

V504

Thermische Elektronenemission

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.05.2022

Abgabe: 17.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Austrittsarbeit und die Energieverteilung der Leitungselektronen	3
2.2	Berechnung der Sättigungsstromdichte bei der thermischen Elektronen- emission	3
2.3	Die Hochvakuum-Diode	4
2.4	Die Langmuir-Schötkysche Raumladungsgleichung	4
2.5	Das Anlaufstromgebiet einer Hochvakuumdiode	5
2.6	Die Kennlinie der Hochvakuumdiode	5
3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	6
3.1	Kennlinienschar einer Hochvakuumdiode	7
3.2	Maximal mögliche Heizleistung	7
4	Auswertung	8
4.1	Kennlinienschar durch Variation der Heizleistung	8
4.2	Der Gültigkeitsbereich des Raumladungsgesetzes	12
4.3	Das Anlaufstromgebiet	12
4.4	Kathodentemperatur aus den verschiedenen Heizleistungen	14
4.5	Austrittsarbeit des Kathodenmaterials	14
5	Diskussion	15
6	Anhang	17
	Literatur	19

1 Zielsetzung

In dem Versuch V504 geht es um die Erzeugung von Elektronen durch die Erhitzung von Wolfram. Gemessen werden dabei die Kennlinien einer Hochvakuumdiode, sowie das Anlaufstromgebiet bei maximaler Leistung. Bestimmt kann dadurch die Austrittsarbeit von Wolfram.

2 Theorie

2.1 Austrittsarbeit und die Energieverteilung der Leitungselektronen

Metalle sind kristalline Festkörper, deren Kennzeichen eine hervorragende elektrische Leitfähigkeit ist. Die Atome die auf den Kristallgitterplätzen sitzen sind ionisiert, wobei die Ionen ein räumlich periodisches Gitter bilden mit den freigesetzten Elektronen als Hülle. Auf die Elektronen im Metallinneren wirkt keine Kraft und können sich somit frei bewegen, weil das Gitterpotential in grober Näherung konstant ist. Damit ein Elektron den Metallverband verlassen kann, muss das Elektron eine Austrittsarbeit $e_0\xi$ besitzen, welches gegen ein Potential ξ anlaufen. Die Quantentheorie liefert dabei eine Antwort auf die Frage, ob Elektronen spontan die Metalloberfläche verlassen können. Elektronen können nur diskrete Energiewerte annehmen. Diese Teilchen, mit einem halbzahligen Spin, unterliegen dem Pauli-verbot, welches besagt, dass höchstens zwei Elektronen den gleichen Energiezustand haben können, diese müssen aber einen entgegengesetzten Spin zueinander haben. Die Konsequenz die sich daraus ergibt ist, dass die Elektronen am absoluten Nullpunkt immer noch eine endliche Energie besitzen. Um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, dass im thermischen Gleichgewicht ein möglicher Zustand mit der Energie E besetzt ist, wird die Fermi-Diracsche-Verteilungsfunktion verwendet. Aus dieser wird klar, dass für das Verlassen der Metalloberfläche die Energie des Elektrons mindestens $\xi + e_0\phi$ betragen muss. Wenn ein Elektron diese oder eine höhere Energie hat und in der Lage ist spontan die Metalloberfläche zu verlassen, kann die Fermi-Diracsche-Verteilungsfunktion genähert werden zu

$$f(E) = \exp\left(\frac{\xi - E}{kT}\right) . \quad (1)$$

2.2 Berechnung der Sättigungsstromdichte bei der thermischen Elektronenemission

Um die Sättigungsstromdichte der austretenden Elektronen zu bestimmen, wird die Richardson-Gleichung verwendet.

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

Diese ist abhängig von der Temperatur und gilt bei hohen Temperaturen.

2.3 Die Hochvakuum-Diode

Die Hochvakuum-Diode wird für die Messung des Sättigungsstrom einer emittierten Metalloberfläche verwendet, da die freien Elektronen sonst mit den Gasmolekülen der Luft Wechselwirken. Ebenso ist ein elektrisches Feld notwendig um die austretenden Elektronen abzufangen. In Abbildung 1 sieht man den Aufbau einer Hochvakuum-Diode, wobei diese aus einem evakuierten Glaskörper besteht, in welchem ein Draht eingeschmolzen ist. Dieser Draht kann durch einen Strom auf eine Temperatur von 100 K bis zu 3000 K erhitzt werden. Die dabei austretenden Elektronen werden durch das erzeugte elektrische Feld abgesaugt.

