

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

Versuchsziele

- Aufnahme der Energiespektren der an einem Streukörper unter verschiedenen Winkeln gestreuten Röntgenstrahlung.
- Bestimmung der Energie der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel.
- Vergleich der gemessenen Energien mit den aus Energie- und Impulserhaltung berechneten Energien.

Grundlagen

Beim Durchgang durch Materie wird ein Teil der Röntgenstrahlung gestreut. Nach klassischer Vorstellung sollte sich dabei die Frequenz der Strahlung nicht ändern. Der amerikanische Physiker *A. H. Compton* beobachtete 1923 jedoch bei einem Teil der gestreuten Strahlung eine Verminderung der Frequenz.

Zur Erklärung muss der ganze Streuprozess quantenphysikalisch behandelt und die Röntgenstrahlung z. B. im Teilchenbild betrachtet werden. Außerdem wird angenommen, dass die streuenden Elektronen frei sind, was für die äußeren Elektronenschalen der Atome bei Energien im Bereich der Röntgenstrahlen eine gute Näherung ist. Somit trifft bei einem Streuprozess ein Photon der Frequenz ν_1 , also mit der Energie $E_1 = h \cdot \nu_1$, auf ein ruhendes freies Elektron der Ruhemasse m_0 . Das Photon wird dabei um den Winkel ϑ gestreut und das Elektron bewegt sich mit der Geschwindigkeit v unter dem Winkel φ zur Richtung des einfallenden Photons (siehe Fig. 1). Für diesen Stoßvorgang wird die Erhaltung von Energie und Impuls verlangt, wie beim elastischen Stoß zweier klassischer Teilchen.

Da das Photon keine Ruhemasse hat, folgt in relativistischer Formulierung aus der Energieerhaltung

$$h \cdot \nu_1 + m_0 \cdot c^2 = h \cdot \nu_2 + \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (I)$$

c : Vakuumlichtgeschwindigkeit
und aus der komponentenweisen Impulserhaltung

$$\frac{h \cdot \nu_1}{c} = \frac{h \cdot \nu_2}{c} \cdot \cos \vartheta + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \cdot \cos \varphi$$

und

$$0 = \frac{h \cdot \nu_2}{c} \cdot \sin \vartheta + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \cdot \sin \varphi \quad (II).$$

Aus (I) und (II) lässt sich nach einigen Umformungen für die Energie der gestreuten Strahlung herleiten:

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

Im Versuch werden die Untersuchungen von *Compton* an einem Streukörper aus Plexiglas wiederholt und ihre Ergebnisse mit Gl. (III) verglichen. Zur Spektromaufnahme wird der Röntgenenergie-detektor eingesetzt.

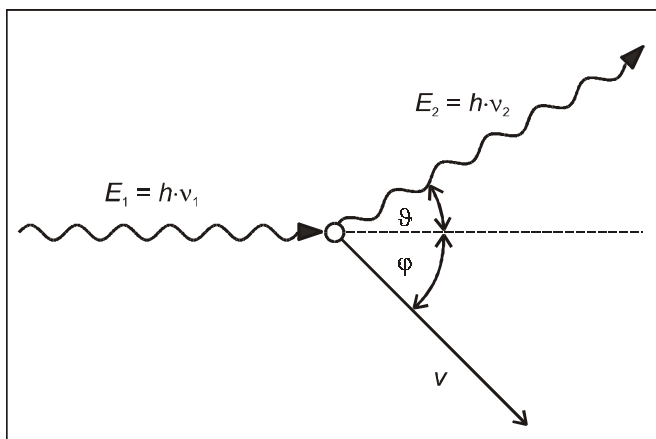


Fig. 1 Schematische Darstellung der Compton-Streuung

Geräte

1 Röntgengerät mit mit Röntgenröhre Mo und Goniometer	554 801/11
1 Comptonzusatz Xray II	554 837/71
1 Röntgenenergiedetektor	559 938
1 Sensor-CASSY	524 010
1 VKA-Box	524 058
1 CASSY Lab	524 200
1 HF-Kabel, 1 m	501 02
1 PC mit Windows 98 - Vista	

