

**v504**

# **Thermische Elektronenemissionen**

Justus Weber

justus.weber@tu-dortmund.de

Guy Lochny

guy.lochny@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.04.2025

Abgabe: 22.04.25

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Austrittsarbeit und Energieverteilung von Elektronen . . . . .	3
2.2 Sättigungsstromdichte der thermischen Elektronenemission . . . . .	4
2.3 Die Hochvakuum-Diode und Langmuir-Schottkysche Raumladungsgleichung	4
2.4 Kathodentemperatur . . . . .	5
2.5 Fehlerrechnung . . . . .	6
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1 Bestimmung der Kennlinien . . . . .	6
3.2 Das Anlaufstromgebiet . . . . .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1 Kennliene der Hochvakuumdiode und Sättigungsströme . . . . .	8
4.2 Langmuir-Schottky'sches Raumladungsgesetz . . . . .	11
4.3 Anlaufstromgebiet . . . . .	12
4.4 Kathodentemperatur . . . . .	14
4.5 Berechnung der Austrittsarbeit . . . . .	15
<b>5 Diskussion</b>	<b>15</b>
5.1 Kennlinienschar . . . . .	16
5.2 Langmuir-Schottky'sches Raumladungsgesetz . . . . .	16
5.3 Anlaufstromgebiet . . . . .	16
5.4 Kathodentemperatur . . . . .	16
5.5 Austrittsarbeit . . . . .	16
<b>6 Anhang</b>	<b>16</b>
<b>Literatur</b>	<b>21</b>

# 1 Zielsetzung

Unter der thermischen Elektronenemission versteht man den Effekt des Elektronenausgangs aus Metalloberflächen, wenn diese erhitzt werden. In diesem Versuch soll die Abhängigkeit des Elektronenstroms von der Temperatur der Metalloberfläche erforscht werden. Dazu wird eine Kennlinienschar erstellt, aus der der Sättigungsstrom abgelesen werden soll. Weiterhin soll herausgefunden werden, für welchen Bereich das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz Gültigkeit findet. Ebenso soll für die maximale Heizleistung das Anlaufstromgebiet untersucht werden und so die Kathodentemperatur ermittelt werden. Diese soll außerdem mittels einer Leistungsbilanz des Heizstromkreises herausgefunden werden. Aus den Werten für die Kathodentemperatur und den Sättigungsstrom soll zuletzt die Austrittsarbit von Wolfram herausgefunden werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Austrittsarbit und Energieverteilung von Elektronen

Metalle sind kristalline Festkörper. Sie bilden ein Gitter von ionisierten Atomen, welches von nahezu kräftefrei bewegten Elektronen eingehüllt wird. Kräftefrei ist es da im Inneren des Metalls das "Gitterpotential" nahezu konstant ist. Demnach können sich die Elektronen dort frei bewegen. Um Elektronen jedoch aus dem Metall zu emittieren, muss eine Austrittsarbit überwunden werden, da das Potential außerhalb des Metalls verschieden ist.

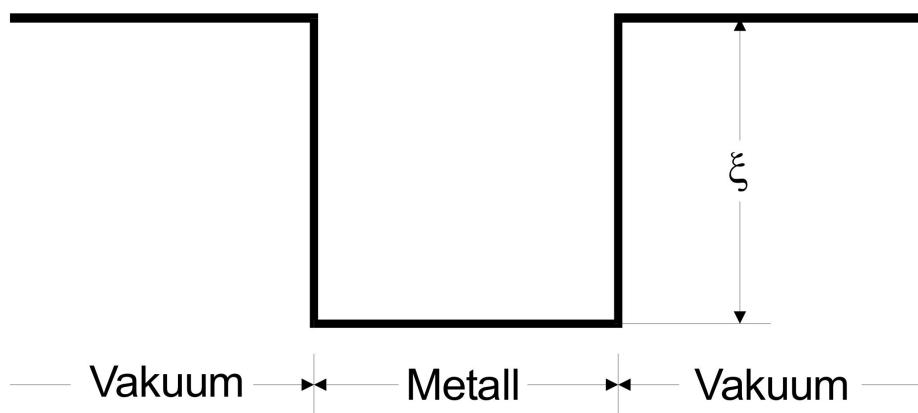


Abbildung 1: Potentialtopf-Modell eines Metalls. [2]

Anhand des Potentialtopfmodells lässt sich verdeutlichen, dass die Elektronen eine Austrittsarbit von  $e_0 \xi$  verrichten müssen. Elektronen unterliegen dem Pauli Prinzip: Das bedeutet, dass nur Elektronen mit entgegengesetzten Spinstellungen einen möglichen

Zustand besetzen können. Es gilt der Zusammenhang:

$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{\zeta - E}{k_b T} + 1}. \quad (1)$$

