

V504 Thermische Elektronenemission

Alina Landmann, alina.landmann@tu-dortmund.de
Jannine Salewski, jannine.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.04.2018

Abgabe: 03.05.2018

TU Dortmund - Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Durchführung	3
4 Auswertung	4
4.1 Ermittlung des Sättigungsstroms	4
4.2 Gültigkeit der Langmuir-Schottky-Gleichung	6
4.3 Untersuchung des Anlaufstromgebietes	7
4.4 Bestimmung der Kathodentemperatur über die Leistungsbilanz	10
4.5 Berechnung der Austrittsarbeit mit Hilfe der Richardson-Gleichung	10
5 Diskussion	11
Literatur	12

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die thermische Elektronenemission ("Glühelktrischer Effekt") untersucht werden. Insbesondere soll hier die Temperaturabhängigkeit und die Austrittsarbeit des verwendeten Wolframs mit Hilfe der Kennlinien untersucht werden.

2 Theorie

Als glühelktrischer Effekt wird die Emission von Elektronen von einem aufgeheizten Metall bezeichnet. Hierzu müssen sie Elektronen eine Austrittsarbeit verrichten. Diese Austrittsarbeit lässt sich an dem Modell eines Potentialtopfes erklären. Das Elektron ist in dem Potentialtopf des positiv geladenen Atomgitters gebunden und es muss die Austrittsarbeit leisten, um aus diesem Potential herauszugelangen.

Dieser Versuch muss in einer Hochvakuumdiode durchgeführt werden, damit die freigesetzten Elektronen nicht mit der Umgebungsluft reagieren. Der schematische Aufbau einer Hochvakuumdiode ist in Abbildung 1 dargestellt.

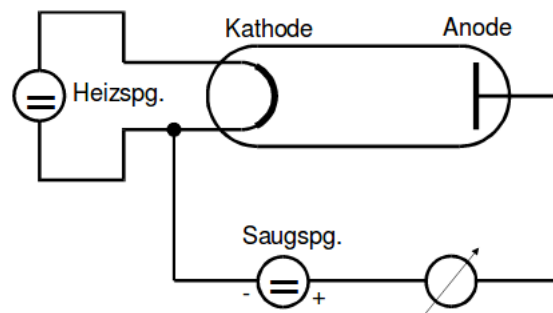


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Hochvakuumdiode. [Dor]

Die Heizspannung sorgt für die Erhitzung des Metalles in der Kathode, hier Wolfram. Die Elektronen treten aus der Kathode aus und werden durch die Beschleunigungsspannung in Richtung der Anode beschleunigt. Der gemessene Strom zwischen Anode und Kathode ist proportional zu den herausgelösten Elektronen. Wenn der Strom I in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U aufgetragen wird, es entsteht eine typische Kennlinie (Abbildung 2).

Diese Kennlinie ist in drei Bereiche unterteilt, die jeweils durch ein Gesetz beschrieben werden. Der erste Bereich wird als **Anlaufstromgebiet** bezeichnet, hier ist die Beschleunigungsspannung negativ, sie kann also eher als Gegenspannung verstanden werden. Dieser Strom lässt sich darauf zurückführen, dass die aus der Kathode austretenden Elektronen eine statistisch verteilte kinetische Energie haben. Es existieren also endlich viele Elektronen, die trotz Gegenspannung die Anode erreichen. Die Stromdichte j in Abhängigkeit des Gegenstroms U und der Temperatur T ist gegeben durch

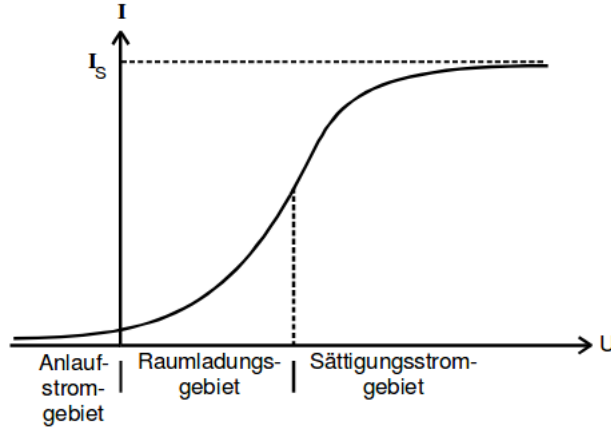


Abbildung 2: Kennlinie. [Dor]

$$j(V) = A \cdot \exp\left(-\frac{e_0 V}{k_B T}\right) \quad (1)$$

wobei A eine Konstante, e_0 die Elementarladung und k_B die Boltzmannkonstante darstellt.

