

VERSUCH V504

Thermische Elektronenemission

Jannis Vornholt
jannis.vornholt@tu-dortmund.de

Alfredo Manente
alfredo.manente@tu-dortmund.de

Durchführung: 27.04.2021

Abgabe: 04.05.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	5
3	Messwerte	6
4	Auswertung	7
4.1	Kennlinie	7
4.2	Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes	7
4.3	Anlaufstromgebiet	7
4.4	Kathodentemperatur	9
4.5	Austrittsarbeit von Wolfram	9
5	Diskussion	12
	Literatur	13

1 Theorie

In diesem Versuch geht es um die thermische Elektronenemission. Die Zentrale zu untersuchende Größe ist hierbei die Austrittsarbeit, zudem werden verschiedenen Temperaturen bestimmt.

Da Metalle kristalline Festkörper sind, besitzen sie freie Elektronen, die sogenannten Leitungselektronen. Sie können sich im Metallgitter frei bewegen, jedoch nicht ohne weiteres austreten, da das Potential dieses Gitters von der Umgebung verschieden ist. Damit die Elektronen das Gitter verlassen können, müssen sie die Austrittsarbeit $e_0\zeta$ leisten. Wegen des Pauli-Verbots besitzen die Elektronen immer eine endliche Energie. Durch die Fermi-Diracsche Verteilungs-Funktion wird die Wahrscheinlichkeit beschrieben, dass ein Elektron bei gegebener Temperatur die Energie E besitzt. Für Teilchen die eine hohe Energie haben, also die Metalloberfläche verlassen können, kann man die Funktion zu Gleichung (2) nähern.

$$f(E) \approx \exp\left(\frac{\zeta - E}{kT}\right) \quad (1)$$

Die Richardson-Gleichung (??) beschreibt die Sättigungsstromdichte, also die Zahl der Elektronen, die pro Zeit und Fläche bei gegebener Temperatur aus dem Metall austreten.

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

Um den Sättigungsstrom messen zu können wird eine Hochvakuum-Diode benötigt, da die Elektronen ansonsten mit den Luftmolekülen um den Draht interagieren würden. Die Hochvakuum-Diode besteht im wesentlichen aus einem evakuierten Glaskörper, in dem sich eine Glühkathode und eine Anode befinden. Die Kathode kann durch einen Strom auf 1000 bis 3000K erhitzt werden. Die dann austretenden Elektronen werden durch ein elektrisches Feld abgesaugt, welches durch eine von außen angelegte Spannung zwischen Kathode und Anode erzeugt wird. Die abgesaugten Elektronen treffen dadurch auf der Anode auf, welche diese detektiert.

Im Gültigkeitsbereich der Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgleichung hängt der Anodenstrom nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch von der Anodenspannung. Dies liegt daran, dass die zwischen Kathode und Anode befindlichen Elektronen die Kathode zu einem gewissen Maße vom elektrischen Feld abschirmen. Dadurch erreicht das elektrische Feld nicht alle austretenden Elektronen. Dieser Effekt wird durch eine steigende Anodenspannung verringert. Dieser Effekt wird durch das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz beschrieben und ist in Gleichung (3) festgehalten.

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

Zu dem Sättigungsstromgebiet und dem Raumladungsgebiet kommt noch das Anlaufstromgebiet. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass trotz Gegenspannung ein Anodenstrom gemessen wird. Dies kommt zustande, da die Elektronen wie am Anfang beschrieben eine gewisse Energieverteilung besitzen. Wenn diese Elektronen nun aus dem Metall

austreten, jedoch nach der Bewältigung der Austrittsarbeit noch Energie übrig haben, spiegelt sich diese Energie als kinetische Energie wieder. Diese kinetische Energie kann sich nun durch eine Geschwindigkeit in Anodenrichtung ausdrücken und groß genug sein um eine gewisse Gegenspannung zu überwinden. Gleichung (4) beschreibt den in diesem Gebiet gemessenen Diodenstrom in Abhängigkeit der Gegenspannung V .

$$j(V) = \text{const} \exp\left(-\frac{e_0 V}{kT}\right) \quad (4)$$

Aus diesen drei Gebieten, ergibt sich nun die Kennlinie der Hochvakuum-Diode, welche in Abbildung 1 dargestellt ist. Das Anlaufstromgebiet liegt im Bereich $V < 0$ und ist durch ein exponentiellen Zusammenhang zwischen I und V gekennzeichnet. Danach kommt das Raumladungsgebiet, in welchem eine $\sqrt{V^3}$ -Abhängigkeit vorhanden ist. Zum Schluss, bei hohen Absaugspannungen kommt das Sättigungsstromgebiet, in dem nähert sich der gemessenen Strom asymptotisch dem Sättigungswert an.

