

FE Feldelektronenemission

1. Vorbereitung

Am Praktikumstag werden Kenntnisse vorausgesetzt über

- Tunneleffekt
- Heisenbergsche Unschärferelation
- Potentialtopf
- Austrittsarbeit
- Fermi-Energie
- Pauli-Prinzip
- Literaturwert für die Austrittsarbeit von Barium
- Feldelektronenmikroskop

2. Literatur

Gerthsen 20.Auflage: Kapitel: 8.1.3; 16.2.2; 16.3.2;

Marmier Kernphysik 1: S.97-102

Demtröder Experimentalphysik 3: Kapitel: 3.3.3; 4.2.3; 13.1;

Stöcker Taschenbuch der Physik: Literaturwert für die Austrittsarbeit von Barium

3. Motivation und Grundlagen

3.1. Austrittsarbeit, Potentialschwelle und Potentialwall

Die Feldemission ist ein Anwendungsbeispiel für den quantenmechanischen Tunneleffekt. Mit der Feldemission ist die Erzeugung freier Elektronen mit einer sehr geringen Energiebreite möglich, die in der Feldelektronenmikroskopie und für die Rastertunnelmikroskopie eingesetzt werden.

Die Leitungselektronen sind im Inneren eines Metalls nahezu frei beweglich. Der Austritt in den Außenraum wird durch einen Potentialanstieg an der Grenzfläche des Metalls verhindert. Man spricht von einem freien Elektronengas, das in einem Potentialkasten eingeschlossen ist (siehe Abb. FE.1).

In diesem Potentialkastenmodell sind bei der Temperatur $T = 0$ K alle Zustände bis zur Fermi-Energie E_F mit jeweils zwei Elektronen besetzt (Pauli-Prinzip). Die Energiedifferenz

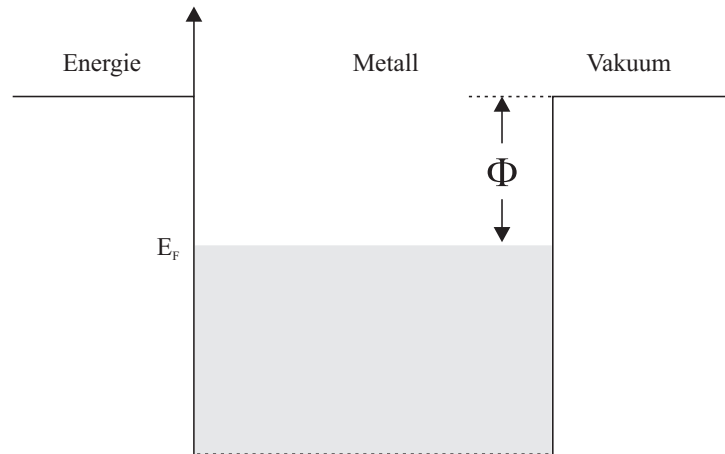
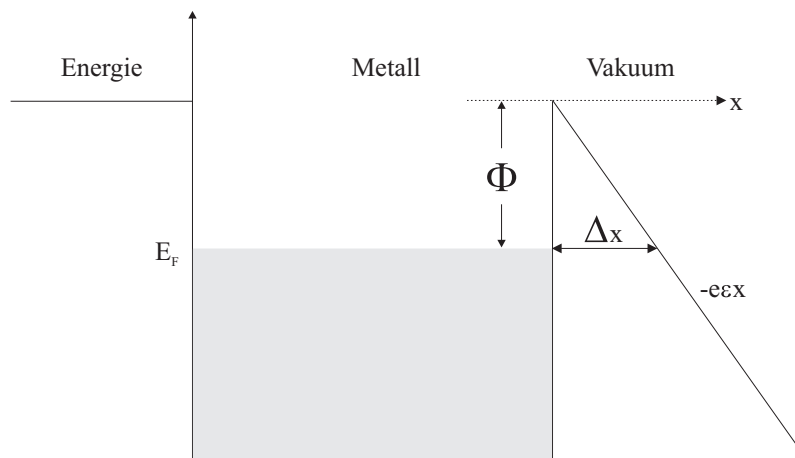


Abbildung FE.1: Elektronen im Potentialkastenmodell

zwischen der Fermi-Energie E_F und dem Vakuumniveau wird als Austrittsarbeit Φ bezeichnet.

Bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunktes besetzen die freien Elektronen durch thermische Anregung auch Energieniveaus oberhalb der Fermi-Energie. Sie gelangen bei sehr starker Erhitzung sogar in das Energiekontinuum oberhalb des Vakuumniveaus und können somit den Festkörper verlassen. Man spricht von Glühemission oder thermischer Emission (vgl. Versuch: Thermische Emission).

Lässt man an der Grenzfläche des Metalls ein starkes elektrisches Feld ϵ angreifen, so wird die Potentialschwelle (Abb. FE.1) zu einem Potentialwall (Abb. FE.2) verbogen.

Abbildung FE.2: Potentialkasten mit anliegendem äußeren Feld ϵ

Bei hohen Feldstärken wird die Wallbreite Δx auf der Höhe des Fermi-Energie so gering, dass ein Teil der Elektronen aufgrund des quantenmechanischen Tunneffekts hindurch treten kann. Die Elektronen werden nicht über die Potentialschwelle gehoben, wie bei der thermischen Emission, sondern sie tunneln durch den Potentialwall hindurch, ihre Energie wird dabei nicht verändert.

3.2. Theorie des Tunneleffekts

Bekanntermaßen kann man jedem Teilchen auch Welleneigenschaften zuordnen. Die korrespondierende de-Broglie-Wellenlänge λ_{el} zu einer Masse m kann man über $E = h\nu = mc^2$ erhalten. Betrachtet man das Leitungselektron eines Metalls als Welle, welche auf einen Potentialwall der Breite Δx trifft, so wird ein Teil der Welle reflektiert. Ein anderer dringt in den Wall ein und wird in seiner Amplitude abgeschwächt. (Eine Änderung der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann auch erfolgen, ist aber für die prinzipielle Erklärung nicht wichtig.) Die Amplitudenabnahme erfolgt wie bei Absorption üblich exponentiell. Die de-Broglie-Wellenlänge der Metallelektronen, die zur Feldemission beitragen (nahe der Fermiegrenze E_F) liegt in der Größenordnung einiger $\frac{1}{10}$ nm. Wenn die Wallbreite in derselben Größenordnung liegt ($\Delta x \approx \lambda_{el}$), gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit $\left(e^{-\frac{2\pi}{\lambda}\Delta x}\right)$, dass die Elektronen den Potentialwall durchtunneln können.

Die Wallbreite kann bereits rein geometrisch abgeschätzt werden. Nach Abb. FE.2 fällt das Potential im Außenraum mit $-e\epsilon x$ ab, damit ist Δx über

$$\Delta x = \frac{\Phi}{e\epsilon} \quad (\text{FE.1})$$

zu berechnen. Für eine Austrittsarbeit $\phi \approx 5 \text{ eV}$ und einer de-Broglie-Wellenlänge $\lambda_{el} \approx 0,5 \text{ nm}$ folgt für das zum Tunneln minimal benötigte elektrische Feld:

$$\epsilon = \frac{\Phi}{e \lambda_{el}} \approx \frac{5 \text{ eV}}{e \cdot 0,5 \text{ nm}} \approx 10^{10} \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{FE.2})$$

Es sind also enorme Feldstärken notwendig, um Elektronen über den Tunneleffekt aus einem Leiter zu emittieren. Sie sind praktisch nur mit sehr feinen Metallspitzen zu erreichen.

Bei einem kugelsymmetrischen Feld gilt an einer Spitze mit Radius r :

$$\epsilon = \frac{U}{r} \quad (\text{FE.3})$$

also bei z.B. $U = 2000 \text{ V}$ ist $r \cong 200 \text{ nm}$.

