

V603

Compton-Effekt

Tahir Kamcili
tahir.kamcili@udo.edu

Marina Andreß
marina.andress@udo.edu

Durchführung: 01.06.2021

Abgabe: 08.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
3.1 Aufnahme eines Emissionsspektrums der Kupfer Röntgenröhre	4
3.2 Bestimmung der Transmission als Funktion der Wellenlänge	5
3.3 Bestimmung der Compton-Wellenlänge	5
4 Vorbereitung	5
5 Auswertung	6
5.1 Emissionsspektrum	6
5.2 Bestimmung der Transmission	7
5.3 Bestimmung der Compton-Wellenlänge	8
6 Diskussion	9
Literatur	9
7 Anhang	10

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die Compton-Wellenlänge λ_C zu bestimmen.

2 Theorie

Der Compton Effekt beschreibt den Effekt, wenn γ -Strahlung an einem Elektron gestreut wird. Dies geschieht in der Regel durch kohärente und inkohärente Streuung. Die kohärente Streuung entspricht dem klassischen inelastischen Stoß und die inkohärente Streuung entspricht dem elastischen Stoß. Durch letzteren wird die γ -Strahlung frequenzverschoben, da diese durch den Stoß am Elektron Energie an dieses abgibt.

Wenn λ_1 die einfallende und λ_2 die auslaufende Wellenlänge ist, kann die Differenz berechnet werden über

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

Dabei ist θ der Winkel im den das γ -Photon gestreut wird. Der Vorfaktor $\lambda_c = h/m_e c$ wird auch die Compton-Wellenlänge genannt.

Zum erzeugen der Röntgenstrahlung werden Elektronen aus einer Glühkathode auf eine Anode hin beschleunigt. Dabei entsteht beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode Röntgenstrahlung die sich aus der Bremsstrahlung und der charakteristischen Röntgenstrahlung zusammensetzt.

Die Bremsstrahlung entsteht, wie es der Name suggeriert, durch die Abbremsung des Elektrons im Coulombfeld des Atoms des Anodenmaterials und ist dadurch kontinuierlich und die charakteristische Röntgenstrahlung entsteht durch die Ionisierung eines Atoms in der Anode, wodurch ein Elektron, unter Aussendung eines γ -Quanten, nachrückt. Diese Energien sind diskret. Die charakteristische Röntgenstrahlung ist somit Materialabhängig. Die Compton-Wellenlänge kann durch die Transmission und Absorption von Röntgenstrahlung durch Aluminium bestimmt werden. Die Transmission eines Stoffes nimmt mit zunehmender Wellenlänge ab, wodurch ebenfalls die Intensität der Compton-Wellenlänge sinkt. Der Transmissionskoeffizient kann durch

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

berechnet werden, wobei I_0 die Intensität der gesamten einfallenden Strahlung und I die transmittierte Strahlung, die gerade betrachtet wird, beschreibt.

Die Absorption durch Materie kann mit dem Delamberschen Gesetz beschrieben werden. Dies ist gegeben durch

$$I = I_0 e^{-\mu d} , \quad (3)$$

wobei d die Dicke, μ der Absorptionskoeffizient und I_0 die einfallende Intensität ist. Der Absorptionskoeffizient μ ist gegeben durch $\mu = \mu_{\text{Paar}} + \mu_{\text{Photo}} + \mu_{\text{Com}}$, wobei μ_{Paar} für den Paarbildungskoeffizienten, μ_{Photo} für den Photoeffektkoeffizienten und μ_{Com} für den Comptoneffektkoeffizienten steht.

Wenn Strahlung auf ein Gitter fällt, dann wird diese am Gitter gebeugt. Durch Interferenz wird lediglich im Winkel α , auch Glanzwinkel genannt, Strahlung reflektiert. Dieser Winkel kann durch die Bragg'sche Bedingung beschrieben werden, welche gegeben ist durch

$$2d \sin \alpha = n \lambda, \quad (4)$$

wobei λ die gebeugte Wellenlänge und d die Gitterkonstanten ist. Der ganze Effekt wird Bragg'sche Reflexion genannt.

3 Durchführung

Das Experiment ist aufgebaut durch eine Kupfer-Röntgenröhre, einem LiF-Kristall und einem Geiger-Müller-Zählrohr. Diese sind in einem Gehäuse verbaut. Der LiF-Kristall kann sich um sich selbst rotieren. Auf einer Kreisbahn um den Kristall kann das Geiger-Müller-Zählrohr bewegt werden. Der Aufbau ist in der Abbildung 1 dargestellt.

