

V504

# Thermische Elektronenemission

Amelie Hater  
amelie.hater@tu-dortmund.de

Ngoc Le  
ngoc.le@tu-dortmund.de

Durchführung: 04.06.2024

Abgabe: 11.06.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Sättigungsstromdichte . . . . .	3
2.2 Hochvakuum-Diode . . . . .	4
2.3 Kennlinie der Hochvakuum-Diode . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1 Kennlinienschar einer Hochvakuum-Diode . . . . .	5
3.2 Bestimmung des Anlaufstromgebiets . . . . .	6
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes . . . . .	8
4.2 Bestimmung der Kathodentemperatur . . . . .	8
4.3 Bestimmung der Kathodentemperaturen und Austrittsarbeit von Wolfram	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>Literatur</b>	<b>11</b>
<b>Anhang</b>	<b>12</b>
Messdaten . . . . .	12
Originaldaten . . . . .	16

# 1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Versuchs ist die Austrittsarbeit von Wolfram zu bestimmen. Hierfür werden verschiedene Kennlinien einer Hochvakuum-Diode und das Anlaufstromgebiet der Diode aufgenommen und untersucht.

## 2 Theorie

Metalle sind meistens kristalline Festkörper mit einer guten elektrischen Leitfähigkeit, da die Atome ionisiert sind. Daher bilden die Ionen ein räumlich periodisches Gitter, welche von freigesetzten Elektronen eingehüllt sind. Das Gitterpotential wird in grober Näherung als konstant betrachtet. Somit stellt das Metallinnere ein Gebiet mit positiven Potential dar, was vom Betrag des Potentials im Außenraum unterschiedlich ist.

Damit ein Elektron das Metall verlassen kann, muss ein Elektron gegen das Potential mithilfe einer Austrittsarbeit anlaufen. Laut der Quantentheorie können Elektronen nur diskrete dicht beieinanderliegende Energiewerte annehmen. Zusätzlich unterliegen die Elektronen eines Kristallgitters dem Pauli-Verbot, da diese Teilchen mit halbzahligen Spin sind. Das Pauli-Verbot sagt aus, dass jeder mögliche Zustand mit der Energie  $E$  von höchstens zwei Elektronen eingenommen werden kann. Hierbei müssen die beiden Elektronen entgegengesetzte Spins besitzen. Dadurch weisen die Elektronen beim absoluten Nullpunkt eine endliche Energie auf, wobei die Fermische Grenzenergie  $\xi$  nicht überschritten wird. Diese ist abhängig von der Zahl  $n$  der Elektronen pro Volumeneinheit im Metall.

Bei Zimmertemperatur gilt für alle Metalle  $\xi \gg k_B T$ . Durch die Fermi-Diracsche Verteilungsfunktion wird die Wahrscheinlichkeit angegeben, dass im thermischen Gleichgewicht ein möglicher Zustand mit der Energie  $E$  besetzt ist. Daraus lässt sich erschließen, dass ein Elektron mindestens die Energie  $\xi + e_0 \phi$  besitzen muss, um die Metalloberfläche zu verlassen. Für Elektronen mit hoher Energie, lässt sich diese Wahrscheinlichkeit mit

$$f(E) \approx \exp\left(\frac{\xi - E}{k_B T}\right) \quad (1)$$

nähern, da diese Elektronen die Metalloberfläche spontan verlassen können.

### 2.1 Sättigungsstromdichte

Die Sättigungsstromdichte  $j_S$  beschreibt, die Zahl der Elektronen, welche pro Zeit- und Flächeneinheit aus einer Metalloberfläche austreten. Dies wird durch die Richardson Gleichung