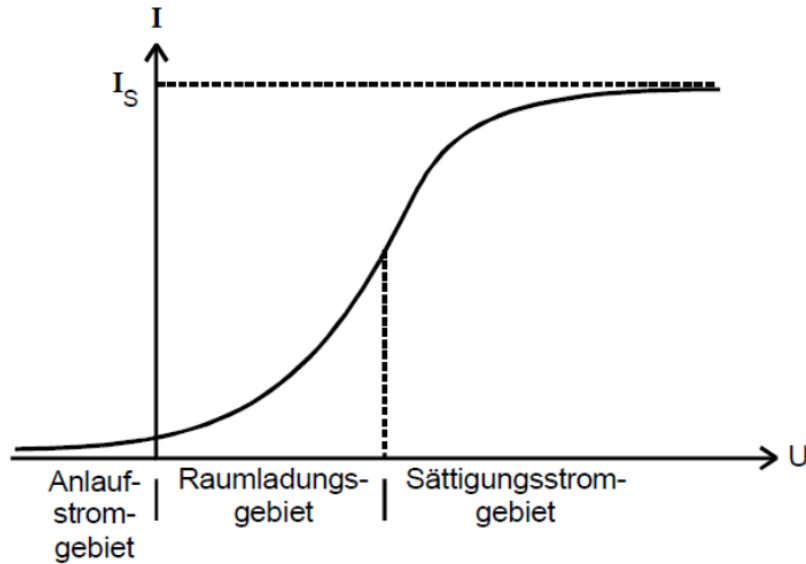


Abbildung 1: Kennlinie einer Hochvakuum-Diode

2 Durchführung

Die Diode wird wie in der Anleitung beschrieben angeschlossen. Anschließend wird der Heizstrom auf 2A gestellt und die Absaugspannung in 20V Schritten von 0V bis 240V und noch einmal auf 250V erhöht. Bei jedem dieser Schritte wird der gemessene Diodenstrom notiert. Dies wird für die Heizströme 2,1V, 2,2V, 2,3V und 2,4V wiederholt. Anschließend wurde die Diode gewechselt, da das μ -Amperemeter nicht ordentlich funktionierte. Nach dem Wechsel der Diode wird das dort stehende μ -Amperemeter angeschlossen und die Absaugspannung umgepolt. Die jetzt vorhandene Gegenspannung wird in 0,1V Schritten von 0V bis 1V erhöht und bei jedem Schritt der Diodenstrom notiert.

3 Messwerte

Tabelle 1: Kennlinienwerte einer Hochvakuumdiode

U_B [V]	$I_H = 2A$	$I_H = 2,1A$	$I_H = 2,2A$	$I_H = 2,3A$	$I_H = 2,4A$
	I [mA]				
0	0	0	0	0	0
20	0,110	0,130	0,110	0,130	0,220
40	0,160	0,273	0,460	0,600	0,728
60	0,170	0,293	0,599	0,930	1,194
80	0,173	0,300	0,631	1,100	1,628
100	0,175	0,302	0,643	1,178	1,915
120	0,177	0,306	0,601	1,206	2,11
140	0,179	0,311	0,608	1,223	2,21
160	0,180	0,320	0,616	1,236	2,27
180	0,181	0,328	0,621	1,245	2,30
200	0,182	0,330	0,625	1,257	2,32
220	0,183	0,332	0,629	1,272	2,33
240	0,184	0,334	0,633	1,279	2,35
250	0,184	0,335	0,638	1,283	2,35

Tabelle 2: Gegenspannung

U_B [V]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
I [μ A]	95	52	28	16	9	6	3	1,8	0,6	0	0

4 Auswertung

4.1 Kennlinie

Um die Kennlinienschar der Hochvakuumdiode zu erhalten, wird eine Ausgleichsrechnung für die gemessenen Ströme I in Abhängigkeit zur angelegten Absaugspannung U_B durchgeführt. Für diese Ausgleichsrechnung wird der Ansatz eines logistischen Wachstums gewählt:

$$I = \frac{A}{1 + e^{-U_B \cdot B + C}} + D \quad (5)$$

Daraus ergeben sich die Graphen in Abbildung 2, in der zudem die jeweiligen Messwerte eingetragen sind.

