

**Versuch 504**  
**Thermische Elektronenemission**  
**TU Dortmund, Fakultät Physik**  
**Anfänger-Praktikum**

Marc Posorske

[marc.posorske@tu-dortmund.de](mailto:marc.posorske@tu-dortmund.de)

Fabian Lehmann

[fabian.lehmann@tu-dortmund.de](mailto:fabian.lehmann@tu-dortmund.de)

25.Oktobe 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
2.1	Erstellung einer Kennlinienschaar . . . . .	4
2.2	Anlaufstrom . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1	Kennlinien der Hochvakuumdiode . . . . .	5
3.2	Langmuir-Schottkysches-Gesetz . . . . .	15
3.3	Kathodentemperatur im Anlaufstromgebiet . . . . .	16
3.4	Kathodentemperatur bei Saugspannung . . . . .	19
3.5	Austrittsarbeit des Kathodenmaterials . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>21</b>
4.1	Langmuir-Schottkysches-Gesetz . . . . .	21
4.2	Kathodentemperatur bei Saugspannung . . . . .	21
4.3	Austrittsarbeit des Kathodenmaterials . . . . .	22

# 1 Theorie

Die Atome in Metallen sind fast ausnahmslos ionisiert. Das führt dazu, dass die Atome sich zu gitterartigen Strukturen zusammenfügen und die zugehörigen Elektronen sich fast frei innerhalb des Gitters bewegen können. Besitzen die Elektronen genug Energie, können sie aus dem Metall austreten. Als Modell, kann das Potential des Metalls als Potentialtopf betrachtet werden. Die Arbeit, die ein Elektron aufbringen muss um das Metall zu Verlassen heißt Austrittsarbeit. Wie viele Elektronen einen gewissen Betrag an Energie haben, lässt sich durch die Fermi-Diracsche Verteilungs-Funktion beschreiben.

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\zeta}{kT}} + 1} \quad (1)$$

Dabei steht  $\zeta$  für die Fermische Grenzenergie, die in diesem Fall die Austrittsarbeit ist. Bei dem in diesem Versuch betutzten Wolfram ist die Exponentialfunktion selbst beim Schmelzpunkt so groß, dass die Gleichung vereinfacht werden kann.

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\zeta}{kT}}} \quad (2)$$

Aus Gleichung (2) lässt sich auch auf die Richardson-Gleichung schliessen.

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

Die Sättigungsstromgröße  $j_s$  gibt and wie viele Elektronen pro Zeit und Fläche aus dem Metall austreten.

Für die Messung in diesem Versuch wird eine Hochvakuum-Diode benutzt. In ihr befindet sich ein Draht aus Wolfram, der mit einer Heizspannung  $U_f$  zum glühen gebracht wird. Der Draht dient dabei als Kathode, von der die ausgelösten Elektronen zur Anode wandern. Ohne ein Vakuum, würden die Elektronen mit den Gasmolekülen in Wechselwirkung treten und die Anode nicht erreichen.

Die Strom-Spannungs Kurve der Diode setzt sich aus drei Teilen zusammen:

Das Anlaufstromgebiet, ist das Gebiet in dem Strom durch die Diode fließt, ohne dass eine Anodenspannung angelegt wird. Sogar bei einer kleinen Gegenspannung ( $U \leq -1V$ ) fließt noch ein schwacher Strom. Dies kommt durch die Eigengeschwindigkeit der Elektronen zustande, da zumindest einige laut Gleichung (1) genug Energie besitzen um das Metall zu verlassen.

Der zweite Teil der Kurve, das Raumladungsgebiet, entsteht aufgrund des erzeugten elektrischen Feldes zwischen Anode und Kathode. Es erreichen nicht alle Elektronen, die das Metall verlassen, auch die Anode, da sie zwar genug Energie besitzen um aus dem Metall auszutreten, aber nicht genug um die Anode zu erreichen. Beschrieben wird die Dichte durch die Langmuir-Schottkysche Raumladungsgleichung.

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

Dabei ist  $V$  die Anodenspannung und  $a$  der Abstand zwischen Anode und Kathode. Der letzte Teil Teil ist das Sättigungsgebiet. Hier nähert sich der Strom asymptotisch einem Maximalwert, dem Sättigungswert.

Eine weitere Gleichung (5) lässt sich aus dem Energiesatz und dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz [1] herleiten. Damit kann die Kathodentemperatur berechnet werden.

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

Wobei  $f$  die emittierende Kathodenoberfläche angibt,  $\eta$  der Emissionsgrad der Oberfläche ist,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante meint und  $N_{WL}$  die Wärmeleitung der Apparatur bezeichnet.

## 2 Durchführung

### 2.1 Erstellung einer Kennlinienschaar

Das regelbare Konstantspannungsgerät mit dem maximalen Strom von 2,6A wird zur Erzeugung der Heizspannung genutzt. Für die Anodenspannung wird ein Gerät genutzt, das bis zu 250V Spannung erzeugen kann. Der Pluspol wird mit der Anode verbunden und der Minuspol mit dem bereits an der Kathode angeschlossen Minuspol der Heizspannung. Zum Ablesen der jeweiligen Spannung und Stromstärke können die eingebauten Volt- und Ampermeter verwendet werden.

Anschließend wird für einen festen Heizstrom die Heizspannung gemessen und für Anodenspannungen von 0V bis 250V in 10V Schritten der Anodenstrom gemessen. Die selbe Messung wird anschließend für drei weitere Heizströme und den maximal möglichen als fünfte Messung durchgeführt.

