

### Thermische Elektronenemission

Im vorliegenden Experiment wird die Erzeugung freier Elektronen durch den glühelektrischen Effekt untersucht. Insbesondere wird die Temperaturabhängigkeit erforscht, und die Austrittsarbeit des hier verwendeten Wolframs bestimmt. Zu diesem Zweck werden fünf Kennlinien aufgezeichnet, aus denen sich die nötigen Parameter errechnen lassen.

Das Experiment muss im Hochvakuum durchgeführt werden (wie sich der geneigte Leser schnell anhand einer Dimensionsanalyse klar machen kann), so dass sich die Verwendung einer Hochvakuumdiode anbietet. Diese hat folgenden Aufbau:

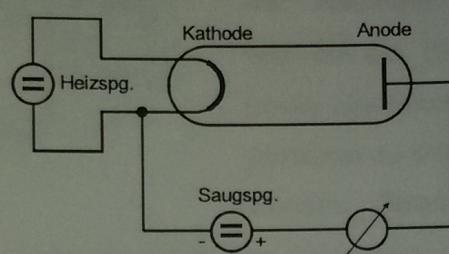


Abbildung 1

Die Kathode wird durch einen starken Heizstrom (ca. 2,6 A) auf etwa 3000 K geheizt. Die aus ihr austretenden Elektronen werden durch eine angelegte Saugspannung von bis zu 300 V in Richtung Anode beschleunigt.

Eine typische Kennlinie (Abb. 2), in der die Spannung zwischen Kathode und Anode gegen den fließenden Strom aufgetragen wird, hat folgende Gestalt:

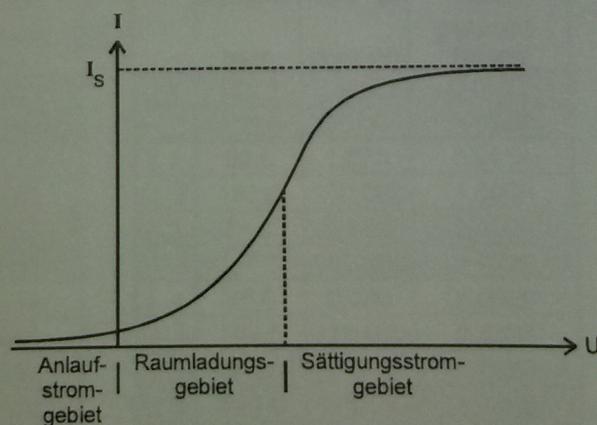


Abbildung 2

Sie gliedert sich in drei Gebiete, zunächst sei hier das Anlaufstromgebiet behandelt. Es fällt auf, dass selbst für kleine Gegenspannungen ein Stromfluss stattfindet. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die aus der Kathode austretenden Elektronen eine statistisch verteilte Bewegungsenergie haben. Es existieren also endlich viele Elektronen, die schnell genug sind, um trotz Gegenspannung die Anode zu erreichen. Die Abhängigkeit der Stromdichte von der Gegenspannung V und der Temperatur T ist gegeben durch:

$$j(V) = \text{const} \exp\left(-\frac{e_0 V}{k_B T}\right) \quad (1)$$

An das Anlaufstromgebiet schließt sich das Raumladungsgebiet an. In diesem Spannungsbereich erreichen nicht alle Elektronen die Anode, da aufgrund der beschleunigten Bewegung der Elektronen die Raumladungsdichte nach (2) abnimmt. Es enden also einige Feldlinien an den Raumladungselektronen vor der Kathode, so dass nicht mehr alle Elektronen vom Anodenfeld erfasst werden:

$$j = -\rho v \quad (2)$$

Anstelle des Ohmschen Gesetzes gilt daher in diesem Bereich das Langmuir-Schottkysche Raumladungsgesetz:

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

Die Beziehung  $j \sim V^{3/2}$  stellt dabei aufgrund der Herleitung eine Näherung dar. Der Exponent soll im Folgenden bestimmt werden.