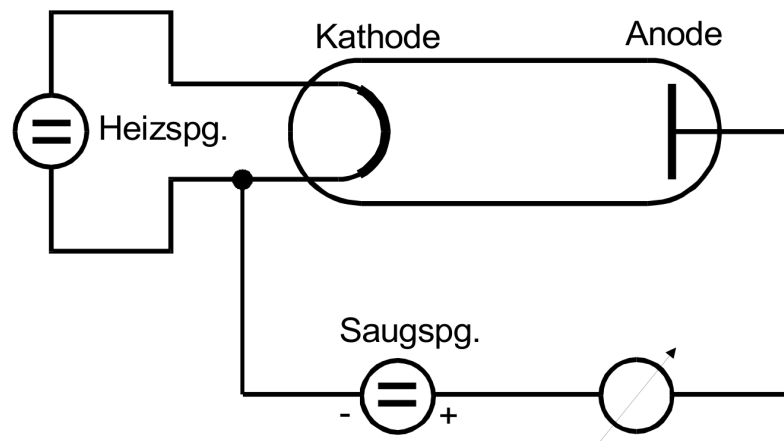


Abbildung 1: Grundsätzliche Beschaltung einer Hochvakuum-Diode [1].

2.4 Die Langmuir-Schottkysche Raumladungsgleichung

Der Anodenstrom hängt, bei gegebener Kathodentemperatur, von der Anodenspannung ab. Eine hinreichend hohe Anodenspannung führt zu einem Spannungs unabhängigen Strom. Jedoch ist das Ohmsche Gesetz, also die Proportionalität von Strom und Spannung, auch vor Erreichen des Sättigungswertes bei einer Diode ungültig. Grund dafür ist, dass die Geschwindigkeit der Elektronen nicht mehr konstant ist und dies dazu führt, dass die Raumladungsdichte ρ eine Funktion des Ortes wird und in Richtung der Anode abnimmt.

$$j = -\rho \cdot v$$

Der Verlauf der Feldstärke zwischen Anode und Kathode wird durch die Raumladungsdichte beeinflusst, weil diese das Feld von der Kathode abschirmt. Die Feldlinien die von der Anode ausgehen reichen nicht mehr bis zur Kathode und enden schon an den Raumladungselektronen. Die emittierten Elektronen werden dann nicht mehr als von dem Anodenfeld erfasst, wodurch der gemessene Diodenstrom kleiner als der Sättigungsstrom ist. Dargestellt wird dies durch das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz, wobei der Gültigkeitsbereich dieser auch Raumladungsgebiet genannt wird

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

2.5 Das Anlaufstromgebiet einer Hochvakuumdiode

Aus der Gleichung (3) folgt, dass bei $V = 0$ auch $j = 0$ ist. Jedoch wird beobachtet das bei $V = 0$ noch ein geringer Anodenstrom vorhanden ist. Dieser entsteht durch die Eigengeschwindigkeit der Elektronen beim Verlassen der Kathode. Bei $T > 0$ sind endlich viele Elektronen mit der Energie größer als die der Austrittsarbeit, welche gegen ein geringer Anlaufstrom anlaufen können, wobei das Anodenmaterial die Austrittsarbeit ϕ_A besitzt. Dadurch müssen die Elektronen, die die Anode erreichen, eine größere Energie besitzen als $e_0 \phi_A + e_0 V$. Beschrieben wird der Verlauf des Anodenstromgebietes durch

$$j(V) = j_0 \exp \left(-\frac{e_0 \phi_A + e_0 V}{kT} \right) = \text{const} \exp \left(\frac{e_0 V}{kT} \right) . \quad (4)$$

2.6 Die Kennlinie der Hochvakuumdiode

Die Kennlinie einer Hochvakuumdiode stellt den Zusammenhang zwischen der Stromdichte j bzw. dem Anodenstrom I_A und dem außen angelegten Potential dar. Einteilen lassen sich diese Kennlinien in drei Gebiete, wie in Abbildung 2 zu sehen. Das erste Gebiet ist das Anlaufstromgebiet, in welchem der Zusammenhang zwischen I und V im Bereich $V > 0$ existiert. Das zweite Gebiet ist das Raumladungsgebiet, in welchem die $\sqrt{V^3}$ -Abhängigkeit vorhanden ist. Für die Bestimmung der Kathodentemperatur und der Austrittsarbeit der Kathode können teile der Kennlinie benutzt werden.

