

### 3.8 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums aus der Grenzfrequenz von Röntgenstrahlung

*Stichwörter:* Röntgenstrahlung, Röntgengerät, Grenzfrequenz, Plancksches Wirkungsquantum, Braggsche Bedingung, Geiger-Müller Zählrohr

*Hinweis:* zu diesem Versuch wird kein Laborbericht verlangt. Daher wird eine sehr gute Vorbereitung erwartet. Lesen Sie mindestens die am Ende angegebene Literatur gut durch, und recherchieren Sie in anderen Quellen (z.B. andere Aufbauten, Erwartungswerte, usw.) vor den Versuchstag.

#### 1 Methode und Theorie

In einer Röntgenröhre werden Elektronen durch die angelegte Anodenspannung  $U_A$  beschleunigt. Beim Auftreffen auf die Anode besitzen sie die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_A \quad (e = \text{Elementarladung}). \quad (1)$$

Im Anodenmaterial werden sie auf einer sehr kurzen Strecke abgebremst, wobei jedes Elektron seine Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung und Wärme abgibt. Die Energie der abgestrahlten Quanten liegt wegen der hohen Anodenspannung (20 kV ... 35 kV) im Bereich der Röntgenstrahlung. Die Energiebilanz für ein Elektron lautet dann

$$e \cdot U_A = Q + h\nu. \quad (2)$$

Dabei ist  $Q$  die Wärme und  $h\nu$  die Strahlungsenergie. Die Maximalenergie, die ein Röntgenquant erhalten kann, wird erreicht, wenn die gesamte kinetische Energie des Elektrons in Strahlung umgesetzt wird:

$$h\nu_{\text{max}} = e \cdot U_A. \quad (3)$$

Damit ergibt sich die zu einer gegebenen Anodenspannung gehörige Grenzwellenlänge zu

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{c}{\nu_{\text{max}}} = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{U_A}. \quad (4)$$

#### 2 Vorbereitungsaufgaben

Vor dem Versuchstag, lesen Sie die angegebene Bibliographie und suchen Sie auch eigenständig andere zusätzliche Quellen um die Vorbereitungsfragen zu beantworten.

1. Erklären Sie wie ein Geiger-Müller Zählrohr funktioniert.
2. Erklären Sie die 5 „As“ des Strahlenschutzes. Wie wird in diesem Versuch dafür gesorgt, dass das Minimierungsgebot des Strahlenschutzes erfüllt wird?
3. Wie verhält sich die Röntgenstrahlung in diesem Versuch? Handelt es sich um Teilchen oder Wellen?

### 3 Versuchsaufbau und Durchführung

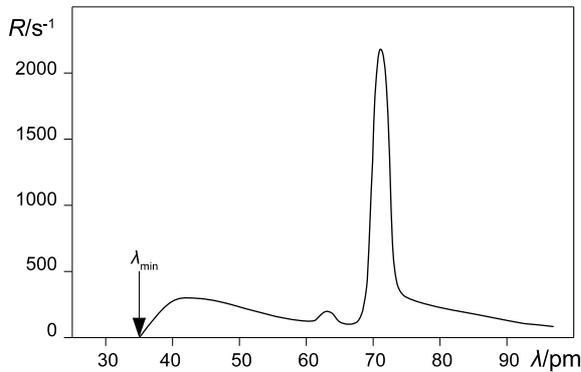


Abbildung 1: Spektrum der Mo-Röntgenröhre bei  $U_A = 35 \text{ kV}$

Zur Bestimmung der Wellenlänge wird eine Braggsche Anordnung verwendet. Der aus einer Schlitzblende austretende Röntgenstrahl fällt unter dem Winkel  $\beta$  auf die Oberfläche eines LiF-Kristalls und wird an den Netzebenen des Kristalls reflektiert (siehe Abb. 2). Wegen der dabei auftretenden Interferenzen gilt dies aber nur für die Wellenlängen, die der Braggschen Bedingung entsprechen:

$$k\lambda = 2d \cdot \sin\beta. \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

$d$  ist dabei der Abstand der Netzebenen (201 pm bei LiF). Durch Verändern des Einfallswinkels kann auf diese Weise also das Spektrum der Röntgenstrahlen ausgemessen werden (siehe Abb. 1).

Zur Bestimmung der Wellenlänge wird eine Braggsche Anordnung verwendet. Der aus einer Schlitzblende austretende Röntgenstrahl fällt unter dem Winkel  $\beta$  auf die Oberfläche eines LiF-Kristalls und wird an den Netzebenen des Kristalls reflektiert (siehe Abb. 2). Wegen der dabei auftretenden Interferenzen gilt dies aber nur für die Wellenlängen, die der Braggschen Bedingung entsprechen:

$$k\lambda = 2d \cdot \sin\beta. \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

$d$  ist dabei der Abstand der Netzebenen (201 pm bei LiF). Durch Verändern des Einfallswinkels kann auf diese Weise also das Spektrum der Röntgenstrahlen ausgemessen werden (siehe Abb. 1).

