FACHBEREICH PHYSIK DER UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

Physikalisches Praktikum für Anfänger

Teil C

Teilnehmer:

_____

© 1999 Fachbereich Physik Universität Kaiserslautern
Ausgabe: Frühjahr 2001

Herausgeber: Dr. Kurt Jung

Grafiken: Ingeborg Wollscheid
Gestaltung und Satz: Matthias Jung

Inhaltsverzeichnis

W 4b Wärmestrahlung	4
W 5a Thermodynamische Kreisprozesse	8
E 2b Kennlinien von Halbleiterelementen	14
E 2d Transistorkennlinien	20
O 2b Gitterspektralapparat und Monochromator	25
O 4a Mikrowellen / Braggreflexion	30
A 1a e/m-Bestimmung	35
A 1b Bestimmung der Planckschen Konstanten h	46
A 1c Franck-Hertz-Versuch	55
A 1d Röntgenröhre	61
A 1f Röntgenspektren	67
K 2a Radioaktiver Zerfall	74

W 4b Wärmestrahlung

Aufgabenstellung

Es soll das unterschiedliche Emissionsverhalten verschieden präparierter Oberflächen untersucht werden. Dabei ist die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes zu überprüfen.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 2
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 11.1–3
3. Pohl: Optik und Atomphysik, Bd. III, Abschn. 16
4. Alt: Staatsexamensarbeit, Universität Kaiserslautern 1978

Fragen zum Versuch

1. Wie funktionieren Thermoelemente und Thermosäulen?
2. Was versteht man unter einem schwarzen Strahler?
3. Wie unterscheiden sich Lampenspektren vom Sonnenspektrum?
4. Was besagt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz?
5. Wie ist der Emissionsgrad einer Oberfläche definiert?
6. Wie lautet das Stefan-Boltzmann-Gesetz?
7. Welche Aussage macht das Wiensche Verschiebungsgesetz?
8. Wie lautet das Plancksche Strahlungsgesetz?
9. Wie ist die Temperatur definiert?
10. Informieren Sie sich über Treibhauseffekt, Wirkungsweise von Doppelfenstern (an der Südfront der Häuser), Aluminiumreflektoren zwischen Außenwand und Heizkörpern, Thermoskanne, Kryostat, Wirkung des zunehmenden CO_2-Gehaltes der Atmosphäre auf das Klima, selektive Absorber.

Versuchsdurchführung

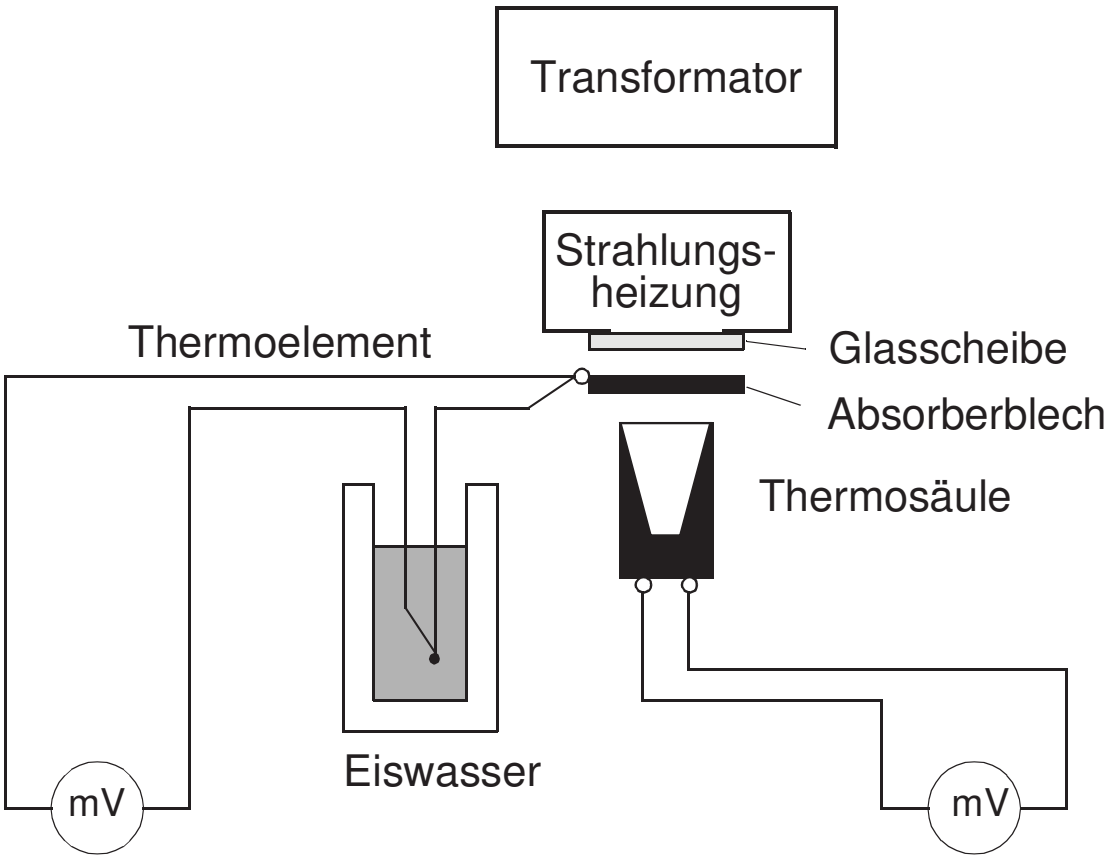

Abb. 1: Prinzipbild des experimentellen Aufbaus

Aufgabe 1: Eichung des Thermoelements

Für 5–10 verschiedene Temperaturen zwischen 0° und 90° C ist eine Spannungs-Temperatur-Charakteristik aufzunehmen. Zur Durchführung stehen ein Dewargefäß mit Eiswasser, ein Wasserbehälter mit Tauchsieder, ein Thermometer und ein Vielfachmessinstrument zur Verfügung.

Bei unvorsichtiger Handhabung besteht Verbrennungs- und Verbrühungsgefahr! Der Heizofen für die Strahlungsheizung erreicht erst nach 1/4 Stunde seine Endtemperatur und sollte zwischen den Einzelmessungen nicht abgeschaltet werden.

Aufgabe 2: Emissionsvermögen verschiedener Oberflächen

Für 4 verschieden präparierte Oberflächen sind jeweils 12–15 Minuten lang der Temperaturverlauf des Absorberbleches sowie die Thermosäulenspannung zu registrieren.

Die Thermosäule ist 1–2 mm von der Oberfläche entfernt zu montieren. Überlegen Sie sich die Zeitabstände für die einzelnen Ablesungen.

Nach jeder Messreihe sind die Werte für Thermoelementspannung und Thermosäulenspannung in ein Diagramm einzuzeichnen. Verfolgen Sie auch Änderungen der Raumtemperatur. (Warum?)

Diskutieren Sie die erhaltenen Kurven.

Aufgabe 3: Überprüfen Sie die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

- Wie hängen Thermoelementspannung bzw. Thermosäulenspannung mit der Temperatur des Absorbers bzw. Wärmeabstrahlung des Absorberblocks zusammen?
- Übertragen Sie die in Aufgabe 2 registrierten Werte in geeigneter Darstellung auf Millimeterpapier. Berücksichtigen Sie dabei die Änderung der Raumtemperatur.
- Führen Sie eine Fehlerabschätzung durch und vergleichen Sie Ihre Meßwerte mit dem erwarteten theoretischen Verlauf.

Aufgabe 4: Ermittlung von Emissionsgraden

Bestimmen Sie für *eine* Oberfläche deren absoluten Emissionsgrad. Aus Ihrer Fehlerrechnung erkennen Sie, dass die Angabe des absoluten Emissionsgrades sehr ungenau ist. Geben Sie deshalb die relativen Emissionsgrade der untersuchten Oberflächen an.

Thermosäule nach Moll / Technische Daten

- Durchmesser der kreisförmigen Empfängerfläche: $(10 \pm 1)\,\mathrm{mm}$, Eintrittsöffnung $25\,\mathrm{mm}$.
- Innenwiderstand: $10\,\Omega$
- Zahl der Thermoelemente: 16
- Empfindlichkeit (Thermospannung/Strahlungsleistung): $0.16\,\mu\mathrm{V}/\mu\mathrm{W}$

Beachten Sie bei der Auswertung, dass Sie nur die Hälfte der insgesamt abgestrahlten Leistung messen!

W 5a Thermodynamische Kreisprozesse

Aufgabenbeschreibung

Dieser Versuch soll zum Verständnis von thermodynamischen Kreisprozessen beitragen. Mit Hilfe einer Demonstrationsmaschine sollen thermodynamische Kreisprozesse durchgespielt und die Ergebnisse und theoretischen Erwartungen diskutiert werden. Der Versuch ist computergesteuert.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. I, Kap. XI
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.2–3, 5.5
3. Alonso-Finn III: Kap. 11.3–11.10
4. Ballif-Dibble: Anschauliche Physik, Kap. 7
5. Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, Bd. I, S. 237
6. Joos: Lehrbuch der theoretischen Physik, 12. Aufl., §1
7. Atkins: Physik, Teil C

Fragen zum Versuch

Schwerpunkt der Vorbereitung:

1. Was besagen die drei Hauptsätze der Thermodynamik?
2. Was sind adiabatische, isobare, isochore und isotherme Prozesse?
3. Was ist der Carnot-Kreisprozess?
4. Worin besteht der Unterschied zwischen Carnot- und Stirling-Prozess?

5. Welche Flächen im p-V-Diagramm charakterisieren die aufgenommene Wärmemenge, die abgegebene Wärmemenge, die von außen zugeführte Arbeit bzw. die nach außen abgegebene Arbeit?
6. Laufen Wärmepumpen und Kältepumpen gleichsinnig oder gegensinnig?
7. Wie groß ist der ideale Wirkungsgrad solcher Maschinen?
8. Was ist für die Raumheizung prinzipiell günstiger, die elektrische Widerstandsheizung oder die Wärmepumpe?

Fragen zum Experiment:

1. Ist es bei der Bremsmessung prinzipiell gleichgültig, wie oft man die Nylonschnur um die Achse des Schwungrades legt?
2. Wie kann man die Kälteleistung bzw. Wärmeleistung der Maschine ermitteln? (2 Wege)
3. Warum ermittelt man sie nur auf einem dieser beiden möglichen Wege?
4. Wieso stimmt die theoretische Kälteleistung bzw. Wärmeleistung nicht mit der tatsächlich geleisteten Arbeit überein?

Hinweise zum Versuch

Das Computerprogramm wird nach Einschalten des Rechners automatisch initialisiert oder kann durch Eingabe von `MOTOR` gestartet werden.

Die Reihenfolge der Aufgabenstellung ist so angelegt, dass das Versuchsprogramm in der kürzestmöglichen Zeit durchgeführt werden kann. Beim Versuchsaufbau liegt eine ausführliche Beschreibung der benutzten Apparatur. Außer den dort gegebenen Hinweisen sind folgende Punkte zu beachten:

Zu dem Versuch gehört ein speziell entwickeltes Netzgerät. Das Gerät ist mit einem Druckwächter ausgestattet, der bei Ausfall des Kühlwasserumlaufs automatisch die Heizspannung und die Spannung zum Betrieb des Experimentiermotors ausschaltet. Zusätzlich

ist das Gerät mit einem Umdrehungszähler ausgerüstet, der jeweils nach Druck des Start-Knopfes für die Dauer einer Minute die vom Initiator kommenden Signale zählt.

Die Messung des Innendrucks im Zylinder erfolgt mit Hilfe eines elektronischen Drucksensors, der eine zum Druck proportionale Spannung abgibt. Die Eichung des Sensors ist vorab durchgeführt worden und wird bei der Druckbestimmung berücksichtigt. Das Volumen des Arbeitsgases wird dadurch bestimmt, dass mit Hilfe einer Lichtschranke die Stellung des Schwungrades, an dem eine Lochscheibe mit 256 Löchern angebracht ist, ermittelt wird. Der Computer berechnet aus der Stellung des Schwungrades dann das zugehörige Volumen (Wie genau kann dieser, vom Rechner ermittelte Wert bestenfalls sein?).

Die günstigste Anordnung der Transmissionsriemen für die Wärmepumpe und die Kältemaschine ist aus der Skizze auf der Grundplatte der Maschine zu ersehen.

Die Temperaturmessung an der Kältemaschine bzw. der Wärmepumpe geschieht mit Hilfe eines elektronischen Temperatursensors. Dieser gibt eine zur Temperatur proportionale Spannung ab. Zur Eichung des Sensors rufen Sie unter dem Menüpunkt TEMPERATURVERLAUF das Untermenü EICHUNG auf. Sie können zwei Eichmessungen machen, z. B. eine bei Zimmertemperatur und eine im Eiswasser. Das Programm zeigt die gemessenen Daten an und berechnet die zugehörige Eichkurve. Gleichzeitig wird der gültige Eichungsbereich angezeigt.

Achten Sie darauf, die Flügelschrauben am Flanscheinsatz nicht zu stark anzuziehen (mögliche Zerstörung des Glaszylinders).

Das Einlaufen des Heißluftmotors, das mit Hilfe des Menüpunktes DREHZAHLENTWICKLUNG registriert werden kann, erfordert jeweils relativ viel Zeit (etwa 15 Minuten). Dann sollte sich die Drehzahl des Motors auf $\pm$ 2-3 U/min stabilisiert haben.

Für die Bremsmessungen am Heißluftmotor ist es aus experimentellen Gründen am günstigsten, wenn die Nylonschnur in der auf der Grundplatte der Maschine dargestellten Weise um die Achse des Schwungrades geschlungen und an der Federwaage befestigt wird. Der Knoten in der Schnur soll verhindern, dass bei eventuellem

Zurückdrehen des Motors die Federwaage zerstört wird. Während jeder Bremsung des Heißluftmotors ist die Nylonschnur an der Welle des Schwungrades mit einigen Tropfen Nähmaschinenöl mehrmals zu tränken.

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung:

1. Betreiben Sie die Maschine als Kältemaschine und lassen Sie $2\,\mathrm{cm}^3$ Wasser zu Eis gefrieren.

   a) Messen Sie die Gefrierzeit des Wassers.

   b) Bestimmen Sie die Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine.

   c) Nehmen Sie das zugehörige p-V-Diagramm auf.

   d) Kühlen Sie anschließend das Eis bis auf ca. $-25°$ C ab.

2. Betreiben Sie unmittelbar daran anschließend die Maschine als Wärmepumpe und tauen Sie das Eis wieder auf. Erwärmen Sie das Wasser bis auf *höchstens 20° C*.

   a) Messen Sie die Auftauzeit.

   b) Bestimmen Sie die Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine.

   c) Nehmen Sie das p-V-Diagramm auf.

3. Betreiben Sie die Maschine als Heißluftmotor. Notieren Sie bei den Teilaufgaben a)–e) jeweils die Heizleistung!

   a) Bringen Sie die Maschine bei ca. 15 A Heizstrom zum Laufen. Warten Sie, bis der Motor eingelaufen ist und die Drehzahl sich stabilisiert hat. Notieren Sie die Drehzahl. Nehmen Sie das p-V-Diagramm für den Leerlauf auf.

b) Bremsen Sie die Maschine mit Gewichtsstücken von 2 kg ab. Warten Sie, bis sich die Drehzahl stabilisiert hat. Notieren Sie die Drehzahl und die Kraft die an der Federwaage angreift. Nehmen Sie das p-V-Diagramm auf.

c) Wiederholen Sie b) mit einem Gewicht von 1 kg.

d) Wiederholen Sie c) mit der Drehzahl, die sich in Teilaufgabe b) eingestellt hatte, durch Vermindern der Heizleistung.

Auswertung

1. Bestimmen Sie die Kälteleistung der Kältemaschine (J/s) aus der Gefrierzeit und aus dem p-V-Diagramm. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der Kältemaschine aus dem p-V-Diagramm. Bestimmen Sie die Größenordnung des Wirkungsgrades.

2. Werten Sie wie unter 1. die Wärmepumpe aus.

3. Bestimmen Sie jeweils

   - die Leistung des Heißluftmotors aus der Bremsmessung und der Umdrehungsgeschwindigkeit.
   - die Leistung des Heißluftmotors aus dem p-V-Diagramm und der Umdrehungsgeschwindigkeit.
   - den Wirkungsgrad des Heißluftmotors aus der aufgenommenen elektrischen Leistung und der abgegebenen Leistung.
   - den mechanischen Verlustfaktor aus der gemessenen und aus der aus dem p-V-Diagramm ermittelten Leistung.
   - den Wärmeverlustfaktor aus der pro Zyklus vom Motor aufgenommenen Wärmemenge (p-V-Diagramm) und der insgesamt zugeführten Wärmemenge (elektrische Energie).

- den Wirkungsgrad aus dem p-V-Diagramm. Vergleichen Sie diesen mit dem direkt aus abgegebener und aufgenommener Leistung ermittelten Wirkungsgrad. Berücksichtigen Sie dabei in quantitativer Weise die mechanischen und Wärmeverluste.
- Zusätzlich: Konstruieren Sie die Isothermen zur höchsten und niedrigsten Temperatur in einem gemessenen p-V-Diagramm, verwenden Sie die Tangenten für V = const. am gemessenen p-V-Diagramm und vergleichen Sie das so entstandene p-V-Diagramm eines Stirlingprozesses mit dem gemessenen. Welchen Wirkungsgrad hat der konstruierte Stirlingprozess? Vergleichen Sie den am Heißluftmotor ermittelten Wirkungsgrad mit dem Wirkungsgrad des konstruierten Stirlingprozesses.

E 2b Kennlinien von Halbleiterelementen

Aufgabenstellung

1. Die Kennlinien verschiedener Halbleiterdioden sind dynamisch aufzunehmen. Strom und Spannung sind mit Hilfe einer entsprechenden Schaltung auf dem Oszilloskop darzustellen, und nach der Eichung des Oszilloskops auf Millimeterpapier zu übertragen. Der Verlauf der Kennlinien und die Anwendungsmöglichkeiten der einzelnen Dioden sind kurz zu diskutieren.

2. Der Kennlinienverlauf einer Tunneldiode ist dynamisch aufzunehmen und auf Millimeterpapier zu übertragen. Anhand des Verlaufs der Kennlinie ist deren praktische Bedeutung und Verwendung zu diskutieren.

3. Die Temperaturabhängigkeit eines NTC-Widerstandes ist zu messen.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 14.4
2. Lehmann: Dioden und Transistoren, Kap. 1 und 2
3. Pütz: Einführung in die Elektronik, Kap. 3 und 4
4. Beuth: Bauelemente der Elektronik, Kap. 1, 2.5–6, 5, 6
5. Tietze-Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Kap. 3, 4.6, 4.8
6. Bitterlich: Elektronik, Kap. 1.3.1–2, 1.3.5
7. Teichmann: Halbleiter, Bd. 21, Kap. 3–6, 8, 9

Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter dem Bändermodell allgemein?