Das Raumladungsgebiet geht in das Sättigungsstromgebiet über. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass alle austretenden Elektronen die Anode erreichen. Der Grenzstrom hängt nur noch von der Temperatur und der Austrittsarbeit ab und ist durch die Richardson-Gleichung gegeben:

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

**a) Kennlinienschar und Sättigungsstrom**

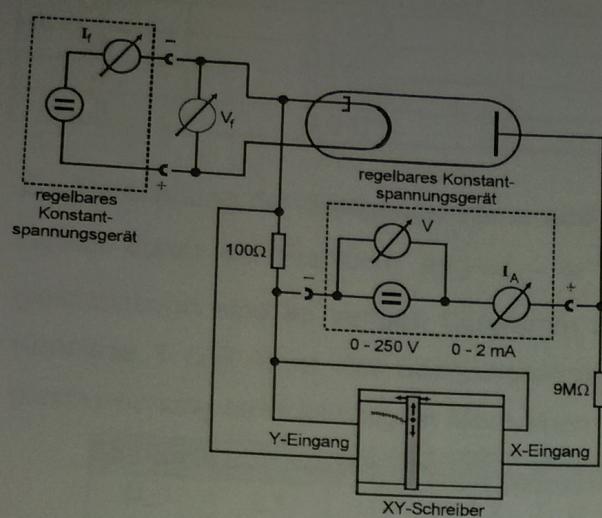


Abbildung 3

Zur Aufnahme der Diodenkennlinien wird folgende Schaltung verwendet (Abb. 3). Die Kennlinienschar befindet sich im Anhang, ebenso die Messdaten.

Ein X-Y-Schreiber zeichnet die Abhängigkeit des Diodenstromes von der Kathodenspannung auf. Dazu wird die am  $100\Omega$ -Widerstand abfallende Spannung gemessen, die proportional zu dem durch die Diode fließenden Strom ist. Die Kathoden-

spannung wird durch den  $1\text{ M}\Omega$ -Innenwiderstand des Schreibers und den zusätzlichen  $9\text{ M}\Omega$ -Widerstand um den Faktor 10 heruntergeteilt. Die Kalibrierung des Schreibers erfolgt durch Zeichnen von drei Eichstrichen pro Kennlinie.

