

Versuch A12 – Der COMPTON-Effekt		
Name:		Mitarbeiter:
Gruppennummer:	Betreuer:	Datum:

1. Aufgabenstellung

Untersuchen Sie die Winkelabhängigkeit der Energie der gestreuten RÖNTGENstrahlung infolge des COMPTON-Effektes

1.1. Themen zur Vorbereitung

- Eigenschaften von Röntgenstrahlung
- technische Erzeugung von Röntgenstrahlen
- Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte
- der COMPTON-Effekt
- Beschreibung der Versuchsanordnung

1.2. Messungen

- 1.2.1. Optimieren Sie die Signalstärke.
- 1.2.2. Kalibrieren Sie den Energiedetektor.
- 1.2.3. Messen Sie winkelabhängig (in den bei der Versuchsdurchführung angegebenen Schritten) die Energie der gestreuten Röntgenstrahlung.

1.3 Auswertungen

- 1.3.1 Fassen Sie die Messergebnisse in einer Tabelle zusammen.
- 1.3.2 Stellen Sie die Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ in Abhängigkeit vom Streuwinkel ϑ sowie von $(1-\cos\vartheta)$ dar.
- 1.3.3 Berechnen Sie aus den Messdaten die COMPTON-Wellenlänge λ_c .

1.4. Zusatzaufgabe

Bei welchem Streuwinkel ist die Verschiebung $\Delta\lambda$ maximal?

2. Grundlagen

2.1. Röntgenstrahlung

Bei der nach Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) bezeichneten elektromagnetischen Strahlung liegt die Photonenenergie E etwa im Bereich (1 - 120) keV. Es ergeben sich für diesen Bereich Vakuumwellenlängen von etwa (10 – 1000) pm.

Am langwelligen Ende dieses Spektralbereichs geht Röntgen- in die ultraviolette Strahlung über, am kurzwelligen in die Gammastrahlung. Die Bereichsgrenzen für die einzelnen Strahlungsarten sind jedoch nicht präzise festgelegt.

Röntgenstrahlen können z.B. technisch mit einer sogenannten Röntgenröhre erzeugt werden. Dies ist ein evakuierter Glaskolben, in den zwei Elektroden (Kathode und Anode) eingelassen sind (Abb. 1).

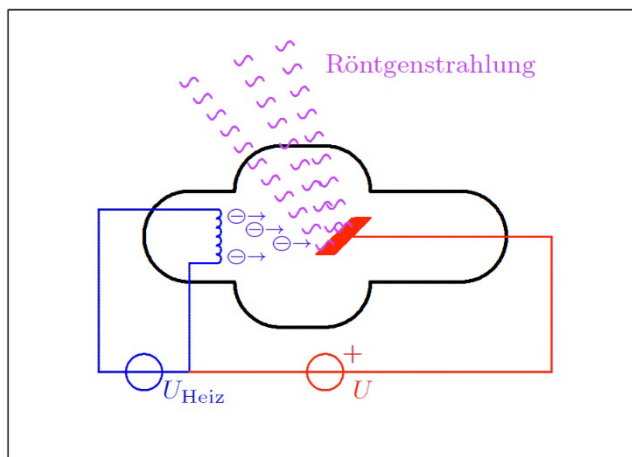


Abb. 1:

Schematische Abbildung einer Röntgenröhre. Die Kathode (blau) wird durch Anlegen einer Heizspannung auf eine Temperatur von ca. 2000 K erwärmt. Die Heizspannung ist klein bezüglich der Anodenspannung U . Auf die Anode (rot) treffen schnelle Elektronen. Die erzeugte Röntgenstrahlung setzt sich aus der Bremsstrahlung, charakteristischen Strahlung und Lilienfeldstrahlung zusammen.

Die Kathode besteht aus einer Glühwendel. Sie wird elektrisch geheizt, so dass Elektronen thermisch emittiert werden. Die Wendel wird damit in eine Elektronenwolke gehüllt, wodurch sich zwischen Wendel und Wolke ein elektrisches Raumladungsfeld aufbaut, welches zunächst der weiteren Elektronenemission entgegenwirkt.

Bei Anlegen einer positiven Anodenspannung U , der sog. Beschleunigungsspannung, werden Elektronen aus der Wolke zur Anode hin beschleunigt. Dies schwächt das Raumladungsfeld, so dass nun die Kathode weitere Elektronen emittieren kann. Dabei werden elektrische Hochspannungen U von bis zu 120 kV genutzt. Die Stärke des Anodenstroms wird durch die Anodenspannung und ab einem gewissen Sättigungswert durch die Heizspannung bestimmt.

