

V504: Thermische Elektronenemission

Felix Geyer Rune Dominik
felix.geyer@tu-dortmund.de rune.dominik@tu-dortmund.de

Durchführung: 30. Mai 2017
Abgabe: 06. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	1
2	Durchführung	2
2.1	Versuchsaufbau	2
2.2	Versuchsdurchführung	3
3	Auswertung	3
3.1	Aufnahme der Kennlinien und Bestimmung des Sättigungsstroms I_S . . .	3
3.2	Bestimmung des Raumladungsgebietes	5
3.3	Untersuchung des Anlaufstromgebietes	5
3.4	Temperaturbestimmung aus Leistungsbilanz	7
3.5	Bestimmung der Austrittsarbeit	7
4	Diskussion	8
	Literatur	9

1 Theorie

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des glühelektrischen Effektes an einer Hochvakuumdiode. Als glühelektrischen Effekt wird die Emission von Elektronen aus einem aufgeheizten Metall bezeichnet. Dabei muss an den Elektronen die sogenannte Austrittsarbeit geleistet werden. Zur Erklärung dieses Begriffs ist die Vorstellung des Metalls als Potentialtopf sinnvoll. Die positiv geladenen Kerne sind an einem Gitter gebunden, das Potential der Kerne erzeugt einen Potentialtopf, der um ϕ vom umgebenden Potential abweicht. In diesem Topf können sich die Elektronen frei bewegen, sie sind nicht mehr an ein Atom gebunden. Um den Potentialtopf verlassen zu können, müssen die Elektronen mindestens dieses Potential überwinden. Diese Überlegung führt zusammen mit einigen Kenntnissen über das Verhalten der Elektronen in ihrem Phasenraum auf die RICHARDSON-Gleichung

$$j_S(T) = 4\pi \frac{e_0 m_0 k^2}{h^3} T^2 \exp\left(\frac{-e_0 \phi}{kT}\right), \quad (1)$$

mit der aus der Temperatur T sowie den Konstanten e_0 (Elementarladung), m_0 (Elektronenruhemasse), k (BOLZMANN-Konstante) und h (PLANKSCHES Wirkungsquantum) die Sättigungsstromdichte, also den Strom der Elektronen aus der Metalloberfläche, berechnet werden.

Versuchsanordnungen zur Messung dieses Zusammenhanges schließen zwangsläufig ein

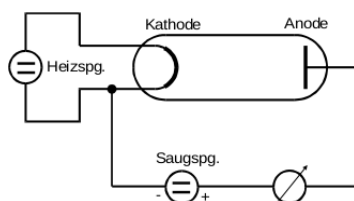


Abbildung 1: Aufbau einer Hochvakuumdiode mit Heizkreislauf[Dor17].

Vakuum ein, um Wechselwirkungen zwischen emittierten Elektronen und Umgebung zu verhindern. Zusätzlich wird in ihnen ein elektrisches Feld angelegt, um die ungerichtete Elektronenemission zu fokussieren. Dafür wird eine Anode in die Anordnung gebracht, die emittierende Metalloberfläche dient als Kathode. Die Elektronen bewegen sich also nach ihrer Emission auf die Anode zu. Einen solchen Aufbau bezeichnet man als Hochvakuumdiode (siehe Abbildung 1). Bei Nutzung einer solchen Anordnung wird jedoch festgestellt, dass der an der Anode gemessene Strom von der Spannung der Anode abhängt und erst ab einer Sättigungsspannung I_S alle Elektronen die Anode erreichen. Grund dafür ist die Beschleunigung, die die Elektronen im elektrischen Feld erfahren. Die Ladungsdichte ρ im Inneren der Diode ist somit Ortsabhängig. Als Konsequenz der Kontinuitätsgleichung

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

wird das elektrische Feld nahe der Kathode sehr schwach, da es von den austretenden Elektronen abgeschirmt wird. Die nachströmenden Elektronen können die Anode dann

nicht mehr erreichen. Der an der Anode gemessene Strom kann sich also nur an den Sättigungsstrom annähern. Aus der POISSON-Gleichung und der Energieerhaltung folgt für den Verlauf der Stromdichte in der Diode:

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

das sogenannte LANGMUIR-SCHOTTKYSCHES Raumladungsgesetz. a bezeichnet dabei die x -Position der Anode.

