

Verwandte Themen

Röntgenstrahlen, Compton-Effekt, Compton-Wellenlänge, Ruheenergie, Absorption, Transmission, Energie- und Impulserhaltung, Bragg-Streuung.

Prinzip

Mittels einer indirekten Methode wird in diesem Versuch die Comptonwellenlänge mit Hilfe von Röntgenstrahlen bestimmt. Hierfür werden Röntgenstrahlen an einem Plexiglasblock gestreut. Die Intensität der gestreuten Strahlung wird mit einem Zählrohr gemessen. Aus dem Transmissionsverhalten wird anhand einer zuvor gemessenen Transmissionskurve die Comptonwellenlänge bestimmt.

Material

1 XR 4.0 expert unit, Röntgengerät 35 kV	09057-99	1 Plattenhalter	02062-00
1 XR 4.0 Goniometer für Röntgengerät 35 kV	09057-10	1 XR 4.0 Optische Bank	09057-18
1 XR 4.0 Einschub mit Kupfer-Röntgenröhre	09057-50	1 Reiter für optische Profilbank, h = 30 mm	08286-01
1 Zählrohr Typ B	09005-00	1 XR measure 4.0 software	14414-61
1 XR 4.0 LiF-Einkristall in Halter	09056-05	1 Datenkabel USB Steckertyp A/B	14608-00
1 XR 4.0 Blendentubus d = 2 mm	09057-02		
1 XR 4.0 Blendentubus d = 5 mm	09057-03	<i>Zusätzlich erforderlich</i>	
1 XR 4.0 Comptonzusatz	09057-04	PC, Windows® XP oder höher	

Dieser Versuch ist in dem Erweiterungsset „XRC 4.0 X-ray Charakterisierung Erweiterungsset“ enthalten.



Abb. 1: P2541701

Aufgaben

1. Bestimmen Sie die Transmission eines Aluminiumabsorbers als Funktion des Bragg-Winkels und tragen Sie sie gegen die Wellenlänge der Strahlung grafisch auf.
2. Messen Sie die Intensität der an einem Plexiglasblock unter a) 60° b) 90° und c) 120° gestreuten Strahlung mit und ohne Absorber.
3. Bestimmen Sie aus der ermittelten Transmission mit Hilfe der Transmissionskurve die Compton-Wellenlänge des Elektrons.

Aufbau

Schließen Sie das Goniometer und das Geiger-Müller-Zählrohr an die entsprechenden Buchsen im Experimentierraum an (siehe Kennzeichnung in Abb. 2). Der Goniometerblock **mit eingesetztem**

Analysatorkristall soll sich in einer mittleren Position befinden. Das Geiger-Müller-Zählrohr mit seiner Halterung wird am hinteren Anschlag der Führungstangen arretiert. Vergessen Sie nicht, die Zählrohr-Blende vor dem Zählrohr zu montieren.

Der Blendentubus mit 2-mm-Durchmesser wird zur Kollimierung des Röntgenstrahls in den Strahlausgang des Röhreneinschubs eingesetzt.

Um den Aufbau zu kalibrieren, stellen Sie zunächst sicher, dass der richtige Kristall in den Goniometer-Parametern eingegeben ist. Wählen Sie dann „Menü“, „Goniometer“, „Autokalibrierung“. Nun ermittelt das Gerät die optimale Stellung von Kristall und Goniometer zueinander und im Anschluss die Position des Peaks.

Hinweis

Details zur Bedienung des Röntgengeräts und des Goniometers sowie zum Umgang mit den Einkristallen entnehmen Sie bitte den entsprechenden Bedienungsanleitungen.

