

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

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Sättigungsstromdichte	3
2.2 Hochvakuum-Diode	4
2.3 Kennlinie der Hochvakuum-Diode	4
3 Durchführung	5
3.1 Kennlinienschar einer Hochvakuum-Diode	5
3.2 Bestimmung des Anlaufstromgebiets	6
4 Auswertung	6
4.1 Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes	6
4.2 Bestimmung der Kathodentemperatur	8
4.3 Bestimmung der Kathodentemperaturen und Austrittsarbeit von Wolfram	9
5 Diskussion	10
Literatur	10
Anhang	11
Messdaten	11
Originaldaten	14

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 ξ 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.

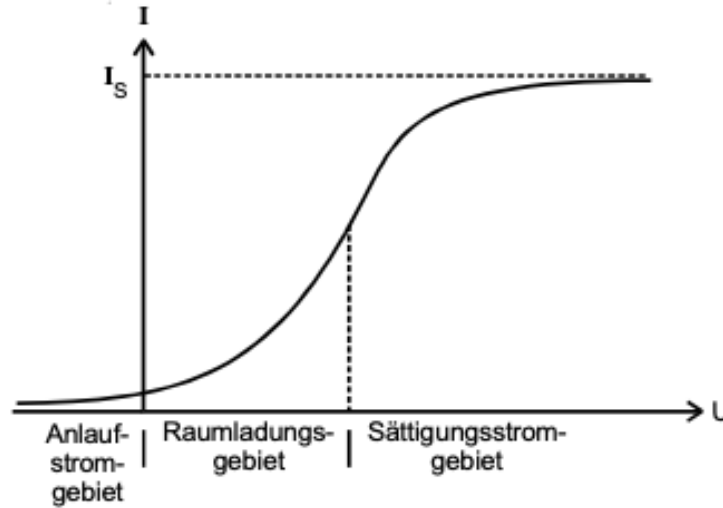


Abbildung 1: Kennlinie einer Hochvakuum-Diode Q[1].

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 ϕ_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 ρ 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 sowie die Austrittsarbeit der Kathode bestimmt werden.

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_S bestimmt.

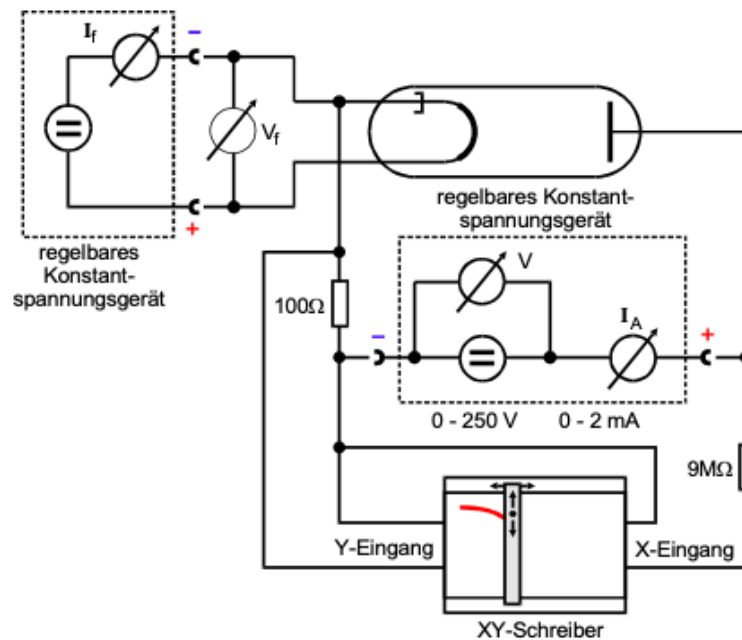


Abbildung 2: Schaltbild zur Erstellung einer Kennlinie der Hochvakuum-Diode Q[1].

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. Hierbei werden die jeweiligen Anodenspannungen und -ströme notiert. Zuletzt wird mit den aufgenommenen Daten die Kathodentemperatur sowie die Austrittsarbeit bestimmt.

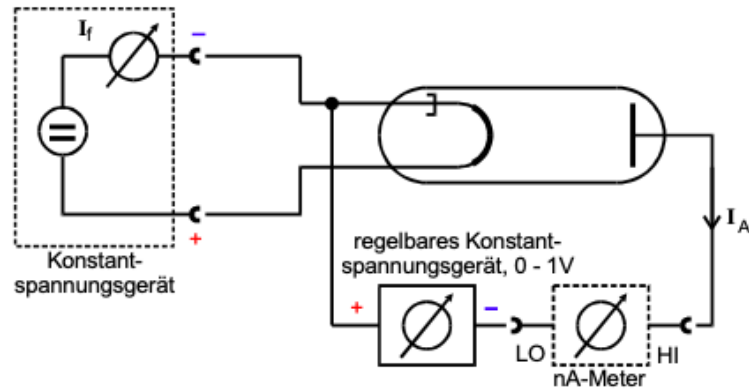


Abbildung 3: Schaltbild zur Aufnahme einer Anlaufstromkurve Q[1].