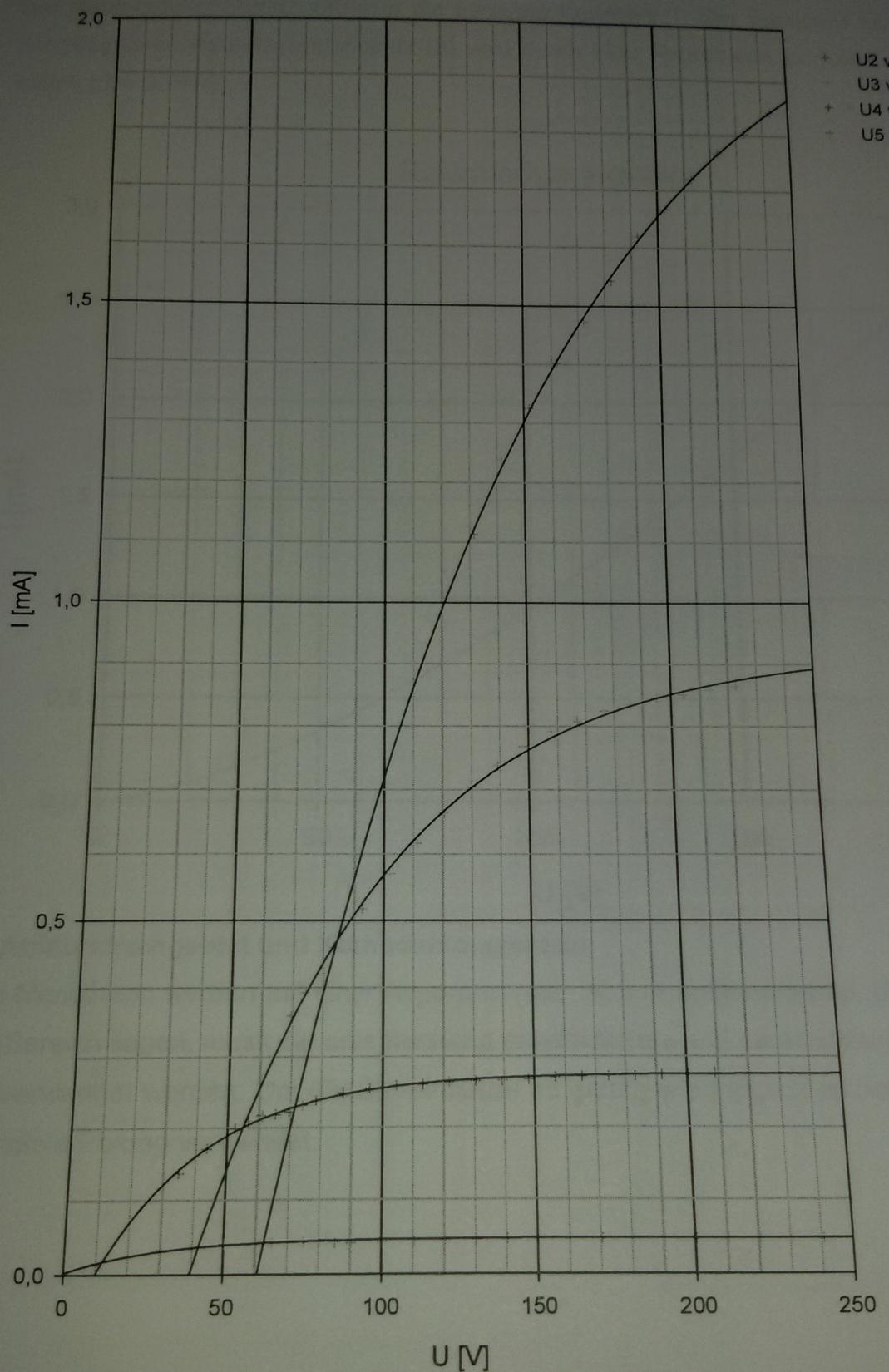
Die Kennlinien werden vermessen und die Daten mit Hilfe der aus der Kalibrierung gewonnenen Faktoren korrekt skaliert.

Skalierungsfaktoren (1. + 2.)			
	Abstand [mm]	Abstand [mA], [V]	Faktor [mA/mm], [V/mm]
I_1	40,0	0,810	0,0203
U_1	55,5	50,000	0,9009
I_2	60,5	0,710	0,0117
U_2	78,0	80,000	1,0256
I_3	55,0	0,356	0,0065
U_3	65,0	60,000	0,9231
I_4	37,0	0,067	0,0018
U_4	81,5	70,000	0,8589
I_5	24,5	0,020	0,0008
U_5	60,0	60,000	1,0000

Skalierungsfaktoren (1. + 3.)			
	Abstand [mm]	Abstand [mA], [V]	Faktor [mA/mm], [V/mm]
I_1	103,5	2,000	0,0193
U_1	135,0	120,000	0,8889
I_2	90,5	1,070	0,0118
U_2	150,0	150,000	1,0000
I_3	84,0	0,583	0,0069
U_3	171,5	160,000	0,9329
I_4	45,0	0,089	0,0020
U_4	192,5	170,000	0,8831
I_5	47,0	0,040	0,0009
U_5	179,0	180,000	1,0056

Mittelwerte
0,01979
0,89489
0,01178
1,01282
0,00671
0,92801
0,00189
0,87101
0,00083
1,00279

