

V504

Thermische Elektronenemission

Yanick Sebastian Kind
yanick.kind@udo.edu

Till Willershausen
till.willershausen@udo.edu

Durchführung: 13.04.2021

Abgabe: 19.04.2021

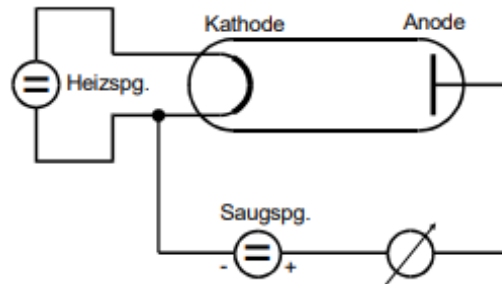
Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	4
2.1	Kennlinien und Sättigungsstrom	4
2.2	Anlaufstrom und Austrittsarbeit	5
3	Auswertung	5
3.1	Kennlinienschar einer Hochvakuumdiode	5
3.2	Bestimmung des Raumladungsgebietes	7
3.3	Bestimmung der Kathodentemperatur	8
3.4	Bestimmung der Austrittsarbeit mit der Leistungbilanz	9
4	Diskussion	10
	Literatur	10

1 Theorie

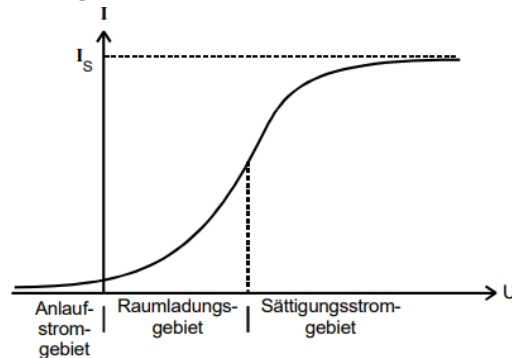
Im vorliegenden Experiment wird die thermische Elektronenemission untersucht. Dabei werden mit Hilfe des glühelektrischen Effekts freie Elektronen aus einer Metalloberfläche gelöst. Ziel des Versuches ist es die Temperaturabhängigkeit und die Austrittsarbeit von Wolfram zu bestimmen. Eine Durchführung des Versuches ist nur im Hochvakuum möglich, da die freien Elektronen nicht mit den Gasmolekülen wechselwirken sollen. Es bietet sich eine Hochvakuumdiode an, welche wie in Abbildung 1 beschaltet wird. Das Erhitzen

Abbildung 1: Beschaltung einer Hochvakuumdiode [1]



der Kathode erfolgt durch einen starken Heizstrom (ca. 2,6 A). Durch diesen Heizstrom wird die Kathode auf etwa 3000 K erhitzt, wodurch Elektronen emittiert werden. Durch eine angelegte Saugspannung werden die Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Bei dem Auftragen der Spannung zwischen Kathode und Anode gegen den fließenden Strom wird eine Kennlinie sichtbar. Eine typische Kennlinie ist in Abbildung 2 zu sehen. Die Kennlinie wird in drei Teile unterteilt. Der erste Teil ist das Anlaufstromgebiet.

Abbildung 2: Kennlinie einer Hochvakuumdiode [1]



In diesem Gebiet ist die Spannung umgepolt, so dass eine Gegenspannung vorliegt. Es fällt auf, dass für kleine Gegenspannungen auch Elektronen ankommen, da einige dieser Elektronen genug kinetische Energie haben um den Potentialunterschied zu überwinden. Dies ist möglich da die ausgelösten Elektronen eine statistisch verteilte Bewegungsenergie

aufweisen. Eine Abhängigkeit der Stromdichte von der Gegenspannung ist gegeben durch

$$j(V) = \text{const} \exp \left(-\frac{e_0 V}{k_B T} \right). \quad (1)$$

Das zweite Gebiet wird Raumladungsgebiet genannt. In diesem Gebiet erreichen aufgrund der nicht gleichmäßigen Raumladungsdichte nicht alle Elektronen die Anode. Diese entsteht durch die beschleunigte Bewegung der Elektronen in dem elektrischen Feld. Einige Elektronen werden somit nicht von dem Anodenfeld erfasst, so dass einige Feldlinien an den Raumladungselektronen vor der Kathode enden. Die Raumladungsdichte nimmt in Richtung der Anode ab. Dies lässt sich anhand der Gleichung (2) erkennen.

