



Versuch P2-62: Glühemission, Feldemission

Raum F1-29

Hier geht es um den Übertritt von Leitungselektronen aus einem Metall in den freien Raum, wobei Arbeit gegen die Bindungskräfte des Metallverbandes auf das ansonsten 'freie' Elektron geleistet werden muss. In der atomaren Beschreibung muss das Elektron einen Potentialberg passieren. Die notwendige kinetische Energie, um darüber hinwegzukommen, erhält es durch Zufuhr von Wärme: Das nennt man **Glühemission**. Wenn der Potentialberg genügend schmal ist, was bei hoher elektrischer Feldstärke an der Metalloberfläche der Fall ist, dann haben auch Elektronen aus dem kalten Metall eine Chance, den Potentialberg zu passieren, indem sie hindurch *tunneln*: Das nennt man **Feldemission**.

Es wird nicht erwartet, dass Sie Formeln für Glüh- und für Feldemission herleiten können. Dazu wären Kenntnisse aus Quantenmechanik und Quantenstatistik nötig. Bei diesem Versuch geht es um die Demonstration der Phänomene, um Messmethoden und um das Verständnis klassisch erklärbarer Erscheinungen, wie z.B. der Bildkraft, der Wirkung eines Feldes auf die Form des Potentialverlaufs (Schottky-Effekt), den Raumladungseinfluss beim Diodenstrom oder die Kathodenstrukturabbildung beim Feldelektronenmikroskop. Bei der Auswertung wird Wert auf geschickte Auftragungen gelegt.

Aufgaben:

1. Glühemission: Richardson-Gesetz. Messen Sie den Sättigungsstrom I_s einer Vakuum-Diode mit Wolfram-Kathode in Abhängigkeit von der Heizleistung P . Verwenden Sie nur den mit 2V~ gekennzeichneten Heizspannungsausgang und nur den mit 0...100V= gekennzeichneten Anodenspannungsausgang des Netzgeräts.

Der Heizstrom für die Diode (K81A) wird mit Hilfe des bereit gestellten Netzgerätes variiert und sollte auf etwa 20 Werte zwischen ca. 1,7 A (kleinstem messbaren Sättigungsstrom von ca. 1 μ A) und 2,3 A (maximal zulässiger Wert) eingestellt werden. Verwenden Sie eine spannungsrichtige Schaltung für die Heizstrom- und Heizspannungsmessung. Aus den geometrischen Daten von Heizfaden, Heizfadenanschlüssen und Anode sowie deren Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit; Emissionsvermögen) wurde der Zusammenhang zwischen Heizleistung P und Heizfadentemperatur T aufgrund von Wärmestrahlung und Wärmeleitung berechnet. Die resultierende, pyrometrisch überprüfte Kurve $T = f(P)$ steht Ihnen zur Verfügung. Tragen Sie Ihre gefundenen Wertepaare (T , I_s) so auf, dass sich bei Gültigkeit des Richardson-Gesetzes ($I_s = A_k \cdot \epsilon \cdot T^2 \exp\{-\phi/kT\}$) eine Gerade ergeben müsste. Die heiße Heizfadenoberfläche A_k beträgt ca. 4 mm². Bestimmen Sie aus Ihrer Kurve das Elektronenemissionsvermögen ϵ und die Elektronenaustrittsarbeit ϕ von Wolfram.

2. Diodenkennlinie; Langmuir-Schottkysches Raumladungsgesetz; Schottky-Effekt. Messen Sie bei einem Heizstrom von ca. 2,3 A in Abhängigkeit von der Spannung U zwischen Kathode und Anode (-3V bis 100V) den Diodenstrom I in einer stromrichtigen Schaltung. (Spannungswerte nötigenfalls korrigieren!) Diskutieren Sie anhand Ihres Ergebnisses Anlauf-, Raumladungs- und Sättigungsgebiet der $I(U)$ -Kurve. Tragen Sie für den Bereich ($-1V \leq U \leq 10V$) Ihre gefundenen Wertepaare (U , I) so auf, dass sich bei Gültigkeit des Langmuir-Schottkyschen Raumladungsgesetzes ($I = (2e/m)^{1/2} \cdot 4\epsilon_0/9 A_a \cdot d^{-2} \cdot U^{3/2}$) eine Gerade ergeben müsste. Die Anodenfläche A beträgt ca. 61 mm² und der Kathoden-Anodenabstand d ca. 0,81 mm. Prüfen Sie, ob die Geradensteigung den theoretischen Wert aufweist. Sie können auch versuchen, zum besseren Verständnis und als gute E-Lehreübung das Raumladungsgesetz für planparallele gleichgroße Kathoden- und Anodenflächen herzuleiten. Sie verwenden dabei die Poissonsche Potentialgleichung und die Kontinuität des elektrischen Stromes. Dass beim tatsächlich vorliegenden coaxialen Problem bis auf einen vernachlässigten Korrekturfaktor nahe 1 dieselbe Formel gilt, ist nur mit größerem Aufwand zu zeigen. Tragen Sie für den Bereich ($20V \leq U \leq 100V$) Ihre gefundenen Wertepaare (U , I) so auf, dass sich bei Gültigkeit der Schottky-Beziehung $\phi(E) = \phi(0) - (eE/\pi\epsilon_0)^{1/2} \cdot e/2$ für die Erniedrigung der effektiven Austrittsarbeit $\phi(E)$ bei Vorhandensein eines Feldes E an der Leiteroberfläche, also $I = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot \sqrt{U})$, eine Gerade ergeben müsste. Prüfen Sie, ob der resultierende Faktor β mit dem theoretischen Wert für die vorliegenden Versuchsbedingungen (Temperatur $T(P)$, Zylindergeometrie mit $r_i = 0,065$ mm und $r_a = 0,875$ mm) verträglich ist.