2. Worin unterscheiden sich die Anordnungen der Energiebänder von Metallen, Halbleitern und Isolatoren?
3. Erklären Sie die Begriffe: Donatoren, Akzeptoren, n-Leitfähigkeit, p-Leitfähigkeit und Defektelektronen.
4. Erläutern Sie das elektrische Verhalten eines pn-Übergangs ohne und mit angelegter äußerer Spannung!
5. Was versteht man unter einer realen Halbleiterdiode?
6. Erklären Sie Zener- und Avalanche-Effekt!
7. Welche Anwendungen finden Tunneldioden?
8. Was sind Heißleiter, Kaltleiter, Varistoren und Varactoren?
9. Wie funktioniert ein Oszilloskop?

Aufgabendurchführung

Machen Sie sich zunächst mit dem Oszilloskop vertraut. Geben Sie dazu eine Wechselspannung von 2 V auf den Y-Eingang des Oszilloskops und prüfen Sie die Funktionen der verschiedenen Bedienungsknöpfe. Untersuchen Sie dann die Gleichspannung des Netzgerätes. Skizzieren Sie den Zeitverlauf von Gleich- und Wechselspannung mit Angabe einer Spannungs- und Zeitskala.

Zu Aufgabe 1

Nehmen Sie, nachdem Sie sich mit der Handhabung des Oszilloskops vertraut gemacht haben, mit Hilfe der unten stehenden Schaltung zunächst die Kennlinie eines Ohmschen Widerstandes auf. Diese dient zur Eichung des Oszilloskops. Benutzen Sie dazu eine Wechselspannung von $U_0 = 2\,V$.

Um bei dieser Schaltung störende Erdschleifen zu verhindern, ist als Erde nur die Abschirmung des Koaxialkabels für den y-Eingang zu verwenden. Bei der Eichung des Oszilloskops legt man zweckmäßigerweise die Ruhelage des Elektronenstrahles in die Mitte des Bildschirmes. Bei einer Empfindlichkeit von $0.5\,V/cm$ für die y-Ablenkung des Oszilloskops läßt sich auch die x-Ablenkung am

Drehknopf X-MAGN leicht auf die gleiche Empfindlichkeit[1] einregeln. Die Widerstandskennlinie ist für diesen Fall ($R_1 = R_2$) dann eine Gerade mit der Steigung -1. Erklären Sie, weshalb diese Widerstandskennlinie eine negative Steigung besitzt und beachten Sie diese Eigenschaft der Schaltung bei der weiteren Aufnahme von Kennlinien.

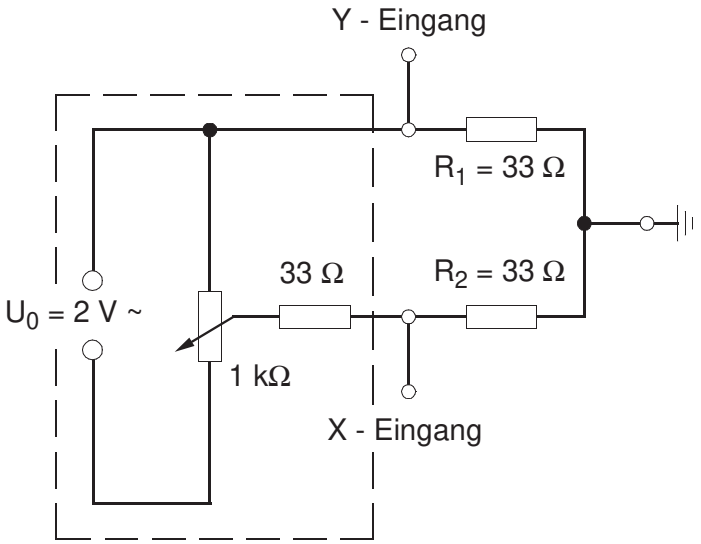

Abb. 1: Schaltung zur Messung der Kennlinie des Ohmschen Widerstandes

Nach der Eichung des Osilloskops sind nun die Kennlinien der einzelnen Dioden leicht darzustellen, indem man nur den Widerstand R_2 durch die jeweilige Diode ersetzt. Überlegen Sie, wie die Diode gepolt sein muss, damit die positive Spannung an der Diode in x-Richtung nach rechts und der positive Strom in y-Richtung nach unten geschrieben werden. Erhöhen Sie die Spannung U_0 und die Empfindlichkeit für den y-Eingang, um den Steilanstieg des Sperrstromes bei der Zenerdiode ZPD 2.7 und ZM 3.9 zu erfassen. Beachten Sie, dass der maximal zulässige Arbeitsstrom (ZPD 2.7: 135 mA, ZY 10: 90 mA) bei den Aufnahmen der Kennlinien nicht überschritten wird.

[1] Mit dem z. Z. beim Versuch stehenden Oszilloskop kann sowohl die Vertikal- als auch die Horizontal-Ablenkempfindlichkeit eingestellt werden.

Die einzelnen Kennlinien sind auf Millimeterpapier zu übertragen. Berechnen Sie außerdem für die Zenerdiode ZPD 2.7 aus der gemessenen Kennlinie den Zenerwiderstand für eine Zenerspannung $U_Z = 2.7\,V$.

Diskutieren Sie kurz anhand des Verlaufs der einzelnen Kennlinien der Halbleiterdioden deren praktische Bedeutung und Verwendung.

zu Aufgabe 2

Nehmen Sie mit Hilfe der Schaltung in Abb. 2 die Kennlinie einer Tunneldiode auf und übertragen Sie ihren Verlauf auf Millimeterpapier.

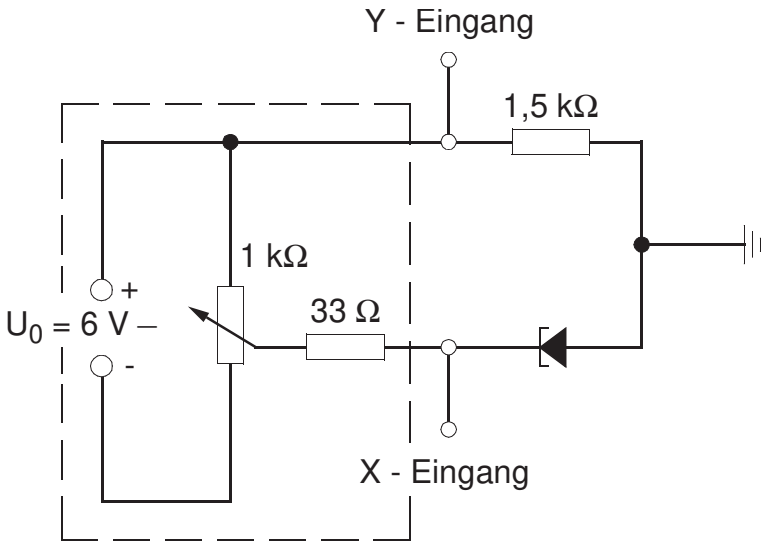

Abb. 2: Schaltung zur Messung der Kennlinie der Tunneldiode

Achtung, die Tunneldiode darf nicht in Sperrichtung betrieben werden.

Bestimmen Sie außerdem das Verhältnis I_P/I_V und die Steigung der in dieser Kennlinie enthaltenen Widerstandsgeraden. Diskutieren Sie kurz anhand des Kennlinienverlaufs der Tunneldiode deren praktische Bedeutung und Verwendung.

Abb. 3 zeigt den Kennlinienverlauf einer Tunneldiode in Durchlaßrichtung; der Strom steigt zunächst mit geringer zunehmender Spannung bis zum Wert I_P an, um dann mit steigender Spannung wieder bis zu dem Tiefstwert I_V zu fallen. Anschließend geht die Kennlinie in eine Diodenkennlinie über. Um die Diode nicht zu überlasten, darf jedoch die Spannung nicht viel weiter erhöht werden. Wird die Diode in einer Schaltung betrieben, in der der Vorwiderstand des angeschlossenen Stromkreises größer ist als der Betrag des negativen Widerstandes zwischen U_P und U_V, wie dies in der Schaltung in Abb. 2 der Fall ist, wird das Gebiet zwischen U_P und U_V instabil. Sobald U_P erreicht ist, springt die Spannung auf einen Wert U_S. Abb. 4 zeigt den ungefähren Verlauf der Kennlinie, der bei der Realisierung der unten stehenden Schaltung auf dem Bildschirm des Oszilloskops sichtbar wird.

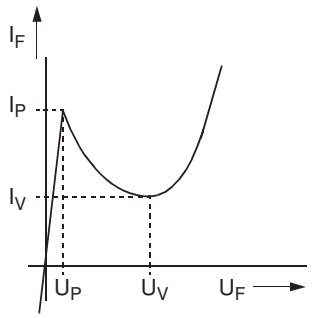

Abb. 3: Theoretische Kennlinie einer Tunneldiode

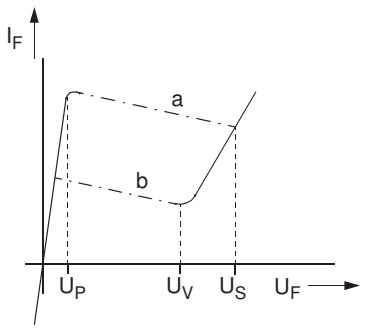

Abb. 4: Realer Kennlinienverlauf einer Tunneldiode

zu Aufgabe 3

Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit eines NTC-Widerstandes. Tauchen Sie dazu den am Thermometer festgeklebten NTC-Widerstand in ein Wasserbad und erhöhen Sie schrittweise die Temperatur des Wassers beginnend bei 20° bis 90° C. Erhöhen Sie die Temperatur nur langsam und achten Sie auf guten Temperaturausgleich. Der Widerstand des NTC-Widerstandes wird mit dem digitalen Multimeter gemessen. Die Änderung des Widerstandes mit der Temperatur erfolgt näherungsweise nach der Formel:

$$R(T_1) = R(T_2) \exp\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T_2}\right) \tag{1}$$

T_1 und T_2 werden in Kelvin angegeben. Die Regelkonstante B ist eine materialabhängige Konstante, die Werte zwischen 2500 K und 5000 K annehmen kann. Durch Logarithmieren und Differenzieren erhalten Sie aus obiger Gleichung für den Temperaturkoeffizienten α_T die Beziehung $\alpha_T = B/T_2$.

Tragen Sie nun die gemessenen Werte in ein Diagramm ein und bestimmen Sie aus der graphischen Darstellung die Regelkonstante B des verwendeten NTC-Widerstandes.

Erklären Sie, weshalb zur graphischen Bestimmung von B der Widerstand gegen den Kehrwert der Temperatur des Wassers auf halblogarithmischem Papier aufgetragen werden muss.

Berechnen Sie außerdem für eine Temperatur T = 40° C dessen Temperaturkoeffizienten α_T.

Um einen größeren Temperaturbereich zu überdecken, können Sie die Messung mit einem elektrisch beheizten NTC-Widerstand wiederholen. Tragen Sie den Widerstand über der umgesetzten elektrischen Leistung auf. (Stationäres Gleichgewicht abwarten!) Die maximale Heizleistung soll 5 Watt nicht überschreiten.

E 2d Transistorkennlinien

Aufgabenbeschreibung

Durch Aufnahme der Kennlinien von Transistoren sollen deren physikalische Eigenschaften verständlich gemacht werden. Die eigentliche Messaufgabe wird von einem Computer (PC) mit geeigneter Hard- und Software (APLab©) wahrgenommen.

Für den Aufbau der Grundschaltungen steht ein Steckbrett mit den benötigten Schaltelementen zur Verfügung. Als Spannungsquellen und -messgeräte dienen zwei DA- und vier AD-Wandler, die durch einen Computer angesteuert werden.

Literatur

1. Jean Pütz: Einführung in die Elektronik, Kap. 4, 5, 6 und 7
2. Johannes G. Lehmann: Dioden und Transistoren, Kap. 3
3. Klaus Beuth: Bauelemente der Elektronik, Kap. 2
4. Hans Biefer: Industrielle Elektronik, Kap. II, 9
5. Leybold-Heraeus: Allgemeine Elektronik, Teilgebiet 1
6. U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik, Kap. 6, 18.10, 18.11
7. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 14.4

Fragen zum Versuch

1. Welche Materialien sind wichtige Halbleiter?
2. Was ist bipolarer Strom?
3. Wodurch wird physikalisch ein pn-Übergang charakterisiert?
4. Womit wird Germanium p-dotiert?
5. Wie kann man mit einfachen Messgeräten feststellen, ob ein Transistor defekt ist?

6. Wie sehen die Grundschaltungen eines Transistors aus?

Folgende Fragen beziehen sich auf die Emitterschaltung:

7. Was nennt man Eingangskennlinie, was Ausgangskennlinie, wie misst man sie?
8. Was versteht man unter der Strom-Steuerkennlinie?
9. Was ist der Arbeitspunkt und wie wird er gewählt?
10. Wo und wie wird die Widerstandsgerade eingezeichnet?
11. Was ist die Leistungshyperbel?
12. Wie ist die Stromversorgung bzw. Spannungsverstärkung definiert?
13. Welche Möglichkeiten gibt es, den Basisgleichstrom zu erzeugen?

Folgende Fragen beziehen sich auf die Interfacetechnik:

14. Was sind DA- bzw. AD-Wandler?
15. Wie funktionieren DA- und AD-Wandler (im Prinzip)?
16. Wie ist die Auflösung eines DA- bzw. AD-Wandlers definiert?

Versuchsdurchführung

Allgemeiner Hinweis:

Machen Sie sich mit der Handhabung von APLab© vertraut. Dazu finden Sie an Ihrem Arbeitsplatz eine Anleitung. Sollten Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich an Ihren Betreuer.

Aufgabe 1: Diodenkennlinie

Nehmen Sie eine Diodenkennlinie mit Hilfe von APLab© auf. Dazu muss die Datei `DIODENKENNLINE.LAB` geladen werden. Diese kann nach dem Start von APLab© oder nach dem Auswählen von VERSUCHSAUFBAU LÖSCHEN aus einem Dialogfenster ausgewählt werden.

Für die Messung der Diodenkennlinien wird die Grundschaltung in Abb. 1 verwendet.

Da AD-Wandler nur Spannung messen können, ist der Strom aus dem Spannungsabfall an einem Referenzwiderstand R zu bestimmen. Machen Sie sich vor dem Versuch klar, wie der Strom I aus U_{AD1}, U_{AD2} und R bestimmt werden kann und welche systematischen Fehler bei dieser Messmethode auftreten können.

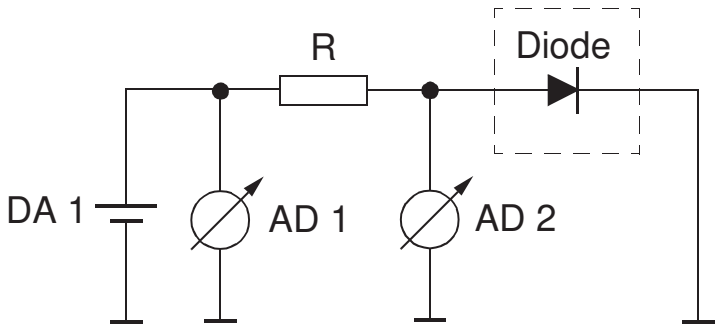

Abb. 1: Grundschaltung zur Messung der Diodenkennlinien

Bauen Sie die Grundschaltung auf und verkabeln Sie diese mit dem Rechner. Alle schwarzen Buchsen an der Interface Steckerleiste sind intern miteinander verbunden und stellen den Massenanschluß dar. Wählen Sie geeignete Messgeräte und nehmen Sie als Test die Kennlinie eines Widerstandes auf. Die Kennlinie muss eine Gerade durch den Ursprung ergeben, deren Steigung dem Widerstand entspricht. Drucken Sie diese Kennlinie aus.

Ersetzen Sie den Widerstand durch eine Diode und messen Sie deren Kennlinie. Drucken Sie die Kennlinie aus.

Wiederholen Sie die Messung mit einem anderen Vorwiderstand und drucken Sie die Kennlinie aus.

Aufgabe 2: Transistorkennlinie

Nehmen Sie die Transistorkennfelder für eine Emitterschaltung mit verschiedenen (min. 3) Kombinationen von Basiswiderstand und Lastwiderstand auf. Es empfiehlt sich, folgende Kombinationen für die Widerstände zu wählen: ($R_1 = 68\,k\Omega$, $R_2 = 390\,\Omega$), ($R_1 = 10\,k\Omega$, $R_2 = 390\,\Omega$), ($R_1 = 68\,k\Omega$, $R_2 = 1000\,\Omega$). Dazu wählen Sie die Versuchsdatei `TRANSISTOR.LAB`.

Für die Messung ist die in Abb. 2 skizzierte Emitterschaltung aufzubauen und mit dem Rechner zu verbinden.

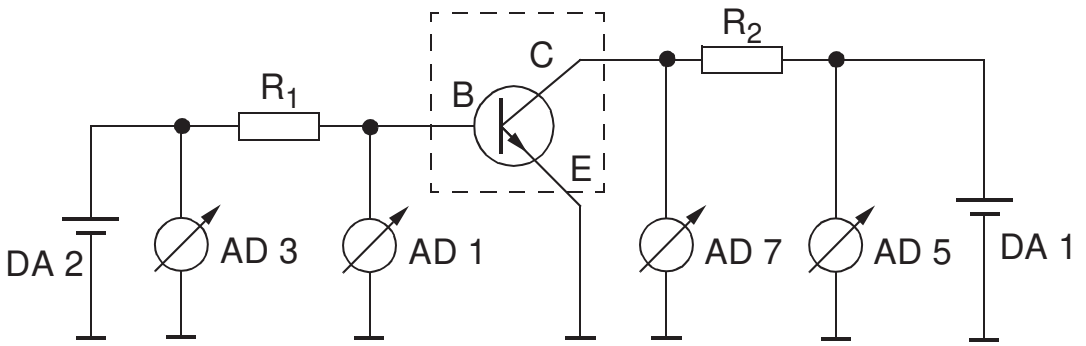

Abb. 2: Emitterschaltung zur Messung der Transistorkennlinien

Ein Transistorkennlinienfeld besteht aus drei verschiedenen Einzelkennlinien, der Eingangskennlinie (I_B über U_{BE}), der Stromsteuerkennlinie (I_C über I_B) und dem Ausgangskennlinienfeld (I_C über U_{CE}). Machen Sie sich vor dem Versuch klar, wie Sie die gesuchten Messgrößen aus den gemessenen Spannungen bestimmen können. Verwenden Sie geeignete Messgeräte und bestimmen Sie alle Einzelkennlinien und drucken Sie diese aus. Achten Sie dabei auch auf geeignete Einheiten.