An der Anode treffen die Elektronen mit der kinetischen Energie eU auf das Anodenmaterial und werden abgebremst, wodurch Röntgenstrahlung der maximalen Energie eU entsteht. Ein Teil der kinetischen Energie wird über die sogenannte Bremsstrahlung abgegeben. Hierbei wird das Elektron bei Annäherung an einen Atomkern durch dessen elektrisches Feld abgelenkt. Die (negative) Beschleunigung führt zur Emission von Bremsstrahlung. Ihre energetische Verteilung ist kontinuierlich, mit einem ausgeprägten Maximum, welches sich mit zunehmender Beschleunigungsspannung zu größeren Energien verschiebt.

Der Bremsstrahlung überlagert ist die sog. charakteristische Strahlung. Diese entsteht, sofern ein hochenergetisches Elektron ein Hüllenelektron aus dem Kraftfeld eines Anodenmaterialatoms entfernt. Die Fehlstelle wird von einem anderen Elektron desselben Atoms aber einer höheren Schale aufgefüllt. Die freiwerdende Energie wird in Form von (Röntgen-)Strahlung emittiert und entspricht der Differenz der Energieniveaus. Daher besitzt die charakteristische Strahlung eine materialspezifische diskrete Energieverteilung.

Im vorliegenden Experiment besteht die Anode aus Molybdän. Ihre charakteristische Strahlung wird für die Messungen zum Compton-Effekt verwendet. Zur Kalibrierung des Energiedetektors wird mindestens ein weiteres Signal bekannter Energie benötigt. Dafür wird die Röntgenfluoreszenzstrahlung von Gold genutzt, die im goldbeschichteten Gehäuse der Si-PIN-Photodiode des Röntgenenergiedetektors erzeugt wird.

Darüber hinaus gibt es die sog. Lilienfeldstrahlung, die beim Übergang von elektrisch geladenen Teilchen (hier Elektronen) durch die Grenzfläche zwischen Ausbreitungsmedien unterschiedlicher Dielektrizität entsteht.

2.2 Der Compton-Effekt

Im Jahr 1916 erweiterte EINSTEIN sein Konzept der Lichtquanten (Photonen), indem er jedem Lichtquant einen Impuls zuordnete. Ein Photon der Energie $E = h \cdot f$ hat demnach unter Berücksichtigung des Zusammenhangs $c = \lambda \cdot f$ einen Impuls vom Betrag:

$$p = m \cdot c = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

Aus Gl. 1 ist zu sehen, dass bei einer Wechselwirkung zwischen einem Photon und einem materiellen Teilchen Energie und Impuls übertragen werden kann.

Im Jahre 1923 führte A. COMPTON von der Washington University in St. Louis ein Experiment durch, welches einen überzeugenden Beweis für die korpuskulare Natur der elektromagnetischen Strahlung bei der Wechselwirkung mit stofflicher Materie und für die Gültigkeit von Energie- und Impulserhaltungssatz auch in der Mikrophysik lieferte. Bei diesem Experiment trafen Röntgenstrahlen der Wellenlänge λ auf eine Kohlenstoffprobe, wie in Abb. 2 dargestellt.

COMPTON ermittelte die Wellenlänge λ' und Intensität I der Röntgenstrahlen, die unter verschiedenen Winkeln ϑ von der Kohlenstoffprobe gestreut wurden.