In Gleichung 1 ist die Fermi-Dirac Verteilungsfunktion mit der Fermi-Energie  $\zeta$  gegeben. Diese kann für eine hohe Energie  $\zeta$ , welche die Austrittsarbeit überwinden kann, genähert werden. Die Näherung ist in Gleichung 2 gegeben. Des Weiteren ist der Verlauf der Verteilungsfunktion in Abbildung 2 dargestellt

$$f(E) \approx \exp \left( \frac{\zeta - E}{k_b T} \right). \quad (2)$$

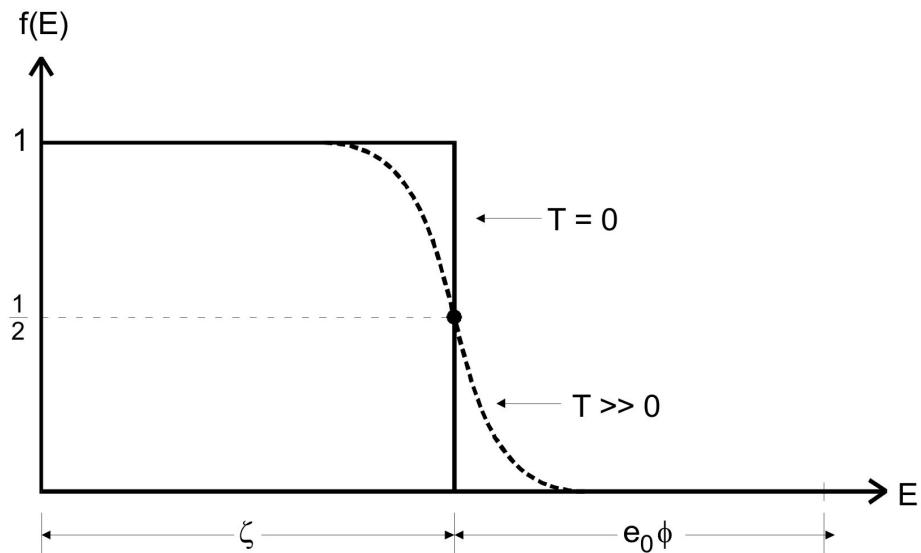


Abbildung 2: Fermi-Dirac Verteilung. [2]

## 2.2 Sättigungsstromdichte der thermischen Elektronenemission

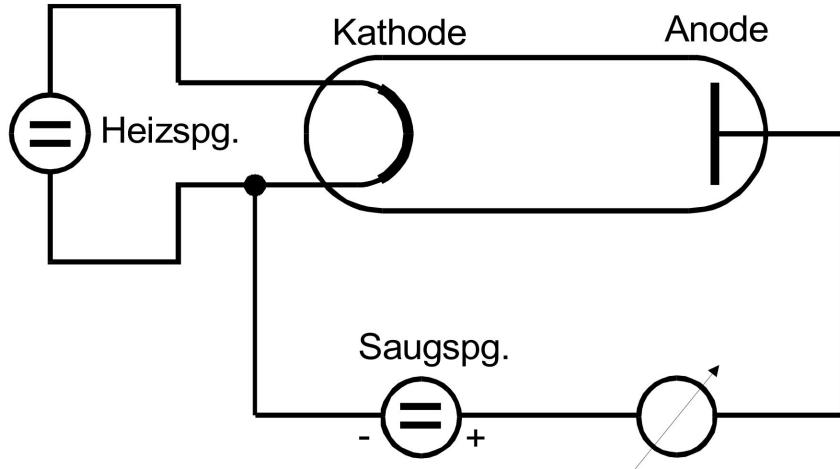
Aus Gleichung 2 lässt sich die Anzahl der pro Zeit austretenden Elektronen ableiten. Diese ist temperaturabhängig und wird durch die Richardson-Gleichung in Gleichung 3 beschrieben

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

## 2.3 Die Hochvakuum-Diode und Langmuir-Schottkysche Raumladungsgleichung

Um die austretenden Elektronen zu messen, muss das Metall in ein Vakuum gebracht werden. Damit werden Wechselwirkungen von Elektronen mit Gasmolekülen vorgebeugt.

Im Vakuum können sie durch ein angelegtes Spannungsfeld zu einer Anode abgesaugt werden. Es kommt eine Hochvakuumdiode wie in Abbildung 3 zum Einsatz.



**Abbildung 3:** Schaltung einer Hochvakuum-Diode. [2]

Durch das elektrische Feld der positiv geladenen Anode werden die Elektronen beschleunigt, wobei ihre Geschwindigkeit mit abnehmendem Abstand zur Anode zunimmt. Dadurch haben eine höhere Geschwindigkeit je näher sie der Anode kommen. Die Kontinuitätsbedingung der Stromdichte,

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

mit der Stromdichte  $j$  und der Raumladungsdichte  $\rho$ , führt nun zu einer unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen und damit auch zu einer Ladungsverteilung, welche von der Kathode hin zur Anode abnimmt. Durch die unterschiedliche Ladungsdichte wird die Kathode abgeschirmt. Folglich erreichen nicht mehr alle Feldlinien ausgehend von der Anode die Kathode. Damit ist der gemessene Diodenstrom kleiner als der erwartete Sättigungsstrom.