Für den vorliegenden Versuch genügt es, einen kleinen Bereich dieses Spektrums in der Umgebung der Grenzwellenlänge auszumessen. Die gemessenen Zählraten  $R(\beta, U_A)$  werden mit der Anodenspannung  $U_A$  als Parameter grafisch gegen die sich aus Gl. (6) ergebenden Wellenlängen  $\lambda$  ( $k = 1$ ) aufgetragen. Zur Ermittlung der Grenzwellenlänge  $\lambda_{\min}$  wird der lineare Bereich jeder Kurve grafisch bis zur  $\lambda$ -Achse extrapoliert.

Eine Messung der Nullrate ist in diesem Versuch nicht erforderlich, da sie gegenüber den gemessenen Zählraten vernachlässigt werden kann.

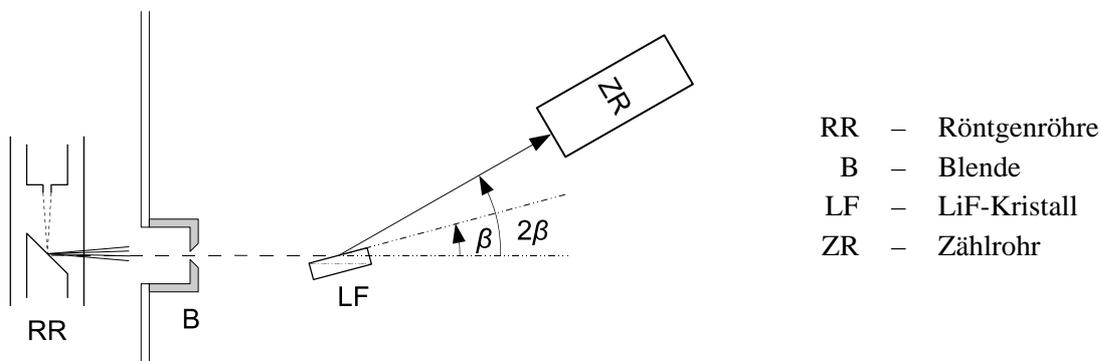


Abbildung 2: Versuchsaufbau

**Aufgaben:**

$U_A/\text{kV}$	$\beta_{\min}/^\circ$	$\beta_{\max}/^\circ$
34	5,0	6,1
32	5,3	6,4
30	5,7	6,8
28	6,0	7,1
26	6,5	7,6
24	7,0	8,1
22	7,8	8,9

1. Es sind 7 Messreihen für verschiedene Anodenspannungen aufzunehmen. Die Einstellungen am Röntgengerät für  $I_A = 1 \text{ mA}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$  und  $\Delta\beta = 0,1^\circ$  sind immer gleich. Für jede Messreihe getrennt eingestellt werden nacheinander  $U_A$ ,  $\beta_{\min}$  und  $\beta_{\max}$  (siehe Tabelle 1). Das Röntgengerät muss im Modus COUPLED betrieben werden. Zum Start der Messung drücken Sie die Taste SCAN.

Jetzt werden automatisch alle Winkel im eingestellten Bereich im Abstand von  $0,1^\circ$  angefahren und für 30 s die jeweilig Zählrate ermittelt. Jede Messreihe dauert etwa 6 Minuten.

Tabelle 1: Messbereiche

Nach der Messung rufen Sie die Zählraten für die jeweiligen Winkel durch Druck auf die Taste REPLAY ab. Der Winkel wird mit dem Stellrad gewählt. Die dazugehörige Zählrate in  $\text{s}^{-1}$  erscheint in der oberen Anzeige. Tragen Sie alle Messwerte in eine große Tabelle ein. Fügen Sie eine Spalte für die nach Gl. (6) berechneten Wellenlängen hinzu.

2. Tragen Sie alle Messwerte  $R = R(\lambda)$  in ein Diagramm mit  $U_A$  als Parameter ein. Es empfiehlt sich, dabei für die Messreihen mit kleineren Zählraten einen größeren Maßstab für die vertikale Achse zu wählen. Zeichnen Sie die Ausgleichsgeraden für den linearen Teil der Kurven ein, und bestimmen Sie aus deren Schnittpunkt mit der  $\lambda$ -Achse die Grenzwellenlängen  $\lambda_{\min}$ .
3. Bestimmen Sie grafisch den Fehler  $\Delta\lambda_{\min}$ .
4. Tragen Sie in einem weiteren Diagramm die ermittelten Grenzwellenlängen  $\lambda_{\min}$  gegen die Kehrwerte der Anodenspannungen  $U_A$  auf. Nach Gl. (4) ist dieser Zusammenhang linear. Zeichnen Sie die Ausgleichsgerade, und berechnen Sie aus deren Steigung das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  (Hinweis: Die Gerade muss durch den Nullpunkt gehen).
5. Zeichnen Sie die Fehlerbalken ein, und schätzen Sie auf grafischem Weg den Fehler von  $h$  ab.

**Literatur:** D. Meschede, *Gerthsen Physik* Kap. 12.2.3, 14.1, 17.3, 25. Auflage (2016).