Das **Raumladungsgebiet** wird durch das **Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz** beschrieben

$$j(V) = \frac{4}{9} e_0 \sqrt{\frac{2e_0}{m_o}} \frac{V^{3/2}}{a^2}, \quad (2)$$

wobei a der Abstand zwischen Anode und Kathode und m_0 die Elektronenmasse beschreibt. Hierbei werden Elektronen aus dem Metall durch den Glühelektrischen Effekt herausgelöst und in Richtung der Anode beschleunigt. Der gemessene Strom I ist dabei proportional zu $V^{3/2}$.

Der letzte Abschnitt der Kennlinie wird durch das **Sättigungsstromgebiet** charakterisiert. Hier nähert sich der Strom einem Sättigungswert an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die freigewordenen Elektronen zwischen der Kathode und der Anode ein eigenes elektrisches Gegenfeld erzeugen. Bei einer bestimmten Spannung ist das Gegenfeld der Elektronen genauso groß wie das eigentlich durch die Beschleunigungsspannung erzeugte elektrische Feld. Somit stellt sich ein Gleichgewicht ein und der Strom I kann nicht mehr größer werden. Dieser Bereich wird durch die folgende **Richardson Gleichung** beschrieben, mit ϕ die Austrittsarbeit beschreibt,

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

3 Durchführung

Zunächst wird der Versuchsaufbau nach dem Schaltplan aufgebaut (siehe Abbildung 3).

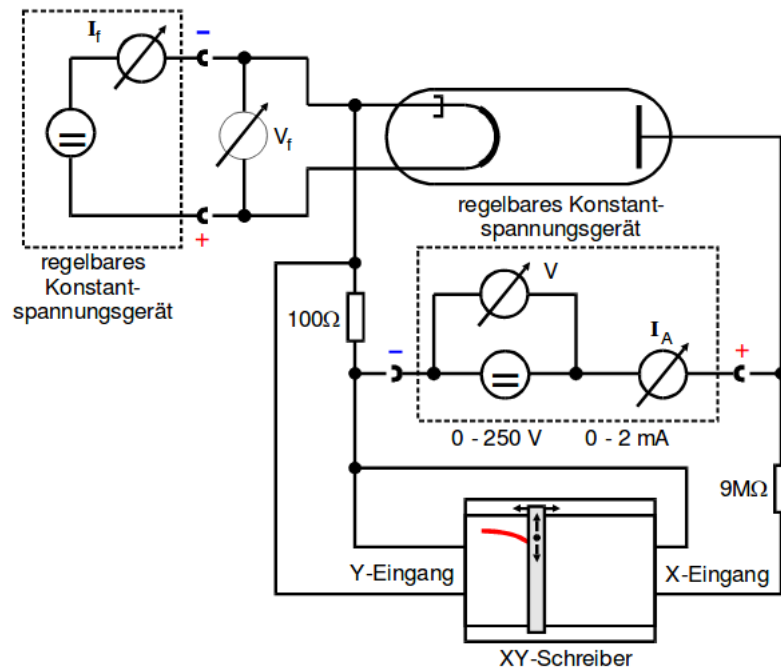


Abbildung 3: Aufbau. [Dor]

Es werden zunächst 4 Messungen des Sättigungsbereiches durchgeführt mit jeweils verschiedenen Heizspannungen zwischen 1.8 A und 2.3 A. Dabei werden zu ungefähr 20 verschiedenen Beschleunigungsspannungen (im Bereich von 0 V bis 250 V) die Stromstärken I gemessen.