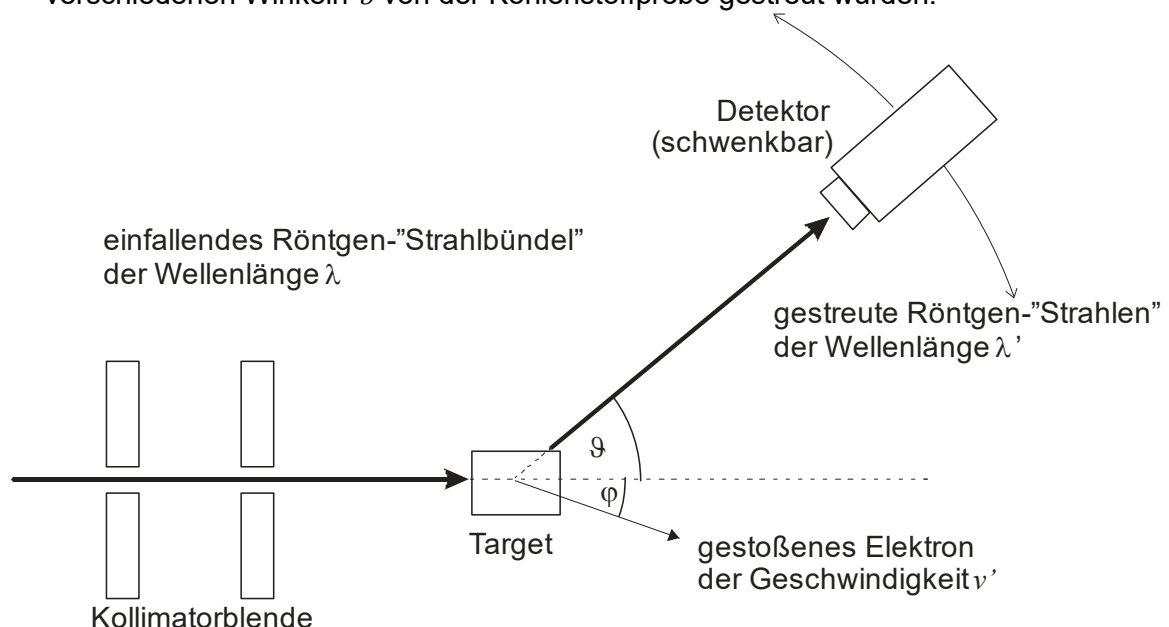


Abb. 2 Prinzipielle Anordnung.

Obwohl der einfallende Röntgenstrahl nur eine Wellenlänge λ enthält, traten bei den gestreuten Röntgenstrahlen zwei Intensitätsmaxima auf. Ein Maximum liegt bei der Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung (RAYLEIGH bzw. klassische oder kohärente Streuung), das zweite Maximum bei einer Wellenlänge λ' , die um eine Wellenlänge

gendifferenz $\Delta\lambda$ (die so genannte COMPTON-Verschiebung) länger ist (inkohärente Streuung) auf. Die mit dem Streuwinkel zunehmende Wellenlänge bedeutet einen Energie- und Impulsverlust der Röntgenstrahlung bei der Wechselwirkung mit dem Festkörper.

Diese Ergebnisse sind im Rahmen der klassischen Physik nicht zu verstehen. Danach handelt es sich bei dem einfallenden Röntgenstrahl um eine elektromagnetische Welle. Ein Elektron der Probe wird dann durch die oszillierende elektrische Kraft des elektrischen Feldes zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die Frequenz, mit der das Elektron schwingt, ist gleich der Anregungsfrequenz (kohärente Streuung) und das Elektron emittiert Strahlung mit *derselben* Frequenz (Hertzscher Dipol). Die gestreuten Röntgenstrahlen sollten also dieselbe Frequenz und damit auch dieselbe Wellenlänge wie die einfallende Strahlung haben. Das ist aber nicht der Fall. Einzig die Intensität der einfallenden Strahlung könnte abnehmen.

COMPTON interpretierte die Streuung von Röntgenstrahlen an den Elektronen des Kohlenstoffs als Energie- und Impulsübertrag (vermittelt durch Photonen) zwischen dem einfallenden Röntgenstrahl und den als – im Vergleich zur Energie der Röntgenstrahlung - frei angenommenen Elektronen im Kohlenstoff, als handle es sich um Teilchen.

Um das Problem zu lösen, nimmt man an, ein einzelnes (Röntgen-) Photon der Energie $E = hf$ sei an der Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Röntgenstrahl und dem als ruhend angenommenen Elektron beteiligt. Durch den Stoß wird sich die Ausbreitungsrichtung des Röntgenstrahls ändern (der Röntgenstrahl wird gestreut) und das Elektron erleidet einen Rückstoß. Dem Elektron wird also ein gewisser Betrag an kinetischer Energie übertragen. Bei diesem Prozess gilt der Energieerhaltungssatz. Die Energie des gestreuten Photons ($E' = hf'$) muss daher kleiner als die des einfallenden Photons sein. Daher haben die gestreuten Röntgenstrahlen eine kleinere Frequenz f' und damit eine größere Wellenlänge λ' als die einfallenden Röntgenstrahlen. Das zeigen die experimentellen Ergebnisse von Compton.

