



Versuch 17:
Kennlinie der Vakuum-Diode



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Prinzip der Vakuumdiode	3
2.2	Anlaufstrom	3
2.3	Raumladungsgebiet	4
2.4	Sättigungsbereich	4
3	Durchführung	5
3.1	Aufbau	5
4	Auswertung	6
5	Diskussion	11
5.1	Vergleich der Ergebnisse	11
5.2	Fehlerquellen	11



PRAKTIKANTEN:
Christian Gaß,
Fabian Heimann

DURCHFÜHRUNG:
05.09.2013

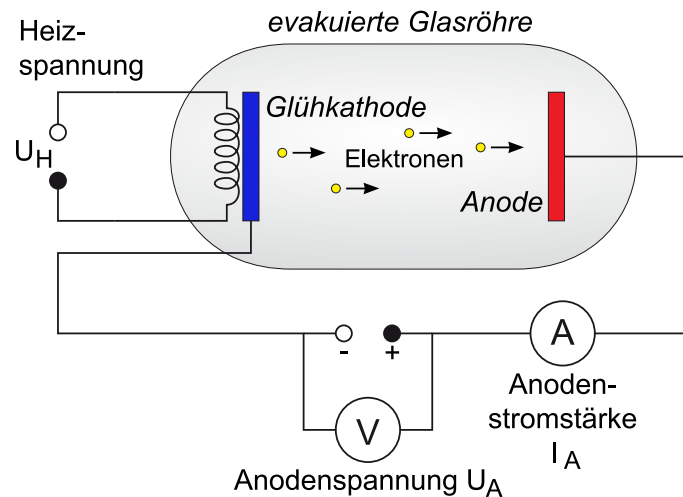


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Vakuumdiode [1]

1 Einleitung

In diesem Versuch soll die sog. Kennlinie einer Vakuumdiode gemessen werden. Was das genau ist, wird weiter unten erklärt. Vakuumdioden hatten eine historische Bedeutung als Gleichrichter. Das Prinzip der Vakuumdiode wird auch in Röntgenröhren verwendet.

2 Theorie

2.1 Prinzip der Vakuumdiode

Bei einer Vakuumdiode handelt es sich um einen evakuierten Glaszylinder, an dessen einem Ende ein Glühdraht angebracht ist. Eine grobe schematische Darstellung ist in Abb. 1 zu sehen. An diesen Glühdraht wird eine Heizspannung U_H angelegt; dadurch fließt ein Heizstrom I_H . Durch diesen Strom werden aus dem Draht Elektronen ausgelöst. Wie viele das sind, hängt von der sog. Austrittsarbeit des Materials ab. Am anderen Ende der Diode ist eine Metallplatte, die sog. Anode angebracht. Zwischen diesen beiden wird eine Beschleunigungs- oder Anodenspannung U_A angelegt. Dadurch werden die ausgetretenen Elektronen beschleunigt und es fließt ein Strom I_A .

Je nachdem, wie groß die angelegte Beschleunigungsspannung ist, zeigt die Diode ein unterschiedliches Verhalten. Man unterscheidet den sog. Anlaufstrom bei kleinen Beschleunigungsspannungen, das Raumladungsgebiet bei mittleren Beschleunigungsspannungen und den Sättigungsbereich bei hohen Beschleunigungsspannungen. Eine Übersicht über diese Bereiche ist in Abb. 2 dargestellt.

2.2 Anlaufstrom

Betrachten wir zuerst den Fall keiner angelegten Beschleunigungsspannung U_A . Dann treffen durch den Strom im Heizdraht beschleunigte Elektronen auf die Anode. Es fließt

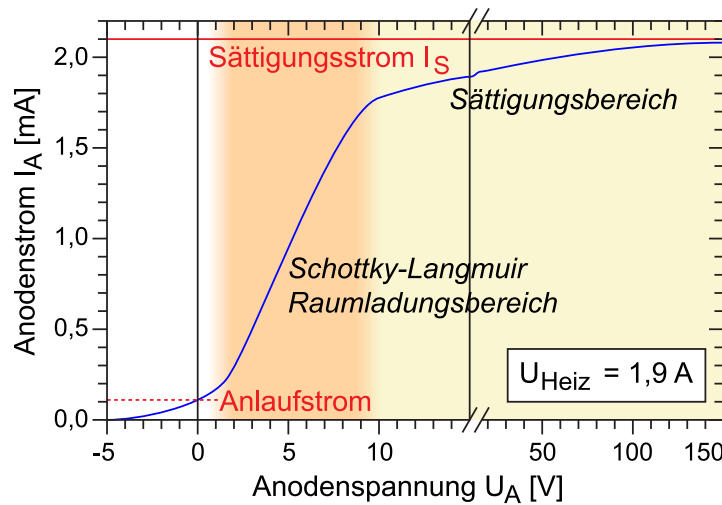


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Kennlinie einer Vakuumdiode [1]