Um einen Transistor nicht zu überlasten, muss ein Arbeitswiderstand R_2 eingebaut werden, den Sie anhand der Kennlinien dimensionieren sollten. Dazu tragen Sie in ein Ausgangskennlinienfeld die Leistungshyperbel ein ($P_{tot} = 300\,\mathrm{mW}$, $U_{DA2} = 5\,\mathrm{V}$). Wie groß muss R_2 in diesem Fall mindestens sein? Beachten Sie, dass die zu $R_{L\,min}$ gehörende Lastwiderstandsgerade die zuvor eingezeichnete Leistungshyperbel nicht schneiden darf! Will man den Transistor als Wechselspannungsverstärker einsetzen, so muss man den Arbeitspunkt einstellen.

Wählen Sie den Arbeitspunkt (Begründung!) und zeichen Sie diesen in das Kennlinienfeld ein. Entnehmen Sie dem Kennlinienfeld die Gleichstromverstärkung $B = I_C/I_B$ und die Kleinsignalstromverstärkung $\beta = \partial I_C/\partial I_B$ ($U_{CE} = \mathrm{const.}$) und tragen Sie beide als Funktion des Kollektorstromes auf. Diskutieren Sie anhand des Kennlinienfeldes das Verstärkungsverhalten der Schaltung.

Hinweis

Beachten Sie, dass nicht alle Aufgabenteile mit APLAB© durchgeführt werden sollen. APLAB© ist hauptsächlich ein Messwerterfassungsprogramm, das auch die Auswertung unterstützt. Oft kann ein Diagramm schneller von Hand gezeichnet werden. Setzen Sie APLAB© nur dort zur Auswertung ein, wo es Ihnen sinnvoll erscheint.

O 2b Gitterspektralapparat und Monochromator

Aufgabenbeschreibung

Mit den bekannten Wellenlängen einer Na-Dampflampe soll ein Gitterspektralapparat geeicht und sein Auflösungsvermögen bestimmt werden. Die so geeichte Apparatur wird dann dazu benutzt, um die beiden gelben Spektrallinien einer Hg-Dampflampe zu vermessen. Außerdem soll in einem weiteren Versuchsteil das gesamte sichtbare Spektrum der Hg-Dampflampe mittels eines Monochromators und eines x-t-Schreibers aufgezeichnet werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. III
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 10.1, 12.3
3. Pohl: Optik und Atomphysik III, §75
4. Born: Optik, Kap. IV, §51

Fragen zum Versuch

1. Was besagt das Huygenssche Prinzip?
2. Was versteht man unter der Interferenz zweier Wellenzüge?
3. Welche Bedingungen müssen zwei Wellenzüge erfüllen, damit Interferenz beobachtet werden kann?
4. Wie beschreibt man das Beugungsbild eines Spaltes bei parallelem Lichteinfall im Fernfeld?
5. Wie macht sich die Form der Lichtquelle bemerkbar?
6. Wie ändert sich die Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von der Anzahl der beugenden Spalte?

7. Aus welcher Bedingung leitet man das spektrale Auflösungsvermögen eines Gitters her?
8. Vergleichen Sie die Winkeldispersion eines Gitters mit der eines Prismas!
9. Kennen Sie noch weitere Spektrometer für elektromagnetische Wellen?
10. Welche Vorteile haben die einzelnen Spektrometer?
11. Mit welchen Verfahren kann man Wellenlängen bestimmen, ohne bekannte Linien zu benutzen?
12. Wie kann man das benutzte Spektrometer verbessern?
13. Wie funktioniert eine Metalldampflampe, z. B. eine Na-Dampflampe.
14. Wie unterscheidet sich das Licht einer Spektrallampe (z. B. Na-Dampflampe) von dem Licht einer Glühlampe oder dem Licht der Sonne?
15. Kann man die Frequenz des Lichts messen? (Frage zum Nachdenken)

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Eichen Sie den Apparat und bestimmen Sie die Gitterkonstante mittels der beiden gelben Na-Linien bei den Wellenlängen $\lambda_1 = 588{,}99\,\mathrm{nm}$ und $\lambda_2 = 589{,}59\,\mathrm{nm}$.

2. Bestimmen Sie das Auflösungsvermögen und vergleichen Sie zwischen theoretischem und tatsächlichem Auflösungsvermögen.

3. Bestimmen Sie die Wellenlängendifferenz der beiden gelben Hg-Linien

   - mit Hilfe der Formel für das theoretische Auflösungsvermögen, wenn Sie wie in Aufgabe 2 beschrieben die Zahl der Gitterspektren soweit verzögern, dass die beiden Na-Linien gerade nicht mehr aufgelöst werden können.

- indem Sie die Wellenlänge jeder Linie messen und daraus den Linienabstand berechnen.

Welche Art der Messung ist zuverlässiger?

4. Nehmen Sie mit Hilfe des 2. Monochromators das Spektrum der Hg-Dampflampe im Bereich von 350 – 590 nm auf. Eichen Sie zuvor die Wellenlängenskala des Monochromators mit den beiden bekannten Na-Linien.

5. Auswertung

   zu 1. Tragen Sie die Gitterkonstante über der Ordnungszahl m auf.

   zu 2. Vergleichen Sie die Genauigkeit beider Messmethoden.

   zu 4. Werten Sie das Spektrum aus und vergleichen Sie die Wellenlänge

      a) mit den in Teil 3 bestimmten Ergebnissen und
      b) mit den Literaturwerten.

Versuchsaufbau

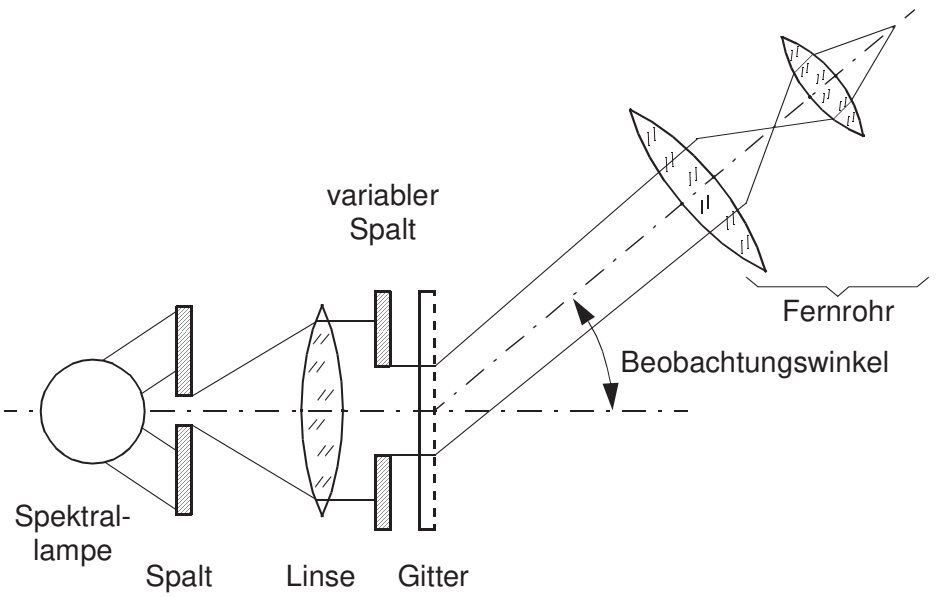

Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau

Das von der Spektrallampe (Na, Hg), Spalt und Linse gebildete parallele Strahlenbündel trifft auf das Strichgitter, das je nach Versuch von einem weiteren Spalt abgedeckt ist. Mit einem schwenkbaren Fernrohr können die einzelnen Linien in verschiedenen Ordnungen betrachtet und ihr Beugungswinkel ϑ bestimmt werden. Der variable Spalt wird nur bei Messung des Auflösungsvermögens benötigt.

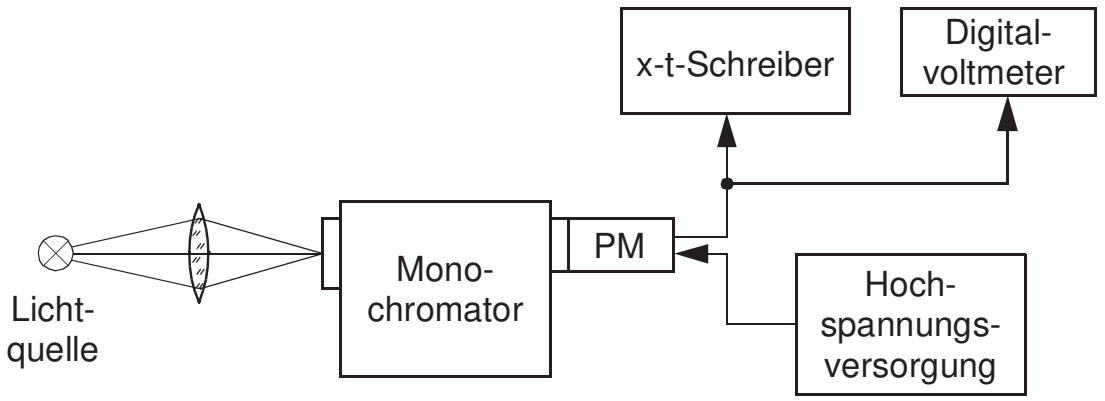

Abb. 2: Versuchsaufbau mit Monochromator und x-t-Schreiber

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

zu 1) Die Dampflampen sollten einige Minuten brennen, bevor man mit der Messung beginnt. Warum? Bestimmen Sie den Beugungswinkel de beiden Natrium-Lampen für mehrere Ordnungen und berechnen Sie daraus die Gitterkonstante. Überlegen Sie unter welchen Bedingungen die Messung am zuverlässigsten wird.

zu 2) Schränken Sie mit Hilfe des variablen Spaltes die Zahl der beleuchteten Gitterstriche ein, bis die beiden gelben Na-Linien nicht mehr zu trennen sind. Bestimmen Sie aus der Breite des variablen Spaltes das Auflösungsvermögen. Tragen Sie das gemessene Auflösungsvermögen über der Ordnungszahl auf und vergleichen Sie es mit dem berechneten Wert.

In welcher Ordnung sollte die Absolutmessung am genauesten werden, welche Eigenschaften des Gitterspektralapparates erschweren eine solche Messung?

zu 4) Um maximale Auflösung zu erreichen, muss das gesamte Gitter des Monochromators ausgeleuchtet werden. Dazu müssen der Durchmesser der Linse, die voll ausgeleuchtet sein soll und ihr Abstand zum Eintrittsspalt des Monochromators im Verhältnis 1/4 stehen. Bilden Sie deshalb die Lichtquelle mit einer Linse auf den Eintrittsspalt ab.

Achten Sie dabei auf die folgenden Einstellungen (siehe Abb. 2):

- Monochromator: Ein- und Austrittsspalt 50 μm
- x-t-Schreiber: 0.5 V Empfindlichkeit (cal.), 60 mm/min Vorschub
- Photomultiplier: 480 V, die Spannung am Digitalvoltmeter darf 1 Volt nicht überschreiten. Ansonsten könnte der Photomultiplier zerstört werden.

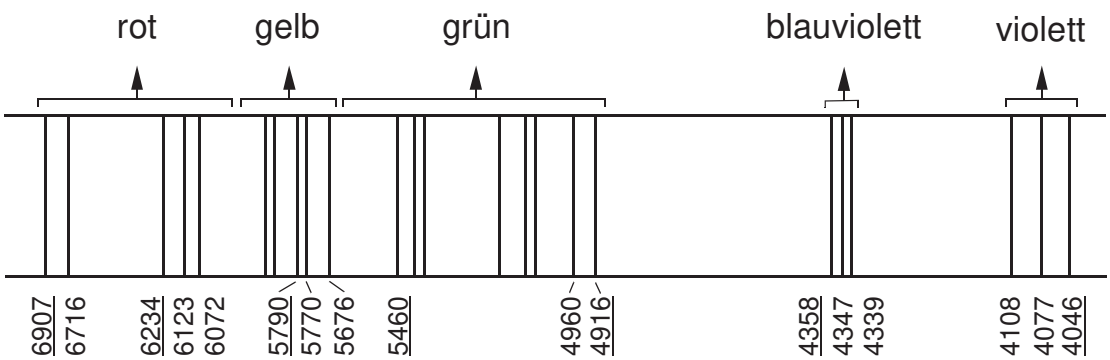

Abb. 3: Quecksilberspektrum

O 4a Mikrowellen / Braggreflexion

Aufgabenbeschreibung

Mit Mikrowellen sollen zur Lichtoptik analoge Versuche durchgeführt werden. An einem Modellkristall wird die Bragg-Reflexion untersucht.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, (Kristallstruktur)
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 14.1-3, 12.5.2
3. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik
4. Kopitzki: Einführung in die Festkörperphysik
5. Nimtz: Mikrowellen
6. Unilab: Microwaves (Versuchsbeschreibung beim Versuch)

Fragen zum Versuch

Mikrowellen

1. Bei welchen Frequenzen bzw. Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung spricht man von Mikrowellen?
2. Erklären Sie, warum das Stabgitter als Polarisationsfilter arbeitet?

Optik

1. Erläutern Sie die Begriffe lineare Polarisation und Zirkularpolarisation.
2. Beschreiben Sie die Interferenz an dünnen Schichten. Wann tritt Verstärkung, wann Auslöschung ein?

3. Wie funktioniert ein Fabry-Perot-Interferometer?
4. Wie ist das Interferometer von Michelson aufgebaut?
5. Beschreiben Sie die Beugung am Spalt, am Doppelspalt, am Gitter.

Kristallstruktur

1. Informieren Sie sich über die verschiedenen Kristallstrukturen. Was versteht man unter einem einfach kubischen (kubisch raumzentrierten, kubisch flächenzentrierten) Gitter?
2. Welche Struktur haben NaCl, CsCl und Diamant?
3. Wie sind die Millerschen Indizes definiert?
4. Erläutern Sie die Bragg-Bedingung.
5. Worin unterscheiden sich die verschiedenen Methoden der Röntgenstreuung an Kristallen (Laue-Verfahren / Drehkristallverfahren / Debye-Scherrer-Verfahren)? Welche dieser drei Methoden entspricht etwa dem Versuch (Aufgabe 4)?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Zeigen Sie, dass der Mikrowellensender polarisierte Wellen liefert.

2. Zeigen Sie, dass das Stabgitter ein Polarisationsfilter darstellt und dass somit ein um 45° geneigtes Stabgitter die Polarisationsebene um 45° dreht.

3. Bestimmen Sie die Wellenlänge der verwendeten Strahlung mit folgenden Anordnungen:

   - Interferenz an dünnen Schichten
   - Michelson-Interferometer
   - Doppelspalt

4. Messen Sie die Bragg-Reflexe an den (100)-, (110)- und (111)-Ebenen des Modellkristalls. Berechnen Sie den Netzebenenabstand!

Hinweise zu den Aufgaben

zu Aufgabe 1

Der Empfänger sollte etwa 1 m entfernt vom Sender aufgestellt werden. Drehen Sie den Empfänger um seine lange, horizontale Achse und messen Sie die Intensität in Abhängigkeit vom Drehwinkel.

zu Aufgabe 3

Interferenz an dünnen Schichten: Versuchsaufbau siehe Abb. 1. Warum steht der Empfänger hinter dem Sender? Verschieben Sie den Spiegel (Metallplatte) und messen Sie die Positionen der Maxima und Minima.

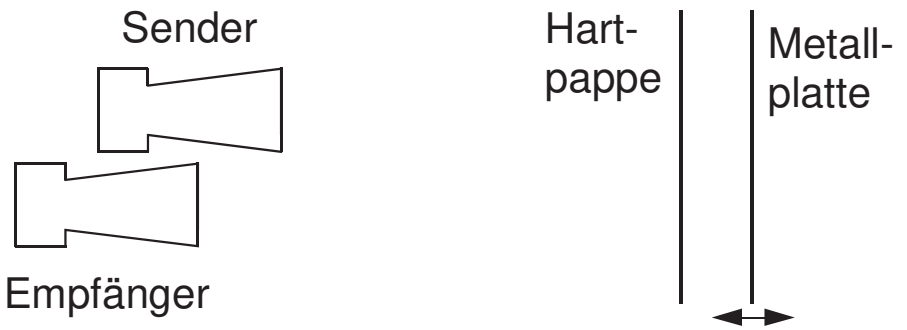

Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau: Interferenz an dünnen Schichten

Michelson-Interferometer: Verschieben Sie einen der Spiegel und messen Sie die Positionen der Maxima und Minima.

Doppelspalt: Versuchsaufbau siehe Abb. 2. Messen Sie die Intensitätsverteilung hinter dem Spalt.

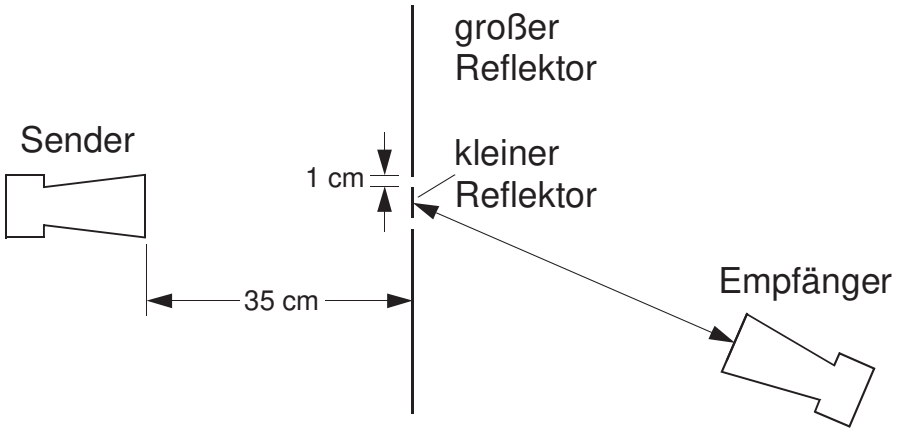

Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau: Doppelspalt

zu Aufgabe 4

Anhand eines Modellkristalls soll die Bragg-Reflexion untersucht werden. Das Kristallmodell besteht aus Aluminiumkugeln, die in einen Styroporwürfel eingebettet sind. Die Kristallstruktur ist einfach kubisch.