Durchführung

- Der PC und das Röntgengerät werden mit Hilfe des Datenkabels über die USB Buchse verbunden (der entsprechende Anschluss am Röntgengerät ist in Abb. 3 gekennzeichnet).
- Starten Sie nun das „Measure“-Programm: das Röntgengerät erscheint auf dem Bildschirm.
- Indem Sie die verschiedenen Funktionen auf und unter dem abgebildeten Gerät anklicken, können Sie nun das Gerät vom Computer aus bedienen. Alternativ können die Parameter auch am Gerät geändert werden – das Programm übernimmt die entsprechenden Einstel-

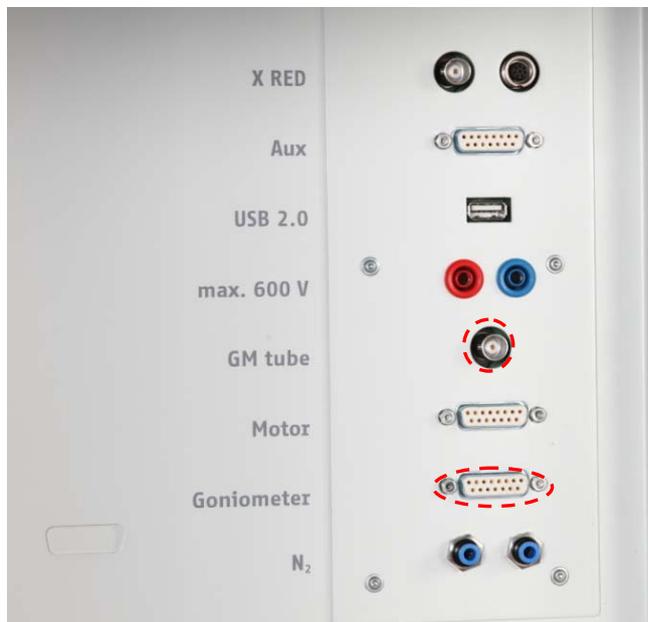


Abb. 2: Anschlüsse im Experimentierraum



Abb. 3: Anschluss des Computers

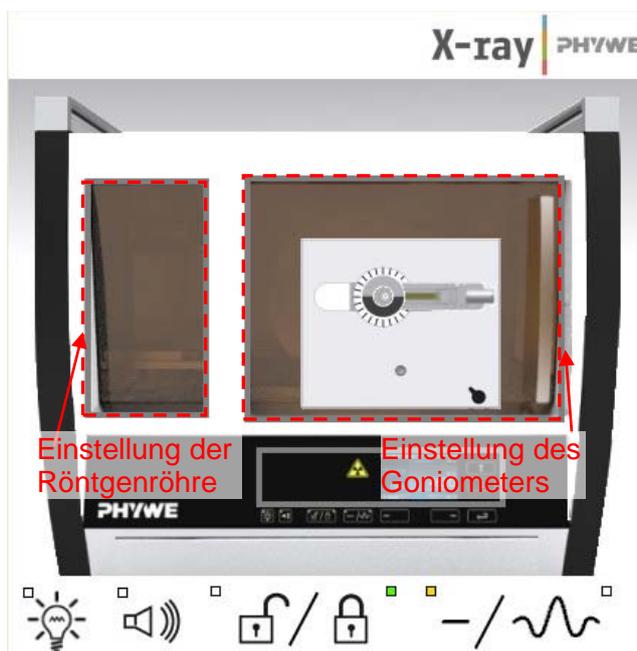


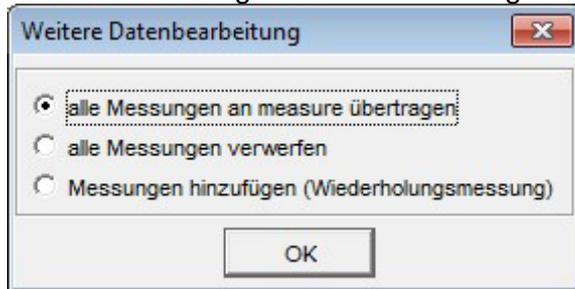
Abb. 4: Teil der Bedienoberfläche in der Software

lungen automatisch.

