

## Physikalisches Anfängerpraktikum (P2)

# P2-50,51: Widerstandskennlinien

Matthias Faulhaber, Matthias Ernst (Gruppe 19)

Karlsruhe, 2.12.2009

---

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Eigenschaften verschiedenartiger Widerstände, insbesondere deren Temperaturabhängigkeit.

## 0 Grundlagen

### 0.1 Halbleiter

Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und Nichtleitern liegt. Ihre Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu. Durch Dotieren, d.h. z.B. das Einbringen von Fremdatomen wie Ge oder P in einen Si-Halbleiter lassen sich die Eigenschaften des Halbleiters gezielt verändern. Durch Hinzufügen eines Elements mit mehr als 4 Valenzelektronen entsteht ein sogenannter „n-Halbleiter“, wobei die überschüssigen Elektronen leicht ins Leitungsband angehoben werden können und der Halbleiter dann leitend wird. Wird andererseits ein Element mit weniger als 4 Valenzelektronen eingebracht, so entsteht ein „p-Halbleiter“ mit einer Elektronenlücke (einem „Loch“). Auch die Löcher können wandern, indem sie von benachbarte Elektronen gefüllt werden.

### 0.2 Halbleiterdioden

Werden ein n- und ein p-Halbleiter kombiniert, so erhält man eine Diode. Dabei können überschüssige Elektronen aus dem n-Halbleiter die Löcher im p-Halbleiter besetzen (n-p-Übergang). Dies erfolgt jedoch nur bis zu einer gewissen Grenze, da der n- und der p-Halbleiter dabei ionisiert werden. Dabei baut sich ein elektrisches Feld auf, was ab einer bestimmten Stärke weitere n-p-Übergänge verhindert. An der Grenze der beiden Halbleiter findet sich ein Bereich, in dem fast keine Ladungsträger vorhanden sind. Wird eine externe Spannung angelegt, so kann diese den n-p-Übergang begünstigen (bei Polung in Sperrrichtung), was dazu führt, dass keine Elektronen mehr für den Stromtransport verfügbar sind. Bei Polung in Durchlassrichtung werden jedoch weitere Elektronen in den p-Halbleiter fließen, was zu freien Elektronen und somit zu Stromfluss führt. Dies tritt jedoch erst ab einer bestimmten Spannung auf, da zunächst der n-p-Übergang rückgängig gemacht werden muss.

# 1 Durchführung

## 1.1 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands  $R(T)$  eines Halbleiterwiderstands soll mit einer Wheatstoneschen Brücke von Zimmertemperatur bis  $200^\circ\text{C}$  gemessen werden. Den Aufbau der Wheatstoneschen Brückenschaltung zeigt Abb. 1.

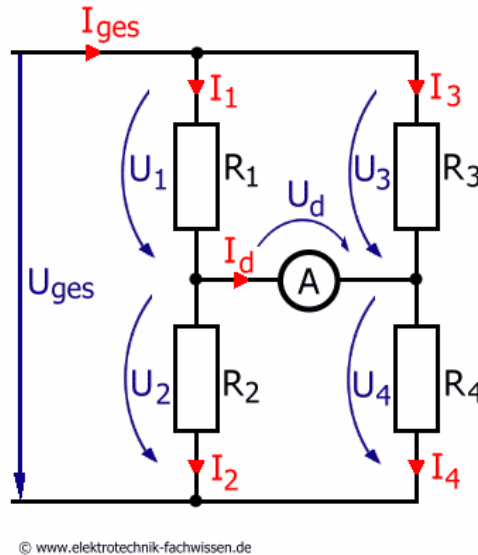


Abbildung 1: Aufbau der Wheatstoneschen Brückenschaltung

Die Schaltung dient der Bestimmung eines Widerstands, z.B.  $R_2$ , bei bekannten Werten der anderen Widerstände. Dabei muss mindestens ein Widerstand, z.B.  $R_3$ , variabel sein (alternativ kann auch ein Potentiometer statt  $R_3$  und  $R_4$  verwendet werden). An die Schaltung wird eine vorgegebene Spannung  $U_{\text{ges}}$  angelegt und der Widerstand  $R_3$  so eingestellt, dass  $U_d = 0$  ist. Damit ist auch  $I_d = 0$  und die Messung des Widerstands  $R_2$  erfolgt stromlos. Dann gilt:

$$R_2 = R_4 \frac{R_1}{R_3} \quad (1)$$

Im Versuch wird das Verstärker-Multimeter in der empfindlichsten Einstellung als Brückeninstrument A benutzt, um eine möglichst genaue Messung dieser Spannung zu gewährleisten.

