

Fortgeschrittenenpraktikum 2



Experimente der Atom- und Quantenphysik mit Röntgenstrahlung

Compton-Effekt: Messung der Energie der
gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom
Streuwinkel

Georg Koller

UNIVERSITÄT GRAZ
UNIVERSITY OF GRAZ



Inhaltsverzeichnis

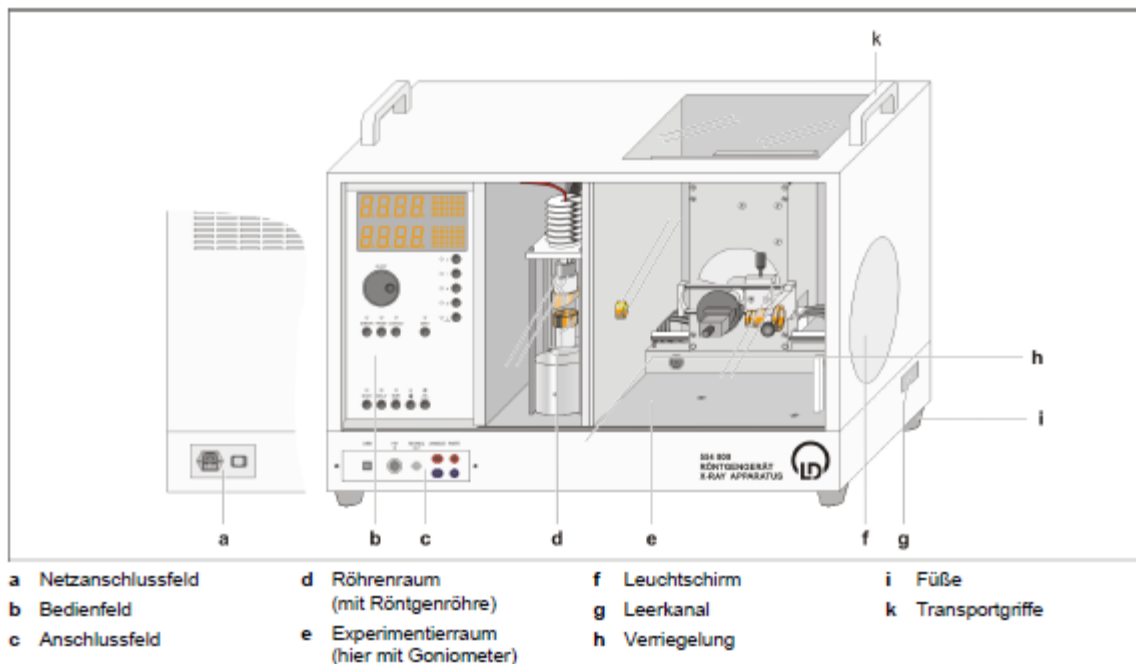
1.	Generelle Informationen zum Röntgengerät	3
1.1.	Angestrebte Lernziele.....	7
1.2.	Notwendige Vorkenntnisse	7
1.3.	Wichtige Informationen zu Hardware und Software	7
1.4.	Empfohlene Literatur	7
2.	Versuch zum Comptoneffekt.....	8
3.	Beschreibungen der Gerätschaften.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.	Hinweise zu Ihrer Sicherheit und zum Umgang mit den Gerätschaften	13
5.	Kontrollfragen.....	14
6.	Informationen zu Auswertung und Bericht	14