- Wenn Sie auf den Experimentierraum klicken (siehe rote Kennzeichnung in Abb. 4), können Sie die Parameter für das Experiment verändern. Wählen Sie die Einstellungen für Aufgabe 1 wie in Abb. 5 angegeben.
- Wenn Sie auf die Röntgenröhre klicken (siehe rote Kennzeichnung in Abb. 5), können Sie Spannung und Strom der Röntgenröhre ändern. Wählen Sie die Einstellungen wie in Abb. 6 angegeben.
- Starten Sie das Experiment, indem Sie auf den roten Kreis klicken:



- Nach der Messung erscheint die Abfrage:



Markieren Sie den ersten Punkt und bestätigen Sie mit OK. Die Messwerte werden nun direkt an die Software measure übertragen.

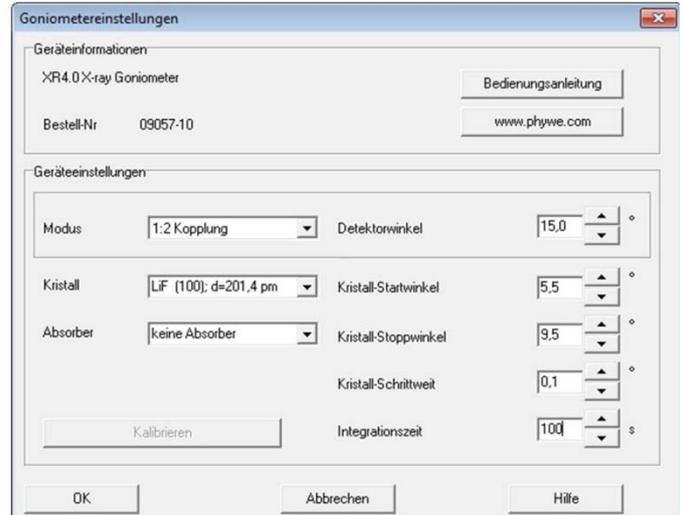


Abb. 5: Einstellungen für das Goniometer; Aufgabe 1

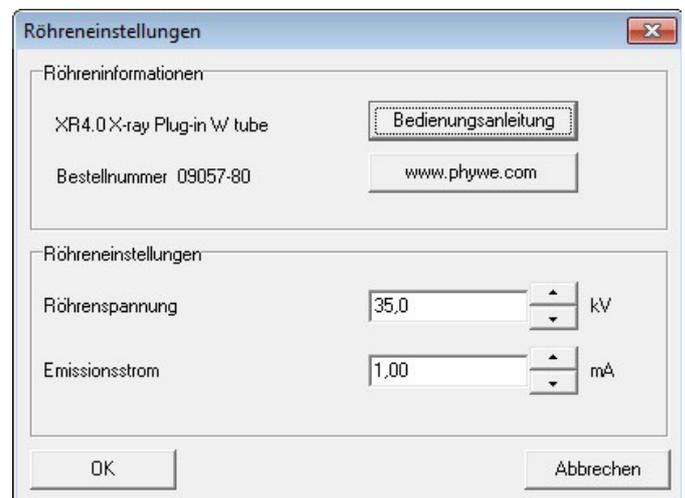


Abb. 6: Einstellung der Spannung und der Stromstärke

Durchführung

Aufgabe 1: Bestimmung der Transmission von Aluminium

Einstellungen: Siehe Übersicht.

Setzen Sie die 2 mm-Blende ein und setzen Sie den Kristall am Goniometer ein. Zuerst wird mit Hilfe des LiF-Analysatorkristalls in dem o.g. Winkelintervall die Intensität N der Röntgenstrahlung bestimmt. Die Messung ist zu wiederholen, nachdem der Aluminiumabsorber vor den Ausgangstube des Röhreneinschubes positioniert worden ist (er lässt sich am besten mit Hilfe eines Reiters für die optische Bank und des Plattenhalters positionieren).