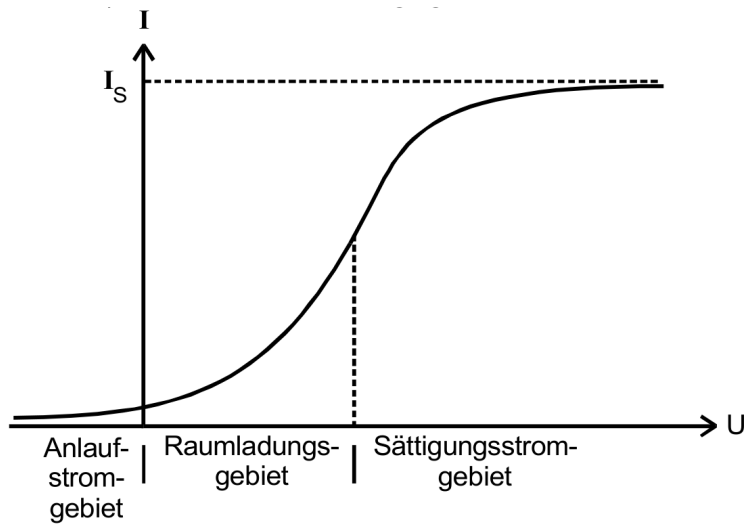


Abbildung 2: Kennlinie einer Hochvakuumdiode [1].

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für diesen Versuch wird eine Hochvakuumdiode, zwei regelbare Konstantspannungsgeräte, eine regelbares Konstantspannungsgeräte, welches eine Spannung von 0 V bis 1 V generiert, Kabel und ein viel kürzeres und dünneres Kabel verwendet. Zusehen sind diese Sachen in der Abbildung 3.

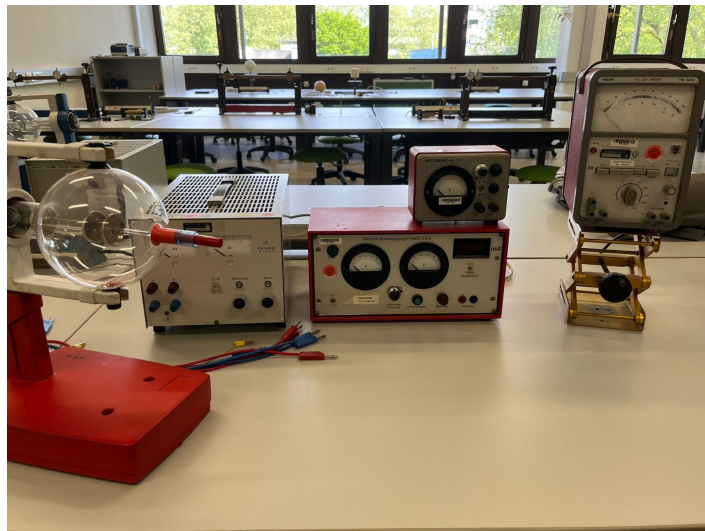


Abbildung 3: Verbildlichung aller verwendeten Materialien.

3.1 Kennlinienschar einer Hochvakuumdiode

Für den ersten Versuchsteil wird die Schaltung, wie Abbildung 4 zu sehen, aufgebaut. Danach werden beide Spannungsgeräte angeschaltet und der Strom des oben links, in Abbildung 4, abgebildeten Spannungsgeräts auf 2 A gestellt und der Spannungswert aufgenommen. Als nächstes werden die Spannung und der Strom des Gleichstromversorgers aufgenommen. Dies wird für die Anodenströme von 2,0 A – 2,5 A jeweils aufgenommen.

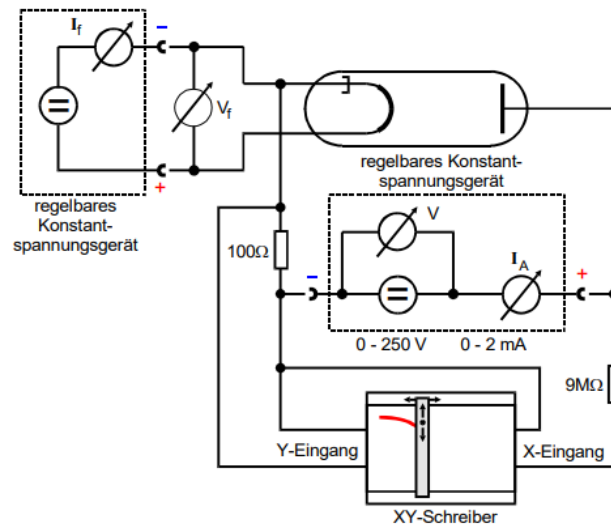


Abbildung 4: Schaltung zur Aufnahme von Diodenkennlinien [1].

3.2 Maximal mögliche Heizleistung

Als nächstes wird die Schaltung, wie in Abbildung 5 zu sehen, umgebaut. Der Heizstrom wird auf 2,5 A gestellt. Die Gegenspannung wird in einem Bereich von 0 A bis 1 A in 0,1 Schritte variiert und der daraus resultierende Strom aufgenommen.