## 2.4 Kathodentemperatur

Die Kathodentemperaturen werden über die Leistungsbilanz ermittelt. Mit dem Energiesatz und den Identitäten für die zugeführte Leistung  $N_{zu}$  und dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz ( $N_W$ ), welches die Wärmestrahlung festlegt, ergibt sich:

$$\begin{aligned} N_{zu} &= N_W + N_{WL} \\ \Leftrightarrow U_H I_H &= f \eta \sigma T^4 + N_{WL} \\ \Leftrightarrow T &= \left( \frac{I_H U_H - N_{WL}}{f \eta \sigma} \right)^{1/4} \end{aligned}$$

## 2.5 Fehlerrechnung

Die gemessenen Werte unterliegen Messunsicherheiten und werden demnach im Folgenden nicht als fehlerfrei angesehen. Die Fehler entstehen bei der Bildung der Mittelwerte durch den Fehler des Mittelwerts und bei der Regressionsrechnung sowie der Fehlerfortpflanzung durch Python. Der Mittelwert ist definiert durch

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (5)$$

Der Fehler des Mittelwerts ist somit gegeben durch

$$\begin{aligned} \Delta\bar{x} &= \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Um Fehler einzubeziehen, wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung verwendet:

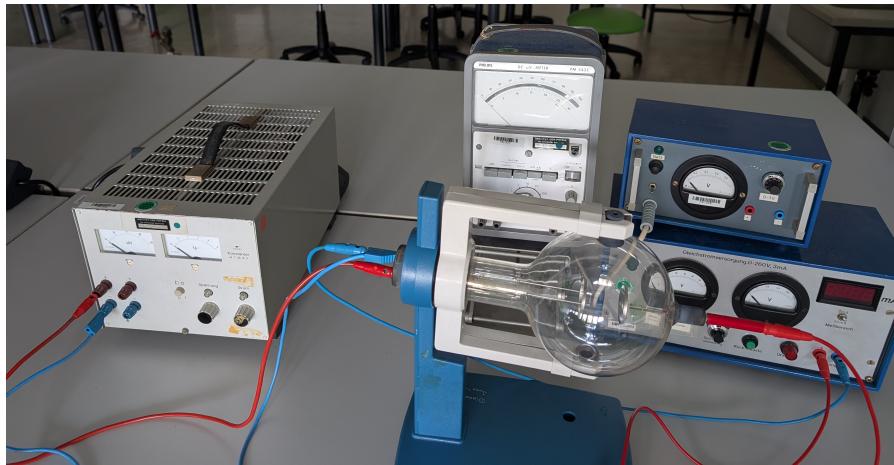
$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (7)$$

## 3 Durchführung

Die Versuchsdurchführung ist zweigeteilt. Zunächst erfolgt das Aufnehmen der Messwerte für eine Schar von fünf Kennlinien, mit dessen Hilfe die Sättigungsströme ermittelt und das Langmuir-Schottky'sche Raumladungsgesetz bestimmt werden kann.

### 3.1 Bestimmung der Kennlinien

Es soll eine Schar von fünf verschiedenen Kennlinien dargestellt werden, also für jeweils fünf verschiedene Heizspannungen. Die Schaltung wird gemäß Unterabschnitt 2.3 aufgebaut, welche auch in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Vakuum-Diode ist an einen Heizspannungs- und Stromgenerator angeschlossen. Wird dort eine Spannung eingestellt, beginnt die Kathode und damit das Wolfram zu glühen und es treten Elektronen aus. Zusätzlich wird an die Diode mit einer weiteren Spannungsquelle eine Spannung angelegt, die sogenannte „Absaugspannung“. Diese wird kontinuierlich in kleinen Schritten erhöht und jeweils gegen den gemessenen Absaugstrom aufgetragen.



**Abbildung 4:** Aufbau-Teil 1.

### 3.2 Das Anlaufstromgebiet

Um den Bereich des Anlaufstromgebiets festzulegen wird die in Abbildung 5 abgebildete Schaltung aufgebaut. Der Aufbau unterscheidet sich von der Schaltung in Unterabschnitt 3.1 dadurch, dass nun ein invertiertes Gegenfeld kleinerer Spannung ( $0 - 1V$ ) an die Vakuum Diode angeschlossen wird. Nun wird eine Heizspannung eingestellt und die Spannung des Gegenfeldes von  $0 - 1$  Volt in verschiedenen Schrittgrößen erhöht und der Anlaufstrom abgelesen.

