

Physik-Praktikum:RÖN

1. Versuch: Röntgenspektrum der Molybdänanode

Ziel

Aufzeichnung des Röntgenspektrums, Berechnung der Wellenlänge und Energie der K_α und K_β - Linien beider Beugungsmaxima 1. bis 3. Ordnung und die Mittelwerte davon.

Aufbau

Eine Röntgenröhre, die mit einem Spaltblendenkollimator versehen ist, strahlt auf einen Kristall in einer Halterung. Hinter dem Kristall ist ein Strahlenmessgerät (Geiger-Müller-Zählrohr) befestigt, so dass nur die Strahlen gemessen werden, die beim jeweiligen Winkel der Bragg-Bedingung gehorcht. Die Kristallhalterung ist drehbar (Drehachse senkrecht zur Röntgenstrahlung), so dass der Kristall von parallel bis etwa 30° zur Strahlung hin gekippt ausgerichtet werden kann. Das Zählrohr ist ebenfalls drehbar befestigt, und zwar so, dass der Kristall der Drehpunkt ist, und mit der Kristallhalterung gekoppelt, so dass der Winkel des Zählrohrs immer doppelt so groß wie der des Kristalls ist (dies ist nötig wegen der am Kristall auftretenden Bragg-Reflexion, bei der sich, wie bei jeder Reflexion, der Winkel des ausfallenden Strahls der doppelte Glanzwinkel ist). Die Drehwinkel von Kristall und Zählrohr werden durch zwei Zeiger oben am Gerät angezeigt.

An diesem Röntgengerät ist ein Motor befestigt, der Kristall (und damit gekoppelt das Zählrohr) in zwei Geschwindigkeiten drehen kann; der Motor außerdem gibt eine zum Drehwinkel proportionale Spannung aus. An das Zählrohr ist ein Impulsratenmesser (der die Impulsrate in eine dazu proportionale Spannung umwandelt) mit Lautsprecher angeschlossen. Ein XY-Schreiber zeichnet diese Impulsrate in Abhängigkeit vom Drehwinkel auf.

Durchführung

Zuerst wird der Motor auf seine Nullsposition gedreht (so dass die winkelbeschreibende Spannung auf 0 ist). In die Halterung des Röntgengeräts wird ein NaCl-Kristall eingeschraubt und am Gerät die Beschleunigungsspannung auf Stufe 6 und maximaler Kathodenstrom eingestellt. Zuvor wird außerdem der XY-Schreiber geeicht und eingestellt (Nullstellung, passende Schrittweite lt. Anleitung) und eine Markierung bei 5° und 10° Drehwinkel (des Kristalls) auf das Millimeterpapier im Schreiber geschrieben. Beim Zünden der Röhre muss der Kristall auf mindestens 2° gedreht sein, damit die direkten Strahlen aus der Röntgenröhre nicht in das Zählrohr gelangen und wegen ihrer Intensität es beschädigen würden. Von dort bis zu einem Drehwinkel von ca. 30° wird die Intensität aufgezeichnet. Man erkennt deutlich die K_α - und die K_β - Linie des Anodenmaterials Molybdän, insgesamt je dreimal (Maxima 1., 2. und 3. Ordnung beider Bragg-Interferenz).

$$\lambda = \frac{2 d_{\text{NaCl}} \sin \vartheta_n}{n}; E = \frac{\hbar c}{\lambda};$$

$$\hbar = 6,62618 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,13571 \cdot 10 \text{ eVs}; c = 2,997924 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; a = 564,94 \text{ pm};$$

$$d_{\text{NaCl}} = \frac{a}{2};$$

Linie	Winkel	Wellenlänge[m]	Energie[J]
K_α 1.Ordnung	$(7,8 \pm 0,1)^\circ$	$7,69 \cdot 10^{-11}$	$2,58 \cdot 10^{-15}$
K_α 2.Ordnung	$(15,5 \pm 0,1)^\circ$	$7,55 \cdot 10^{-11}$	$2,63 \cdot 10^{-15}$
K_α 3.Ordnung	$(23,3 \pm 0,1)^\circ$	$7,45 \cdot 10^{-11}$	$2,67 \cdot 10^{-15}$
Mittelwert		$7,46 \cdot 10^{-11}$	$2,66 \cdot 10^{-15}$

Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}$	$0,085 \cdot 10^{-11}$	$0,030 \cdot 10^{-15}$
Messunsicherheit (Vertrauensniveau 68,26 %)	$u = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s$	$0,065 \cdot 10^{-11}$	$0,023 \cdot 10^{-15}$
K_β 1.Ordnung	$(7,2 \pm 0,1)^\circ$	$6,49 \cdot 10^{-11}$	$3,06 \cdot 10^{-15}$
K_β 2.Ordnung	$(13,7 \pm 0,1)^\circ$	$6,69 \cdot 10^{-11}$	$2,97 \cdot 10^{-15}$
K_β 3.Ordnung	$(20,6 \pm 0,1)^\circ$	$6,63 \cdot 10^{-11}$	$3,0 \cdot 10^{-15}$
Mittelwert		$6,60 \cdot 10^{-11}$	$3,01 \cdot 10^{-15}$
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}$	$0,10 \cdot 10^{-11}$	$0,046 \cdot 10^{-15}$
Messunsicherheit	$u = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s$	$0,076 \cdot 10^{-11}$	$0,035 \cdot 10^{-15}$

Bei einer Ablesegenauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ ergibt sich ein zusätzlicher Fehler von $\Delta \lambda = 1 \text{ pm}$ und $\Delta E = \pm 0,08 \cdot 10^{-15} \text{ J}$.

Dadurch ergibt sich die gesamte Unsicherheit

$$u_{K_\beta(\lambda)} = 0,076 \cdot 10^{-11} \text{ m} + 0,1 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,176 \cdot 10^{-11} \text{ m} \text{ und}$$

$$u_{K_\beta(E)} = 0,035 \cdot 10^{-15} \text{ J} + 0,08 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 0,115 \text{ J} \text{ für die } K_\beta\text{-Linie und}$$

$$u_{K_\alpha(\lambda)} = 0,185 \cdot 10^{-11} \text{ m} \text{ und } u_{K_\alpha(E)} = 0,11 \cdot 10^{-15} \text{ J} \text{ für die } K_\beta\text{-Linie.}$$

Die Ableseunsicherheit ist also deutlich größer als die Messunsicherheit.

Wie groß ist der in die Braggbedingung einzusetzende Wert des Netzebenenabstands, wenn die den Kristall begrenzenden Flächen (Spaltflächen) parallel zu den Würfelflächen sind?

Die Gitterkonstante gibt die Seitenlänge eines einzelnen Kristallwürfels (bestehend aus einem zentralen Atom, hier Natrium, und den unmittelbar anschließenden Atomen außenherum in Würfelform) an. In so einem Kristallwürfel sind horizontal drei Atomschichten übereinander, also sind dazwischen zwei Netzebenenabstände. Die Gitterkonstante umfasst also zwei Netzebenenabstände.

Fehlerquellen (auch für die folgenden Versuche):

- Ablesegenauigkeit des Diagramms
- Genauigkeit beim Winkeleinstellen (große Zeiger, grobe Skala)

2. Versuch: Pulsanzeige mit Lautsprecher

Durchführung

Der Impulsratenmesser, der an das Zählrohr angeschlossen ist, hat einen Lautsprecher. Man misst bei einem Winkel, bei dem die Intensität so gering ist, dass man einzelne Pulse unterscheiden kann.

Warum ist die Pulsfolge unregelmäßig?

Weil die Röntgenstrahlen als Folge von Stoßprozessen mit Atomen auftreten, die statistisch verteilt sind. Die Stöße bewirken nur eine Anregung von inneren SchalenElektronen, die wieder, statistisch verteilt, auf ihr altes Energieniveau zurückfallen und dabei Röntgenquanten abgeben. Außerdem beruht

das Geiger-Müller-Zählrohr auch auf statistischen Stoßprozessen (jede Elektronenlawine erzeugt einen Impuls). Dies alles sorgt dafür, dass die Pulsfolge unregelmäßig ist.

3. Versuch: Messung der Absorption in Zirkon

Ziel

Aufzeichnung des Röntgenspektrums ohne und mit Zirkonfilter, Berechnung der Transmissionskurve von Zirkon aus diesen Spektren und Bestimmung der Wellenlänge der Absorptionskante.

Aufbau und Durchführung

Siehe 1. Versuch, zwischen Röntgenröhre und Spaltblendenkollimator befindet sich ein Zirkonblech (Dicke 0,5 mm). Plot des XY-Schreibers auf dasselbe Papier.