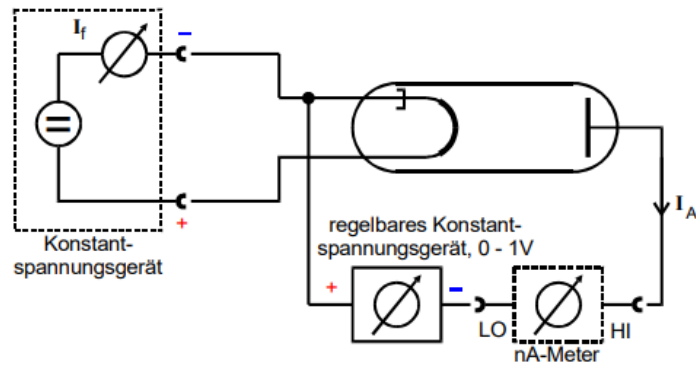


Abbildung 5: Schaltung zur Aufnahme einer Anlaufstromkurve [1].

4 Auswertung

4.1 Kennlinienschar durch Variation der Heizleistung

Gemessen wurden fünf Kennlinien durch Variation der Heizleistung. Die Messwerte der fünf Kennlinien befinden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Die Messwerte der fünf Kennlinien

	Kennlinie 1	Kennlinie 2	Kennlinie 3	Kennlinie 4	Kennlinie 5	Kennlinie 6
U / V	I / mA	I / mA	I / mA	I / mA	I / mA	I / mA
10	0,05	0,055	0,084	0,068	0,109	0,121
15	-	0,103	0,150	0,134	0,192	0,208
20	0,104	0,154	0,232	0,222	0,282	0,300
25	-	0,197	0,310	0,309	0,398	0,402
30	0,123	0,227	0,385	0,420	0,516	0,516
40	0,129	0,256	0,525	0,602	0,744	0,750
50	0,130	0,268	0,628	0,753	0,988	1,007
60	0,131	0,272	0,727	0,874	1,209	1,200
70	0,132	0,275	0,731	0,945	1,414	1,604
80	0,133	0,277	0,738	0,995	1,602	1,953
90	-	-	-	1,006	1,714	-
100	-	-	-	1,012	-	-

Aus den Messwerten werden Graphen erstellt. Dabei bildet sich eine Asymptote und an der wird der Sättigungsstrom I_S wie in Abbildung 2. Der Sättigungsstrom wird in Tabelle 2.

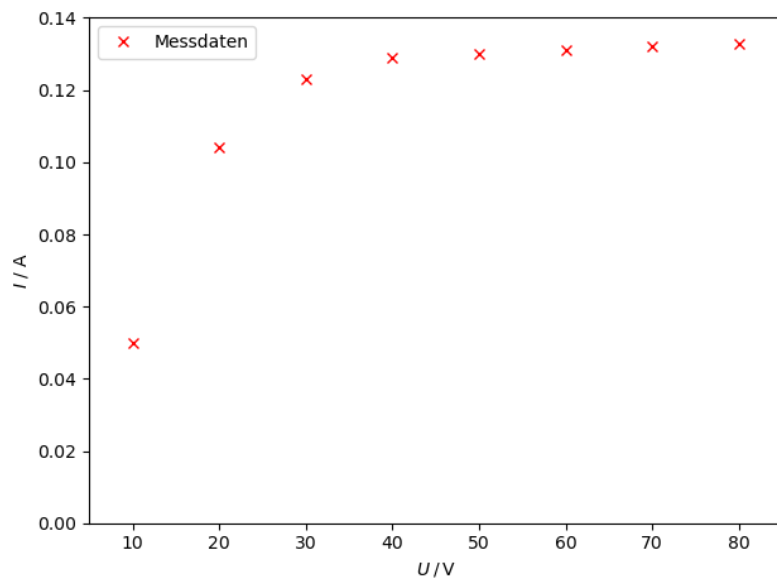


Abbildung 6: Kennlinie 1 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,0 \text{ A}$.

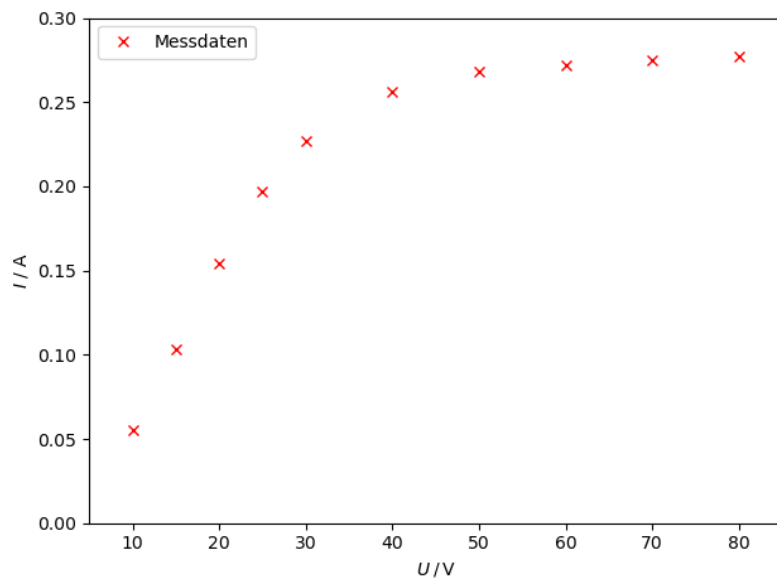


Abbildung 7: Kennlinie 2 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,1 \text{ A}$.

