

Versuchsprotokoll E8

Kennlinie

14.01.2015



Alexander Schlüter, Josh Wewers, Frederik Edens

Gruppe 15/mi

alx.schlueter@gmail.com

joshw@muenster.de

f_eden01@wwu.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Warm- und Kaltleiter	1
1.2	Halbleiter	2
1.3	Glimmlampe	2
2	Versuch	3
2.1	Diode in Durchlassrichtung	3
2.2	Zenerdiode	4
2.3	Glühlampe	6
2.4	NTC	7
2.5	Glimmlampe	8
2.6	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalldrahtes	10
3	Diskussion	11
3.1	Diode in Durchlassrichtung:	11
3.2	Zehnerdiode:	12
3.3	Glühlampe:	12
3.4	NTC:	12
3.5	Glimmlampe	12
3.6	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalldrahtes	13

1 Einführung

Abhängig vom Bauteil können Stromstärke und Spannung in verschiedensten Verhältnissen stehen. Diese Verhältnisse werden Grafisch dargestellt als Kennlinien bezeichnet.

1.1 Warm- und Kaltleiter

Aus dem Ohmschen Gesetz ist ein einfaches Verhältnis zwischen Spannung und Stromstärke bekannt. Die Spannung U ist direkt proportional zur Stromstärke I , wobei der Widerstand R einen Proportionalitätskoeffizienten darstellt

$$U = R \cdot I \quad (1.1)$$

Bei einem idealen ohmschen Widerstand steigt somit die Spannung linear mit der Stromstärke. Der elektrische Widerstand lässt sich aus dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ und der Geometrie des Leiters errechnen. Für homogene Leiter gilt

$$R = \rho \int_l \frac{dr}{A(r)} \quad (1.2)$$

Analog dazu sind elektrischer Leitwert der Kehrwert des elektrischen Widerstandes und spezifische elektrische Leitfähigkeit der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Der spezifische elektrische Widerstand ist material- und temperaturabhängig. Für kleine Temperaturdifferenzen in der Größenordnung von 100 K verhält sich der spezifische elektrische Widerstand linear zur Temperatur T

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1.3)$$

Dabei ist ρ_0 der spezifische Widerstand bei der Temperatur T_0 und α Proportionalitätskonstante. Entsprechend ist α gegeben durch

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1.4)$$

In jedem realen Leiter wird durch den Stromfluss eine Verlustleistung erzeugt, die den Leiter erwärmt. Dieses Prinzip ist insbesondere bei einer Glühlampe zu beobachten. Der

Draht wird fängt durch den Stromfluss an zu glühen und emittiert dadurch Licht. Da sich mit der Zunahme der Temperatur der spezifische elektrische Widerstand ändert ist die I - U -Kurve nicht linear. Bei Warmleitern wie Metallen flacht die Kurve mit zunehmender Spannung ab, bei Kaltleitern dagegen wird die Kurve zunehmend steiler.

1.2 Halbleiter

Halbleiter zeichnen sich dadurch aus, dass für kleine Spannungen der Strom bevorzugt in eine Richtung fließt. Meistens werden dazu heutzutage Grenzschichten aus n-dotierten und p-dotierten Silizium verwenden. Dabei besitzt das n-Dotierte Silizium durch ein eingearbeitetes Element aus der fünften Hauptgruppe freie negative Ladung, während das p-dotierte Silizium durch ein Element der dritten Hauptgruppe freie positive Ladung besitzt. An der Grenzschicht diffundieren die freien negativen Ladungen in die p-Schicht und es wird ein Elektrisches Feld mit negativem Pol an der p-Schicht erzeugt. Dieses Feld wird Raumladungszone genannt. Durch den Ladungsübergang in die p-Schicht existieren hier weniger freie Ladungen und somit nimmt der Widerstand zu. Legt man den positiven Pol der äußeren Spannung an der p-Schicht an, so wirkt man dem elektrischen Feld entgegen und in der Raumladungszone sind mehr freie Ladungen, so dass die Leitfähigkeit zunimmt. Legt man die Spannung entgegengesetzt an, so wird die Raumladungszone entsprechend vergrößert und der Widerstand bleibt groß. Ab einer gewissen, von der jeweiligen Diode abhängigen, Durchbruchspannung nimmt der Widerstand rapide ab. Dabei werden normale Dioden nachhaltig geschädigt, während Z-Dioden auf diesen Betrieb ausgelegt sind und so zur Spannungsregulierung verwendet werden können.

1.3 Glimmlampe

Bei der Glimmlampe werden zwischen einer Kathode und einer Anode eine Spannung angelegt. Ist diese Spannung zu klein, kann kein Strom fließen. Ab der Zündspannung kommt es zum Überschlag, so dass das enthaltene Gas ionisiert wird. Durch die Ionisierung kann nun auch bei geringerer Spannung Strom fließen, bis die Löschspannung unterschritten wird. Das Ionisierte Gas emittiert bei der Entladung elektromagnetische Wellen. Je nach Gas können diese im Bereich des sichtbaren Lichts liegen.