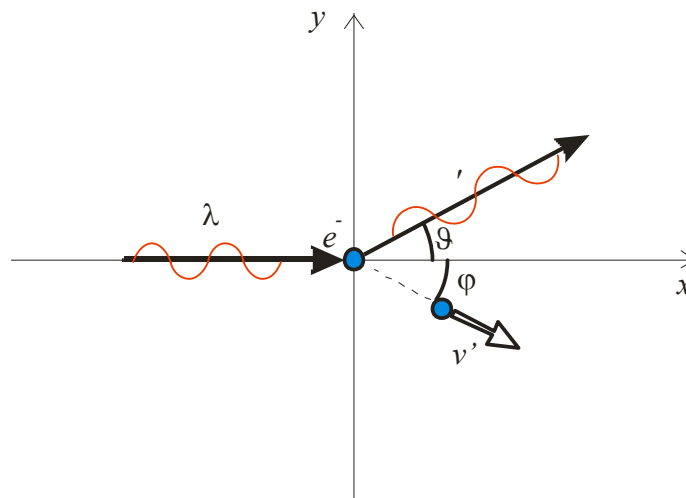


Abb. 3 Verhältnisse vor und nach dem Stoß.

Für die quantitative Behandlung dieses Prozesses wenden wir den Energieerhaltungssatz und Impulserhaltungssatz an. Abbildung 3 zeigt einen „Zusammenstoß“ zwischen einem Röntgenstrahl und einem zunächst ruhenden, freien Elektron im Target.

Nach dem Stoß bewegt sich ein Röntgenquant mit der Wellenlänge λ' in die durch den Winkel ϑ gekennzeichnete Richtung und das Elektron bewegt sich in die Richtung φ mit der Geschwindigkeit v' .

Die Energieerhaltung besagt:

$$hf + E_{e0} = hf' + E'_e \quad (2)$$

wobei hf die Energie des einfallenden Röntgenphotons, hf' die Energie des gestreuten Röntgenphotons, E_{e0} die Ruheenergie des Elektrons und E_e' die kinetische Energie des zurückgestoßenen Elektrons sind (wie in der Mechanik vereinbaren wir, dass die gestrichenen Größen für die Verhältnisse nach dem Stoß gelten). Da der Rückstoß des Elektrons mit nahezu Lichtgeschwindigkeit erfolgen kann, muss man die kinetische Energie des Elektrons nach dem Stoß relativistisch behandeln.

$$hf + m_{e0}c^2 = hf' + E_e' \quad (3)$$

Zwischen Energie und Impuls eines relativistischen Teilchens gilt

$$E_e^2 = m_{e0}^2 c^4 + p_e^2 c^2 \quad (4)$$

Da das Elektron diese Energie nach dem Stoß besitzt, schreiben wir

$$E_e'^2 - p_e'^2 c^2 = m_{e0}^2 c^4 \quad (5)$$

Gleichung (3) wird nach E_e' umgestellt und das Ergebnis in Gleichung (5) eingesetzt:

$$(hf + m_{e0}c^2 - hf')^2 - p_e'^2 c^2 = m_{e0}^2 c^4 \quad (6)$$

Dass der Impuls ein Vektor ist, wird in Abb. 4 berücksichtigt. Nach dem Cosinus-Satz gilt für den Betrag des Impulses vom Elektron nach dem Stoß

$$p_e'^2 = p_{ph}^2 + p_{ph}'^2 - 2p_{ph} \cdot p_{ph}' \cos \vartheta \quad (7)$$

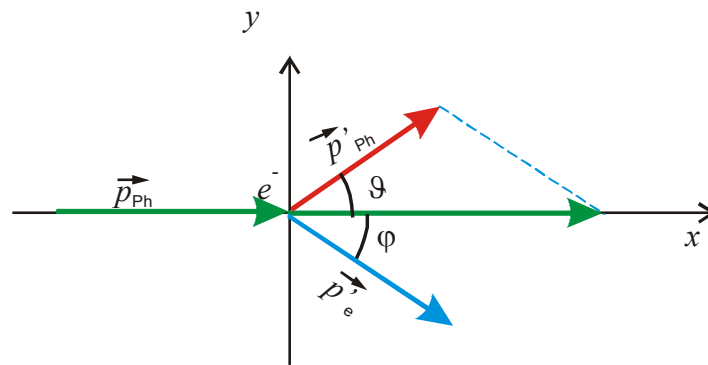


Abb. 4 Impulsdarstellung.