$$j = -\rho V \quad (2)$$

Anstelle des Ohmschen Gesetzes gilt in diesem Bereich das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz

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

Die Proportionalität $j \sim V^{\frac{3}{2}}$ ist aufgrund der Herleitung nur eine Näherung. Der dritte Bereich ist das Sättigungsstromgebiet. Der Sättigungsstrom ist erreicht, wenn alle Elektronen die Anode erreichen. Gegeben ist der Grenzstrom durch die Richardson Gleichung

$$I_s(T) = 4f\pi \frac{e_0 m_0 k_b^2}{h^3} T^2 \exp \left(\frac{-e_0 \phi}{k_b T} \right). \quad (4)$$

Wobei f die Kathodenfläche ist. Der Sättigungsstrom ist nur noch von der Temperatur und der Austrittsarbeit $W_A = e_0 \phi$ abhängig. Aus der Leistungsbilanz und der Energieerhaltung folgt die Gleichung

$$T = \sqrt[4]{\frac{I_f U_f - N_{WL}}{f \eta \sigma}}. \quad (5)$$

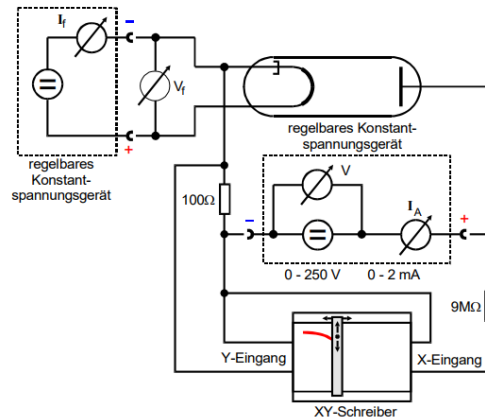
Mit dieser lässt sich die Temperatur ermitteln. Dabei ist σ die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante, f die emittierende Kathodenoberfläche und $\eta = 0.28$ der Emissionsgrad der Oberfläche.

2 Durchführung

2.1 Kennlinien und Sättigungsstrom

Zur Bestimmung der Kennlinien wird ein Aufbau wie in Abbildung 3 benutzt. Die Kennlinien werden durch Variation der Spannung zwischen Anode und Kathode entnommen. Dabei wird für jede neue Kennlinie der Heizstrom um 0,1 A erhöht. Die dazugehörigen Messwerte und Heizspannungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. An Stelle eines XY-Schreibers wird an einem Amperemeter der Diodenstrom I_A abgelesen. Aus den Messwerten lässt sich auch auf den Sättigungsstrom schließen.

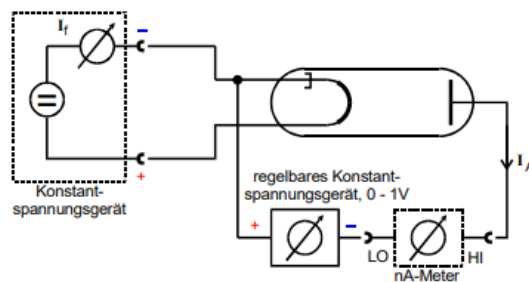
Abbildung 3: Schaltung zur Aufnahme der Diodenkennlinien [1]



2.2 Anlaufstrom und Austrittsarbeit

Die Messatur wird wie in Abbildung 4 aufgebaut. Wesentliche Unterschiede zu dem

Abbildung 4: Schaltung zur Aufnahme des Anlaufstroms [1]



Aufbau 3 sind dabei nur die Umpolung des Spannungsgerätes und das Austauschen des Amperemeters mit einem empfindlicheren Nanoamperemeter. Durch den eingebauten Verstärker ist dieses Gerät jedoch störungsanfälliger. Bei der Messung wird der Heizstrom auf 2,5 A eingestellt und die Gegenspannung langsam hochskaliert. Die Messwerte werden an dem Amperemeter mit zugehöriger Gegenspannungen abgelesen.