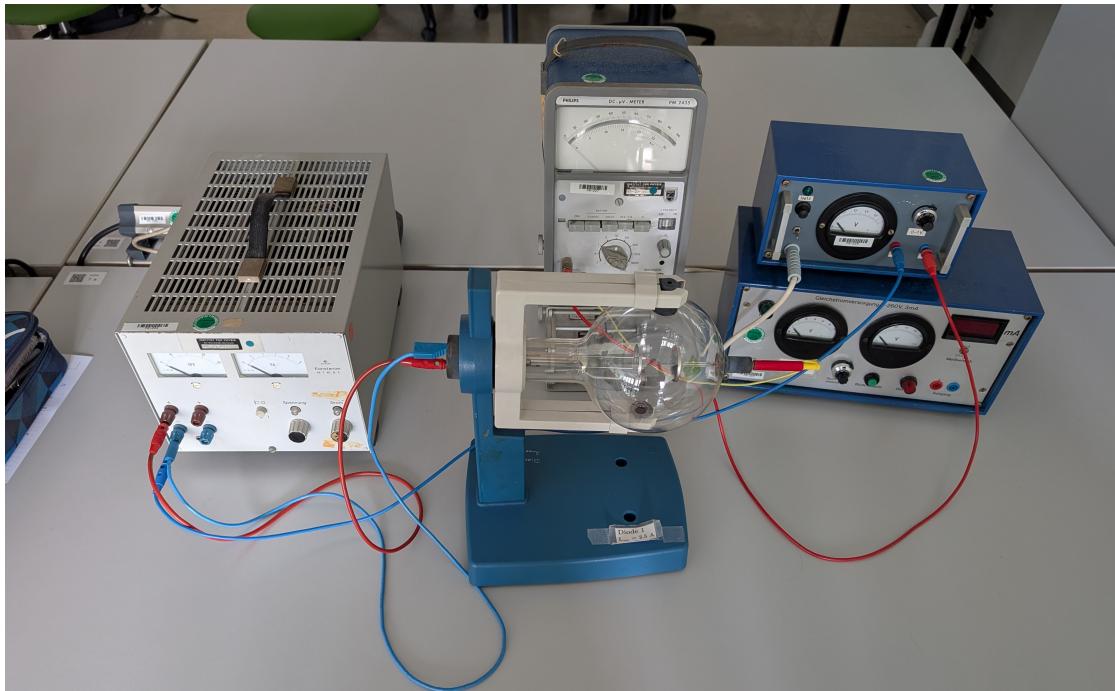


Abbildung 5: Aufbau-Teil 2.

## 4 Auswertung

### 4.1 Kennlinie der Hochvakuumdiode und Sättigungsströme

Die verschiedenen Werte für die Heizströme  $I_H$  und Saugspannungen  $U_S$  befinden sich in den Tabellen Tabelle 1 und Tabelle 2. Tabelle 1 stellt die Werte für die erste Messung bei einem Heizstrom von  $I_H = 1,8\text{A}$  dar. Die restlichen Messungen mit mehr Messdaten befinden sich in Tabelle 2.

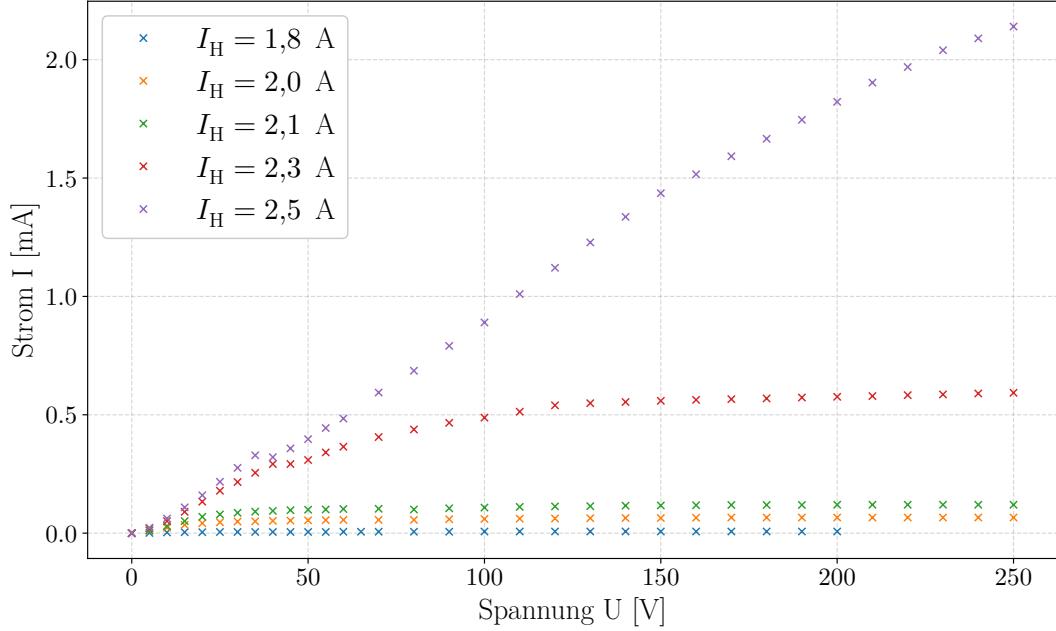
**Tabelle 1:** Messdaten für die Kennlinien.