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

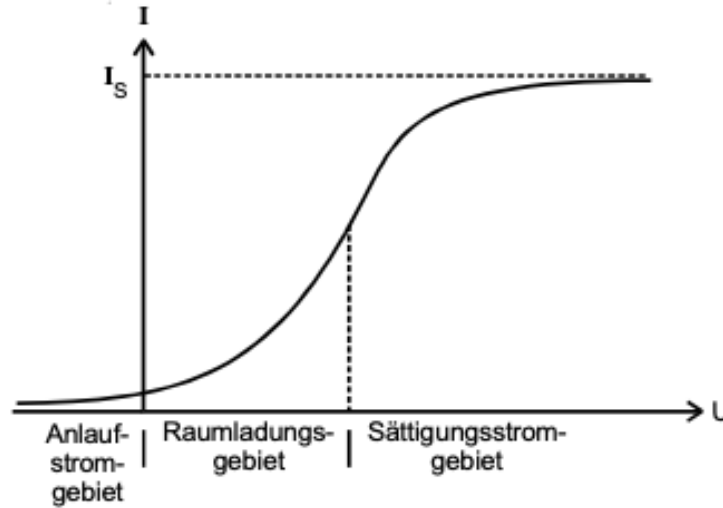
beschrieben.

## 2.2 Hochvakuum-Diode

Für die Messung des Sättigungsstromes einer emittierenden Metalloberfläche wird eine Hochvakuum-Diode verwendet. Das Hochvakuum vermeidet die Wechselwirkungen zwischen den freien Elektronen und den Gasmolekülen. Zusätzlich sorgt die Hochvakuum-Diode dafür, dass ein elektrisches Feld existiert, welches die austretenden Elektronen absaugt. Die Diode besteht aus einem evakuiertem Glaskörper. In diesem Glaskörper ist ein Draht eingeschmolzen, der durch Strom auf  $1000 - 3000 \text{ K}$  erhitzt werden kann. Demzufolge treten Elektronen aus, die durch das elektrische Feld abgesaugt werden.

## 2.3 Kennlinie der Hochvakuum-Diode

Die Kennlinie einer Hochvakuum-Diode ist in Abbildung 1 zu erkennen. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen der Stromdichte  $j$  bzw. dem Anodenstrom  $I_A$  und dem von außen angelegten Potential einer Hochvakuumdiode.



**Abbildung 1:** Kennlinie einer Hochvakuum-Diode Q[1].

Das Anlaufstromgebiet ist durch einen exponentiellen Zusammenhang von dem Strom  $I$  und des Potentials  $V$  beschrieben. Dieser lautet

$$j(V) = j_0 \exp\left(-\frac{e_0 \phi_A + e_0 V}{k_B T}\right) = \text{const} \exp\left(-\frac{e_0 V}{k_B T}\right). \quad (3)$$

Der Anlaufstrom bezeichnet den geringen Strom, gegen welche die Elektronen beim Verlassen der Kathode anlaufen können. Dies ist möglich, da die Energie dieser Elektronen größer als die Austrittsarbeit  $\phi_A$  ist. Das Raumladungsgebiet wird durch das Langmuir-Schottkyschen-Raumladungsgesetz

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{2 \frac{e_0}{m_0}} \frac{V^{3/2}}{a^2} \quad (4)$$

beschrieben. In dem Raumladungsgebiet werden nicht alle emittierten Elektronen vom Anodenfeld erfasst, wodurch der gemessene Diodenstrom kleiner als der Sättigungsstrom ist. Hierbei ist die Geschwindigkeit der Elektronen nicht konstant und die Raumladungsdichte  $\rho$  der Elektronen nimmt zur Anode hin ab. Da die Raumladungsdichte den Verlauf der Feldstärke zwischen der Anode und Kathode beschreibt, reichen die Feldlinien, die von der Anode ausgehen, nicht mehr vollständig bis zur Kathode. Zuletzt ist in der Kennlinie der Sättigungsstromgebiet gekennzeichnet, der in 2.1 erläutert wird. Mithilfe von Ausschnitten der Kennlinie können die Kathodentemperatur  $T$  sowie die Austrittsarbeit der Kathode bestimmt werden.

