

Versuch V603: Compton-Effekt

Ziel: Es soll die Compton-Wellenlänge λ_c des Elektrons bestimmt werden.

Stichworte: Absorption, Bremsstrahlung, charakteristisches Spektrum, Compton-Effekt, Compton-Wellenlänge, Emissionsspektrum, Geiger-Müller Zählrohr, Photoeffekt, Röntgenstrahlung, Streuung, Totzeit

Theoretische Grundlagen

Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Wellenlänge von γ -Strahlung bei Streuung an einem Elektron zu längeren Wellenlängen verschiebt (Compton-Effekt). In diesem Versuch wird die Compton-Wellenlänge über eine indirekte Methode mit Hilfe von Röntgenstrahlen bestimmt. Hierzu werden Röntgenstrahlen an einem Plexiglasquader gestreut und aus dem Transmissionsverhalten die Comptonwellenlänge bestimmt.

Bei der Streuung von Röntgenstrahlung an Materie tritt neben der klassischen inelastischen Streuung (kohärenten Streuung) auch noch die elastische frequenzverschobene Streuung (inkohärente Streuung) auf. Bei der inelastischen Streuung (Compton Streuung) wechselwirkt ein Photon mit einem freien Elektron. Hierbei gibt das Photon einen Teil seiner Energie an das Elektron ab und wird um den Winkel θ gestreut. Aus der Energie- und Impulserhaltung kann die Energie, und damit die Wechselwirkung, des gestreuten Photons berechnet werden. Die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ zwischen einfallender Wellenlänge λ_1 und Compton verschobener Wellenlänge λ_2 läßt sich durch

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

beschreiben, wobei θ der gestreute Winkel ist. Die Konstante $\lambda_c = h/(m_e c)$ hat die Dimension einer Länge und wird Compton-Wellenlänge des Elektrons genannt. Die Wellenlängenverschiebung ist bei $\theta = 0^\circ$ minimal ($\Delta\lambda = 0$) und bei $\theta = 180^\circ$ maximal ($\Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_c$).

Für die Erzeugung von Röntgenstrahlen werden in einer evakuierten Röhre aus einer Glühkathode Elektronen emittiert und auf eine Anode hin beschleunigt. Beim Auftreffen auf die Anode entsteht Röntgenstrahlung, die sich aus dem kontinuierlichem

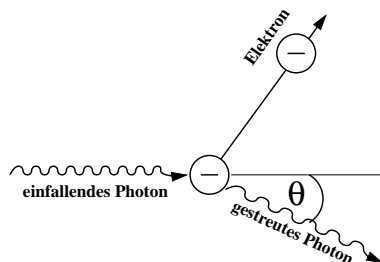


Abbildung 1: Compton-Effekt

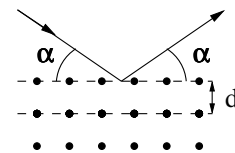
Bremsspektrum und der charakteristischen Röntgenstrahlung des Anodenmaterials zusammensetzt. Das Bremsspektrum entsteht bei der Abbremsung eines Elektrons im Coulombfeld des Atoms. Durch die Abbremsung wird ein Photon (Röntgenquant) ausgesendet, dessen Energie gerade der Energieverlust des abgebremsten Elektrons ist. Da das Elektron sowohl einen Teil seiner Energie als auch seine gesamte kinetische Energie abgeben kann, handelt es sich beim Bremsspektrum um ein kontinuierliches Spektrum. Beim charakteristischen Spektrum wird das Anodenmaterial ionisiert, hierdurch kann ein Elektron aus einer äußeren Schale unter Aussendung eines Röntgenquants in die innere Schale zurückfallen. Da in diesem Fall die Energie des Röntgenquants gerade die Energiedifferenz der beiden Energieniveaus ist, besteht das charakteristische Spektrum aus scharfen Linien, deren Energie charakteristisch für das Anodenmaterial der Röntgenröhre ist.

Für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge wird die Transmission und Absorption von Röntgenstrahlung durch Aluminium ausgenutzt. Die Transmission eines Stoffes hängt von der Wellenlänge ab und nimmt mit zunehmender Wellenlängen ab. Die Transmission der Compton verschobenen Wellenlänge ist daher kleiner als die Transmission der einfallenden Wellenlänge. Bei der Absorption von Photonen durch Materie der Dicke d wird die einfallende Intensität I_0 gemäß dem Delamber'schen Gesetz.

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (2)$$

geschwächt. Der Absorptionskoeffizient $\mu = \mu_{Paar} + \mu_{Photo} + \mu_{Com}$ setzt sich im Allgemeinen aus dem Absorptionskoeffizienten für Paarbildung μ_{Paar} , des Photoeffektes μ_{Photo} und des Comptoneffektes μ_{Com} zusammen.