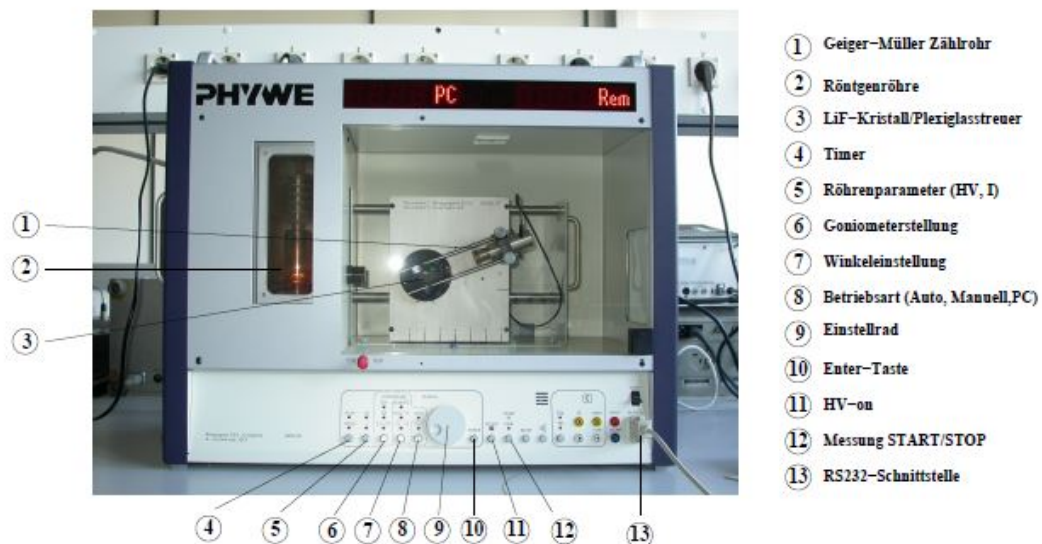


Abbildung 1: Aufbau einer Röntgenröhre [6]

Die Steuerung der einzelnen Elemente kann Wahlweise per Hand oder Computer erfolgen, jedoch ist es sinnvoll die unterschiedlichen Spektren mit dem Computer aufzunehmen. Die Beschleunigungsspannung und der Emissionsstrom werden bei allen Messungen auf $U = 35 \text{ kV}$ und $I = 1 \text{ mA}$ eingestellt.

3.1 Aufnahme eines Emissionsspektrums der Kupfer Röntgenröhre

Für die Aufnahme des Emissionsspektrums wird mit dem LiF-Kristall in $0,1^\circ$ -Schritten mit einer Integrationszeit von 10 s im Intervall von 8° bis 25° durch gemessen.

3.2 Bestimmung der Transmission als Funktion der Wellenlänge

Für die Bestimmung der Transmission als Funktion der Wellenlänge wird ebenfalls in $0,1^\circ$ -Schritten der Kristall abgefahren. Jedoch einmal mit Aluminium-Absorber und einmal ohne. Bei der Messung mit dem Absorber wird dieser vor die verbaute 2mm Blende gesetzt. Bei beiden Messungen beträgt die Integrationszeit pro Winkel 200 s, in einem Winkelbereich von 7° bis 10° .

3.3 Bestimmung der Compton-Wellenlänge

Für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge λ_C wird die Transmission der ungestreuten und gestreuten Röntgenstrahlung betrachtet und mit einerander verglichen. Dafür werden die Impulse wieder einmal mit und einmal ohne Al-Absorber zwischen Streuer und Geiger-Müller Zählrohr mit einer Integrationszeit von 300 s gemessen.

4 Vorbereitung

Als Vorbereitung zu dem Versuch sollte die Energien der $\text{Cu-}K_\alpha$ und $\text{Cu-}K_\beta$ Linie bestimmt und die dazugehörige Wellenlänge λ und den Winkel α für den LiF-Kristall mit der Gitterkonstante $d = 201,4 \text{ pm}$ und $n = 1$.

Die Energien liegen bei $E_{K_\alpha} = 8,046 \text{ keV}$ und $E_{K_\beta} = 8,904 \text{ keV}$. Daraus folgt für den Glanzwinkel $\theta_{K_\alpha} = 22,49^\circ$ und $\theta_{K_\beta} = 20,22^\circ$ und eine Wellenlänge von $\lambda_{K_\alpha} = 1,541 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ und $\lambda_{K_\beta} = 1,391 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Zusätzlich lässt sich die Compton-Wellenlänge bestimmen zu $\lambda_{K_{\text{Compton}}} = 2,431 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

5 Auswertung

5.1 Emissionsspektrum

Aus den Messdaten aus Tabelle (3) lässt sich das Emissionsspektrum einer Kupferröntgenröhre in (2) graphisch darstellen.

