

Versuch 504

Thermische ELektronenemission

Stefanie Hilgers
Stefanie.Hilgers@tu-dortmund.de

Lara Nollen
Lara.Nollen@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.04.2018

Abgabe: 08.05.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
5 Diskussion	7
Literatur	7

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird die Erzeugung freier Elektronen durch Erhitzen eines Metalles untersucht, dieses Phänomen wird auch als glühelektrischer Effekt bezeichnet. Von besonderem Interesse ist dabei die Temperaturabhängigkeit, sowie die Austrittsarbeit, die Materialabhängig ist. Diese Austrittsarbeit soll in diesem Versuch für das Metall Wolfram bestimmt werden. Da freie Elektronen sehr schnell mit den Luftmolekülen wechselwirken, wird dieser Versuch im Hochvakuum durchgeführt. Um diese Bedingung zu realisieren wird eine Hochvakuumdiode verwendet.

2 Theorie

Metalle haben eine hohe elektrische Leitfähigkeit, dies kann dadurch erklärt werden, dass das Metallinnere durch einen Potentialtopf wie in Abbildung 1 beschrieben werden kann, in dem sich die Elektronen kräftefrei bewegen können. Damit ein Elektron diesen Potentialtopf verlassen kann benötigt es die sogenannte Austrittsarbeit $e_0\xi$ (e_0 =Elementarladung) um gegen das Potential ξ anzulaufen.

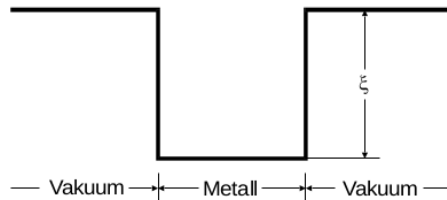


Abbildung 1: Potentialtopfmodell eines Metalles [1].

Hier stellt sich die Frage, ob die Elektronen auch spontan genügend Energie besitzen können um den Potentialtopf zu verlassen. Dazu sind zunächst zwei Aussagen wichtig:

- 1) Elektronen können nur diskrete Energiewerte annehmen.
- 2) Das Pauli-Prinzip besagt, dass jeder mögliche Zustand mit der Energie E höchstens von zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin eingenommen werden kann.

Die Fermi-Dirac-Verteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zustand der Energie E bei einer Temperatur T besetzt wird. Sie wird durch die Funktion

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-\xi}{kT}\right) + 1} \quad (1)$$

beschrieben. An dieser Formel kann man erkennen, dass das Elektron mindestens die Energie $\xi + e_0\phi$ benötigt, um die Metalloberfläche zu verlassen. Dabei gibt ϕ die Potentialdifferenz zwischen Außenraum- und Innenraum des Potentialtopfes an. Experimente haben ergeben, dass dieser Wert sehr groß ist, weshalb die Exponentialfunktion im Nenner

sehr stark wächst. Für energiereiche Elektronen die das Metall verlassen können kann die Näherung

$$f(E) = \exp\left(\frac{\xi - E}{kT}\right) \quad (2)$$

verwendet werden.

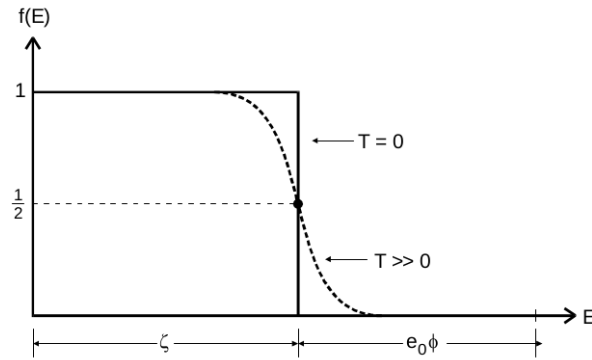


Abbildung 2: Fermi-Diracksche Verteilungsfunktion.

Gestrichelte Linie für $T \gg 0$ und durchgezogene Linie für $T=0$ (absoluter Nullpunkt)

[1].

Wie schon erwähnt wird für diesen Versuch eine Hochvakuumdiode verwendet. Hier ist in ein vakuumiertes Glasgefäß eine Anode und Kathode eingelassen. Um den Elektronen nun genügend Energie zuzuführen um das Metall zu verlassen wird die Kathode mit Hilfe einer Heizspannung auf 1000-3000 K erhitzt. Die austretenden Elektronen werden dann "abgesaugt", dies geschieht über die positiv geladene Anode. Der Strom an der Anode ist nun ein Maß für die ausgetretenen Elektronen.