$U_S/V$	$I_S/\text{mA}$
0	0,000
5	0,001
10	0,003
15	0,004
20	0,004
25	0,005
30	0,005
35	0,005
40	0,005
45	0,005
50	0,005
55	0,005
60	0,006
65	0,006
70	0,006
80	0,006
90	0,006
100	0,007

**Tabelle 2:** Messdaten für die Kennlinien.

	$I_H = 2,0 \text{ A}$	$I_H = 2,1 \text{ A}$	$I_H = 2,3 \text{ A}$	$I_H = 2,5 \text{ A}$
$U_S / \text{V}$	$I_S / \text{mA}$	$I_S / \text{mA}$	$I_S / \text{mA}$	$I_S / \text{mA}$
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.010	0.012	0.020	0.023
10	0.023	0.030	0.051	0.062
15	0.035	0.051	0.090	0.109
20	0.042	0.069	0.133	0.160
25	0.046	0.079	0.179	0.217
30	0.049	0.086	0.216	0.276
35	0.050	0.091	0.255	0.329
40	0.052	0.094	0.292	0.321
45	0.053	0.097	0.292	0.358
50	0.054	0.099	0.309	0.397
55	0.055	0.100	0.341	0.444
60	0.056	0.102	0.365	0.484
70	0.056	0.103	0.406	0.594
80	0.056	0.100	0.438	0.686
90	0.059	0.105	0.466	0.791
100	0.060	0.108	0.488	0.890
110	0.061	0.111	0.513	1.010
120	0.062	0.113	0.540	1.121
130	0.063	0.114	0.549	1.228
140	0.064	0.116	0.554	1.336
150	0.064	0.117	0.559	1.436
160	0.065	0.118	0.563	1.516
170	0.066	0.119	0.566	1.592
180	0.066	0.119	0.569	1.666
190	0.066	0.119	0.573	1.746
200	0.066	0.120	0.576	1.822
210	0.066	0.120	0.579	1.903
220	0.066	0.120	0.583	1.969
230	0.066	0.120	0.586	2.040
240	0.066	0.120	0.590	2.090
250	0.066	0.120	0.593	2.140

In Abbildung 6 ist die Saugspannung gegen den detektierten Strom aufgetragen. Dabei ist das sigmoidale Wachstum einigermaßen erkennbar, vor Allem jedoch bei den höheren Heizspannungen fällt es einfacher, den Verlauf zu identifizieren. Mithilfe dieser Daten lassen sich die unterschiedlichen Sättigungsströme ablesen, diese lauten wie folgt:



**Abbildung 6:** Kennlinien bei unterschiedlichen Heizströmen.

**Tabelle 3:** Ermittelte Sättigungsströme.

$I/V$	$I_S/\text{mA}$
1,8	0,007
2,0	0,066
2,1	0,120
2,3	0,593
2,5	2,140

## 4.2 Langmuir-Schottky'sches Raumladungsgesetz

In dieser Sektion soll der Gültigkeitsbereich des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes bestimmt werden. Dafür essentiell ist die Strom-Spannungs- Beziehung mit der Form

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{2 \frac{e_0}{m_0} \frac{U^b}{a^2}} \quad (8)$$

Die nicht-lineare Regeression dazu wird in Python mithilfe eines Curve fits erstellt und verfügt über die Form:  $a \cdot U^b$ . Um mit der Theorie übereinzustimmen, sollte  $b$  dem Wert  $\frac{3}{2}$  möglichst nahe kommen. Nach Einsetzen der Parameter und Erstellung des Fits ergeben sich die Parameter zu:

$$a = 0.001 \pm 0.007$$

$$b = 1.4 \pm 1.8$$

Die Kurve ist in Abbildung 7 dargestellt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnten keine verwertbaren eignen Messwerte für diesen Teil verwendet werden. Daher wurden die Messdaten des Tutors zur Verfügung gestellt, um eine vernünftige Auswertung zu ermöglichen.