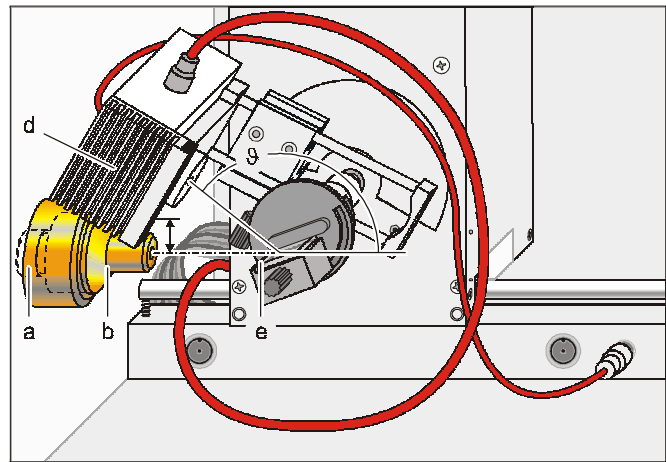
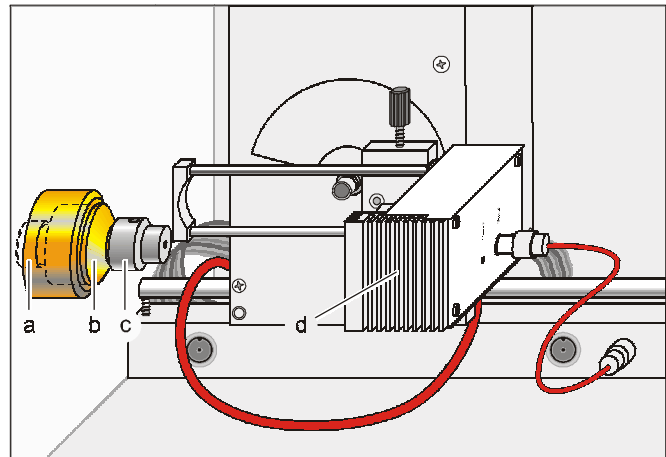


Fig. 2 Versuchsaufbau zur Messung des Primärstrahls (oben) und zur Messung der Energie der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel (unten)
Zr-Filter (a), Kreiskollimator (b), Abschwächerblende (c), Röntgenenergiedetektor (d), Streukörper (e)

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt.

- Zr-Filter (aus Lieferumfang des Röntgengeräts) auf die Strahleintrittsseite des Kreiskollimators (aus dem Lieferumfang des Comptonzusatzes Xray II) stecken.
- Kreiskollimator in der Kollimatoraufnahme des Röntgengeräts montieren.
- Anschlusskabel des Tischnetzgeräts durch den Leerkanal des Röntgengeräts führen und an die Mini-DIN-Buchse des Röntgenenergiedetektors anschließen.
- Sensorhalter mit montiertem Röntgenenergiedetektor im Sensorarm des Goniometers befestigen.
- Signalausgang des Röntgenenergiedetektors mittels mitgeliefertem BNC-Kabel an die BNC-Buchse SIGNAL IN des Röntgengeräts anschließen.
- Anschlusskabel soweit nachführen, dass ein vollständiger Schwenk des Sensorarmes möglich ist.

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.

- Taster SENSOR drücken und den Sensorwinkel mit Dreheinsteller ADJUST von Hand auf 150° stellen, dazu das Goniometer ggf. weiter nach rechts schieben.
- Abstand des Röntgenenergiedetektors 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. 8 cm Abstand zwischen Kreiskollimator und Drehachse).
- Sensor-CASSY an Computer anschließen und VKA-Box aufstecken.
- Ausgang SIGNAL OUT im Anschlussfeld des Röntgengeräts mittels BNC-Kabel mit VKA-Box verbinden.


Durchführung

- Tischnetzgerät ans Netz anschließen (nach ca. 2 min leuchtet die Leuchtdiode „grün“ und der Röntgenenergiedetektor ist betriebsbereit).
- CASSY Lab aufrufen und die Messparameter „Vielkanalmessung, 256 Kanäle, negative Pulse, Verstärkung = -3, Messdauer = 300 s“ einstellen.

Abschätzung der Zählrate in Streuanordnung:

- Plexiglas-Streukörper auf Targettisch legen und festklemmen.
- Taster TARGET drücken und den Targetwinkel mit Dreheinsteller ADJUST von Hand auf 20° stellen.
- Röhren-Hochspannung $U = 35$ kV, Emissionsstrom $I = 1,00$ mA einstellen und Hochspannung einschalten.
- Spektromaufnahme mit  oder Taste F9 starten.
- Sensorwinkel langsam zwischen 150° und 30° variieren und jeweils oben rechts im CASSY Lab-Fenster die gesamte Zählrate ablesen.
- Emissionsstrom reduzieren, falls die gesamte Zählrate 200 1/s wesentlich überschreitet.