Zur Messung des Raumladungsgebietes wird die maximale Stromstärke von 2.3 A eingestellt und etwa 50 Messpaare genommen, hierbei soll vor allem im Bereich bis 100 V, um den Raumladungsbereich gut darzustellen.

Bei der Messung des Anlaufstromgebietes wird ein Nanoamperemeter und ein externes Voltmeter angeschlossen, um die geringen Stromstärken genauer messen zu können. Hier werden möglichst viele Messwerte aufgenommen, hier sind es etwa 20.

4 Auswertung

4.1 Ermittlung des Sättigungsstroms

Im ersten Teil des Versuchs werden die Kennlinien unterschiedlich eingestellter Heizströme ermittelt. Die dazugehörigen Messwerte befinden sich in Tabelle 1 und 2. Aus diesen Tabellen lassen sich die Sättigungsströme gut ablesen. Die Heizleistungen der fünf gemessenen Heizströme betragen:

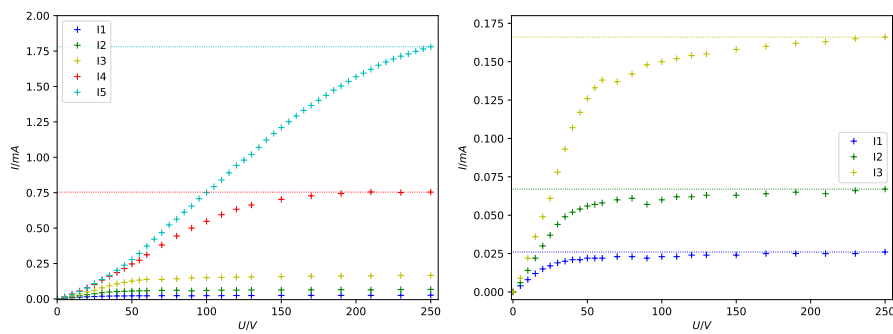
$$P_1 = 7.2 \text{ W}$$

$$P_2 = 8.55 \text{ W}$$

$$P_3 = 9.0 \text{ W}$$

$$P_4 = 12.1 \text{ W}$$

$$P_5 = 14.1 \text{ W}$$



(a) Kennlinienschar der Hochvakuum- diode. (b) Kennlinienschar der Hochvakuum- diode für die ersten drei Heizströme.

Für die Sättigungsströme können folgende Werte abgelesen werden:

$$I_{S1} = 0.028 \text{ mA}$$

$$I_{S2} = 0.067 \text{ mA}$$

$$I_{S3} = 0.166 \text{ mA}$$

$$I_{S4} = 0.754 \text{ mA}$$

$$I_{S5} = 1.780 \text{ mA}$$

U / V	I_1 / mA	I_2 / mA	I_3 / mA	I_4 / mA
0	0,000	0,000	-	-
5	0,004	0,006	0,009	0,013
10	0,008	0,014	0,022	0,034
15	0,012	0,022	0,036	0,056
20	0,015	0,030	0,049	0,079
25	0,017	0,037	0,061	0,101
30	0,019	0,044	0,078	0,133
35	0,020	0,049	0,093	0,160
40	0,021	0,052	0,107	0,186
45	0,021	0,054	0,117	0,215
50	0,022	0,056	0,126	0,247
55	0,022	0,057	0,133	0,273
60	0,022	0,058	0,138	0,312
70	0,023	0,060	0,137	0,381
80	0,023	0,061	0,142	0,444
90	0,022	0,057	0,148	0,500
100	0,023	0,060	0,150	0,548
110	0,023	0,062	0,152	0,595
120	0,024	-	0,154	0,633
130	0,024	0,063	0,155	0,663
150	0,024	0,063	0,158	0,703
170	0,025	0,064	0,160	0,728
190	0,025	0,065	0,162	0,744
210	0,025	0,064	0,163	0,755
230	0,025	0,066	0,165	0,751
250	0,026	0,067	0,166	0,754

Tabelle 1: Messdaten zur Ermittlung der Kennline der Hochvakuumdiode für die ersten vier Heizspannungen.