Für den Sättigungsstrom ergibt sich aus den Ausgleichsrechnungen Tabelle 3. Dafür wird I für $U_B \rightarrow \infty$ für besagten Ansatz gebildet, woraus sich für den Sättigungsstrom

$$I_S = A + D \quad (6)$$

ergibt.

Tabelle 3: Sättigungsströme

Messung	1	2	3	4	5
Sättigungsstrom [mA]	0,181	0,320	0,624	1,248	2,336

4.2 Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes

Laut Anleitung ist der Gültigkeitsbereich des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetz der Bereich des Raumladungsgebietes, also der Bereich in dem der Strom I in Abhängigkeit von U_B exponentiell steigt. Aus Abbildung 2 wird dieser Bereich des exponentiellen Anstiegs für Messung 5 (Die Messung mit der maximal mögliche Heizleistung), graphisch bestimmt und auf die ersten vier Messpunkte festgelegt. Der Exponent für diesen Bereich wird per Regression ermittelt und beträgt 1,397. Dies ist in 3 Graphisch dargestellt.

4.3 Anlaufstromgebiet

Die Temperatur der Kathode bei der Messung des Anlaufstromgebietes wird durch Gleichung (7) bestimmt.

$$j(V) = \text{const} \exp\left(-\frac{e_0 V}{kT}\right) \quad (7)$$