Um den relativen Fehler von N möglichst gering zu halten, sind hohe Raten erforderlich.

Bei hohen Pulsraten ist allerdings die Totzeit τ des Zählrohres zu berücksichtigen, da von diesem nicht alle einfallenden Photonen registriert werden (siehe Theorie).

Übersicht Einstellungen am Goniometer und Röntgengerät für Aufgabe 1:

- 2:1-Kopplungsmodus
- Integrationszeit 100 s (Gate-Timer); Winkelschrittweite $0,1^\circ$
- Winkelbereich: $5,5^\circ < \vartheta < 9,5^\circ$
- Anodenspannung $U_A = 35 \text{ kV}$; Anodenstrom $I_A = 1 \text{ mA}$

Aufgabe 2: Bestimmung der Comptonstreuung

Der Analysatorkristall wird gegen den Plexiglasstreuer ausgetauscht und auf eine Stellung von 10° gedreht (s. Abb. 7 und 8). Der Blendentubus mit 2-mm-Lochdurchmesser wird durch den Blendentubus mit 5-mm-Lochdurchmesser ersetzt. Das Zählrohr befindet auf a) 60° , b) 90° , c) 120° .

Die Impulsraten bei folgenden Anordnungen sind nun nacheinander zu bestimmen:

N_3 : mit Plexiglasstreuer aber ohne Aluminiumabsorber

N_4 : mit Plexiglasstreuer und Aluminiumabsorber in Position 1 (siehe Abb. 9)

N_5 : mit Plexiglasstreuer und Aluminiumabsorber in Position 2

Zur Bestimmung der Rate N_4 ist der Aluminiumabsorber mit Hilfe des Reiters für die optische Bank und des Plattenhalters zwischen Blende und Streuer zu positionieren. Zur Bestimmung der Rate N_5 ist der Aluminiumabsorber auf die Führungsstangen des Zählrohres zu klemmen.

Es sollten jeweils drei Messwerte notiert werden bei einer Messzeit von 50-100 s.

Bei sehr geringen Impulsraten ist u. U. die Untergrundstrahlung bei $U_A = 0$ V zu berücksichtigen.

Theorie

Die Absorption eines Materials wird von drei verschiedenen Wechselwirkungsprozessen bestimmt, deren relative Beiträge von der Ordnungszahl (Kernladungszahl) Z und Massenzahl A des Abschirmmaterials abhängen.

Die wichtigsten Einzelprozesse sind

- der Photoeffekt; Abschwächung $\sim Z^4/A$
- die Comptonstreuung; Abschwächung $\sim Z/A$
- die Paarbildung; Abschwächung $\sim Z^2/A$.

Der energieabhängige Absorptionskoeffizient eines Materials μ setzt sich also aus dem Absorptionskoeffizienten der Paarbildung μ_{Pa} , des Photoeffektes μ_{Ph} und des Comptoneffektes μ_{Co} zusammen. Zwei weitere Mechanismen, Kernphotoeffekt und normale elastische Streuung, sind für die Abschirmwirkung normalerweise vernachlässigbar.