Anpassung der Zählrate des Primärstrahls:


- Targethalter mit dem Targettisch ausbauen und Sensor in 0°-Position bringen.
- Abschwächerblende auf den Kreiskollimator setzen und sorgfältig ausrichten (mit den Schrauben nach oben und unten weisend).
- Emissionsstrom auf 0,1 mA reduzieren und Hochspannung einschalten.
- Spektromaufnahme mit  oder Taste F9 starten.
- In 0,1°-Schritten um 0° den Sensorwinkel suchen, bei dem die Gesamtzählrate nur wenig über den in Streuanordnung gemessenen Zählraten 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:

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 $K\alpha$ - und der Mo $K\beta$ -Linie auch die Au $L\alpha$ - und die Au $L\beta$ -Linie zu erwarten (siehe Fig. 3). Mit Hilfe dieser Linien kann die Energiekalibrierung der Spektren durchgeführt werden.

- Registrierte Ereignisse löschen und mit  oder Taste F9 Primärspektrum aufnehmen.
- Anschließend mit Alt+E das Dialogfenster „Energiekalibrierung“ öffnen, „globale Energiekalibrierung“ wählen und die Energien der Au $L\alpha$ - (9,71 keV) und der Mo $K\alpha$ -Linie (17,44 keV [1]) eintragen.
- Im Popup-Menü des Diagrammfensters den Menüpunkt „Weitere Auswertungen“ → „Peakschwerpunkt berechnen“ auswählen, die Au $L\alpha$ -Linie markieren und das Ergebnis in das Dialogfenster „Energiekalibrierung“ eintragen.
- Anschließend den Schwerpunkt der Mo $K\alpha$ -Linie bestimmen und eintragen.

Aufnahme der Spektren in Streuanordnung:

- Abschwächerblende entfernen.
- Targethalter mit Targettisch auf Goniometer montieren.
- Plexiglas-Streukörper auflegen und festklemmen.
- Emissionsstrom $I = 1,00$ mA (bzw. den zuvor bei der Abschätzung der Zählrate ermittelten Emissionsstrom) einstellen und Hochspannung einschalten.

- Targetwinkel auf 20° und Sensorwinkel auf 30° stellen.
- Mit  oder Taste F9 ein neues Spektrum aufnehmen.
- Anschließend bei konstantem Targetwinkel weitere Spektren für die Sensorwinkel 60°, 90°, 120° und 150° aufnehmen.
- Gesamte Messung unter einem passenden Namen speichern.

Messbeispiel

Fig. 3 zeigt das Primärspektrum, also das Emissionsspektrum der Röntgenröhre mit Mo-Anode nach Monochromatisierung mit einem Zr-Filter.

In Fig. 4 ist in einem Energieausschnitt um die Mo $K\alpha$ -Linie eine Überlagerung der unter verschiedenen Streuwinkeln ϑ aufgenommenen Spektren dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Energie der gestreuten Strahlung mit wachsendem Streuwinkel verkleinert. Die Intensität der gestreuten Strahlung ist bei $\vartheta = 90^\circ$ an kleinsten.

Fig. 3 Emissionsspektrum der Röntgenröhre mit Mo-Anode nach Monochromatisierung mit einem Zr-Filter ($\vartheta = -0,1^\circ$)

