

Praktikum Klassische Physik II

# Versuchsvorbereitung:

## Widerstandskennlinien

(P2-51,52)

Christian Buntin, Jingfan Ye

*Gruppe Mo-11*

Karlsruhe, 7. Juni 2010

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Spannungsabhängigkeit bei Edelmetallwiderständen</b>	<b>5</b>
2.1	Spannungsabhängigkeit eines Edelmetallwiderstandes . . . . .	5
2.2	Widerstand einer handelsüblichen Glühbirne . . . . .	5
2.3	Widerstand einer Kohlefadenlampe . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Diodenkennlinien</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Diodenkennlinie eines Varistors mittels punktweiser Messung</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Tunneldiode</b>	<b>7</b>
5.1	Diodenkennlinie einer Tunneldiode . . . . .	7
5.2	Sprungverhalten des Stromes . . . . .	7
5.3	Spannungsüberhöhung durch Sprungverhalten . . . . .	7

---

## Einleitung

Bei diesem Versuch soll die Abhängigkeit verschiedener Arten von elektrischen Widerständen von bestimmten Parametern untersucht werden. Dabei wird zunächst die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Heiß- bzw. Kaltleitern sowie von verschiedenen Glühlampen beobachtet. Im weiteren Verlauf wird die Spannungsabhängigkeit verschiedener Diodenarten durch unterschiedliche Messmethoden untersucht.

Da Widerstände und Dioden elektrische Bauteile sind, für welche es aufgrund der zu untersuchenden Effekte ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten gibt, sind sie heutzutage in nahezu jedem elektrischen Gerät vorhanden. Somit ist es für einen Physiker von großer Relevanz, die Eigenschaften dieser Bauteile zu kennen.

## Theoretische Grundlagen

### Wheatstonesche Brückenschaltung

Da bei diesem Versuch Widerstände möglichst genau bestimmt werden sollen, ist hier eine Wheatstonesche Brückenschaltung wie in Abbildung 1 von Vorteil. Dabei wird mittels eines Potentiometers das Verhältnis der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  so eingestellt, dass der Strom  $I_W$  zwischen den Widerstandspaaren null wird. In dieser Situation liegen jeweils die Mitten der Widerstände auf gleichem Potential und damit ist jeweils das Verhältnis der Widerstände gleich:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0}{R_x}$$

Da sowohl  $R_1$  und  $R_2$  aus der Stellung des Potentiometers, als auch  $R_0$  bekannt sind, lässt sich somit der Wert des unbekannten Widerstandes  $R_x$  ermitteln:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} = R_0 \cdot \frac{l-x}{x} = R_0 \cdot \left( \frac{l}{x} - 1 \right),$$

wobei die letzten beiden Terme gelten, wenn es sich um ein lineares Potentiometer der Länge  $l$  handelt, dessen Abgreifer sich im Falle  $I_W = 0$  am Ort  $x$  befindet.

Der Vorteil dieser Schaltung ist, dass die Widerstandsmessung unabhängig vom Innenwiderstand des verwendeten Messgerätes ist und somit Verfälschungen aufgrund dessen ausgeschlossen werden können.

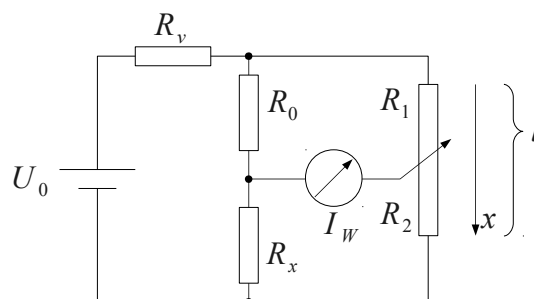


Abbildung 1: Wheatstonesche Brückenschaltung

## Bändermodell

Als **Metalle** bezeichnet man generell alle Elemente des Periodensystems, welche sich links bzw. unterhalb der gedachten Linie Bor–Astat befinden. Sie haben alle gemeinsam, dass die Atome durch eine metallischen Bindung zusammengehalten werden, welche zur Eigenschaft hat, dass sich die Valenzelektronen im Metall frei bewegen können (Elektronengas).

