

TU Dortmund

V504 - Thermische Elektronenemission

Markus Stabrin
markus.stabrin@tu-dortmund.de

Kevin Heinicke
kevin.heinicke@tu-dortmund.de

Versuchsdatum: 15. Januar 2013

Abgabedatum: 21. Januar 2013

1 Einleitung

2 Theorie

3 Aufbau und Durchführung

4 Auswertung

4.1 Sättigungsströme und Kennlinien der Hochvakuumdiode

Um den Sättigungsstrom I_s der Diode abzuschätzen, werden für fünf Heizstromstärken I_H die Kennlinien aufgetragen. Hierfür wird der Diodenstrom I gegen das Diodenpotential U aufgetragen. Für Ströme $I > 1,25 \text{ mA}$ zeigt das Strommessgerät eine Überlastung an. Weil dieser Wert jedoch bei den Heizstromstärken $I_H = 2,9 \text{ A}$ und $I_H = 3,1 \text{ A}$ erreicht wird, bevor ein Abflachen der Kurve erkannt werden kann, können lediglich drei Sättigungsströme abgelesen werden:

$$\begin{aligned} I_H = 2 \text{ A}, U_H = 3 \text{ V} &\Rightarrow I_{s,1} = 4 \text{ nA} \\ I_H = 2,3 \text{ A}, U_H = 3,5 \text{ V} &\Rightarrow I_{s,2} = 40 \text{ nA} \\ I_H = 2,6 \text{ A}, U_H = 4 \text{ V} &\Rightarrow I_{s,3} = 0,32 \text{ mA} \end{aligned}$$

Die Folgenden zwei Graphen visualisieren die Messdaten, sowie die geschätzten Sättigungsströme I_s . Die Messdaten sind anschließend in Tabelle 4.4 aufgeführt.