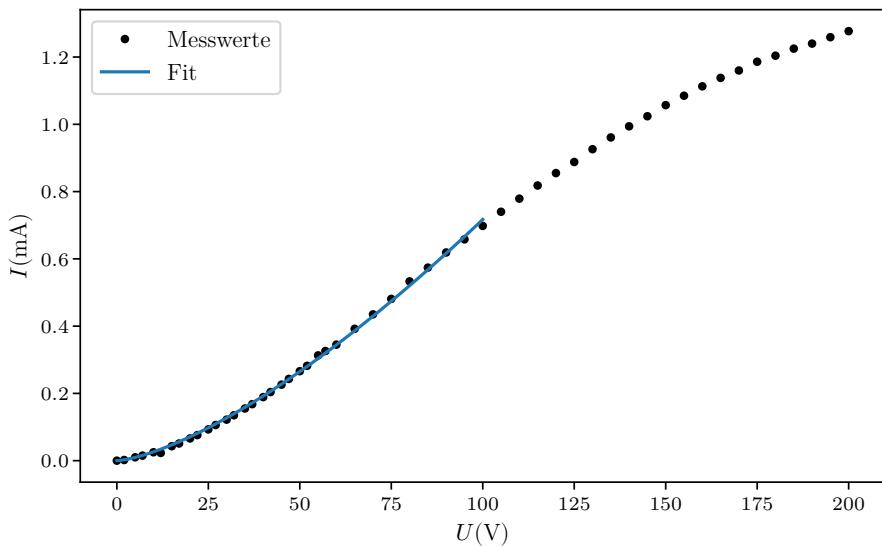


Abbildung 7: Langmuir-Schottky.

Der Wendepunkt der Messwerte ist bei etwa 100V abzulesen. Demzufolge findet die Raumladungsgleichung im Intervall [0,100] Anwendung.

### 4.3 Anlaufstromgebiet

In Tabelle 4 ist einerseits die Spannung des Gleichstromspannungsgeräts und andererseits die detektierte Spannung am Ampermeter dargelegt. Die dazugehörige Heizstromstärke und Heizspannung betragen  $I_H = 5\text{V}$  und  $U_H = 2.5\text{A}$ .

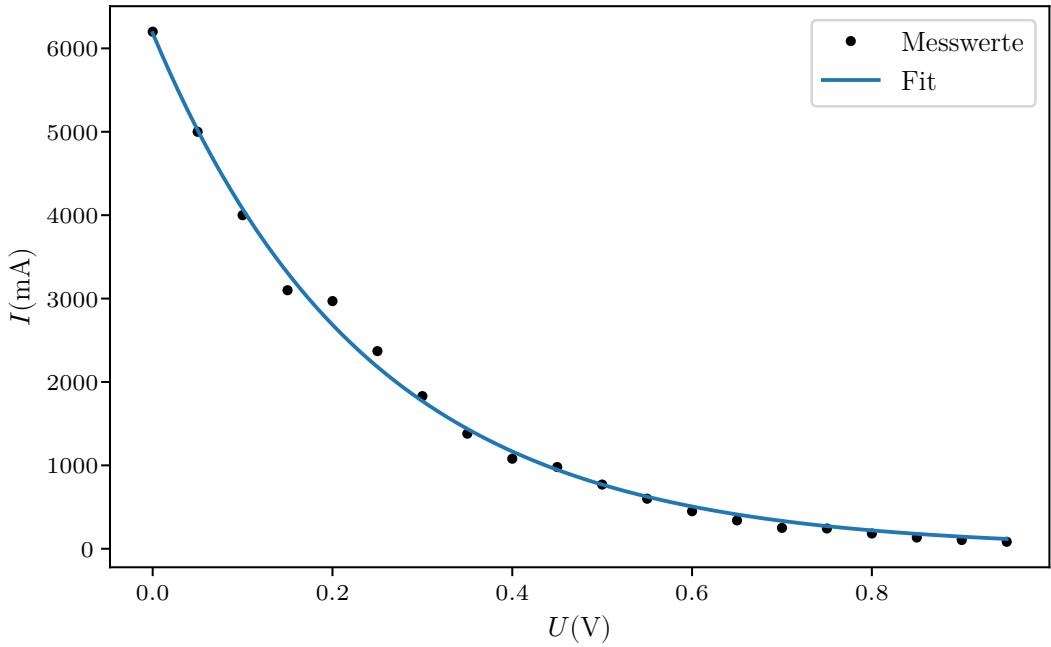
**Tabelle 4:** Anlaufstromgebiet-Messwerte.

$U/V$	$I/A$
84	0,95
105	0,90
135	0,85
183	0,80
243	0,75
250	0,70
340	0,65
450	0,60
600	0,55
770	0,50
980	0,45
1080	0,40
1380	0,35
1830	0,30
2370	0,25
2970	0,20
3100	0,15
4000	0,10
5000	0,05
6200	0,00

Mithilfe dieser Werte kann eine Ausgleichsrechnung der Form

$$I = a \cdot e^{\left(-\frac{e_0 U}{k_B b}\right)} \quad (9)$$

erstellt werden. Mit den eingesetzten Werten ergibt sich folgender Fit:



**Abbildung 8:** Anlaustromgebiet-Regression.

Die Fitparameter ergeben sich zu

$$a = (6.183 \pm 0.8) \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$b = (2782.9 \pm 0.5) \text{ K}$$

Die gesuchte Temperatur entspricht dem Parameter  $b = (2782.9 \pm 0.5) \text{ K}$ .