also auch ohne Beschleunigungsspannung ein kleiner Strom. Dieser spielt bei kleinen Spannungen ebenfalls eine Rolle. Er entspricht dem hochenergetischen Teil der Maxwell-Verteilung. Auf eine detaillierte Herleitung wollen wir aus Platzgründen verzichten. Es gilt

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{e|U|}{k_B T}}. \quad (1)$$

Der Anlaufstrom ist ebenfalls von der sog. Austrittsarbeit W_A des Materials des Glühdrahtes abhängig. Dies ist die Arbeit, die ein Elektron benötigt, um den Draht zu verlassen. Je größer die Austrittsarbeit, desto kleiner der fließende Strom. Dieser Zusammenhang zur Stromdichte j wird durch die sog. Richardson-Gleichung dargestellt:

$$j = A_R T^2 e^{\frac{-W_A}{k_B T}} \quad (2)$$

Dabei ist die Richardson-Konstante $A_R = 6 \cdot 10^{-3} \text{ AK}^{-2} \text{ m}^{-2}$. k_B steht für die Boltzmann-Konstante; T für die Temperatur des Glühdrahtes.

2.3 Raumladungsgebiet

Im Raumladungsgebiet bei höheren Beschleunigungsspannungen gilt das sog. Schottky-Langmuirsche Raumladungsgesetz

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \cdot \frac{(U_A - U_K)^{3/2}}{l^2} \quad (3)$$

2.4 Sättigungsbereich

Liegt zwischen Glühdraht und Anode eine sehr hohe Beschleunigungsspannung an, werden fast alle emittierten Elektronen zur Anode hin beschleunigt und dort aufgenommen. Es

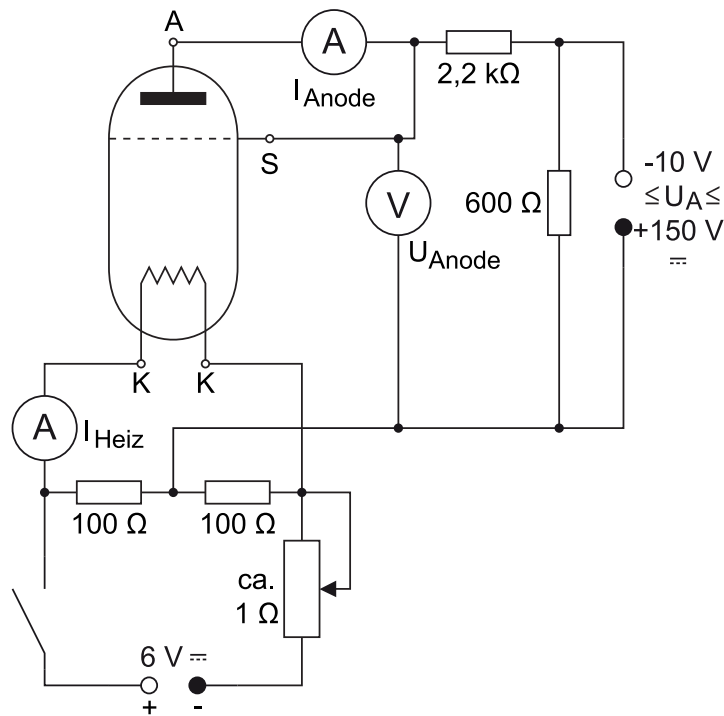


Abbildung 3: Schaltskizze des Versuchsaufbaus [1]

ist also zu erwarten, dass der fließende Anodenstrom I_A bei hohen Spannungen gegen einen bestimmten Wert geht. Je höher die Heizspannung, desto größer sollte auch diese obere Grenze werden, denn es werden mehr Elektronen freigesetzt.

