

TE Thermische Emission

1. Vorbereitung

Folgende Kenntnisse werden am Versuchstag vorausgesetzt:

- Wie sieht die Kennlinie einer Glühdiode aus, und in welche Bereiche unterteilt man sie?
- Wie lautet in den verschiedenen Bereichen die Beziehung für den Emissionsstrom? Machen Sie sich klar, welche physikalischen Größen jeweils den Strom begrenzen.
- In welchem Bereich wird in diesem Versuch gemessen?
- Welche Messwerte müssen korrigiert werden, und wie sieht diese Korrektur aus? Könnte man diesen Messfehler vermeiden und wenn ja, wie?
- Was versteht man unter der Fermikante, und wie ist die Austrittsarbeit definiert?
- Was ist eine Kontaktspannung?
- Was bezeichnet man als Schottky-Effekt?
- Wie lautet das Stefan-Boltzmann Gesetz?
- Was versteht man unter einem schwarzen und unter einem grauen Strahler?

2. Literatur

Zu diesem Versuch liegt in der Fachbereichsbibliothek eine Praktikumsmappe aus. Zu allen Punkten, die unter *Vorbereitung* genannt sind, finden Sie in dieser Mappe oder der Versuchsanleitung geeignetes Arbeitsmaterial für eine gründliche Vorbereitung. Sie können aber selbstverständlich auch andere Bücher benutzen. In der Praktikumsmappe finden Sie zusätzliche Informationen zu Oxidkathoden, die u. a. auch in Fernsehern Verwendung finden. Wenn Sie Aufgabe 4 richtig gelöst haben, wissen Sie, warum das so ist. Dort ist auch eine Gleichung zur Berechnung des Sättigungsstromes angegeben. Benützen Sie aber zur Lösung der Aufgabe 4 bitte das Richardson-Dushman-Gesetz aus dieser Anleitung.

In der Praktikumsmappe finden Sie auch Informationen zum grauen Körper und zum Stefan-Boltzmann-Gesetz.

Der Artikel über Oxidkathoden dient lediglich zu Ihrer Information und wird am Praktikumsnachmittag nicht abgefragt und auch nicht vorausgesetzt.

3. Motivation und Grundlagen

Strahlen freier Elektronen finden sowohl in der Technik (Elektronenröhren, Elektronenstrahlschweißen, Röntgengeräte,..) als auch in der Wissenschaft (Beugungsexperimente zur Strukturanalyse, Elektronenoptik,..) Anwendung. Möglichkeiten zur Erzeugung freier Elektronen sind z.B. Thermische Emission und Feldemission.

Die Gesetzmäßigkeiten der Thermischen Emission bestimmen die Wirkungsweise der Glühdiode. Im Anlaufstrombereich der Glühdiode hat ein Teil der Elektronen, die aus der heißen Kathode austreten, eine genügend hohe Energie, um außer dem Austrittspotential auch noch eine schwache Gegenspannung $U_{AK} = \varphi_A - \varphi_K = -U_G$ (φ_A, φ_K : Anoden- und Kathodenpotential; $U_G > 0$) überwinden zu können. Für diesen *Anlaufstrom* gilt:

$$I_A(U_G, T) = I_S(T) \cdot e^{-\frac{eU_G}{k_B T}} \quad (\text{TE.1})$$

Dabei ist $I_S(T) = I_A(0, T)$ der temperaturabhängige Sättigungsstrom, e die Elementarladung und k_B die Boltzmann-Konstante.

Von *Sommerfeld* und *Nordheim* wurde die Abhängigkeit des Sättigungsstromes von der Kathodentemperatur T und der Kathodenaustrittsarbeit W_K berechnet. Ohne äußeres Feld ergibt sich

$$I_S(T) = A_0 F T^2 \cdot e^{-\frac{W_K}{k_B T}} \quad (\text{TE.2})$$

Dabei ist A_0 eine Konstante und F die Oberfläche der Kathode.

Die Bedingung für die Gültigkeit von Gl. TE.2 - eine homogene Oberfläche mit temperaturunabhängiger Austrittsarbeit - ist bei der im Versuch verwendeten Röhre mit dem Radienverhältnis $\frac{R}{r} \approx 1,5$ (R = Anodenradius, r = Kathodenradius) näherungsweise erfüllt. Für Kathoden, die diese Bedingung nicht erfüllen, verwendet man i. A. die formal ähnliche *Richardson-Gleichung*

$$I_S(T) = A_R F T^2 \cdot e^{-\frac{W_K}{k_B T}} \quad (\text{TE.3})$$

Trägt man den natürlichen Logarithmus von I_A gegen U_G auf, so lässt sich aus der Steigung der sich ergebenden Geraden die Kathodentemperatur T bestimmen.