Sättigungsstromgebiet



29.04.2002

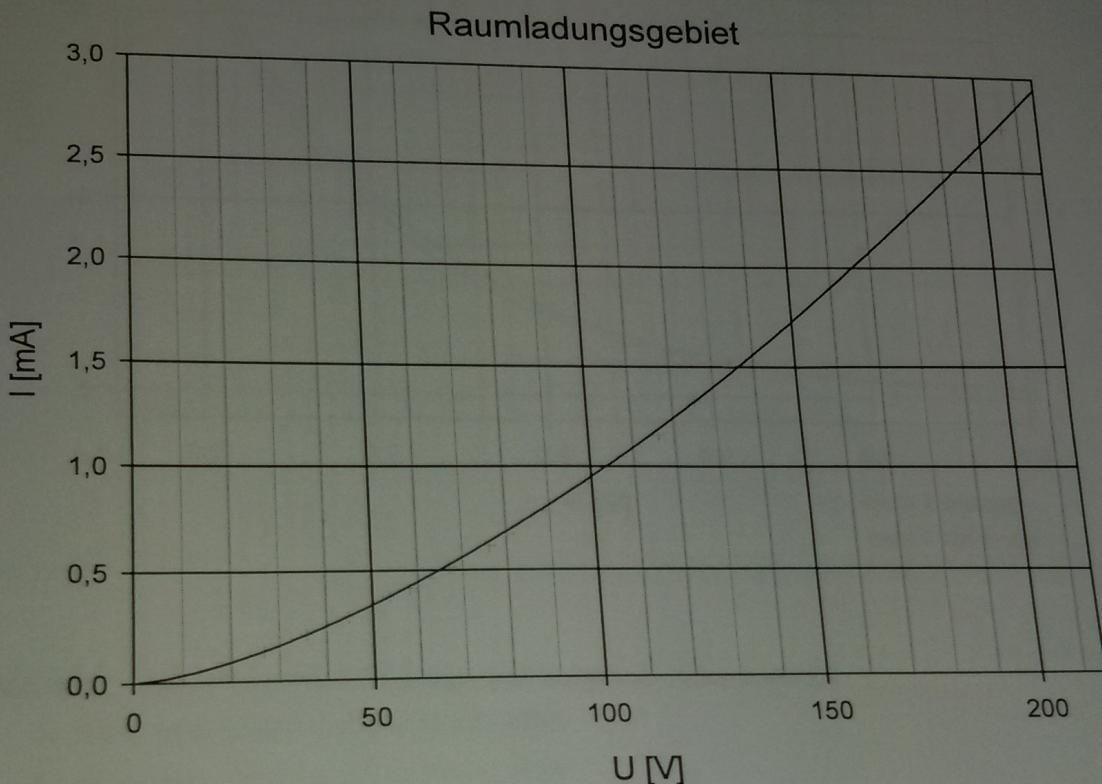
Linien-Nr.	Sättigungsstrom [mA]	Standardabweichung [mA]	Korrelationskoeffizient
2	2,1872	0,0290	0,9998
3	0,9263	0,0084	0,9992
4	0,2756	0,0012	0,9970
5	0,0479	0,0005	0,9735

Zur Berechnung der Sättigungsströme wird angenommen, dass die Kennlinien in diesem Gebiet durch die Funktion  $j(V) = I_s - Ae^{-BV}$  angenähert werden können. Diese Ausgleichskurven sind im vorigen Diagramm zusätzlich zu den Messdaten dargestellt. Bei Kennlinie 1 (2,7 A) ist das Sättigungsstromgebiet nicht zu erkennen. Die bei der Ausgleichsrechnung berücksichtigten Messdaten sind in der Tabelle farbig markiert.