Die Kathodentemperatur kann mithilfe aus der Leistungsbilanz des Heizstromfadens berechnet werden. Hier lautet die zugeführte Leistung lautet  $N_{\text{zu}} = V_{\text{f}} I_{\text{f}}$ . Diese wird über Wärmestrahlung und Wärmeleitung der Fadenhalterung wieder abgegeben. Hier kann für die Wärmeleitung zu  $N_{\text{WL}} = 0,9 - 1 \text{ W}$  abgeschätzt werden. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz ergibt sich für die Strahlungsleistung  $N_{\text{W}} = f \eta \sigma T^4$ , wobei  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{K}^4$  gilt.  $f$  ist die emittierende Kathodenoberfläche und  $\eta = 0,28$  der Emissionsgrad der Oberfläche. Aus dem Energiesatz ergibt sich

$$I_{\text{f}} U_{\text{f}} = f \eta \sigma T^4 + N_{\text{WL}}. \quad (5)$$

### 3 Durchführung

#### 3.1 Kennlinienschar einer Hochvakuum-Diode

Im ersten Teil der Durchführung wird eine Kennlinienschar einer Hochvakuum-Diode erstellt. Hierfür wird die Schaltung in Abbildung 2 ohne einen XY-Schreiber verwendet. Dabei wird die Heizleistung fünf mal im Bereich von  $1,8 \text{ A} - 2,4 \text{ A}$  variiert. Für jede Heizleistung wird schrittweise die Anodenspannung erhöht und der zugehörige Anodenstrom notiert. Damit wird anschließend für jede Heizleistung eine Kennlinie erstellt und die jeweiligen Sättigungsströme  $I_{\text{S}}$  bestimmt.

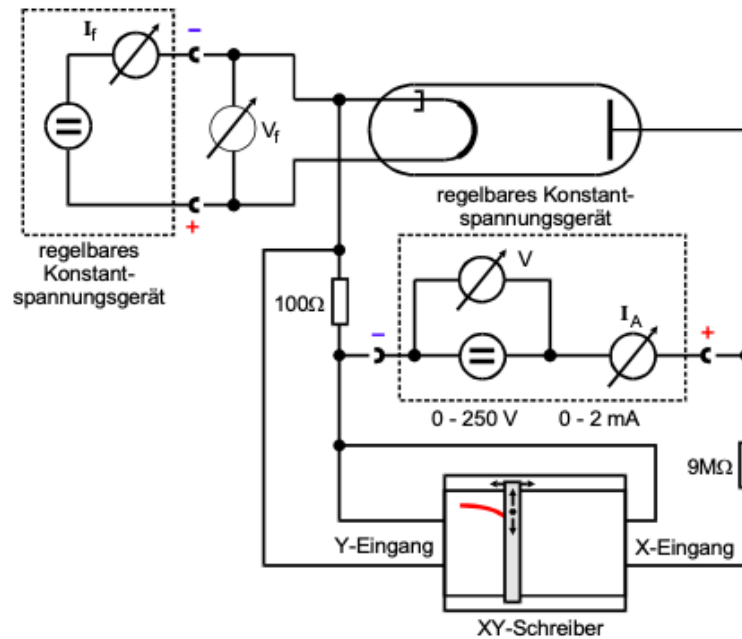


Abbildung 2: Schaltbild zur Erstellung einer Kennlinie der Hochvakuum-Diode Q[1].

### 3.2 Bestimmung des Anlaufstromgebiets

Beim zweiten Teil der Durchführung wird das Anlaufstromgebiet der Diode untersucht. Hier wird die Schaltung in Abbildung 3 verwendet. Zunächst wird der Heizstrom auf 2,3 A eingestellt. Daraufhin wird die Spannung des Gegenfelds schrittweise erhöht und der jeweilige Anodenstrom notiert. Zuletzt wird mit den aufgenommenen Daten die Kathodentemperatur sowie die Austrittsarbeit bestimmt.