3 Auswertung

Jegliche Fehlerrechnung wurde mit der Python-Bibliothek uncertainties [2] absolviert. Allgemeine Rechnungen wurden mit der Python-Bibliothek numpy [4] automatisiert.

3.1 Kennlinienschar einer Hochvakuumdiode

In der Tabelle 1 sind die gemessenen Absaugströme aufgetragen. In der Abbildung 5 sind die Messwerte der Absaugströme I_{A1} bis I_{A6} bei 6 verschiedenen Heizströmen (I_H)

Abbildung 5: Kennlinienschar bei verschiedenen Heizleistungen

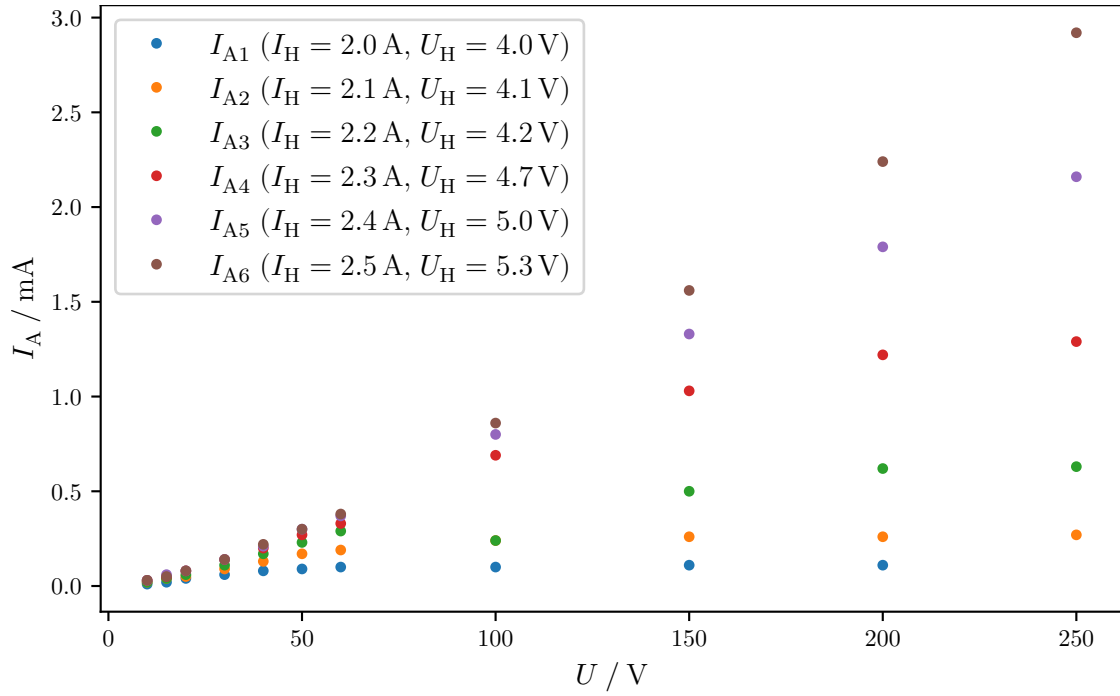


Tabelle 1: Gemessene Absaugströme

U_A / V	I_{A1} / mA	I_{A2} / mA	I_{A3} / mA	I_{A4} / mA	I_{A5} / mA	I_{A6} / mA
10	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
15	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,05
20	0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,08
30	0,06	0,09	0,11	0,14	0,14	0,14
40	0,08	0,13	0,17	0,2	0,21	0,22
50	0,09	0,17	0,23	0,27	0,3	0,3
60	0,1	0,19	0,29	0,33	0,37	0,38
100	0,1	0,24	0,24	0,69	0,8	0,86
150	0,11	0,26	0,5	1,03	1,33	1,56
200	0,11	0,26	0,62	1,22	1,79	2,24
250	-	0,27	0,63	1,29	2,16	2,92