3 Durchführung

In diesem Versuch wollen wir zum einen eine Kennlinie einer Vakuumdiode aufnehmen und zum anderen über die Richardson-Gleichung die Austrittsarbeit für die verwendete Diode bestimmen.

3.1 Aufbau

Dazu bauen wir zuerst den in Abb. 3 dargestellten Schaltkreis auf. Dann führen wir mit dieser Schaltung die folgenden Messungen durch.

- (1) Als erstes nehmen wir für drei verschiedene Heizströme I_H (1.9 A, 2 A, 2.07 A) die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Beschleunigungsspannung ($10 \text{ V} \leq U_A \leq 150 \text{ V}$) auf. Im besonderen messen wir den Anlaufstrom und die Spannung, bei der der Anodenstrom verschwindet. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Messung des Stromes verwenden wir im Bereich kleiner Ströme ein analoges Amperemeter. Im Raumladungsgebiet soll die Schrittweite für die Beschleunigungsspannung 2 V nicht überschreiten; im Sättigungsbereich erhöhen wir sie.

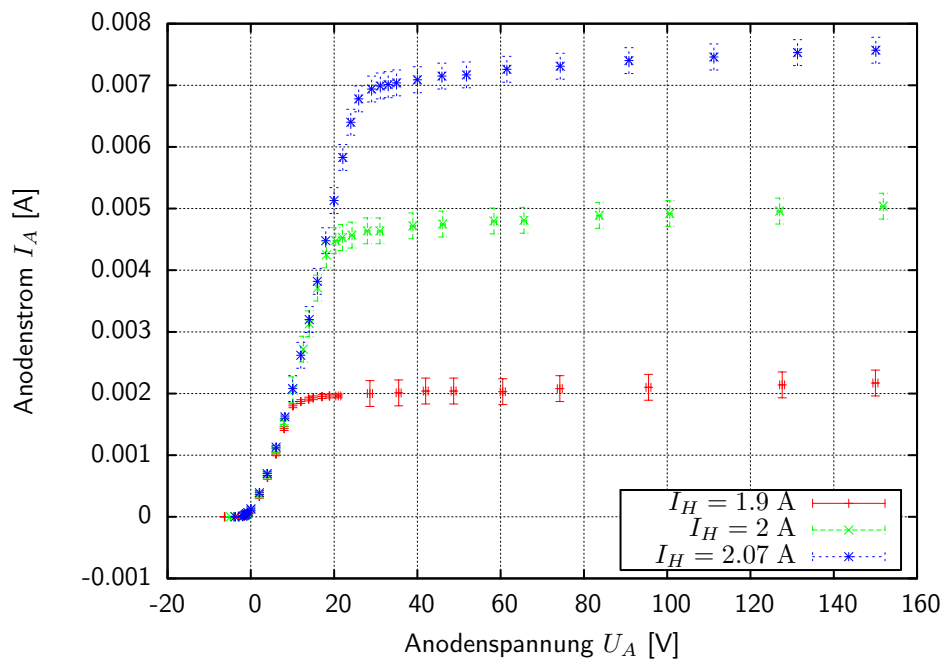


Abbildung 4: Komplette Kennlinie der Diode für verschiedene Heizströme I_H

- (2) Bei einer Beschleunigungsspannung $U_A = 125 \text{ V}$ messen wir die Abhängigkeit des Sättigungsstromes vom Heizstrom ($1.8 \text{ A} \leq I_H \leq 2.15 \text{ A}$). Dabei wählen wir $\Delta I_H = 0.05 \text{ A}$.
- (3) Als letztes messen wir die Innenwiderstände der verwendeten Messgeräte.

4 Auswertung

Punkt 1 Als erster Auswertungspunkt ist gefragt, den Strom I_A als Funktion von U_A für die verschiedenen I_H darzustellen. Der Plot ist in Abb. 4 zu sehen. Als Fehler für den Strom wurde jeweils der Fehler für das Messgerät angenommen. Dieser ist bei den Messungen mit den Multimetern jeweils 1% des Maximalwertes + 1 Digit. Es wurden verschiedene Messbereiche verwendet. Für die Messungen mit dem Mikroamperemeter haben wir als Fehler $2 \mu\text{A}$ verwendet. Denn das Gerät hatte Güteklasse 2 und der Messbereich betrug $100 \mu\text{A}$. Daher nehmen wir als Fehler 2% dieses Wertes an.