### 2.2 Anlaufstrom

Um den Anlaufstrom zu messen wird für die Anodenspannung ein Konstantspannungsgerät mit einer variablen Spannung von 0V bis 1V verwendet. Es wird genau anders herum gepolt angeschlossen als für die Erstellung der Kennlinien, um ein Gegenfeld zu erzeugen. Dass heißt, der Pluspol des Spannungsgeräts wird an den Minuspol der Heizspannung geschlossen. Weiterhin ist es notwendig auch ein empfindlicheres Ampermeter zu verwenden, das im Nanoampere-Bereich messen kann. Der Minuspol des Spannungsgeräts wird an den LO-Eingang des Ampermeters angeschlossen. Aufgrund der Kontakt- und Leitungswiderstände, ist es wichtig ein möglichst Kurzes Kabel zwischen HI-Ausgang und Anode zu verwenden. Der Kontaktwiderstand lässt sich verringern indem man den Bananenstecker in der Buchse dreht.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Kennlinien der Hochvakuumdiode

Aus den Tabellen (3.1 – 3.5) sind die darauf folgenden Abbildungen (1 – 5) erstellt worden.

Anodenspannung [V]	Anodenstrom [mA]
10	0,044
20	0,088
30	0,108
40	0,119
50	0,126
60	0,128
70	0,132
80	0,135
90	0,138
100	0,141
110	0,144
120	0,146
130	0,147
140	0,149
150	0,150
160	0,151
170	0,152
180	0,154
190	0,155
200	0,156
210	0,157

Tabelle 3.1: Kennlinie 1 (Heizwerte: 4,2V; 2,1A)

Aus den Abbildungen 1,2 und 3 wurde der Sättigungsstrom  $I_s$  abgelesen (Tab. 3.6). Bei den Abbildungen 4 und 5 war das nicht möglich, der Großteil des Sättigungsstromgebietes befand sich außerhalb der Messwerte.

Anodenspannung [V]	Anodenstrom [mA]
10	0,049
20	0,123
30	0,181
40	0,232
50	0,263
60	0,281
70	0,302
80	0,310
90	0,322
100	0,330
110	0,336
120	0,340
130	0,344
140	0,348
150	0,352
160	0,355
170	0,359
180	0,362
190	0,366
200	0,368
210	0,371
220	0,373
230	0,375
240	0,377
250	0,380

**Tabelle 3.2:** Kennlinie 2 (Heizwerte: 4,8V; 2,2A)

Anodenspannung [V]	Anodenstrom [mA]
10	0,050
20	0,135
30	0,230
40	0,309
50	0,367
60	0,421
70	0,479
80	0,525
90	0,555
100	0,589
110	0,622
120	0,642
130	0,655
140	0,665
150	0,671
160	0,677
170	0,682
180	0,686
190	0,692
200	0,697
210	0,702
220	0,706
230	0,709
240	0,713
250	0,717

**Tabelle 3.3:** Kennlinie 3 (Heizwerte: 5,0V; 2,3A)

Anodenspannung [V]	Anodenstrom [mA]
10	0,061
20	0,163
30	0,275
40	0,383
50	0,460
60	0,575
70	0,689
80	0,812
90	0,947
100	1,042
110	1,131
120	1,229
130	1,343
140	1,452
150	1,566
160	1,666
170	1,779
180	1,882
190	1,984
200	2,080
210	2,180
220	2,280
230	2,370
240	2,450
250	2,530

**Tabelle 3.4:** Kennlinie 4 (Heizwerte: 5,9V; 2,5A)

Anodenspannung [V]	Anodenstrom [mA]
10	0,063
20	0,170
30	0,288
40	0,398
50	0,514
60	0,606
70	0,711
80	0,829
90	0,958
100	1,107
110	1,282
120	1,399
130	1,494
140	1,593
150	1,730
160	1,865
170	2,000
180	2,140
190	2,290
200	2,440
210	2,580
220	2,720
230	2,860
240	3,000
250	3,110

**Tabelle 3.5:** Kennlinie 5 (Heizwerte: 6,1V; 2,6A)

Heizspannung [V]	Heizstrom [A]	Sättigungsstrom [mA]
4,2	2,1	0,16
4,8	2,2	0,38
5,0	2,3	0,72
5,9	2,5	2,80
6,1	2,6	3,50