$$\mu = \mu_{Pa} + \mu_{Ph} + \mu_{Co}$$

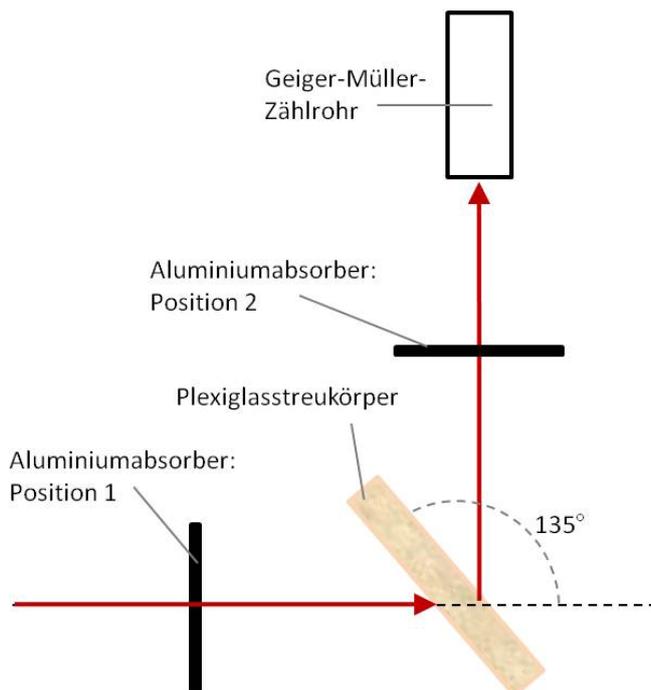


Abb. 7: Schematische Darstellung zur 90° -Comptonstreuung

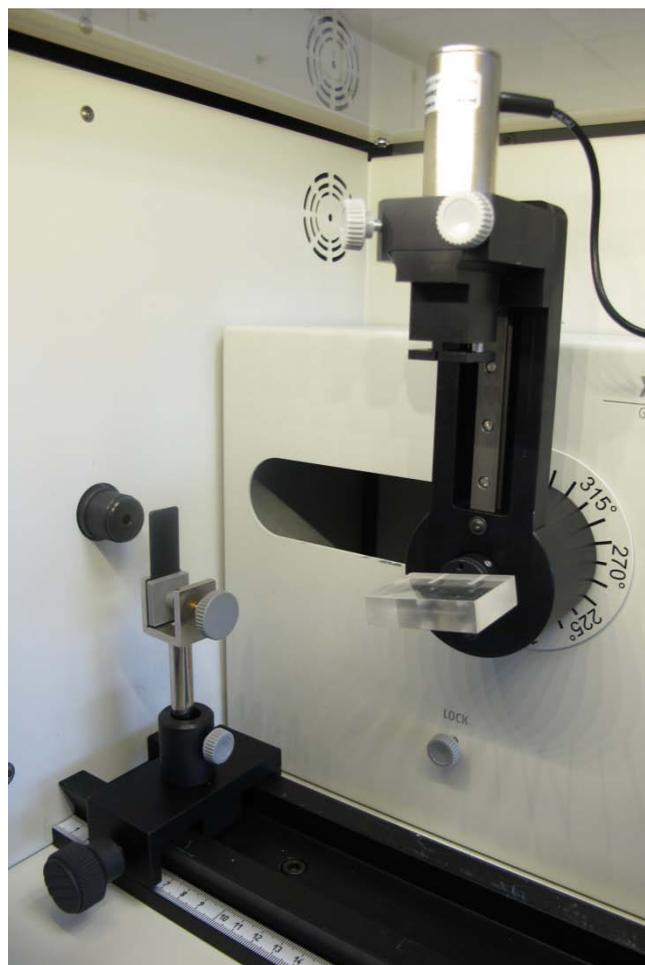


Abb. 8: Aufbau Aufgabe 2. Position von Streukörper und GM-Zählrohr für die Aufnahme bei 90° . Absorber in Position 1.

Für den von uns betrachteten Bereich der Röntgenstrahlung ($E \approx 1 - 100 \text{ keV}$) ist μ_{Pa} zu vernachlässigen (siehe Abb. 9, beispielhaft für Aluminium). μ_{ph} ist für diesen Versuch ebenfalls nicht relevant, da nicht Photonen sondern nur Elektronen freigesetzt werden. Deshalb empfängt der Detektor fast ausschließlich Compton-Anteile.

Eine schematische Darstellung des Comptoneffekts zeigt Abb. 10.