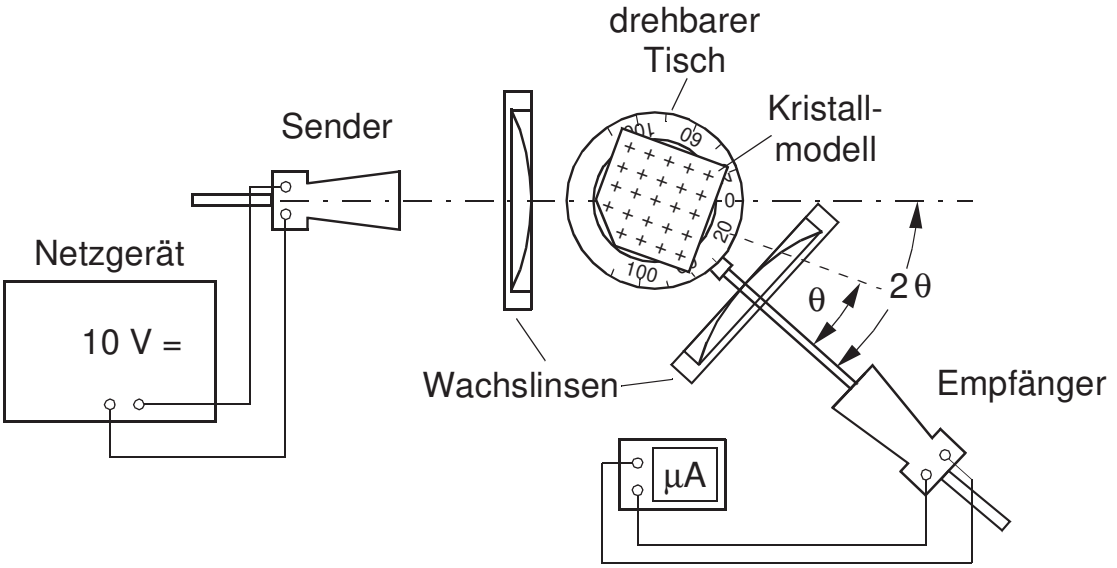

Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau: Bragg-Reflexion

Machen Sie sich vor Versuchsbeginn klar, welches die 100 (110,111)-Ebene ist. Überlegen Sie auch, wie Sie den Kristall auf den Drehtisch legen müssen, um den 110-Bragg-Reflex beobachten zu können (Hinweis: Der Reflex muß in der durch Sender, Empfänger und Kristall gebildeten Ebene liegen).

Um gute Ergebnisse zu erhalten, muss ein optimaler Abstand zwischen Sender und Linse (bzw. Empfänger und Linse) gewählt werden (Probieren Sie, wie Sie unter 0° maximale Intensität bekommen). Messen Sie bei rotierendem Kristall die Intensitätsverteilung der reflektierten Strahlung (Warum rotiert der Kristall?). Ordnen Sie die gemessenen Maxima in der Intensitätsverteilung den verschiedenen Bragg-Reflexen zu. Beachten Sie bei der Berechnung der Netzebenenabstände, dass der während der Messung abgelesene (Empfänger-)Winkel halbiert werden muss (Warum?).

A 1a e/m-Bestimmung

Aufgabenbeschreibung

Die spezifische Elektronenladung e/m soll nach zwei verschiedenen Verfahren bestimmt werden.

Literatur

1. Finkelnburg: Einführung in die Atomphysik
2. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. VIII
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 8.2
4. Schpolski: Atomphysik I, Kap. I
5. Kohlrausch: Praktische Physik II

Fragen zum Versuch

1. Erläutern Sie die wichtigsten Eigenschaften des Elektrons (Masse, Ladung, Spin (anschauliche Deutung), magnetisches Moment, Erzeugung freier Elektronen, Elektron als Baustein der Materie, Elektron als Träger des elektrischen Stromes, etc.).
2. Wie kann man die Masse und die Ladung des Elektrons messen? Aus welchen physikalischen Erscheinungen hat man die Existenz des Elektrons erschlossen? Woher weiß man, dass das Elektron einen Spin hat (Spektroskopie)?
3. Stellen Sie die Bewegungsgleichungen für ein Elektron in einem konstanten elektrischen Feld auf:

    a) Dabei habe das Elektron die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$.

b) Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Elektrons, das die Spannung 1 Volt durchlaufen hat?

4. Stellen Sie die Bewegungsgleichung für ein Elektron in einem konstanten Magnetfeld auf (Lorentzkraft). Was versteht man unter der Zyklotronfrequenz? Ändert sich der Betrag der Geschwindigkeit?
5. Auf welcher Bahn bewegt sich ein Elektron, auf das sowohl ein elektrisches wie auch ein magnetisches Feld einwirken? Betrachten Sie dabei qualitativ folgende Fälle:

   a) $\vec{E} \parallel \vec{B}$

   b) $\vec{E} \perp \vec{B}$

   Hier soll die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ senkrecht zu $\vec{E}$ und $\vec{B}$ stehen. Wie groß müssen $\vec{v}_0$, $\vec{E}$ und $\vec{B}$ sein, damit das Elektron geradlinig weiterfliegt?
6. Erläutern Sie qualitativ die Abbildung von Elektronenstrahlen durch magnetische und elektrische Linsen.
7. Erläutern Sie qualitativ den Bau und die Wirkungsweise einer Braunschen Röhre.
8. Erläutern Sie qualitativ die Funktion und den Aufbau einer Helmholtzschen Spule.
9. Begründen Sie ausführlich die Fadenstrahlmethode und das Verfahren von Busch zur Messung von e/m.
10. Wie entstehen die Leuchterscheinungen im Fadenstrahlrohr? Wie hoch muß etwa der Gasdruck in der Röhre sein? Wieviel Energie verliert ein Elektron ungefähr, wenn es ein Atom zum Leuchten anregt? Wie groß ist die mittlere freie Weglänge der Elektronen bei 10^{-3} Torr, wenn man für den Wirkungsquerschitt $10^{-15}\,\mathrm{cm}^2$ annimmt?
11. Informieren Sie sich über die Versuche von Kaufmann zur e/m-Bestimmung.

Aufgabenstellung

1. Aufgabe: Fadenstrahlrohr

Lenken Sie mit dem Magnetfeld der Helmholtzspule die Elektronen auf eine Kreisbahn und bestimmen Sie bei vorgegebenem Radius die spez. Elektronenladung e/m.

Führen Sie den Versuch mit

1. fester Beschleunigungsspannung und variablem Spulenstrom
2. festem Spulenstrom und variabler Beschleunigungsspannung durch.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Zubehör: Fadenstrahlrohr, Helmholtzspulen, Netzgerät für Beschleunigungsspannung und Heizung, Gleichspannungsgerät für Spulenstrom, Heizspannungsregler, Voltmeter für Anodenspannung, Amperemeter für Spulenstrom.

Legen Sie an die Kathode die Heizspannung von 10.3 V. Die Beschleunigungsspannung beträgt maximal 300 V und ist die *Summe* der beiden anzulegenden Spannungen. Durch Variation des Verhältnisses Kathodenspannung/Anodenspannung (mit dem Gitter als Bezugspunkt) lässt sich die Helligkeit und Schärfe des Elektronenstrahls regeln.

Schalten Sie den Spulenstrom ein und ändern Sie den Strom so lange, bis sich die Elektronenbahn zu einem Kreis krümmt.

Bevor Sie die einzelnen Messungen durchführen, beleuchten Sie das Fadenstrahlrohr mit den eingebauten Marken für den Radius des Strahles mit einer Lampe, dadurch leuchten die Marken nach. Nach dem Ausschalten der Lampe variieren Sie die Beschleunigungsspannung oder den Spulenstrom so, dass der Elektronenstrahl mit den fluoreszierenden Marken übereinstimmt.

Lesen Sie nun den bei der Beschleunigungsspannung U zur Erzeugung des Vollkreises mit dem Radius r erforderlichen Spulenstrom I

ab und berechnen Sie unter Verwendung dieser Messwerte die spez. Ladung e/m des Elektrons.

Die spez. Elektronenladung kann mit der folgenden Gleichung ausgerechnet werden:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \left[\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{kg}}\right] \tag{1}$$

mit den Größen

U	=	Durchlaufende Spannung
r	=	Krümmungsradius des Strahls
B	=	Magnetfeld der Helmholtzspulen

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Helmholtzspulen ergibt sich für B:

$$B = 69.149 \cdot 10^{-5} I \left[\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2}\right] \tag{2}$$

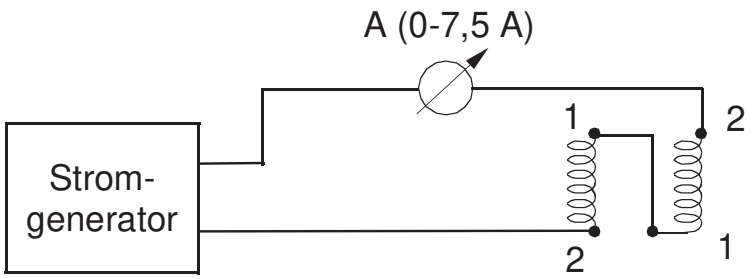

Abb. 1: Schaltung der Helmholtzspulen: Die Anschlussbezeichnungen „1“ und „2“ sind am Sockel der Spulen angebracht. Mittlerer Spulenradius 20 cm. Maximaler Spulenstrom $\mathrm{I_{max}} = 9\,\mathrm{A}$.

2. Aufgabe: Bestimmung von e/m nach Busch

Aus den elektronenoptischen Abbildungseigenschaften eines homogenen Magnetfeldes kann bei bekanntem Magnetfeld B und bekannter Beschleunigungsspannung U die spezifische Ladung e/m der Elektronen bestimmt werden.

Beobachten Sie die Ablenkung des Elektronenstrahls bei

1. var. Beschleunigungsspannung U und festem Spulenstrom I.
2. fester Beschleunigungsspannung U und var. Spulenstrom I.

In beiden Fällen werden Messreihen aufgenommen, die auch mit umgepolter Spule durchzuführen sind. (Spule umdrehen!)

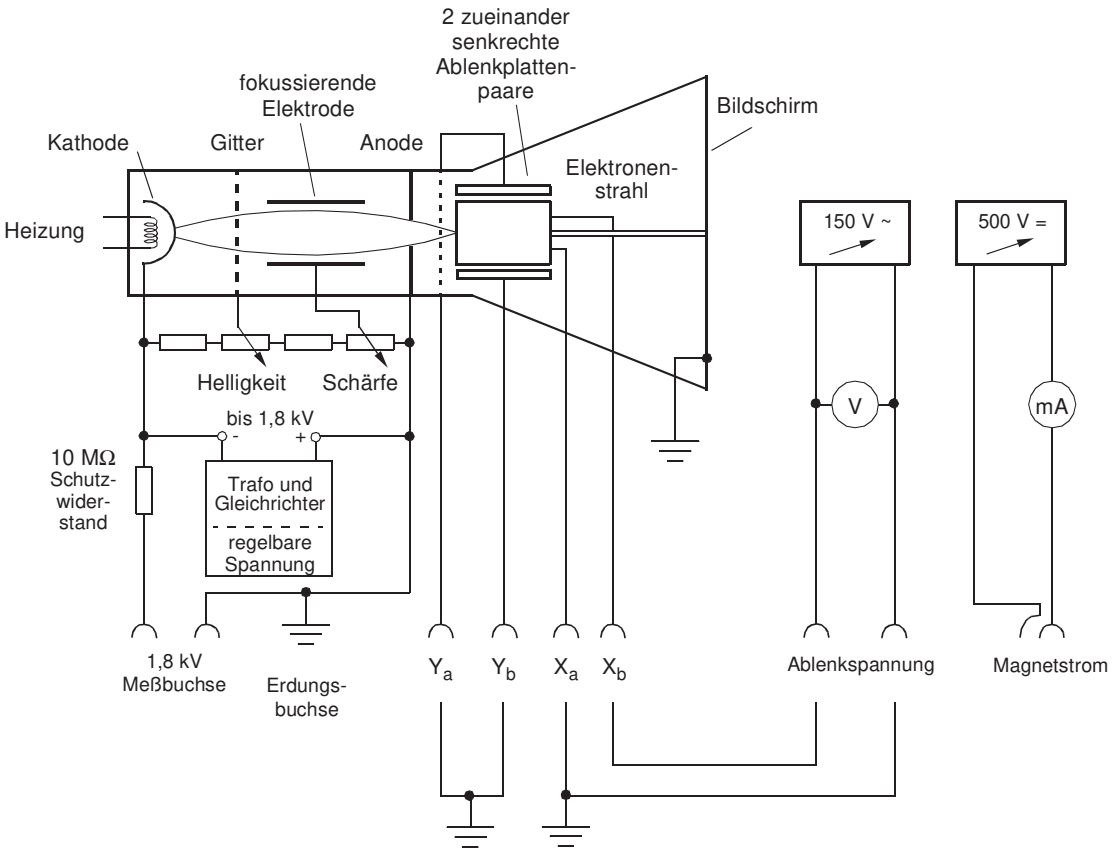

Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau: e/m-Bestimmung nach Busch

Die indirekt geheizte Kathode emittiert Elektronen, die als „Elektronenwolke“ die Kathode umgeben. Wegen der zwischen Kathode und Gitter bestehenden Spannung werden Elektronen aus dieser Wolke abgesaugt und auf das Gitter zu beschleunigt. Es werden um so mehr Elektronen abgesaugt, je größer die zwischen Kathode und Gitter bestehende Spannung ist. Da die Rate der abgesaugten

Elektronen ein Maß für die Helligkeit des auf dem Bildschirm erzeugten Leuchtflecks ist, hat man somit die Möglichkeit, durch Variation des Gitterpotentials die Helligkeit zu steuern.

Die durch das Gitter hindurchfliegenden Elektronen bilden bereits einen „Elektronenstrahl“, der jedoch noch einen viel zu großen Durchmesser hat und i. a. divergent ist. Damit man auf dem Bildschirm einen möglichst kleinen Leuchtfleck erhält, muss man analog zur Optik den divergenten Strahl mit Hilfe einer Linse in die Bildschirmebene fokussieren. Als „Elektronenlinse“ dient im vorliegenden Fall eine aus drei Elektroden (Gitter, „fokussierende Elektrode“, Anode mit Öffnung) bestehende Anordnung. Dabei werden die Elektronen zunächst abgebremst, wodurch sich der Strahl aufweitet, und anschließend wieder beschleunigt, wodurch die Fokussierung erreicht wird. Die Güte einer Elektronenlinse hängt im wesentlichen von der Form aller verwendeten Elektroden ab. Damit wird nämlich die Form des elektrischen Feldes festgelegt, das die Flugbahnen der Elektronen bestimmt. (Bei einer ganz bestimmten Elektrodenform bezeichnet man die mittlere Elektrode manchmal als Wehnelt-Zylinder.)

Die Brennweite einer Elektronenlinse hängt von den angelegten Spannungen ab. Bei kleinen Potentialdifferenzen zwischen den Elektroden ist die Einwirkung der schwachen elektrischen Felder auf die Flugbahnen der Elektronen gering und die Brennweite groß. Bei großen Potentialdifferenzen ist die Brennweite sehr klein und kann sogar noch innerhalb der Linse liegen.

Durch Verändern des Potentials der fokussierenden Elektrode kann man somit die Schärfe des Leuchtpunktes auf dem Bildschirm einstellen.

Die Endenergie der Elektronen wird bestimmt durch das insgesamt durchlaufende Potentialgefälle, also durch die Spannung zwischen Kathode und Anode. Nach dem Passieren der Anode ändert sich die Energie der Elektronen nicht mehr, da der Raum hinter der Anode feldfrei ist. Die Ablenkplatten müssen bei diesem Versuchsteil geerdet sein.

Besteht zwischen zwei Ablenkplatten eine Spannung, so werden die Elektronen beim Durchgang durch den Kondensator abgelenkt und durchlaufen eine parabelförmige Bahn. Anschließend fliegen sie

wieder geradlinig weiter. Dabei bleibt die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Längsachse der Röhre konstant.

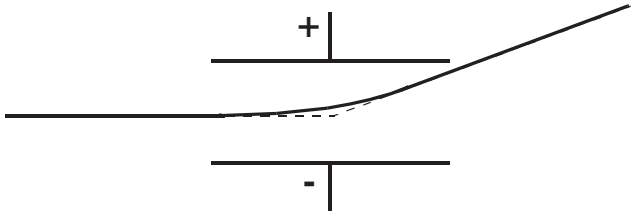

Abb. 3: Elektronenstahl im Kondensator

Der Bildpunkt verschiebt sich entsprechend. Näherungsweise kann man annehmen, dass der Elektronenstrahl in der Mitte des Kondensators abgeknickt wird.

Legt man an den Kondensator eine Wechselspannung an, so verändert sich die Ablenkung des Elektronenstrahls entsprechend der sich ändernden Spannung.

Wenn die Frequenz der Wechselspannung hoch genug ist (z. B. 50 Hz), ist es nicht mehr möglich, mit dem Auge dem Leuchtfleck zu folgen. Man sieht einen Strich; der Elektronenstrahl ist scheinbar aufgefächert.

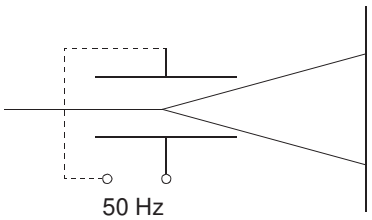

Abb. 4: Elektronenstrahl im Ablenkkondensator

Für die folgende Betrachtung wurde die Ablenkspannung wieder als konstant angenommen.

Die Projektion des Elektronenstrahls auf die Bildschirmebene ist in Abb. 5 gepunktet eingezeichnet (Nicht zu verwechseln mit dem Leuchtpunkt, welcher der Durchstoßpunkt des Strahls durch die Bildschirmebene ist.).

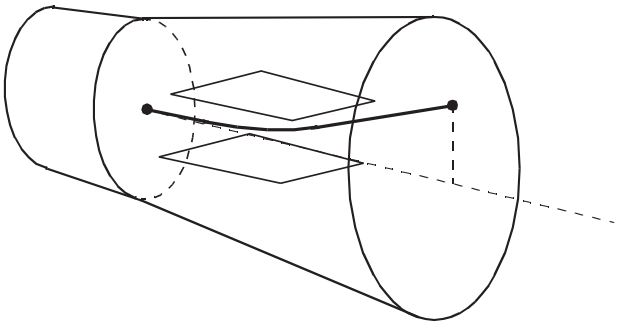

Abb. 5: Schematische Teilansicht einer Braunschen Röhre

Wird in Richtung der Längsachse der Anordnung ein Magnetfeld angelegt, dann wird die zur Längsachse senkrechte, ursprünglich geradlinige Bewegung wegen der nun wirkenden Lorentzkraft in einen Kreisbogen umgewandelt (Abb. 6a). Mit zunehmendem Magnetfeld (Abb. 6b,c) schließt sich die Bewegung in der zur optischen Achse der Anordnung senkrechten Ebene zu einem Vollkreis.