#### 4.4 Kathodentemperatur

Wie in Unterabschnitt 2.4 hergeleitet, gilt für die Kathodentemperatur der Zusammenhang:

$$T = \left( \frac{I_H U_H - N_{WL}}{f \eta \sigma} \right)^{1/4}$$

$I_H$  und  $U_H$  sind die Heizspannungen (deren Werte können Tabelle 5 entnommen werden),  $N_{WL}$  ist die Wärmeleistung mit einem Wert von  $N_{WL} = 0.95 \text{ W}$ .  $f$  ist die Kathodenoberfläche, welche durch  $3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  gegeben ist. Der Wert  $\eta$  ist der Emissionsgrad der Oberfläche und beträgt  $\eta = 0.28$ . Das  $\sigma$  steht für die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante, diese beläuft sich auf:  $\sigma = 5.7 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{K}^4}$ . Mit allen eingesetzten Werten ergeben sich die folgenden Temperaturen:

**Tabelle 5:** Ermittelte Sättigungsströme.

$I_H/A$	$U_H/V$	$T/K$
1,8	3	1680,021
2,0	4	1884,829
2,1	4	1911,014
2,3	5	2084,673
2,5	5	2132,408

#### 4.5 Berechnung der Austrittsarbeit

Die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials wird mithilfe von Gleichung 3 errechnet. Da diese  $W_A = e_0\Phi$  ist, ergibt sich diese mit Abkürzung der spezifischen Stromdichte als  $j_S = \frac{I_S}{f}$  als:

$$W_A = -Tk_B \ln \left( \frac{j_S h^3}{4\pi e_0 m_0 k_B^2 T^2} \right)$$

Die Austrittsarbeit aus dem Wolfram zu allen Kennlinien befindet sich in Tabelle Tabelle 6

**Tabelle 6:** Ermittelte Sättigungsströme.

Kennlinie	$W_A/eV$
1	5,541
2	5,901
3	5,892
4	6,181
5	6,103

Durch diese Werte kann der Mittelwert und ebenso der Fehler dessen ermittelt werden. Letztendlich beläuft sich die Austrittsarbeit auf

$$\overline{W_A} = 5.9236 \pm 0.1110 \text{ eV.}$$

### 5 Diskussion

Zunächst ist festzuhalten, dass sich das Experiment sehr leicht durch äußere Einflüsse beeinflussen lässt. Es handelt sich um einen systematischen Fehler: Laptops oder andere technische Geräte sowie sogar das körpereigene Magnetfeld beeinflussen die Messungen, wodurch sich einige schwankenden Werte besser erklären lassen.

## 5.1 Kennlinienschar

Wie erwartet steigt der Sättigungsstrom proportional zum Heizstrom. Folglich ähnelt die Kennlinienschar der theoretischen Kennlinie. Trotzdessen sind die Messwerte nicht exakt, wie erhofft. Eine Abflachung ist lediglich bei einer Kennlinie wirklich gut zu erkennen. Jenes wird vor Allem im folgenden Absatz zu einem Verhängnis.

## 5.2 Langmuir-Schottky'sches Raumladungsgesetz

In diesem Bereich sollte geprüft werden, in welchem Bereich das Langmuir-Schottky'sches Raumladungsgesetz Gültigkeit beweist. Jenes ist im Intervall von 0 bis 100 V der Fall. Dabei ist jedoch anzumerken, dass für den Fit des Graphen andere Messwerte genutzt werden mussten. Die eigenen experimentell ermittelten Werte führten zu keinem sinnvoll verwertbaren Ergebnis, weshalb die Messwerte des Tutoren zugezogen wurden. Ziel war es, bei dem Fit der Form  $a \cdot U^b$  den Parameter  $b$  als  $3/2$  zu bestimmen, was auch gelang; mithilfe des Fits ergaben die Messwerte einen Parameter von  $b = 1.4 \pm 1.8$ . Abgesehen vom verhältnismäßig sehr großen Fehler handelt es sich um eine Abweichung von  $6.67\%$ .

## 5.3 Anlaufstromgebiet

Die berechnete Temperatur der Kathode beläuft sich auf  $T = 2782.9 \pm 0.5\text{K}$ . Jenes steht nicht ganz im Einklang mit den Werten zur ermittelten Temperatur aus Unterabschnitt 4.4. Allerdings lässt sich positiv festhalten, dass der Verlauf der Regression exponentiell abnimmt und die Abweichungen der Werte sehr minimal sind. Demnach ist die Richardson-Gleichung bestätigt und der Versuch kann als Erfolg gerwertet werden.