Die Leitfähigkeit eines Halbleiters steigt mit der Temperatur, also fällt dessen Widerstand. Für die Temperaturabhängigkeit wird der Ansatz gemacht:

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (2)$$

Um diesen Ansatz zu überprüfen, bietet sich die Auftragung des logarithmierten gemessenen Widerstands über der inversen Temperatur an, denn Logarithmieren von Gl. 2 ergibt:

$$\ln(R) = \frac{b}{T} + \ln(a) \quad (3)$$

Man sollte sich bei Gültigkeit des Ansatzes eine Gerade erhalten. Der Koeffizient  $b$  ist dann die Steigung der Geraden, der Koeffizient  $a$  aus deren Achsenabschnitt  $c$  gemäß  $a = e^c$  berechenbar.

Anwendungen von Heißleitern (NTC-Widerstände), also Leiter, deren Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt, wie z.B. Halbleiter;

- Temperaturmessung

Unter Verwendung des in Gl. 2 gemachten Ansatzes können NTC-Widerstände zur Temperaturmessung eingesetzt werden, wenn für die Messanordnung die Parameter  $a$  und  $b$  bekannt sind, indem der Widerstand  $R_T$  bei der gesuchten Temperatur gemessen wird. Dann gilt:

$$T = \frac{b}{\ln(R_T) - \ln(a)} \quad (4)$$

- Füllstandsanzeige

Der Füllstandsanzeige liegt der Temperaturengleich eines NTC-Widerstands durch eine Flüssigkeit anderer Temperatur zugrunde. Bei unterschiedlichem Benetzungsgrad des NTC-Widerstands, der teilweise in die Flüssigkeit hineinragt, wird sich eine vom Füllstand abhängige Temperatur einstellen. Aus dem daraus resultierenden Widerstand kann also der Füllstand berechnet werden.

- Strombegrenzung

Um den Strom zu begrenzen, kann ein NTC-Widerstand parallel zum Verbraucher geschaltet werden. Bei geringen Strömen fließen diese quasi vollständig durch das zu schützende Bauteil, da der NTC-Widerstand kalt bleibt und somit einen hohen Widerstandswert aufweist. Fließen hohe Ströme, so erwärmt sich der NTC-Widerstand und sein Widerstandswert wird geringer, weshalb der Strom zunehmend durch diesen statt durch das zu schützende Bauteil fließt. Dies lässt sich auch z.B. in Lichterketten anwenden, indem parallel zu jedem Lämpchen ein derartiger Widerstand geschaltet wird. Wenn ein Lämpchen durchbrennt, würde normalerweise die Lichterkette erlöschen oder bei Kurzschluss an dieser Stelle eine höhere Spannung an den übrigen Lämpchen anliegen, was diese bald überlasten würde. Wenn der Strom jedoch im Fall eines durchgebrannten Lämpchens durch einen NTC-Widerstand fließt, so wird dieser warm, sodass durch den steigenden Widerstand bei richtiger Einstellungen nahezu dieselbe Spannung abfällt wie an einem funktionsfähigen Lämpchen, was das (bis auf das durchgebrannte Lämpchen) ordnungsgemäße Funktionieren der Lichterkette gewährleistet.

## 1.2 Messung der Eigenschaften verschiedener Widerstände

### 1.2.1 Spannungsabhängigkeit eines Edelmetallwiderstands

Mit der Halbwellenschaltung des Experimentiergeräts wird die Spannungsabhängigkeit des Stroms  $I(U)$  eines Edelmetallwiderstands oszillographisch gemessen. Unter Anwendung des Ohmschen Gesetzes gilt  $R = \frac{U}{I}$ , weshalb ein linearer Zusammenhang von Strom und Spannung zu erwarten ist. Außerdem ist zu überprüfen, ob die Erwärmung des Widerstands durch den Messstrom den Widerstandswert ändert. Man könnte annehmen, dass dieser aufgrund der höheren inneren Energie und dem somit gehinderten Stromfluss steigt. Vor den Messungen muss die Eichung des Oszillographen kontrolliert und ggf. mit Wechselspannung erneuert werden.

### 1.2.2 Kaltwiderstand einer 60W-Glühbirne mit Wolfram-Glühwendel

Mit einem Ohmmeter wird der Kaltwiderstand einer 60W-Glühbirne mit einer Glühwendel aus Wolfram gemessen. Aus den Nenndaten der Glühbirne ( $P = 60\text{W}$  und Netzspannung  $U_{\text{Netz}} = 230\text{V}$ ) kann der Widerstand der Glühbirne im zum Vergleich im Voraus berechnet werden:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{P} \approx 882\Omega \quad (5)$$

Da Wolfram jedoch ein Kaltleiter ist, wird der tatsächlich gemessene Widerstand wahrscheinlich deutlich geringer sein. Aus diesem Grund schadet auch ein stark überhöhter Einschaltstrom der Glühbirne nicht, da sie sich schnell aufheizt, dabei der Widerstand steigt und so der fließende Strom gesenkt wird.