1. Generelle Informationen zum Röntgengerät

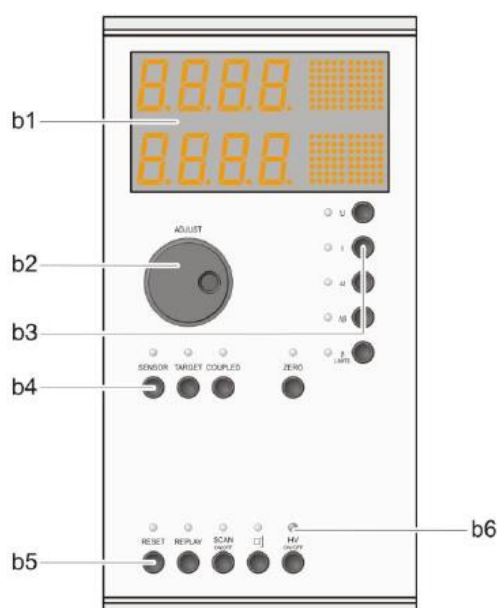
Die folgenden Experimente werden an einem Röntgengerät der Fa. Leybold Didaktik durchgeführt. Das Röntgengerät (Mo-Anode) ist ein mikroprozessorgesteuertes Komplettgerät, welches Experimente von der Atomphysik bis hin zur Festkörperphysik ermöglicht. Zur Erstellung des Skriptums wurden die Leybold Didaktik Versuchsunterlagen P 554801, P 6372, P 55483d

Allgemeine Gerätebeschreibung:

Das Gerät besteht aus drei Bereichen: dem Bedienfeld (b), dem Röhrenraum (d) und dem Experimentierraum (e).



Bedienfeld (b): Bedienung erfolgt über mehrere Taster (Auswahl) und einem Drehschalter (Werteeinstellung)



b1 Anzeigefeld

b2 Drehschalter zur Werteeinstellung

b3 Taster zur Wahl der Parameter

U...Röhrenhochspannung 0...35 kV

I...Röhrenemissionsstrom 0...1 mA

Δt ...Messzeit pro Winkelschritt

$\Delta \beta$...Winkelschrittweite Goniometer

b4 Taster zur Wahl des Scan-Modus

Sensor...Sensorarm kann automat. Oder manuell bewegt werden

Target... Targetarm kann automat. Oder manuell bewegt werden

Coupled... Sensor- und Targetarm werden automat. oder manuell im Verhältnis 2:1 bewegt.

Zero...Bewegt Sensor- und Targetarm in die messtechnische Nullposition

b5 Befehls-Taster

Reset... Bewegt Sensor- und Targetarm in die messtechnische Nullposition und alle Parameter auf Werkseinstellung. Hv = off

Replay...aktiviert Auslesen des Messwertespeichers

Scan on/off...testet Sicherheitskreise (Türen geschlossen?) und startet Messung

Lautsprecher...schaltet akkustische Impulsanzeige für den Sensor ein und aus.

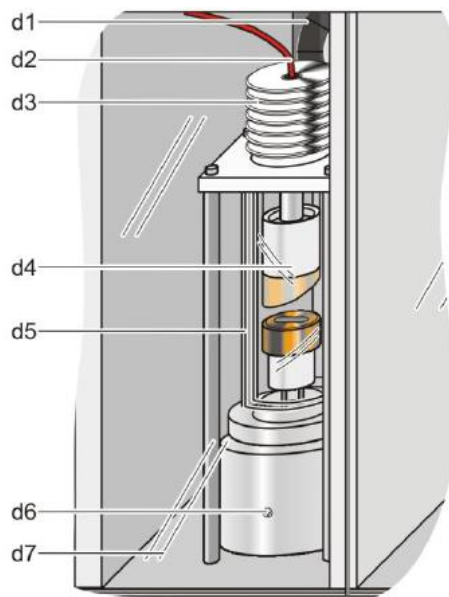
HV on/off... testet Sicherheitskreise (Türen geschlossen?) und schaltet Hochspannung ein

b6 Hochspannungs-Kontrollleuchte

blinkt bei eingeschalteter Röhren-Hochspannung

Röhrenraum(d): Beinhaltet Mo-Anode zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

Der Röhrenraum dient zur Aufnahme der Röntgenröhre und als Abschirmeinrichtung für die Röntgenröhre.