Die Energie E bzw. die Wellenlänge λ der Röntgenstrahlung kann durch die Bragg'sche Reflexion analysiert werden. Hierbei fällt Röntgenlicht auf ein dreidimensionales Gitter (z.B. ein LiF-Kristall). Die Photonen werden an jedem Atom des Gitters gebeugt. Die Röntgenstrahlen interferieren miteinander und beim Glanzwinkel α erhält man konstruktive Interferenz. Bei bekannter Gitterkonstanten d ($d_{LiF} = 201.4 \text{ pm}$) kann so mit Hilfe der Bragg'schen Bedingung



$$2 d \sin \alpha = n \lambda \quad (3)$$

aus dem Winkel α die gebeugte Wellenlänge λ bestimmt werden, wobei n die Beugungsordnung ist.

Vorbereitung

1. Informieren Sie sich in der Literatur welche Energien die Kupfer K_α und Kupfer K_β Linien haben. Berechnen Sie die zugehörigen Wellenlängen und den Winkel α für einen LiF-Kristall ($d_{LiF} = 201.4 \text{ pm}$) und $n = 1$.
2. Berechnen Sie die Compton-Wellenlänge λ_c .

Aufgabe

1. Messen und Analysieren Sie das Emissionsspektrum der Cu-Röntgenröhre.
2. Bestimmen Sie mindestens 5 mal die Compton-Wellenlänge mit Hilfe der Röntgenstrahlung.

Versuchsaufbau und Durchführung

Der experimentelle Aufbau besteht im wesentlichen aus einer Kupfer-Röntgenröhre, einen LiF-Kristall bzw. einen Plexiglas-Streuer und einem Geiger-Müller-Zählrohr. Die Elektronik ist im Röntgengerät (Abb.2) integriert und kann wahlweise über einen Rechner oder manuell bedient werden. Es ist sinnvoll das Emissionsspektrum (Aufgabe 1) und die Transmission $T(\lambda)$ des Aluminium-Absorbers (Aufgabe 2a) mit dem Rechner

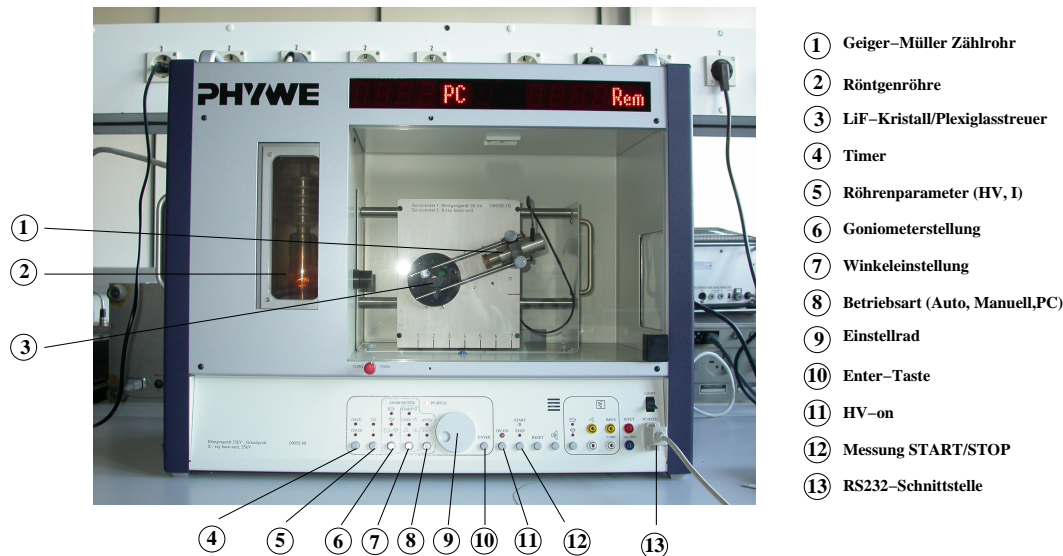


Abbildung 2: Röntgenröhre

zu vermessen. Für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge (Aufgabe 2b-2d) ist die manuelle Bedienung sinnvoller. Wird das Experiment über den PC gesteuert, so gehen Sie in das Programm **measure** und wählen unter dem Menüpunkt **Messgeräte** das Röntgengerät an. Nun können Sie die **Messart**, den **Drehmodus**, den anzufahrenden Kristallwinkel sowie die **Integrationszeit** wählen und die Messung starten. Bei manuellem Betrieb, muß das RS232-Kabel abgezogen werden und das Röntgengerät auf **Manuell** umgestellt werden. Die manuellen Einstellungen, z.B. des Kristallwinkels oder der Messzeit, erfolgen über den Einstellknopf ⑨ und müssen mit **ENTER** bestätigt werden. Die gemessene Zählrate erscheint in der oberen Anzeigenleiste des Röntgengerätes.