Der Term für p_e' wird in Gleichung (6) eingesetzt, da uns nur die Beträge des gestreuten Röntgenphotons interessieren.

$$(hf + m_{e0}c^2 - hf')^2 - c^2(p_{ph}^2 + p_{ph}'^2 - 2p_{ph} \cdot p_{ph}' \cos \vartheta) = m_{e0}^2 c^4 \quad (8)$$

Rechnet man die Klammern aus und berücksichtigt die Gleichung (1), erhält man

$$f m_{e0} c^2 - f' m_{e0} c^2 - hf f' - hf f' \cos \vartheta = 0 \quad (9)$$

Weitere Umformungen ergeben:

$$\frac{f - f'}{f f'} = \frac{h}{m_{e0} c^2} (1 - \cos \vartheta) \quad (10)$$

oder mit der Wellenlänge formuliert:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_{e0} c} (1 - \cos \vartheta) \quad (11)$$

Dieses Resultat stimmt mit den Messergebnissen von COMPTON überein. Die Verschiebung der Wellenlänge $\Delta \lambda$ ist nur vom Streuwinkel abhängig. Sie ist aber nur bei kleinen Wellenlängen und Stoßpartnern kleiner Masse nachweisbar.

Bei einem Winkel von 90° beträgt die Wellenlängenänderung $\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} = 2,4 \text{ pm}$ und

wird COMPTON-Wellenlänge λ_c genannt.

Da die Röntgen-Photonen nicht nur an den äußeren, schwach gebundenen Elektronen gestreut werden, sondern auch an fest gebundenen und damit am Atom, wird neben der geringeren Wellenlänge auch die Wellenlänge der einfallenden Röntgen-Photonen nachweisbar sein, da diese Stöße (fast) elastisch verlaufen.

3. Experiment

3.1. Versuchsanordnung

Für die Untersuchung des Compton-Effekts wird ein Röntgengerät der Firma Leybold genutzt. Dieses enthält neben einem Bedienfeld und der Röntgenröhre einen Experimentierraum (Abb. 5). Über einen Kollimator (Abb. 5 (a)) werden die Röntgenstrahlen in den Experimentierraum und auf ein Target (Abb. 5 (b)) geleitet. Dieses befindet sich auf einem Targettisch (Abb. 5 (c)), welcher rotiert werden kann. Zudem ist ein rotierbarer Röntgenenergiedetektor (Abb. 5 (d)) verbaut.

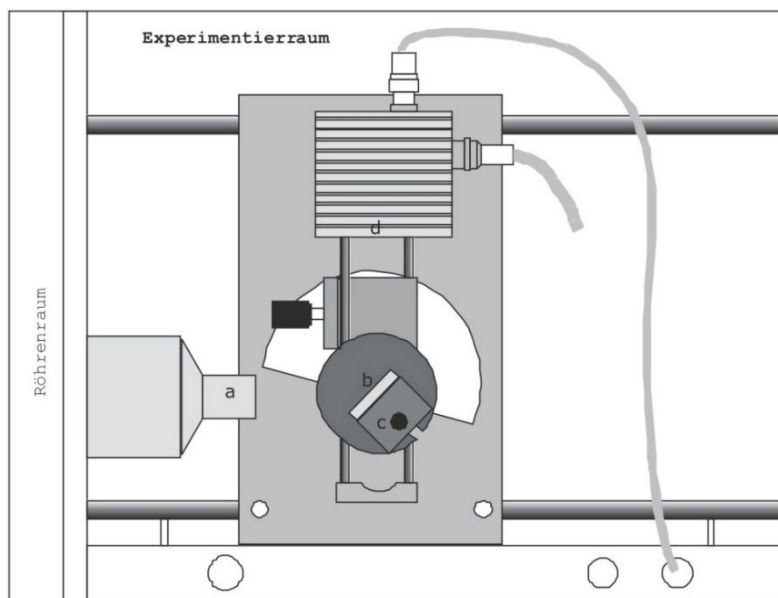


Abb. 5:

Aufbau des Experiments

a – Lochkollimator

b – Target

c – Targettisch

d – Detektor

Bei Inbetriebnahme des Röntgengerätes wird automatisch die Kühlung des Energiedetektors gestartet, um dessen Rauschen herabzusetzen. Die Einsatzbereitschaft ist gegeben, wenn am Detektorgehäuse eine grüne LED leuchtet. Zudem führt das Gerät einen Selbsttest aus und Targettisch und Detektor stellen sich auf einen Winkel von 0° zueinander ein. Die Experimente können nur gestartet werden, wenn die Bleiglastüren des Röhren- und Experimentierraumes geschlossen sind.