Für die Spannungen berechnen wir den Fehler jeweils als 0.25% des Maximalwertes + 1 Digit. Auch hier haben wir 2 verschiedene Messbereiche gewählt, sodass der Fehler für verschiedene Werte unterschiedlich groß war.

	$I_H = 1.9 \text{ A}$	$I_H = 2 \text{ A}$	$I_H = 2.07 \text{ A}$
m	$(124 \pm 4) \cdot 10^{-5}$	$(131 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	$(132 \pm 2) \cdot 10^{-5}$
b	$(230 \pm 8) \cdot 10^{-5}$	$(261 \pm 4) \cdot 10^{-5}$	$(281 \pm 4) \cdot 10^{-5}$
$U_K \text{ [V]}$	-1.86 ± 0.09	-2.00 ± 0.05	-2.12 ± 0.04

Tabelle 1: Ergebnisse für die Bestimmung der Kontaktspannung U_K .

Punkt 2 Nun soll $I_A^{2/3}$ für das Raumladungsgebiet aufgetragen werden. Nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung ist der Fehler für diese Größe

$$\sigma_{I_A^{2/3}} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{I_A} \cdot I_A^{-1/3} \quad (4)$$

Der entsprechende Plot ist in Abb. 5 dargestellt.

Wir führen eine lineare Regression mit diesen Werten durch. Die Kontaktspannung ist die Spannung, bei der der Anodenstrom verschwindet. Wir erhalten sie aus folgendem Ansatz: $0 = m \cdot x + b \Rightarrow x = -\frac{b}{m}$. Also ist

$$U_K = -\frac{b}{m}. \quad (5)$$

Für den Fehler gilt nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_{U_K}^2 = \left[\frac{\sigma_b}{m}\right]^2 + \left[\sigma_m \cdot \frac{b}{m^2}\right]^2 \quad (6)$$

So erhalten wir für jeden Heizstrom einen Wert für U_K . Die Ergebnisse sind in Tab. 1 dargestellt. Wir bilden den gewichteten Mittelwert und erhalten $(-2.05 \pm 0.03) \text{ V}$.

Punkt 3 Als nächster Punkt soll I_A gegen $U_A - U_K$ doppelt logarithmisch aufgetragen werden. Dazu verwenden wir für U_K den oben berechneten gewichteten Mittelwert.

Eine Berechnung der Fehlerbalken erscheint bei einer logarithmischen Darstellung nicht sinnvoll. Daher verzichten wir auf diese. Der entsprechende Plot ist in Abb. 6 dargestellt. Wir führen eine lineare Regression durch. Die Steigung der Geraden entspricht dem Exponenten im Raumladungsgesetz. Die Werte mit Spannungen nah an der Kontaktspannung wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, weil hier kleine Ströme fließen, bei denen in logarithmischer Skalierung extrem große Fehler auftreten.

Die verschiedenen Werte für die Steigung für verschiedene Heizströme sind in Tab. 2 dargestellt. Als gewichteter Mittelwert ergibt sich daraus 1.52 ± 0.02 für den Exponenten im Raumladungsgesetz.

Punkt 4 Im nächsten Auswertungspunkt geht es um die Auswertung der Daten des zweiten Versuchsteils. Es soll hierzu I_S/T^2 gegen $1/T$ halblogarithmisch aufgetragen