Die angelegte Gegenspannung muss aber wegen der folgenden Effekte noch korrigiert werden:

1. Die Raumladung zwischen Kathode und Anode bildet in Kathodennähe einen kleinen Potentialwall.
2. Die unterschiedlichen Austrittsarbeiten von Kathode und Anode erzeugen eine Kontaktspannung zwischen Kathode und Anode.

Für kleine Stromdichten ist die Raumladung gering und kann darum vernachlässigt werden. Die effektiv zu überwindende Gegenspannung ist unter Berücksichtigung des Kontaktpotentials

$$U_{AK}^{\text{eff}} = -U_G + \frac{1}{e} (W_K - W_A) \quad (\text{TE.4})$$

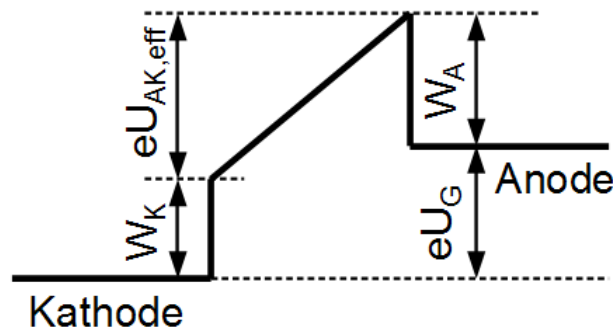


Abbildung TE.1: Veranschaulichung des Potentialverlaufs zwischen Kathode und Anode.

Dabei sind W_K und W_A die Austrittsarbeiten von Kathode und Anode.

Für den Anlaufstrom I_A ergibt sich damit

$$I_A(U_G, T) = A_0 F T^2 \cdot e^{-\frac{W_A + eU_G}{k_B T}} \quad (\text{TE.5})$$

Ist der Einfluss der Kathodentemperatur T auf die Anodenaustrittsarbeit W_A gering, so lässt sich T aus Gl. TE.5 bestimmen.

Die Anodenaustrittsarbeit W_A ergibt sich dann zu

$$W_A = k_B T \cdot \ln \left(\frac{A_0 F T^2}{I_A(0, T)} \right) \quad (\text{TE.6})$$

Die Berechnung der Kathodenaustrittsarbeit W_K aus den Sättigungsstromkurven wird nicht durchgeführt, weil dies nur zu qualitativen Ergebnissen führen würde.

4. Versuchsdurchführung

4.1. Messung

Überprüfen Sie den Versuchsaufbau anhand der Schaltskizze Abb. TE.2.

Achtung: Schalten Sie die Geräte erst nach Überprüfung durch den Assistenten ein!

Nehmen Sie anschließend bei mehreren verschiedenen Heizströmen ($I_H = 450, 500$ und 550 mA) die Messreihe $I_A = I_A(U_G)$ auf.

Notieren Sie bei jeder Messreihe den eingestellten Heizstrom I_H . Erhöhen Sie dann die Gegenspannung U_G ausgehend von 0 V in ca. 20 gleichmäßigen Schritten, bis Sie einen Anlaufstrom $I_A \leq 2$ nA messen. Notieren Sie bei jeder Anlaufstrommessung zusätzlich den jeweiligen Messbereich bzw. den Innenwiderstand des Digitalmultimeters. Das Multimeter für die Anlaufstrommessung ist immer im kleinsten noch möglichen Messbereich zu betreiben.

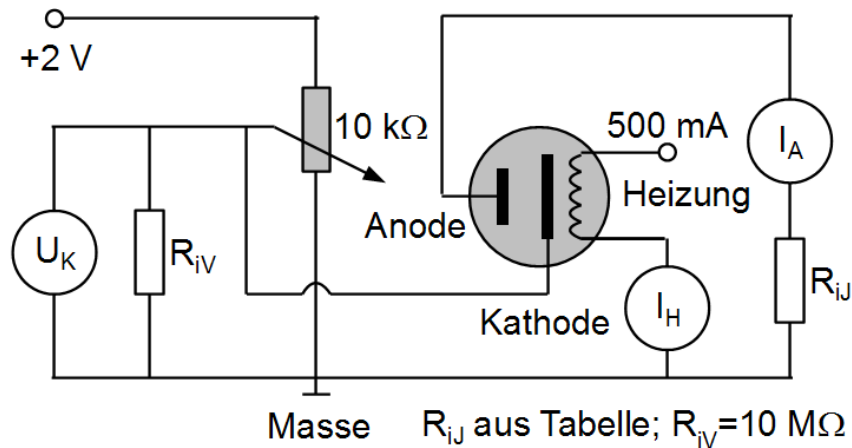


Abbildung TE.2: Schaltplan der Messanordnung.