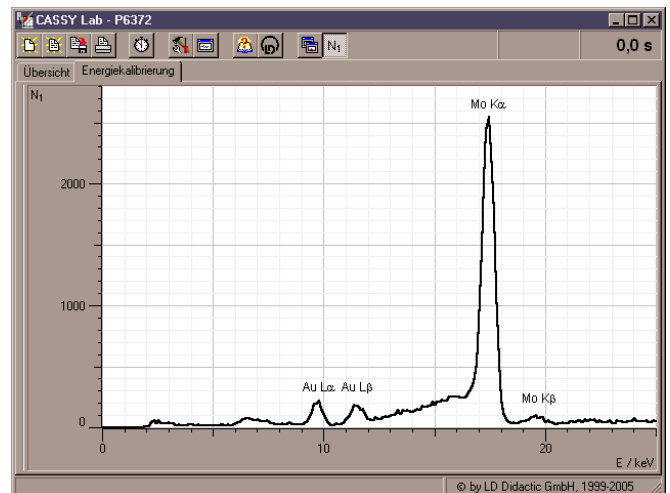
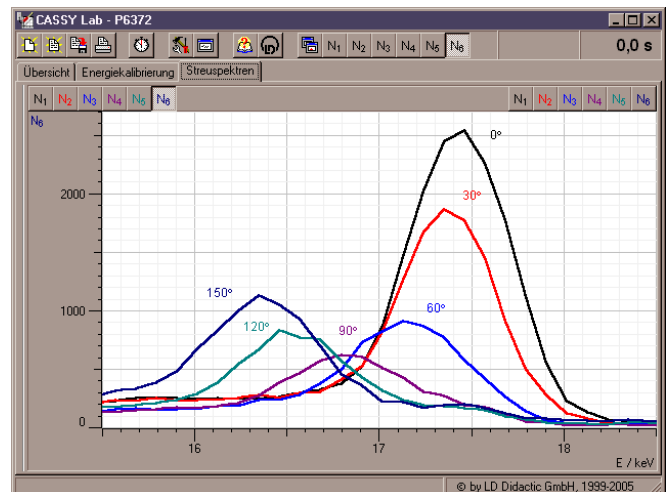


Fig. 4 Energieausschnitt des Primärspektrums (0°) und der unter den Streuwinkeln 30°, 60°, 90°, 120° und 150° gemessenen Energiespektren.



Auswertung

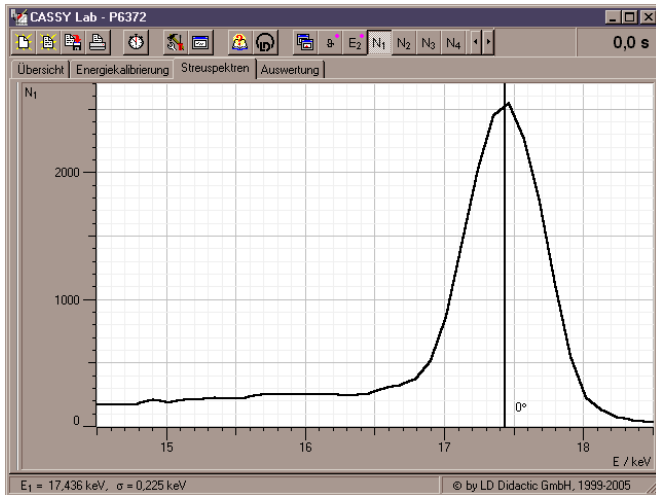


Fig. 5a Ausschnitt des Spektrums N_1 (0° , Primärspektrum) mit der unverschobenen Mo $K\alpha$ -Linie

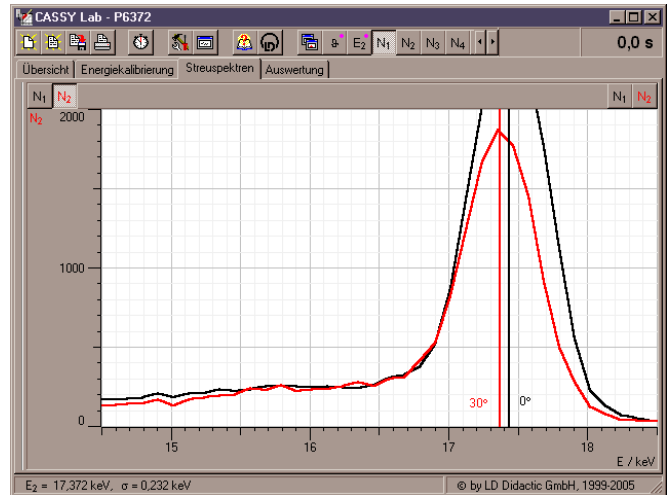


Fig. 5b Verschobene Mo $K\alpha$ -Linie aus dem Spektrum N_2 (30°) und unverschobene Linie aus N_1 .