Durch Wechselwirkung mit einem freien Elektron im Festkörper verliert das einfallende Photon Energie und wird aus seiner ursprünglichen Richtung unter dem Streuwinkel ϑ abgelenkt. Das vorher ruhende Elektron nimmt dann zusätzlich kinetische Energie auf und verlässt den Kollisionort unter dem Winkel φ . Aus dem Energie- und Impulserhaltungssatz erhält man die Energie des gestreuten Photons als Funktion des Streuwinkels zu (s. Anhang):

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_0 c^2} (1 - \cos \vartheta)}$$

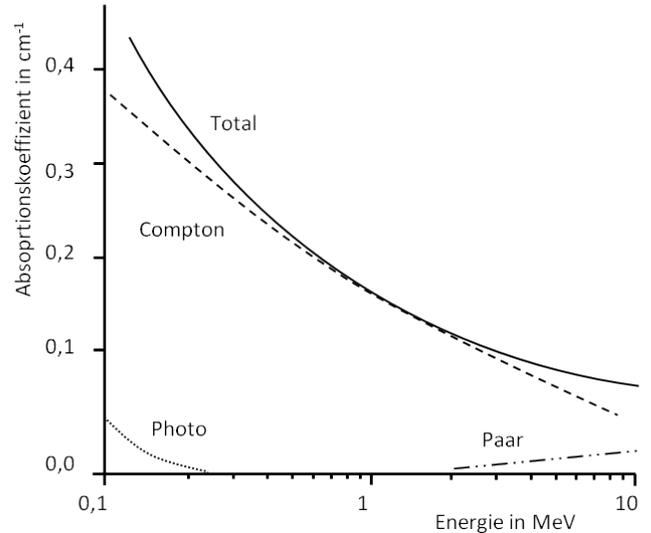


Abb. 9: Absorptionskoeffizient als Funktion der Energie bei Aluminium.

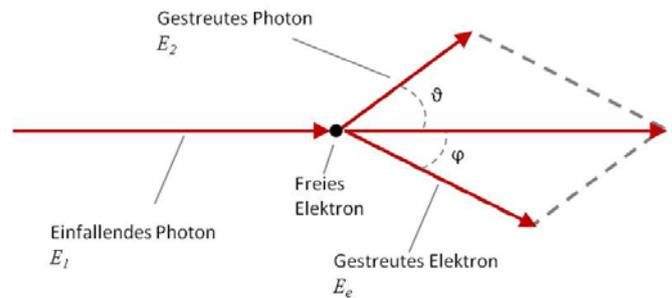


Abb. 10: Impuls- und Energiebeziehung beim Comptoneffekt

Photonenenergie vor bzw. nach dem Stoß	E_1 bzw. E_2
Streuwinkel	ϑ
Vakuumlichtgeschwindigkeit	$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Ruhemasse des Elektrons	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Das Photon hat nach dem Stoß eine geringere Energie E_2 und damit eine größere Wellenlänge λ_2 als vor dem Stoß. Mit $E = h\nu$ lässt sich (1) umformen in:

$$\frac{1}{h\nu_2} - \frac{1}{h\nu_1} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos \vartheta) \quad (2)$$

Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Photonenfrequenz	ν

Mit $\lambda = c/\nu$ folgt aus (2):

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \vartheta) \quad (3)$$

Die nur aus den drei Universalkomponenten bestehende Wellenlängendifferenz ergibt für 90° -Streuung die sog. Comptonwellenlänge λ_C für Elektronen.

$$\lambda_C = \frac{h}{m_0 c} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 2,998 \cdot 10^8} \frac{Js}{kg \cdot ms^{-1}} = 2,426 pm$$

Für die Sonderfälle der Vorwärts- bzw. Rückwärtsstreuung $\vartheta = 0^\circ$ bzw. $\vartheta = 180^\circ$ gilt jeweils für die Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda = 2\lambda_C$.

Auswertung

Aufgabe 1: Bestimmen Sie die Transmission eines Aluminiumabsorbers als Funktion des Bragg-Winkels und tragen Sie sie gegen die Wellenlänge der Strahlung grafisch auf.