Skalierte Messdaten										
U_1	I_1 2,7 A [mA]	U_2	I_2 2,4 A [mA]	U_3	I_3 2,3 A [mA]	U_4	I_4 2,1 A [mA]	U_5	I_5 1,9 A [mA]	
0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000	
8,95	0,0396	10,13	0,0471	9,28	0,0302	8,71	0,0284	10,03	0,0125	
17,90	0,0890	20,26	0,1060	18,56	0,0671	17,42	0,0616	20,06	0,0258	
26,85	0,1385	30,38	0,1708	27,84	0,1140	26,13	0,0985	30,08	0,0342	
35,80	0,2078	40,51	0,2356	37,12	0,1576	34,84	0,1373	40,11	0,0383	
44,74	0,2869	50,64	0,3180	46,40	0,2113	43,55	0,1705	50,14	0,0409	
53,69	0,3759	60,77	0,4064	55,68	0,2683	52,26	0,1989	60,17	0,0425	
58,17	0,4155	65,83	0,4476	60,32	0,2884	56,62	0,2093	65,18	0,0429	
62,64	0,4650	70,90	0,4947	64,96	0,3253	60,97	0,2169	70,20	0,0434	
67,12	0,5145	75,96	0,5536	69,60	0,3588	65,33	0,2178	75,21	0,0438	
71,59	0,5639	81,03	0,6066	74,24	0,3923	69,68	0,2216	80,22	0,0434	
76,07	0,6134	86,09	0,6596	78,88	0,4259	74,04	0,2311	85,24	0,0429	
80,54	0,6728	91,15	0,7185	83,52	0,4594	78,39	0,2377	90,25	0,0417	
89,49	0,7816	101,28	0,8187	92,80	0,5164	87,10	0,2482	100,28	0,0434	
98,44	0,9201	111,41	0,9070	102,08	0,5701	95,81	0,2538	110,31	0,0450	
107,39	1,0487	121,54	1,0071	111,36	0,6170	104,52	0,2576	120,34	0,0454	
116,34	1,1575	131,67	1,1132	120,64	0,6640	113,23	0,2595	130,36	0,0454	
125,29	1,3257	141,79	1,2368	129,92	0,7042	121,94	0,2624	140,39	0,0459	
134,23	1,5038	151,92	1,3252	139,20	0,7377	130,65	0,2643	150,42	0,0463	
143,18	1,6522	162,05	1,4017	148,48	0,7679	139,36	0,2652	160,45	0,0463	
152,13	1,7907	172,18	1,4724	157,76	0,7914	148,07	0,2671	170,47	0,0467	
161,08	1,9391	182,31	1,5431	167,04	0,8081	156,78	0,2690	180,50	0,0467	
170,03	2,0974	192,44	1,6197	176,32	0,8249	165,49	0,2709	190,53	0,0471	
178,98	2,2458	202,56	1,6668	185,60	0,8350	174,20	0,2718	200,56	0,0471	
187,93	2,4239	212,69	1,7198	194,88	0,8450	182,91	0,2728	210,59	0,0475	
196,88	2,5723	222,82	1,7669	204,16	0,8517	191,62	0,2737	220,61	0,0475	
205,83	2,7306	232,95	1,8022	213,44	0,8584	200,33	0,2747	230,64	0,0479	
214,77	2,9087	243,08	1,8435	222,72	0,8652	209,04	0,2756	240,67	0,0479	

**b) Raumladungsbereich und Strom-Spannungs-Beziehung**

Der Raumladungsbereich umfasst die gesamte Kennlinie 1. Der Exponent im Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetz (3) wird durch eine Regression zu  $1,479 \pm 0,009$  ermittelt ( $R = 0,9998$ ).



**c) Anlaufstromgebiet und Kathodentemperatur**

Die Messdaten werden mit einer Apparatur nach Abb. 4 aufgenommen. Da die Ströme im nA-Bereich liegen, muss ein entsprechend empfindliches und damit störanfälliges Messgerät verwendet werden. Um die Störeinflüsse so gering wie möglich zu halten, wird die abgebildete Polung verwendet.