**Tabelle 3.6:** Sättigungstromwerte

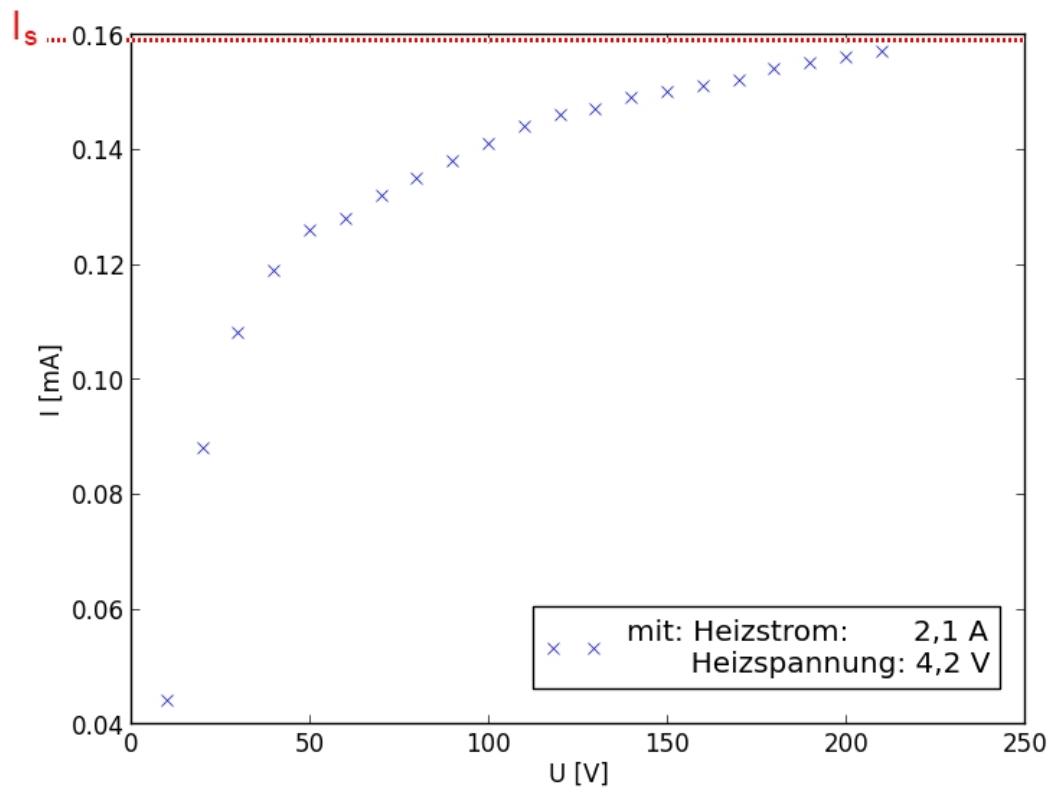


Abbildung 1: Kennlinie 1 (Heizwerte: 4,2V; 2,1A)

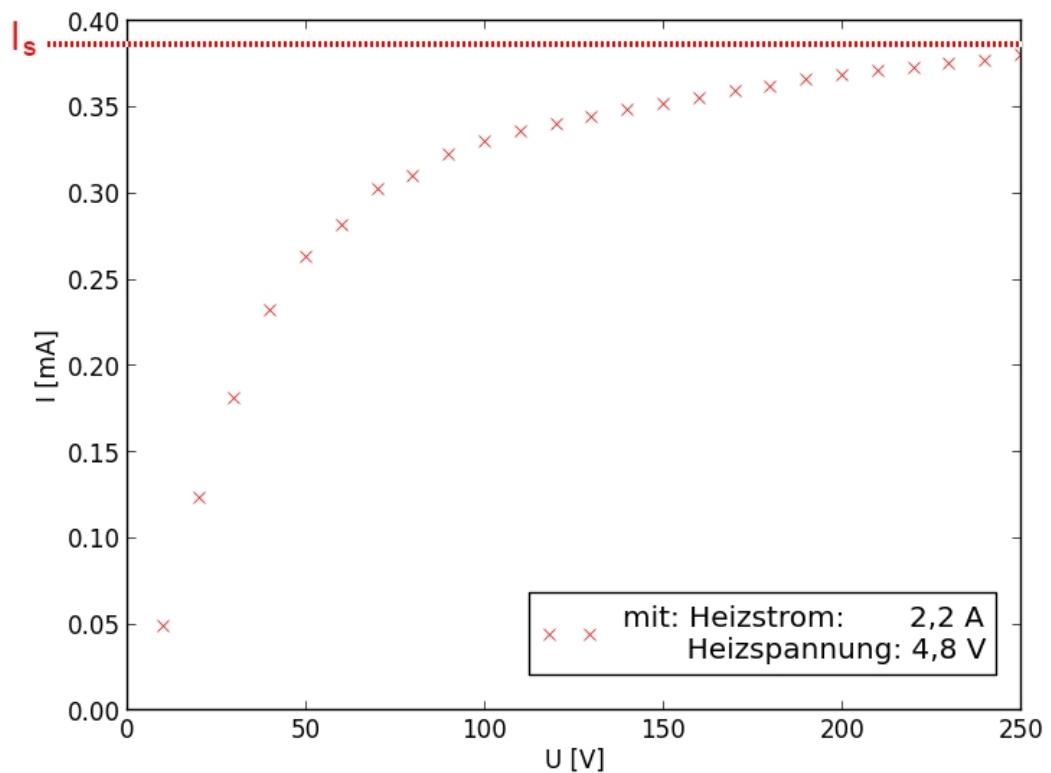


Abbildung 2: Kennlinie 2 (Heizwerte: 4,8V; 2,2A)