Schreibt man die entsprechenden Gleichungen hin, stellt man fest, dass bei gegebenem Magnetfeld die Zeit für einen Umlauf unabhängig ist von der Ablenkung, d. h. bei geeignetem Magnetfeld kann man erreichen, dass alle Elektronen unabhängig von ihrer Ablenkung im Kondensator auf der Strecke zwischen Kondensator und Bildschirm gerade eine volle Kreisbewegung ausführen und den Bildschirm in seinem Mittelpunkt treffen.

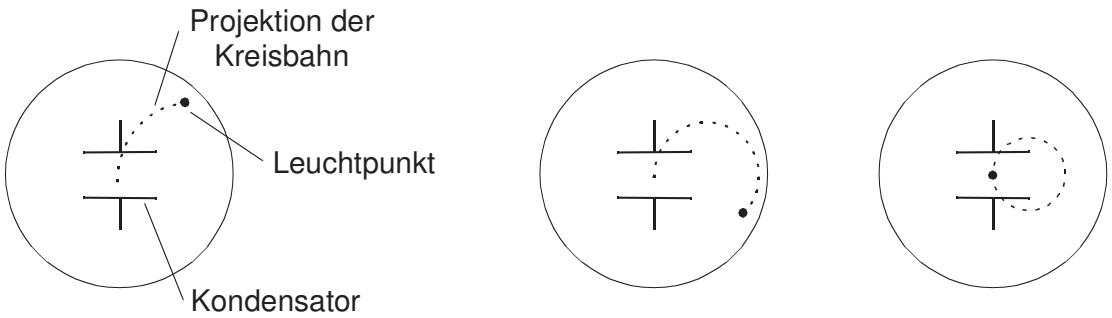

Abb. 6: Schematische Darstellung der Bewegung des Leuchtpunkts

Die Elektronen, die von einem Punkt zwischen den Ablenkplatten ausgehen, werden in einem Punkt auf dem Bildschirm vereinigt.

Das homogene Magnetfeld wirkt wie eine Linse. Das bedeutet, man kann aus dem oben beschriebenen Strich, den man durch Anlegen einer Wechselspannung erhält, einen Punkt in Bildschirmmitte erhalten. Aus den für diesen Fall messbaren bzw. bekannten Daten lässt sich dann e/m berechnen.

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{B^2 l^2} \tag{3}$$

mit den Größen

U	=	Beschleunigungsspannung
l	=	Strecke zwischen der Mitte des Kondensators und dem Schirm = 9.0 cm
B	=	Magnetfeld der Spule

Bestimmung von B

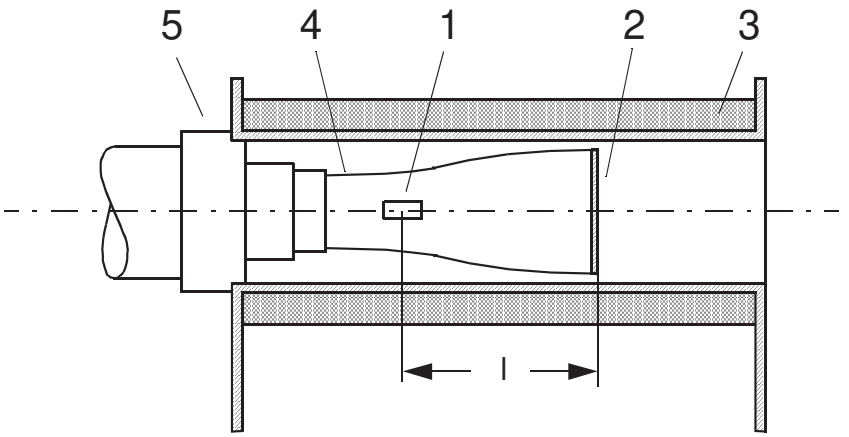

Abb. 7: Lage der Braunschen Röhre im Magnetfeld; 1: Platten des Horizontal-Ablenk-Kondensators; 2: Leuchtschirm der Röhre; 3: Drahtwicklung der Spule; 4: Braunsche Röhre; 5: Adapter, dient zur Halterung der Röhre, so dass die Länge l in der Mitte der Spule sitzt.

Das Magnetfeld B wird durch eine über die Braunsche Röhre gestülpte Zylinderspule erzeugt und aus dem Wert der Stromstärke

wird das Magnetfeld berechnet. Für eine gleichmäßig gewickelte Zylinderspule ist nach Biot-Savart

$$B = \mu_0 \cdot \frac{nI}{2L} \left\{ \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{L - a}{\sqrt{R^2 + (L - a)^2}} \right\} \tag{4}$$

L	=	Länge der Spule
R	=	Radius der Wicklung
n	=	Windungszahl
a	=	Abstand des Bezugspunktes von einem Spulenende

In der Mitte ($a = L/2$) ist B

$$B = \mu_0 \cdot \frac{nI}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \tag{5}$$

Wenn $L^2 \gg 4R^2$ ist, ist $B = \mu_0 \cdot \frac{nI}{L}$.

Da die Spule die oben genannte Bedingung nicht erfüllt, müsste man B mit der Gleichung 4 berechnen. Es vereinfacht die Auswertung der Messergebnisse, wenn mit einem über die Strecke l gemittelten Magnetfeld B gerechnet wird. In dem Fall bekommt man für B

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n^* I}{L} \tag{6}$$

mit n^* als effektiver Windungszahl.

Für die Berechnung der spezifischen Ladung des Elektrons gilt somit

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U}{\overline{B}^2 \cdot l^2} = \frac{8\pi^2 \cdot L^2}{\mu_0^2 \cdot n^{*2} \cdot l^2} \cdot \frac{U}{I^2} \tag{7}$$

n*	=	18.200 Windungen
n	=	20.000 Windungen

Hinweise zur Durchführung

Das nicht benutzte Ablenkplattenpaar muss einwandfrei geerdet sein. Ist dies nicht der Fall, so laden sich die Platten undefiniert auf, was zu Verzerrungen des Elektronenstrahls führt.

Nachdem Sie alle Verbindungen hergestellt haben, schalten Sie beide Netzgeräte ein. Wählen Sie eine Beschleunigungsspannung $> 700\,\mathrm{V}$. Um den Strahl optimal einstellen zu können, legen Sie zunächst keine Spannung an die $\mathrm{X_a}, \mathrm{X_b}$-Platten, sondern erden Sie *beide* Platten. Ohne Magnetfeld erscheint jetzt auf dem Schirm ein heller Fleck, dessen Schärfe und Helligkeit Sie durch die entsprechenden Knöpfe regeln können.

Beachten Sie, dass die Beschleunigungsspannung direkt zu messen ist.

A 1b Bestimmung der Planckschen Konstanten h

Aufgabenbeschreibung

Lässt man Licht auf eine Metalloberfläche fallen, so treten aufgrund des äußeren Photoeffektes Elektronen aus dem Metall aus. Mit einem elektrischen Gegenfeld lässt sich die Abhängigkeit der Energie der ausgelösten Elektronen von der Frequenz und der Intensität des auffallenden Lichtes untersuchen. Aus solchen Gegenfeldmessungen lässt sich bei Kenntnis der Elementarladung e_0 die Plancksche Konstante h bestimmen.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 8.1.2/8.1.3
2. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, Kap. VII, Nr. 1–5
3. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome: Kap. D, §12

Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter dem äußeren Photoeffekt?
2. Informieren Sie sich über die den äußeren Photoeffekt beschreibende Einsteinsche Gleichung.
3. Was versteht man unter der Austrittsarbeit, die beim äußeren Photoeffekt zu leisten ist, und wie kann man sich deren Zustandekommen anschaulich erklären?
4. Welche Besonderheiten ergaben sich bei den Untersuchungen über die Zahl und die Energie der beim äußeren Photoeffekt freigesetzten Elektronen in Abhängigkeit von der Frequenz und der Intensität des auf die Metallfläche fallenden Lichts?

5. Zu welcher neuen Vorstellung über die Natur des Lichtes zwangen diese Untersuchungen?
6. Welche verschiedenen Vorstellungen hatte man vordem vom Licht?
7. Welche experimentellen Befunde über das Licht lassen sich mit der Newtonschen Korpuskulartheorie erklären und welche sprechen für die Wellennatur des Lichtes?
8. Welcher grundlegende Unterschied besteht zwischen der Newtonschen und der Einsteinschen Korpuskulartheorie des Lichtes?
9. Welche Vorstellung hat man heutzutage vom Licht?
10. Wie ist ein Festkörper aufgebaut, d.h. wie sind die Atomkerne angeordnet und was kann man über die Anordnung der Elektronen aussagen?
11. Wodurch unterscheiden sich ein elektrischer Leiter, ein Halbleiter und ein Isolator voneinander?
12. Informieren Sie sich über die Grundzüge des Bändermodells eines Festkörpers. Was versteht man unter den Begriffen Leitungsband und Valenzband, was sind Leitungselektronen, was Valenzelektronen?
13. Was versteht man unter dem inneren Photoeffekt?
14. Informieren Sie sich über das Prinzip folgender Lichtdetektoren

    - Photozelle
    - Photomultiplier
    - Photowiderstand
    - Photodiode
    - Phototransistor
    - Photoelement

15. Was versteht man unter eine Kontaktspannung, wie erklärt sich deren Zustandekommen und wie groß ist diese bei Metallen?
16. Welchen Einfluss hat eine etwa vorhandene Kontaktspannung bei diesem Versuch?

17. Was ist ein Neutralgraufilter und welche anderen Filterarten kennen Sie?
18. Informieren Sie sich über die Funktion und Wirkungsweise eines Interferenzfilters.
19. Wie funktioniert eine Quecksilberdampflampe? Welche anderen Lichtquellen kennen Sie sonst noch?
20. Wie unterscheidet sich das Licht einer Spektrallampe (z. B. einer Quecksilberdampflampe) von dem einer Glühlampe?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Inbetriebnahme der Versuchsanordnung

   a) Verkabeln Sie nach vorliegender Schaltskizze die elektrische Schaltung der Photozelle.

   b) Stellen Sie den Nullpunkt des Elektrometerverstärkers ein.

2. Untersuchungen zum äußeren Photoeffekt

   a) Nehmen Sie für drei verschiedene Lichtfrequenzen die Photostrom- Gegenspannungskennlinie $I_{Ph}(U_G)$ der Photozelle auf.

   b) Nehmen Sie für eine feste Lichtfrequenz aber für mindestens 3 verschiedene Lichtintensitäten die Photostrom-Gegenspannungskennlinie der Photozelle auf und deuten Sie ihre Beobachtungen.

3. Auswertung der Photostrom-Gegenspannungskennlinien

   a) Bestimmen Sie aus den in 2a) gemessenen Kennlinien die Grenzfrequenzen des äußeren Photoeffektes. Ermitteln Sie graphisch Fehlerschranken für die bestimmten Grenzfrequenzen.

b) Bestimmen Sie aus ihren Messungen die Planksche Konstante h

   i. graphisch

   ii. rechnerisch.

   Ermitteln Sie einmal graphisch und zum anderen in einer ausführlichen Fehlerfortpflanzungsrechnung realistische Fehlerschranken für den jeweils bestimmten Wert von h.

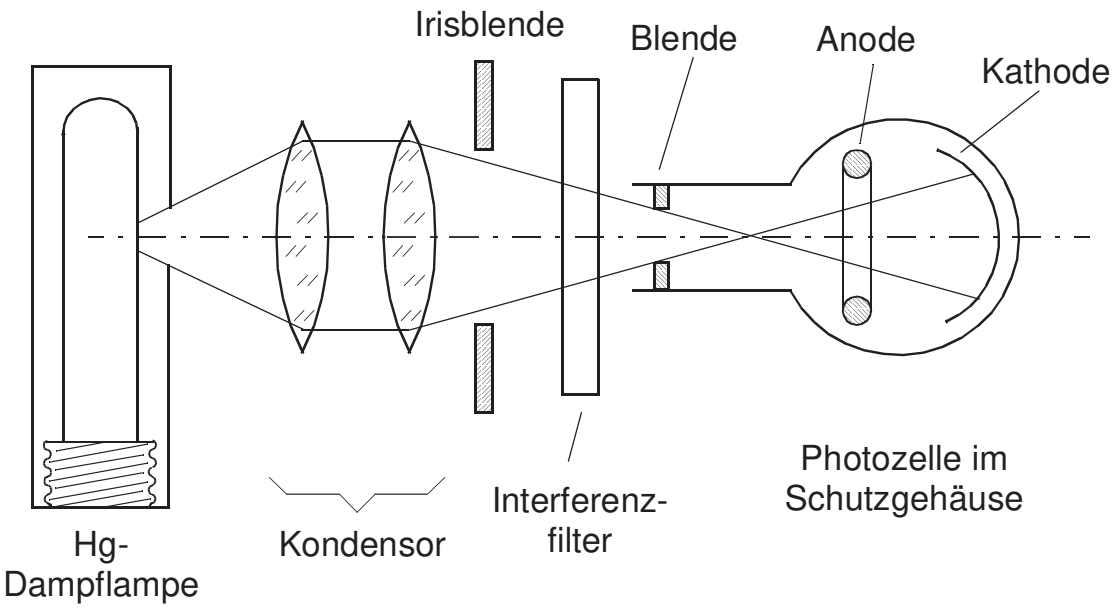

Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus

Anleitung zum Betrieb der einzelnen Geräte

Die Lichtquelle

Als Lichtquelle wird bei diesem Versuch eine Metalldampflampe, hier eine Quecksilberdampflampe, verwendet. In einer solchen Lampe werden Metalldämpfe (z. B. Hg, Na, Zn, Cd, usw.) durch eine elektrische Entladung zur Lichtausstrahlung angeregt.

In einem Lampenkolben befindet sich ein Gasentladungsrohr, in das zwei Elektroden zur Zündung und zum Betrieb einer Gasentladung eingelassen sind.

Zur Bildung des Metalldampfes muss das Gasentladungsrohr zunächst aufgeheizt werden. Deshalb ist die Entladungsröhre mit einem Edelgas, z. B. Neon, gefüllt. Man leitet die Entladung zunächst über das Füllgas ein. Mit zunehmender Erwärmung der Röhre aufgrund dieser Hilfsgasentladung steigt der Metalldampfdruck in der Röhre und die Entladung geht allmählich auf den Metalldampf über, da die Anregungsenergien für Metallatome kleiner sind als für Edelgase.

Je nach dem sich in der Entladungsröhre einstellenden Enddruck des Metalldampfes unterscheidet man Niderdruck-, Normaldruck-, Hochdruck- und Höchstdrucklampen.

In welcher Weise wird die Lichtausbeute von dem in der Gasentladungsröhre herrschenden Dampfdruck abhängen?

Bei der bei diesem Versuch verwendeten Hg-Hochdruckdampflampe wird nach Verstreichen der Einbrennzeit von ca. 5–10 Minuten ein Enddruck von einigen Atmosphären erreicht. Während sich Niederdrucklampen nach einem Verlöschen jederzeit sofort wieder zünden lassen, muss bei Hoch- und Höchstdrucklampen gewartet werden, bis sie sich abgekühlt haben.

Wie lässt sich dieses Verhalten anschaulich verstehen?

Da die Hg-Dampflampe mit 50 Hz Wechselstrom betrieben wird, ist die Entladung mit dieser Frequenz moduliert. Da die Intensität nicht von der Richtung des Stromes in der Lampe abhängt, beträgt die Frequenz der Lichtmodulation 100 Hz. Der Strom in der Photozelle und der Spannungsabfall am Arbeitswiderstand sind entsprechend moduliert.

Wieso messen Sie am Elektrometer-Verstärker trotzdem einen Gleichstrom, d. h. eine Gleichspannung?

Die Drosselspule (Drossel)

Mittels einer Drossel kann man die Quecksilberdampflampe direkt am Netz betreiben. Eine Drossel ist eine Spule mit einem hohen

induktiven Widerstand (Blindwiderstand) bei gleichzeitig möglichst niedrigem ohmschen Widerstand (Wirkwiderstand). Sie dient zur Strombegrenzung (Drosselung) des in der Gasentladungsröhre fließenden Wechselstroms.

Warum benötigt man, wenn man eine Gasentladungslampe direkt am Netz betreibt, eine Strombegrenzung?

Warum nimmt man zur Strombegrenzung in der Entladungsröhre eine Drossel und nicht einen ohmschen Widerstand?

Die Interferenzfilter

Aus dem Spektrum der Quecksilberdampflampe werden mit Hilfe von Interferenzfiltern einzelne Lichtfrequenzen ausgeblendet. Die entsprechenden Angaben über die von der Spektrallampe ausgesandten Linien und die zur Verfügung stehenden Interferenzfilter entnehmen Sie untenstehender Tabelle.

Spektrallinien			Interferenzfilter		
Farbe	Freq. ν [THz]	Wellenl. λ [Å]	max. Durchl. bei λ_{max} [Å]	Halbw.-Br. $\Delta\lambda$ [Å]	Durchl. T(%)
gelb	519	5780	5780	120	30
grün	549	5460	5460	120	30
blau	688	4360	4360	120	30

Vorsicht bei der Handhabung der Filter: Filterflächen auf keinen Fall berühren! Die Filter dürfen auch nicht abgewischt werden, um sie reinigen zu wollen!

Die Photozelle

In der nachfolgenden Skizze ist der schematische Aufbau der zur Verfügung stehenden Photozelle wiedergegeben.

Die Photozelle besteht aus einem Glasgehäuse, in dem sich eine ringförmige Anode und eine flächige auf das Glasgehäuse aufgelegte Photokathode befindet. Das evakuierte Glasgehäuse ist durch ein Schutzgehäuse und zwei Blenden gegen unerwünschte Einwirkung

von Streulicht geschützt. Vor allem sollen die Blenden verhindern, dass die ringförmige Anode direkt von Licht getroffen wird. Warum? Wie machen sich die an der Anode entstehenden Photoelektronen in Ihren Messungen bemerkbar?

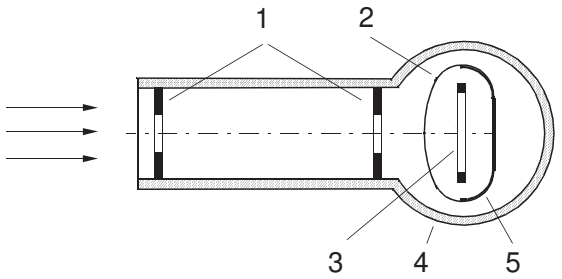

Abb. 2: Schematische Darstellung der Photozelle; 1: Kreisblenden, 2: Glasgehäuse, 3: Anode (ringförmig), 4: Schutzgehäuse, 5: Photokathode (flächig)

Die elektrische Schaltung

Das Schutzgehäuse mit der Photozelle ist fest auf ein Schaltbrett montiert, auf dem Stromkreismarkierungen zur elektrischen Verkabelung der Photozelle aufgetragen sind.