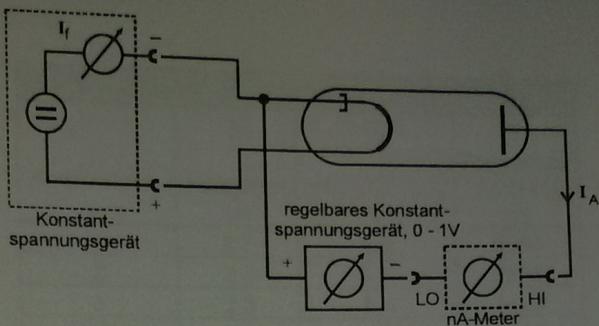


Abbildung 4

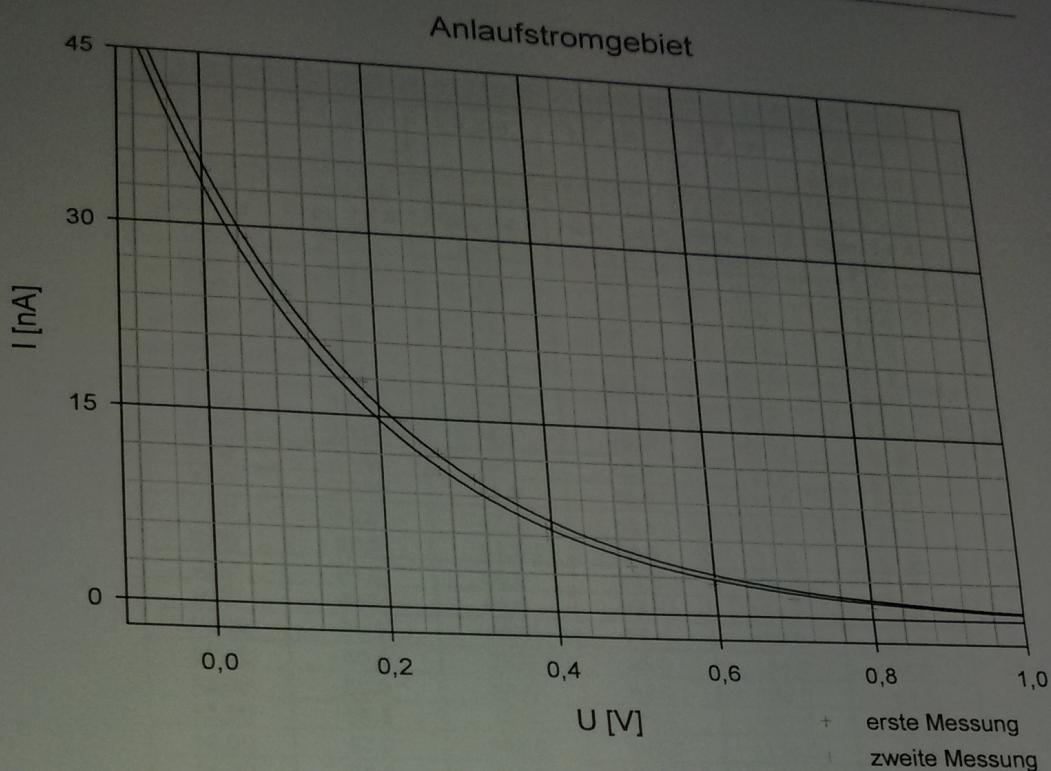
Um die Größe der auftretenden Schwankungen abschätzen zu können, wird die Messung zweimal durchgeführt.

Aufgrund des Spannungsabfalls am Innenwiderstand des Amperemeters von  $1 \text{ M}\Omega$  müssen die vom Voltmeter angezeigten Spannungswerte korrigiert werden:

$$U_{\text{korr}} = U - R_{\text{innen}} I \quad (5)$$

Anschließend wird mittels (1) eine Ausgleichsrechnung durchgeführt, um die Kathoden-temperatur  $T$  zu bestimmen.

Messdaten		Heizung: 2,7A / 6,5V			Umrechnung	
$U$ Gegenspannung, $\pm 0,01 \text{ V}$ [V]	$I_1$ Diodenstrom erste Messung [nA]	$I_2$ Diodenstrom zweite Messung [nA]	Err $I_1, 2$ Messfehler der Stommessungen [nA]	$U_{1, \text{korr}}$ (5) [V]	$U_{2, \text{korr}}$ (5) [V]	
0,00	40,50	38,00	0,5	-0,0405	-0,0380	
0,04	34,50	32,50	0,5	0,0055	0,0075	
0,08	29,00	27,50	0,5	0,0510	0,0525	
0,12	24,50	23,00	0,5	0,0955	0,0970	
0,16	20,50	19,00	0,5	0,1395	0,1410	
0,20	17,75	16,50	0,25	0,1823	0,1835	
0,24	14,75	13,50	0,25	0,2253	0,2265	
0,28	12,25	11,00	0,25	0,2678	0,2690	
0,32	10,25	9,00	0,25	0,3098	0,3110	
0,40	6,75	6,00	0,25	0,3933	0,3940	
0,50	4,30	3,80	0,05	0,4957	0,4962	
0,60	2,55	2,25	0,05	0,5975	0,5978	
0,70	1,50	1,30	0,05	0,6985	0,6987	
0,80	0,90	0,75	0,025	0,7991	0,7993	