Neben Metallen gibt es noch die sogenannten **Halbleiter**, welche Eigenschaften von Leitern und Nichtleitern in sich vereinen. Deren Eigenschaften und Unterschiede gegenüber Metallen lassen sich über das **Bändermodell** beschreiben.

Die Elektronen eines Atoms können nur diskrete Energiewerte annehmen. In einem Kristall mit vielen Atomen wechselwirken diese allerdings, was zur Folge hat, dass für den Kristall ganze Energiebereiche erlaubt sind, die sogenannten *Bänder*. Mehrere dieser Bänder können sowohl überlappen, aber auch durch verbotene Bereiche voneinander getrennt sein. Das höchstgelegene, von Elektronen besetzte Band wird als *Valenzband*, das nächste darüber liegende als *Leitungsband* bezeichnet.

In Metallen überlagern sich Valenz- und Leitungsband, sodass sich die Elektronen des Valenzbandes auch frei im Leitungsband bewegen können, weshalb Metalle sehr gut leiten. In einem Halbleiter dagegen befindet sich zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband eine Bandlücke, in dem sich keine Elektronen aufhalten dürfen. In einem Isolator ist diese Bandlücke so groß, dass sich die Elektronen nicht frei bewegen können. In einem Halbleiter dagegen ist sie klein genug, sodass durch thermische Energie oder Photonen Elektronen angeregt werden können und ins Leitungsband übergehen. Unter bestimmten Bedingungen werden Halbleiter somit leitend.

## Halbleiterdiode

Für Halbleiterbauelemente wird in der Regel ein hochreiner Halbleiter wie Silizium benötigt, da Verunreinigungen starke Veränderungen der Leitfähigkeit hervorrufen können. Silizium besitzt 4 Valenzelektronen, welche im hochreinen Kristall alle gebunden sind. Daher liegen keine frei beweglichen Elektronen vor, somit leitet Silizium nicht (bei 0 K).

Allerdings kann es durch doch noch vorhandene Verunreinigungen, durch Aufbrechen von Bindungen mittels thermischer Energie sowie an der Oberfläche, da die Atome dort nur drei Bindungspartner haben, zu frei beweglichen Elektronen kommen. Diesen Effekt, dass reine Halbleiter doch noch eine geringe Leitfähigkeit besitzen, nennt man **Eigenleitfähigkeit**.

Um einen Schritt näher zur Diode zu kommen, wird das hochreine Silizium **dotiert**, es wird wieder gezielt mit bestimmten Atomen verunreinigt. Dabei ergeben sich 2 sinnvolle Möglichkeiten:

- a) Es kann mit 5-wertigen Atomen, wie beispielsweise Phosphor, dotiert werden. Dabei nehmen die Phosphoratome die Gitterplätze des Siliziums ein. Da Phosphor zwar 5 Valenzelektronen, aber nur 4 Bindungspartner hat, liegt an dieser Stelle ein Elektron vor, was sich frei im Halbleiter bewegen kann. Da dieser Halbleiter nun freie negative Ladungsträger hat und diese abgeben kann, wird er als *n-Halbleiter* oder auch als **Donator** bezeichnet.
- b) Wenn mit 3-wertigen Atomen, wie Aluminium, dotiert wird, so fehlt zur Bindung des vierten umgebenden Siliziumatoms ein Elektron. Es liegen daher positive Ladungsträger in Form von Löchern vor, die sich frei bewegen können. Dabei werden sie von Elektronen anderer Bindungen gefüllt, sodass die Löcher quasi wandern. Daher bezeichnet man diesen Halbleiter als *p-Halbleiter* oder auch als **Akzeptor**.

Diese Dotierung von Halbleitern erzeugt ein weiteres Leitungsband in der Bandlücke, weshalb Elektronen vom Valenzband nun leichter in das Leitungsband wechseln können.

Wenn man nun beide Halbleitertypen zusammenbringt, so bildet sich zwischen ihnen eine ladungsträgerfreie Grenzschicht, da die Elektronen des n-Halbleiters dort die Löcher des p-Halbleiters füllen,

bis keine Elektronen mehr die Grenzschicht passieren können. Ein solches Bauteil wird **p-n-Übergang** genannt.