2 Versuch

Im Folgendem werden die Kennlinien von verschiedenen Bauteilen mit dem Aufbau 1 bestimmt. Die Messfehler für Strom und Spannung variierten aufgrund von Skalenwechseln am Multimeter auch innerhalb einer Messreihe. Im Einzelnen sind sie im Laborbuch vermerkt.

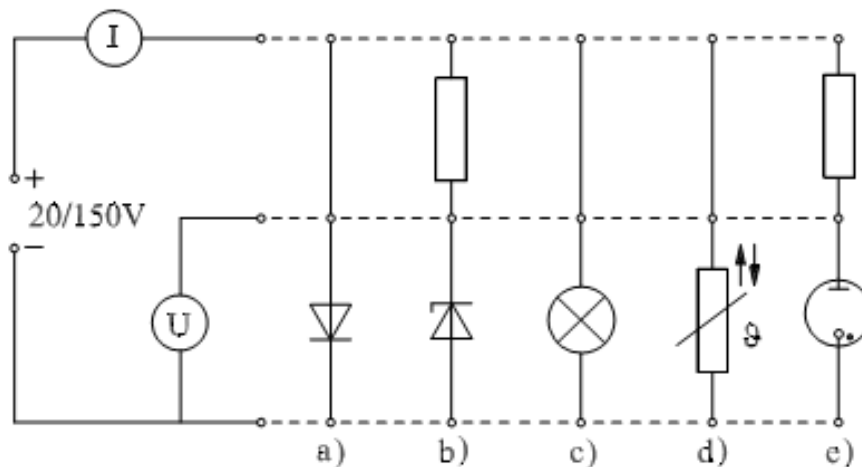


Abbildung 1: Messaufbau für unterschiedliche Leiter

2.1 Diode in Durchlassrichtung

Wie in Abbildung 1 a) gezeigt wird der Strom für unterschiedliche Spannung gemessen, um daraus eine U-I-Kennlinie zu ermitteln.

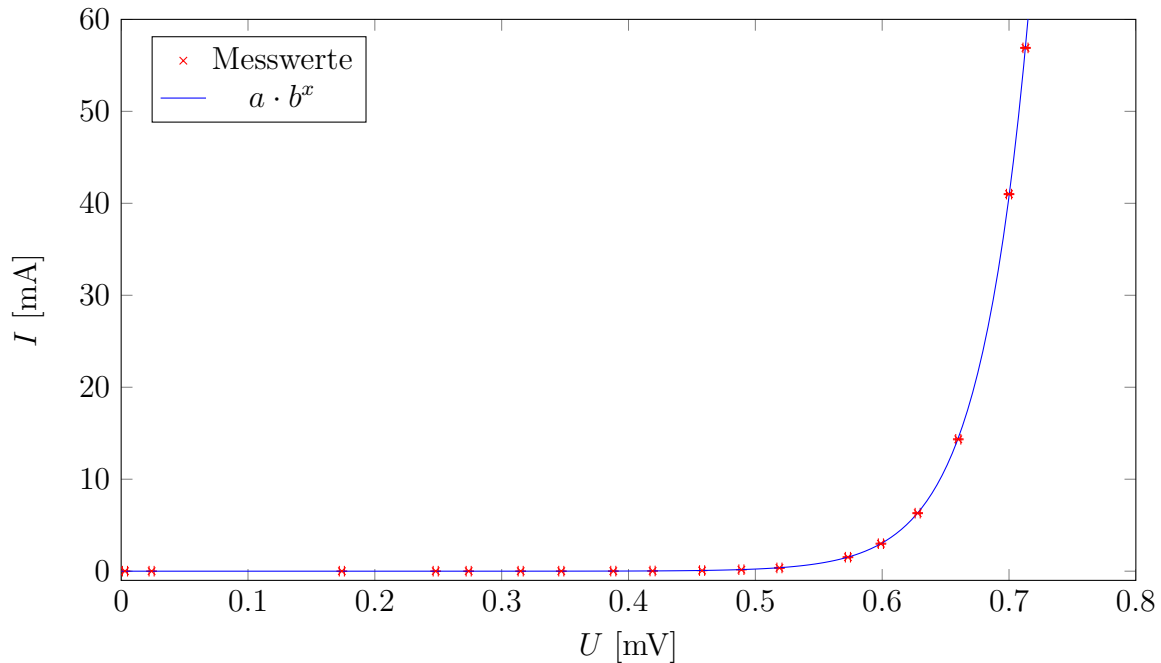


Abbildung 2: Messwerte und Fit für eine Diode in Durchlassrichtung

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen.