d1 Lüfter

d2 Hochspannungskabel

d3 Kühlkörper

d4 Röntgenröhre

d5 Bleiglas-Rohr

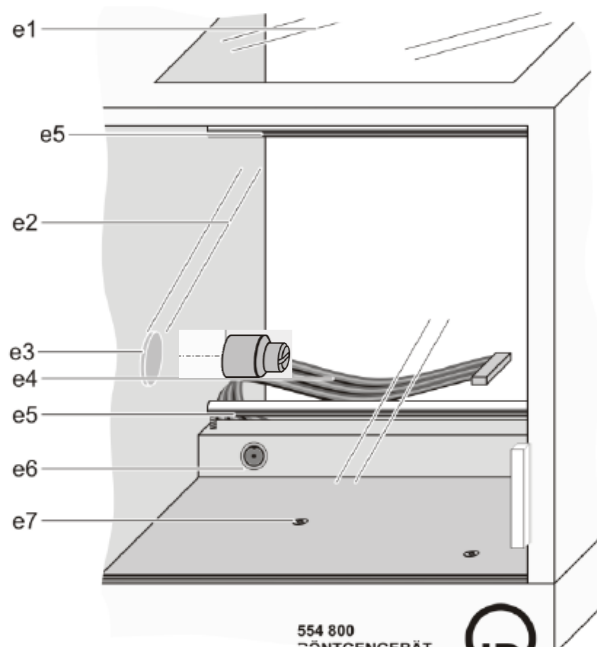
d6 Röhrenfassung mit Befestigungsschraube

d7 Bleiglas-Schiebetür

Tür zum Röhrenraum stets geschlossen halten. Bei Problemen mit der Erzeugung von Röntgenstrahlung ist der Betreuer zu verständigen.

Experimentierraum (e):

Der Experimentierraum dient zur Aufnahme der Experimentiereinrichtungen, wie z.B. des Goniometers, Detektor, etc.



e1 Bleiglas-Fenster

e2 Bleiglas-Schiebetür

e3 Kollimator mit -aufnahme

e4 Flachkabel, mit Pfofenstecker

e5 Führungsschienen

e6 Anschlussleiste

e7 Haltebuchsen

Allgemeines zu Bedienung und Inbetriebnahme

Inbetriebnahme: Im Folgenden eine Kurzbeschreibung zur Inbetriebnahme des Röntgengerätes. Spezifische Details erfolgen in der jeweiligen Versuchsbeschreibung.

a) Inbetriebnahme des Röntgengerätes:

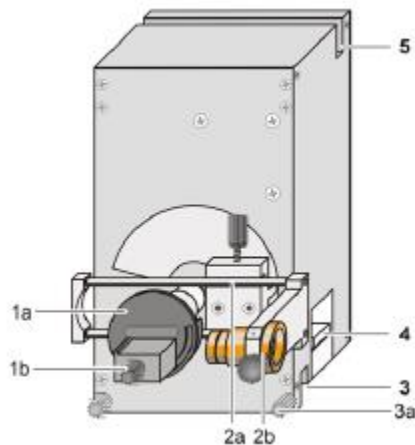
- Netzanschluss herstellen und Röntgengerät einschalten.
- Taster U drücken.
 - Mit Drehschalter z.B. $U = 30 \text{ kV}$ einstellen.
 - Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Taster I drücken.
 - Mit Drehschalter z.B. $I = 1,00 \text{ mA}$ einstellen.
 - Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Kontrollieren, ob die Bleiglas-Schiebetüren ordnungsgemäß verschlossen sind, und Taster HV ON/OFF drücken.
 - Die Hochspannungs-Kontrollleuchte blinkt und die Glühkathode der Röntgenröhre leuchtet. Es wird Röntgenstrahlung erzeugt.
- Taster I drücken und mit Drehschalter den Emissionsstrom I variieren.
 - Die Helligkeit der Glühkathode ändert sich.

b) Messparameter wählen:

- Taster U, I, Δt , $\Delta \beta$ oder Δ LIMITS drücken.
- Mit Drehschalter gewünschten Wert einstellen.
- Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Beliebigen Taster drücken.
- Die Parameterwahl ist abgeschlossen.

c) Goniometerarme manuell (nicht computergesteuert!) positionieren:

Goniometer niemals von Hand zu bewegen versuchen!