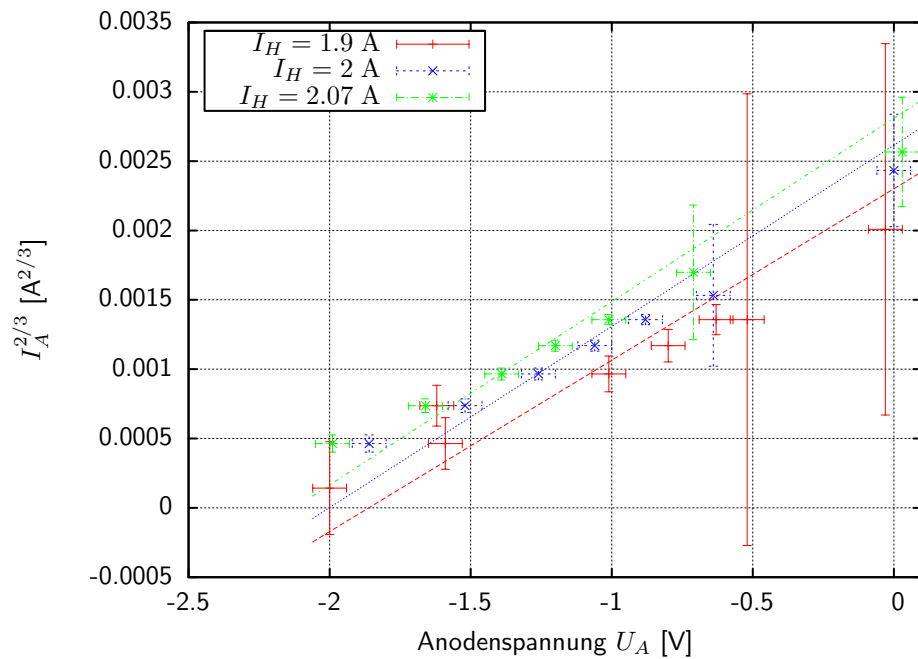
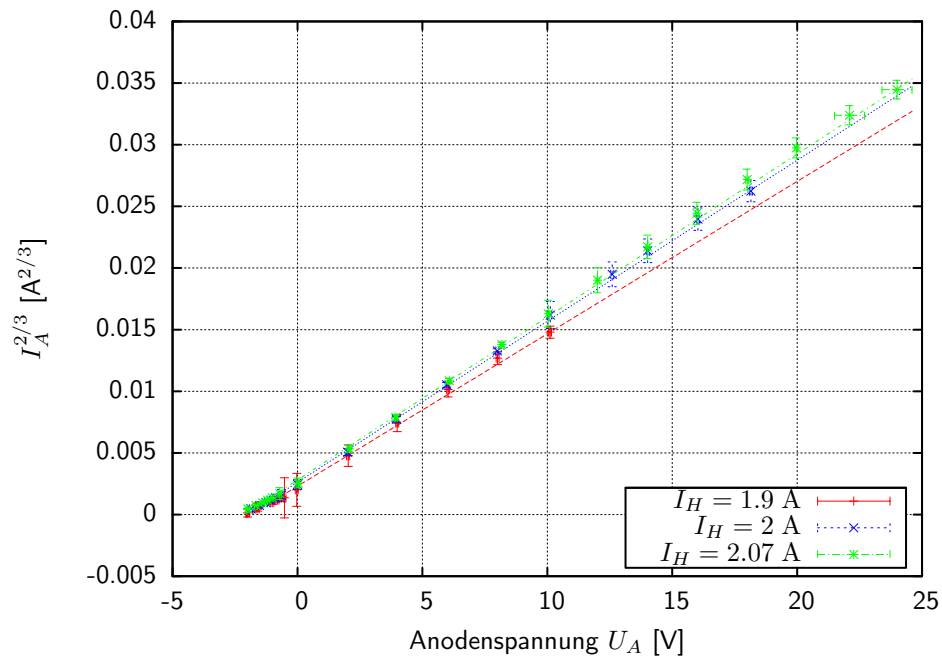


Abbildung 5: Plot von $I_A^{2/3}$ für das Raumladungsgebiet (oben: gesamter Bereich für U_A , unten: Vergrößerung)