Aufgrund des anscheinend exponentiellen Verlaufs der Messwerte wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot b^x$ gefittet. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	$5,617\,84 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3,084 \cdot 10^{-8}$
b	$1,695\,98 \cdot 10^{11}$	$\pm 1,319 \cdot 10^{10}$

Tabelle 1: Linearer Fit zu Abbildung 2

2.2 Zenerdiode

Wie in Abbildung 1 b) gezeigt wird der Strom für unterschiedliche Spannung gemessen, um daraus eine U-I-Kennlinie zu ermitteln. Dies wird jedoch einmal mit einer Polung in Durchlassrichtung und einmal in Sperrrichtung getan.

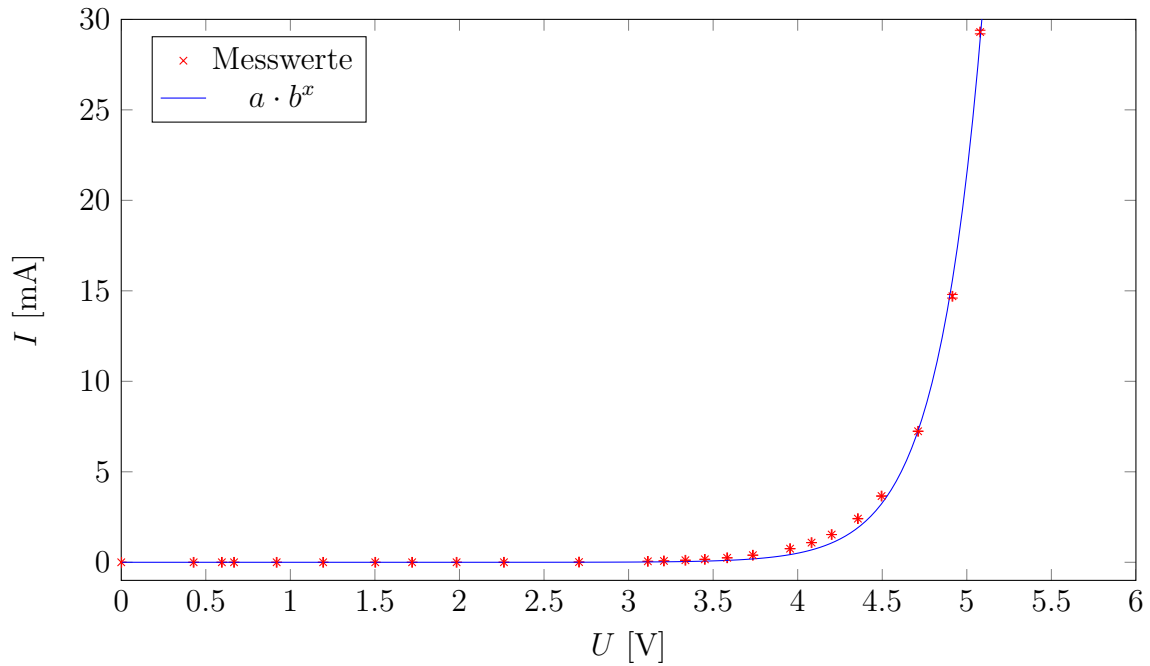


Abbildung 3: Messwerte und Fit für eine Zenerdiode in Sperrrichtung

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen.

Aufgrund des anscheinend exponentiellen Verlaufs der Messwerte wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot b^x$ gefittet. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	$1,502\,71 \cdot 10^{-7}$	$\pm 5,433 \cdot 10^{-8}$
b	42,7533	$\pm 3,073$