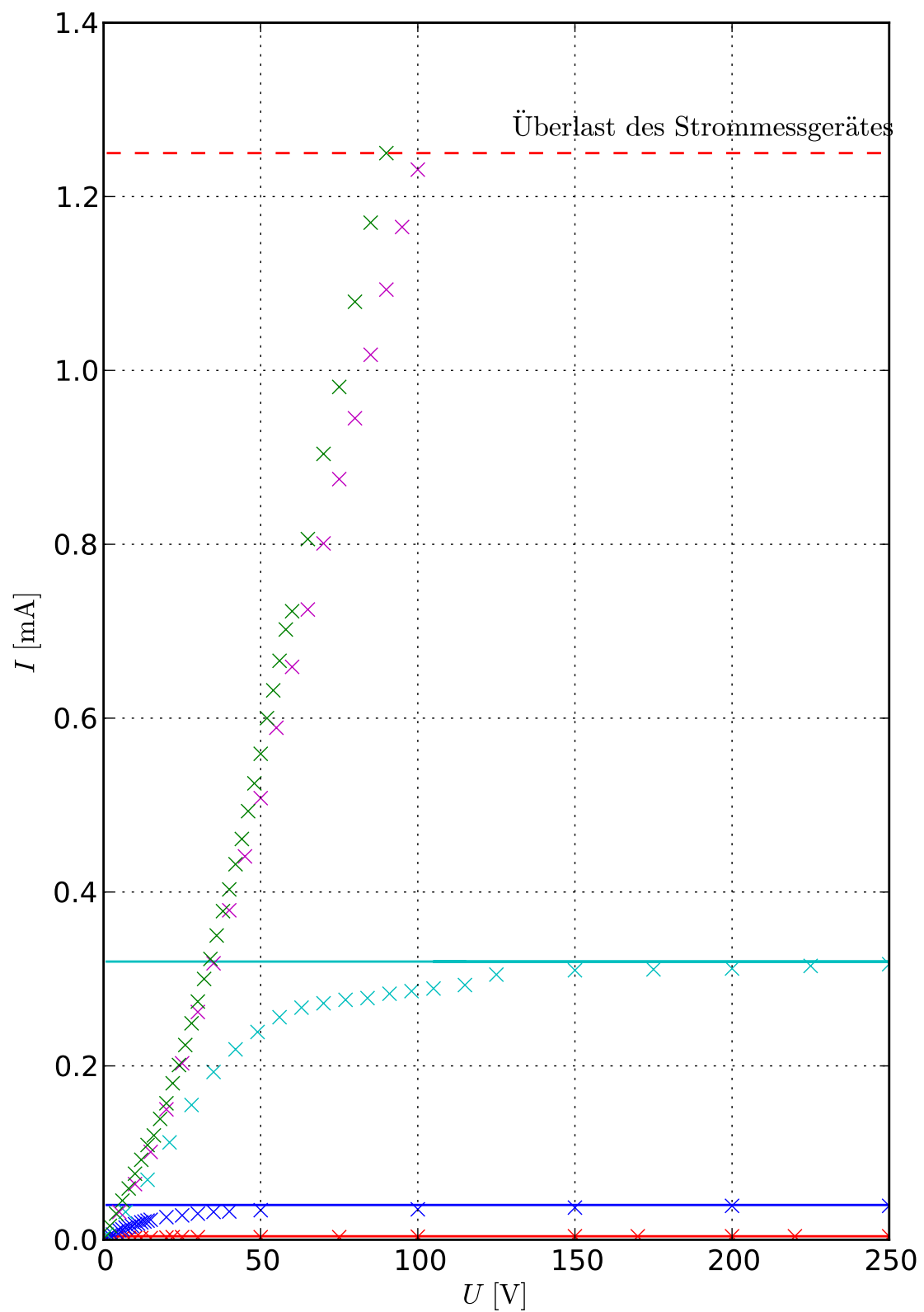


Abbildung 1: Kennlinien der Hochvakuumdiode für Heizströme von $I_s = 2\text{ A}$ bis $I_s = 3,1\text{ A}$.