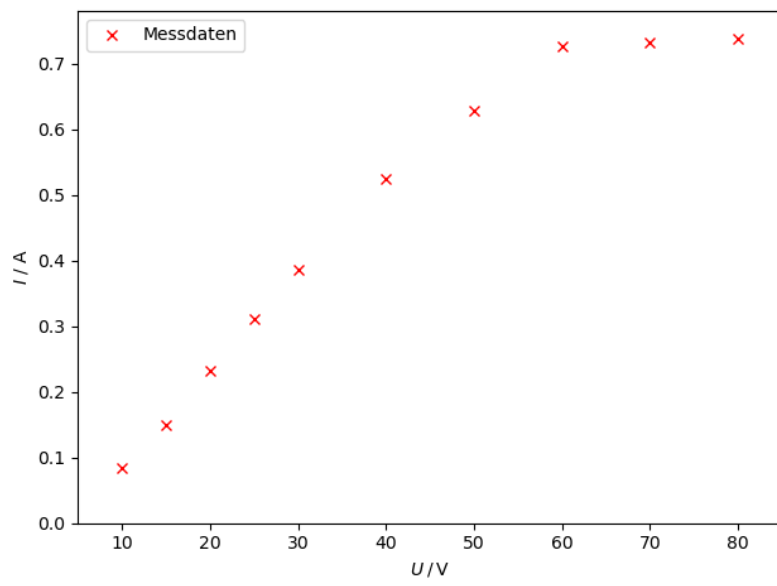


Abbildung 8: Kennlinie 3 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,2 \text{ A}$.

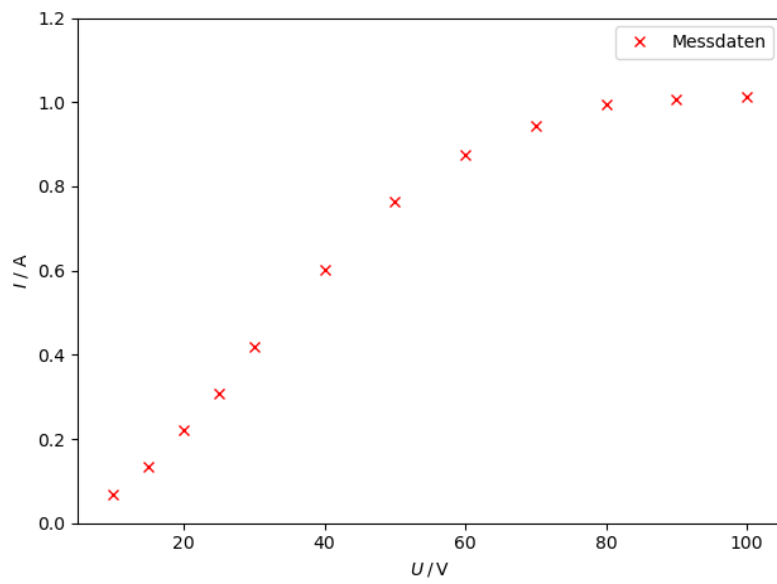


Abbildung 9: Kennlinie 4 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,3 \text{ A}$.

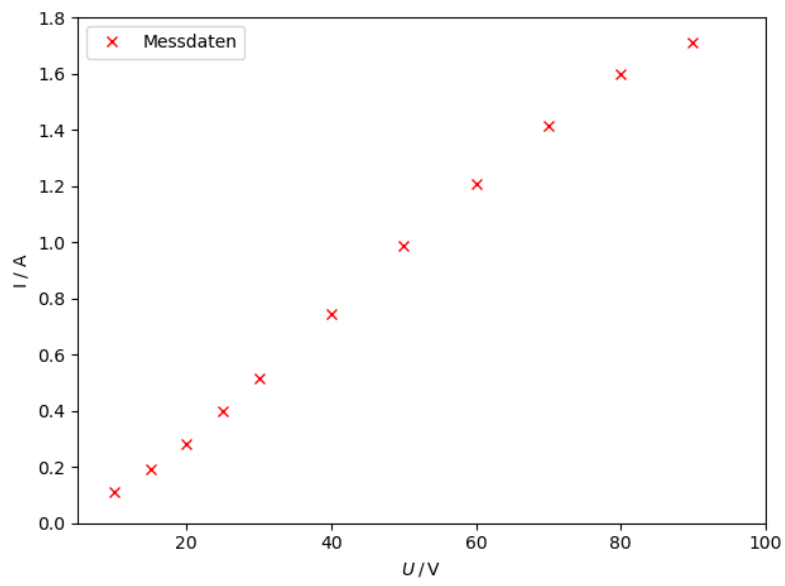


Abbildung 10: Kennlinie 5 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,4 \text{ A}$.