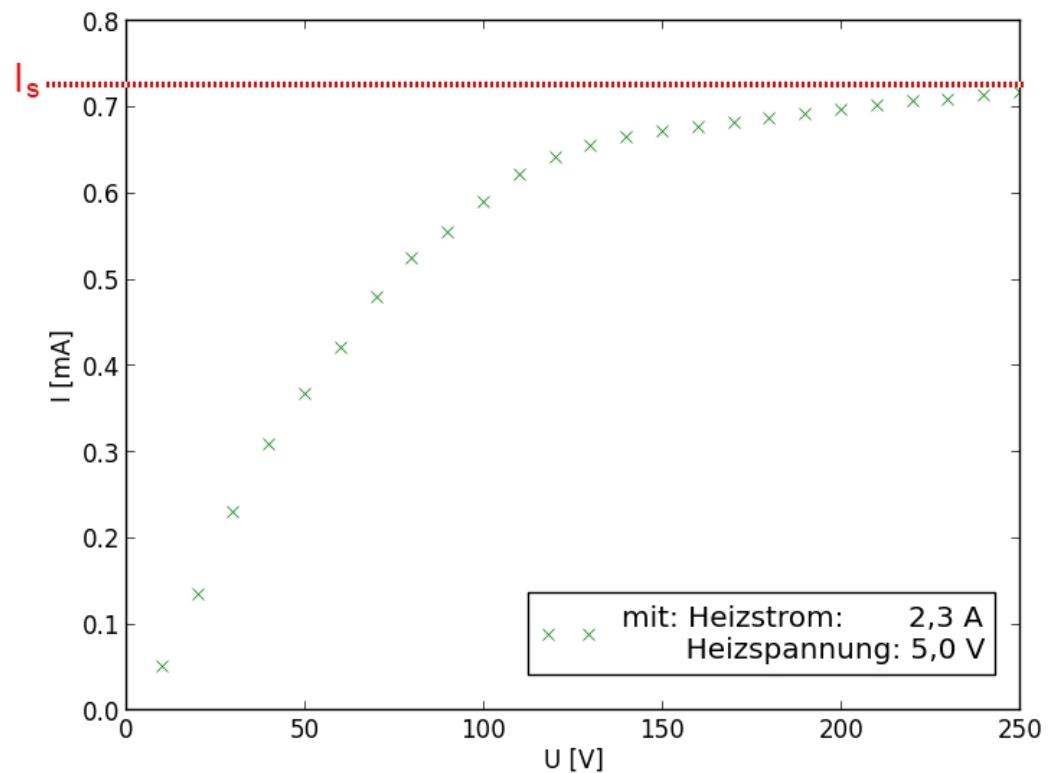


Abbildung 3: Kennlinie 3 (Heizwerte: 5,0V; 2,3A)

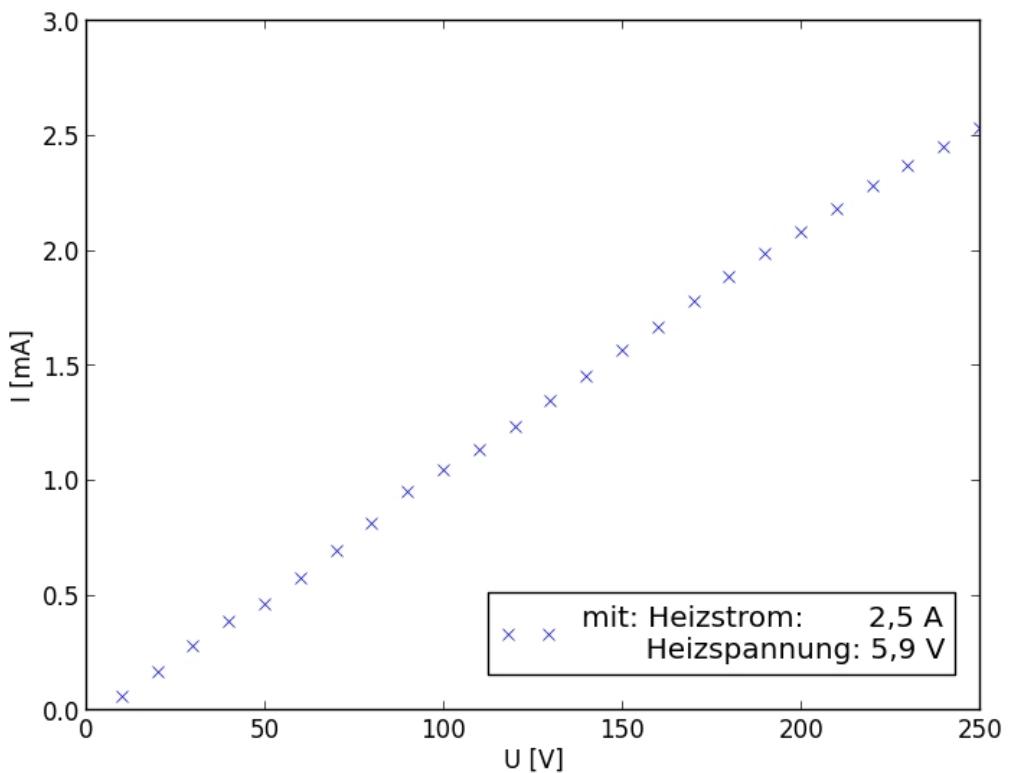


Abbildung 4: Kennlinie 4 (Heizwerte: 5,9V; 2,5A)