Zu erkennen sind die ermittelten Peaks, die die K_α und K_β Linie darstellen, sowie der orange markierte Bremsberg.

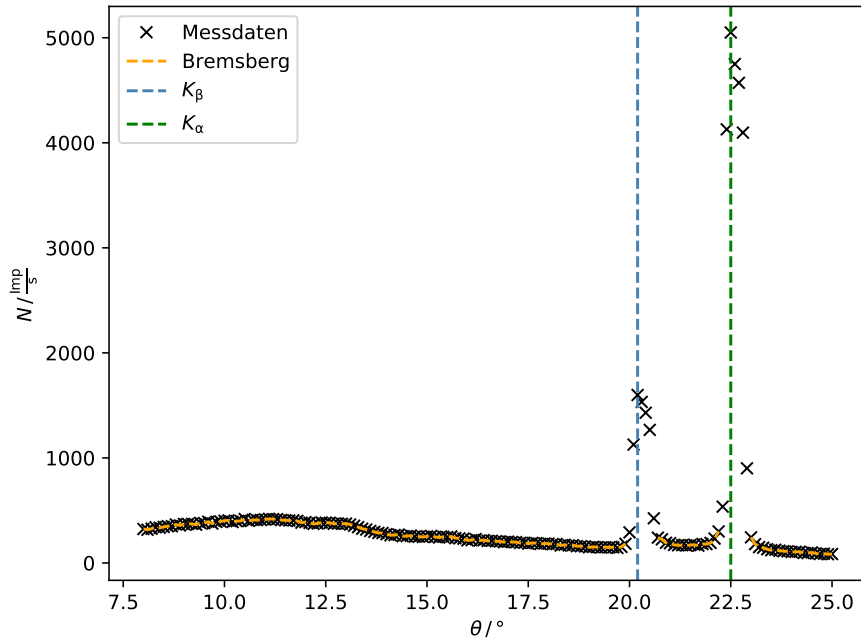


Abbildung 2: Emissionsspektrum einer Cu-Röntgenröhre.

Mittels Python lassen sich die Winkel zu den Peaks bestimmen, woraus die Energie nach

$$E = \frac{h c}{2 d_{LiF} \sin(\theta)} \quad (5)$$

berechnet wird.

$$\theta_\alpha = 20.2^\circ$$

$$E_\alpha = 8.0434 \text{ keV}$$

$$\theta_\beta = 22.5^\circ$$

$$E_\beta = 8.9142 \text{ keV}$$

5.2 Bestimmung der Transmission

Aus den gegebenen Zählraten N aus Tabelle (2) lässt sich die Transmission T mit

$$I = \frac{N}{1 - \tau N} \quad (6)$$

mit der Totzeit $\tau = 90\mu s$ und

$$T = \frac{I_{Al}}{I_O} \quad (7)$$

bestimmen.

In Abbildung (3) ist die Transmission mit dem Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ aufgetragen.

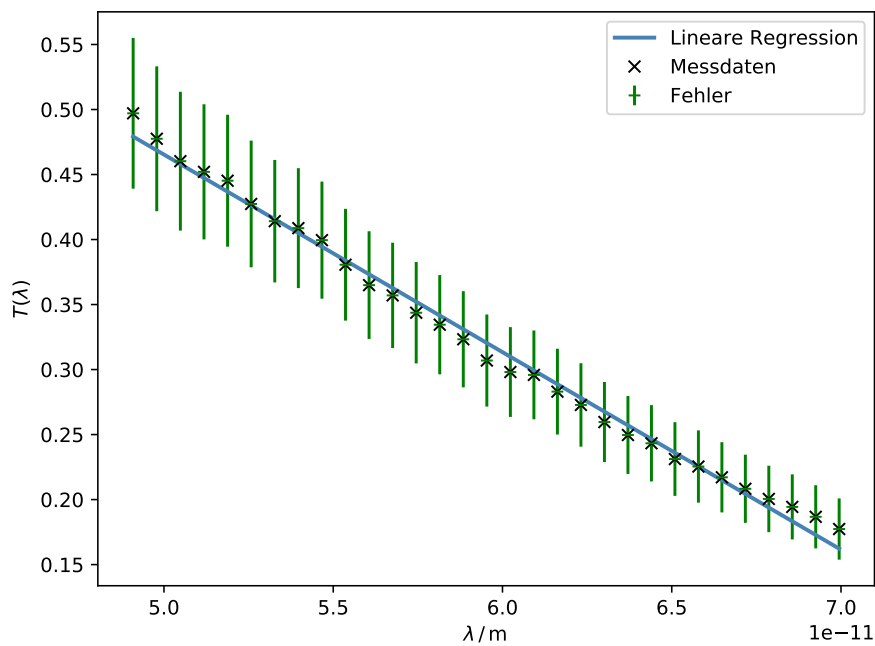


Abbildung 3: Transmission.