Wenn man an diesem nun eine Spannung mit positivem Pol am n-Halbleiter und negativem Pol am p-Halbleiter anlegt, so werden die verbleibenden Ladungsträger aus den Halbleitern gesogen, die Grenzschicht wird breiter und leitet somit nicht. Wenn allerdings eine Spannung mit umgekehrter Polung angeschlossen wird, so liegen im n-Halbleiter immer mehr Elektronen vor, wobei die aus dem p-Halbleiter alle abgesogen werden. Dadurch wird die Grenzschicht immer kleiner, sodass das Bauteil leitend wird. Dieses Bauteil wird auch als **Diode** bezeichnet und leitet Strom nur in eine Richtung.

Wenn an der Diode in Sperrrichtung allerdings die Spannung weiter erhöht wird, so kann das elektrische Feld in der Diode so groß werden, dass es den Elektronen möglich wird, die Sperrschicht zu überwinden. Die Spannung, ab der dies auftritt, wird als **Durchbruchspannung** bezeichnet. Dies ist bei den meisten Dioden nicht gewünscht, da durch die hohe Verlustleistung das Bauteil zerstört werden kann.

Die Elektronen, welche die Grenzschicht überwinden, stoßen mit weiteren Elektronen, die daraufhin auch genügend Energie zum Überwinden der Grenzschicht besitzen. Somit kommt es kettenreaktionsartig zu einer Lawine von Elektronen, die die Grenzschicht überwinden, weshalb man hier von einem **Lawinendurchbruch** spricht.

Es gibt allerdings Dioden, bei denen dieser Effekt ausdrücklich gewollt ist. Bei diesen sogenannten **Zener-Dioden** ist die Grenzschicht aufgrund einer speziellen Dotierung so gering, dass die Diode ab einer gewissen Spannung in Sperrrichtung dennoch leitend wird, ohne zerstört zu werden. Diese Spannung wird dann *Zenerspannung*  $U_Z$  genannt.

Für Dioden kann allerdings auch der quantenmechanische **Tunneleffekt** genutzt werden. Dieser besagt, dass ein quantenmechanisches Teilchen eine schmale Barriere überwinden kann (tunneln), ohne dabei Energie zu verlieren. Allerdings fällt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens nach der Barriere exponentiell mit der Breite dieser ab, weshalb sie dünn genug gewählt werden muss.

Bei einer sogenannten **Tunnel diode** werden die Halbleiter sehr hoch dotiert. Daher wird die Sperrschicht sehr dünn, da bereits an der Grenzschicht genügend Elektronen und Löcher vorhanden sind, um diese aufzubauen. Allerdings kommt durch die Dünne dieser Grenzschicht der Tunneleffekt zum Tragen, sodass die Diode in Sperrrichtung nahezu keine Sperrwirkung zeigt, da die Elektronen einfach durch die Grenzschicht tunneln. In Durchlassrichtung steigt bei kleinen Spannungen die Leitfähigkeit stark an, wobei sie bei einer bestimmten Spannung ein lokales Maximum erreicht und danach wieder abfällt, da die Breite der Grenzschicht wieder zunimmt. Diesen Abfall bezeichnet man auch als *negativen Widerstand*, da dieser mit zunehmender Spannung größer wird. Nach einem Minimum zeigt sich dann die übliche Diodenkennlinie, da ab dort der Strom wieder wie bei einer normalen Diode ansteigt.

## 1 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands

Um die Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands zu bestimmen, wird mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung dessen elektrischer Widerstand bei verschiedenen Temperaturen gemessen. Dabei sollten die Messungen nur kurz und mit geringem Teststrom durchgeführt werden, um eine zusätzliche Erwärmung des Halbleiterwiderstands zu vermeiden.