4 Auswertung

Die für die verschiedenen Heizströme I_{Heiz} bzw. Heizspannung U_{Heiz} gemessenen Werte sind in den Tabellen (3), (4) und (6) aufgetragen. Die verschiedenen Kennlinien sind in den Abbildungen (4) und (??) dargestellt.

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

4.1 Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes

Die Langmuir-Schottkysche Gleichung (??) 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

$$\log(a) = 1,26 \pm 0,02 \quad (5)$$

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

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

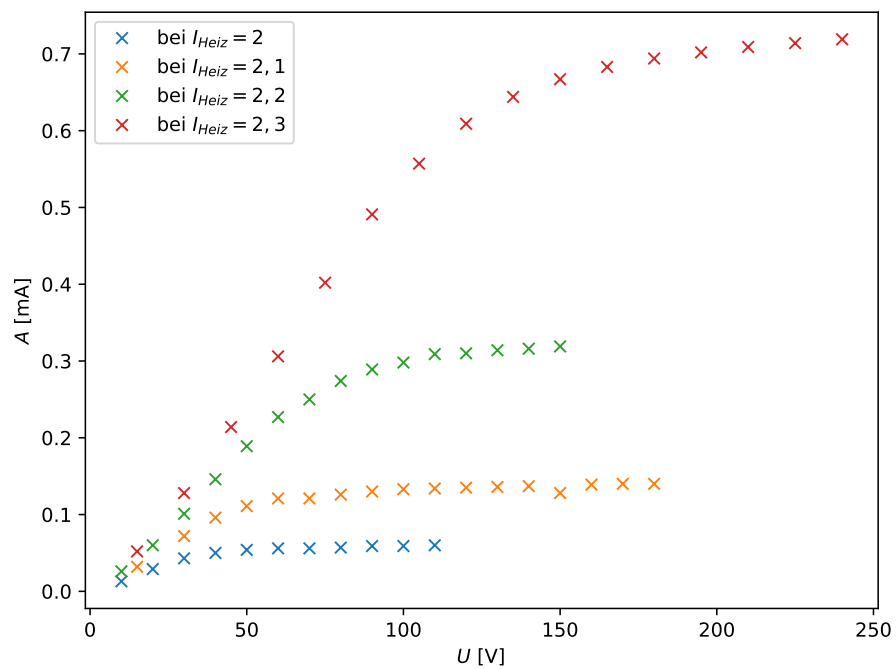


Abbildung 4: Kennlinien der Diode bei verschiedenen Heizströmen.