## 5.4 Kathodentemperatur

Die errechneten Werte passen zur Theorie. Mit steigendem Heizstrom und steigender Heizspannung erhöht sich ebenso die Temperatur der Kathode. Auch dieser Wert ist fehlerbehaftet. Jedoch kann nichts mit Literaturwerten sondergleichen verglichen werden, somit ist keine Aussage über die Genauigkeiten der Messwerte zu treffen. Es lässt sich jedoch vermuten, dass es zu Verlusteffekten innerhalb der Apparatur kam.

## 5.5 Austrittsarbeit

Die errechnete Austrittsarbeit von Wolfram beträgt  $\overline{W_A} = 5.9236 \pm 0.1110\text{ eV}$ . Ausgehend von einem Literaturwert von  $\overline{W_{A,Lit}} = 4.55\text{ eV}$  [1] entspricht das einer Abweichung von  $23.189\%$ . Diese Abweichung ist mit den fehlerbehafteten Temperaturen zu erklären. Da diese dem systematischen Fehler unterliegen, zieht sich dieser in der Rechnung zur Bestimmung der Austrittsarbeit fort.

# 6 Anhang

Abbildung 9: Messwerte (1).

V504 - Thermische Elektromagnetik		
Spannung (V)	Strom (mA)	
3	0	
5	0,001	
10	0,003	
15	0,004	
20	0,004	
25	0,005	
30	0,005	
35	0,005	
40	0,005	
45	0,005	
50	0,005	
55	0,005	
60	0,006	
65	0,006	
70	0,006	
75	0,006	
80	0,006	
90	0,006	
100	0,007	
110	0,007	
120	.	
130	.	
140	.	
150	.	
160	.	
200	0,007	

Heizstrom

Max. Ral

Abbildung 10: Messwerte (2).

U Gegen- spannung	Hilfstrom (A):	Hilfspannung		
		1 mV	2,5 mV	5 mV
0	2.0	0,1	2,3	2,5
5		0	0	0
10	0,010	0,012	0,020	0,023
15	0,023	0,030	0,057	0,062
20	0,035	0,051	0,100	0,109
25	0,042	0,069	0,133	0,160
30	0,046	0,079	0,175	0,217
35	0,049	0,086	0,216	0,276
40	0,050	0,087	0,255	0,329
45	0,052	0,094	0,292	0,321
50	0,053	0,097	0,292	0,358
55	0,054	0,099	0,309	0,397
60	0,055	0,100	0,341	0,444
70	0,056	0,102	0,365	0,484
80	0,056	0,103	0,406	0,594
90	0,056	0,100	0,438	0,686
100	0,059	0,105	0,466	0,791
110	0,060	0,108	0,488	0,890
120	0,061	0,111	0,513	0,910
130	0,062	0,113	0,540	0,912
140	0,063	0,114	0,549	0,928
150	0,064	0,116	0,554	0,936
160	0,064	0,117	0,559	0,946
170	0,065	0,118	0,563	0,956
180	0,066	0,119	0,566	0,962
190	0,066	0,119	0,569	0,966
200	0,066	0,119	0,573	0,974
	0,066	0,120	0,576	0,982
Angaben des detektierten Gegenstroms in mA				
210		0,120	0,579	0,1,203
220		0,120	0,583	0,1,169
230		0,120	0,586	0,1,040
240		0,120	0,590	0,1,030
250		0,120	0,593	0,1,140

*Max Röde*

Abbildung 11: Messwerte (3).

Heizspannung: 5V Heizstrom: 2,5A		
Faktor	Amperelektro (mA)	Gleichstromspannungsgegen (V)
x3	28	0,15 0,25
	55	0 0,32
	45	0,5 0,85
	61	0 0,80
	41	0,5 0,25
x10	25	0 0,20
	34	0,5 0,65
	45	0 0,60
	60	0,5 0,55
	77	0 0,50
	98	0,5 0,45
x20	36	0 0,40
	46	0,5 0,35
	61	0 0,30
	79	0,5 0,25
	99	0 0,20
x100	37	0,5 0,15
	40	0 0,10
	50	0,5 0,05
	62	0 0

Max. Rehm

**Abbildung 12:** Messwerte (3).

	Auperemeter (n4)	Gleichstromspannungsgeät (V)
x3	28 35 45 61 81	9,5 0,95 9 0,99 8,5 0,85 8 0,80 7,5 0,75
x10	25 34 45 60 77 98	7 0,70 6,5 0,65 6 0,60 5,5 0,55 5 0,50 4,5 0,45
x30	36 46 61 79 99	4 0,40 3,5 0,35 3 0,30 2,5 0,25 2 0,20
x100	37 40 50 62	1,5 0,15 1 0,10 0,5 0,05 0 0

Max. Rehm

## Literatur

- [1] FH Münster. *Kirchhoffsche Regeln*. Abgerufen am 22. April 2025. 2025. URL: <https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/chemie/Austrittsarbeits.pdf> (besucht am 22.04.2025).
- [2] V504: *Thermische Elektronenemissionen*. TU Dortmund. 2025.