Aus (3) folgt, dass ohne anliegendes Potential ($V \leq 0$) kein Anodenstrom messbar ist. In der Realität lässt sich aufgrund der Geschwindigkeit, die die Elektronen auch ohne anliegende Spannung besitzen, ein gewisser Strom messen. Dieser Strom wird Anlaufstrom genannt. Die Energie der Elektronen muss jedoch auch groß genug sein, ein äußeres Potential V zu überwinden. Allgemein gilt für die Anlaufstromstärke:

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

wobei ϕ_A die Austrittsarbeit des Anodenmaterials bezeichnet, die ebenfalls überwunden werden muss.

Die Kombination der durch (4), (3) und (1) beschriebenen Abhängigkeiten liefern die sogenannte Kennlinie der Hochvakuumdiode. Ohne anliegende Spannung kann nur ein Anlaufstrom gemessen werden. Wird die Spannung erhöht, wird die $V^{3/2}$ -Abhängigkeit des Raumladungsgesetzes gemessen. Steigt die Spannung weiter, so strebt der gemessene Anodenstrom gegen einen Sättigungswert. Ein Beispiel für eine Kennlinie bei konstantem T ist in 2 gegeben.

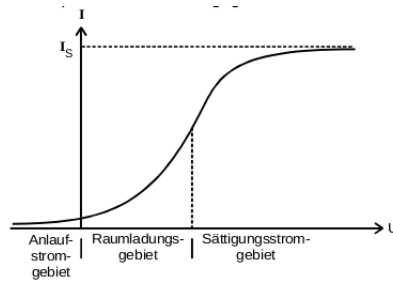


Abbildung 2: Beispielhafte Kennlinie mit Kennzeichnung der einzelnen Abschnitte[Dor17].

2 Durchführung

2.1 Versuchsaufbau

Zur Bestimmung von Kennlinien wird ein Konstantspannungsgerät mit regelbaren Spannungen zwischen Anode und Kathode geschaltet. Die in diesem Kreislauf anliegenden Spannungen und Stromstärken werden über Messgeräte gemessen. In einem zweiten

Kreislauf wird an der Kathode ein Konstantspannungsgerät zur Erzeugung der Heizspannung angeschlossen. Auch hier wird die Spannung gemessen (siehe 3a). Für die Messung der Anlaufstromkurve wird eine abgewandelte Version dieser Schaltung verwendet. Das Spannungsmessgerät des Anode-Kathode Kreislaufs wird entfernt, die Spannungsquelle wird umgepolt und durch ein Konstantspannungsgerät im 1 V Bereich ersetzt. Das Amperemeter wird durch eines mit Messbereich im nA Bereich ersetzt (siehe 3b).

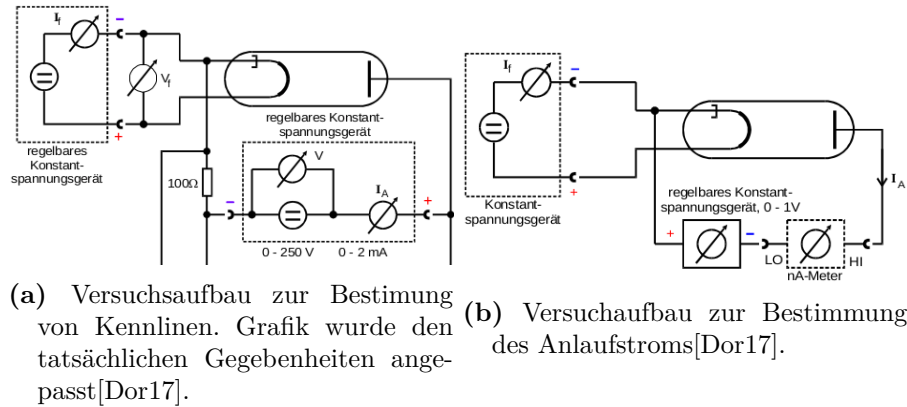


Abbildung 3: Übersicht über die Versuchsaufbauten.