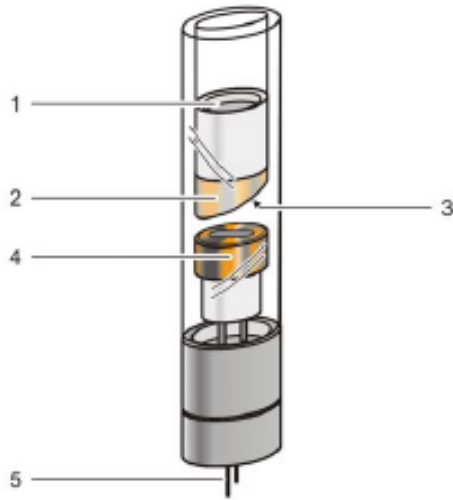
- 1 Targetarm
mit Targethalter (1a), Targettisch (1b)
- 2 Sensorarm
mit Sensorhalter (2a), Sensoraufnahme (2b)
- 3 untere Führungsnut
mit Rändelschrauben (3a)
- 4 Pfostenbuchse
- 5 obere Führungsnut

**Das Goniometer wird ausschließlich über elektrische Schrittmotoren verstellt:
Targetarm und Sensorarm des Goniometers nicht blockieren und nicht mit Gewalt
verstellen.**

- Mit Taster Zero „Nullposition“ anfahren
- Taster SENSOR bzw. TARGET drücken.
 - Mit dem Drehschalter ADJUST gewünschten Winkel einstellen.
- Im Anzeigefeld wird der Sollwert dargestellt, der Sensor- bzw. Targetarm bewegt sich zur gewünschten Winkelposition.

Die Molybden (Mo) Röntgenröhre:

Die Röntgenröhre Mo ist eine direkt geheizte Glühkathoden-Röhre. Ihre Molybdän-Anode ist zur Ableitung der Wärme in einen Kupferblock eingelagert.



1 Schraubgewinde, für Kühlkörper

2 Kupferblock

3 Molybdän-Anode

4 Glühkathode

5 Stiftsockel

Technische Daten:

Anodenmaterial: Molybdän

$K\alpha = 17,4 \text{ keV (71,1 pm)}$,

$K\beta = 19,6 \text{ keV (63,1 pm)}$

max. Anodenspannung: 35 kV

max. Emissionsstrom: 1 mA

Größe des Brennflecks: ca. 2 mm^2

1.1. Angestrebte Lernziele

1.2. Notwendige Vorkenntnisse

1.3. Wichtige Informationen zu Hardware und Software

1.4. Empfohlene Literatur

- Wolfgang Demtröder, „Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper“, 2016, Springer, ISBN 978-3-642-03911-9 (eBook)

2. Versuch zum Comptoneffekt

2.1. Grundlagen

Dieser Versuch zeigt besonders schön den korpuskularen Charakter des Licht (Photonen), wofür *Arthur Holly Compton* 1927 auch den Nobelpreis erhielt. Er fand (1892–1962) 1922 folgendes Phänomen: Bestrahlt man beliebiges Material mit Röntgenstrahlung der Wellenlänge λ_0 , so findet man in der Streustrahlung außer der erwarteten Wellenlänge λ_0 auch Anteile mit größerer Wellenlänge $\lambda_s > \lambda_0$. Dies kann als Stoßvorgang zwischen dem Röntgen-Quant und einem freien Elektron der streuenden Materie erklärt werden. Dabei wird Energie vom Quant auf das Elektron übertragen.