Die Ausgleichsgerade der Form

$$f(x) = m \cdot x + b$$

lässt sich über polyfit bestimmen, sodass folgende Parameter ermittelt werden:

$$m = (-1.519 \pm 0.024) \cdot 10^{10}$$

$$b = 1.225 \pm 0.014$$

5.3 Bestimmung der Compton-Wellenlänge

Aus den gemessenen Impulsen

$$\begin{array}{ll} I_0 = 2731 & \text{(ohne Al-Absorber)} \\ I_1 = 1180 & \text{(mit Al-Absorber)} \\ I_2 = 1024 & \text{(mit Al-Absorber)} \end{array}$$

werden die Transmissionen T_1 und T_2 mit Gleichung (7) bestimmt. So ergibt sich

$$\begin{array}{l} T_1 = 0.432 \\ T_2 = 0.375. \end{array}$$

Diesmal wird auf die Totzeitkorrektur nach Formel (6) verzichtet, da für kleine Zählraten $\tau \cdot N \ll 1$ gilt.

Die zugehörigen Wellenlängen λ_1 und λ_2 lassen sich aus der Ausgleichsgeraden mit

$$\lambda = \frac{T - b}{m}$$

zu

$$\begin{array}{l} \lambda_1 = (5.22 \pm 0.12) \cdot 10^{-11} \text{m} \\ \lambda_2 = (5.59 \pm 0.13) \cdot 10^{-11} \text{m} \end{array}$$

bestimmen. Die Differenz $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_c$ ist dabei die Compton Wellenlänge

$$\lambda_c = (3.76 \pm 0.06) \cdot 10^{-12} \text{m}.$$

6 Diskussion

Nun werden die Ergebnisse der Untersuchung des Emissionsspektrums einer Kupfer-Röntgen-Röhre aus Kapitel (5.1) diskutiert. Im Vergleich mit den in Kapitel (4) aufgeführten Literaturwerten ergeben sich die in Tabelle (1) befindenden relativen Abweichungen.

Tabelle 1: Relative Abweichungen der Messwerte von den Literaturwerten.

$\Delta_{rel}E_\alpha / \%$	$\Delta_{rel}\theta_\alpha / \%$	$\Delta_{rel}E_\beta / \%$	$\Delta_{rel}\theta_\beta / \%$
0.03	0.099	0.11	0.04

Aufgrund der geringen Abweichungen ist diese Messung als gelungen und aussagekräftig zu betrachten.

Bei der Bestimmung der Transmission fällt auf, dass sich die Ausgleichsgerade in Abbildung (3) immer im Bereich der Messunsicherheit befindet. Zudem wurde eine Korrektur der gemessenen Zählraten durchgeführt, da das Geiger-Müller-Zählrohr eine Totzeit von $90\mu s$ hat.

Wird die bestimmte Compton-Wellenlänge mit der Literatur verglichen, ergibt sich eine hohe relative Abweichung von $\Delta_{rel}\lambda_c = 55\%$. Ein Grund dafür kann die Messunsicherheit sein, die bei sehr kleinen Werten eine große Auswirkung haben kann.

Der Compton-Effekt kann nicht im sichtbaren Bereich des Spektrums mit Wellenlängen von ca 380 bis 780 nm auftreten, da es sich um eine andere Größenordnung handelt. Sichtbares Licht ist im Vergleich zur Röntgenstrahlung weniger energetisch und besitzt meist nicht genug Energie um die Bindungsenergie eines Elektrons überwinden zu können.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] *Literaturwert für spezifische Wärmekapazität von Wasser*. 2020. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (besucht am 01.11.2020).
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] *Versuchsanleitung zu Versuch V603 Compton-Effekt*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.