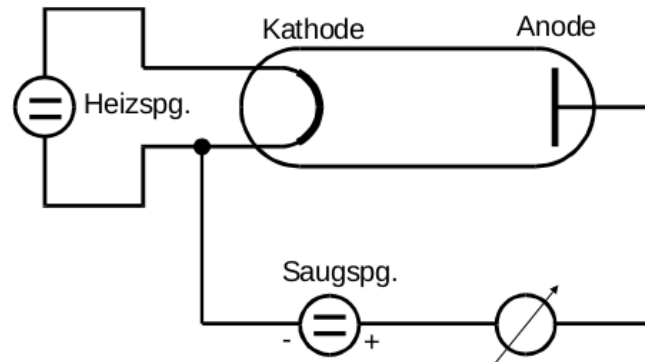


Abbildung 3: Aufbau einer Hochvakuumdiode

[1].

Wird nun die Heizspannung gegen den gemessenen Strom zwischen Anode und Kathode aufgetragen ergibt sich eine Kennlinie.

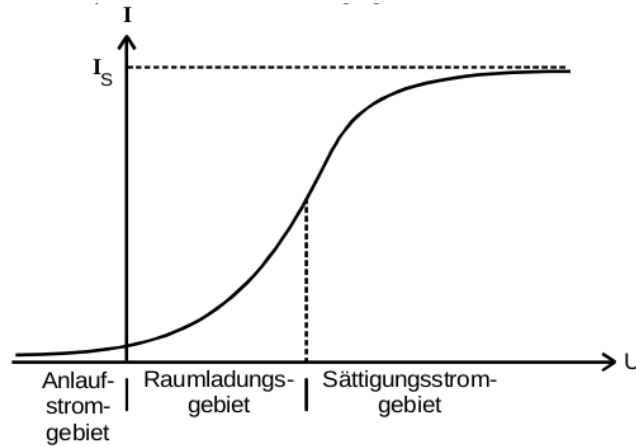


Abbildung 4: Kennlinie einer Hochvakuumdiode [1].

Diese Kennlinie lässt sich in drei Gebiete unterteilen: Anlaufgebiet, Raumladungsgebiet und Sättigungsgebiet.

Anlaufgebiet:

Es ist zu erkennen, dass selbst für kleine Gegenspannungen ein Stromfluss existiert. Dieser lässt sich darüber begründen, dass die austretenden Elektronen eine statistisch verteilte Energie besitzen. Es gibt also Elektronen, die genügend Energie besitzen um ein kleines Gegenfeld zu überwinden. Die Stromdichte für dieses Gebiet lässt sich ausdrücken als

$$j(V) = \text{const} \exp\left(\frac{-e_0 V}{k_B T}\right) \quad (3)$$

und ist von der Gegenspannung V und der Temperatur T abhängig.

Raumladungsgebiet:

In diesem Bereich erreichen nicht alle Elektronen die Anode und das Ohmsche Gesetz ($U = R \cdot I$) ist nicht gültig. Denn aufgrund der Kontinuitätsgleichung

$$j = -\rho v \quad (4)$$

muss ρ überall konstant sein. Da die Elektronen aber zur Anode hin beschleunigt werden ist ihre Geschwindigkeit in Nähe der Anode größer. Also nimmt dort die Raumladungsdichte ρ ab. Anschaulich gesprochen erreichen die Feldlinien der Anode die Kathode nicht mehr, sondern enden an den Raumladungselektronen. Somit werden die emittierten Elektronen nicht mehr von dem Anodenfeld erfasst. In diesem Bereich gilt also anstelle des Ohnschen Gesetzes das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz:

$$j = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{2e_0/m_0} * \frac{V^{(3/2)}}{a^2}. \quad (5)$$

$j \sim V^{(3/2)}$ ist eine Näherung, die sich durch die Herleitung ergibt. Weitere Zusammenhänge in einer Hochvakuumdiode sind im Folgenden dargestellt.