3. Feldemission; Fowler-Nordheim-Beziehung. Heizen Sie zunächst die Wolframspitze der Feldemissionsröhre aus: Hochspannungsgerät ausgeschaltet; Heizstrom langsam auf Maximalwert (Skalenwert 100% $\approx 1,9$ A) regeln und etwa eine Minute fließen lassen; Heizstrom herunterregeln und Gerät ausschalten. **Messen Sie dann bei kalter Kathode den Feldemissionsstrom I in Abhängigkeit von der Spannung**

U an der Röhre. Von der am Hochspannungsgerät angezeigten Spannung muss der errechnete, am $10^9 \Omega$ -Schutzwiderstand abfallende Anteil subtrahiert werden. Es sollte in Stufen von 0,1 kV zwischen den Werten $U(0,2 \text{ nA})$ und $U(0,25 \mu\text{A})$ gemessen werden. Bei kleineren Strömen stören Isolationsmängel, größere gefährden die Röhre. Die Messreihe sollte in weniger als fünf Minuten nach dem Ausheizen durchgeführt sein.

Achtung! Die innere Abschirmung und der Leuchtschirm der Röhre liegen auf Hochspannung!

Achten Sie darauf, dass die äußere Abschirmung geerdet ist!

Bei der evakuierten Röhre besteht Implosionsgefahr! Bei geöffnetem Gehäuse Schutzbrille tragen!

Tragen Sie Ihre gefundenen Wertepaare (U, I) so auf, dass sich bei Gültigkeit der Fowler-Nordheim-Beziehung $I = A \cdot U^2 \cdot \exp(-B/U)$ eine Gerade ergeben müsste. Eine Bestimmung der Parameter A und B und deren Vergleich mit der Theorie ist hier nicht sinnvoll, da eine Reihe von Einflüssen nur mangelhaft bekannt ist, z.B. die exakte Kathodenform und damit die Feldstärke dort sowie die Strombegrenzung durch Raumladungseffekte in der Spitze (Gesetz von Child). Überzeugen Sie sich davon, dass der zu durchtunnelnde Potentialberg ($W_{\text{pot}} = -e^2 / (16\pi\epsilon_0 x) - eEx$) in der Höhe $-\phi \approx -4,5\text{eV}$ (das ist etwa die Oberkante des von Elektronen besetzten Energiebereichs) eine Breite von der Größenordnung der deBroglie-Wellenlänge $\lambda = h/mv$ eben dieser energiereichsten Elektronen ($\approx 6 \text{ eV}$ für Wolfram) hat. Mit x wird der Abstand von der Metalloberfläche bezeichnet. Nimmt man als der Rechnung zugängliche Kathodengeometrie ein Paraboloid an, so lautet die $E(U)$ -Abhängigkeit $E(U) = 2U/(r \cdot \ln\{R/r\})$ mit dem Kathodenspitzenkrümmungsradius $r \approx 0,2 \mu\text{m}$ und dem Kathoden-Anodenabstand $R \approx 5 \text{ cm}$. Berechnen Sie dazu die Potentialbergbreite.

4. Feldelektronenmikroskop. Photographieren Sie das Leuchtschirmbild der Feldemissionsröhre bei maximal zulässigem Strom (0,25 μA). Die bereitgestellte Digitalkamera erhalten Sie vom Betreuer. Diskutieren Sie die Wirkungsweise des Feldelektronenmikroskops und berechnen Sie seine Vergrößerung. Die Kathodenspitze ist ein Wolframeinkristall, dessen Oberfläche aus vielen kleinen charakteristischen Kristallebenen besteht. Die etwas unterschiedlichen Atomzahldichten und damit auch unterschiedlichen Austrittsarbeiten aus den verschiedenen Flächen bewirken die Hell-Dunkel-Struktur. Die Zuordnung der Bildpunkte zu den verschiedenen Kristallebenen wird nicht verlangt. Unvermeidlich wird die Kathode einige Zeit nach dem Ausheizen wieder mit Fremdatomen belegt, darunter auch etliche große Bariumatome, denn im Röhrenkolben befindet sich ein Bariumvorrat. Beobachten Sie längere Zeit nach dem Ausheizen das veränderte Bild. Heizen Sie äußerst vorsichtig bei anliegender Hochspannung und bei Beobachtung der Röhre die Kathode auf dunkle Rotglut. Vor dem Einschalten des Heizstromgerätes zuerst Regler auf Null. *Dann keinesfalls über Skalenwert 25% hinausgehen!* Sie sehen dann deutlich die Wärmebewegung von Teilchen auf der Kathodenoberfläche.