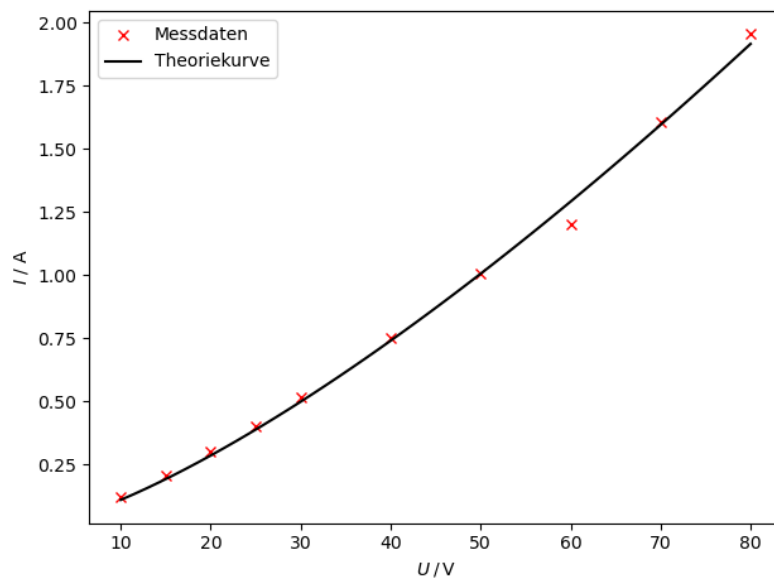


Abbildung 11: Kennlinie 6 mit $I_{\text{Heiz}} = 2,5 \text{ A}$.

Tabelle 2: Der Sättigungsstrom

Kennlinie	I_S / mA
1	0,1338
2	0,2821
3	0,750
4	1,014
5	1,720
6	1,975

Der Wendepunkt lässt sich bei $I_W = 1$ mA ablesen. Der resultierende Wert für die sechs Kennlinien beträgt nach $I_S = 2 \cdot I_W$ somit

$$I_S = 2 \text{ mA}.$$

4.2 Der Gültigkeitsbereich des Raumladungsgesetzes

Der Gültigkeitsbereich des Raumladungsgesetzes wird mit einer Ausgleichsrechnung mit Hilfe des Langmuir Schottkyschen Raumladungsgesetzes überprüft. Dazu wird Kennlinie 6 mit der maximalen Heizleistung genommen und die Ausgleichsrechnung, mit

$$I = c \cdot \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e_0}{m_0}} \cdot U^b,$$

wird in die Abbildung 11 eingetragen. Daraus folgt die für Parameter

$$\begin{aligned} c &= (202,5 \pm 32,7) \cdot 10^{-3} \\ b &= (1,37 \pm 0,03). \end{aligned}$$

4.3 Das Anlaufstromgebiet

Das Anlaufstromgebiet der Diode wird für die maximale Heizleistung untersucht. Die Wertepaare befinden sich in der Tabelle 3. Gewählt wurde die maximale Heizspannung mit $I_{\text{Heiz}} = 2,5$ A. Die Messwerte werden in ein Diagramm eingetragen und eine Ausgleichsrechnung mit

$$I = a \cdot \exp\left(\frac{-e_0 \cdot U}{k_B \cdot b}\right)$$

wird durchgeführt.

Tabelle 3: Die Messwerte des Anlaufgebietes.

$U_{\text{Heiz}} / \text{V}$	I / nA
0	12,0
0,1	6,5
0,2	3,6
0,3	2,0
0,4	1,45
0,5	0,8
0,6	0,5
0,7	0,38
0,8	0,25
0,9	0,21
1,0	0,175