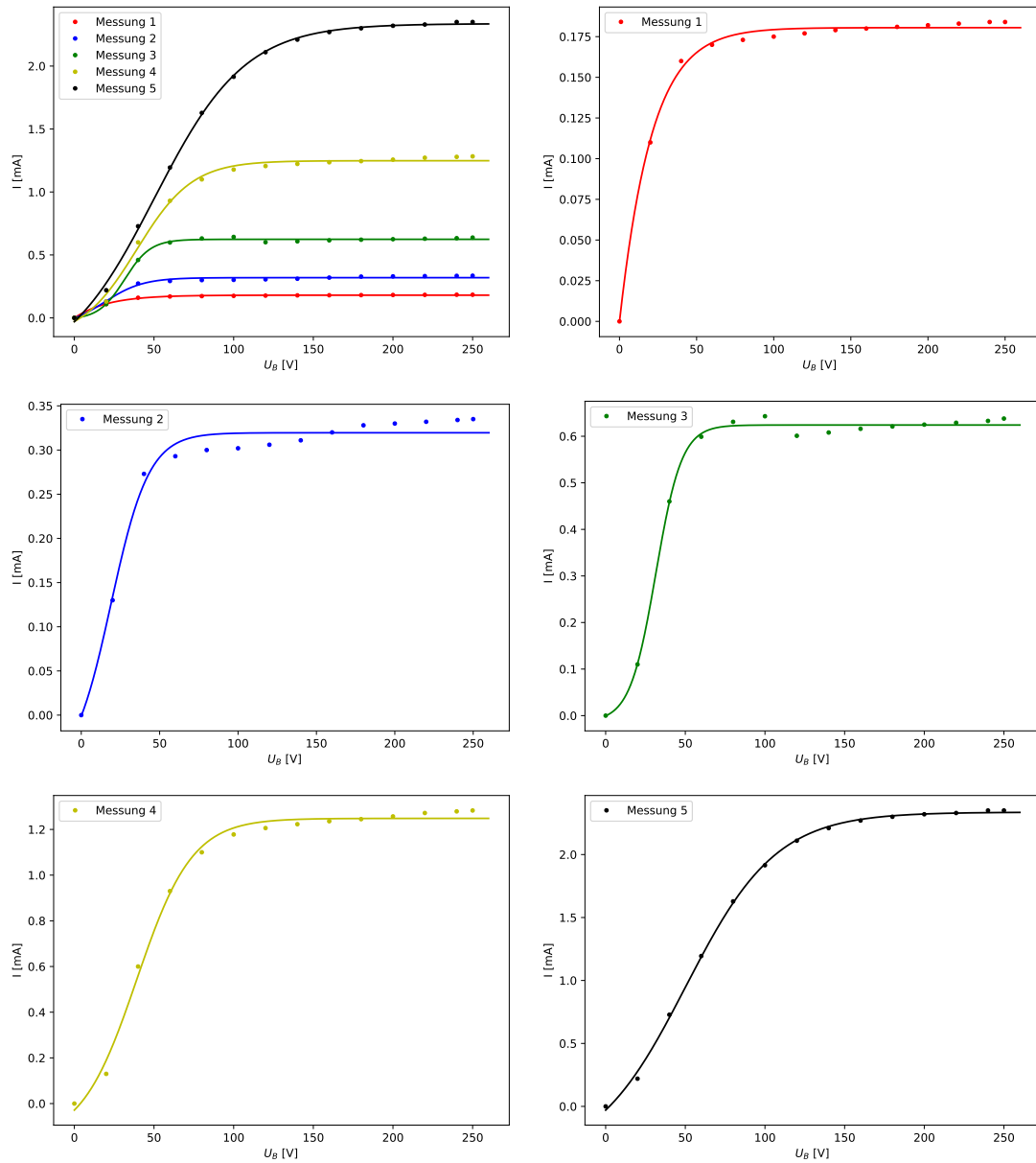


Abbildung 2: Kennlinien der Hochvakuumdiode

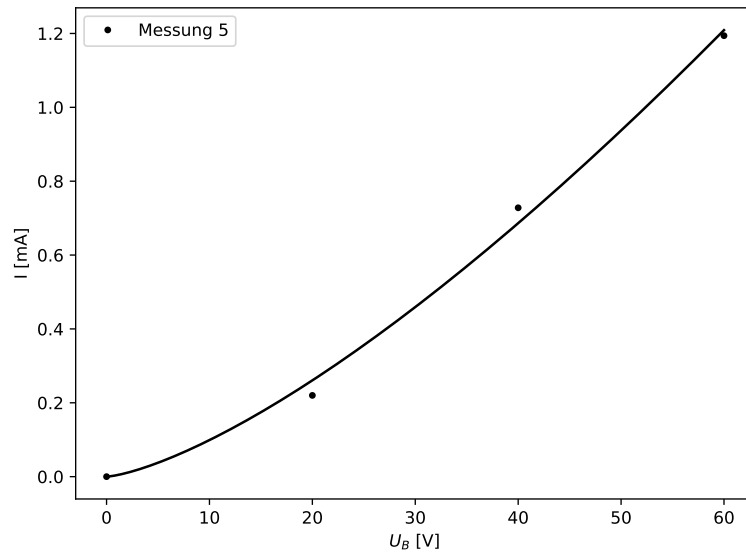


Abbildung 3: Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetz-Bereich vom Messung 5

Dafür wird besagte Gleichung als Ansatz für die Ausgleichsrechnung der gemessenen Ströme im Verhältnis zur Gegenspannung genutzt, woraus sich $T = 1945K$ ergibt. Abbildung 4 zeigt besagte Ausgleichskurve mit samt der Messwerte.

4.4 Kathodentemperatur

Um die Kathodentemperatur, bei den jeweiligen Messungen zur Kennlinie der Diode, zu bestimmen, wird Formel (8) benutzt.

$$T = \sqrt[4]{\frac{I_f \cdot U_f - N_{WL}}{f \cdot \eta \cdot \sigma}}. \quad (8)$$

In diese werden jeweils die Heizspannung U_f und der Heizstrom I_f der fünf Messungen eingesetzt und die restlichen Parameter aus der Anleitung übernommen. Daraus ergibt sich Tabelle 4.

Tabelle 4: Kathodentemperaturen der Messungen 1-5.

Messung	I [A]	U [V]	T [K]
1	2	5	2003
2	2,1	5	2031
3	2,2	5,5	2111
4	2,3	6	2188
5	2,4	6	2428

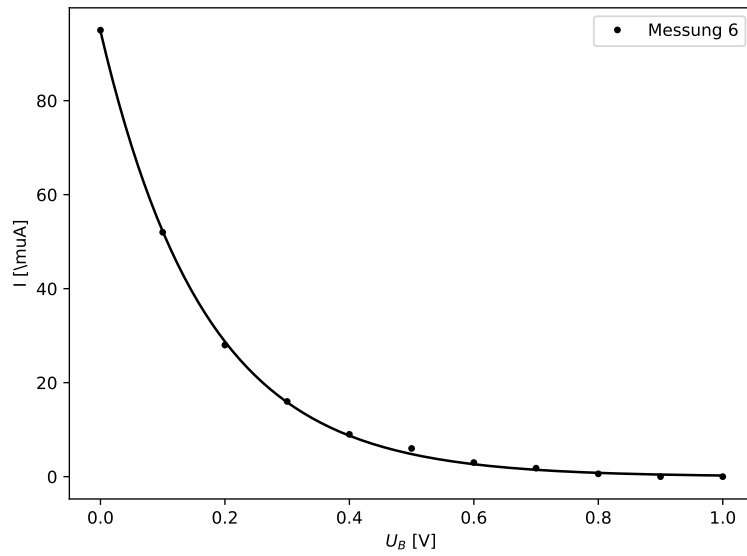


Abbildung 4: Anlaufstromgebiet der Diode für die maximale Heizleistung.