7 Anhang

Tabelle 2: Messwerte für die Bestimmung der Compton-Wellenlänge

θ °	$N_O \frac{\text{Imp}}{s}$	$N_{Al} \frac{\text{Imp}}{s}$	θ °	$N_O \frac{\text{Imp}}{s}$	$N_{Al} \frac{\text{Imp}}{s}$
7,0	226,0	113,5	8,6	328,5	100,0
7,1	232,0	112,0	8,7	332,5	100,5
7,2	240,5	112,0	8,8	337,0	97,5
7,3	248,0	113,5	8,9	340,5	95,0
7,4	255,0	115,0	9,0	348,0	92,5
7,5	262,0	113,5	9,1	350,0	89,5
7,6	269,0	113,0	9,2	353,0	88,0
7,7	276,0	114,5	9,3	356,5	84,5
7,8	281,0	114,0	9,4	359,0	83,0
7,9	289,5	112,0	9,5	363,5	81,0
8,0	295,0	109,5	9,6	367,0	78,5
8,1	300,0	109,0	9,7	369,0	76,0
8,2	308,5	108,0	9,8	370,5	74,0
8,3	311,0	106,0	9,9	375,0	72,0
8,4	317,0	104,5	10,0	375,5	68,5
8,5	324,0	101,5			

Tabelle 3: Messergebnisse für das Emissionsspektrums

θ °	$N \frac{\text{Imp}}{s}$	θ °	$N \frac{\text{Imp}}{s}$	θ °	$N \frac{\text{Imp}}{s}$	θ °	$N \frac{\text{Imp}}{s}$
8,0	323,0	12,3	376,0	16,6	211,0	20,9	192,0
8,1	316,0	12,4	385,0	16,7	206,0	21,0	188,0
8,2	326,0	12,5	384,0	16,8	205,0	21,1	172,0
8,3	340,0	12,6	382,0	16,9	198,0	21,2	168,0
8,4	335,0	12,7	373,0	17,0	203,0	21,3	169,0
8,5	343,0	12,8	376,0	17,1	199,0	21,4	166,0
8,6	350,0	12,9	373,0	17,2	198,0	21,5	170,0
8,7	350,0	13,0	375,0	17,3	191,0	21,6	174,0
8,8	366,0	13,1	366,0	17,4	192,0	21,7	164,0
8,9	357,0	13,2	354,0	17,5	184,0	21,8	180,0
9,0	371,0	13,3	341,0	17,6	191,0	21,9	179,0
9,1	371,0	13,4	326,0	17,7	188,0	22,0	191,0
9,2	372,0	13,5	318,0	17,8	181,0	22,1	232,0
9,3	364,0	13,6	305,0	17,9	185,0	22,2	300,0
9,4	381,0	13,7	296,0	18,0	184,0	22,3	536,0
9,5	379,0	13,8	286,0	18,1	179,0	22,4	4128,0
9,6	393,0	13,9	285,0	18,2	180,0	22,5	5050,0
9,7	375,0	14,0	274,0	18,3	166,0	22,6	4750,0
9,8	391,0	14,1	264,0	18,4	173,0	22,7	4571,0
9,9	395,0	14,2	266,0	18,5	167,0	22,8	4097,0
10,0	402,0	14,3	270,0	18,6	169,0	22,9	901,0
10,1	405,0	14,4	255,0	18,7	160,0	23,0	244,0
10,2	390,0	14,5	255,0	18,8	159,0	23,1	179,0
10,3	398,0	14,6	260,0	18,9	157,0	23,2	151,0
10,4	400,0	14,7	251,0	19,0	149,0	23,3	145,0
10,5	418,0	14,8	250,0	19,1	153,0	23,4	130,0
10,6	401,0	14,9	248,0	19,2	150,0	23,5	121,0
10,7	410,0	15,0	253,0	19,3	147,0	23,6	126,0
10,8	408,0	15,1	257,0	19,4	150,0	23,7	117,0
10,9	409,0	15,2	248,0	19,5	148,0	23,8	112,0
11,0	414,0	15,3	242,0	19,6	149,0	23,9	110,0
11,1	420,0	15,4	249,0	19,7	143,0	24,0	105,0
11,2	417,0	15,5	246,0	19,8	153,0	24,1	106,0
11,3	417,0	15,6	252,0	19,9	182,0	24,2	107,0
11,4	409,0	15,7	236,0	20,0	291,0	24,3	95,0
11,5	406,0	15,8	234,0	20,1	1127,0	24,4	94,0
11,6	404,0	15,9	231,0	20,2	1599,0	24,5	100,0
11,7	405,0	16,0	215,0	20,3	1533,0	24,6	91,0
11,8	400,0	16,1	217,0	20,4	1430,0	24,7	85,0
11,9	383,0	16,2	227,0	20,5	1267,0	24,8	88,0
12,0	389,0	16,3	214,0	20,6	425,0	24,9	83,0
12,1	382,0	16,4	217,0	20,7	241,0	25,0	85,0
12,2	372,0	16,5	210,0	20,8	225,0		