Aus den Glanzwinkeln ϑ erhält man mit der Bragg-Beziehung die zugehörigen Wellenlängen λ .

$$2d \sin \vartheta = n\lambda \quad (1)$$

mit $d = 201,4 pm = \text{LiF-(200)-Netzebenenabstand}$ und hier: $n = 1$.

Für eine Integrationszeit Δt und eine Zählrate n ist die absolute Zählzahl $N = n \cdot \Delta t$.

Der relative Fehler von N ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Bei hohen Pulsraten ist überdies die Totzeit τ des Zählrohres zu berücksichtigen, da von diesem nicht alle einfallenden Photonen registriert werden. Sie beträgt ca. $90 \mu s$ für das verwendete GM-Zählrohr.

Die wahre Impulsrate n^* erhält man aus der gemessenen Impulsrate N mit:

$$n^* = \frac{n}{1 - \tau n} \quad (3)$$

Korrigieren Sie die gemessene Zählrate in einem Winkelbereich von $7,5^\circ < \vartheta < 9,5^\circ$ mit der Totzeit $\tau = 90 \mu s$ des Geiger-Müller Zählrohres. Mit den wahren Impulsraten wird nun die Transmissionskurve

$$T(\lambda) = \frac{n_2^*(\text{Mit Absorber})}{n_1^*(\text{ohne Absorber})}$$

bestimmt und als Funktion von λ eingezeichnet (s. Abb. 11).

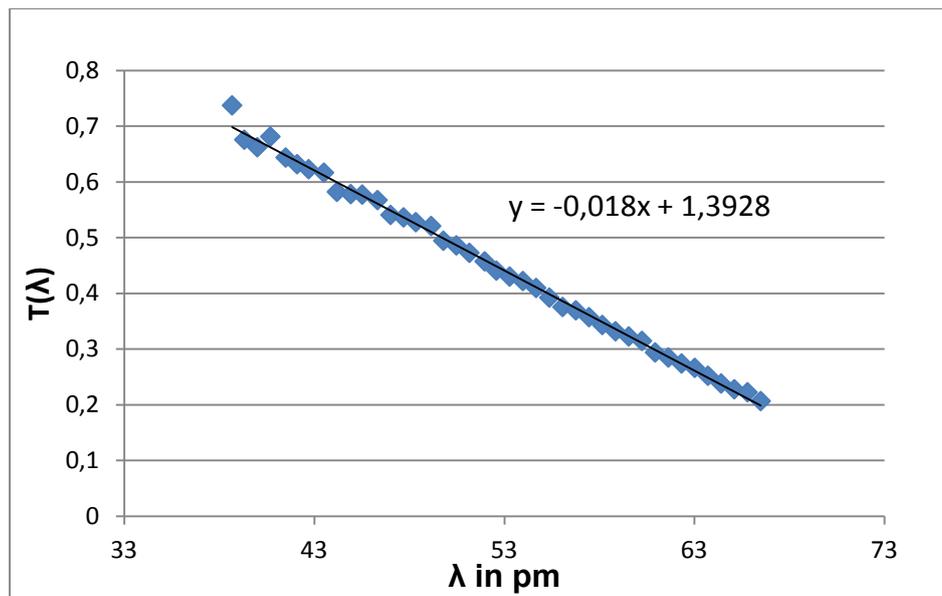


Abb. 11: Die Transmissionskurve für Aluminium in einem engen Wellenlängenbereich

Aufgaben 2 und 3: Messen Sie die Intensität der an einem Plexiglasblock unter 60°, 90° und 120° gestreuten Strahlung mit und ohne Absorber und bestimmen Sie aus der ermittelten Transmission mit Hilfe der Transmissionskurve die Compton-Wellenlänge des Elektrons.