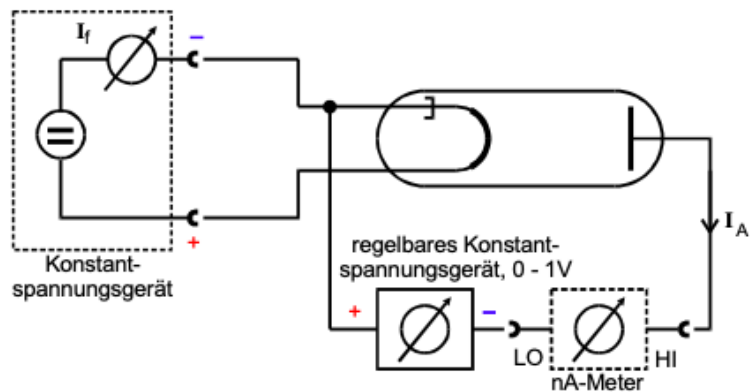
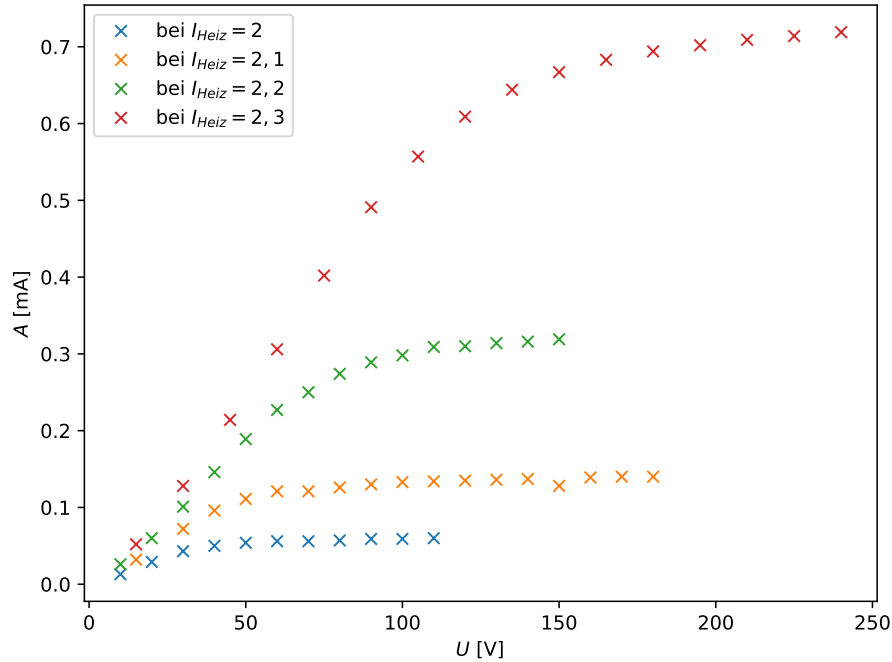


Abbildung 3: Schaltbild zur Aufnahme einer Anlaufstromkurve Q[1].

## 4 Auswertung

Die für die verschiedenen Heizströme  $I_{\text{Heiz}}$  bzw. Heizspannung  $U_{\text{Heiz}}$  gemessenen Werte sind in den Tabellen (4), (5) und (6) aufgetragen. Die verschiedenen Kennlinien sind in den Abbildungen (4) und (5) dargestellt.