4.5 Austrittsarbeit von Wolfram

Durch umformen der Richardson-Gleichung und einsetzen von $j = I/f$ ergibt sich für die Austrittsarbeit Gleichung (9). In diese werden jeweils der Sättigungsstrom I_S und die bereits bestimmte Temperatur T eingesetzt, um die in Tabelle 5 aufgeführte Austrittsarbeit von Wolfram zu bestimmen.

$$\Phi = -\frac{kT}{e_0} \ln \left(\frac{I_S \cdot h^3}{4\pi f e_0 m_0 k^2 T^2} \right) \quad (9)$$

Tabelle 5: Austrittsarbeit von Wolfram.

Messung	T [K]	I_S [mA]	Φ [eV]
1	2003	0,181	5,16
2	2031	0,320	5,13
3	2111	0,624	5,23
4	2188	1,248	5,30
5	2428	2,336	5,79
Mittelwert			$5,32 \pm 0,11$

5 Diskussion

Der in Kapittel 4.2 bestimmte Exponent von 1,397 entspricht nahezu dem erwarteten Wert von $4/3$. Auch die im Abschnitt 4.3 bestimmte Kathodentemperatur ist im vorgegebenen weiten Spektrum von 1000K-3000K und somit zumindest in der richtigen Größenordnung. Ebenso die in 4.4 bestimmten Temperaturen. Bei diesen ist die zu erwartende Steigerung der Temperatur mit Erhöhung des Heizstroms gut sichtbar. Dies alles deutet auf gute Messergebnisse hin. Auch der Umstand, dass die Temperaturen von 4.3 und der fünften Messung aus 4.4 nicht, wie eigentlich zu erwarten, gleich sind, sondern 474K auseinander liegen, ist möglicherweise leicht durch den Umstand zu erklären, dass die Messungen nicht an der gleichen Hochvakuumdiode durchgeführt wurden. Lediglich die bestimmte Austrittsarbeit von Wolfram weicht stärker vom Erwarteten ab. Der gemessene Mittelwert liegt bei $5,32 \text{ eV} \pm 0,11 \text{ eV}$, wohingegen der Literaturwert [1] bei $4,54 \text{ eV}$ - $4,60 \text{ eV}$ liegt. Beide Werte haben die selbe Größenordnung, was nicht auf einen massiven Fehler hindeutet. Stattdessen kann der Fehler bei den vorherigen Rechnungen vermutet werden, da sowohl die Sättigungsströme als auch die Kathodentemperaturen keinen Vergleichswert haben. Auffällig ist, dass bei höherem Heizstrom die Austrittsarbeit von Wolfram immer weiter vom Literaturwert abweicht. Das zusammen mit der Graphik 2, bei der zu sehen ist, dass bei Messung 5 der Graph am Ende immernoch steig und nicht wie die anderen senkrecht zu verlaufen scheint, deutet darauf hin, dass dort bei den Messungen noch nicht der Sättigungsstrom erreicht wurde. Dadurch ist der bestimmte Sättigungsstrom ungenauer, als bei den Messungen bei denen der Sättigungsstrom schon erreicht wurde. Diese Ungenauigkeit beim Bestimmen des Sättigungsstromes könnte auch für Abweichung bei der Austrittsarbeit verantwortlich sein. Ebenso könnten die bestimmten Temperaturen ungenau sein, da die Spannungs und Strom Anzeige beim Heizspannungsgerät, nicht leicht genau abzulesen war. Insgesamt passen die Werte dennoch grob zu den erwarteten Werten.

Literatur

- [1] FH-Münster. *Austrittsarbeit*. 2021. URL: <https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/chemie/Austrittsarbeit.pdf> (besucht am 30.04.2021).
- [2] *Anleitung zu Versuch Nr. 504: Thermische Elektronenemission*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.
- [3] *Fehler Formeln*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.