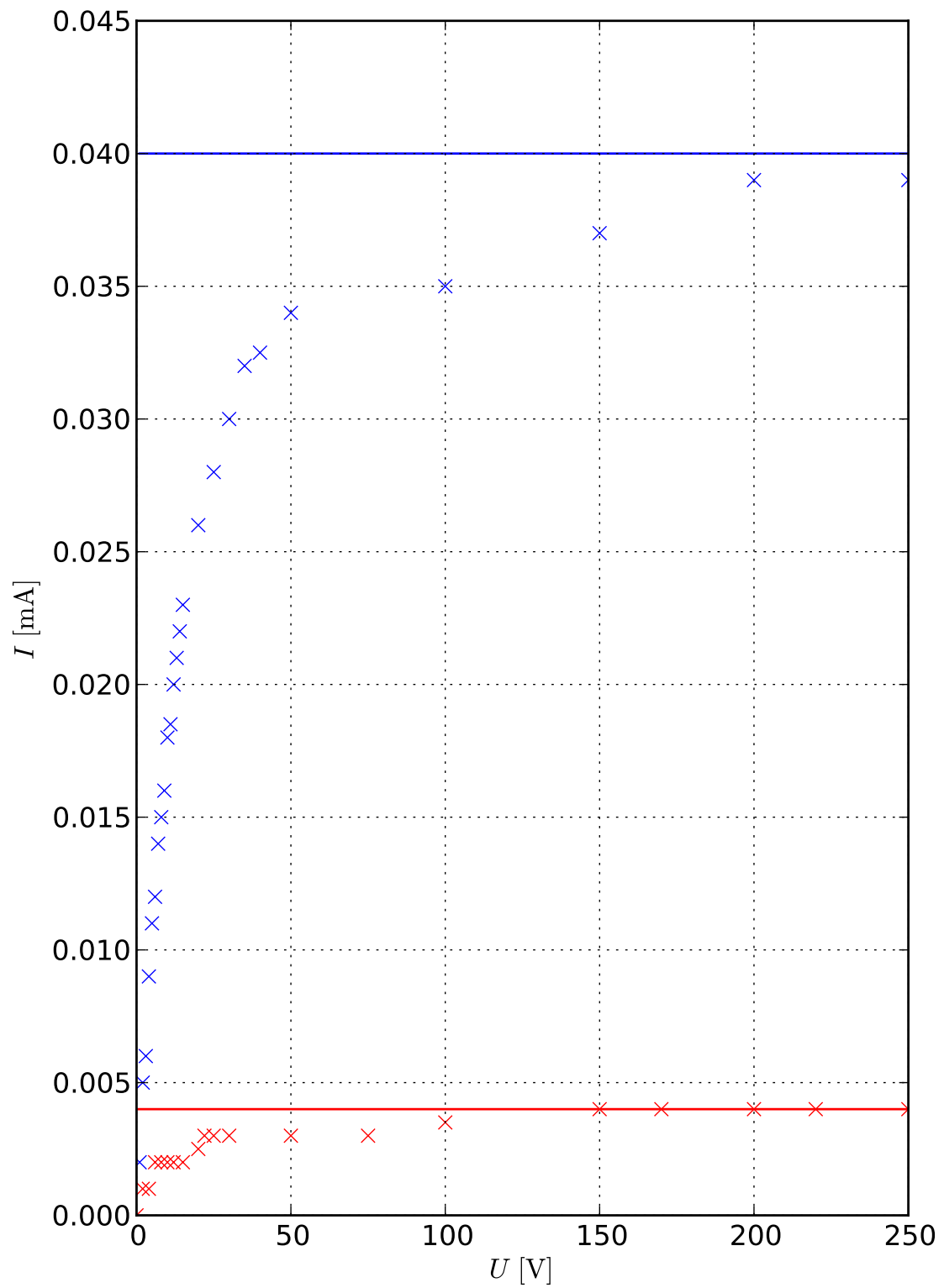


Abbildung 2: Kennlinien der Hochvakuumdiode für Heizströme von $I_s = 2$ A und $I_s = 2,3$ A. In dieser Auflösung lassen sich die Werte besser erkennen.

Tabelle 1: Messwerte für die Diodenkennlinien.

$I_H = 2\text{ A}$ $U_H = 3\text{ A}$		$I_H = 2,3\text{ A}$ $U_H = 3,5\text{ A}$		$I_H = 2,6\text{ A}$ $U_H = 4\text{ A}$		$I_H = 2,9\text{ A}$ $U_H = 5\text{ A}$		$I_H = 3,1\text{ A}$ $U_H = 6\text{ A}$	
$U\text{ [V]}$	$I\text{ [mA]}$	$U\text{ [V]}$	$I\text{ [mA]}$	$U\text{ [V]}$	$I\text{ [mA]}$	$U\text{ [V]}$	$I\text{ [mA]}$	$U\text{ [V]}$	$I\text{ [mA]}$
0	0	0,0020	1	0,006	001	0,032	005	0	0,001
0,001	2	0,0050	2	0,032	007	0,064	010	2	0,016
0,001	4	0,0060	3	0,069	014	0,101	015	4	0,030
0,002	6	0,0090	4	0,112	021	0,150	020	6	0,045
0,002	8	0,0110	5	0,155	028	0,203	025	8	0,059
0,002	10	0,0120	6	0,193	035	0,262	030	10	0,076
0,002	12	0,0140	7	0,219	042	0,318	035	12	0,092
0,002	15	0,0150	8	0,239	049	0,379	040	14	0,109
0,0025	20	0,0160	9	0,256	056	0,441	045	16	0,120
0,003	22	0,0180	10	0,267	063	0,508	050	18	0,139
0,003	25	0,0185	11	0,272	070	0,589	055	20	0,157
0,003	30	0,0200	12	0,276	077	0,659	060	22	0,180
0,003	50	0,0210	13	0,278	084	0,725	065	24	0,201
0,003	75	0,0220	14	0,283	091	0,801	070	26	0,224
0,0035	100	0,0230	15	0,286	098	0,875	075	28	0,249
0,004	150	0,0260	20	0,305	125	0,945	080	30	0,274
0,004	170	0,0280	25	0,310	150	1,018	085	32	0,300
0,004	200	0,0300	30	0,311	175	1,093	090	34	0,323
0,004	220	0,0320	35	0,312	200	1,165	095	36	0,350
0,004	250	0,0325	40	0,315	225	1,231	100	38	0,378
		0,0340	50	0,317	250			40	0,403
		0,0350	100	0,289	105			42	0,432
		0,0370	150	0,293	115			44	0,461
		0,0390	200					46	0,493
		0,0390	250					48	0,525
								50	0,559
								52	0,600
								54	0,632
								56	0,666
								58	0,702
								60	0,723
								65	0,806
								70	0,904
								75	0,981
								80	1,079
								85	1,170
								90	1,250