Wo liegt die Absorptionskante von Zirkon (Wellenlänge angeben)?

Siehe Graph: zwischen $7,25^\circ$ und $8,25^\circ$. Das arithmetische Mittel ist $7,75^\circ$, das entspricht einer mittleren Wellenlänge von $\lambda_{Kante} = 7,62 \cdot 10^{-11} \text{ m}$. D.h. diese Absorptionskante ist unmittelbar neben der K_α -Linie.

Standardabweichung: $s = 0,395^\circ \hat{=} 0,386 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Wie groß ist die Meßunsicherheit dieses Wertes?

Die Messunsicherheit beträgt $u = \frac{t}{\sqrt{n}} s = 0,51 \cdot s = 0,22^\circ \hat{=} 0,197 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Allerdings muss man auch berücksichtigen, dass es sehr große Ableseungenauigkeiten gibt: der Graph des Spektrums mit Zirkonfilter hat ein Offset von ca. 2 mm gegenüber dem anderen Graph, die Messkurve ist sehr unregelmäßig und zackig (ca. ± 4 mm Spielraum). Vor allem: Die Transmissionswerte sind schwer zu bestimmen bei den K-Linien wegen ihrer großen Steigung (schleifender Schnitt; Ungenauigkeit dort: ca. $\pm 10\%$), und nur sehr wenige, wie beschrieben nur sehr ungenau abzulesende Messwerte ergeben die Absorptionskante (die Ausgleichsgerade ist dort ziemlich frei hindurchgelegt, könnte auch verschoben sein – das ist unabhängig von der Messunsicherheit), d.h. die gesamte Unsicherheit ist deutlich größer als die Messunsicherheit.

Wodurch kommt diese Kante zustande?

Ab einer bestimmten Energie der Röntgenquanten können diese Zirkonatome angeregt werden und werden dabei absorbiert. Dies ist ein diskreter Vorgang; Quanten mit kleinerer Energie werden auf keinen Fall absorbiert (daher die Kante), höchstens reflektiert oder abgelenkt (genauso wie die höherenergetischen Quanten).

4. Versuch: Röntgenbeugung an Lithiumfluorid

Ziel

Aufzeichnung des Röntgenspektrums, Messung des Glanzwinkels der K_α -Linie der verschiedenen Beugungsordnungen, Bestimmung des Netzebenenabstands und der Gitterkonstante von Lithiumfluorid.

Aufbau

Siehe Versuch 1; der NaCl-Kristall wird durch einen LiF-Kristall ersetzt, ansonsten ist der Aufbau identisch.

Durchführung

Mit dem XY-Schreiber wird das Röntgenspektrum aufgezeichnet und aus dem Diagramm der Glanzwinkel der K_α -Maxima abgelesen. Aus der Bragg-Beziehung (s.o.) kann man den Netzebenenabstand ausrechnen:

$$d_{\text{LiF}} = \frac{\lambda \cdot n}{2 \cdot \sin \vartheta_n}; \quad \lambda_\alpha = 7,46 \cdot 10^{-11} \text{ m}; \quad \lambda_\beta = 6,60 \cdot 10^{-11} \text{ m};$$

Weil Lithium ebenso wie Natrium ein Alkalimetall und Fluor ebenso wie Chlor ein Halogen ist, ist die Gitterstruktur identisch, die Gitterkonstante ist analog $a_{\text{LiF}} = 2 \cdot d_{\text{LiF}}$.

Linie	Winkel	d_{LiF} [m]	a_{LiF} [m]
K_α -Linie 1. Maximum; $n = 1$	11,1 °	$1,94 \cdot 10^{-10}$	$3,87 \cdot 10^{-10}$
K_α -Linie 2. Maximum; $n = 2$	21,8 °	$2,01 \cdot 10^{-10}$	$4,02 \cdot 10^{-10}$
K_β -Linie 1. Maximum; $n = 1$	9,8 °	$1,94 \cdot 10^{-10}$	$3,88 \cdot 10^{-10}$
K_β -Linie 2. Maximum; $n = 2$	19,4 °	$1,99 \cdot 10^{-10}$	$3,97 \cdot 10^{-10}$

Mittelwert: $1,97 \cdot 10^{-10}$ m; Standardabweichung: $s = 0,0356 \cdot 10^{-10}$ m; Messunsicherheit bei einem Vertrauensniveau von 68,26%: $u = 0,021 \cdot 10^{-10}$ m;

$$\Rightarrow d = (1,97 \pm 0,04) \cdot 10^{-10} \text{ m}; \quad a = 2 \cdot d = (3,94 \pm 0,08) \cdot 10^{-10} \text{ m};$$

Fehlerquellen

Siehe oben (Versuch 1).