Da ein bekannter Zusammenhang zwischen dem Widerstand und der Temperatur eines Heißleiters besteht, kann dieser zur direkten Temperaturmessung herangezogen werden. Man kann einen Halbleiterwiderstand auch dazu verwenden, um den Einschaltstrom eines Gerätes, wie zum Beispiel einer Spule, zu begrenzen, da ein Heißleiter im kalten Zustand nur schlecht leitet, bei zunehmender

Erwärmung aber umso besser. Eine andere Anwendungsmöglichkeit ist die Verwendung als Füllstandsanzeiger. Wenn der Halbleiterwiderstand von Wasser bedeckt ist, so ist dessen Temperatur annähernd konstant und der Strom ändert sich nicht. Ist dieser nicht mehr von Wasser bedeckt, so erwärmt sich der Widerstand und der Strom beginnt zu steigen, was als Signal für einen zu niedrigen Füllstand ausgewertet werden kann.

## 2 Spannungsabhängigkeit bei Edelmetallwiderständen

### 2.1 Spannungsabhängigkeit eines Edelmetallwiderstandes

Hier soll mittels eines Oszilloskops die Spannungsabhängigkeit eines Edelmetallwiderstands bestimmt werden. Dazu wird der Spannungsabfall an einem festen Widerstand  $R$ , welcher proportional zum Strom  $I$  ist, über dem Spannungsabfall am Edelmetallwiderstand aufgetragen, wobei als Signalgenerator die Netzfrequenz von 50 Hz verwendet wird.

Zusätzlich sollen mittels einer genauen Spannungsmessung die x- und y-Raster auf dem Bildschirm des Oszilloskops geeicht werden.

### 2.2 Widerstand einer handelsüblichen Glühbirne

Für den Betriebswiderstand  $R_B$  der verwendeten Glühbirne gilt mit den Nenndaten  $U = 220$  V und  $P = 60$  W:

$$R_B = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{P} = 807 \Omega$$

Dieser Widerstand soll mit dem zu messenden Kaltwiderstand  $R_K$  der Glühbirne verglichen werden.

Da auf dem Aufgabenblatt von einem überhöhtem Einschaltstrom die Rede ist, erwarten wir einen geringeren Kaltwiderstand der Glühbirne. Dieser führt zwar zu einem überhöhten Strom beim Einschalten, allerdings ist es die dadurch entstehende hohe Temperatur, die der Glühbirne schaden könnte. Da der Widerstand der Glühbirne allerdings mit steigender Temperatur zunimmt, nimmt der Strom wieder ab, bis sie mit konstanter Temperatur leuchtet, weshalb die Glühbirne dadurch keinen Schaden nimmt.

### 2.3 Widerstand einer Kohlefadenlampe

Für den Betriebswiderstand  $R_B$  der verwendeten Kohlefadenlampe gilt mit den Nenndaten  $U = 220$  V und  $P = 50$  W:

$$R_B = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{P} = 968 \Omega$$

Dieser Widerstand soll auch hier wieder mit dem zu messenden Kaltwiderstand  $R_K$  der Kohlefadenlampe verglichen werden.

Da Kohlefadenlampen nur bei geringerer Temperatur als Glühbirnen mit Wolframdraht betrieben werden können, gilt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu\text{mK}}{T},$$

dass das Intensitätsmaximum des emittierten Lichtspektrums bei einer viel größeren Wellenlänge als bei einer normalen Glühbirne mit Wolframwendel vorliegt. Die Kohlefadenlampe strahlt ihre Leistung also eher im roten bis infraroten Bereich aus, weshalb sie von unserem Auge dunkler als eine Glühbirne mit Wolframwendel wahrgenommen wird.

### 3 Diodenkennlinien

Mittels des Oszilloskops sollen die Strom-Spannungs-Kennlinien folgender Halbleiterdioden aufgenommen werden:

- 1.) Siliziumdiode
- 2.) Zenerdiode
- 3.) Germaniumdiode sowie
- 4.) Varistor.

Damit jeweils nur genau eine Stromrichtung beobachtet wird, wird eine Halbwellenspannung von einer Gleichrichterschaltung verwendet.

Dabei muss der Lastwiderstand einer Gleichrichterschaltung so gewählt werden, dass der maximal erlaubte Strom durch die Diode nicht überschritten und diese damit nicht zerstört wird.