### 1.2.3 Kaltwiderstand einer 50W-Kohlefadenlampe

In einem gleichen Verfahren wie oben wird auch der Kaltwiderstand einer Kohlefadenlampe gemessen. Deren aus den Nennwerten ( $P = 50\text{W}$ ,  $U_{\text{Netz}} = 230\text{V}$ ) berechneter Widerstand beträgt  $1058\Omega$ . Kohle ist ein Heißleiter, daher ist der erwartete Kaltwiderstand kleiner als der Betriebswiderstand. Eine Kohlefadenlampe ist bei gleicher elektrischer Leistung dunkler als eine Wolframwendellampe, da sie sich einerseits nicht so stark aufheizt wie diese, andererseits auch mehr Licht im nicht sichtbaren Bereich abgestrahlt wird.

## 1.3 Spannungsabhängigkeit des Stroms bei Dioden und Varistoren

Für die folgenden Messungen wird die Halbwellenschaltung des Experimentiergeräts verwendet, um die Kennlinien der verwendeten Bauteile in Sperr- und Durchlassrichtung getrennt aufnehmen zu können. Außerdem wird die Temperaturabhängigkeit qualitativ durch Anblasen mit heißer Luft untersucht. In allen Fällen wird die Spannungsabhängigkeit des Stroms  $I(U)$ , in Sperr- und Durchlassrichtung bei den Dioden bzw. beim Varistors in beiden Richtungen der Polung der Spannung gemessen.

### 1.3.1 Spannungsabhängigkeit einer Siliciumdiode

Erwartet wird bei Schaltung in Durchlassrichtung ein verschwindend geringer Stromfluss bei Spannungen, die kleiner als die Durchlassspannung sind. Ab dieser wird die Diode leitend und der Strom steigt stark an. In Sperrichtung fließt kein Strom. Der Lastwiderstand einer Diodengleichrichterschaltung darf nicht zu groß sein, da sonst die Durchlassspannung nicht erreicht wird und die Diode somit auch in Durchlassrichtung dauerhaft sperrt.

### 1.3.2 Spannungsabhängigkeit einer Zenerdiode

Bei in Durchlassrichtung geschalteten Zenerdioden ist qualitativ das gleiche Verhalten wie oben beschrieben zu erwarten. Jedoch wird sie bei einer großen Spannung, der Zenerspannung, in Sperrichtung ebenfalls leitend. Wird eine Zenerdiode parallel zu einem Verbraucher geschaltet, so bleibt der durch sie fließende Strom über einen charakteristischen Spannungsbereich sehr gering und quasi konstant. Bei größeren und kleineren Spannungen verliert sie an Widerstand. So wird die Spannung am Bauteil stabilisiert, ggf. muss noch ein Vorwiderstand eingesetzt werden.

### 1.3.3 Spannungsabhängigkeit einer Germaniumdiode

Eine Germaniumdiode sollte ein ähnliches Verhalten wie eine Siliciumdiode aufweisen, jedoch mit einer niedrigeren Durchlassspannung und einem weniger abrupten Anstieg des durchgelassenen Stroms.

### 1.3.4 Spannungsabhängigkeit eines Varistors

Ein Varistor (Kurzform für „Variable Resistor“) ist ein Bauteil mit einem spannungsabhängigen Widerstand, wobei die Kennlinie unabhängig von der Polung der Spannung ist. Durch den Herstellungsprozess (Sinterung von Pulver) wirkt er wie viele statistisch verteilte Dioden und bei kleinen Strömen fließt zunächst kein Strom. Erst bei höheren Spannungen verhält sich der Varistor dann wie die oben beschriebenen Dioden in Durchlassrichtung. Wird ein Varistor parallel zu einem Bauteil geschaltet, so wirkt er als Schutz gegen induzierte Überspannungen, da er im Normalbetrieb einen hohen Widerstand aufweist, bei Überspannung aber stark leitend wird und somit die Spannungsspitze abfängt.

### 1.4 Messung der Varistor-Kennlinie

Im Gegensatz zur Messung in Abschnitt 1.3.4 wird jetzt die Kennlinie des Varistors mit der vorgegebenen Messapparatur durch punktweise Messung der Spannung und des Stroms aufgenommen. Auf diese Weise wird die Kennlinie wesentlich genauer aufgenommen, jedoch nicht als Ganzes erfasst, sodass sie erst nach der Auswertung der Wertepaare zugänglich ist. Allerdings dauern diese Messungen wesentlich länger.