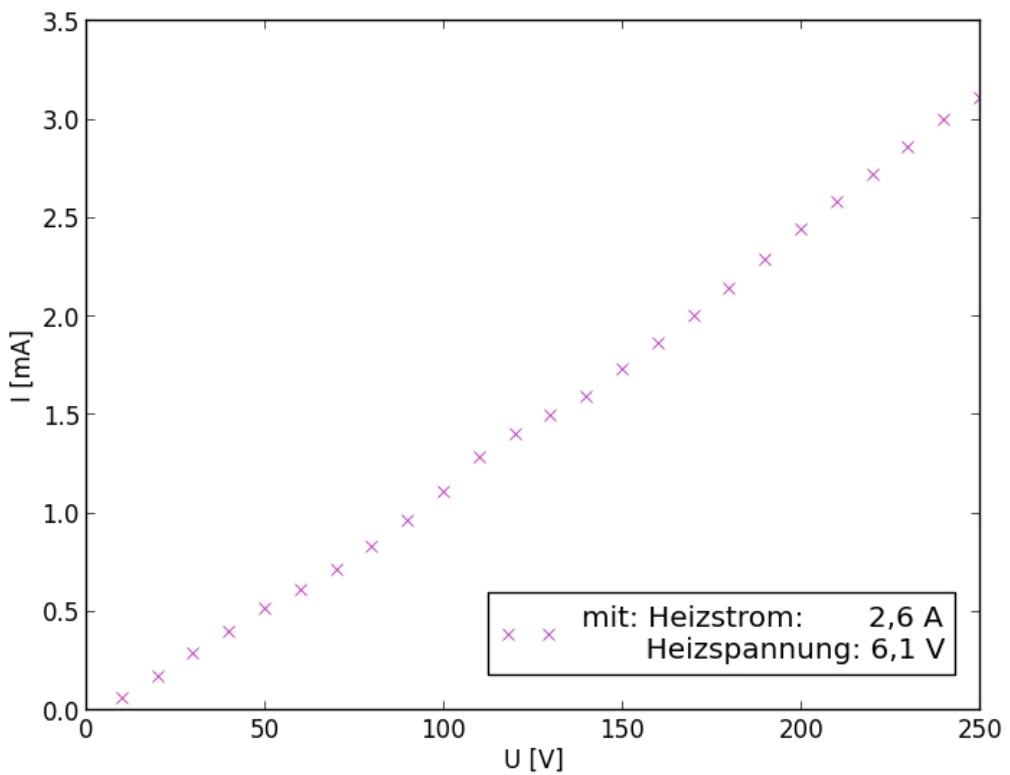


Abbildung 5: Kennlinie 5 (Heizwerte: 6,1V; 2,6A)

### 3.2 Langmuir-Schottkysches-Gesetz

Das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz (Gl. 4) ist solange gültig, bis sich die Kennlinie dem Sättigungstrom annähert, also das Raumladungsgebiet in das Sättigungstromgebiet übergeht. Für die maximal mögliche Heizleistung passiert das ungefähr bei 200V. Trägt man die Messwerte logarithmisch auf, so lässt sich der Exponent erkennen (vgl. Abb. 6). Der Exponent berechnet sich durch lineare Regression [2] aus Gleichung 7, beziehungsweise Tabelle 3.7, welche auf Tabelle 3.5 aufbaut.

$$I \sim U^\alpha \quad (6)$$

$$\Rightarrow \ln(I) \sim \ln(U) * \alpha \quad (7)$$

$U[V]$	$I[mA]$	$\ln(U)$	$\ln(I)$
10	0,063	2,30	-2,765
20	0,170	2,99	-1,772
30	0,288	3,40	-1,245
40	0,398	3,68	-0,921
50	0,514	3,91	-0,666
60	0,606	4,09	-0,501
70	0,711	4,24	-0,341
80	0,829	4,38	-0,188
90	0,958	4,49	-0,043
100	1,107	4,60	0,102
110	1,282	4,70	0,248
120	1,399	4,78	0,336
130	1,494	4,86	0,402
140	1,593	4,94	0,466
150	1,730	5,01	0,548
160	1,865	5,07	0,623
170	2,000	5,13	0,693
180	2,140	5,19	0,761
190	2,290	5,24	0,829

Tabelle 3.7: Logarithmen zur Kennlinie 5 (Heizwerte: 6,1V; 2,6A)

Aus der linearen Regression nach [2] berechnet sich der gesuchte Exponent  $\alpha$  beziehungs-

weise die Ausgleichskurve (Abb. 6).

$$y = a * x + b \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \ln(I) = 1,1808 * \ln(U) - 5,3443 \quad (9)$$