bzw. -spannungen (U_H) aufgetragen. Anhand der Graphik können die Sättigungsströme I_S für die Kennlinien von I_{A1} bis I_{A6} abgelesen werden. Diese betragen in etwa

$$I_{S1} = 0,11 \text{ mA}$$

$$I_{S2} = 0,27 \text{ mA}$$

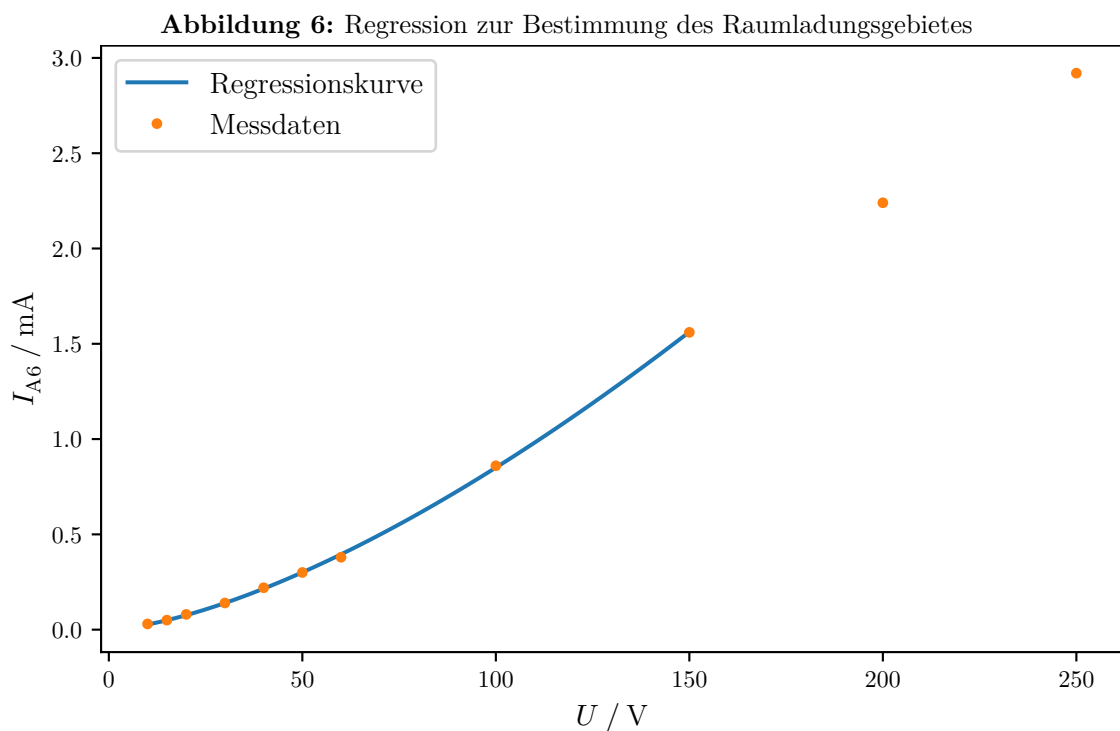
$$I_{S3} = 0,63 \text{ mA}$$

$$I_{S4} = 1,29 \text{ mA}$$

$$I_{S5} = 2,5 \text{ mA}$$

$$I_{S6} = 4 \text{ mA} .$$

3.2 Bestimmung des Raumladungsgebietes



Zur Bestimmung des Raumladungsgebietes wird die Gültigkeit des Exponenten der Gleichung (3) an den Messwerten mittels Regression untersucht. Dazu lässt sich die Regressionvorschrift als