3.3. Das Feldelektronenmikroskop

Der Aufbau des Feldelektronenmikroskops ist in Abb. FE.3 dargestellt. Eine feine Wolframspitze mit einem Radius von $r = 200 \text{ nm}$ befindet sich in einem Glaskolben mit sehr gutem Vakuum (Größenordnung 10^{-7} Pa). Ihr gegenüber befindet sich ein Leuchtschirm in einem Abstand $R = 4 \text{ cm}$. Der Leuchtschirm dient als Anode und die Wolfram-Spitze als Kathode. Die Elektronen bewegen sich in gerade Linie auf den Leuchtschirm zu, nachdem sie die Wolframspitze durchtunnelt haben. Daher ergibt sich der Vergrößerungsmaßstab M zu

$$M = \frac{R}{r} = \frac{4 \text{ cm}}{200 \text{ nm}} = 2 \cdot 10^5 \quad (\text{FE.4})$$

Damit kommt man in die Größenordnung, die notwendig ist, um (ansatzweise) einzelne Atome abzubilden.

Bei der Wolframspitze handelt es sich um einen Einkristall mit kubisch raumzentrierter Kristallsymmetrie. Die Elektronen durchdringen in Vorwärtsrichtung die (110)-Kristallflächen, in seitlicher Richtung werden die (111)-Kristallflächen und in vertikaler Richtung die (100)-Kristallflächen durchtunnelt. Die Austrittsarbeit ist für (110)-Kristallflächen am höchsten und für die (111)-Kristallflächen am geringsten. Daher erscheint die Mitte des Leuchtschirms stets am dunkler als ihre Umgebung. [(100) bedeutet in Richtung der Ecken des Kubus, (111)=in Richtung Raumdiagonale, (110)=in Richtung Flächendiagonale]

Zur Desorption von Restgasen kann die Feldemissionsspitze ausgeheizt werden. Da die Spitze bei zu hohen Stromstärken zerstört wird und natürlich auch um den Emissionsstrom als Messwert zu erfassen, wird der auf den Leuchtschirm treffende Strom mit einem digitalen μ -Amperemeter gemessen. Der für die vorliegende Anordnung nach Herstellerangaben maximal zulässige Emissionsstrom ist $1,8 \mu\text{A}$. Wir bitten um Beachtung. Auf den Zweck des Barium-Vorrats wird weiter unten eingegangen.

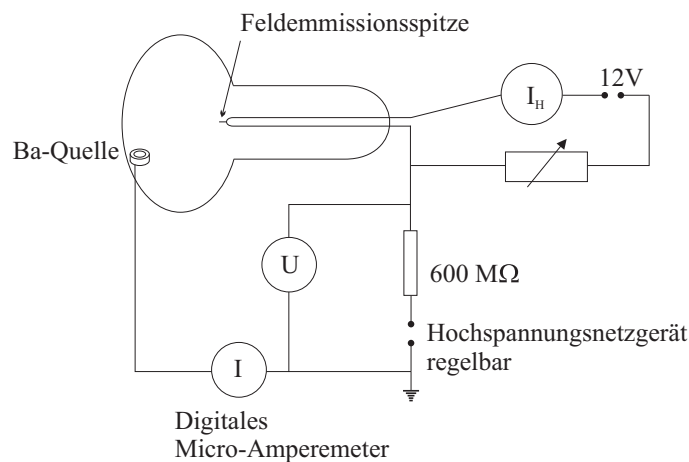


Abbildung FE.3: Schaltplan der Versuchsanordnung

3.4. Bestimmung der Austrittsarbeit von Barium

Eines der Ziele des Versuchs ist es, die Austrittsarbeit von Barium zu bestimmen. Hierbei ist die *Fowler-Nordheim-Gleichung* hilfreich. Sie stellt den Zusammenhang zwischen der Stromdichte j auf der emittierenden Spitze und der angelegten Feldstärke E her. Da $j \propto I$ (Gesamtemissionsstrom) und $E \propto U$, lässt sich diese Gleichung umschreiben in

$$I = P \cdot \frac{U^2}{\Phi_{\text{Ba}}} \cdot e^{-Q \frac{\Phi_{\text{Ba}}^{\frac{3}{2}}}{U}} \quad (\text{FE.5})$$

(P, Q : Konstanten).

Die gesuchte Größe Φ_{Ba} kommt als Argument der Exponentialfunktion sowie als Vorfaktor vor. Um eine Auswertung vornehmen zu können, trägt man $\ln\left(\frac{I}{U^2} \cdot \text{const.}\right)$ gegen $\frac{1}{U}$

auf, und man erhält Geraden mit der Steigung $-Q\Phi_{\text{Ba}}^{\frac{3}{2}}$, die sogenannten Fowler-Nordheim-Geraden (Abb. FE.4). Nimmt man eine Fowler-Nordheim-Gerade für eine reine Wolframspitze ($\Phi_{\text{W}} = 4,45 \text{ eV}$), und eine weitere für die Bariumspitze auf, so lässt sich aus den Steigungen der beiden Geraden die Austrittsarbeit von Barium bestimmen.