Zur Auswertung der Messdaten zum Versuch wird die Software „Cassy Lab 2“ verwendet. Für die energieabhängige Darstellung des Röntgenspektrums muss zunächst den Kanalnummern des Vielkanalanalysators eine Energie zugeordnet werden. Dafür wird der primäre aber abgeschwächte Röntgenstrahl ohne eingebautes Target auf den Detektor geleitet ($\vartheta=0^\circ$). Für die Untersuchung des Compton-Effekts wird anschließend der Winkel zwischen dem Target und dem Detektor variiert. Da der Detektor vom Primärstrahl nur bei $\vartheta=0^\circ$ getroffen wird, ist bei allen anderen Messungen nur das gestreute Spektrum im Diagramm zu sehen.

3.2. Hinweise zur Versuchsvorbereitung

Im ersten Teil des Experiments wird mit der Energieverteilung des Primärspektrums die Kalibrierung der Kanäle vorgenommen und das Maximum der Energie bestimmt. Dazu muss die Targethalterung ausgebaut werden, um den Primärstrahl direkt auf den Detektor zu leiten. Drücken Sie den Öffnungsknopf am unteren Fensterrand, um die Bleiglastür zur Seite zu schieben. Dann wird die gerändelte Überwurfmutter hinter dem eigentlichen Targettisch (vgl. Abb. 5) gelöst und die Halterung herausgezogen.

Danach wird der Lochkollimator des Röntgengerätes ausgebaut indem er in Richtung des Experimentierraums gezogen wird (Achtung, schwergängig) und die Abschwächerblende aufgesetzt (vgl. Abb. 6). Achten Sie auf die Markierungen an den Teilen. Auf dem Kollimator befindet sich zur Monochromatisierung des Röntgenstrahls immer ein Zirkoniumfilter (für das Bremskontinuum der Molybdänanode hat Zirkonium einen großen atomaren Schwächungskoeffizienten). Die beiden Teile werden so zusammengesteckt, dass die Markierungen übereinstimmen. Danach wird das System wieder in seine Halterung im Experimentierraum eingesetzt (Markierung beachten).

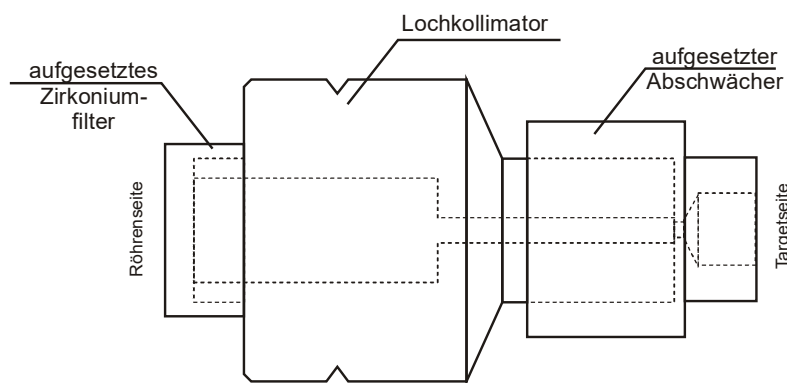


Abb. 6 Blendensystem.

Am Bedienfeld (Vgl. Abb. 11 im Anhang) wird die Röntgenspannung von 35 kV und der Anodenstrom auf 0,02 mA eingestellt. Drücken Sie dazu die Taste „U“ bzw. „I“ und variieren Sie den angezeigten Wert mittels Dreheinsteller. Da das System aus Kollimator und Abschwächerblende nur noch einen dünnen Röntgenstrahl hindurch lässt, muss der Winkel $\vartheta = 0^\circ$ sehr sorgfältig einjustiert werden. Drücken Sie am Bedienfeld des Röntgengerätes die Taste „Sensor“ und stellen Sie mit dem Dreheinsteller einen Winkel von $0,6^\circ$ ein. Inzwischen müsste der Energiedetektor seine Betriebstemperatur erreicht haben, erkennbar am Leuchten der grünen LED an seiner Gehäusesseite.

3.3. Softwareeinstellungen

Die Software „Cassy Lab 2“ ist über den Desktop des bereitgestellten Rechners zu öffnen. Anschließend wählen Sie im angezeigten Dialogfeld die obere linke Box und damit den Vielkanalanalysator als Dateneingang aus und schließen dieses Fenster (Abb. 7) sowie das Überwachungsfenster zur Spannung am Cassysensor A.

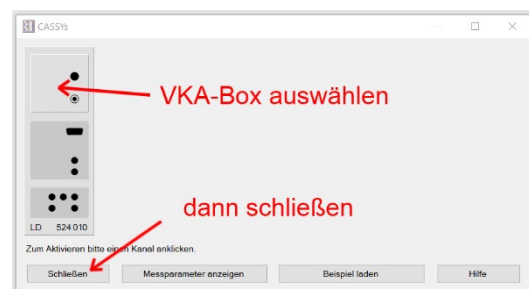


Abb. 7: Auswahl des Vielkanalanalysators.

