrische Feld Sperrschichten abgebaut. Damit sinkt der Widerstand, die Leitfähigkeit des Bauteils (und damit auch der Stromfluss) steigen an.

Einsatzgebiet des Varistors ist der Überspannungsschutz, den VDR kann man dank der symmetrischen Kennlinie auch bei Wechselströmen einsetzen. In der Praxis schaltet man ihn parallel zum gefährdeten Bauteil. Im Falle einer zu hohen Spannung senkt sich der Widerstand des Varistors ab, was zur Folge hat, dass die Überspannung über den nun leitenden VDR abfließen kann und nicht durch das empfindliche Bauteil. Im Normalbetrieb stört der parallel geschaltete Varistor aufgrund seines hohen Widerstandes bei der „normalen“ (also nicht-Über-)Spannung die Schaltung nicht sehr.



Hochspannungsvaristor

(Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Varistor.jpg>)

4 Punktweise Messung der Varistor-Kennlinie

Nun soll die I-U-Abhängigkeit des Varistors durch punktweise Strom- und Spannungsmessungen ermittelt werden. Wir erwarten ein genaueres Ergebnis als bei der oszillographischen Messung in Aufgabe 3. Allerdings ist diese Vorgehensweise deutlich zeitintensiver und auch sehr viel weniger anschaulich, da sich die Kurve nicht sofort auf dem Schirm, sondern erst nach der Übertragung der Messpunkte in ein Diagramm ergibt. Erwartet wird folgende, von zwei Koeffizienten b und c abhängige Beziehung zwischen Spannung und Stromstärke:

$$U = c \cdot I^b \quad (9)$$

Logarithmieren bringt (9) in eine Form, in der wir die Koeffizienten problemlos bestimmen können:

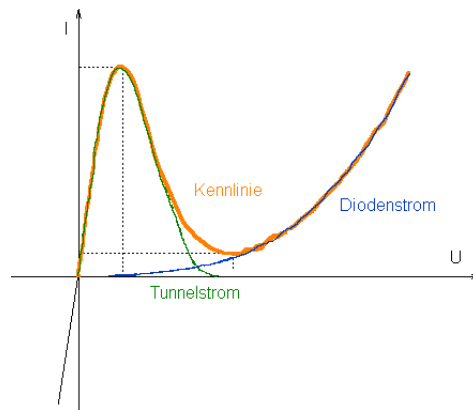
$$\ln U = b \cdot \ln I + \ln c \quad (10)$$

Trägt man also $\ln U$ über $\ln I$ auf, so entspricht b gerade der Steigung und $\ln c$ dem y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden.

5 Tunneldiode (TUD)

5.1 Punktweise Messung der Kennlinie

Eine Tunneldiode ist eine Germaniumdiode mit sehr stark dotiertem p- bzw. n-Bereich. Dies hat zur Folge, dass der Zwischenraum zwischen Valenz- und Leitungsband sehr schmal ist, so dass Elektronen per Tunneleffekt die „verbotene Zone“ überwinden können. Es fließt der sogenannte Tunnelstrom, der ohne angelegte äußere Spannung im Gleichgewicht, als in beide Richtungen gleich groß ist. Legt man eine geringe Spannung in Durchlassrichtung an die Diode an, so nimmt der Tunnelstrom in diese Richtung zu, während er in der entgegengesetzten Richtung zurückgeht. Durch die Überlagerung von Tunnelstrom und regulärem Diffusionsstrom ergibt qualitativ folgende Kennlinie:



Erhöht man die angelegte Spannung, so tritt der Effekt des Tunnelstroms gegenüber dem nun stärker gewordenen Diffusionsstrom in den Hintergrund. Wir erwarten daher für diesen Fall das Verhalten einer gewöhnlichen Germaniumdiode. Im Versuch ist die Spannungsteilerschaltung zu verwenden, wobei ein Maximalstrom von $0,2 \text{ mA}$ eingehalten werden muss. Die Tunneldiode kann nur in Vorwärtsrichtung untersucht werden, da die sehr dünne Sperrschicht sofort einen Zenerdurchbruch erleiden würde. Über der Spannung U sind die Stromstärke I , der per Ohm'schem Gesetz berechnete Widerstand R und der differentielle Widerstand $\frac{dU}{dI}$ aufzutragen. Diesen erhalten wir aus dem Differenzenquotient $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ zweier benachbarter (U, I) -Wertepaare.

5.2 Sprungverhalten des Stromes

Nun soll statt des $300 \mu\text{A}$ -Messbereichs das Ampèremeter auf $100 \mu\text{A}$ gestellt und die Messung wiederholt werden. In das I-U-Diagramm dieser und der vorherigen Messung gilt es nun die Arbeitsgerade einzutragen, die sich mit der Gleichung

$$I = \frac{U_0 - U}{R_i} \quad (11)$$

berechnet. Hierbei ist R_i der jeweilige Innenwiderstand des verwendeten Strommessinstruments, in unserem Fall $R_i = 600 \Omega$ bei einem Messbereich von $300 \mu\text{A}$ und $R_i = 1700 \Omega$ beim $100 \mu\text{A}$ -Messbereich. Man wird feststellen, dass die Arbeitsgerade im $300 \mu\text{A}$ -Messbereich die Kurve nur einmal, im kleineren Messbereich jedoch öfter schneidet. Da der Strom entlang der Arbeitsgeraden „abkürzen“ kann, springt er bei kleinen Änderungen der Spannung zwischen diesen Schnittpunkten hin- und her, was ein Ablesen sehr erschwert.

5.3 Oszillographische Darstellung des Sprunges

Nach dem Einbau der Spule wird die Spannung U_0 am Spannungsteiler langsam erhöht. Anfangs ist noch das bekannte Verhalten der Schaltung zu beobachten. Bei der ersten Sprungstelle jedoch erwarten wir einen Effekt: dort ändert sich der Strom schlagartig; die Spule versucht dieser Änderung entgegenzuwirken. Dadurch gibt es einen „Rücksprung“ des Stromes, dem die Spule nun wieder entgegenwirkt, so dass wir ein ständiges hin- und herspringen beobachten müssten - also eine Schwingung, die sich am besten auf einem Oszilloskop darstellen lässt.