Dieser Versuch ist besonders zu **Erweiterungen** geeignet. Im Folgenden werden einige Anregungen dafür gegeben. Bei Aufgabe 1 kann die Abhängigkeit des Heizfadenwiderstandes von der Temperatur näher untersucht werden. Bei Aufgabe 2 kann das Anlaufstrom-Gebiet der Diodenkennlinie ausgewertet werden. Es liefert in integraler Form Information über die Energieverteilung der emittierten Elektronen. Bei sorgfältiger Messung bis herunter zu Strömen um $0,05 \mu\text{A}$ (besonderes Instrument verlangen!) kann z.B. die theoretisch zu erwartende Boltzmannverteilung überprüft werden. Bei Aufgabe 3 kann die Abhängigkeit der Parameter A und B der Fowler-Nordheim-Beziehung von der Kathodenbelegung, also von der Zeit seit dem letzten Ausheizen, untersucht werden. Zusätzlich zur Diodenkennlinie können auch Triodenkennlinien gemessen und die Wirkung des Steuergitters studiert werden. Schließlich können mit der Triode einfache Verstärkerschaltungen aufgebaut und ausgemessen werden.

Zubehör:

Sockel- und Anschlussplatine für Diode (K81A) und Triode (ECC82 / ECC83)

Netzgerät Kepco (CK-2-8) zum Regeln der Röhrenheizung

Betriebsgerät (ca.2V ; 0...100V= und weitere Spannungen für Untersuchungen an Trioden)

Heizstrom-Meßinstrument (3A~)

Heizspannungsmessgerät (1,8V~)

Universalmeßinstrument

Vielfachmeßinstrument für U_- und I_- (Multizet)

U_- -Instrument mit diversen Vorwiderständen

Feldelektronenmikroskop mit fertigen Verbindungsleitungen (*Nicht entfernen!*) zum Hochspannungsgerät (3...10kV), zum Heizstromgerät und zum Picoamperemeter (empfindlichster Bereich 10pA)

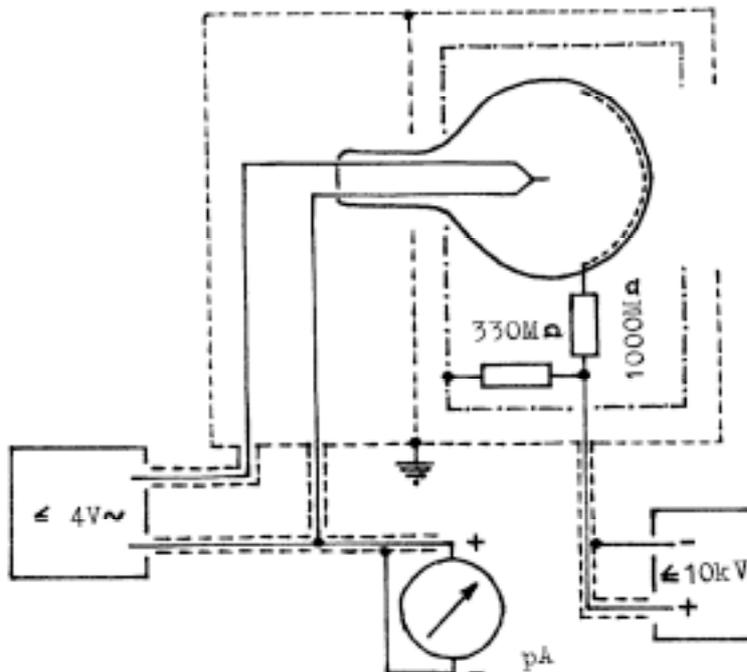
Digitalkamera

Zeiß-Schiene mit Reitern

Stoppuhr
Schutzbrillen
Kristallmodell (kubisch-innenzentriert)

Literatur:

Finkelburg: Atomphysik, 12.Aufl., Kap.VII,14
Müller: Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften (Zeitschrift!), Bd.27
Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik, 12.Aufl., Kap.8.1
Bergmann, Schaefer: Experimentalphysik, 6.Aufl., Par.66
Van der Ziel: Solid State Physical Electronics (1958), Kap.6
Dekker: Solid State Physics, Par.9.6; 9.8
Sokolov, Loskutov, Ternov: Quantenmechanik (1964)
Wedler; Adsorption (1970), Kap.4.14
Schpolski: Atomphysik, 10.Aufl., Par.157
Kittel: Festkörperphysik, 2.Aufl., Kap.8
Walcher: Praktikum der Physik, 3. Aufl., Par.5.6
Dorn, Bader: Physik, Oberstufe E (1976), Par. 17; 33 (sehr einfach!)



Feldelektronenmikroskop mit Hochspannungsgerät, Heizstromgerät und Picoamperemeter