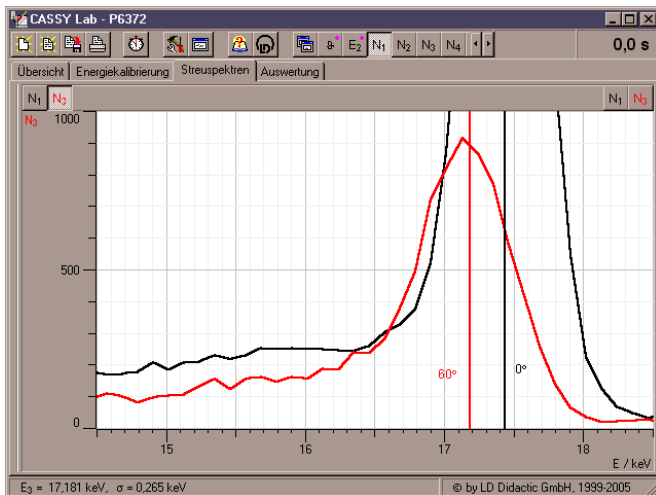


Fig. 5c Verschobene Mo $K\alpha$ -Linie aus dem Spektrum N_3 (60°) und unverschobene Linie aus N_1 .

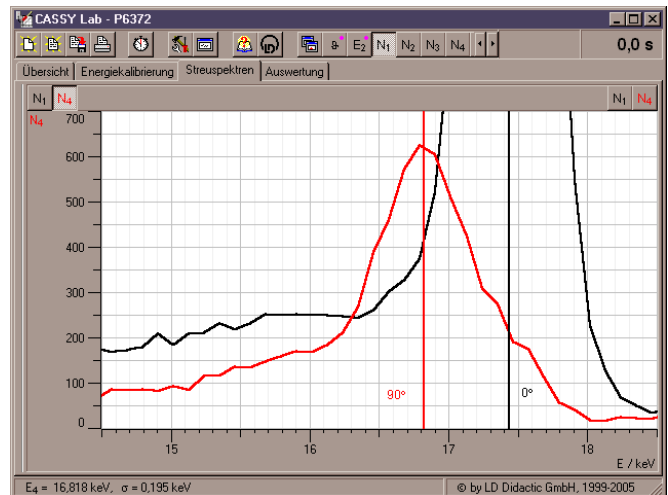


Fig. 5d Verschobene Mo $K\alpha$ -Linie aus dem Spektrum N_4 (90°) und unverschobene Linie aus N_1 .

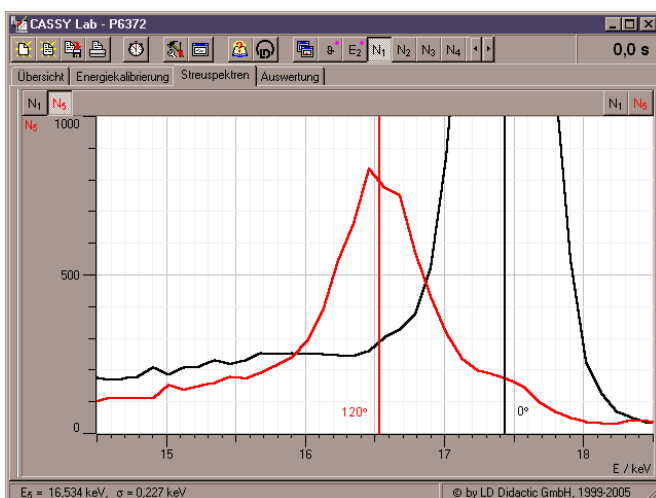


Fig. 5e Verschobene Mo $K\alpha$ -Linie aus dem Spektrum N_5 (120°) und unverschobene Linie aus N_1 .

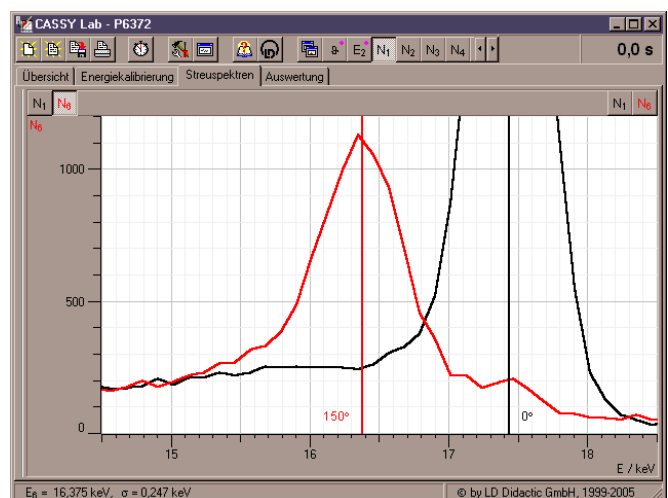


Fig. 5f Verschobene Mo $K\alpha$ -Linie aus dem Spektrum N_6 (150°) und unverschobene Linie aus N_1 .