2.2 Versuchsdurchführung

In einem ersten Versuchsteil wird die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsstroms ermittelt. Dazu werden für verschiedene Heizspannungen die Spannung in 10 V Schritten erhöht und die Stromstärke abgelesen. Die erzeugte Temperatur wird jeweils aus der Leistungsbilanz des Heizkreislaufts bestimmt. Daraus wird dann die Austrittsarbeit der Kathode bestimmt. In einem folgenden Versuchsteil wird für die maximale Heizspannung aus einer Kennlinie der Gültigkeitsbereich von (3) ermittelt und der Tatsächliche Exponent der V -Abhängigkeit bestimmt. Desweiteren wird der Anlaufstrom gemessen und daraus T bestimmt. Dafür wird die Spannung der umgepolten Spannungsquelle in 0.1 V Schritten erhöht, wodurch sich das Gegenfeld zwischen Anode und Kathode erhöht.

3 Auswertung

3.1 Aufnahme der Kennlinien und Bestimmung des Sättigungsstroms I_s

In Tabelle 1 befinden sich die Werte, die zur Bestimmung der Kennlinien genutzt werden. Die zugehörige graphische Darstellung findet sich in Abbildung 4. Die Sättigungsströme sind die maximalen Werte aus Tabelle 1 und in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Kennlinien.

U / V	I_1 / mA	I_2 / mA	I_3 / mA	I_4 / mA	I_5 / mA
0	0	0	0	0	0
10	0.007	0.014	0.022	0.027	0.030
20	0.014	0.031	0.047	0.062	0.077
30	0.018	0.045	0.076	0.103	0.129
40	0.020	0.054	0.102	0.145	0.183
50	0.021	0.059	0.120	0.188	0.241
60	0.022	0.061	0.132	0.225	0.308
70	0.022	0.063	0.139	0.250	0.359
80	0.022	0.065	0.143	0.262	0.407
90	0.023	0.066	0.146	0.271	0.452
100	0.024	0.066	0.145	0.283	0.493
110	0.025	0.066	0.147	0.293	0.529
120	0.025	0.066	0.149	0.298	0.555
130	0.025	0.067	0.150	0.301	0.575
140	0.025	0.068	0.151	0.304	0.590
150	0.025	0.068	0.152	0.307	0.605
160	0.025	0.068	0.153	0.312	0.615
170	0.026	0.069	0.154	0.314	0.621
180	0.026	0.069	0.156	0.315	0.626
190	0.026	0.070	0.157	0.317	0.628
200	0.026	0.070	0.157	0.317	0.632
210	0.026	0.070	0.157	0.318	0.634
220	0.026	0.070	0.157	0.319	0.638
230	0.026	0.070	0.158	0.321	0.641
240	0.026	0.071	0.159	0.322	0.644
250	0.027	0.071	0.159	0.323	0.647

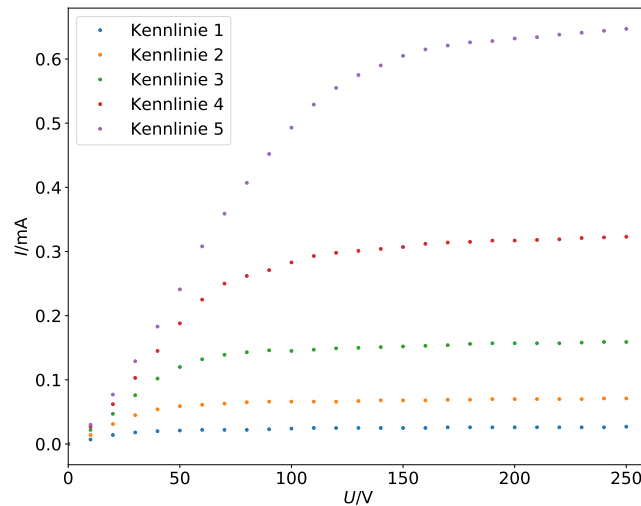


Abbildung 4: Graphische Darstellung der Messwerte zur Bestimmung der Kennlinien.

Tabelle 2: Heizspannungen und -ströme der Kennlinien aus Tabelle 1 mit den Sättigungsströmen.