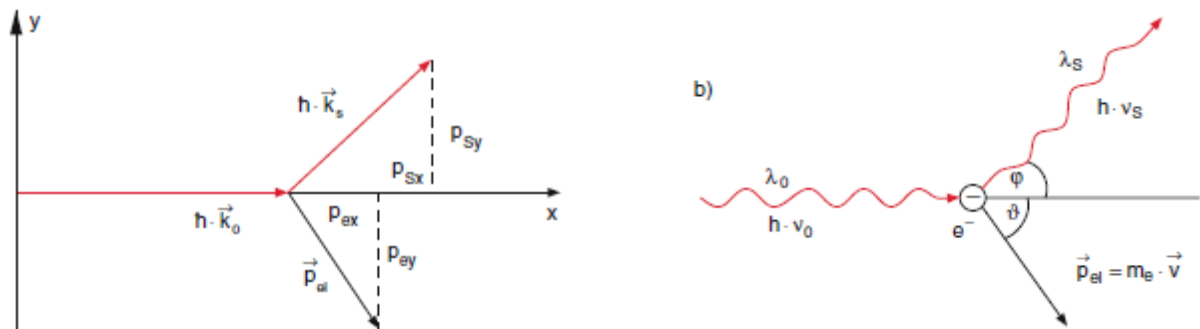


Abb. 2.1: (a) Schematische Darstellung des Comptoneffekts. (b) Darstellung des Impulsübertrages.[1]

Im Folgenden betrachten wir das Elektron als vor dem Stoß ruhend und im Streumaterial nur schwach gebunden, wodurch wir die Bindungsenergie vernachlässigen können. Beim Stoßvorgang

$$h\nu_0 + e^- \rightarrow h\nu_s + e^-(E_{kin})$$

bleiben Energie und Impuls erhalten. Für Energie und Impuls des Photons gilt:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k} \quad \text{und} \quad |p| = \frac{h}{\lambda}, \quad \text{mit}$$

- h ... Plancksches Wirkungsquantum
- c ... Lichtgeschwindigkeit
- λ ... Wellenlänge der Röntgenstrahlung
- ν ... Frequenz der Röntgenstrahlung
- E ... Energie der Röntgenstrahlung
- p ... Impuls der Röntgenstrahlung

In relativistischer Betrachtung lautet der Energiesatz somit:

$$E_{kin}^e = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2, \quad \text{mit } \beta = \frac{v}{c}$$

Für den Impuls folgt:

$$\hbar\vec{k}_0 = \hbar\vec{k}_s + \vec{p}_e \quad \text{mit} \quad \vec{p}_e = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Daraus folgt:

$$\nu_0 - \nu_s = \frac{h}{m_0 c^2} \nu_0 \nu_s (1 - \cos\varphi)$$

Und die Compton-Streuformel:

$$\lambda_S - \lambda_0 = 2\lambda_C \sin^2 \varphi / 2 \quad \text{mit} \quad \lambda_C = \frac{h}{m_0 c} = 2,4262 \cdot 10^{-12} \text{m}$$

λ_C wird Compton-Wellenlänge des Elektrons genannt.

In unserem Versuch messen wir die Energien der gestreuten Strahlung. Die dahingehend umgeformte Formel lautet:

$$E_S = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)}$$

E_S ...Energie der gestreuten Strahlung

E_0 ...Primärenergie

Ref.: [1] Wolfgang Demtröder, „Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper“, 2016, Springer, ISBN 978-3-642-03911-9 (eBook)

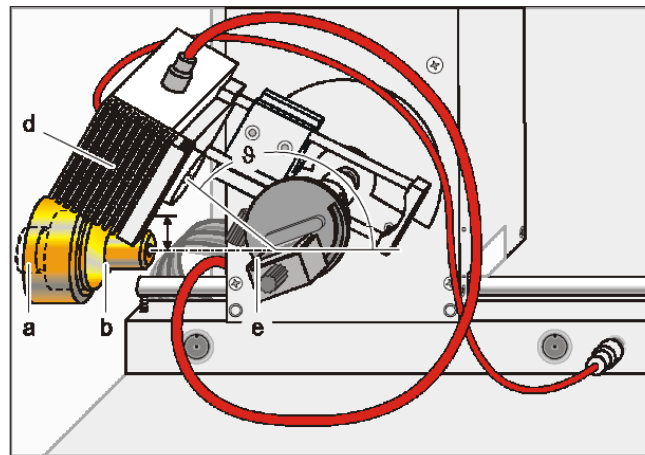
2.2. Versuchsdurchführung

2.2.1. Aufnahme des Primärspektrums und Energiekalibrierung des Detektors

Achtung: Die Versuchsvorgaben sind unbedingt einzuhalten, da es in dieser Messgeometrie zu sehr hohen Zählraten kommen kann, welche den Detektor (Röntgenenergiesensor) beschädigen können.