Der Aluminiumabsorber wirkt in diesem Versuch als eine Art starker Farbfilter. Er absorbiert kürzere Wellenlängen weniger stark als längere. Wird er also vor den Streukörper positioniert, hat er eine andere Wirkung als in der langwelligeren gestreuten Strahlung hinter dem Streukörper. Deshalb lassen sich auf diese Weise die Wellenlänge der gestreuten und nicht gestreuten Strahlung ermitteln.

Indem Sie den Absorber in den Strahlengang zwischen die Röntgenröhre und den Streukörper bringen (Position 1, Abb. 7), bestimmen Sie zuerst die Transmission $T_1 = n_4/n_3$ der noch nicht gestreuten Röntgenstrahlung. Steht der Absorber in Position 2, erhält man die Transmission der gestreuten Röntgenstrahlung.

Da wir in Aufgabe 1 die Abhängigkeit der Transmission von Aluminium von der Wellenlänge ermittelt haben, können wir nun von der Transmission direkt auf die Wellenlänge der Röntgenstrahlung schließen, die den Absorber passiert. Aus den beiden unterschiedlichen, aus der 90°-Streuung erhaltenen Transmissionskoeffizienten ($T_1 > T_2$) erhält man so die entsprechenden Wellenlängen.

Beispielrechnung

Abb. 1 zeigt die Transmissionskurve für Aluminium in einem engen Wellenlängenbereich. Die zugehörige Geradengleichung hat die Formel

$$y = -0.018x + 1.3928$$

Die Ergebnisse von Aufgabe 2 sind in Tabelle 1 aufgelistet.

$$T_1 = \frac{N^*_4}{N^*_3} = \frac{39,0 \text{ Im p/s}}{96,7 \text{ Im p/s}} = 0,403 \pm 1,27\% ;$$

$$T_2 = \frac{N^*_5}{N^*_3} = \frac{35,3 \text{ Im p/s}}{96,7 \text{ Im p/s}} = 0,365 \pm 1,32\% ;$$

Die angezeigte Abweichung von $\pm 1,27$ bzw. $\pm 1,32$ % berechnet sich nach (2) und der folgenden Gleichung

chung (Achtung: hier wir die absolute Zählrate $N^* = n^* \cdot \Delta t$ eingefügt):

$$\Delta T_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\Delta N_4^*}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta N_3^*}}\right)^2}$$

Der Relative Fehler der hier berechnet wird, bezieht sich nur auf den statistischen Fehler. Systematische Fehler (siehe Hinweis) werden nicht berücksichtigt.

Aus der Geradengleichung der Ausgleichsgeraden aus Abbildung 12 ergeben sich die zugehörigen Wellenlängen zu 58,93 pm und 61,48 pm. Das ergibt eine Wellenlängendifferenz von $\Delta\lambda = \lambda_C = 2,56$ pm, die sehr nah am theoretischen Wert von $\lambda_C = 2.426$ pm liegt.

Tabelle 1 Beispielergebnisse

ϑ	n_3^*	n_4^*	n_5^*	T_1	T_2	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda$
60°	241,121	83,625	76,017	0,347	0,315	58,09	59,87	1,78
90°	178,833	59,315	51,235	0,332	0,286	58,93	61,48	2,56
120°	216,124	70,444	58,81	0,336	0,272	58,71	62,26	3,56

Es zeigt sich, dass mit kleiner werdendem Streuwinkel auch die Wellenlängendifferenz kleiner wird.

Hinweis

- Es entsteht ein systematischer Fehler, da:
 - o auch an der Aluminiumfolie Röntgenstrahlung gebeugt wird und so direkt in den Zähler gelangen kann
 - o die Röntgenstrahlung polychromatisch ist
 - o Die Geometrie des Streuers nicht sphärisch ist
- Der Fehler, der durch Fluoreszenz erzeugt wird kann vernachlässigt werden, da die Energie dieser Strahlung zu gering ist, um detektiert zu werden.