Vorbereitung zur weiteren Auswertung in CASSY Lab:

- Neue Größe „Streuwinkel“ (als Parameter, Symbol: θ , Einheit: $^\circ$, von: 0, bis: 180, Dezimalstellen: 0) einrichten.
- Neue Größe „Energie“ (als Parameter, Symbol: E_2 , Einheit: keV, von: 0, bis: 20, Dezimalstellen: 2) einrichten.
- Neue Darstellung „Auswertung“ mit Streuwinkel als x-Achse und Energie als y-Achse einrichten.

Bestimmung der Energie als Funktion des Streuwinkels:

- Energiespektrum auswählen und geeigneten Ausschnitt festlegen.
- Im Popup-Menü des Diagrammfensters den Menüpunkt „Weitere Auswertungen“ \rightarrow „Peakschwerpunkt berechnen“ aufrufen und den Bereich des energieverschobenen Peaks markieren (ab $\theta = 90^\circ$ reicht die Energieauflösung des Detektors zur Trennung des unverschobenen und des verschobenen Peaks aus, siehe Fig. 5d bis 5f).
- Ermittelten Peakschwerpunkt und zugehörigen Streuwinkel in die Tabelle der Darstellung „Auswertung“ eintragen (siehe Fig. 6).

Vergleich der gemessenen Energien mit den aus Energie- und Impulserhaltung berechneten Energien:

- Darstellung „Auswertung“ wählen und mit Alt+F das Dialogfenster „Freie Anpassung“ öffnen.
- $f(x, A, B, C, D) = 17,44 / (1 + 17,44 * (1 - \cos(x)) / A)$ und Startwert für A: 511 (konstant) eintragen.
- „Weiter mit Bereich markieren“ anklicken und Messpunkte im Diagramm markieren.

Das Resultat ist eine gemäß (III) mit den Parametern $E_1 = 17,44$ keV und $m c^2 = 511$ keV berechnete Theoriekurve, die mit den Messwerten gut übereinstimmt (siehe Fig. 6).

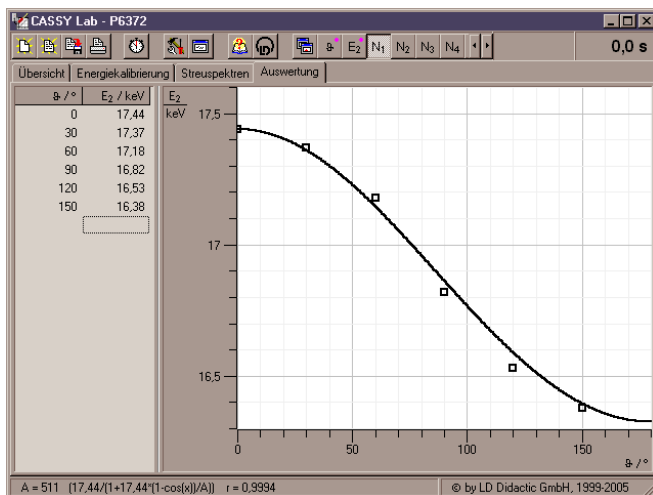


Fig. 6 Aus den gemessenen Energiespektren bestimmte Energie E_2 der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel θ und gemäß (III) berechnete Kurve.

Ergebnis

Beim Durchgang durch Materie wird ein Teil der Röntgenstrahlung gestreut und erfährt dabei eine Energieverschiebung (Compton-Effekt).

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.

Zusatzinformation

Der Vergleich zwischen Messung und Theorie kann alternativ auch als Anpassung mit dem freien Anpassungsparameter A (der „Ruhemasse“ des Stoßpartners der Röntgenphotonen) durchgeführt werden.

Als Ergebnis erhält man einen Wert für den Parameter A, der in guter Näherung mit der „Ruhemasse“ eines ruhenden freien Elektrons ($m c^2 = 511$ keV) übereinstimmt.

Literatur

- [1] gewichteter Mittelwert aus
C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edition, 1978, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