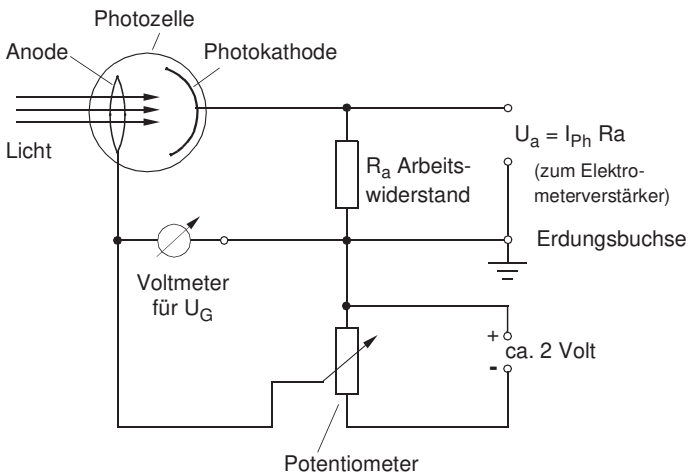

Abb. 3: Elektrische Verschaltung der Photozelle

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

Zu 1a) und 1b)

Nach Einschalten der Quecksilberdampflampe beginne man nach der Schaltskizze mit der Verkabelung der elektrischen Schaltung.

Solange sich noch kein Interferenzfilter im Strahlengang befindet, muß der Lichtverschluß (die Irisblende) unbedingt verschlossen bleiben!

Stellt man den Einschaltknopf des Elektrometerverstärkers auf die Stellung ZERO CENTER, so lässt sich die Nullpunkteinstellung in der Mitte der Anzeigeskala vornehmen. Man kann dann, ohne die Polarität des Elektrometerverstärkers umzuschalten, sowohl negative wie positive Ströme bzw. Spannungen messen.

Wie nehmen Sie die Nullpunkteinstellung des Elektrometerverstärkers vor? Woran müssen Sie denken, wenn Sie während einer Messreihe auf einen anderen Messbereich umschalten? Warum nehmen Sie bei diesem Versuch zur Spannungsmessung ein Elektrometerverstärker?

Nach Beendigung der Messungen Einschaltknopf des Elektrometerverstärkers auf POWER-OFF. Die Batterie des Verstärkers entlädt sich sonst.

Zu 2a) und 2b)

Nach Einsetzen des jeweiligen Interferenzfilters kann der Lichtverschluss geöffnet und mit der Aufnahme der Photostrom-Gegenspannungskennlinie $I_{Ph}(U_G)$ begonnen werden.

In welchen Spannungsbereichen kann man sich größere Schrittweiten für U_G erlauben? Wo sollte mit möglichst kleinen Schrittweiten gemessen werden?

Während der Messung des Photostromes keine Messkabel bewegen! Warum?

Tragen Sie nach Aufnahme der 1. Photostrom-Gegenspannungskennlinie diese sofort in ein entprechendes Diagramm auf, bevor Sie mit der nächsten Messreihe beginnen und überprüfen Sie, ob die Messkurve den erwarteten Verlauf zeigt.

Wie lässt sich der graphische Verlauf der aufgenommenen Kennlinie deuten? Warum nimmt der Photostrom $I_{Ph}(U_G)$ ab einer gewissen Gegenspannung U_G negative Werte an?

Denken Sie daran, dass auch die Anode aus einem Metall besteht und unter Umständen von einzelnen Lichtquanten getroffen wird.

Wie kann man diesen negativen Photostrom möglichst klein halten, ohne den positiven Photostrom zu verringern?

Vor dem Auswechseln der Interferenzfilter den Lichtverschluss schließen! Die Filterflächen nicht berühren oder abwischen!

Hinweise zur Versuchsauswertung

Zu 3a) und 3b)

Überlegen Sie sich, wie Sie die gemessenen Photostrom-Gegenspannungskennlinien auswerten müssen, um die Grenzfrequenz ν_0 und die Plancksche Konstante h zu bestimmen.

Welche Messgröße müssen Sie hierzu als Funktion der Lichtfrequenz auftragen? Wie lässt sich aus dieser graphischen Darstellung die Grenzfrequenz und die Plancksche Konstante bestimmen? Wie kann man dieser graphischen Darstellung Fehlerschranken für ν_0 und h entnehmen?

Führen Sie für die rechnerisch ermittelten Einzelwerte der Planckschen Konstanten eine ausführliche Fehlerrechnung durch.

Überlegen Sie sich danach, ob es sinnvoll ist, für h eine gewichtete Mittelwertbildung vorzunehmen?

A 1c Franck-Hertz-Versuch

Aufgabenbeschreibung

In einer Elektronenstoßapparatur wird ein Energieniveau des Quecksilberatoms angeregt. Das Experiment erlaubt die Bestimmung der Anregungsenergie. Damit gelang Franck und Hertz der Nachweis diskreter Energieniveaus in Atomen.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, Kap. II (Anregende Stöße)
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 12.2.5–12.2.7, 12.3, 12.6.2
3. Huber: Physik, Bd. III/1, Atomphysik, Kap. 7, §6
4. Finkelnburg: Einführung in die Atomphysik, Kap. III
5. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. D, 13–15; Kap. F, 27a

Einführende Fragen

Bohrsches Atommodell

1. Welche Aussagen macht das Bohrsche Atommodell und welches sind die Bohrschen Postulate?
2. Was versteht man unter Hauptquantenzahl n und welche Bedeutung hat diese Quantenzahl im Bohrschen Atommodell?
3. Berechnen Sie den Bahnradius und die Gesamtenergie E eines im Wasserstoff-Atom gebundenen Elektrons als Funktion dieser Hauptquantenzahl n unter Berücksichtigung der Bohrschen Postulate.

4. Was versteht man unter einem Energie- oder Termschema eines Atoms und was bedeuten die Begriffe Grundzustand, angeregter Zustand, Ionisations- oder Anregungsenergie und Ionisationsgrenze?
5. Veranschaulichen Sie sich in einem Diagramm das Termschema des Wasserstoffatoms.

Quantentheorie

1. Welche Quantenzahlen beschreiben den Zustand des Atoms? Wie erhält man sie und welche anschauliche Bedeutung haben sie?
2. Was versteht man unter dem Pauli-Prinzip und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für den Aufbau der Atomhülle?

Stoßprozesse

1. Welche verschiedenen Stoßprozesse finden in der Franck-Hertz-Röhre statt?
2. Welche Energie kann maximal beim elastischen bzw. unelastischen Stoß übertragen werden?
3. Wie hängt die Wahrscheinlichkeit für einen unelastischen Stoß von der Anregungsenergie ab?

Apparatives

1. Welche Strom-Spannungscharakterisitk hat eine evakuierte Franck-Hertz-Röhre? Skizzieren Sie dazu für eine feste Gegenspannung U_G den Strom auf der Gegenelektrode I_G als Funktion der Beschleunigungsspannung U_B.
2. Wie ändert sich diese Strom-Spannungscharakteristik, wenn sich Quecksilberdampf in der Röhre befindet? Erklären und deuten Sie den sich ergebenden Strom-Spannungsverlauf $I_G(U_B, U_G)$ für verschiedene, aber feste Gegenspannungen U_G.

3. Was ändert sich unter Umständen an diesem Diagramm, wenn sich ein anderes Gas in der Franck-Hertz-Röhre befindet?
4. Was versteht man unter dem Begriff Kontaktpotential (oder Kontaktspannung) und welchen Einfluss hat ein vorhandenes Kontaktpotential auf die gemessene Strom-Spannungscharakteristik?
5. Machen Sie sich die elektrische Schaltung der zur Verfügung stehenden Franck-Hertz-Apparatur klar und diskutieren Sie die Potentialverhältnisse in der Röhre.
6. Was versteht man unter dem Begriff Stoßzone, wie wandert diese bei Steigerung der Beschleunigungsspannung U_B durch die Röhre und wieviele solcher Stoßzonen gibt es?
7. Was passiert mit den angeregten Quecksilberatomen?

Auswertung

Informieren Sie sich über das Verfahren des „gewogenen Mittelwertes“.

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

Führen Sie mit der zur Verfügung stehenden Apparatur ein Franck-Hertz-Experiment durch.

1. Verkabeln Sie nach der unten angegebenen Schaltskizze die zur Verfügung stehende Franck-Hertz-Apparatur.

2. Nehmen Sie für 4 verschiedene Gegenspannungswerte U_G (1 V, 1.5 V, 2 V und 5.5 V) und bei auf ca. 165° C erhitztem Quecksilberdampf die Strom-Spannungscharakteristik der Franck-Hertz-Röhre auf.

3. Berechnen Sie unter Verwendung des gewogenen Mittels aus den 4 gemessenen Strom-Spannungscharakteristiken die Anregungsenergie des untersuchten Quecksilberübergangs.

4. Die Temperatur des Gases ist von signifikanter Bedeutung für das Franck-Hertz-Experiment. Untersuchen Sie für eine aus Aufgabe 2 als günstig ermittelte Gegenspannung die Abhängigkeit der Franck-Hertz-Charakteristik von der Temperatur. Dazu sollten Sie zusätzlich bei 150° C und bei 180° C die Charakteristik aufnehmen.

5. Ermitteln Sie aus den dem Versuch beiliegenden Informationen über den Dampfdruck von Quecksilber in Abhängigkeit von der Temperatur die mittlere freie Weglänge der Hg-Atome bei den drei untersuchten Temperaturen.

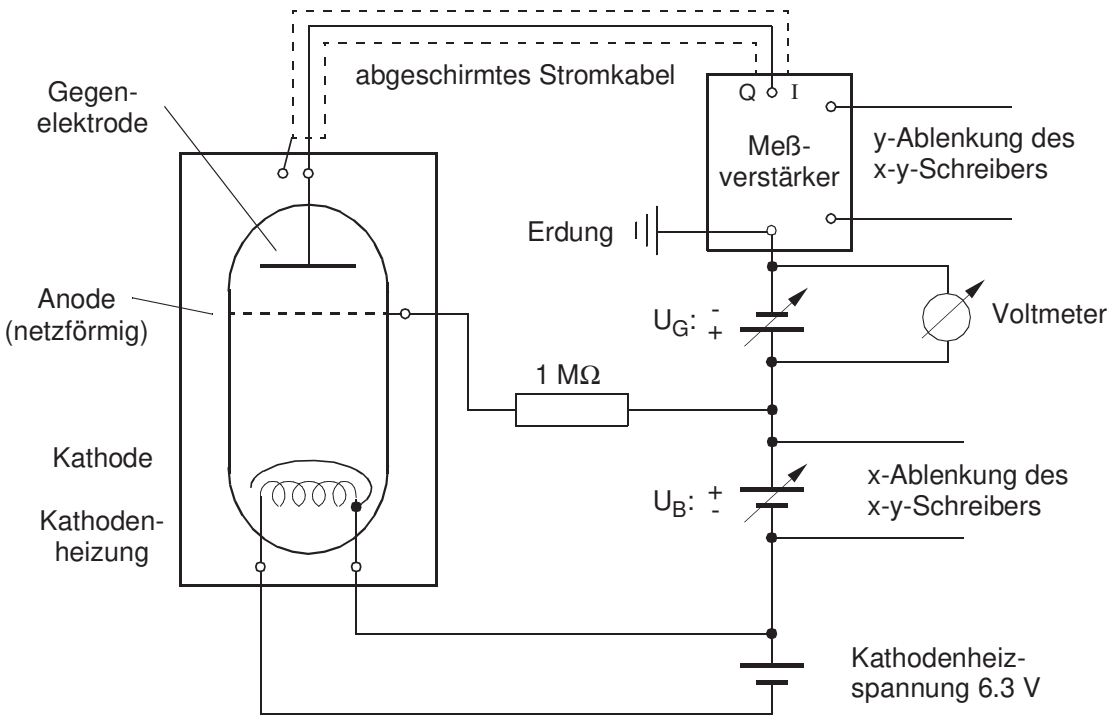

Abb. 1: Schaltskizze zur Franck-Hertz-Röhre

Anleitung

Allgemeines

Zur Durchführung eines Franck-Hertz-Experimentes muss der untersuchte Dampf – hier Quecksilberdampf – einen bestimmten Dampfdruck haben (etwa 10^{-2} Torr).

Warum lässt sich das Franck-Hertz-Experiment nicht gut bei wesentlich kleineren Drücken durchführen? Warum scheitert das Experiment bei zu hohen Drücken? Wie stellt man bei dieser Versuchsanordnung den richtigen Quecksilberdampfdruck ein?

Die Heizung der Franck-Hertz-Röhre geschieht über eine Glühwendel, die in den Boden der Franck-Hertz-Apparatur eingelassen ist, und über einen Transformator geregelt werden kann.

Die Heizleistung sollte durch geeignete Einstellung der Transformatorspannung so gewählt werden, dass der Thermostat zur Temperaturregelung möglichst wenig schaltet. Es hat sich gezeigt, dass sich diese Bedingung bei einer Heizspannung von 160 V gut realisieren lässt.

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

Zu 1. Stellen Sie den Heiztransformator zunächst auf 220 V und beginnen Sie mit der Verkabelung der Franck-Hertz-Apparatur. Regeln Sie nach Erreichen der Betriebstemperatur von ca. 165° C die Transformatorspannung auf 160 V zurück. Prüfen Sie während des Versuches mehrmals nach, ob die Temperatur konstant bleibt. Nach Beendigung der Verkabelung und vor dem Einschalten der Netzgeräte ist die Schaltung vom zuständigen Betreuer nachsehen zu lassen!

Zu 2. Nehmen Sie für 4 verschiedene Gegenspannungen U_G (1 V, 1.5 V, 2 V, 5.5 V) die Strom-Spannungscharakteristik der Franck-Hertz-Röhre auf. Der Messverstärker ist auf eine Empfindlichkeitsstufe von 10^{-8} A einzustellen.

Warum verwendet man zur Strommessung nicht ein gewöhnliches Amperemeter?

Die Schrittweite, mit der Sie die Beschleunigungsspannung U_B variieren, sollte i. a. nicht größer als 1 V sein. Wenn Sie die Messwerte gleich während des Versuches auf Millimeterpapier graphisch auftragen – was unbedingt zu empfehlen ist – können Sie die Schrittweite jeweils selbst optimal festlegen.

Wo ist es sinnvoll, mit möglichst kleinen Schrittweiten für U_B zu messen? Wo kann man sich größere Schrittweiten für U_B erlauben?

Hinweise zur Versuchsauswertung

Zur Bestimmung der Anregungsenergie des untersuchten Quecksilberniveaus bestimme man für jede der drei gemessenen Strom-Spannungscharakteristiken den mittleren Abstand der Maxima bzw. Minima und errechne den Fehler aus der Streuung der Einzelwerte.

Benutzt man zur Festlegung der Anregungsenergie besser die Maxima oder die Minima der Messkurven? Begründen Sie Ihre Aussage anhand Ihrer Messkurven.

Für die Bestimmung des Endresultates werden diese drei Mittelwerte und ihre Fehler gewichtet gemittelt.

A 1d Röntgenröhre

Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch sollen mit Hilfe einer Ionisationskammer Röntgenstrahlen nachgewiesen und deren Absorptionsverhalten in Materie untersucht werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, Kap. 2 (Röntgenstrahlung)
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 12.5, 8.3.1 und 13.3.2
3. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. L, 42 und 43

Fragen zum Versuch

1. Mit welchen Methoden kann man Röntgenstrahlen erzeugen und welche Prozesse treten dabei auf?
2. Wie lassen sich Röntgenstrahlen im elektromagnetischen Spektrum einordnen und wie unterscheiden sie sich von α-Strahlen? Wie bestimmt man die Wellenlänge von Röntgenstrahlen?
3. Was versteht man unter weichen, harten, ultra-harten Röntgenstrahlen?
4. Was versteht man unter dem Begriff Röntgenspektrum und welche verschiedenen Arten von Spektren unterscheidet man?
5. Wie ändert sich ein Röntgen-Emissionsspektrum, wenn man die Röhrenspannung erhöht, wie, wenn man den Röhrenstrom erhöht?
6. Wie lassen sich Röntgenspektren theoretisch verstehen und was kann man aus ihnen über den Aufbau der Atome lernen?

7. Was versteht man unter dem Begriff „Grenzfrequenz“ des Röntgenemissionsspektrums, und welche Naturkonstante läßt sich daraus bestimmen?
8. Veranschaulichen Sie sich Aufbau und Funktionsweise einer Ionisationskammer.
9. Wie sieht die Strom-Spannungscharakteristik einer Ionisationskammer aus?
10. Welche Prozesse tragen zur Abschwächung von Röntgenstrahlen beim Durchstrahlen von Materie bei?
11. Was versteht man unter folgenden Begriffen:
    - Schwächungskoeffizient: μ
    - Streukoeffizient: σ
    - Absorptionskoeffizient: τ
    - Massenschwächungskoeffizient: μ/ϖ
12. Ist der Abschwächungskoeffizient μ für ein bestimmtes Material eine Konstante, oder, wenn nicht, wovon hängt er ab?
13. Begründen Sie, warum man zur Abschirmung von Röntgenstrahlen Bleimaterial bevorzugt.
14. Was versteht man unter dem Begriff Eindringtiefe einer Strahlung und wie hängt diese für Röntgenstrahlen mit dem Schwächungskoeffizienten μ zusammen?
15. In welchem Maßstabpapier würden Sie die Meßwerte einer Absorptionsmessung eintragen? (Exponentialgesetz!)
16. Wie läßt sich aus dieser Darstellung graphisch die Eindringtiefe ermitteln?
17. Was versteht man unter dem Begriff Ionendosis und Ionendosisleistung, und welche anderen Einheiten zur Messung der Intensität von Röntgenstrahlen kennen Sie sonst noch?
18. Welche physiologischen Wirkungen üben Röntgenstrahlen auf menschliches Gewebe aus und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für deren Handhabung?
19. Erläutern Sie die Braggsche Reflexionsbedingung.
20. Wie sind die Millerschen Indizes definiert (z. B. (100)-Spaltfläche)?