Aus der Ausgleichsrechnung ergeben sich folgende Temperaturen:

1. Messung:  $(2932 \pm 52)$  K,  $R = 0,9991$
2. Messung:  $(2843 \pm 57)$  K,  $R = 0,9989$

Mittelwert:  $(2889 \pm 45)$  K

#### d) Kathodentemperaturen

Aus den ermittelten Spannungs- und Stromwerten für den Heizkreis lässt sich nach

$$T = \sqrt[4]{\frac{I_f U_f - N_{WL}}{f \eta \sigma}} \quad (6)$$

die Temperatur der Kathode berechnen, wobei  $N_{WL}$  zu 1 W abgeschätzt wurde. Die übrigen Konstanten wurden dem Skript entnommen.

Temperaturen			
Kennliniennr.	I <sub>r</sub> Heizstrom [A]	U <sub>r</sub> Heizspannung [V]	T Temperatur nach (6) [K]
1	2,7	6,5	2386
2	2,4	5,5	2211
3	2,3	5,0	2129
4	2,1	4,5	2017
5	1,9	4,0	1896

Die Temperaturen liegen in derselben Größenordnung wie in c).

### e) Austrittsarbit für Wolfram

Die Richardson-Gleichung (4) lässt sich wie folgt umstellen:

$$\Phi = -\frac{k_B T}{e_0} \ln \left( \frac{I_s h^3}{4\pi f e_0 m_0 k_B T^2} \right) \quad (7)$$

Austrittsarbit			
Kennliniennr.	T Temperatur aus d) [K]	I <sub>s</sub> Sättigungsstrom aus a) [mA]	Φ Austrittsarbit [eV]
2	2211	2,187	4,80
3	2129	0,926	4,77
4	2017	0,276	4,71
5	1896	0,048	4,69

4,74 ± 0,05

Mittelwert

Das Ergebnis liegt in derselben Größenordnung wie der Literaturwert von 4,5 eV.

### Messdaten

U_cm cm auf der X-Achse des Plots [cm]	I_1_cm cm auf der Y- Achse des Plots, 2,7 A [mm]	I_2_cm cm auf der Y- Achse des Plots, 2,4 A [mm]	I_3_cm cm auf der Y- Achse des Plots, 2,3 A [mm]	I_4_cm cm auf der Y- Achse des Plots, 2,1 A [mm]	I_5_cm Blatt 2, cm auf der Y- Achse des Plots, 1,9 A [mm]
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	2,0	4,0	4,5	15,0	15,0
2,00	4,5	9,0	10,0	32,5	31,0
3,00	7,0	14,5	17,0	52,0	41,0
4,00	10,5	20,0	23,5	72,5	46,0
5,00	14,5	27,0	31,5	90,0	49,0
6,00	19,0	34,5	40,0	105,0	51,0
6,50	21,0	38,0	43,0	110,5	51,5
7,00	23,5	42,0	48,5	114,5	52,0
7,50	26,0	47,0	53,5	115,0	52,5
8,00	28,5	51,5	58,5	117,0	52,0
8,50	31,0	56,0	63,5	122,0	51,5
9,00	34,0	61,0	68,5	125,5	50,0
10,00	39,5	69,5	77,0	131,0	52,0
11,00	46,5	77,0	85,0	134,0	54,0
12,00	53,0	85,5	92,0	136,0	54,5
13,00	58,5	94,5	99,0	137,0	54,5
14,00	67,0	105,0	105,0	138,5	55,0
15,00	76,0	112,5	110,0	139,5	55,5
16,00	83,5	119,0	114,5	140,0	55,5
17,00	90,5	125,0	118,0	141,0	56,0
18,00	98,0	131,0	120,5	142,0	56,0
19,00	106,0	137,5	123,0	143,0	56,5
20,00	113,5	141,5	124,5	143,5	56,5
21,00	122,5	146,0	126,0	144	57,0
22,00	130,0	150,0	127,0	144,5	57,0
23,00	138,0	153,0	128,0	145	57,5
24,00	147,0	156,5	129,0	145,5	57,5