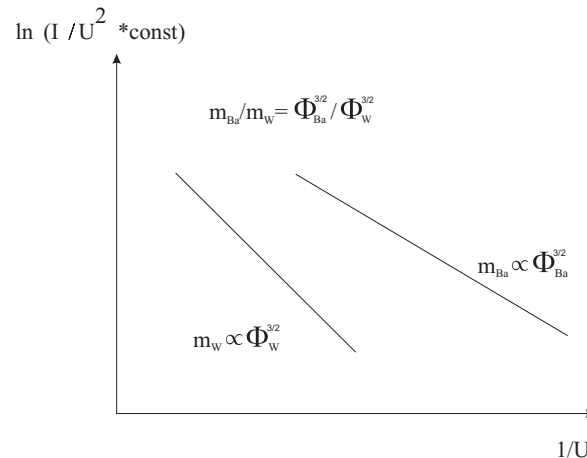


Abbildung FE.4: Fowler-Nordheim-Geraden mit Steigungen m

4. Versuchsdurchführung

4.1. Messung

Ein Ziel des Versuchs ist es, ein Gefühl für den Tunneleffekt, hier die exponentiell starke Zunahme des Emissionsstromes ab der Schwellenspannung, zu bekommen. Weiterhin soll die Feldemission beobachtet werden. Das Vakuum des Glaskolbens ist zu ermitteln und der Wert der Bariumaustrittsarbeit ist zu bestimmen.

1. Vergleichen Sie den Aufbau mit der Schaltskizze Abb. FE.3. Die Inbetriebnahme ist erst nach der Überprüfung durch den Assistenten erlaubt. Messgerät auf den richtigen Messbereich stellen.
2. **Beobachtung des Emissionsmusters der Feldemissionskathode.** Erhöhen Sie langsam die Saugspannung unter Beobachtung entweder des Emissionsstroms oder auch der Helligkeit auf dem Bildschirm. Die Höhe der Saugspannung ist hier nicht von Bedeutung. Im Praktikum wird auf das Zustandekommen des Musters näher eingegangen.
3. **Ausheizen der Kathode:**
Was ist beim Ausheizen unbedingt zu beachten? (Falls Ihnen dazu nichts einfällt, nicht weitermachen, und den Assistenten fragen). Heizen Sie die Feldemissionsspitze mit einem Heizstrom von höchstens 1,8 A für maximal 30 s aus.
Danach kurz warten, nach dem Herunterregeln des Stroms ist sehr schnell wieder Raumtemperatur an der Spitze erreicht. Verfahren Sie jetzt erneut wie unter 2. Welchen Unterschied sehen Sie zu 2., was sind die Folgen des Ausheizens?

4. Bestimmung des Vakuums der Röhre:

Heizen Sie erneut aus und regeln Sie den Feldemissionsstrom auf $1,5 - 1,7 \mu\text{A}$ ein. Bei konstant gehaltener Hochspannung ist alle 15 s der Strom festzuhalten, bis dieser Wert konstant wird. Zur Auswertung tragen Sie die Ergebnisse gegen die Zeit t auf. Ermitteln Sie den Zeitpunkt, ab dem an die Kurve eine horizontale Tangente anzulegen ist, ggf. Kurve extrapolieren. Die so erhaltene Zeitspanne Δt wird als Wiederbedeckungszeit bezeichnet. Das Vakuum in der Röhre ist durch die Beziehung

$$p \cong \frac{10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{\Delta t}$$

zu berechnen. (Eine Fehlerrechnung ist nicht notwendig.)

5. Bestimmung der Barium-Austrittsarbeit:

In diesem Abschnitt sind Wertepaare (U, I) zu bestimmen, und über die Gl. FE.5 die entsprechende Austrittsarbeit zu berechnen. Wie im betreffenden Abschnitt ausgeführt sind nicht nur $(U, I)_{\text{Barium}}$ -Werte, sondern auch $(U, I)_{\text{Wolfram}}$ -Werte notwendig.