21. Wie hängt der Absorptionskoeffizient τ von der Wellenlänge und der Ordnungszahl des Absorbers ab?
22. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Wellenlänge der K_α-Linie eines Elementes und seiner Ordnungszahl (Moseleysches Gesetz)?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Nachweis von Röntgenstrahlen

- Inbetriebnahme der Röntgenstrahlapparatur.
- Überprüfen Sie bei strahlender Röntgenröhre mit einem Röntgenstrahldosismeter die aus dem Bleischutzkasten austretende Röntgenreststrahlung.
- Messen und deuten Sie die Abhängigkeit des Ionisationsstroms von der an den Kondensatorplatten anliegenden Spannung bei fester Röntgenröhrenspannung U_{Roe} für mindestens 3 verschiedene Röntgenröhrenströme I_{Roe}.

bei Apparatur 1:			bei Apparatur 2:		
U_{Roe}	=	50 kV	U_{Roe}	=	60 kV
I_{Roe}	=	2 mA, 3 mA, 4 mA	I_{Roe}	=	1 mA, 2 mA, 3 mA

2. Absorption von Röntgenstrahlen in Materie

- Messen Sie die Abschwächung von Röntgenstrahlen durch Kupfer-Bleche in Abhängigkeit von der Blechdicke für einen festen Röhrenstrom I_{Roe}, aber für 5 verschiedene Röntgenröhrenspannungen U_{Roe}.

bei Apparatur 1:			bei Apparatur 2:		
I_{Roe}	=	2 mA	I_{Roe}	=	2 mA
U_{Roe}	=	50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV	U_{Roe}	=	40 kV, 50 kV, 60 kV, 90 kV

- Tragen Sie die Meßergebnisse der verschiedenen Absorptionsmeßreihen in ein geeignetes Maßstabpapier ein und diskutieren Sie die sich ergebenden Meßkurven.
- Bestimmen Sie, jeweils für den „harten“ Anteil der Röntgenstrahlung, für jede einzelne Meßreihe graphisch die zugehörige Eindringtiefe in dem verwendeten Kupfermaterial und bestimmen Sie daraus den jeweiligen Abschwächungskoeffizienten für den harten Anteil der untersuchten Röntgenstrahlung.

3. Aufnahme eines Röntgenbildes (freiwillige Zusatzaufgabe)

Sie können z. B. von einer Armbanduhr eine Röntgenaufnahme anfertigen. Dazu wird die Uhr in der Halterung befestigt und der Film direkt dahinter. Die Belichtung erfolgt mit einer Spannung von 78/80 kV und einem Strom von 2 mA. Die Belichtungszeit ist abhängig vom Objekt und von der Filmempfindlichkeit. Hierzu liegt eine gesonderte Anleitung bei der Aufgabe.

Versuchsaufbauskizzen

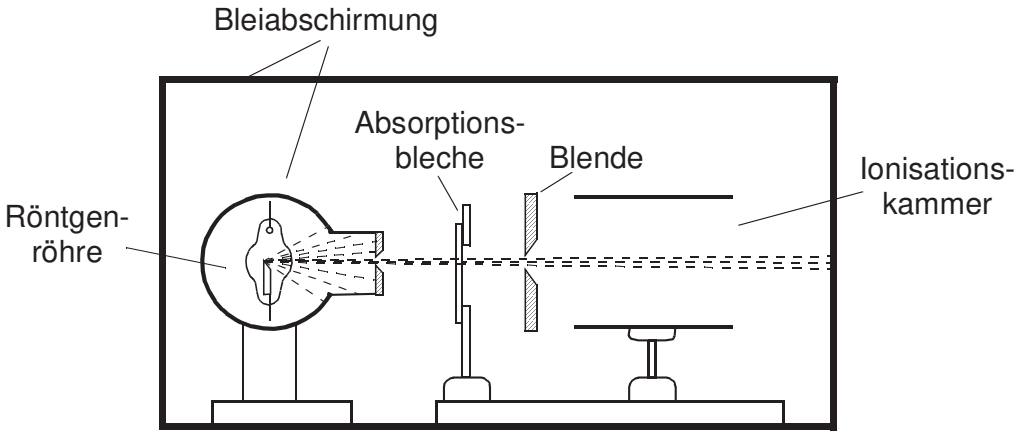

Abb. 1: Röntgen-Experimentierkammer

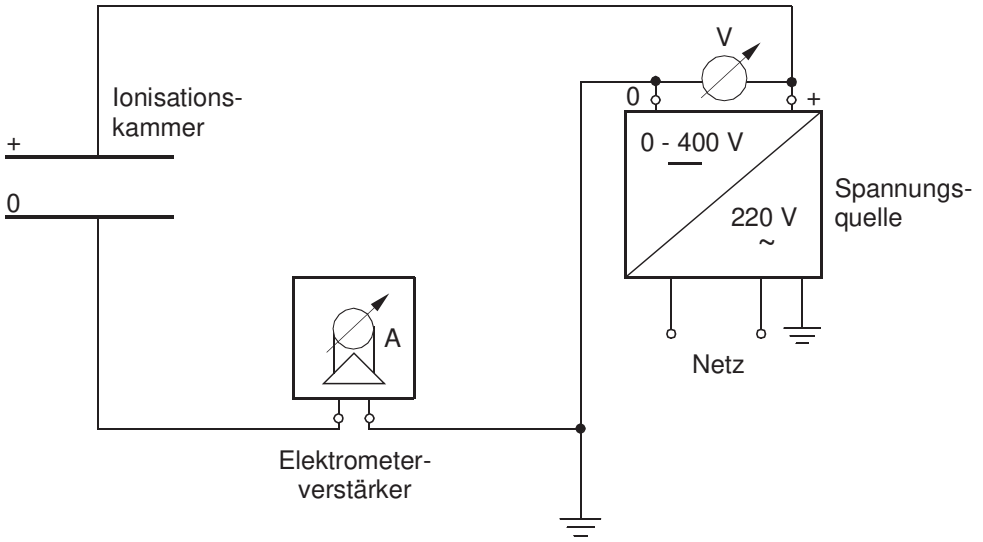

Abb. 2: Elektrische Verschaltung des Röntgenstrahlnachweises

Vorsicht, an den Kondensatorplatten der Ionisationskammer liegen bis zu 500 V Spannung an. Vor Öffnen des Abschirmkastens ist unbedingt die Spannungsversorgung auszuschalten und die Spannungsfreiheit am Vielfachmeßgerät zu kontrollieren!

Anleitung

Die Röntgenstrahlapparatur besteht aus folgenden 3 Einheiten:

- Dem Röntgengenerator
- Der Spannungs- und Stromversorgungseinheit
- Dem Röntgenstrahlnachweis

Der Röntgengenerator (Röntgenstrahlerzeuger) besteht aus einem Hochspannungs- und einem Heiztransformator und der eigentlichen Röntgenröhre. Eine Schnittzeichnung und eine kurze Beschreibung des zur Verfügung stehenden Röntgengenerators liegt am Versuchsplatz aus.

Die Spannungs- und Stromversorgung ist bei Apparatur 1 und 2 *unterschiedlich*!

Bei Apparatur 1 besteht sie aus zwei Einheiten: Der Schalteinheit PLEODOR 4 und einem Hochspannnungsregler. Die eigentliche Strom- und Spannungsversorgung bewerkstelligt die Schalteinheit PLEODOR 4. Sie ist ausgestattet mit einem Netzschalter, einem Regler für den Röntgenröhrenstrom I_{Roe} und einem zugehörigen Amperemeter.

Der Hochspannungsregler ermöglicht es, die für die Röntgenröhre notwendige Hochspannung stufenlos zu regeln. Bei Apparatur 1 hat der Spannungsvorwahlschalter der Schalteinheit PLEODOR 4 *keine Bedeutung* (bleibt auf Stellung „100 keV“)!

Bei Apparatur 2 wird die für die Röntgenröhre gebrauchte Hochspannung nur über den Spannungsvorwahlschalter geregelt. Hierbei ist zu beachten, daß der Schalter nur auf die angegebenen *diskreten* Werte eingestellt wird, eine stufenlose Regelung ist nicht möglich. Werden Zwischenwerte eingestellt, so besteht die Gefahr, daß in der Schalteinheit PLEODOR 4 einige Widerstände überlastet werden. Es ist hier also immer darauf zu achten, daß der Spannungsvorwahlschalter beim gewählten Wert *einrastet*. Außerdem muß hier *vor* jeder Änderung der Hochspannung der Netzschalter auf 0 zurückgestellt werden und darf erst nach der Änderung wieder eingeschaltet werden.

A 1f Röntgenspektren

Aufgabenbeschreibung

Das Emissionsspektrum einer Röntgenröhre mit Kupferkathode und die Absorptionskonstanten verschiedener Metalle sollen vermessen werden. Außerdem soll die induzierte Fluoreszenzstrahlung verschiedener Metalle untersucht werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, Kap. 2 (Röntgenstrahlung)
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 12.5 und Kap. 14.1.1–14.1.3
3. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. L, 42 und 43
4. Ludwig: Röntgenphysik im Schülerversuch
5. Finkelnburg: Einführung in die Atomphysik, Kap. III, 10
6. Krischner: Einführung in die Röntgenfeinstrukturanalyse, Abschn. 1, 2.7
7. Neff: Grundlagen und Anwendungen der Röntgenfeinstrukturanalyse, Abschn. 1; 6

Fragen zum Versuch

Siehe auch Fragen zum Versuch Röntgenröhre

1. Was versteht man unter folgenden Begriffen:
   - Schwächungskoeffizient: μ
   - Streukoeffizient: σ
   - Absorptionskoeffizient: τ

- Massenschwächungskoeffizient: μ/ϖ

und welcher Zusammenhang besteht zwischen diesen Koeffizienten?

2. Wie hängt der Absorptionskoeffizient τ von der Wellenlänge und der Ordnungszahl des Absorbers ab?
3. Ist der Abschwächungskoeffizient μ für ein bestimmtes Material eine Konstante, oder, wenn nicht, wovon hängt er ab?
4. Begründen Sie, warum man zur Abschirmung von Röntgenstrahlen Bleimaterial bevorzugt.
5. Was versteht man unter dem Begriff Eindringtiefe einer Strahlung und wie hängt diese für Röntgenstrahlen mit dem Schwächungskoeffizienten μ zusammen?
6. Erläutern Sie die Braggsche Reflexionsbedingung.
7. Wie sind die Millerschen Indizes definiert (z.B. (100)-Spaltfläche)?
8. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Wellenlänge der K_α-Linie eines Elementes und seiner Ordnungszahl (Moseleysches Gesetz)?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Nehmen Sie das Emissionsspektrum einer Röntgenröhre mit Cu-Anode durch Bragg-Reflexion an verschiedenen Einkristallen auf.

   a) Bestimmen Sie die Lage (Einfallswinkel auf die Kristallebene) der CuK_α- und CuK_β-Linien möglichst bis zur 3. Ordnung.

   b) Bestimmen Sie das kurzwellige Ende der Bremsstrahlung bei 2 verschiedenen Anodenspannungen (LiF-Kristall).

2. Vermessen Sie die Absorptionskanten von Cu-, Ni- und Co-Filtern.

3. Messen Sie die Transmission der induzierten Fluoreszenzstrahlung verschiedener Elemente durch ein Co-Filter.

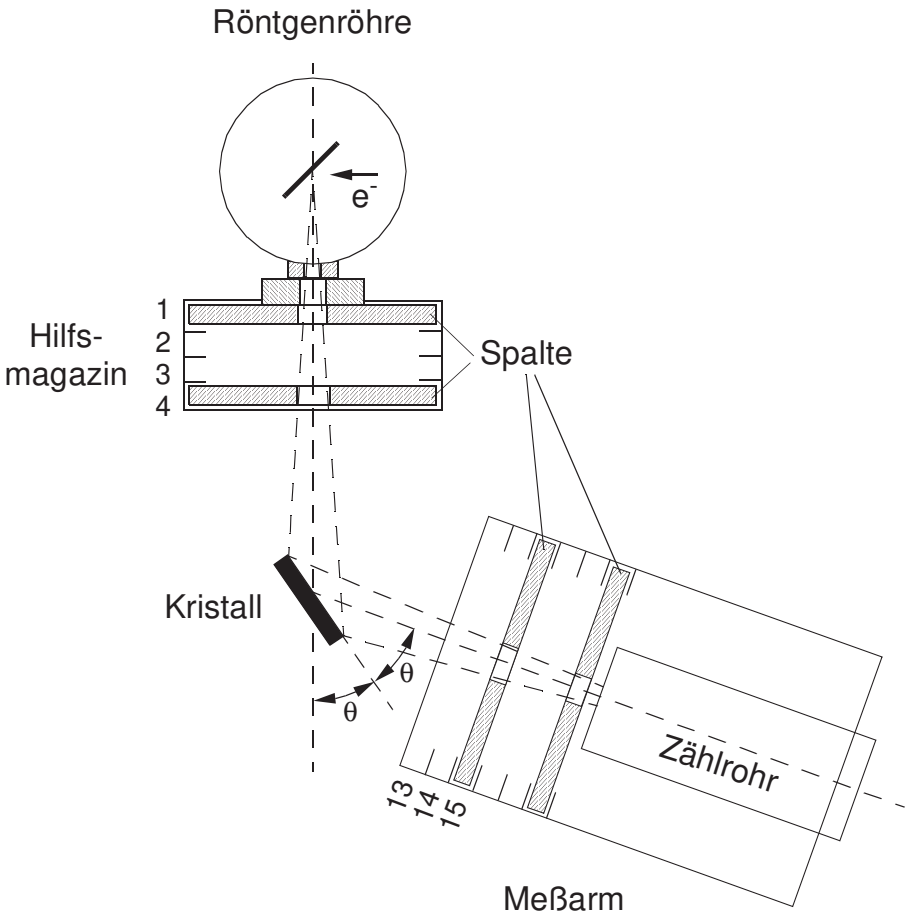

Abb. 1: Versuchsaufbau

Hinweise zur Durchführung

Die Röhre ist so justiert, dass bei 0°-Stellung der Primärstrahl in der Mitte des Messarms verläuft (s. Abb. 1). Der Messarm kann von $2\Theta = 11°$ bis $2\Theta = 124°$ gefahren werden. Wenn das Hilfsmagazin vor die Röhre montiert ist, schränkt sich der Bereich auf 11° bis 95° ein. Zum Justieren der Kristalle in der Drehachse muss der Messarm auf 0° eingestellt werden.

Die Blenden sitzen zentrisch auf dem Messarm, wenn sie durch eine Feder gegen die bezifferte Seite des Diamagazins gedrückt werden.

Der Einbau der Kristalle erfolgt gemäß Abbildung 2. Die matt erscheinende Seitenfläche des Kristalls ist die reflektierende Seite für die Röntgenstrahlung. Nehmen Sie den LiF-Einkristall (blau) aus Zubehör I und setzen Sie ihn mit einer kurzen und schmalen Seitenfläche auf die Stufe des Einkristallhalters. Dabei soll eine der beiden langen und breiten (100)-Spaltflächen gegen die abgeschrägte Verlängerung des Kristallhalters stoßen. Ziehen Sie die Halteklammer so weit an, bis der Kristall sicher durch die Gummispannbacke festgehalten wird.

Die Röhre wird bei allen Aufgaben mit einem Emissionsstrom von $80\,\mu$A betrieben. Der Strom sollte immer überwacht und, wenn notwendig, nachgeregelt werden. Die Betriebsspannung des Zählrohrs (Geiger-Müller) ist 450 V. Zum Messen kleiner Zählraten kann die Kappe vor dem Eintrittsfenster abgenommen werden. Bei allen Versuchen wird das Hilfsmagazin vor der Röhre montiert, um den Primärstrahl zu kollimieren.

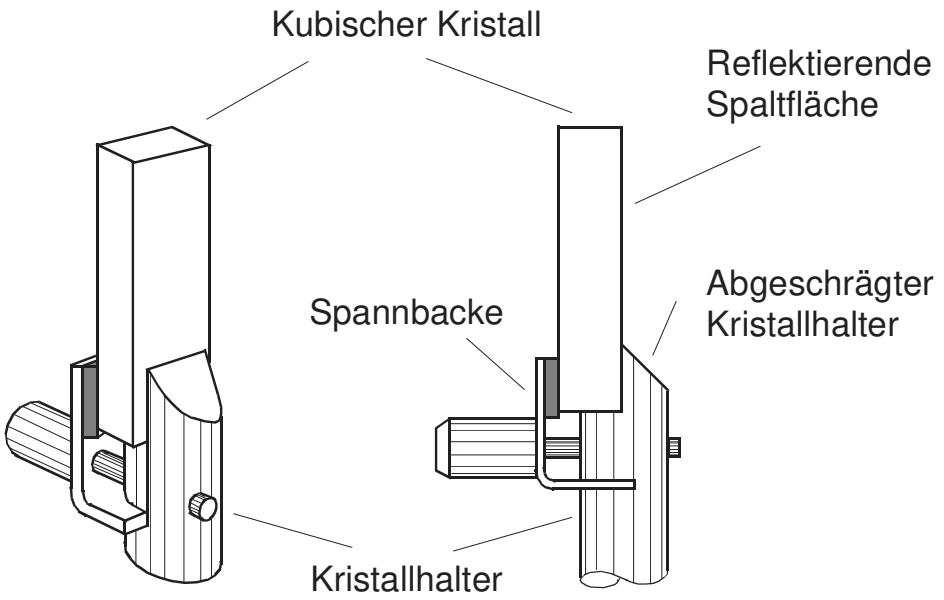

Abb. 2: Halterung des LiF-Einkristalls

zu Aufgabe 1a)

Vorbereitung:
1 mm Spalt senkrecht vor der Röhre
3 mm Spalt auf Pos. 13
1 mm Spalt auf Pos. 18
Kristall einjustieren
Zählrohr in Pos. 21 und 24

Berechnen Sie *vor* der Durchführung der Messung die Lage der K_α- und K_β-Linien aus der Bedingung für konstruktive Interferenz bei der Bragg Reflexion. Stellen Sie verschiedene Winkel des Messarms ein und notieren Sie jeweils die Zählrate.

Es stehen 3 verschiedene Einkristalle zur Verfügung. Die Messung mit dem LiF-Kristall sollte zuletzt gemacht werden. Man erspart sich einen erneuten Umbau für Aufgabe 1b).

zu Aufgabe 1b)

Vorbereitung:
1 mm Spalt senkrecht vor der Röhre
3 mm Spalt auf Pos. 13
1 mm Spalt auf Pos. 4
Zählrohr in Pos. 21 und 24

Berechnen Sie auch hier den Grenzwinkel vor der Messung (man erspart sich unnötige Messungen im falschen Winkelintervall).

Bestimmen Sie den Grenzwinkel bis 30 kV und bei 20 kV. Nehmen Sie dazu jeweils die Intensitätsverteilung im Bereich des Grenzwinkels auf.