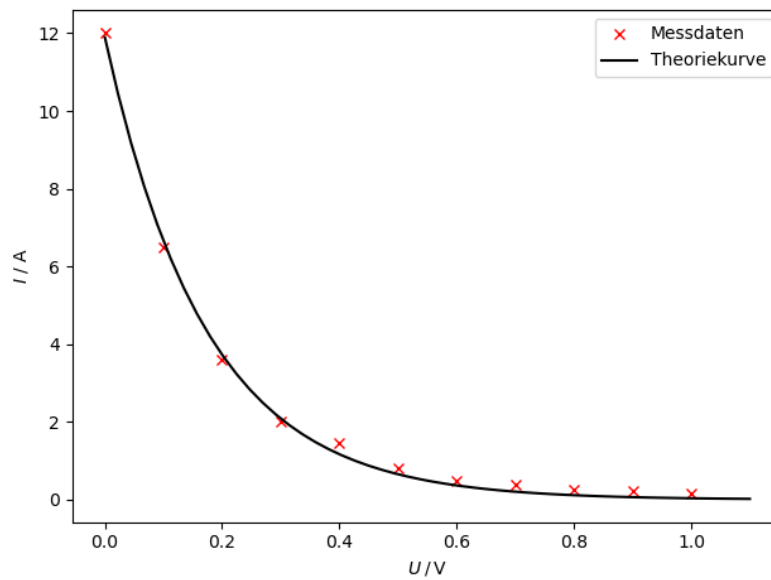


Abbildung 12: Das Anlaufgebiet bei maximaler Heizleistung.

Aus der Ausgleichsrechnung ergibt sich für die Parameter

$$a = (11,89 \pm 0,16) \text{ nA} ,$$

$$b = (2000,51 \pm 50,86) .$$

Die Temperatur T ist dabei der Parameter b mit

$$T = (2000,51 \pm 50,86) \text{ K} .$$

4.4 Kathodentemperatur aus den verschiedenen Heizleistungen

Die Kathodentemperatur T wird aus der Leistungsbilanz des Heizstromfadens gewonnen. Dazu beträgt die Leistung:

$$N_{\text{zu}} = U_{\text{Heiz}} \cdot I_{\text{Heiz}}.$$

Die Wärmestrahlung und Wärmeleitung wird dabei abgegeben. Angenommen wird der Wert für die Wärmeleitung einen Wert von $N_{\text{w}} = 1 \text{ W}$. Die Strahlungsleistung ergibt sich nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz zu

$$N_{\text{zu}} = f \cdot \eta \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Hierbei beträgt die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstant $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{K}^4}$, die Kantenoberfläche $f = 0,35 \text{ cm}^2$ und der Emissionsgrad $\eta = 0,28$. Aus dem Energiesatz folgt

$$\begin{aligned} N_{\text{zu}} &= N_{\text{Str}} + N_{\text{WL}} \\ \Leftrightarrow U_{\text{Heiz}} \cdot I_{\text{Heiz}} &= f \cdot \eta \cdot \sigma \cdot T^4 + N_{\text{WL}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Die berechneten Temperaturen folgen durch die Umstellung der Gleichung (5) und werden ebenso in der Tabelle 4 festgehalten.

Tabelle 4: Die Kathodentemperatur T

$U_{\text{Heiz}} / \text{V}$	$I_{\text{Heiz}} / \text{A}$	T / K
5	2,0	2003,48
5	2,1	2030,75
5,5	2,2	2111,33
6	2,3	2187,90
6,2	2,4	2232,66
7	2,5	2331,29

4.5 Austrittsarbeit des Kathodenmaterials

Die Austrittsarbeit wird aus den T - und den zugehörigen I_{s} -Werten hergeleitet. Die Richardson-Gleichung (4) wird nach ϕ umgestellt zu:

$$W_{\text{A}} = e_0 \cdot \phi = -T k_{\text{B}} \cdot \ln \left(\frac{j_{\text{s}} h^3}{4 \pi e_0 \cdot m_0 k_{\text{B}}^2 T^4} \right),$$

mit

$$j_s = \frac{I_s}{f}.$$

Somit ergibt sich die Austrittsarbeit von Wolfram für die sechs Kennlinien:

Tabelle 5

Kennlinien	$W_A / \cdot 10^{-19} \text{ J}$	$W_A / \text{ eV}$
1	9,173	5,72
2	9,100	5,68
3	9,211	5,74
4	9,486	5,92
5	9,536	5,95
6	9,954	6,21

Die Austrittsarbeit von Wolfram beträgt

$$\overline{W}_A = (5,87 \pm 0,18) \text{ eV}.$$

5 Diskussion

Im ersten Teil des Versuches wurden die Kennlinien untersucht. Die Kennlinie verhalten sich wie in Abbildung 3. Es ist anzumerken, dass die messwerte bei der Apparatur höchstens bis 100 V gingen. Durch eine höhere Abzahl an Messwerten wäre die Asymptote bzw. der Sättigungsstrom besser bestimmbar. Der Sättigungsstrom an der Kennlinie sechs ist nicht direkt erkennbar, deswegen wurde der Wendepunkt abgeschätzt. Zudem stellt das Ablesen ebenso eine Ungenauigkeit dar, denn bei 50 V sprang der Zeiger am Messgerät von dem einen auf den anderen.