Für die Abhängigkeit der Spannung vom Strom wird folgender Ansatz gemacht:

$$U = c \cdot I^b \quad (6)$$

Zur Bestimmung der Koeffizienten  $b$  und  $c$  bietet sich eine doppeltlogarithmische Auftragung der Messwerte an, denn es gilt:

$$\ln(U) = b \cdot \ln(I) + \ln(c) \quad (7)$$

Der erwartete Verlauf ist dann eine Gerade,  $b$  kann also direkt aus der Steigung abgelesen werden,  $c$  erhält man aus dem  $y$ -Achsenabschnitt.

### 1.5 Messungen an einer Tunneldiode

Tunnelioden sind stark dotierte Halbleiterbauelemente, oft aus Germanium- oder Galliumarsenid. Aufgrund der starken Dotierung leiten sie auch bei kleinen Spannungen bereits Strom, da die Sperrschicht durchtunnelt wird. Den schematischen Verlauf des Stroms zeigt Abb. 2. Deutlich ist der sofort ansteigende Strom zu erkennen, der jedoch bei  $I_P$  ein Maximum durchläuft und anschließend wieder abfällt. In diesem (hier grau angedeuteten) Bereich weist die Diode einen negativen Widerstand auf, bis die Spannung  $U_V$  erreicht wird, an der der Strom minimal ist. Anschließend steigt der Strom wieder, wie es bei einer „normalen“ Diode auch der Fall ist. In Sperrichtung leitet sie den Strom durch, da die Zenerspannung nahe bei 0V liegt.

#### 1.5.1 Messung der Spannungsabhängigkeit des Stromes

Die Spannungsabhängigkeit des Stromes soll in Vorwärtsrichtung durch punktweise Messungen des Stroms und der Spannung bestimmt werden. Die Stromstärke soll höchstens 200 $\mu$ A betragen, für die Spannungsmessung wird der 300 $\mu$ A-Bereich des Messgeräts verwendet. Der Strom, der Widerstand sowie der differentielle Widerstand  $\frac{dU}{dI}$  sollen über der Spannung aufgetragen werden.

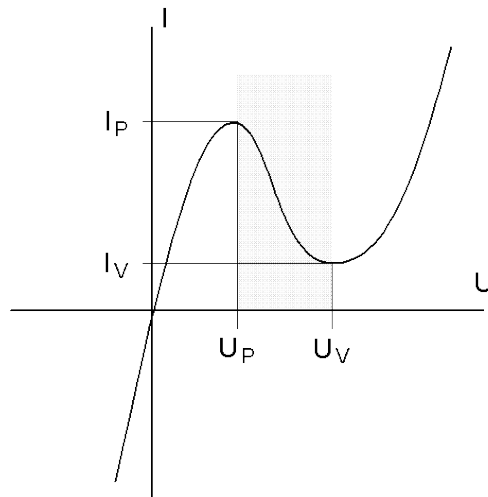


Abbildung 2: Schematische Kennlinie einer Tunnel diode

### 1.5.2 Sprungverhalten des Stroms

Für die Beobachtung des Sprungverhaltens des Stroms muss das Strommessgerät im  $100\mu\text{A}$ -Bereich verwendet werden, die Spannung wird abermals von  $0\text{V}$  an gesteigert. Für die Auswertung sollen Arbeitsgeraden der Form  $I = \frac{U_0 - U}{R}$  in das  $I(U)$ -Diagramm eingezeichnet werden, wobei der Innenwiderstand im  $300\mu\text{A}$ -Bereich ca.  $600\Omega$ , im  $100\mu\text{A}$ -Bereich ca.  $1,7\text{k}\Omega$  beträgt und die Betriebsspannung  $U_0$  variiert werden soll.

### 1.5.3 Oszillographische Beobachtung des Sprungverhaltens

In die Schaltung wird eine Spule eingefügt, sodass beim Sprung des Stromes eine Spannungsüberhöhung auftritt. Dann wird die Spannung an der Tunnel diode oszillographisch beobachtet, wobei die Spannung am Spannungsteiler erhöht wird. Ohne weitere Messgeräte sind Schwingungen oberhalb des Sprunges Schwingungen zu erwarten. Diese können nach der Lenzschen Regel erklärt werden, da an dieser Stelle der Strom schnell ändert und sich somit in der Spule eine Gegenspannung aufbaut. Dadurch fällt die Spannung jedoch wieder unter die Spannung der Sprungstelle ab, was eine abermalige Induktion einer Spannung in der Spule zur Folge hat. Dadurch steigt die Spannung wieder. Diese Spannungsanstiege und -abfälle wiederholen sich dann, was zu den erwarteten Schwingungen führt.

## Anhang

### Quellenangaben

Die folgenden Grafiken wurden nicht selbst erstellt:

- Abbildung 1: <http://www.elektrotechnik-fachwissen.de/grundlagen/brueckenschaltung.php> (abgerufen am 1.12.2009)
- Abbildung 2: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/pl/a/ae/Dioda-tunelowa-rd.svg> (bearbeitet, abgerufen am 1.12.2009)