Warten Sie nach dem Einstellen eines neuen Heizstromes mit dem Beginn der Messung so lange, bis sich in der Röhre ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat. Das Gleichgewicht liegt vor, wenn der Strom I_A stabil ist.

Der Innenwiderstand des Strommessgerätes in Abhängigkeit vom Messbereich ist:

Messbereich	Innenwiderstand
1A	0,1Ω
100mA	0,1Ω
10mA	1Ω
1mA	10Ω
100μA	100Ω
10μA	1kΩ
1μA	10kΩ
100nA	100kΩ

Tabelle TE.1: Innenwiderstände des Strommessgerätes in Abhängigkeit vom Messbereich

Überlegen Sie sich, wie dieser Innenwiderstand bei der Auswertung der Messung zu berücksichtigen ist! (Sie werden am Praktikumsnachmittag mit dem Assistenten darüber diskutieren.)

4.2. Aufgaben und Fragen

1. Durch Logarithmieren von Gl. TE.5 ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem natürlichen Logarithmus von I_A und der Gegenspannung U_G :

$$\ln I_A = -\frac{e}{k_B T} \cdot U_G + \ln(A_0 F T^2) - \frac{W_A}{k_B T} = m \cdot U_G + b \quad (\text{TE.7})$$

Aus der Steigung m der Geraden lässt sich die Kathodentemperatur T bestimmen. Erstellen Sie die Diagramme $\ln I_A = f(U_G)$ am Computer oder notfalls manuell auf Millimeterpapier.

Sie sehen anhand der Diagramme, dass bei kleinen Gegenspannungen die Raumladung noch wirksam ist. Eine sehr hohe Gegenspannung wirkt dagegen als beschleunigende Spannung für die Elektronen, die aus der verhältnismäßig heißen Anodenoberfläche austreten. Dies führt bei sehr kleinen Anlaufströmen ebenfalls zu Abweichungen vom linearen Verlauf der Kurve. Aus dem Kurvenverlauf ist aber zu ersehen, welcher Kurvenbereich zur Berechnung der Kathodentemperatur herangezogen werden muss.

Führen Sie in diesem Bereich mit Hilfe eines geeigneten Programms eine lineare Anpassung (lineare Regression) durch. Sie können dann aus der Steigung der angenäherten Geraden die jeweilige Kathodentemperatur berechnen.

2. Berechnen Sie mit Gl. TE.6 und den entsprechenden Temperaturwerten aus Aufgabe 1 die Anodenaustrittsarbeit W_A ($k_B = 8,6174 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$; $A_0 = 0,1 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2\text{K}^2}$; $F = 1,26 \text{ cm}^2$).

Überlegen Sie sich bitte genau, welchen Wert Sie für $I_A(0, T)$ einsetzen.

Zeichnen Sie das Diagramm $W_A = f(T)$ (W_A in eV; T in K).

Man sieht, dass die Kathodentemperatur einen geringen Einfluss auf die Anodenaustrittsarbeit W_A hat.

3. Erläutern Sie den Schottky-Effekt.
Leiten Sie einen Ausdruck für die Erniedrigung der Austrittsarbeit her.
Wie wirkt sich der Schottky-Effekt auf die Kennlinie einer Glühdiode aus? Geben Sie die Formel für den neuen Sättigungsstrom an.
4. Von einer Glühkathode wird die Stromdichte $j_S = 0,5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ verlangt. Wie groß ist der Emissionswirkungsgrad η

$$\eta = \frac{\text{Emissionsstrom}}{\text{Heizleistung}} = \frac{I_S}{P_H}$$

(a) für eine Kathode aus Wolfram ($A_R = 60 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2\text{K}^2}$; $W_K = 4,53 \text{ eV}$)?

(b) für eine Oxidkathode ($A_R = 0,046 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2\text{K}^2}$; $W_K = 1,2 \text{ eV}$)?

Die nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz abgestrahlte Leistung kann gleich der Heizleistung gesetzt werden. Für einen schwarzen Körper ist die Konstante des Stefan-Boltzmann Gesetzes $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2\text{K}^4}$. Sowohl die Wolfram- als auch die Oxidkathode sind aber graue Körper mit einem spektralen Emissionsgrad ϵ von 0.29 bzw. 0.19 ($k_B = 8,6174 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$).

Lösen Sie die bei der Berechnung der Kathodentemperatur T auftretende transzendente Gleichung nicht graphisch, sondern iterativ oder numerisch. Dieser Weg ist bedeutend schneller.