U_H / V	I_H / A	I_s / mA
3.0	1.8	0.027
3.5	1.9	0.071
4.0	2.0	0.159
4.2	2.1	0.323
4.7	2.2	0.647

3.2 Bestimmung des Raumladungsgebietes

Für die Messwerte I_5 wird das Raumladungsgebiet untersucht. Nach (3) hat dabei der Strom eine $V^{\frac{3}{2}}$ -Abhängigkeit. Diese wird mittels linearer Regression untersucht. Dazu werden die Spannung und der Strom logarithmiert und gegeneinander aufgetragen. Dies und die Regression sind in Abbildung 5 zu sehen. Eine lineare Ausgleichsrechnung ergibt für den Exponenten der Spannung 1.291 ± 0.014 .

3.3 Untersuchung des Anlaufstromgebietes

Die Messwerte zur Kennlinie des Anlaufstromgebietes befinden sich in Tabelle 3. Die grafische Darstellung ist in Abbildung 6 zu finden. Dabei wurden die Ströme logarithmiert aufgetragen. Dabei ist zu beachten, dass die Spannung im Graph angepasst wurde, da am Innenwiderstand des Amperemeters Spannung abfällt, siehe Abbildung 3b. Die Spannungen sind in Tabelle 3 angegeben. Mithilfe der Regression soll ein Ausdruck für

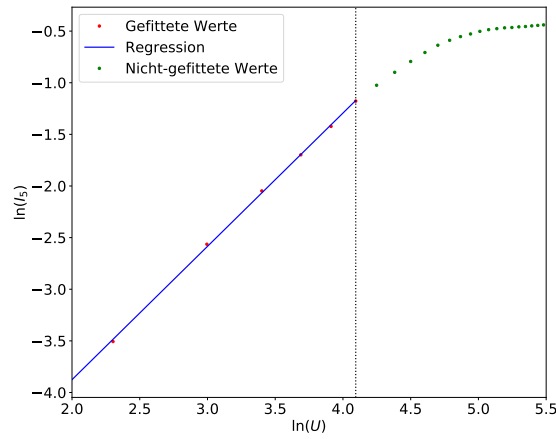


Abbildung 5: Graph zur Untersuchung des Raumladungsgebietes. Die gestrichelte Linie gibt an, bis wohin die $V^{\frac{3}{2}}$ Abhängigkeit gilt und somit bis zu welcher Spannung vom Raumladungsgebiet gesprochen werden kann.

Tabelle 3: Messwerte zur Kennlinie des Anlaufstromsgebiet.

U / V	I_6 / nA	U_{kor} / V
0.00	9.500	-0.00950
0.10	5.000	0.09500
0.20	3.000	0.19700
0.30	1.600	0.29840
0.40	0.900	0.39910
0.50	0.500	0.49950
0.60	0.320	0.59968
0.70	0.200	0.69980
0.80	0.130	0.79987
0.90	0.125	0.89987
0.96	0.110	0.95989

die Kathodentemperatur T gefunden werden. Dazu wird (4) umgestellt zu

$$\ln(I) = \ln(\text{const}) - \frac{e_0 U}{k \cdot T}.$$

Die Steigung der linearen Regression gibt einen Wert für $e_0/(k \cdot T)$ an und es folgt

$$T = -\frac{e_0}{k \cdot x} \quad (5)$$

mit x als Steigung der linearen Regression. Aus (5) ergibt sich $T = (2.17 \pm 0.05) \cdot 10^3 \text{ K}$.

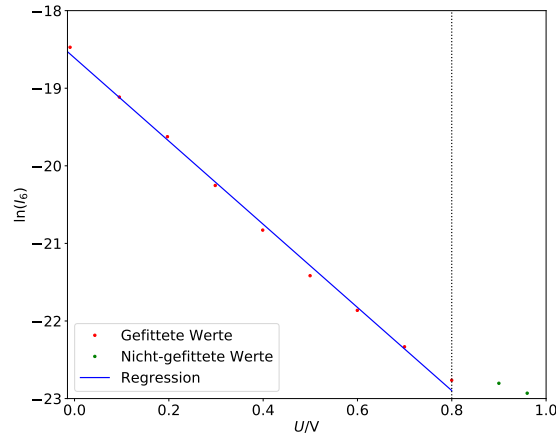


Abbildung 6: Graph zur Untersuchung des Anlaufstromgebietes. Die zwei Messwerte rechts von der gestrichelten Linie sind nicht in den Fit einbezogen worden, da sie nicht zu den restlichen Werten des Anlaufstromgebietes passen. Sie sind vermutlich durch Messrauschen entstanden.