Auffällig bei der Bestimmung des Exponenten b , welche zur Überprüfung des Raumladungsgesetzes dient, weist die Abweichung auf:

$$b_{\text{exp}} = 1,37 \pm 0,03 \quad b_{\text{theo}} = 1,5 \\ \rightarrow 8,6\%$$

Die Abweichung könnte auf den Ablesefehler oder auf nicht genügend Messwerte deuten.

Die Glühkathode kann durch einen Strom von 1000 bis 3000 K erhitzt werden. Der berechnete Wert für die Temperatur entspricht $T_{\text{exp}} = (2000,51 \pm 50,86) \text{ K}$ und liegt somit im Intervall. Die Kurve verhält sich, wie erwartet, exponentiell. Die Kathodentemperatur aus den Kennlinien liegen ebenso im Intervall. Es liegt eine positive Gegenspannung an, was dafür sorgt, dass der gemessene Strom fällt.

Die berechnete Austrittsarbeit von Wolfram weist die Abweichung auf:

$$\overline{W}_A = (5,87 \pm 0,18) \text{ eV} \quad W_{A, \text{theo}} = 4,55 \text{ eV [2]} \\ \rightarrow 29\%$$

Die Abweichung führt auf die abgeschätzten Sättigungsstrom. Nichtsdestotrotz eignet sich der Versuch für die Bestimmung der Austrittsarbeit von Wolfram. Jedoch sollte die Messapparatur funktionstüchtig sein und für mehrere Messungen eignen.

6 Anhang

T1		V504			
Spannungsgesetz		Gleichstromversorgung			
V	A	V	mA		
1. 5V	2	10V	0,05	3	2,3
		20V	0,104	6	
		30V	0,123		
		40V	0,129	4	2,4
		50V	0,130		
		60V	0,134		
		70V	0,132		
		80V	0,133		
2	2,1	10	0,055	5	2,5
		15	0,103		
		20	0,154		
		25	0,197		
		30	0,227		
		40	0,256		
		50	0,267		
		60	0,272		
		70	0,275		
		80	0,277		
3	2,2	10	0,084		
		15	0,150		
		20	0,252		
		25	0,340		
		30	0,395		
		40	0,525		
		50	0,628		
		60	0,717		
		70	0,784		
		80	0,788		
				10	0,059
				15	0,134
				20	0,122
				25	0,330
				30	0,304
				40	0,449
				50	0,536
				60	0,602
				70	0,705
				80	0,763
				90	0,834
				100	0,845
				110	0,883
				120	0,935
				130	0,983
				140	1,012
				150	1,031
				160	1,092
				170	1,128
				180	1,185
				190	1,237
				200	1,246
				210	1,264
				220	1,284
				230	1,304
				240	1,324
				250	1,344
				260	1,364
				270	1,384
				280	1,404
				290	1,424
				300	1,444
				310	1,464
				320	1,484
				330	1,504
				340	1,524
				350	1,544
				360	1,564
				370	1,584
				380	1,604
				390	1,624
				400	1,644
				410	1,664
				420	1,684
				430	1,704
				440	1,724
				450	1,744
				460	1,764
				470	1,784
				480	1,804
				490	1,824
				500	1,844
				510	1,864
				520	1,884
				530	1,904
				540	1,924
				550	1,944
				560	1,964
				570	1,984
				580	2,004
				590	2,024
				600	2,044
				610	2,064
				620	2,084
				630	2,104
				640	2,124
				650	2,144
				660	2,164
				670	2,184
				680	2,204
				690	2,224
				700	2,244
				710	2,264
				720	2,284
				730	2,304
				740	2,324
				750	2,344
				760	2,364
				770	2,384
				780	2,404
				790	2,424
				800	2,444
				810	2,464
				820	2,484
				830	2,504
				840	2,524
				850	2,544
				860	2,564
				870	2,584
				880	2,604
				890	2,624
				900	2,644
				910	2,664
				920	2,684
				930	2,704
				940	2,724
				950	2,744
				960	2,764
				970	2,784
				980	2,804
				990	2,824
				1000	2,844

max. Strom.	V	nA
2,5 A	0	12
	0,1	6,5
	0,2	3,6
	0,3	2
	0,4	1,45
	0,5	0,8
	0,6	0,5
	0,7	0,38
	0,8	0,25
	0,9	0,21
	1	0,175

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Thermische Elektronenemission*. 2022. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1930999/mod_resource/content/2/V504.pdf (besucht am 10.05.2022).
- [2] *Electron Work Function Of The Elements*. 2022. URL: <https://public.wsu.edu/~pchemlab/documents/Work-functionvalues.pdf> (besucht am 16.05.2022).