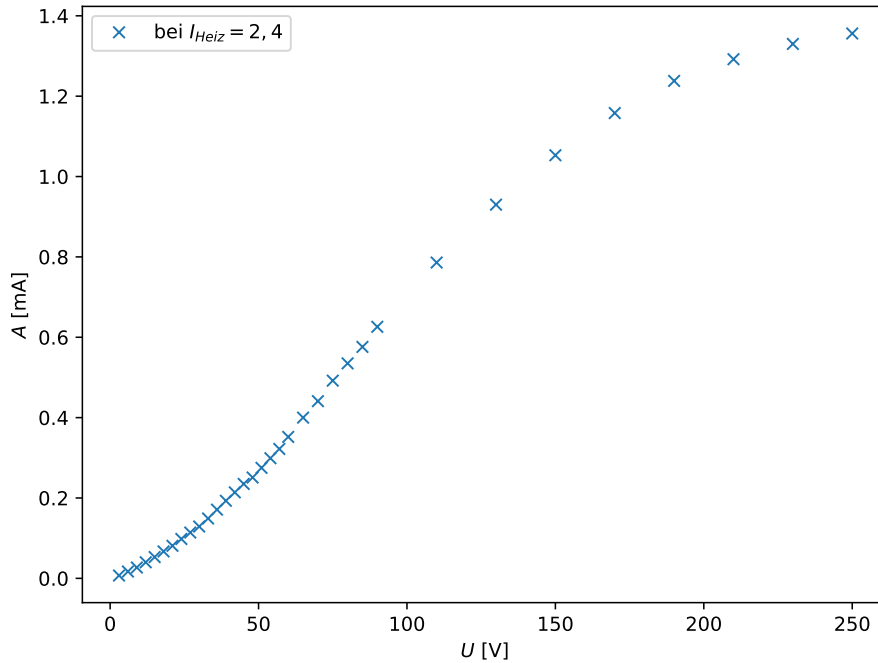


**Abbildung 4:** Kennlinien der Diode bei verschiedenen Heizströmen.

Aus den Abbildungen (4) und (5) werden die Sättigungsströme  $I_S$  abgelesen, die in Tabelle (6) aufgelistet sind.

**Tabelle 1:** Gemessener Sättigungsstrom in Abhängigkeit vom Strom bei  $I_{\text{Heiz}} = 2,4$  und  $U_{\text{Heiz}} = 5$ .

$I$ [mA]	$I_S$ [mA]
2,0	0,060
2,1	0,140
2,2	0,319
2,3	0,719
3,4	1,356



**Abbildung 5:** Kennlinien der Diode bei einem Heizstrom von 2,4 mA

#### 4.1 Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes

Die Langmuir-Schottkysche Gleichung (4) hat die Form  $I = a \cdot U^b$ . Diese lässt sich durch Logarithmisieren in die Geradengleichung

$$\log(I) = b \cdot \log(U) + \log(a)$$

bringen. Zur Überprüfung der Gleichung wird eine lineare Regression der 5. Kennlinie verwendet, die bei dem höchsten Heizstrom entsteht. Die Regression und die Messwerte der 5. Kennlinie sind in Abbildung (7) abgebildet.

Durch die lineare Regression ergeben sich die Werte

$$\log(a) = 1,26 \pm 0,02 \quad (6)$$

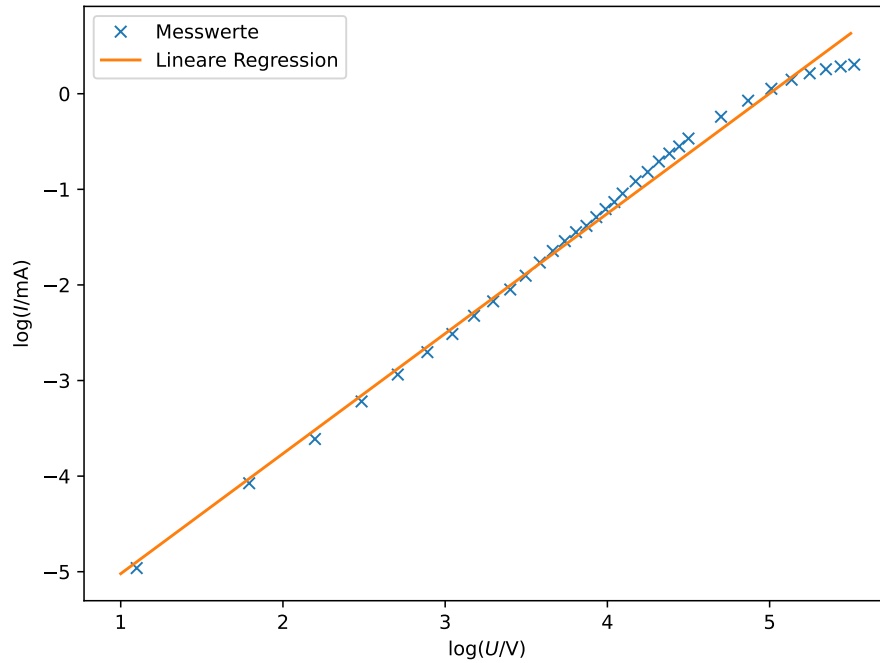
$$b = -6,28 \pm 0,08. \quad (7)$$

$b$  ist zur Auswertung der Gültigkeit nicht relevant.  $\log(a)$  kann mit dem Theoriewert  $\log(a)_{\text{Theo}} = \frac{3}{2}$  verglichen werden.