4.2 Verifizierung des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes

Um die Vorhersage des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes zu prüfen, wurden bei maximalem Heizstrom $I_H = 3,1 \text{ A}$ möglichst viele Werte aufgenommen. Das Gesetz gilt in einem Bereich von $U = 0$ bis zum Wendepunkt der Diodenkennlinie. Weil in dieser Messreihe kein Wendepunkt erkennbar ist wird angenommen, dass das Gesetz für alle Werte erfüllt ist.

Es gilt dann

$$\begin{aligned} I &\propto U^a, \\ \Leftrightarrow \ln I &\propto a \ln U. \end{aligned}$$

Mit einem Konstanten Exponenten a , der durch lineare Regression ermittelt werden kann und etwa den Wert $a = 3/2$ annehmen soll.

Lineare Regression mit Hilfe des Python-Moduls numpy ergibt

$$a = 1,204 \pm 0,007.$$

Zusätzlich wird eine nicht-lineare Regression durch numpy durchgeführt und liefert

$$a = 1,380 \pm 0,008.$$

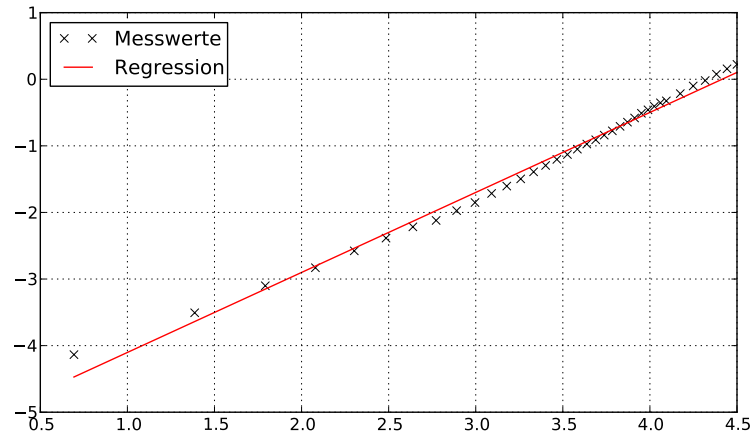


Abbildung 3: Lineare Regression der $(\ln U, \ln I)$ Wertepaare zur Kontrolle des Exponenten des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes.

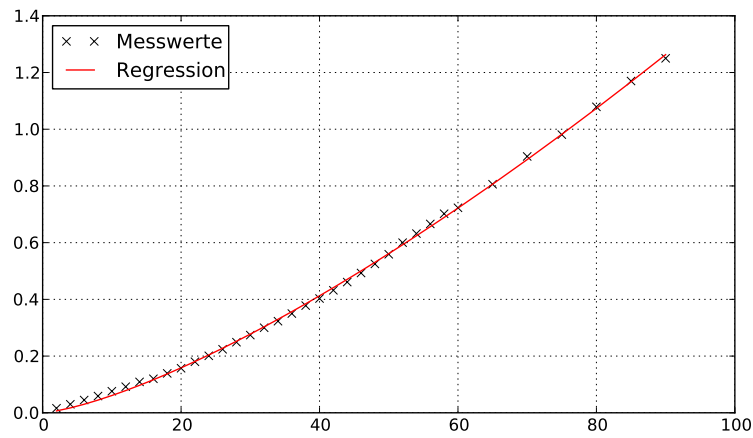


Abbildung 4: Nicht-lineare Regression der (U, I) Wertepaare zur Kontrolle des Exponenten des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes.