Tabelle 2: Linearer Fit zu Abbildung 3

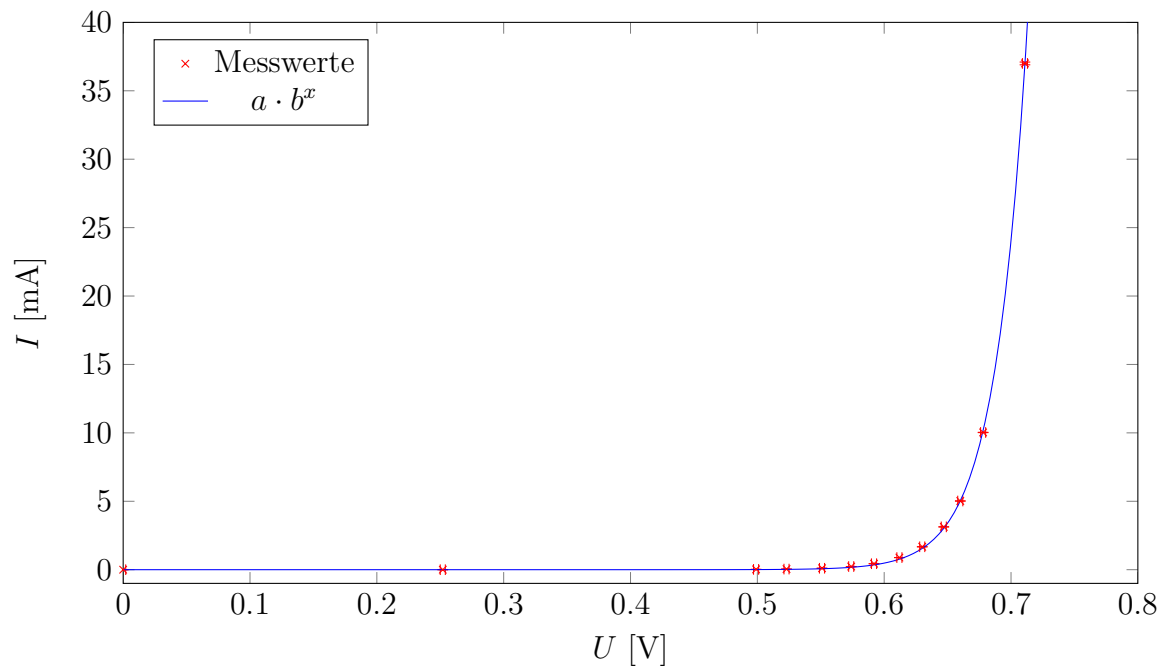


Abbildung 4: Messwerte und Fit für eine Zenerdiode in Durchlassrichtung

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen.

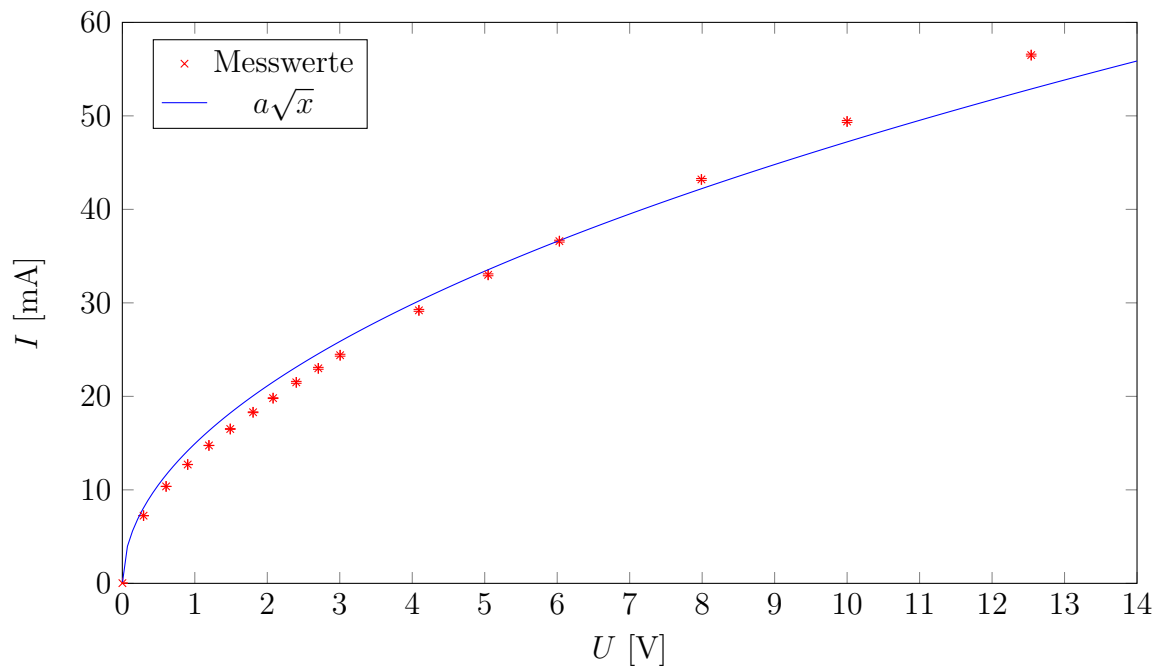
Aufgrund des anscheinend exponentiellen Verlaufs der Messwerte wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot b^x$ gefittet. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	$3,088\,03 \cdot 10^{-11}$	$\pm 3,759 \cdot 10^{-12}$
b	$9,720\,68 \cdot 10^{16}$	$\pm 1,673 \cdot 10^{16}$

Tabelle 3: Linearer Fit zu Abbildung 4

2.3 Glühlampe

Wie in Abbildung 1 c) gezeigt wird der Strom für unterschiedliche Spannung gemessen, um daraus eine U-I-Kennlinie zu ermitteln.

**Abbildung 5:** Messwerte und Fit für eine Lampe

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen.