#### 4.2 Bestimmung der Kathodentemperatur

Der Bereich des Anlaufstroms hat einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wie in Gleichung (3) zu sehen ist. Die Messwerte werden bei einem Heizstrom von 2,3 A aufgenommen. Durch das Logarithmieren des Stroms und dem





**Abbildung 6:** Lineare Regression der logarithmisierten, fünften Kennlinie.

Auftragen gegen die Spannung kann eine lineare Regression der Form

$$y = cx + d$$

durchgeführt werden. Die verwendeten Messwerte aus dem Anlaufbereich sind in Tabelle (7) zu sehen.

Diese Messwerte und die lineare Regression sind in Abbildung (7) dargestellt. Die Werte der lineare Regression bestimmen sich zu

$$c = -7,8 \pm 0,6$$

$$d = 1,7 \pm 0,2.$$

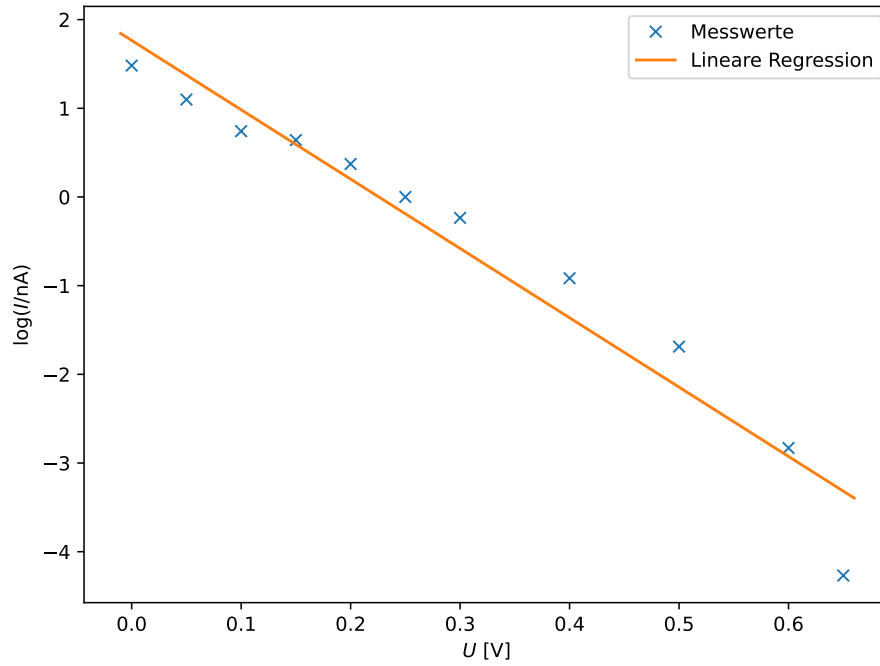
Durch Vergleich mit Gleichung (3) ergibt sich

$$c = -\frac{e}{kT}$$

$$\Leftrightarrow T = -\frac{e}{kc}$$

für die Kathodentemperatur  $T$ . Die aus den Messwerten bestimmte Kathodentemperatur ist

$$T = (1,5 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ K}.$$



**Abbildung 7:** Lineare Regression der Messwerte aus dem Anlaufbereich.

### 4.3 Bestimmung der Kathodentemperaturen und Austrittsarbeit von Wolfram

Zur Bestimmung der Kathodentemperatur wird Gleichung (5) nach

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

umgestellt. Für die verwendete Kathode gelten folgende Werte: Die Wärmeleistung beträgt  $W_{NL} = 0,95 \text{ W}$ , die emittierende Fläche ist  $f = 0,32 \text{ cm}^2$  und der Emissionsgrad ist  $\eta = 0,28$ . Die Ergebnisse sind in Tabelle (2) aufgeführt.