4.3 Bestimmung der Kathodentemperatur...

4.3.1 ...mit Hilfe des Kathodenstromes I und der Kathodenspannung U im Anlaufstromgebiet

Aus den Wertepaaren (U, I) im Anlaufstromgebiet der Diode bei maximaler Heizleistung ($I_H = 3,1 \text{ A}$), lässt sich die Temperatur T der Kathode ermitteln. Wegen der Beziehung

$$I(U) \propto \exp\left(-\frac{e_0 U}{kT}\right)$$

lässt sich T durch lineare Regression von $\ln I$ gegen $c \cdot U$ bestimmen. Die Berechnung durch numpy liefert dann den Wert für c , woraus sich T errechnen lässt. Es ist zu beachten, dass die gemessene Spannung U um die im Messgerät abfallende Spannung $U_- = I \cdot 1 \text{ M}\Omega$ korrigiert werden muss. Die Regression wird also mit $U_k = U - U_-$ durchgeführt.

Die Temperatur T ist dabei außerdem mit einem Fehler behaftet, der mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt wird. Es gilt

$$\begin{aligned} c &= -\frac{e_0}{kT} \\ \Leftrightarrow T &= -\frac{e_0}{kc}, \\ \Delta T &= \frac{e_0}{kc^2} \Delta c, \end{aligned}$$

mit der Stefan-Boltzmann Konstante $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ [2] und der Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [2].

Die Regression liefert

$$\begin{aligned} c &= (-3,360 \pm 0,088) \frac{\text{C}}{\text{J}} \\ \Rightarrow T &= (3453 \pm 90) \text{ K}. \end{aligned}$$

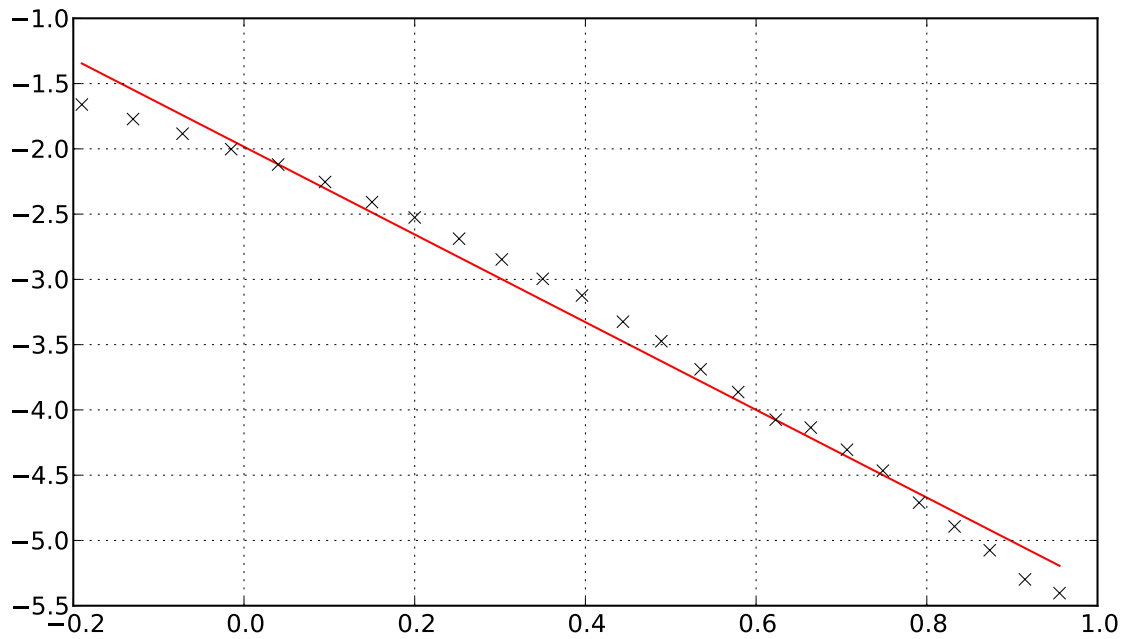


Abbildung 5: Lineare Regression von $\ln I$ gegen U_k im Anlaufstrombereich.