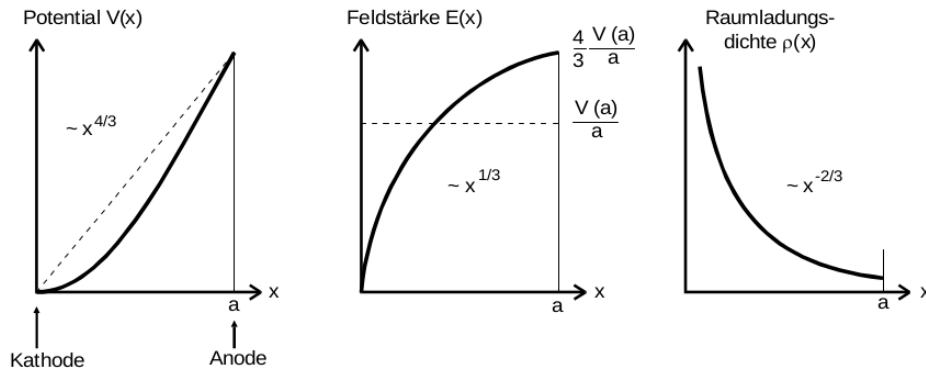


Abbildung 5: Ortsabhängigkeit des Potentials V , der Feldstärke E und der Raumladungsdichte ρ im Raumladungsgebiet einer Hochvakuumdiode [1].

Sättigungsgebiet:

Jetzt erreichen alle Elektronen die Anode. Der Grenzstrom ist nun nur von der Austrittsarbeit und der Temperatur abhängig. In diesem Bereich gilt die Richardson-Gleichung:

$$j_s(T) = 4\pi \frac{e_0 m_0 k^2}{h^3} T^2 \exp\left(\frac{-e_0 \phi}{kT}\right) \quad (6)$$

Aus der Leistungsbilanz des Heizstromfadens und dem Enrgiesatz ergibt sich folgende Formel für die Kathodentemperatur:

$$I_f U_f = f \eta \sigma T^4 + N_{WL}. \quad (7)$$

Dabei ist f die emittierende Kathodenoberfläche, η der Emissionsgrad der Oberfläche, σ die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante und N_{WL} wurde auf 1 W abgeschätzt.

3 Durchführung

Mit einem Versuchsaufbau wie in Abbildung 6 (ohne XY-Schreiber) wird der Versuch durchgeführt. Zunächst werden für fünf unterschiedliche Heizspannungen die Kennlinien aufgenommen. Dazu wird die Gegenspannung schrittweise erhöht und die entsprechende Stromstärke notiert. Für die maximale Heizleistung wird äquivalent vorgegangen, doch werden hier mehr Messwerte genommen. Ebenfalls für die maximale Heizleistung wird die Anlaufspannung untersucht, dazu wird ebenfalls äquivalent vorgegangen, es werden allerdings präzisere Messgeräte benutzt.

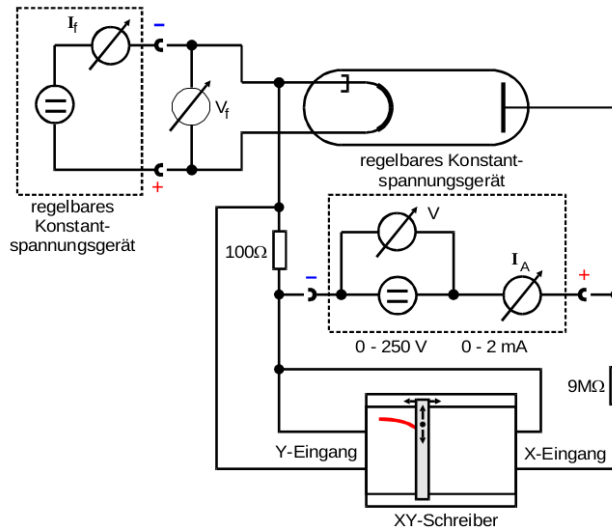


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Aufnahme von Kennlinien [1].