U / V	I_5 / mA	U / V	I_5 / mA
5	0,015	130	1,020
10	0,032	135	1,070
15	0,052	140	1,122
20	0,077	145	1,168
25	0,108	150	1,210
30	0,137	155	1,251
35	0,167	160	1,292
40	0,202	165	1,331
45	0,238	170	1,366
50	0,278	175	1,402
55	0,321	180	1,437
60	0,373	185	1,474
65	0,422	190	1,504
70	0,468	195	1,536
75	0,522	200	1,569
80	0,563	205	1,594
85	0,612	210	1,621
90	0,655	215	1,650
95	0,708	220	1,673
100	0,750	225	1,694
105	0,793	230	1,714
110	0,840	235	1,730
115	0,890	240	1,748
120	0,943	245	1,765
125	0,980	250	1,780

Tabelle 2: Messdaten zur Ermittlung der Kennlinie der Hochvakuumdiode für die fünfte Heizspannung.

4.2 Gültigkeit der Langmuir-Schottky-Gleichung

Im folgenden soll die Gültigkeit der Langmuir-Schottky-Gleichung überprüft werden. Dies geschieht, indem eine Regression der Form

$$f(x) = a x^b$$

durch die Messwerte der höchsten Heizleistung gelegt wird. Der Vorfaktor a steht hier für den Vorfaktor der Langmuir-Schottky-Gleichung 2 und b für den gesuchten Exponenten. Der Raumladungsbereich wurde dabei abgeschätzt, weshalb für die Ausgleichsrechnung

nur die Werte verwendet wurden, die innerhalb von 15 bis 125 Volt lagen. Dies liefert folgende Werte für a und b :

$$a = (1.49 \pm 0.11) \text{ As/Vm}^3 \sqrt{\frac{C}{\text{kg}}} \quad \text{und} \\ b = 1,349 \pm 0,017$$

Der Theoriewert für b liegt bei 1,5, womit die prozentuale Abweichung des ermittelten Werts bei 10.1 % liegt.

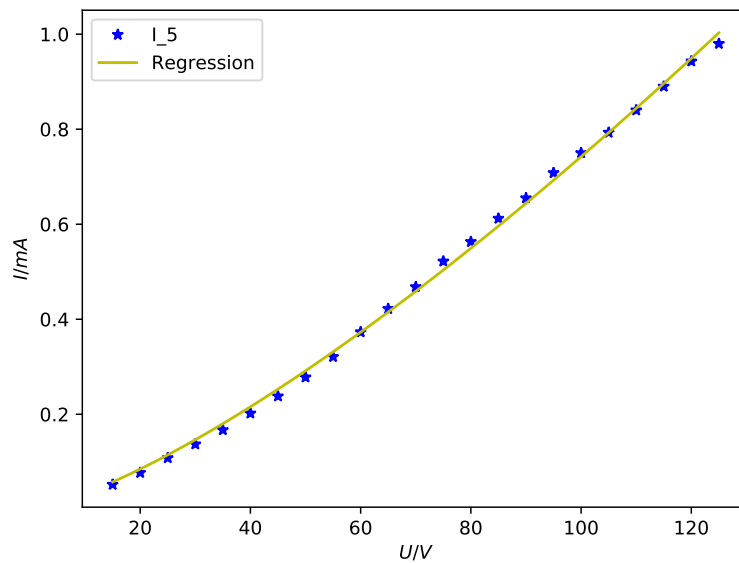


Abbildung 5: Messwerte und Regression zur Überprüfung der Langmuir-Schottky-Gleichung