Tabelle 2: Messwerte für Diodenspannung U , U_k und -strom I im Anlaufstrombereich.

U [V]	U_k [V]	I [nA]	U [V]	U_k [V]	I [nA]
0,0	-0,19	0,19	0,52	0,489	0,031
0,04	-0,13	0,17	0,56	0,535	0,025
0,08	-0,072	0,152	0,6	0,579	0,021
0,12	-0,015	0,135	0,64	0,623	0,017
0,16	0,04	0,12	0,68	0,664	0,016
0,2	0,095	0,105	0,72	0,7065	0,0135
0,24	0,15	0,09	0,76	0,7485	0,0115
0,28	0,2	0,08	0,8	0,791	0,009
0,32	0,252	0,068	0,84	0,8325	0,0075
0,36	0,302	0,058	0,88	0,87375	0,00625
0,4	0,35	0,05	0,92	0,915	0,005
0,44	0,396	0,044	0,96	0,9555	0,0045
0,48	0,444	0,036			

4.3.2 ...mit Hilfe der Heizleistung $U_H I_H$

Anhand der Heizleistung $U_H I_H$ der Kathodenheizung lässt sich die Temperatur T der Kathode ebenfalls bestimmen. Es gilt dabei

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

mit der Stefan-Boltzmannschen Strahlungskonstante $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ [2], der Kathodenoberfläche $f = 0,35 \text{ cm}^2$ [1], dem Emissionsgrad $\eta = 0,28$ [2] und der Wärmeleitung $N_{WL} = 0,9$ [2]. Wegen Ablesefehlern des Heizstromes I_H und der Heizspannung U_H ist die Temperatur T fehlerbehaftet. Für den Fehler gilt nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung

$$\Delta T = \frac{1}{4} (f \eta \sigma)^{-\frac{1}{4}} |I_H U_H - N_{WL}|^{-\frac{3}{4}} (U_H \Delta I_H + I_H \Delta U_H).$$

Damit ergeben sich die Werte

I_H [A] ± 1 A	U_H [V] ± 1 V	T [K]
2	3	1741 ± 4
2,3	3,5	1894 ± 4
2,6	4	2033 ± 4
2,9	5	2224 ± 3
3,1	6	2376 ± 3

4.4 Bestimmung der Austrittsarbeit

Mit Hilfe der Richardson-Gleichung lässt sich schließlich aus den Sättigungsströmen I_s die Austrittsarbeit von Elektronen im gegebenen Material bestimmen. Es gilt

$$e_0 \Phi = -kT \cdot \ln \left(\frac{I_s \hbar^3}{4\pi e_0 m_0 k^2 T^2} \right).$$

Hier bezeichnet $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ [2] die Planck-Konstante. Man erhält

I_s [nA]	T [K]	$e_0 \Phi$ [eV]
4	1741 ± 4	7,24
40	1894 ± 4	5,65
320	2033 ± 4	7,74

Durch Bildung des Mittelwertes über alle $n = 3$ Werte und des mittleren Fehlers

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n^2 - n}},$$

erhält man für die Austrittsarbeit:

$$\overline{e_0\Phi} = (6,88 \pm 0,63) \text{ eV}.$$

5 Diskussion

Besonders auffällig sind in diesem Experiment die Abweichung der Kathodentemperatur zwischen Kapitel 4.3.1 und 4.3.2. Der Unterschied von über 30 % lässt sich nur durch Systematische Fehler erklären.

Zudem konnte die Austrittsarbeit auf Grund der kleinen Wertestichprobe nicht besonders genau bestimmt werden. Falls mehr Messwerte oberhalb von Kathodenspannungen von $U = 90 \text{ V}$ aufgenommen werden könnten, wäre die Abweichung von fast 70 % vom Literaturwert $e_0\Phi = 4,1 \text{ eV}$ eventuell geringer ausgefallen.

6 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] Physikalisches Anfängerpraktikum der TU Dortmund: Versuch Nr. 504 - Thermische Elektronenemission. Stand: Januar 2013.
- [2] National Institute of Standards and Technology: Reference on Constants, Units and Uncertainty. <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>. Stand: 16.01.2013.