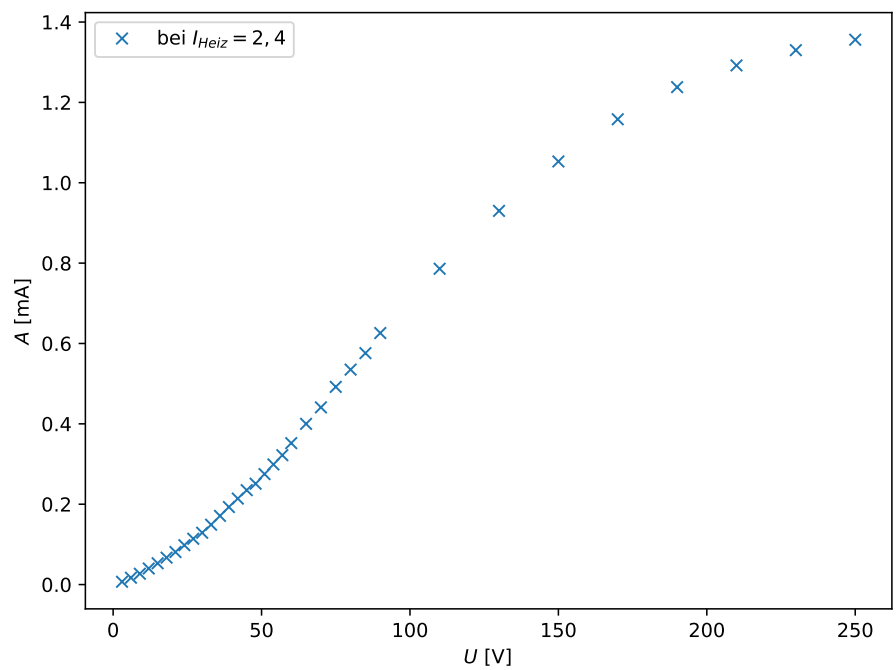


Abbildung 5: Kennlinien der Diode bei einem Heizstrom von 2,4 mA

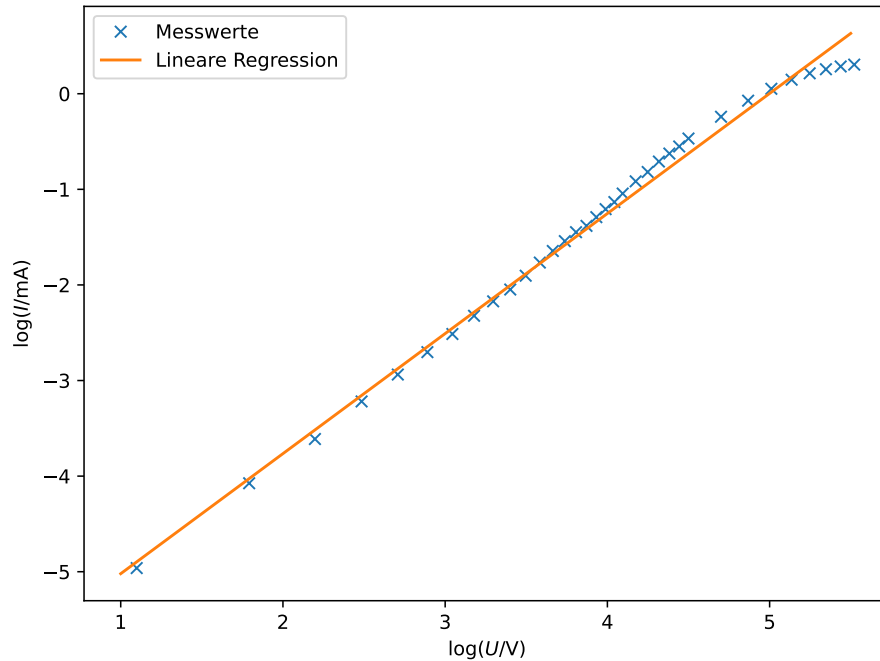


Abbildung 6: Lineare Regression der logarithmisierten, fünften Kennlinie.

4.2 Bestimmung der Kathodentemperatur

Der Bereich des Anlaufstroms hat einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wie in Gleichung (??) zu sehen ist. Durch das Logarithmieren des Stroms und dem Auftragen gegen die Spannung 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 (??) dargestellt. Die Wert der lineare Regression bestimmen sich zu

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

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

Durch Vergleich mit Gleichung (??) ergibt sich

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

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

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

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

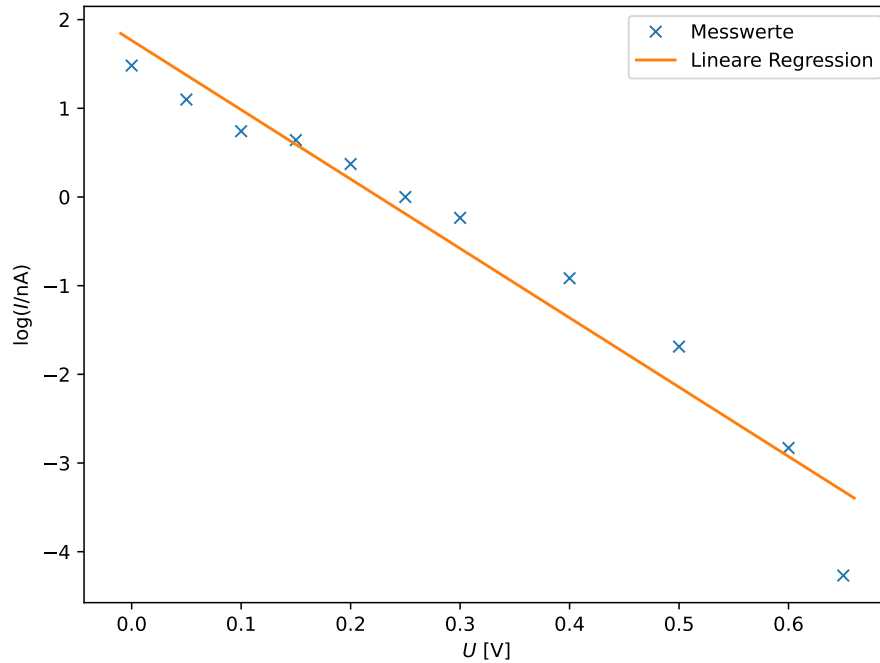


Abbildung 7: Lineare Regression der messwerte aus dem Anlaufbereich.

4.3 Bestimmung der Kathodentemperaturen und Austrittsarbeit von Wolfram

Zur Bestimmung der Kathodentemperatur wird Gleichung (??) 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 besträgt $W_{NL} = 0,95 \text{ W}$, 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 1: Kathodentemperaturen in Abhängigkeit des Heizstroms und der Heizspannung.

Strom [nA]	Spannung [V]	Temperatur [K]
2	4	1927,53
2,1	4	1954,31
2,2	4,5	2046,02
2,3	5	2131,90
2,4	5	2131,90

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

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

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

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

Strom [nA]	Φ [eV]
2	5.11614313
2,1	5.04917175
2,2	5.15708723
2,3	5.23936631
2,4	5.18676248

Der Mittelwert dieser Werte wird zu $\bar{\Phi} = 5,15 \pm 0,03\text{eV}$ bestimmt.

5 Diskussion

Literatur

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

Anhang

Messdaten

Tabelle 3: 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 4: 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 5: 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 6: Gemessener Strom in Abhängigkeit von der Spannung bei $I_{\text{Heiz}} = 2.4$ und $U_{\text{Heiz}} = 5$.

I_{Heiz} [mA]	I_S [mA]
2,0	0,060
2,1	0,140
2,2	0,319
2,3	0,719
3,4	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