Achtung: kleinster Winkel 11.5°

zu Aufgabe 2

Vorbereitung:
1 mm Spalt senkrecht vor der Röhre
3 mm Spalt in Pos. 4
1 mm Spalt in Pos. 18
NaCl Kristall einjustieren
Zählrohr in Pos. 22 und 25
Filter in Pos. 3

Vermessen Sie jeweils die Transmission (I/I_0) im Bereich $2\Theta = 20°$ bis $40°$. Messen Sie zunächst die Intensität ohne Filter „I_0“ (1°-Schnitte), danach die Intensität mit den verschiedenen Filtern als Funktion des Winkels.

zu Aufgabe 3

Vorbereitung: 1 mm horizontal vor der Röhre
Messarm auf 90° (= 2Θ)
Zählrohr in Pos. 17 und 20
Lochblende bzw. Filter in Pos. 12
Plastiktrommel in der Mitte einbauen
(Fenster 45° zum Strahl)

Mit dem Drahtauslöser können verschiedene Folien in das Fenster der Plastiktrommel gebracht werden. Messen Sie zunächst die Fluoreszenzstrahlung (I_0) für die verschiedenen Elemente durch die 9.5 mm Lochblende. Ersetzen Sie dann die Lochblende durch das Co-Filter und messen Sie die durchgelassene Intensität.

Hinweise zur Auswertung

zu 1a): Stellen Sie die gemessene Intensität als Funktion des Einfallswinkels dar. Versehen Sie das Diagramm mit einer Wellenlängenskala.

zu 1b): Stellen Sie die Intensität im Bereich des kurzwelligen Grenzwinkels als Funktion der Energie der Photonen dar.

zu 2: Stellen Sie die relative Transmission als Funktion der Wellenlänge graphisch dar. Markieren Sie die Lage der CuK_α- und CuK_β-Linien. Interpretieren Sie das Ergebnis.

zu 3: Bestimmen Sie die relative Transmission für die Fluoreszenzstrahlung der verschiedenen Elemente. Tragen Sie die Transmission gegen die Ordnungszahl auf. Erklären Sie den Verlauf!

Allgemeiner Hinweis

Das benutzte Spektrometer ist als Schulversuch zugelassen. Das Gerät kann nur betrieben werden, wenn die Bleiglashaube geschlossen ist, die die entstehende, schon relativ intensitätsschwache Röntgenstrahlung weitgehend absorbiert. Mit dem Betrieb sind keine Gesundheitsgefährdungen verbunden. Deshalb sind auch keine Strahlenschutzüberwachungsmaßnahmen notwendig.

Tabellen

	LiF	NaCl	KCl	RbCl
2d: [nm]	0.403	0.564	0.629	0.658

Element			Emission [pm]			Absorption [pm]
Z	Masse	Symbol	K_α	K_β	Mittelwert	K-Kante
23	50,94	V	255	228	242	227
24	52,00	Cr	229	208	218	207
25	54,94	Mn	210	191	200	189
26	55,85	Fe	194	176	185	174
27	58,93	Co	179	162	170	161
28	58,71	Ni	166	149	157	148
29	63,54	Cu	154	139	146	138
30	65,37	Zn	144	129	137	128

K 2a Radioaktiver Zerfall

Aufgabenbeschreibung

Von den mehr als 1250 bekannten Atomkernen sind etwa ein Drittel stabil, die übrigen sind instabil. Im vorliegenden Versuch wird $^{103}_{45}$Rh mittels einer Neutronenquelle in $^{104}_{45}$Rh umgewandelt, das dann unter β^--Emission in $^{104}_{46}$Pd zerfällt. Gemessen wird die Halbwertszeit des radioaktiven Rhodiumisotops.

Der Arbeitspunkt des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs wird aus dessen Charakteristik entnommen, die mit einem $^{22}_{11}$Na- oder einem $^{137}_{55}$Cs-Präparat gemessen wird. Zudem wird die Häufigkeitsverteilung zufälliger Prozesse untersucht.

Literatur

1. Alonso-Finn III: Kap. 7
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 13.2–3
3. Marmier: Kernphysik I
4. Braunbeck: Grundbegriffe der Kernphysik
5. Kohlrausch: Praktische Physik 1, 2, 3
6. Piraux: Radioisotope und ihre Anwendung in der Industrie, Kap. 1, 2
7. Schpolski: Atomphysik II
8. Mayer-Kuckuck: Kernphysik

Fragen zum Versuch

1. Erläutern Sie qualitativ den Aufbau der Atomkerne.
2. Was ist ein instabiler Kern? Auf welche Arten kann er zerfallen? Wie sieht die Gesetzmäßigkeit des Zerfalls aus?

3. Erläutern Sie den Begriff der radioaktiven Zerfallsreihe. Geben Sie die Zerfallsreihe für $^{210}_{82}$Pb an.
4. Diskutieren Sie die Umwandlungsspinne von $^{9}_{4}$Be.
5. Was versteht man unter den Begriffen „Halbwertszeit“ und „mittlere Lebensdauer“? Informieren Sie sich über die Halbwertszeiten der im Versuch auftretenden Substanzen $^{210}_{82}$Pb, $^{9}_{4}$Be, $^{104}_{45}$Rh, $^{22}_{11}$Na, $^{137}_{55}$Cs, u.a.!
6. Erklären Sie die Wirkungsweise der Neutronenquelle. Warum geht man dabei von $^{210}_{82}$Pb aus? (Anmerkung: Auch ein Po-Be-Präparat könnte als Neutronenquelle verwendet werden, vgl. auch Frage 5.)
7. Wie sind die Begriffe Energiedosis, Ionendosis, Dosisäquivalent und Qualitätsfaktor definiert?
8. Informieren Sie sich über die biologischen Wirkungen der Radioaktivität (Toleranzdosis u. dgl.).
9. Was ist ein Neutron, wie kann man es erzeugen und nachweisen?
10. Was versteht man unter künstlicher Radioaktivität?
11. Erklären Sie das Geiger-Müller-Zählrohr!
12. Welche weiteren Nachweisgeräte für radioaktive Substanzen kennen Sie?
13. Was ist ein Multi-Channel-Analyser (MCA)?
14. Wo nutzt man die Radioaktivität in der Praxis aus?
15. Welche ungefähre Genauigkeit erwarten Sie bei Ihren Messungen? (Vor Versuchsbeginn abschätzen!)
16. Was versteht man unter Poisson-Verteilung und Gauß-Verteilung? Was versteht man unter dem Begriff statistischer $\sqrt{\mathrm{N}}$-Fehler?
17. Was ist die „Stirlingsche Näherungsformel“?
18. Was versteht man unter Höhenstrahlung?

Aufgabenstellung

1. Nehmen Sie die Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs auf.

2. Bestimmen Sie die Nullrate.

3. Messen Sie die Aktivität des $^{22}_{11}$Na- bzw. des $^{137}_{55}$Cs-Präparats und bestimmen Sie die Häufigkeitsverteilung der Zerfälle. Diese ist mit der Poisson- bzw. Gauß-Verteilung zu vergleichen.

4. Bestimmen Sie die Halbwertszeit des aktivierten Rhodiums (Literaturwert: 42 s).

Allgemeine Hinweise:

Wenn in der Anleitung auf das $^{22}_{11}$Na-Präparat Bezug genommen wird, kann alternativ auch ein $^{137}_{55}$Cs-Präparat im Versuch benutzt werden.

Machen Sie sich mit der Handhabung von APLab©vertraut. Sollten Sie Fragen haben, wenden Sie sich an Ihren Betreuer.

Zu Aufgabe 1:

Unter der Zählrohrcharakteristik versteht man den Zusammenhang zwischen der am Zählrohr angelegten Spannung U und der Impulsrate (bei gegebener Aktivität). Zur Aufnahme der Charakteristik wird ein $^{22}_{11}$Na- bzw. ein $^{137}_{55}$Cs-Präparat benutzt.

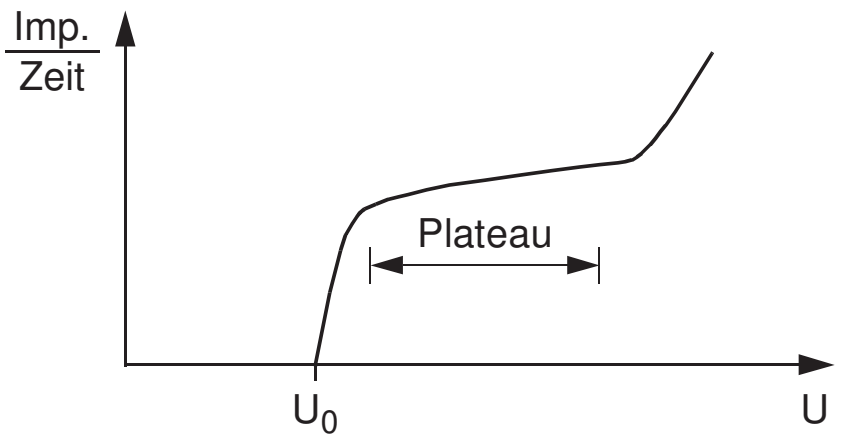

Abb. 1: Geiger-Müller-Zählrohrcharakteristik

Bei U_0 (Einsatzspannung) treten die ersten Entladungen des Zählrohrs auf, es folgt ein (hier sehr schmaler) Bereich proportionalen Anstiegs der Zählrate mit der Spannung und anschließend der Plateau-Bereich, das eigentliche Arbeitsgebiet des Zählrohrs, in dem die Zählrate relativ unabhängig von der Spannung ist.

1. Bestimmen Sie vor dem Start der eigentlichen Messung die Einsatzspannung U_0 (hörbar durch lautes Knacken des Lautsprechers in der Spannungsversorgung/Verstärker-Einheit) und überlegen Sie sich geeignete Spannungswerte bzw. Spannungsintervalle für die Aufnahme der Zählrohrcharakteristik.

2. Stellen Sie einen Spannungswert am Zählrohr ein und nehmen Sie die Zählrate über einen geeigneten Zeitraum mit Hilfe eines x-t-Schreibers auf. Übertragen sie die gemessenen Werte in eine Tabelle und bestimmen Sie die Zählrate (Imp/s).

3. Tragen Sie alle gemessenen Werte in ein Diagramm mit korrekter Beschriftung und Fehlern ein und drucken Sie dieses aus.

Es empfiehlt sich, zuerst eine Probemessung mit wenigen Spannungswerten (davon einige im vermuteten Plateau-Bereich) und kurzer Messdauer durchzuführen.

Wählen Sie für die weiteren Messungen einen geeigneten Arbeitspunkt für das Geiger-Müller-Zählrohr innerhalb des Plateau-Bereiches der Zählrohrcharakteristik. Es ist zu beachten, dass die Samplingrate bei allen Messungen auf eine Sekunde als Zeitabstand zwischen zwei Abtastvorgängen eingestellt ist (im allgemeinen entspricht dies der Default-Einstellung).

Vorsicht, die Einsatzspannung U_0 darf nicht um mehr als 200 V überschritten werden. Höhere Spannungen zerstören das Zählrohr.

zu Aufgabe 2:

Auch ohne Präparat kann man mit dem Geiger-Müller-Zählrohr in einem Zeitintervall von 5 s bis zu 10 Ereignisse zählen, die insbeson-

dere durch die Höhenstrahlung und die Radioaktivität der Umgebung (z. B. Mauerwerk) verursacht werden.

Nehmen Sie die Nullrate über einen geeigneten Zeitraum mit Hilfe eines x-t-Schreibers auf (Summenfunktion findet man unter Statistik in der Tabellenauswertung). Bestimmen Sie den Mittelwert der gemessenen Zählraten und bestimmen Sie den Meßfehler.

zu Aufgabe 3:

Die Häufigkeitsverteilung der Aktivität des $^{22}_{11}$Na-Präparats soll gemessen werden. Hierfür sollten mehrere Zeitintervalle von kürzerer Dauer aufgenommen werden. Dafür eignet sich am besten der Viel-Kanal-Analysator (MCA). Dieser unterteilt die Eingangswerte in feste Intervalle, die sogenannten Kanäle. So steht jeder Kanal für ein Intervall von Eingangswerten. Wird jetzt ein Eingangswert gemessen, so wird der Zählerstand des dazu gehörigen Kanals um eins hochgezählt.

Bei der Messung ist darauf zu achten, dass eine geeignete Anzahl an Einzelmessungen vorgenommen wird. Dazu ist es notwendig, die Intervallgröße nicht zu klein zu wählen. Überlegen Sie sich anhand der Aktivität des zu untersuchenden Präparats die Anzahl der Kanäle und die notwendige Messzeit, um verwertbare Ergebnisse zu erlangen. Auch hier sollte die Zeit zwischen dem Abtasten zweier Zählerstõnde eine Sekunde betragen.

Übertragen Sie die Messdaten in eine Tabelle und rechnen Sie die Spannungswerte in (Imp/s) um. Bestimmen Sie die Fehler und tragen Sie die Daten in einem Histogramm auf. Tragen Sie die Poisson- und die Gauß-Verteilung in das Histogramm ein und erläutern Sie den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Verteilungen.

Poisson-Verteilung:

$$w(n_i) = \frac{(\overline{n})^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\overline{n}} \qquad (1)$$

Gauß-Verteilung:

$$w(n_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n_i-\overline{n}}{\sigma}\right)^2} \tag{2}$$

Hierbei bedeuten:

n_i	:	Impulszahl
$\overline{n} = \frac{1}{Z}\sum_i Z_i n_i$	:	Mittelwert
Z_i	:	Häufigkeit
Z	:	Anzahl der Messungen
$\sigma = \sqrt{\frac{1}{Z-1}\sum_i Z_i (n_i - \overline{n})^2}$	:	Standardabweichung

Beide Verteilungen sind gemäß $\sum_{n_i} w(n_i) = 1$ normiert.

Viele Rechner können die Fakultätsfunktion $n!$ nicht für beliebige große n mit ausreichender Genauigkeit berechnen. Eine Methode dieses Problem zu lösen ist die „Stirlingsche Näherungsformel“, die $n!$ für große Zahlen n sehr gut nähert. Zeigen Sie, dass durch Anwenden der „Stirlingschen Näherungsformel“ die Poisson-Verteilung durch

$$w(n_i) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n_i}} \left(\frac{\overline{n}}{n_i}\right)^{n_i} \cdot e^{(n_i-\overline{n})} \tag{3}$$

dargestellt werden kann.

zu Aufgabe 4:

Aus der Neutronenquelle (s. a. Beschreibung) treten pro Sekunde und Quadratzentimeter etwa 150 langsame Neutronen aus (vgl. Frage 4). Bei der Aktivierung geschieht folgendes:

$$^{103}_{45}\mathrm{Rh} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{104}_{45}\mathrm{Rh}$$

Die Stärke der Aktivierung hängt u. a. von der Anzahl der pro Zeiteinheit austretenden Neutronen, dem von der Neutronenenergie abhängigen Wirkungsquerschnitt für die Absorption eines Neutrons und von der Dauer der Aktivierung ab.

Das bei der Aktivierung entstandene Isotop $^{104}_{45}\mathrm{Rh}$ zerfällt wie folgt:

$$^{104}_{45}\mathrm{Rh} \longrightarrow ^{104}_{46}\mathrm{Pd} + \mathrm{e}^-$$

Die Anzahl der ausgesandten β^--Teilchen, die vom Geiger-Müller-Zählrohr registriert werden, ist proportional zur Anzahl der zerfallenden Teilchen. Aus der Zeitabnahme dieser Zerfallsrate lässt sich die Halbwertszeit von $^{104}_{45}$Rh bestimmen.

Hinweise zur Messung:

Durch Einschieben von zwei auf Plastikträgern befestigten Rhodiumplättchen in die Neutronenquelle für die Dauer von mindestens 5 Minuten werden diese Rhodiumplättchen aktiviert und dann nahe an das Zählrohr gebracht. Während der Messung können zwei weitere Plättchen aktiviert werden, um den Zeitaufwand für die Messung zu verkürzen. Bei den Versuchsteilen 3 und 4 sollten sich die beiden Parallelgruppen miteinander absprechen. Eine Gruppe sollte mit Teil 3, die andere mit Teil 4 beginnen. Für den Versuchsteil 4 stehen dann jeweils vier Rhodiumplättchen zur Verfügung, von denen jeweils zwei aktiviert werden können, während bei den beiden anderen die Abklingzeit gemessen wird.

Vorsicht, Zählrohr nicht berühren, da es leicht zerbrechlich ist!

Die Halbwertszeit $^{104}_{45}$Rh beträgt nur 42 Sekunden, daher muss die Messung sofort nach Entnahme des Präparats aus der Neutronenquelle gestartet werden. Zur Messung soll ein x-t-Schreiber verwendet werden.

Wegen der geringen Aktivität des $^{104}_{45}$Rh-Präparats ist dieser Messzyklus mindestens viermal zu wiederholen. Beachten Sie, dass die Messintervallänge und die Samplingrate jeweils übereinstimmt. Nach dem Übertragen der Messwerte in eine Tabelle, addieren Sie die verschiedenen Zerfallskurven mit Hilfe der BERECHNEN-Funktion.

Um die Nettoimpulsrate zu bestimmen, muss noch die Nullrate abgezogen werden. Drucken Sie die Tabelle aus.

Anhand dieser Tabelle ist eine halblogarithmische Zerfallskurve zu erstellen, mit deren Hilfe die Halbwertszeit bestimmt werden kann. Schätzen Sie den Fehler ab und vergleichen Sie Ihr Endergebnis mit dem Literaturwert. Wie sind die Fehlerbalken der Summenkurve definiert?

Allgemeiner Hinweis

Die benutzten radioaktiven Präparate liegen bezüglich ihrer Aktivität alle unter der Freigrenze. Da beim Umgang mit diesen Präparaten keine Gefährdung zu erwarten ist, sind keine Strahlungsschutzüberwachungsmaßnahmen notwendig.

Versuch	**Physikalische Fragestellung**	**Raum**	**Seite**
W 4b	Wärmestrahlung	371 A	4
W 5a	Thermodynamische Kreisprozesse	379	8
E 2b	Kennlinien von Halbleiterelementen	379	14
E 2d	Transistorkennlinien	379	20
O 2b	Gitterspektralapparat und Monochromator	374, 375	25
O 4a	Mikrowellen / Bragg-Reflexion	379	30
A 1a	e/m-Bestimmung	370, 372	35
A 1b	Bestimmung der Planckschen Konstanten h	377, 378	46
A 1c	Franck-Hertz-Versuch	368, 371	55
A 1d	Röntgenröhre	385, 386	61
A 1f	Röntgenspektren	385, 386	67
K 2a	Radioaktiver Zerfall	384	74