Nach der Auswahl des Dateneingangs sind am rechten Bildrand im Menübereich „Ereignisse N_A “ die Standardeinstellungen der Messparameter auszuwählen. Diese beinhalten:

1. die Messung über 512 Kanäle
2. die Aktivierung der Verstärkung negativer Pulse (Häkchen setzen) mit dem (Verstärkungs)Faktor -3,00
3. die Messdauer von 100 s

3.4. Signalsoptimierung

Schalten Sie am Bedienfeld die Hochspannung ein (Taste „HV on“). Danach wird mit der Taste F9 am Computer die Messung begonnen. Im Menübereich „Ereignisse N_A “ im rechten Teil des Bildschirmfensters finden Sie die Impulse / Zeit. Die Zählrate sollte in der Größenordnung $n/t = 50/1s$ liegen.

Mit der Taste „Sensor“ am Bedienfeld kann nun der Strahlenverlauf Kollimator – Abschwächerblende – Eingangsfenster des Energiedetektors optimiert werden. Mit dem Dreheinsteller wird von $0,6^\circ$ ausgehend in $0,1^\circ$ -Schritten der Winkel geändert um festzustellen, ob sich die Zählrate noch erhöhen lässt. Das gefundene Maximum des Winkels wird als $\vartheta = 0^\circ$ definiert.

Nach erfolgreicher Signalsoptimierung schalten Sie die Hochspannung aus. Löschen Sie die Messung mit der Taste „F4“ und ändern Sie im Menübereich „Ereignisse N_A “ auf der rechten Seite die Messdauer auf 300 s. Nach Zuschalten der Hochspannung wird die Messung zur Aufnahme des primären Röntgenspektrums begonnen, welches für die Energiekalibrierung genutzt wird.

3.5 Energiekalibrierung

Das aufgenommene Spektrum sollte dem der Abb. 8 (links) ähnlich sein. Es sind mehrere Peaks zu erkennen. Ein Peak ist eine „Spitze“ die im Spektrum liegt und hier dem energetischen Übergang einer Atomsorte zugeordnet werden kann.

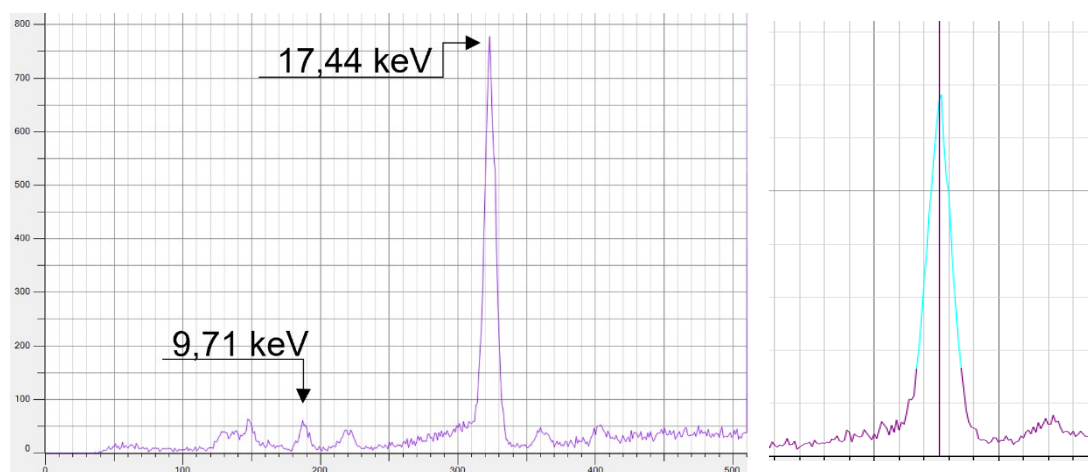


Abb. 8: Kalibrierspektrum (links) und Auswahl des Peakbereiches für eine Peak schwerpunktsberechnung (rechts).

Erkennbar ist die hohe Spitze der charakteristischen Strahlung mit einer Energie von 17,44 keV der Molybdän-Anode. Links daneben sind zwei kleine Maxima der L-Linien von Gold erkennbar (9,71 keV und 11,44 keV). Sie stammen aus dem Material der Diode, die als Energiedetektor fungiert.