Aufgrund des anscheinend Wurzel-artigem Verlaufs der Messwerte, besonders im Bereich bis 3V, wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot \sqrt{x}$ gefittet. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	14,9315	$\pm 0,2092$

Tabelle 4: Linearer Fit zu Abbildung 5

2.4 NTC

Wie in Abbildung 1 d) gezeigt wird der Strom für unterschiedliche Spannung gemessen, um daraus eine U-I-Kennlinie zu ermitteln. Dabei muss nach jeder Spannungserhöhung gewartet werden, bis sich der Temperaturgradient abgebaut hat.

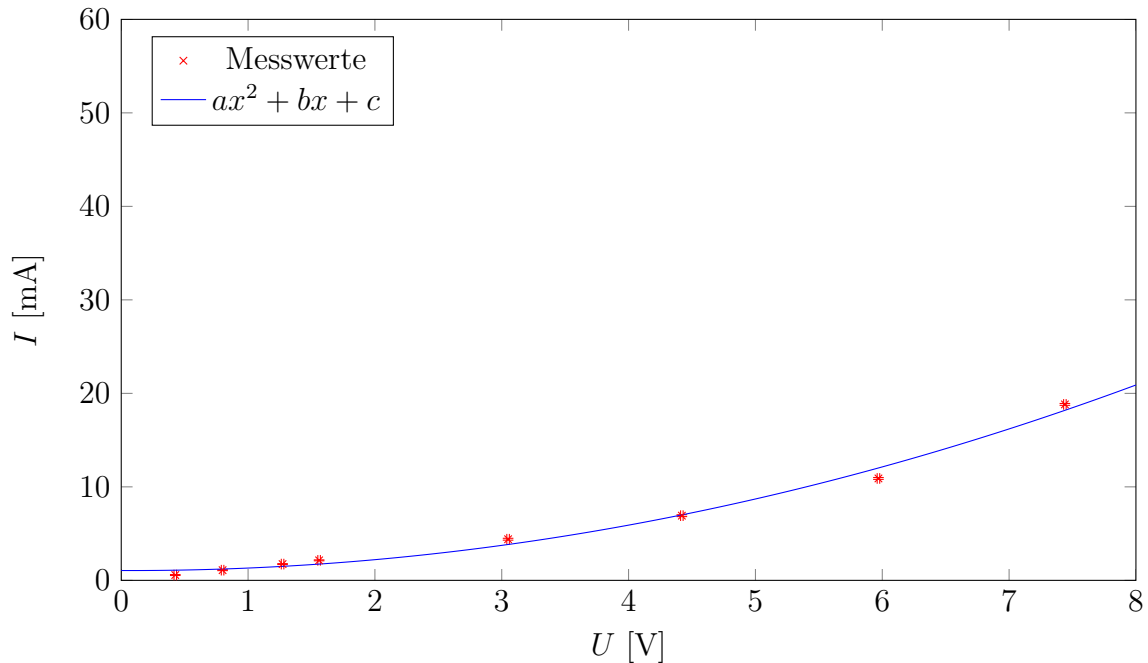


Abbildung 6: Messwerte und Fit für eine NTC-Widerstand

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen.

Aufgrund des anscheinend quadratischen Verlaufs der Messwerte wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ gefittet. Beim Fitten wurde der letzte Messwert nicht betrachtet, da er vollkommen aus dem Verlauf der Werte herausfällt. Dies ist auf ein Versagen der Leistung des Netzgeräts zurückzuführen. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	0,316 693	$\pm 0,056\ 91$
b	$-0,053\ 343\ 5$	$\pm 0,4446$
c	1,052 14	$\pm 0,6146$

Tabelle 5: Quadratischer Fit zu Abbildung 6

2.5 Glimmlampe

Wie in Abbildung 1 e) gezeigt wird der Strom für unterschiedliche Spannungen gemessen. Dabei wird zuerst durch langsames Hochdrehen der Spannung bis zur Zündung der Lampe

die Zündspannung bestimmt. Anschließend wird die Spannung langsam reduziert, bis die Glimmlampe erlischt, um die Löschspannung zu bestimmen. Wir erhalten als Mittelwerte für jeweils drei Messungen:

Zündspannung	$(112,0 \pm 0,1) \text{ V}$
Löschspannung	$(83,3 \pm 0,1) \text{ V}$

Tabelle 6: Messergebnis zur Glimmlampe

Anschließend messen wir den Strom von der höchstmöglichen bis zur Löschspannung durch:

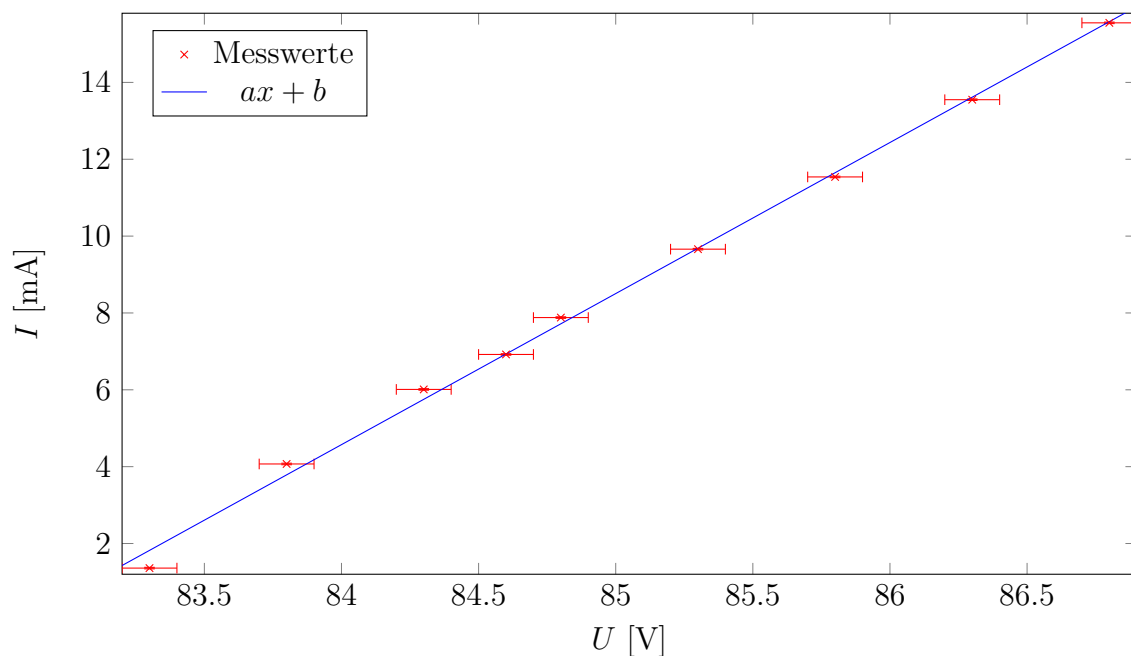


Abbildung 7: Messwerte für die Glimmlampe

Aufgrund des anscheinend linearen Verlaufs der Messwerte wurde mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren die Werte gegen die Funktion $f(x) = a \cdot x + b$ gefittet. Ausgabe:

Variable	Wert	Unsicherheit
a	3,931 46	$\pm 0,073\ 44$
b	-325,67	$\pm 6,243$

Tabelle 7: Linearer Fit zu Abbildung 7

2.6 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalldrahtes

Der Zusammenhang aus der Theorie gilt für den spezifischen Widerstand ρ , jedoch messen wir im Versuch den Widerstand $R = \rho \cdot l/A$, wobei l die Länge des Leiters und A die Querschnittsfläche ist. Wir gehen näherungsweise davon aus, dass die thermische Ausdehnung während des Versuches gering ist und nehmen deshalb l und A als konstant an. Für den Fit definieren wir $C := \rho_0 \cdot l/A$.

Die Messwerte werden für Aufheizen bzw. Abkühlen getrennt mit *gnuplot* nach dem *least-squares*-Verfahren gegen die aus der Theorie erwartete Funktion $R(T) = C(1 + \alpha \cdot T)$ gefittet.