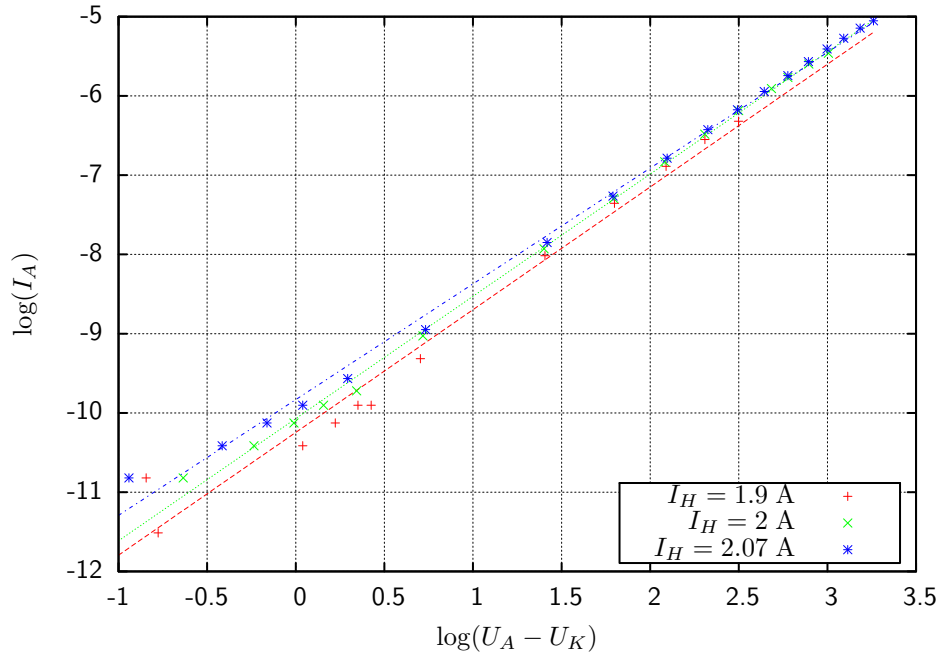


Abbildung 6: Auswertung zum Exponenten im Raumladungsgesetz.

werden. Dazu wird zuerst nach der folgenden linearen Regression aus den gemessenen I_H die Temperatur berechnet:

$$T(I_H) = 579 \frac{\text{K}}{\text{A}} \cdot I_H + 1150.2 \text{ K} \quad (7)$$

Die Fehler für die verschiedenen Größen des Plots werden nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt. Damit ergibt sich der in Abb. 7 dargestellte Graph. Mit diesen Daten führen wir eine lineare Regression durch. Das Ergebnis passt gut zu den Messdaten und ist ebenfalls in der Abbildung eingezeichnet. Wir erhalten eine Steigung $m = (-59.6 \pm 1.3) \cdot 10^3 \text{ K}$ und einen y-Achsen-Abschnitt $b = 5.0 \pm 0.6$.

Nun zur Bedeutung dieser Auswertung. Wir setzen dazu bei Gleichung (2) an und verwenden, dass $I = j \cdot A$. Dann folgt

$$I = A \cdot A_R T^2 e^{\frac{-wA}{k_B T}}. \quad (8)$$

	$I_H = 1.9 \text{ A}$	$I_H = 2 \text{ A}$	$I_H = 2.07 \text{ A}$
m	1.55 ± 0.08	1.54 ± 0.02	1.46 ± 0.03

Tabelle 2: Ergebnisse für die Bestimmung des Exponenten im Raumladungsgesetz.

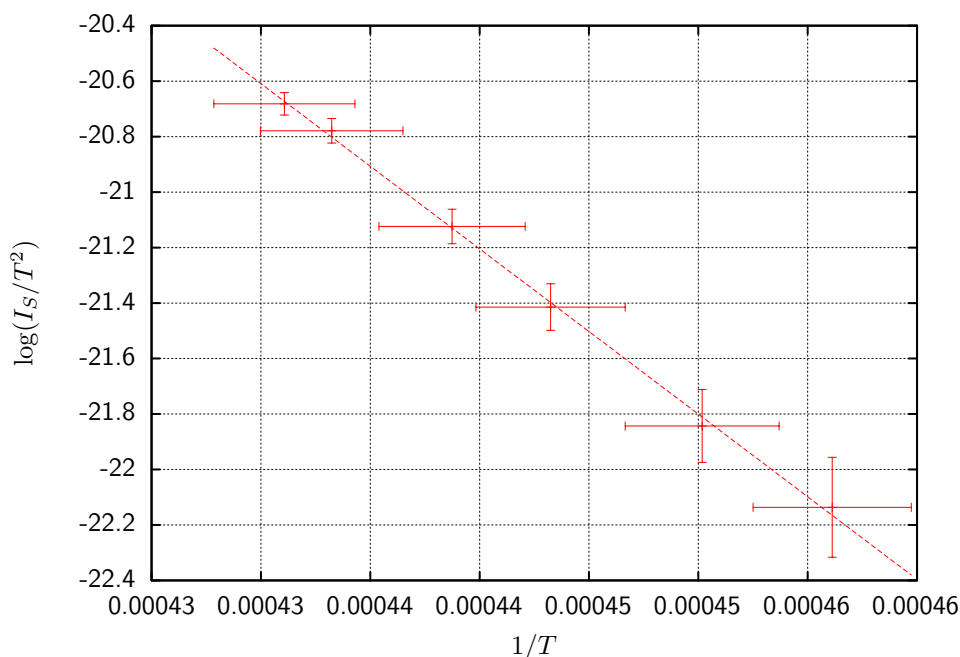


Abbildung 7: Auswertung des zweiten Versuchsteils

Durch Umformen ergibt sich

$$\ln \frac{I}{T^2} = \ln(A \cdot A_R) - \frac{W_A}{k_B} \cdot \frac{1}{T} \quad (9)$$