$$a = \alpha = 1,1808 \quad (10)$$

$$\Delta a = 1,24\% \quad (11)$$

$$b = -5,3443 \quad (12)$$

$$\Delta b = 1,22\% \quad (13)$$

$$\Rightarrow I = U^\alpha * e^b \quad (14)$$

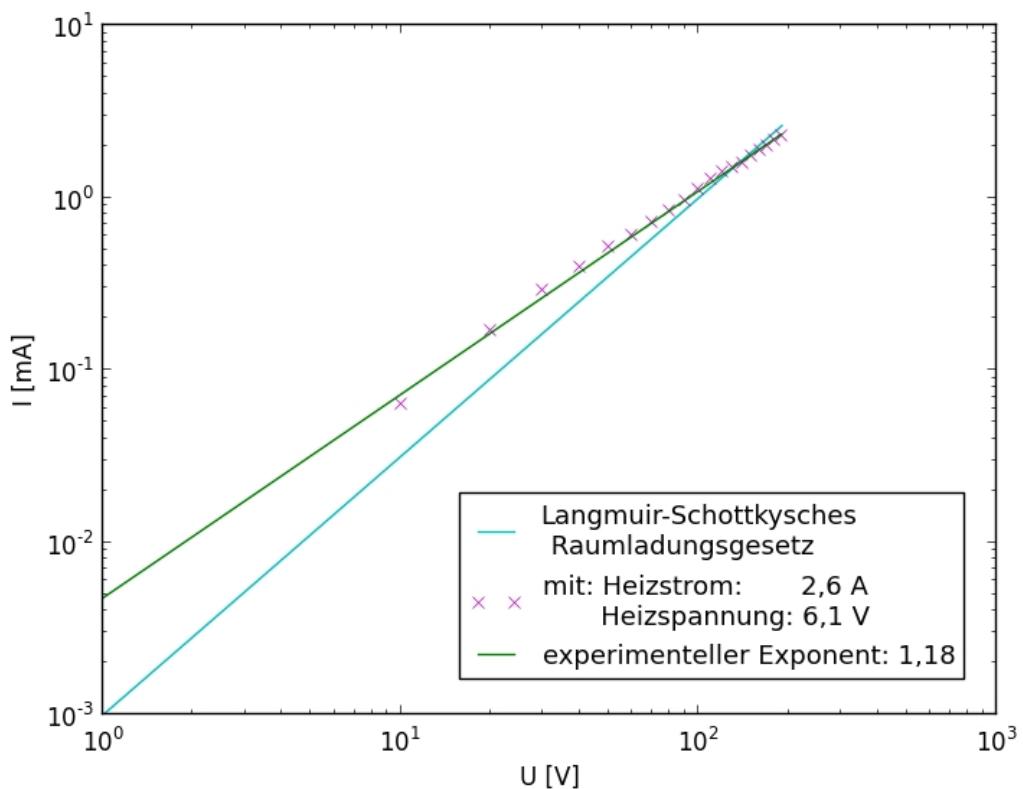


Abbildung 6: Strom-Spannungs-Beziehung

### 3.3 Kathodentemperatur im Anlaufstromgebiet

Aus den aufgezeichneten Messwerten (vgl. Tab. 3.9) lässt sich nach der Gleichung 23 die angezeigte Spannung  $U_{Heiz}$  nach  $U_{Heiz,real}$  korrigieren. Daraus lässt sich dann mit

Gleichung 5 T berechnen (Tab. 3.9). Die genutzen Apparaturkonstanten waren dabei:

$$\begin{aligned} f &= 0,32 \text{ cm}^2 \\ \eta &= 0,28 \\ N_{WL} &= 0,95 \text{ W}. \end{aligned} \quad (15)$$

Eine lineare Ausgleichsrechnung [2] ergibt folgende Werte.

$$y = a * x + b \quad (16)$$

$$T = 107,43 \frac{1}{V} * U_{Heiz,real} + 1643,81 \text{ K} \quad (17)$$

$$a = 107,43 \frac{1}{V} \quad (18)$$

$$\Delta a = 0,7\% \quad (19)$$

$$b = 1643,81 \text{ K} \quad (20)$$

$$\Delta b = 0,2\% \quad (21)$$

Die Werte sind in Abbildung 7 veranschaulicht.

$$U'_a = U_a + R * I_a \quad (22)$$

$$\Rightarrow U_{Heiz,real} = U_{Heiz} - (U_{gegen} + R * I_S) \quad (23)$$

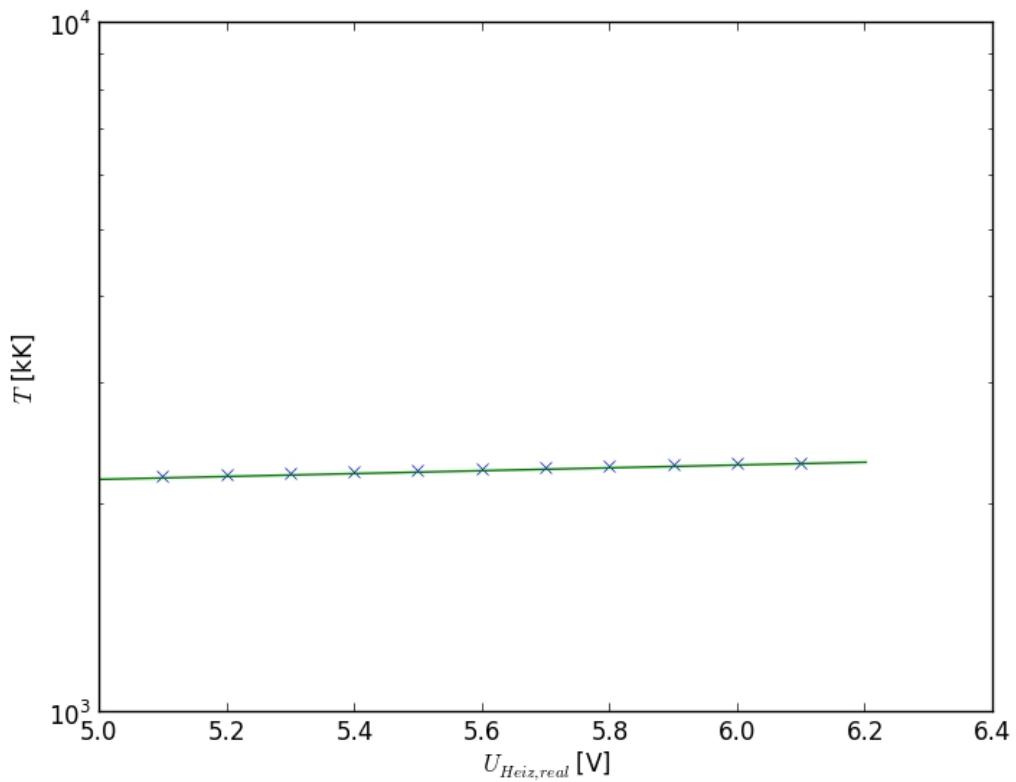
$$mit : R = 1M\Omega \quad (24)$$

$U_{gegen}$ [V]	$I_{Anlauf}$ [nA]
0,0	115,00
0,1	91,00
0,2	65,00
0,3	44,50
0,4	30,00
0,5	20,00
0,6	12,50
0,7	7,50
0,8	4,50
0,9	2,90
1,0	1,65