Der Detektor des Messgeräts bestimmt die Energie einfallender Röntgenphotonen und sortiert sie entsprechend in einen der 512 Kanäle der horizontalen Achse ein. Es kann also ein Energiespektrum gemessen werden: Photonenenergie auf der horizontalen Achse, Anzahl der mit dieser Energie gezählten Photonen auf der vertikalen Achse. Für eine genaue Bestimmung der den Kanälen zugeordneten Energien muss eine Kalibrierung mit zwei bekannten Paaren aus Kanalnummer und Energie durchgeführt werden.

Nutzen Sie einen Rechtsklick in das Spektrum und wählen Sie den Menüpunkt „Peakschwerpunkt berechnen“. Wählen Sie anschließend den gewünschten Peak aus, indem Sie mit gedrückter linker Maustaste über den Peak ziehen. Der ausgewählte Bereich sollte etwa die oberen zwei Drittel des Peaks umfassen um systematische Abweichungen zu minimieren (Abb. 8, rechts). Das Hereinzoomen in das Spektrum erleichtert die Auswahl des Peakbereiches (Rechtsklick in das Spektrum ermöglicht die Auswahl „Zoom“).

Die Kanalnummer des Peakschwerpunktes wird Ihnen am unteren linken Bildrand angezeigt. Tragen Sie diese Werte (inklusive Nachkommazahl) mit den dazugehörigen keV-Energien in den Abschnitt Energiekalibrierung der Messparameter am rechten Bildrand ein (Abb. 9). Falls dieser Abschnitt nicht angezeigt wird, klicken Sie auf „Ereignisse N_A “ im oberen rechten Teil. Wiederholen Sie die Peakschwerpunktsbestimmung für den zweiten Peak.

Abb. 9: Kalibrierung der Energieskala.

Abb. 10: Änderung der Achsenbelegung.

Die horizontale Achse ist nun von Kanalnummern auf Photonenenergien kalibriert worden. Um die Energie als Achsenbeschriftung anzuzeigen, rechtsklicken Sie erneut im Spektrum und wählen „Achsenbelegung ändern“ aus, um sich die Messwerte als Funktion der Energie anzeigen zu lassen (Abb. 10).

3.5. Hinweise zur Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung des Comptoneffektes wird im Weiteren ausschließlich der dominante Molybdänpeak des Spektrums betrachtet. Den Energiewert für $\vartheta = 0^\circ$ ist Ihnen mit 17,44 keV bereits vorgegeben. Für die Messungen an anderen Winkeln öffnen Sie bei abgeschalteter Hochspannung den Experimentierraum, bauen Sie den Kollimator aus um den Abschwächer nach vorne abzuziehen. Der Lochkollimator wird ebenso wie der Targettisch (waagrecht) wieder eingesetzt und der durchsichtige Kunststoffkörper auf den Targettisch gelegt. Nach dem Schließen der Tür stellen Sie den Röhrenstrom auf 1 mA und den Targetwinkel auf 20° . Der Sensorwinkel wird vorsichtig auf $\vartheta = 145^\circ$ gestellt (beachten Sie in der Auswertung die gemessene Nullpunktkorrektur). Achten Sie darauf, dass sich die Anschlusskabel im Experimentierraum frei bewegen können. Mit der Taste F4 wird die alte Messung gelöscht. Nutzen Sie auch für die weiteren Messungen eine Messzeit von 300 Sekunden. Vergrößern Sie nach jeder Messung zur genaueren Bestimmung der Peakenergie den relevanten Teil des Spektrums und bestimmen Sie den Peakschwerpunkt. Notieren Sie den Energiewert und dessen Unsicherheit zu diesem Winkel.

Als weitere Winkel werden zur Messung $\vartheta = 130^\circ, 110^\circ, 90^\circ, 70^\circ, 50^\circ$ und 30° gewählt. Wegen der Übersichtlichkeit in der Darstellung sollten vor jeder neuen Messung die alten Messreihen mit F4 gelöscht werden.

4. Literatur

- [1] – LD Didactic GmbH; Röntgengerät, eine Anleitung; Hürth oder
[2] – www.ld-didactic.de/service unter „Experimente“ und „Handblätter Physik - Sekundarstufe 2 und Hochschulpraktikum“ im Abschnitt 6.3.7
[3] – Eichler, Kronfeldt, Sahm; Das neue Physikalische Grundpraktikum; Springer Verlag Berlin Heidelberg 2006, Abschn. 48

5. Anhang



Abb. 11: Erläuterungen zum Bedienfeld des Gerätes.