Eine Zenerdiode kann zum Beispiel zur Spannungsstabilisierung verwendet werden. Dabei wird eine Zenerdiode in Sperr- bzw. Zenerrichtung parallel zum Lastwiderstand  $R_L$  geschaltet, wobei zwischen Spannungsquelle und Lastwiderstand mit Zenerdiode noch ein Vorwiderstand  $R_V$  geschaltet werden muss, um den Stromfluss zu begrenzen. In diesem Fall fällt, wenn die Spannung  $U_0$  der Spannungsquelle hoch genug ist, an der Zenerdiode immer die Zenerspannung  $U_Z$  ab. Dadurch bleibt der Strom durch den Vorwiderstand immer konstant und die Spannung am Lastwiderstand wird auf die Zenerspannung beschränkt und somit stabilisiert.

Dabei muss der Vorwiderstand  $R_V$  so dimensioniert werden, dass beim minimalem Laststrom  $I_{L,\min}$  der maximal zulässige Strom  $I_{Z,\max}$  durch die Zenerdiode nicht überschritten wird, damit diese nicht zerstört wird. Allerdings muss er auch klein genug sein, um den maximal nötigen Strom  $I = I_{Z,\min} + I_{L,\max}$  für die Zenerdiode und den Lastwiderstand liefern zu können, denn sonst kommt es zum Spannungsabfall an der Zenerdiode, wodurch eine Stabilisierung nicht mehr gegeben ist. Damit gilt also für die Dimensionierung des Vorwiderstandes  $R_V$ :

$$\frac{U_0 - U_Z}{I_{Z,\max} + I_{L,\min}} \leq R_V \leq \frac{U_0 - U_Z}{I_{Z,\min} + I_{L,\max}}$$

Ein *Varistor* (engl. von „variable resistor“) ist ein spannungsabhängiger Widerstand. Da dessen Widerstand für kleine Spannungen sehr groß und für große Spannungen sehr klein ist, und dieser Übergang auch noch fast verzögerungsfrei stattfindet, ist er zum Schutz vor Überspannungen geeignet. Geschaltete Induktivitäten lassen sich beispielsweise über Varistoren erden. Bei niedrigen Spannungen im normalen Betrieb hat der Varistor einen hohen Widerstand und greift praktisch nicht in die Schaltung ein. Wenn beim Ein- und Ausschaltvorgang allerdings hohe Spannungsspitzen induziert werden, so wird der Varistor niederohmig und die Spannungsspitzen können gegen Erde abfließen, ohne der Schaltung zu schaden.

## 4 Diodenkennlinie eines Varistors mittels punktweiser Messung

Nun soll die Strom-Spannungs-Kennlinie des Varistors durch punktweise Messung aufgenommen werden. Dabei wird das Messgerät mit dem niedrigeren Innenwiderstand als Strommessgerät, das mit dem höheren Innenwiderstand als Spannungsmessgerät verwendet.

Wahrscheinlich erkennt man hier besser den genauen Zusammenhang als mittels Oszilloskop, während die Darstellung mittels Oszilloskop wesentlich schneller ein Bild gibt.

## 5 Tunneldiode

### 5.1 Diodenkennlinie einer Tunneldiode

Mittels punktweiser Messung wird die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunneldiode aufgenommen.

Zur Auswertung werden über der Spannung der Strom, der Widerstand sowie der differentielle Widerstand aufgetragen.

### 5.2 Sprungverhalten des Stromes

Hier wird wieder die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunneldiode aufgenommen, allerdings in einem anderen Messbereich des Strommessinstrumentes.

Zur Deutung des zu erwartenden eigenartigen Sprungverhaltens des Stromes werden Arbeitsgeraden in beide Diagramme für verschiedene Betriebsspannungen eingezeichnet.

### 5.3 Spannungsüberhöhung durch Sprungverhalten

Durch das Einfügen einer Spule in den Schaltkreis tritt bei den Sprüngen Selbstinduktion in der Spule auf, welche zu Spannungsüberhöhungen führen. Da durch diese Erhöhung der Widerstand der Tunneldiode wieder größer wird, verringert dies wiederum den Strom, was sich wieder auf die Spannungserhöhung auswirkt. Diese Schwingung kommt somit vom negativen Widerstand der Tunneldiode oberhalb der Höckerspannung.