Tabelle 3.8: Anlaufstromgebiet (Heizwerte: 6,1V; 2,6A)

$U_{gegen}$ [V]	$U_{Heiz,real}$ [V]	$T$ [kK]
0,0	6,1	2,298
0,1	6,0	2,288
0,2	5,9	2,278
0,3	5,8	2,267
0,4	5,7	2,257
0,5	5,6	2,246
0,6	5,5	2,235
0,7	5,4	2,224
0,8	5,3	2,213
0,9	5,2	2,202
1,0	5,1	2,191

**Tabelle 3.9:** Kathodentemperatur im Anlaufstromgebiet( $U_{Heiz} = 6,1V$ )



**Abbildung 7:** Kathodentemperatur im Anlaufstromgebiet

### 3.4 Kathodentemperatur bei Saugspannung

Die Leistungsbilanz des Heizstromkreises dient nach Gleichung 5 mit den Werten aus 15 zur Berechnung der Temperatur aus den aufgezeichneten Werten (vgl. Tab. 3.1-3.5). Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.10 und in Abbildung 8 dargestellt.

$U_{Heiz}[\text{V}]$	$I_{Heiz}[\text{A}]$	T[kK]
4,200	2,100	1,959
4,800	2,200	2,059
5,000	2,300	2,108
5,900	2,500	2,254
6,100	2,600	2,298

**Tabelle 3.10:** Kathodentemperatur unter Heizleistungsvariation

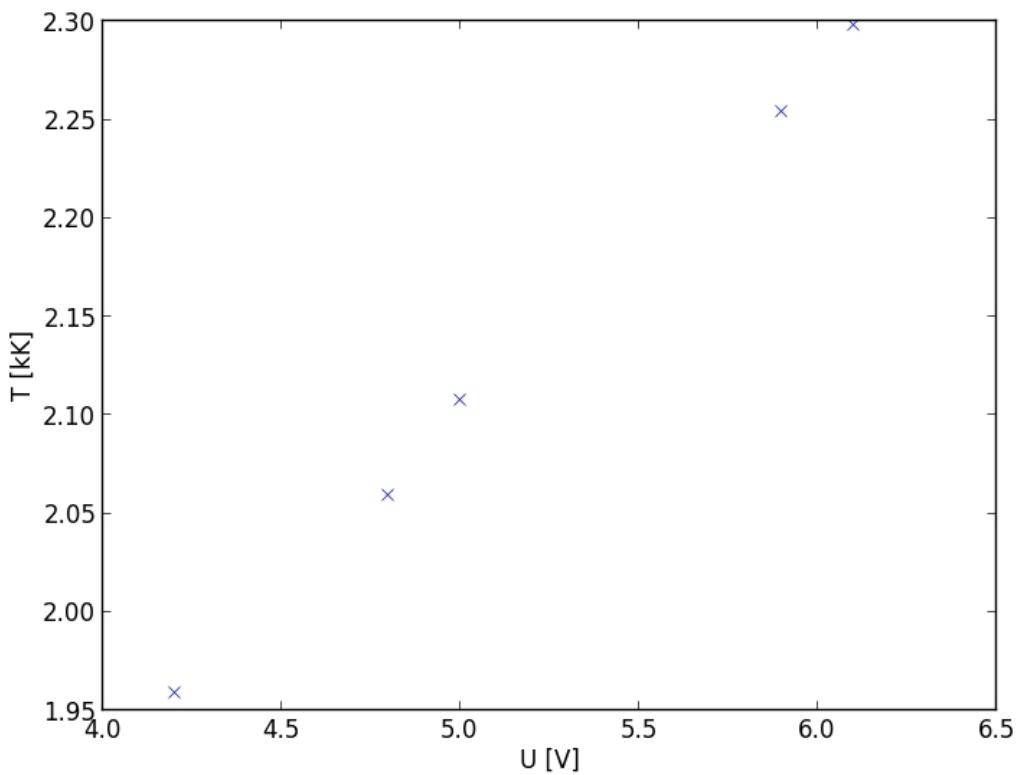


Abbildung 8: Kathodentemperatur unter Heizleistungsvariation

### 3.5 Austrittsarbeit des Kathodenmaterials

Um die Austrittsarbeit der Wolfram-Kathode nach der Richardson-Gleichung 3 zu berechnen, werden die T Werte aus Tabelle 3.10 und die Sättigungsstromwerte aus Tabelle 3.6 verwendet. Die Ergebnisse für die Austrittsarbeit  $e_o\varphi$  sind in Tabelle 3.11 zusammengefasst. Der Mittelwert der Austrittsarbeit  $\overline{e_o\varphi}$ , welcher nach Gleichung 26 berechnet wird, beträgt:

$$\overline{e_o\varphi} = 4,84\bar{3} \quad (25)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (26)$$