4 Auswertung

4.1 Bestimmung des Sättigungsstroms aus den Kennlinien

Zur Erstellung der 5 Kennlinien werden die jeweils gemessenen Wertepaare aus Spannung und Anodenstrom, welche in Tabelle ?? abzulesen sind gegeneinander aufgetragen, wie in Abbildung ?? zu sehen ist. Die Heizströme I_H und die entsprechenden Spannung U_H der 5 Messungen betragen hierbei:

Messung 1 : $I_{H1} = 2,0 \text{ A}$, $U_{H1} = 4,3 \text{ V}$

Messung 2 : $I_{H2} = 2,1 \text{ A}$, $U_{H2} = 4,7 \text{ V}$

Messung 3 : $I_{H3} = 2,2 \text{ A}$, $U_{H3} = 5,1 \text{ V}$

Messung 4 : $I_{H4} = 2,3 \text{ A}$, $U_{H4} = 5,4 \text{ V}$

Messung 5 : $I_{H5} = 2,4 \text{ A}$, $U_{H5} = 5,9 \text{ V}$

Tabelle 1: Messwerte zur Erstellung der Kennlinienschar

U / V	I_1 / A	I_2 / A	I_3 / A	I_4 / A	I_5 / A
0	0	0	0	0	0
10	0,034	0,035	0,047	0,055	0,068
20	0,070	0,097	0,130	0,150	0,167
30	0,084	0,147	0,191	0,248	0,235
40	0,090	0,177	0,252	0,293	0,325
50	0,095	0,192	0,312	0,372	0,424
60	0,095	0,195	0,376	0,453	0,520
70	0,096	0,198	0,418	0,533	0,616
80	0,099	0,206	0,447	0,608	0,712
90	0,101	0,214	0,465	0,685	0,817
100	0,102	0,218	0,480	0,745	0,917
110	0,105	0,220	0,492	0,806	1,012
120	0,106	0,223	0,500	0,858	1,104
130	0,110	0,226	0,509	0,897	1,188
140	0,113	0,228	0,518	0,933	1,275
150	0,115	0,230	0,526	0,969	1,368
160	0,117	0,231	0,531	0,996	1,460
170	0,118	0,234	0,536	1,018	1,559
180	0,119	0,236	0,541	1,034	1,640
190	0,119	0,237	0,545	1,047	1,713
200	0,120	0,239	0,549	1,057	1,795

plot1.pdf

Abbildung 7: Messwerte und Ausgleichsfunktionen der Messungen

Die Ausgleichsfunktionen werden dabei durch einen Fit mit der Funktion

$$f(x) = s - \exp -c * d \quad (8)$$

erstellt, wobei der Parameter s den Sättigungsstrom angibt. Aus dem Diagramm lassen

sich ungefähr Heizströme von

$$I_{S1} \approx 0,10 \text{ mA}$$

$$I_{S2} \approx 0,23 \text{ mA}$$

$$I_{S3} \approx 0,55 \text{ mA}$$

$$I_{S4} \approx 1,07 \text{ mA}$$

$$I_{S5} > 2 \text{ mA}$$

ablesen, wobei dies bei der fünften Kennlinie nicht mehr wirklich möglich ist, es lässt sich nur sagen, dass der Sättigungsstrom deutlich größer ist als der in dem Diagramm maximal darstellbare Strom von etwa 2 mA. Aus der Ausgleichsrechnung ergeben sich zudem noch rechnerisch die folgenden Werte:

$$I_{S1} \approx (0,112 \pm 0,002) \text{ mA}$$

$$I_{S2} \approx (0,233 \pm 0,003) \text{ mA}$$

$$I_{S3} \approx (0,572 \pm 0,010) \text{ mA}$$

$$I_{S4} \approx (1,441 \pm 0,072) \text{ mA}$$

$$I_{S5} \approx (32 \pm 23) \text{ mA} .$$

4.2 Bestimmung des Exponenten im Raumladungsgebiet

Die Messwerte des maximalen Heizstroms von 2,5 A bei 6,2 V sind in Tabelle ?? abzulesen.