4.3 Untersuchung des Anlaufstromgebietes

Im folgenden Teil des Versuchs wird das Anlaufstromgebiet für die maximal mögliche Heizleistung untersucht und mit Hilfe der Formel für den Anlaufstrom 1 die Kathodentemperatur bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass auf Grund der empfindlichen Messgeräte, der Innenwiderstand des Amperemeters korrigiert werden muss. Die korrigierte Spannung beträgt:

$$U_{\text{ko}} = U_{\text{gem}} + I \cdot R_{\text{i}}$$

R_i ist mit $1\text{ M}\Omega$ angegeben. Mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung der Form

$$I(U) = a \exp(bU)$$

können zunächst die Parameter a und b bestimmt werden. Der zugehörige Plot der Messwerte und die Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 6 zu sehen. Die experimentell ermittelten Werte für a und b betragen:

$$\begin{aligned} a &= (7.29 \pm 0.08) \text{ A} \\ b &= (-5.67 \pm 0.09) \text{ 1/V} \end{aligned}$$

Im Vergleich mit der Formel für den Anlaufstrom 1 ergibt sich, dass für a und b folgendes gelten muss:

$$\begin{aligned} a &= \text{const} \\ b &= \frac{e_0}{k_B T} \end{aligned}$$

Die Temperatur lässt sich demnach mittels

$$T = \frac{e_0}{k_B b} \text{ berechnen.}$$

Hierbei ist zu beachten, dass sich in dieser Formel die zuvor experimentell ermittelte und somit fehlerbehaftete Größe b befindet, weshalb hier die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung beachtet werden muss:

$$\Delta T = \sqrt{\left(-\frac{e_0}{k_B b^2}\right)^2 \cdot (\Delta b)^2}.$$

Für die experimentell ermittelte Temperatur der Kathode ergibt sich folglich ein Wert von $2047 \pm 32 \text{ K}$.

$U_{\text{gem}} / \text{V}$	U_{ko} / V	I / mA
0.00	0.0071	7.1
0.06	0.065	5.0
0.12	0.1235	3.5
0.18	0.1824	2.4
0.24	0.2419	1.9
0.30	0.3014	1.4
0.36	0.361	1.0
0.42	0.42077	0.77
0.48	0.48055	0.55
0.54	0.54039	0.39
0.60	0.6003	0.30
0.66	0.660215	0.215
0.72	0.72015	0.15
0.78	0.78011	0.11
0.84	0.840086	0.086
0.90	0.900061	0.061
0.96	0.960043	0.043

Tabelle 3: Messdaten zur Untersuchung des Anlaufstromgebiets.

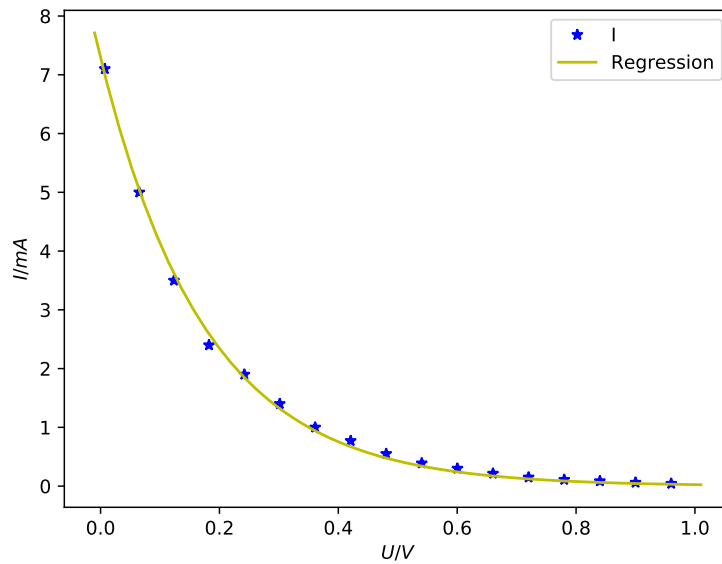


Abbildung 6: Messwerte und Regression zur Untersuchung des Anlaufstromgebiets

4.4 Bestimmung der Kathodentemperatur über die Leistungsbilanz

Zur Bestimmung der Kathodentemperatur über die Leistungsbilanz, wird verwendet, dass die Temperatur auch mittels folgender Formel berechnet werden kann:

$$T = \sqrt[4]{\frac{I_f U_f - N_{WL}}{f \eta \psi}}$$

Die Wärmeleitung N_{WL} wird hier mit 0,95W abgeschätzt. Die emittierende Kathodenoberfläche ist mit $f = 0,32 \text{ cm}^2$ und der Emissionsgrad der Oberfläche η mit 0,28 angegeben. Die Stefan-Boltzmann-Strahlungskonstante liegt bei $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$. In Tabelle 4 sind die berechneten Temperaturen mit den zugehörigen Werten für den Heizstrom und die Heizspannung zu sehen. Im Vergleich mit dem berechneten Wert aus der Anlaufstromgebiertsrechnung für den maximalen Heizstrom, ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 9,1%.