3.4 Temperaturbestimmung aus Leistungsbilanz

Zur Erzeugung der Kennlinien aus Kapitel 3.1 werden die Heizspannungen und -ströme aus Tabelle 2 genutzt. Mit der Gleichung

$$T = \left(\frac{U_H \cdot I_H - N_{WL}}{\eta \sigma f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

lassen sich Werte für T finden. Diese folgt aus der Annahme, dass die zugeführte elektrische Leistung in Form von Wärmestrahlung abgestrahlt und in Form von Wärmeleitung abgegeben wird. Dabei ist $N_{WL} = 0.9 \text{ W}$ die als Wärmeleitung abgegebene Leistung, $\eta = 0.28$ der Emissionsgrad der Oberfläche, $\sigma = 5.7 \cdot 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ die Boltzmannsche Strahlungskonstante und $f = 0.32 \text{ cm}^2$ die emittierende Kathodenoberfläche. Da es fünf verschiedene Heizleistungen gibt, gibt es auch fünf verschiedene Temperaturen. Diese finden sich in Tabelle 4. Der Mittelwert ergibt sich zu $T = (1.91 \pm 0.06) \cdot 10^3 \text{ K}$.

Tabelle 4: Temperaturen aus (6).

T_1 / K	T_2 / K	T_3 / K	T_4 / K	T_5 / K
1722.89	1831.78	1930.94	1984.43	2073.47

3.5 Bestimmung der Austrittsarbeit

Aus den Sättigungsströmen aus Kapitel 3.1 und den Temperaturen aus Tabelle 4 lässt sich mit Formel (1) die Austrittsarbeit berechnen. Dabei ist zu beachten, dass $j_S = I_S/f$

gilt. (1) wird umgestellt zu

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

Es ergeben sich mit (7) die Werte in Tabelle 5. Der Mittelwert der Austrittsarbeiten

Tabelle 5: Austrittsarbeiten bei verschiedenen Temperaturen und Sättigungsströmen.

$e_0\phi_1$ / eV	$e_0\phi_2$ / eV	$e_0\phi_3$ / eV	$e_0\phi_4$ / eV	$e_0\phi_5$ / eV
4.32	4.46	4.58	4.60	4.69

beträgt $e_0\Phi = (4.53 \pm 0.07)$ eV.

4 Diskussion

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass die Temperaturen, die aus dem Anlaufstrom und aus der Heizleistungsbetrachtung gewonnen wurden, sich stark unterscheiden. Da allerdings die Austrittsarbeit von Wolfram mit zweiterer Methode bestimmt wurde und diese vom Literaturwert¹ 4.54 eV nur 0.22% abweicht (und innerhalb der Messungenauigkeit liegt), legt dies den Schluss nahe, dass die Heizleistungsbetrachtung bessere Werte liefert als die Methode, die Temperatur mithilfe des Anlaufstromgebietes zu untersuchen. Erklären lässt sich das damit, dass in Kapitel 3.3 Ströme im nA-Bereich gemessen werden, welche schwierig exakt zu bestimmen sind.

Die Bestimmung des Raumladungsgebietes und die Verifizierung der Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes ist alles in allem eher schlecht verlaufen. Der gemessene Wert liegt nicht innerhalb der Messungenauigkeit, die relative Abweichung beträgt 13.93%. Allerdings ist die Abweichung des Fehlerintervalls mit 15σ ziemlich groß. Die Ursache dafür liegt ihrer endlichen Größe und in der Bauart der Anode, die nicht alle von der Kathode emittierten Elektronen aufnehmen kann. Dieser Fehler könnte durch einen optimierten Versuchsaufbau verringert werden.

¹Siehe [al98]

Literatur

- [al98] Katja Bammel et al. „Austrittsarbeit verschiedener Materialien“. In: *Spektrum der Wissenschaft* (1998). URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/austrittsarbeit/1067>.
- [Dor17] TU Dortmund. *V504: Thermische Elektronenemission*. 30. Mai 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V504.pdf>.