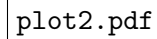
Tabelle 2: Messwerte bei 2,5 A

U/V	I/A	U/V	I/A
5	0,026	130	1,337
10	0,068	135	1,392
15	0,115	140	1,451
20	0,170	145	1,513
25	0,206	150	1,575
30	0,233	155	1,660
35	0,286	160	1,697
40	0,343	165	1,768
45	0,395	170	1,831
50	0,438	175	1,899
55	0,500	180	1,964
60	0,554	185	2,03
65	0,616	190	2,10
70	0,660	195	2,17
75	0,713	200	2,24
80	0,770	205	2,31
85	0,817	210	2,38
90	0,877	215	2,45
95	0,928	220	2,53
100	0,989	225	2,59
105	1,046	230	2,66
110	1,105	235	2,73
115	1,161	240	2,81
120	1,223	245	2,87
125	1,279	250	2,94

Das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz gilt dabei im gesamten Wertebereich. Zur Bestimmung des Exponenten der Strom-Spannungs-Beziehung werden die Messwerte in einem logarithmischen Diagramm (??) gegeneinander aufgetragen und es wird eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$y = a \cdot x + b \quad (9)$$

durchgeführt.



plot2.pdf

Abbildung 8: Logarithmisches Diagramm des Raumladungsgebiets mit linearer Ausgleichsfunktion.

Hieraus ergeben sich die Parameter

$$a = 1.172 \pm 0.005$$

$$b = -5.4 \pm 0.02 ,$$

wobei a den gesuchten Exponenten angibt.

4.3 Bestimmung der Kathodentemperatur aus dem Anlaufstromgebiet

Die Messwerte des Anlaufstromgebietes für einen Heizstrom von 2,5 A befinden sich in Tabelle ??.

Tabelle 3: Messwerte bei 2,5 A

U / V	I / nA	U / V	I / nA
0,00	11,8	0,50	0,95
0,02	10,5	0,52	0,86
0,04	9,8	0,54	0,84
0,06	8,8	0,56	0,77
0,08	7,9	0,58	0,70
0,10	7,2	0,60	0,65
0,12	6,4	0,62	0,59
0,14	5,8	0,64	0,54
0,16	5,3	0,66	0,50
0,18	4,8	0,68	0,44
0,20	4,4	0,70	0,40
0,22	3,9	0,72	0,38
0,24	3,5	0,74	0,35
0,26	3,2	0,76	0,32
0,28	2,9	0,78	0,29
0,30	2,6	0,80	0,28
0,32	2,35	0,82	0,275
0,34	2,10	0,84	0,265
0,36	1,95	0,86	0,250
0,38	1,75	0,88	0,230
0,40	1,60	0,90	0,220
0,42	1,45	0,92	0,205
0,44	1,25	0,94	0,195
0,46	1,15	0,96	0,180
0,48	1,05		

Diese werden in einem halblogarithmischen Diagramm (Diagramm ??) gegeneinander aufgetragen und es wird erneut eine lineare Ausgleichsrechnung mit der Funktion ?? durchgeführt.

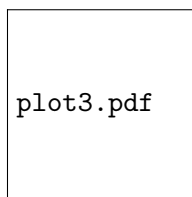


Abbildung 9: Halblogarithmisches Diagramm des Anlaufstroms mit linearer Ausgleichsfunktion.

Hieraus ergeben sich die Parameter

$$a = -4.47 \pm 0.051 \frac{1}{V}$$

$$b = 2.33 \pm 0.03 .$$

Aus der Gleichung ?? folgt, dass die Kathodentemperatur T gegeben ist durch die Gleichung

$$T = \frac{e_0}{k \cdot a} , \quad (10)$$

wobei $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ [q1] die Elementarladung bezeichnet, und $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ [q2] die Boltzmann-Konstante. Somit ergibt sich also insgesamt eine Kathodentemperatur von

$$T = (-2596 \pm 32) \text{K} ,$$

wobei sich der Fehler aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2} \quad (11)$$

ergibt, also in diesem Fall

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{e_0}{k \cdot a^2} \right)^2 \cdot (\Delta a)^2} . \quad (12)$$

4.4 Bestimmung der Kathodentemperatur

Zur Bestimmung der Kathodentemperatur wird die Formel ?? verwendet, wobei die Werte der Heizspannung und des Heizstromes aus dem ersten Auswertungsteil zu entnehmen sind. Hieraus ergeben sich die folgenden Werte der Kathodentemperatur :

$$T1 = 1964,07 \text{ K}$$

$$T2 = 2041,43 \text{ K}$$

$$T3 = 2115,03 \text{ K}$$

$$T4 = 2174,56 \text{ K}$$

$$T5 = 2253,03 \text{ K}$$

Hierbei berechnen sich die Fehler nach Formel ?? durch

$$\Delta T = \sqrt{\text{???????}} . \quad (13)$$