$I_S[\text{mA}]$	$e_0\varphi[\text{eV}]$
0,16	4,71
0,38	4,81
0,72	4,82
2,80	4,91
3,50	4,97

**Tabelle 3.11:** Austrittsarbeit (Wolfram)

## 4 Diskussion

### 4.1 Langmuir-Schottkysches-Gesetz

Der Theoriewert des Exponenten der Strom-Spannungs-Beziehung lässt sich aus Gleichung 4 ablesen. Der Exponent der Messwerte wurde in Gleichung 10 bestimmt.

$$\text{Theorie : } I \sim U^{\alpha_{\text{errechnet}}} = U^{\frac{3}{2}} = U^{1,5} \quad (27)$$

$$\text{Messung : } I \sim U^{\alpha_{\text{mess}}} = U^{1,18} \quad (28)$$

$$\Delta\alpha = 22\% \quad (29)$$

Dieser Unterschied bedeutet, wie auch in Abbildung 6 zu erkennen ist, dass die Stromstärke mit steigender Spannung nicht so schnell zu nimmt, wie sie es theoretisch sollte. Dieser Differenz könnten Stromstärkeverluste an zu Grunde liegen, die daher kommen, dass auf Grund eines Hochvakuums geringer Qualität zu viele Elektronen an Luftmolekülen wechselwirken.

### 4.2 Kathodentemperatur bei Saugspannung

Die Messergebnisse der Kathodentemperatur sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst (vgl. Tab. 3.10).

$U_{\text{Heiz}}[\text{V}]$	$I_{\text{Heiz}}[\text{A}]$	$T[\text{kK}]$
4,2	2,1	2,0
4,8	2,2	2,1
5,0	2,3	2,1
5,9	2,5	2,3
6,1	2,6	2,3

**Tabelle 4.1:** Kathodentemperatur unter Heizleistungsvariation

### 4.3 Austrittsarbeit des Kathodenmaterials

Die errechnete Austrittsarbeit (Gl.25) unterscheidet sich von dem Literaturwert[3].

$$e_0\varphi_{Lit} = 4,53\text{eV} \quad (30)$$

$$e_0\varphi_{mess} = 4,84\text{eV} \quad (31)$$

$$\Delta e_0\varphi = 6,9\% \quad (32)$$

Ein Grund für diesen Unterschied könnte sein, dass die reale Temperatur geringer war, als die aus den Messergebnissen errechnete.

### Literatur

- [1] *Versuch Nr.504 – Thermische Elektronenemission.*
- [2] John R. Taylor. *An introduction to error analysis.* University Science Books, 2 edition, 1997.
- [3] Dr. Rolf Winter. *Das große Tafelwerk.* Cornelsen, 2009.

## Versuch S04

25.10.12

Heizstrom in A	Heizspannung in V	Anodenspannung in V	Anodenstrom in mA
2,1	4,2	10	0,044
		20	0,088
		30	0,108
		40	0,119
		50	0,126
		60	0,128
		70	0,132
		80	0,135
		90	0,138
		100	0,141
		110	0,144
		120	0,146
			0,147
			0,149
			0,150
			0,151
			0,152
		180	0,54
		190	0,155
		200	0,156
		210	0,157

kg

Heizstrom	Heizspannung		
2,2	4,8	10	0,1049
	0,625,0	20	0,123
	1,025,0	30	0,187
	1,225,0		0,232
	1,250,0		0,263
	1,275,0		0,287
	1,300,0	32	0,302
	1,325,0		0,310
	1,350,0	33	0,322
	1,375,0		0,330
	1,400,0		0,336
	1,425,0		0,340
	1,450,0		0,344
	1,475,0		0,348
	1,500,0		0,352
	1,525,0		0,355
	1,550,0		0,359
	1,575,0		0,362
	1,600,0		0,366
	1,625,0		0,368
	1,650,0		0,371
	1,675,0		0,373
	1,700,0		0,375
	1,725,0		0,377
	1,750,0	35	0,380
		250	
			Wg

2,3	5,0	16	0,050
		20	0,135
		30	0,230
		32	0,309
			0,367
			0,421
			0,479
		80	0,528
			0,555
		100	0,589
			0,622
			0,642
			0,655
			0,665
			0,671
		160	0,677
			0,682
			0,686
			0,692
			0,697
			0,702
			0,706
			0,709
			0,713
		250	0,717

JH

KC

2,5

5,9

10

0,061

0,163

0,275

0,383

50

0,480

0,575

0,689

0,812

0,947

100

0,1042

1,131

1,229

1,343

1,452

150 1,560

1,666

1,775

1,882

1,984

200

2,09

2,18

2,28

2,37

2,45

2,53

Kg

kg

2,6	6,100,0	10	0,063	2,2
			0,170	
			0,288	
			0,398	
	50		0,514	
			0,606	
			0,711	
			0,828	
			0,958	
	100		1,107	
			1,282	
			1,399	
			1,494	
			1,593	
	150		1,730	
			1,865	
			2,00	
			2,14	
			2,29	
	200		2,44	
			2,58	
			2,72	
			2,86	
	240		2,90	
	245		3,11	
				AC

## Anlauf Strom:

Heizstrom	Heizspannung	Gegenspannung	Anlaufstrom in mA
2,6	6,1	0,02 0,06 0,1 0,14 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1	<del>115</del> <del>102</del> <del>90</del> 115 91 65 44,5 30 20 12,5 7,5 4,5 <del>2,9</del> 1,65
			Weg