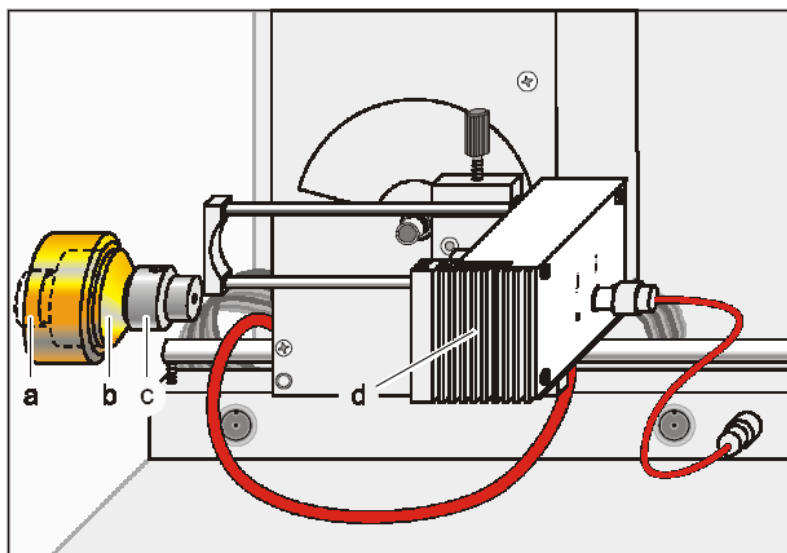
Positionierung des Goniometers:

- Achten Sie auf das Anschlusskabel, sodass ein vollständiger Schwenk des Detektorarmes möglich ist.
- Taster SENSOR drücken und den Sensorwinkel mit Dreheinsteller ADJUST von Hand auf 150° stellen, dazu das Goniometer ggf. weiter nach rechts schieben.
- Abstand des Röntgenenergiesensors zur Drehachse so wählen, dass das Detektorgehäuse bei diesem Sensorwinkel den Röntgenstrahl gerade nicht verdeckt.
- Goniometer anschließend so weit nach links schieben, dass das Detektorgehäuse den Kreiskollimator gerade nicht berührt (ca. 10 cm Abstand zwischen Kreiskollimator und Drehachse). Siehe Abbildung.
- Die Goniometerposition wird im weiteren Versuch nicht mehr geändert.



Versuchsaufbau zur Positionierung des Goniometers und zur Messung der Energie der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel ($\approx 150^\circ$ in Abbildung): Zr-Filter (a), Kreiskollimator (b), Abschwächerblende (c), Röntgenenergiedetektor (d), Streukörper (e).

Anpassung der Zählrate des Primärstrahls:



Versuchsaufbau zur Messung des Primärstrahls: Zr-Filter (a), Kreiskollimator (b), Abschwächerblende (c), Röntgenenergiedetektor (d).

Analog zur Abbildung:

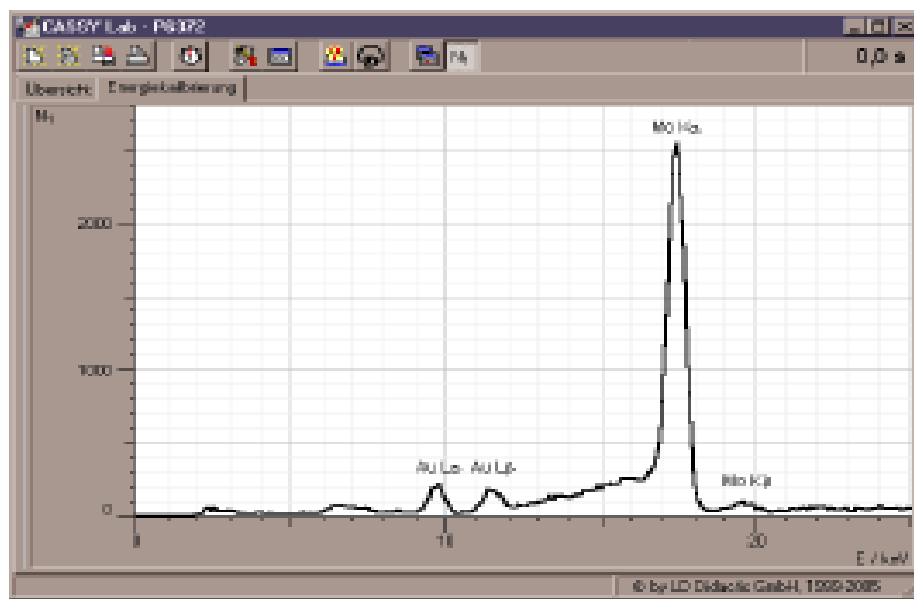
- Zr-Filter auf die Strahleintrittsseite des Kreiskollimators stecken.
- Kreiskollimator in der Kollimatoraufnahme des Röntgengerätes montieren.
- Targethalter mit dem Targettisch ausbauen und Sensor in 0° -Position bringen (Taste „Zero“).
- Abschwächerblende auf den Kreiskollimator setzen und sorgfältig ausrichten (mit den Einbuchtungen nach oben und unten weisend).
- Emissionsstrom auf 0,05 mA reduzieren und Hochspannung einschalten.
- Cassylab 2 starten und mit VKA-Box verbinden.
- In CASSY Lab die Messparameter „Vielkanalmessung, 512 Kanäle, negative Pulse, Verstärkung = -4, Messdauer = 300 s“ einstellen.

- Spektrumaufnahme mit Menu oder Taste F9 starten.
- Maximum Signal in 0,1°-Schritten um 0° des Sensorwinkel suchen, bei dem die Gesamtzählrate nur wenig über den in Streuanordnung gemessenen Zählraten (ca. 200 s⁻¹ liegt (ggf. den Emissionsstrom leicht verändern).
- Falls keine oder nur geringe Zählrate zu messen ist: Ausrichtung der Abschwächerblende überprüfen und Abschwächerblende evtl. um 180° drehen.

Aufnahme des Primärspektrums und Energiekalibrierung des Detektors:

Die zu messende Röntgenstrahlung erzeugt im Gehäuse der Si-PIN-Photodiode des Röntgenenergiedetektors zusätzlich Röntgenfluoreszenzstrahlung, die ebenfalls registriert wird. Im Primärspektrum sind daher neben der Mo K_α- und der MoK_β-Linie auch die Au L_α- und die Au L_β-Linie zu erwarten. Mit Hilfe dieser Linien kann die Energiekalibrierung der Spektren durchgeführt werden.

- Registrierte Ereignisse löschen und mit Menu oder Taste F9 Primärspektrum aufnehmen (Settings siehe oben).
- Mit Alt+E das Dialogfenster „Energiekalibrierung“ öffnen, „globale Energiekalibrierung“ wählen und die Energien der Au L_α- (9,71 keV) und der Mo K_α-Linie (17,44 keV) eintragen.
- Im Popup-Menü des Diagrammfensters den Menüpunkt „Weitere Auswertungen“ → „Peakschwerpunkt berechnen“ auswählen, die Au L_α-Linie markieren und das Ergebnis in das Dialogfenster „Energiekalibrierung“ eintragen.
- Anschließend die Mo K_α-Linie markieren und das Ergebnis in das Dialogfenster eintragen.



Zur Identifikation der Emissionen im Primärspektrum

Der Detektor ist nun kalibriert und das Primärenergiespektrum 0° ist aufgenommen.