$$y = cV^d \quad (6)$$

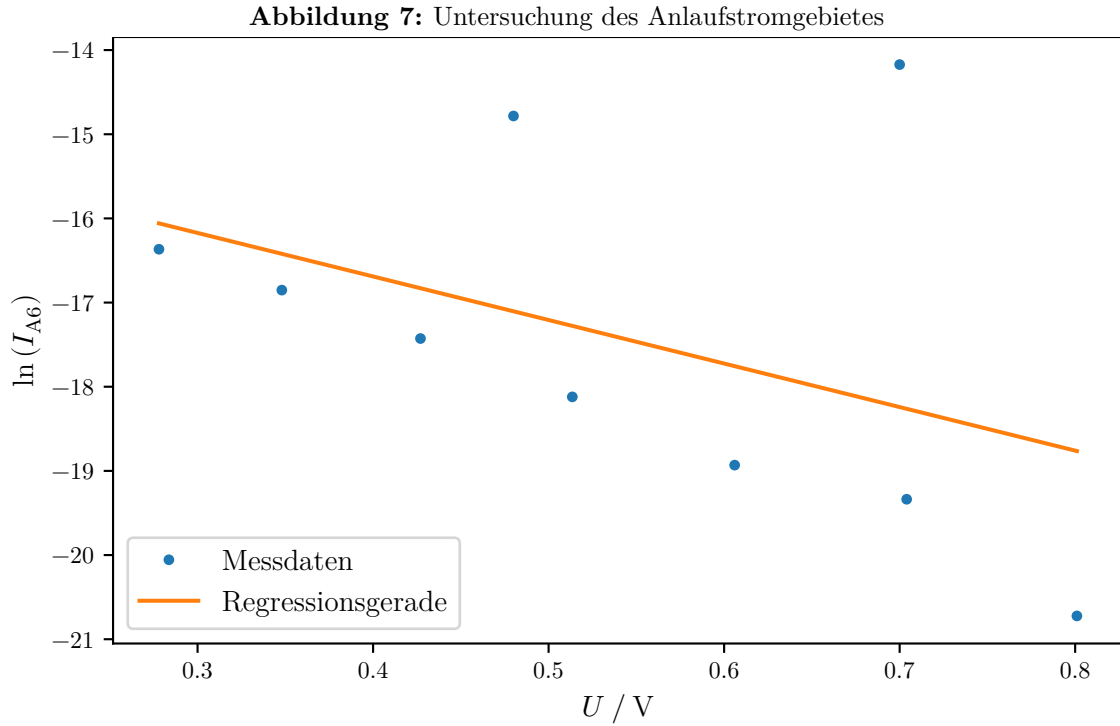
schreiben. Nach Durchführung der Regression und Anpassung der Spannungsintervalle ergeben sich die Regressionsparameter zu

$$c = 0,001 \pm 0,001$$

$$d = 1,50 \pm 0,01 .$$

Aufgrund der Anpassung des Intervalls lässt sich sagen, dass die $V^{\frac{3}{2}}$ -Proportionalität zwischen 0 V und 150 V und somit auch das Raumladungsgebiet wiederzufinden ist.

3.3 Bestimmung der Kathodentemperatur



Zunächst muss die Spannung wegen des Spannungsabfalls an dem Nanoamperemeter korrigiert werden. Dafür wird das Produkt aus der Anlaufspannung und dem Innenwiderstand von $R_j = 1 \text{ M}\Omega$ hinzuaddiert.

$$U = U_H + IR_j . \quad (7)$$

Zur Bestimmung der Temperatur wird mit Hilfe des Anlaufstroms eine lineare Regression durchgeführt. Die Gesetzmäßigkeit (1) wird hierfür logarithmiert.