**Tabelle 2:** Kathodentemperaturen in Abhängigkeit des Heizstroms und der Heizspannung.

Strom [A]	Spannung [V]	Temperatur [K]
2	4	1930,04
2,1	4	1956,86
2,2	4,5	2048,69
2,3	5	2134,68
2,4	5	2159,54

Durch das Ersetzen von  $j_S = \frac{I_S}{f}$  wird die Austrittsarbeit mithilfe von

$$\Phi = -\frac{kT}{e} \log \left( \frac{I_S h^3}{4\pi f e m_0 k^2 T^2} \right)$$

berechnet. Mithilfe der in Tabelle (2) vermerkten Werte wird die Austrittsarbeiten berechnet, die in Tabelle (3) aufgelistet sind.

**Tabelle 3:** Austrittsarbeit in Abhängigkeit des Heizstroms.

Strom [A]	$\Phi$ [eV]
2	4,74
2,1	4,67
2,2	4,76
2,3	4,82
2,4	4,77

Der Mittelwert dieser Werte wird zu  $\bar{\Phi} = (4,75 \pm 0,03)$  eV bestimmt.

## 5 Diskussion

Bei den fünf gemessenen Kennlinien stellen sich bei allen der Sättigungsstrom ein. Daher sollte dieser mit hoher Genauigkeit ablesbar sein. Für den Exponenten der Langmuir-Schottkysch-Gleichung ergibt sich eine relative Abweichung von 16 %. Diese Abweichung ist gering genug, als dass die Gleichung als bestätigt angesehen werden kann. Die relative Abweichung zwischen der experimentell bestimmten Kathodentemperatur von 1500 K und der aus der Leistungsbilanz errechneter Wert von 2134,68 K beträgt 29,73 %. Die Austrittsarbeit kann mit dem Theoriewert  $\bar{\Phi}_{Theo} = 4,54$  eV verglichen werden. Dadurch ergibt sich eine relative Abweichung von 4,62 %. Diese Abweichung können dadurch zustande gekommen sein, dass die Anzeige des Messgeräts beim Ablesen der Stromstärke teils stark geschwankt hat. Außerdem war das Einstellen der verschiedenen Spannungen teils problematisch dadurch, dass durch den Versuchsaufbau hindurch auf das Gerät geschaut werden musste. Trotzdem sind die Abweichungen verhältnismäßig gering.

## Literatur

- [1] Unknown. *Thermische Elektronenemission*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2024.

## Anhang

### Messdaten

**Tabelle 4:** Gemessener Strom in Abhängigkeit von der Spannung bei  $I_{\text{Heiz}} = 2$  und  $U_{\text{Heiz}} = 4$  in den linken beiden Spalten und bei  $I_{\text{Heiz}} = 2.1$  und  $U_{\text{Heiz}} = 4$  in den rechten beiden Spalten.

Spannung [V]	Strom [mA]	Spannung [V]	Strom [mA]
10	0,013	15	0,032
20	0,029	30	0,072
30	0,043	40	0,096
40	0,050	50	0,111
50	0,054	60	0,121
60	0,056	70	0,121
70	0,056	80	0,126
80	0,057	90	0,130
90	0,059	100	0,133
100	0,059	110	0,134
110	0,060	120	0,135
		130	0,136
		140	0,137
		150	0,128
		160	0,139
		170	0,140
		180	0,140

**Tabelle 5:** Gemessener Strom in Abhängigkeit von der Spannung bei  $I_{\text{Heiz}} = 2,2$  und  $U_{\text{Heiz}} = 4,5$  in den linken beiden Spalten und bei  $I_{\text{Heiz}} = 2,3$  und  $U_{\text{Heiz}} = 5$  in den rechten beiden Spalten.