Zuerst werden $(U, I)_{\text{Wolfram}}$ -Werte erfasst. Dazu wird die Spitze neu ausgeheizt. Regeln Sie den Feldemissionsstrom auf $1,5..1,8 \mu\text{A}$ ein. Der Wert der Saugspannung kann auf 50 V aufgerundet werden. Senken Sie jetzt die Spannung in 10 Schritten à 50 V und halten Sie die korrespondierenden Stromwerte fest. Nachdem Sie erneut ausgeheizt haben, ist die Messreihe ein zweites und danach ein drittes Mal zu wiederholen.

Als nächstes werden $(U, I)_{\text{Barium}}$ -Werte gemessen. Hierfür wird der Assistenten die Spitze nochmals ausheizen und anschließend mit Barium bedampfen. Die $(U, I)_{\text{Barium}}$ -Werte werden dreimal in Folge gemessen, ohne die Spitze zwischendurch auszuheizen. Experimentell konnte gezeigt werden, dass eine monoatomare Schicht Barium auf Wolfram etwa die gleiche Austrittsarbeit besitzt wie elementares Barium. Da technisch der Aufbau einer Barium-Spitze mit den oben abgeschätzten Abmessungen aufwendig ist, wurde in die Anordnung eine Barium-Quelle eingebaut, welche die Generation einer solchen Monolage ermöglicht und für etwa 50 Aufdampfungen ausreicht.

Durch die Schicht wird die Austrittsarbeit soweit herabgesetzt, dass der maximal zulässige Stromwert bereits bei $1800 \text{ V}..2500 \text{ V}$ zu erreichen ist.

- Das Entfernen des Bariums kann abschließend durch vorsichtiges Erhitzen unter Aufsicht des Assistenten erfolgen. Auf jeden Fall ist ganz am Schluss ein letztes Mal auszuheizen.

4.2. Aufgaben und Fragen

- Die vorne gegebene Erklärung für den Tunneleffekt ist nur eine von mehreren. Suchen Sie nach einer anderen und geben Sie sie mit Ihren eigenen Worten wieder.
- Berechnen Sie das Vakuum wie oben unter 6.1.4 ausgeführt. Warum ist hier ein gutes Vakuum (geringer Druck) wichtig?

3. Zur Bariumaustrittsarbeit:

Mit Hilfe der unter 6.1.5 gewonnenen Wertepaare des Emissionsstromes I und der Hochspannung U stellen Sie Tabellen auf für die Quotienten $\frac{I}{U^2}$ und $\frac{1}{U}$. Auf halb-logarithmischem Papier werden dann die 3 + 3 Fowler-Nordheim-Geraden gezeichnet und die Steigungen der Geraden ermittelt, einmal für die reine Wolfram-Spitze und dann für die mit Barium bedampfte Spitze (Arrhenius-Auftragung). Sie können alternativ lineares Papier verwenden, wenn Sie $\ln \frac{I}{U^2}$ gegen $\frac{1}{U}$ auftragen. Mitteln Sie arithmetisch über jeweils 3 Steigungswerte. Über das Verhältnis der Steigungen erhalten Sie die Austrittsarbeit für Barium.

Führen sie abschließend eine Fehlerrechnung durch, indem Sie aus den Schwankungsbreiten der Steigungswerte auf $\Delta\Phi_{\text{Ba}}$ schließen.

4. Berechnen Sie die de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen λ_{el} für Metalle mit einer Fermi-Energie zwischen $E_{\text{F}} = 2 \text{ eV}$ und $E_{\text{F}} = 8 \text{ eV}$. Für die Fermi-Energie E_{F} und den Impuls p gilt: $E_{\text{F}} = \frac{p^2}{2m}$, Impuls $p = \frac{h}{\lambda_{el}}$
5. Erklären Sie das (hier grüne) Aufleuchten der inneren Beschichtung der Mattscheibe bei Elektronenbeschuss.
6. Wie sieht Ihrer Meinung nach die schärfste Spitze aus, die technisch machbar ist?
7. Wie lässt sich die Abschätzung $\Delta x \cong \lambda_{el}$ für einen merklichen Tunnelstrom erklären?