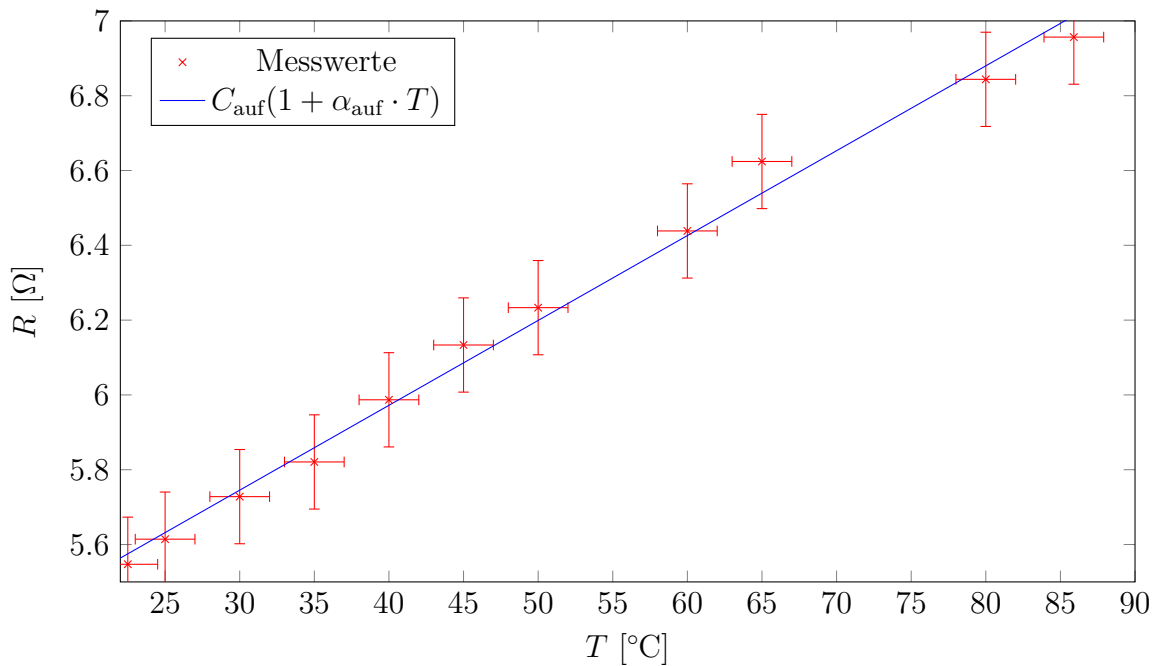
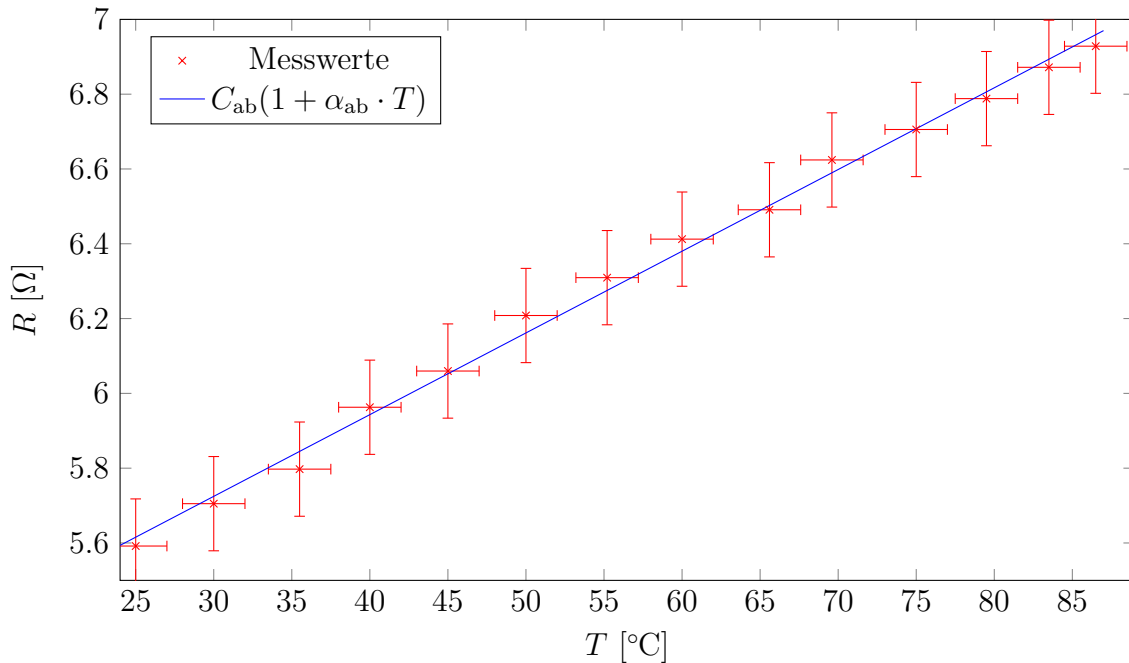


Abbildung 8: Messwerte und Fit fürs Aufheizen

Variable	Wert
C_{auf}	$(5,064\,55 \pm 0,035\,23) \, \Omega$
α_{auf}	$(4,480\,47 \pm 0,160\,30) \, \text{m}\Omega/^{\circ}\text{C}$

Tabelle 8: Fit zu Abbildung 8

**Abbildung 9:** Messwerte und Fit fürs Abkühlen

Variable	Wert
C_{ab}	$(5,069\,29 \pm 0,025\,10) \, \Omega$
α_{ab}	$(4,309\,56 \pm 0,102\,40) \, \text{m}\Omega/^{\circ}\text{C}$

Tabelle 9: Fit zu Abbildung 9

3 Diskussion

3.1 Diode in Durchlassrichtung:

Da die Spannung in Durchlassrichtung angelegt wurde, haben wir erwartet, dass die Anzahl der Ladungsträger in der Raumladungszone zunimmt und dadurch die Leitfähigkeit mit höherer Spannung steigt. In Abb. 2 steigt der Strom ab einer Spannung von ca. 0,6 mV exponentiell an, d.h. das Verhältnis $1/R = I/U$ nimmt zu. Dies entspricht wie erwartet einer Zunahme der elektrischen Leifähigkeit, da sich die Länge bzw. Querschnittsfläche des Halbleiters während der Messung nicht ändern.