Spannung [V]	Strom [mA]	Spannung [V]	Strom [mA]
10	0,026	15	0,052
20	0,060	30	0,128
30	0,101	45	0,214
40	0,146	60	0,306
50	0,189	75	0,402
60	0,227	90	0,491
70	0,250	105	0,557
80	0,274	120	0,609
90	0,289	135	0,644
100	0,298	150	0,667
110	0,309	165	0,683
120	0,310	180	0,694
130	0,314	195	0,702
140	0,316	210	0,709
150	0,319	225	0,714
		240	0,719

**Tabelle 6:** Gemessener Strom in Abhängigkeit von der Spannung bei  $I_{\text{Heiz}} = 2.4$  und  $U_{\text{Heiz}} = 5$ .

Spannung [V]	Strom [mA]	Spannung [V]	Strom [mA]
3	0,007	54	0,299
6	0,017	57	0,322
9	0,027	60	0,352
12	0,040	65	0,400
15	0,053	70	0,441
18	0,067	75	0,492
21	0,081	80	0,535
24	0,098	85	0,576
27	0,114	90	0,626
30	0,129	110	0,786
33	0,149	130	0,930
36	0,171	150	1,053
39	0,193	170	1,158
42	0,214	190	1,238
45	0,235	210	1,292
48	0,251	230	1,330
51	0,275	250	1,356

**Tabelle 7:** Gemessener Strom in Abhängigkeit von der Spannung im Anlaufbereich.

Spannung [V]	Strom [nA]
0	4,40
0,05	3,00
0,1	2,10
0,15	1,90
0,2	1,45
0,25	1,00
0,3	0,79
0,4	0,40
0,5	0,185
0,6	0,059
0,65	0,014

# Originaldaten

$\Delta I = \pm 0,1$      $\Delta U = \pm 0,1$

①  $I_{Heiz} = 2A$      $V_{Heiz} = 4V$

U [V]	I [mA]
10	0,013
20	0,029
30	0,043
40	0,050
50	0,054
60	0,056
70	0,056
80	0,057
90	0,059
100	0,059
110	0,060

②  $I_{Heiz} = 2,1A$      $V_{Heiz} = 4V$

U [V]	I [mA]
15	0,032
30	0,072
40	0,086
50	0,111
60	0,121
70	0,121
80	0,126
90	0,135
100	0,133
110	0,134
120	0,135
130	0,136
140	0,137
150	0,138
160	0,139
170	0,140
180	0,140

③  $I_{Heiz} = 2,2A$      $V_{Heiz} = 4,5V$

U [V]	I [mA]
10	0,026
20	0,060
30	0,101
40	0,146
50	0,189
60	0,227
70	0,250
80	0,274
90	0,289
100	0,298
110	0,305
120	0,310
130	0,314
140	0,316
150	0,319

④  $I_{Heiz} = 2,3A$      $V_{Heiz} = 5V$

U [V]	I [mA]
15	0,052
30	0,128
45	0,214
60	0,306
75	0,402
90	0,497
105	0,557
120	0,609
135	0,644
150	0,667
165	0,683
180	0,694
195	0,702
210	0,709
225	0,714
240	0,719

⑤  $I_{Heiz} = 2,4A$      $V_{Heiz} = 5V$

U [V]	I [mA]
3	0,007
6	0,017
9	0,027
12	0,040
15	0,053
18	0,067
21	0,081
24	0,098
27	0,114
30	0,129
33	0,149
36	0,171
39	0,183
42	0,214
45	0,235

⑥

U [V]	I [mA]
48	0,251
51	0,275
54	0,289
57	0,322
60	0,352
65	0,400
70	0,441
75	0,482
80	0,535
85	0,576
90	0,626

⑦

U [V]	I [mA]
110	0,786
130	0,950
150	1,105
170	1,158
190	1,238
210	1,292
230	1,330
250	1,356



Gegenspannung [V]	I [mA]
0	4,40
0,1	2,10
0,2	1,45
0,3	0,79
0,4	0,40
0,5	0,185
0,6	0,059
<del>0,7</del> 0,65	0,014
0,05	3,00
0,15	1,9
0,25	1,00