Tragen wir nun $\ln \frac{I}{T^2}$ gegen $\frac{1}{T}$ und führen eine lineare Regression der Form $f(x) = m \cdot x + b$ durch, können wir aus m und b die Austrittsarbeit und A bestimmen. Es gilt offensichtlich

$$W_A = -m \cdot k_B, \quad \sigma_{W_A} = \sigma_m \cdot k_B \quad (10)$$

und für die Fläche A

$$A = \frac{e^b}{A_R}, \quad \sigma_A = \frac{\sigma_b \cdot e^b}{A_R}. \quad (11)$$

Damit ergibt sich eine Austrittsarbeit von $W_A = (5.14 \pm 0.12)$ eV. Der Literaturwert für die Austrittsarbeit von Wolfram liegt bei 4.6 eV.

Für die Fläche A erhalten wir mit dem angegebenen Wert für A_R $A = (60 \pm 40)$ m².

Punkt 5 Zuletzt sollen die Fehler durch die Innenwiderstände der verwendeten Messgeräte abgeschätzt werden. Der Widerstand des Voltmeters ließ sich durch die Multimeter nicht messen, da er den Messbereich überschritt.

Das Messgerät zur Messung des Anodenstromes ist mit einem 2.2 kΩ-Widerstand in Reihe geschaltet. Im Vergleich dazu beträgt der Widerstand des Messgerätes etwa 0.5%. In dieser Größenordnung sollte auch der Fehler durch das Amperemeter liegen.

Bei der Messung der Heizspannung war das Messgerät mit einem $100\ \Omega$ -Widerstand in Reihe geschaltet. Das ergibt einen relativen Fehler von 0.1% . Beide Fehler liegen deutlich unter den systematischen Fehlern der Messgeräte, die wir bereits berücksichtigt haben.

5 Diskussion

5.1 Vergleich der Ergebnisse

Punkt 1 Die aufgezeichneten Kennlinien der Dioden entsprechen als Ganzes den zu erwartenden.

Punkt 2 Die Ergebnisse für die Kontaktspannungen sind in sich nicht besonders konsistent; stimmen aber im Großen überein. Ein Vergleich mit einem Literaturwert ist nicht möglich, da der Wert der Kontaktspannung von vielen Faktoren abhängt.

Punkt 3 Die Ergebnisse für den Exponenten im Raumladungsgesetz liegen ebenfalls grob innerhalb ihrer gegenseitigen Fehlerbereiche. Der gewichtete Mittelwert stimmt ganz ordentlich mit dem Literaturwert von 1.5 überein.

Punkt 4 Das Ergebnis für die Bestimmung der Austrittsarbeit von Wolfram liegt relativ gut an dem Literaturwert, auch wenn der Literaturwert streng genommen nicht im bestimmten Fehlerbereich liegt.

Die errechnete Fläche ist viel zu groß. Es ist davon auszugehen, dass die angegebene Richardson-Konstante in der Praktikumsanleitung falsch war. Für gewöhnlich liegen diese im Bereich 10^6 ; der gegebene Wert lag bei 10^{-3} .

5.2 Fehlerquellen

- Die Fehler durch die Innenwiderstände der Messgeräte wurden in Punkt 5 der Auswertung abgeschätzt.
- Die Fehler durch die systematischen Fehler der Messgeräte wurden durch die Fehlerabschätzungen berücksichtigt.
- Bei der Messung der Austrittsarbeit von Wolfram könnte eine Rolle spielen, dass der Glühdraht mit der Zeit abgenutzt ist.

Literatur

- [1] *Lernportal der Universität Göttingen: Kennlinie der Vakuumdiode*, <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/4256>, abgerufen 24.9.2013