3.2 Zehnerdiode:

Im Vergleich von Abb. 3 zu Abb. 4 fällt auf, dass die Leitfähigkeit der Diode in Durchlassrichtung deutlich früher ansteigt als in Sperrrichtung, nämlich werden 5 mA schon bei ca. 0,6 mV statt erst bei 4,5 mV durchgelassen. Wie oben bedeutet der exponentielle Anstieg eine Zunahme der Leitfähigkeit. Für den Anstieg des Stromes trotz Sperrspannung ist der *Lawinendurchbruch* bzw. der *Zehnerdurchbruch* verantwortlich, vgl.¹.

3.3 Glühlampe:

In Abb. 5 ist zu sehen, dass die Steigung $1/R = I/U$ abnimmt, was aufgrund der (näherungsweise) konstanten Länge und Querschnittsfläche des Leiters eine abnehmende Leitfähigkeit bedeutet. Der Draht in der Glühlampe ist also ein *Kaltleiter*. Erklärt werden kann dies durch Zunahme von temperaturbedingten Schwingungen des Atomgitters im Draht, sodass die Elektronen schwerer den Leiter passieren können.

3.4 NTC:

Hier nimmt die Steigung in Abb. 6 und damit die Leitfähigkeit des Bauteils mit höherer Spannung zu. Der NTC ist ein Halbleiter, also steigt die Dichte der Elektronen mit der Temperatur (vgl.²). Da bei höherem Stromfluss die Temperatur im Bauteil steigt, erklärt dies die positive Krümmung der Kennlinie. Beim Versuch musste nach Einstellen der Spannung mehrere Minuten gewartet werden, bevor ein näherungsweise konstanter Strom am Multimeter abgelesen werden konnte. Dies bestätigt die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit.

3.5 Glimmlampe

Bei der Glimmlampe konnte deutlich das unterschiedliche Verhalten im ein- und ausgeschalteten Zustand beobachtet werden. Während im ausgeschalteten Zustand unterhalb von 112 V kein Strom floss, so nahm der Widerstand beim Erreichen der Zündspannung ab und somit die anliegende Spannung ab und der fließende Strom zu. Solange die Lampe

¹Markus Donath und Anke Schmidt. *Anleitung zu den Experimentellen Übungen zur Mechanik und Elektrizitätslehre*. Auflage Wintersemester 2014/2015. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Physikalisches Institut, Oktober 2014.

²Donath und Schmidt, *Anleitung zu den Experimentellen Übungen zur Mechanik und Elektrizitätslehre*.

eingeschaltet ist, verhält sie sich nahezu wie ein ohmscher Widerstand. Spannung und Stromstärke verhalten sich zwar linear zueinander, die Ausgleichsgerade schneidet jedoch nicht den Ursprung, wie es bei einem ohmschen Widerstand zu erwarten wäre. Sobald die Löschspannung erreicht ist, geht die Lampe aus und der Widerstand steigt deutlich an, was sich in einer Zunahme der anliegenden Spannung und einer Abnahme des fließenden Stromes zeigt.

3.6 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalldrahtes

Bei der Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Drahtes hat sich bei unserer Messreihe gezeigt, dass die lineare Näherung in Rahmen unserer Messgenauigkeit völlig ausreicht. Zudem ist zu beobachten, dass im Abweichung bei erwärmen und abkühlen im Rahmen der Unsicherheit liegt und somit von einem reversiblen Prozess ausgegangen werden kann. Bei der Versuchsdurchführung war es insbesondere schwierig, die Temperatur genau zu bestimmen. Sowohl bei dem Erwärmen als auch beim Abkühlen war keine homogene Temperaturverteilung zu beobachten. Je nach Positionierung des Thermometers konnte die gemessene Temperatur deutlich schwanken. Da das Abkühlen deutlich langsamer statt fand, als das erwärmen, kann man hier von einer besseren Temperaturverteilung ausgehen. Zudem liegen die Messwerte beim Abkühlen genauer auf der Ausgleichsgeraden. Somit stimmt beim Abkühlen sowohl die Durchführung besser mit der optimalen Durchführung überein als auch das Resultat mit der Theorie. Wollte man maximale Genauigkeit bei der Temperatur erreichen, müsste man das Wärmebad langsam erhitzen und bevor man den Messwert nimmt eine Zeit lang auf der gleichen Temperatur halten, bis diese sich homogen verteilt hat. Dies wäre aber im Rahmen des Praktikums zu aufwändig.

Literatur

Donath, Markus und Anke Schmidt. *Anleitung zu den Experimentellen Übungen zur Mechanik und Elektrizitätslehre*. Auflage Wintersemester 2014/2015. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Physikalisches Institut, Oktober 2014.