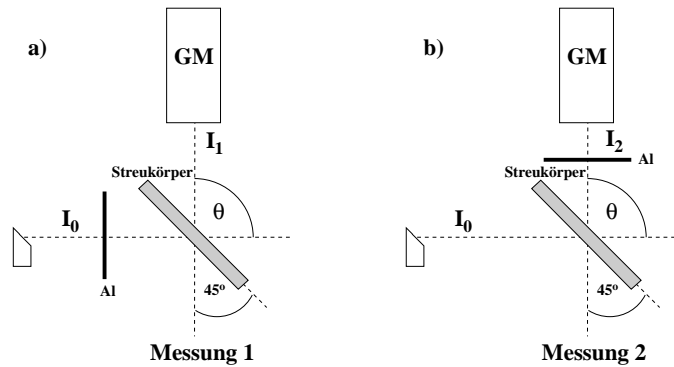


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau

Stellen Sie bei allen Messungen die Röntgenröhre auf eine Beschleunigungsspannung von 35 kV und einen Emissionsstrom von 1 mA. Für die Aufnahme des Emissionsspektrums und der Transmissionskurve wird der LiF-Kristall in die Halterung gesteckt.

1. Verwenden Sie für die Aufnahme des Emissionsspektrums eine 2 mm Blende und einen LiF-Kristall. Messen Sie hierzu das Röntgenspektrum (Beugungsordnung $n=1$) in 0.2° -Schritten. Die Meßzeit pro Winkel sollte zwischen 5 sec und 10 sec liegen. Überlegen Sie sich bei welchem Winkel sie anfangen und aufhören müssen um den vollständigen Bremsberg und die charakteristischen Linien zu messen.¹
2. (a) Nehmen Sie für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge die Transmission $T(\lambda)$ des Aluminium-Absorbers auf. Setzen Sie den Al-Absorber vor die 2 mm Blende. Messen Sie $N_{Al}(\theta)$ mit und $N_0(\theta)$ ohne Absorber (Messzeit $t=100$ sec) und korregieren Sie die gemessene Zählrate in einem Winkelbereich von 7 Grad bis 10 Grad mit der Totzeit $\tau = 90 \mu s$ des Geiger-Müller Zählrohrs:

$$I = \frac{N}{1 - \tau \cdot N} \quad (4)$$

Berechnen Sie die Transmission und tragen Sie $T = I_{Al}/I_0$ als Funktion von λ auf.

- (b) Ersetzen Sie die 2 mm Blende durch eine 5 mm Blende und den LiF-Kristall durch einen Plexiglas-Streuer. Bei den nachfolgenden Messungen empfiehlt sich die manuelle Messung. Stellen Sie den Kristall auf 45° und das Geiger-Müller Zählrohr auf 90° (Abb.3) und messen Sie die Intensität I_0 der Cu-Röhre.
- (c) Führen Sie für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge zwei unabhängige Messungen durch. Die Meßzeit sollte nicht unter $t=300$ sec liegen. Bestimmen Sie zuerst die Transmission $T_1 = I_1/I_0$ (Wellenlänge λ_1) für die noch nicht gestreute Röntgenstrahlung, indem Sie den Aluminiumabsorber in den

¹Hierzu ist es hilfreich als Vorbereitung $E(\theta)$ zu plotten und sich die K_α und K_β Linien von Cu aus der Literatur zu suchen.

Strahlengang zwischen Röntgenröhre und Streukörper bringen (Abb.3a). Bestimmen Sie danach die Transmission $T_2 = I_2/I_0$ (Wellenlänge λ_2) für die gestreute Röntgenstrahlung, indem Sie den Aluminiumabsorber in den Strahlengang zwischen Streukörper und Geiger-Müller-Zählrohr bringen (Abb.3b).

(d) Wiederholen Sie die Messungen 5 mal.

Auswertung

1. Tragen Sie die Transmission als Funktion der Wellenlänge auf. Bestimmen Sie mit Hilfe der Graphik die Wellenlängen λ_1 für die ungestreute Röntgenstrahlung und λ_2 für die gestreute Röntgenstrahlung und berechnen Sie aus der Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ die Comptonwellenlänge λ_c . Vergleichen Sie das Ergebniss mit der Literatur. Welche Einflüsse (systematische Fehler) wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt?
2. Überlegen Sie sich warum der Compton-Effekt im sichtbaren Bereich des Spektrums nicht auftreten kann.