U / V	I / A	T / K
4,0	1,8	1870.36
4,5	1,9	1964.07
4,5	2,0	1992.52
5,5	2,2	2161.59
6,0	2,35	2252.61

Tabelle 4: Messdaten zur Untersuchung der Kathodentemperatur über die Leistungsbilanz.

4.5 Berechnung der Austrittsarbeit mit Hilfe der Richardsongleichung

Um die Austrittsarbeit von Wolfram zu berechnen, wird die Richardsongleichung 3 nach eben dieser umgestellt:

$$e_0 \Phi = -\ln \left(\frac{h^3 I_s}{4\pi e_0 m_0 k_B^2 T^2 f} \right) k_B$$

Die berechneten Werte für die Austrittsarbeit sind in Tabelle 5 zu sehen. Der Mittelwert für die Austrittsarbeit und der zugehörige Fehler berechnen sich mit Hilfe folgender Formeln:

$$\overline{e_0 \Phi} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 e_0 \Phi_i$$

$$\Delta \overline{e_0 \Phi} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^5 (e_0 \Phi_i - \overline{e_0 \Phi})^2}$$

Der Mittelwert der berechneten Austrittsarbeit liegt bei $4,35 \pm 0,00045 \text{ eV}$. Der Literaturwert für die Austrittsarbeit von Wolfram liegt bei $4,54 \text{ eV}$ [for], womit die Prozentuale Abweichung vom Literaturwert bei 4.19%

I_S / mA	T / K	$e_0\Phi / \text{eV}$
0,026	1870.36	4,37
0,067	1964.07	4,36
0,166	1992.52	4,35
0,754	2161.59	4,33
1,780	2252.61	4,32

Tabelle 5: Messdaten zur Berechnung der Austrittsarbeit.

5 Diskussion

Es ist im Verlauf der Auswertung zu erkennen, dass sich die Abweichungen der experimentell ermittelten Werte in einem Bereich zwischen fünf und zehn Prozent liegen. Dies lässt vermuten, dass keine systematischen Fehler begangen wurden. Erklären lassen können sich die Abweichungen zum einen, dass die zu Beginn des Experiments ermittelten Sättigungsströme nicht gänzlich erreicht wurden, was folglich alle Berechnungen, in denen die Werte verwendet wurden, beeinflusst. Des weiteren können die Abweichungen eine Folge dessen sein, dass die Geräteeinstellungen nicht ganz exakt vorgenommen werden konnten. Die prozentuale Abweichung für die auf zwei Arten ermittelte Kathodentemperatur liegt für den höchsten verwendeten Heizstrom bei 9.1% . Auch diese Abweichung ist nicht als allzu hoch anzusehen und ist dadurch erklärbar, dass Werte, wie die Wärmeleitung oder die Stefan-Boltzmann-Konstante, bei der Berechnung der Kathodentemperatur über die Leistungsbilanz, nur grob abgeschätzt wurden. Der Fehler für die berechnete Austrittsarbeit für die Elektronen ist dadurch zu erklären, dass die in der Berechnung verwendete Kathodentemperatur nicht exakt zu dem Wert des Sättigungsstroms passte.

Literatur

- [Dor] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 504 Thermische Elektronenemission*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V504.pdf> (besucht am).
- [for] formel-sammlung.de. *Austrittsarbeit von Elektronen aus Metallen*. URL: <http://www.formel-sammlung.de/formel-Austrittsarbeitvon-%20Elektronen-aus-Metallen-3-25-134.html> (besucht am).