Aufnahme der Spektren in Streuanordnung:

- Entfernen Sie die Abschwächerblende
- Montieren Sie den Targethalter mit Targettisch auf Goniometer.
- Plexiglas-Streukörper nun auflegen und festklemmen.
- In CASSY Lab sollten weiterhin die Messparameter „Vielkanalmessung, 512 Kanäle, negative Pulse, Verstärkung = -4, Messdauer = 300 s“ eingestellt sein.
- Stellen Sie wieder einen Emissionsstrom von I=1mA ein und schalten Sie die Hochspannung ein

- Den Targetwinkel auf 20° und den Sensorwinkel auf 30° stellen (Taste Target und Sensor + Einstellrad)
- Mit F9 ein neues Spektrum (in 30°-Position) aufnehmen
- Anschließend bei konstantem Targetwinkel (20°) weitere Spektren für die Sensorwinkel 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135° und 150° aufnehmen.
- Gesamte Messung unter geeignetem Namen speichern.

Bestimmung der Energie als Funktion des Streuwinkels:

Die Energie der gestreuten Strahlung verkleinert sich mit wachsendem Streuwinkel. Die Intensität der gestreuten Strahlung ist bei $\vartheta = 90^\circ$ an kleinsten.

- Zur Auswertung Energiespektrum auswählen und geeigneten Ausschnitt festlegen. Für die Bestimmung des Peakschwerpunkts sollte nur der Bereich des energieverschobenen Peaks markiert werden. Dazu im Popup-Menü des Diagrammfensters den Menüpunkt „Weitere Auswertungen“ → „Peakschwerpunkt berechnen“ aufrufen und dann den Bereich des energieverschobenen Peaks markieren.
- Ermittelten Peakschwerpunkt und zugehörigen Streuwinkel in eine Tabelle zur Auswertung eintragen.
- Stellen Sie die Daten in einem Plot dar und fitten Sie die Daten mit Gleichung 7, wobei Sie die Elektronenmasse als freien Parameter wählen.
- Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Ruhemasse eines Elektrons.

Ergebnis:

Röntgenstrahlung wird beim Durchgang durch den Plexiglaskörper zum Teil gestreut, wobei eine Energieverschiebung (Compton-Effekt) beobachtet wird. Die Energieverschiebung kann berechnet werden, indem man den Streuvorgang als Stoß zwischen einem Röntgenphoton und einem ruhenden freien Elektron beschreibt und für diesen Stoßvorgang die Erhaltung von Energie und Impuls verlangt.

3. Hinweise zu Ihrer Sicherheit und zum Umgang mit den Gerätschaften

Das Röntgengerät erfüllt die Vorschriften über die Bauart einer Schulröntgeneinrichtung und eines Vollschutzgeräts und ist als Schulröntgengerät und Vollschutzgerät bauartzugelassen.

Durch die werksseitig eingebauten Schutz- und Abschirmvorrichtungen ist die Dosisleistung außerhalb des Röntgengeräts auf unter 1 $\mu\text{Sv/h}$ reduziert, einen Wert, der in der Größenordnung der natürlichen Strahlenbelastung liegt.

■ Vor der Inbetriebnahme das Röntgengerät auf Unversehrtheit überprüfen
(siehe Gebrauchsanweisung zum Röntgengerät).

■ Röntgengerät vor dem Zugriff Unbefugter schützen.

Eine Überhitzung der Anode in der Röntgenröhre Mo ist zu vermeiden.

■ Bei Einschalten des Röntgengeräts überprüfen, ob sich der Lüfter im Röhrenraum dreht.

Das Goniometer wird ausschließlich über elektrische Schrittmotoren verstellt.

■ Targetarm und Sensorarm des Goniometers nicht blockieren und nicht mit Gewalt verstellen.

4. Kontrollfragen

- Erzeugung von Röntgenstrahlung
- Was versteht man unter Bremsstrahlung bzw. charakteristischer Röntgenstrahlung
- Größenordnung der Bindungsenergien der Atome (K-Schalen) im Überblick.
- Erklären Sie den Compton Effekt.
- Ruhemasse des Elektrons.
- Was zeigt der Compton Effekt

5. Informationen zu Auswertung und Bericht