$$\ln(I) = \frac{-e_0}{kT} V + \ln(c) \quad (8)$$

Diese Gleichung in Regressionsparameter überführt ergibt

$$y = mV + a . \quad (9)$$

Mittels Rechnung mit python lassen sich die Parameter zu

$$\begin{aligned} m &= -5,17 \pm 4,13 \\ a &= -14,62 \pm 2,33 \end{aligned}$$

Tabelle 2: Gemessene Anlaufströme bei variierten Gegenspannungen

U_G / V	I_A / nA
0	700
0,1	380
0,2	78
0,3	48
0,4	27
0,5	13,5
0,6	6
0,7	4
0,8	1
0,9	0
1	0

berechnen. Mit Hilfe der Beziehung

$$m = -\frac{e_0}{kT} \iff T = -\frac{e_0}{km} \quad (10)$$

kann die Temperatur zu

$$T = (2200 \pm 1800) \text{ K}$$

bestimmt werden.

3.4 Bestimmung der Austrittsarbeit mit der Leistungsbilanz

Die hierfür berechnete Temperatur wird mit Hilfe einer Leistungsbilanz (5) bestimmt. Daraus kann mit Hilfe der umgestellten Richardson Gleichung (4)

$$e_0\phi = kT \ln \left(\frac{4\pi f e_0 m_0 k^2 T^2}{I_S h^3} \right)$$

die Austrittsarbeit ermittelt werden. Dabei gilt $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$, $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ und $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$. In diesem Versuch wurde die Diode 1 verwendet, so dass die emittierende Kathodenfläche $f = 0,32 \text{ cm}^2$ beträgt. In Abschnitt 3.1 sind die verwendeten Sättigungsströme I_S aufgetragen. Die errechneten Austrittsarbeiten sind in der Tabelle 3 aufgetragen. Der Mittelwert der Austrittsarbeit ergibt sich zu

$$e_0\phi = (4,612 \pm 0,022) \text{ eV} .$$

Tabelle 3: Berechnete Temperaturen und Austrittsarbeit

U_H / V	I_H / A	T / K	I_S / mA	$e_0\phi / \text{eV}$
4,00	2,00	1924,11	0,11	4,62
4,10	2,10	1964,72	0,27	4,58
4,20	2,20	2004,18	0,63	4,53
4,70	2,30	2093,49	1,29	4,62
5,00	2,40	2154,28	2,5	4,64
5,30	2,50	2213,04	4	4,69

4 Diskussion

Eine zu beachtende errechnete Größe ist die Austrittsarbeit. Denn diese weicht vom Literaturwert[3]

$$e_0\phi_{\text{Lit}} = 4,54 \text{ eV} - 4,6 \text{ eV}$$

nicht stark ab. Das Verhältnis des errechneten Wertes und des Literaturwerts liegt bei

$$\eta = \frac{4,612 \text{ eV}}{4,57 \text{ eV}} \approx 101,58 \% ,$$

was einer Abweichung von ungefähr 1,58 % entspricht. Somit lässt sich sagen, dass die Austrittsarbeit von Wolfram relativ genau bestimmt werden konnte. Des Weiteren sind die beiden stark abweichenden Punkte in der Abbildung 6 auffällig. Diese beiden Ausreißer entstanden durch die Korrektur des Spannungsabfalls über das Nanoamperemeter. Eine mögliche Fehlerquelle könnte eine falsche Skalierung des Nanoamperemeters sein. Diese fließen wegen der Korrektur (7) stark in die Berechnung ein. Ein weiterer Grund könnte eine Störung bei dem Messvorgang an dem Nanoamperemeter sein, da dieses sehr empfindlich auf Bewegungen oder benachbarte Objekte reagierte.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V504, Thermische Elektronenemission*.
- [2] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [3] FH-Münster. *Austrittsarbeit*. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjomNzS7YDwAhUO_7sIHUkECFMQFjABegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fwww.fh-muenster.de%2Fciw%2Fdownloads%2Fpersonal%2Fjuestel%2Fjuestel%2Fchemie%2FAustrittsarbeit.pdf&usg=AOvVaw2lH52-1n4bngIoVR0ralq-.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.