5. Versuch: Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

Ziel

Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums durch Messung der minimalen Röntgenquantenwellenlänge bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen.

Aufbau

Siehe oben; als Kristall wurde Lithiumfluorid verwendet, außerdem wurde die Beschleunigungsspannung bestimmt: an einem Anschluss am Röntgengerät liegt 1/1000 der Beschleunigungsspannung als Wechselspannung an; man muss also mit $\sqrt{2}$ multiplizieren, um die Amplitude zu erhalten.

Durchführung

$$\hbar = \frac{E \cdot 2 \cdot d_{\text{LiF}} \cdot \sin \vartheta}{c};$$

Hochspannungsstufe	Winkel	Hochspannung [V]	Planck'sches Wirkungsquantum [Js]
2	4,7 °	24320 ± 30	$7,1573 \cdot 10^{-34}$
3	5,15 °	27350 ± 30	$7,3386 \cdot 10^{-34}$
4	5,47 °	29560 ± 30	$6,8517 \cdot 10^{-34}$
5	5,89 °	32390 ± 30	$7,2144 \cdot 10^{-34}$

6	6,13 °	35070 ± 30	7,2576 · 10 ⁻³⁴
7	7,1 °	38040 ± 30	7,4130 · 10 ⁻³⁴
8	7,79 °	41860 ± 30	7,4459 · 10 ⁻³⁴
		Mittelwert:	7,2398 · 10 ⁻³⁴

Fehlerquellen

Weil die Graphen so unregelmäßig sind und vermutlich wegen Streuung nicht im kurzwelligen Bereich abrupt aufhören, sondern mehr oder weniger rund auslaufen, ist es schwierig, das kurzwellige Ende der Spektren zu bestimmen (Ablesegenauigkeit ca. 1 cm entspricht ca. 1°) (Messungenauigkeiten bei der Beschleunigungsspannungsmessung sind dagegen zu vernachlässigen). Deshalb kommt ein Wert für das Wirkungsquantum heraus, der etwas zu hoch ist.

6. Fragen

Warum ergibt sich aus der durch Beugung an einem Kristall gemessenen Winkelabhängigkeit der Intensität nicht direkt das Röntgenspektrum?

Wie man an den K-Linien erkennen kann treten im gemessenen Winkelbereich (bis 30°) auch Interferenzmaxima höherer Ordnung auf, d.h. das Spektrum 1. Ordnung wird im langwelligen Bereich von den Spektren höherer Ordnung überlagert. Außer bei den K-Linien ist das aber nicht direkt zu erkennen und deshalb auch nicht einfach zu trennen. Außerdem tritt (wegen des Photoeffekts bzw. Comptoneffekts) Sekundärstrahlung auf (weil Atome im Kristall angeregt werden), die ebenfalls das Spektrum überlagert.

Was ist der Unterschied zwischen Gitterkonstante und Netzebenenabstand?

Der Netzebenenabstand ist der Abstand zwischen zwei parallelen Ebenen im Kristall. Die Gitterkonstante gibt die Seitenlänge eines einzelnen Kristallwürfels an (allgemein: einer Elementarzelle), der mehrere Netzebenen umfassen kann (NaCl: zwei Netzebenenabstände).

Was ist der Unterschied zwischen Röntgen- und Gammastrahlung?

Beides ist elektromagnetische Strahlung; Röntgenstrahlung wird durch Abbremsen von schnellen Elektronen (Beschleunigungsspannungen im kV-Bereich) (= Röntgenbremsstrahlung) oder durch den Wechsel des Energieniveaus von Schalenelektronen (= charakteristische Röntgenstrahlung) erzeugt, d.h. die Energie der Photonen ist (wegen der Beschleunigungsspannung) im keV-Bereich. Gammastrahlung entsteht durch Wechsel des Energieniveaus im Atomkern, was mit deutlich höheren Energien verbunden ist, sodass Gammaquanten Energien im MeV-Bereich haben.

Vergleichen Sie die Funktionsweise einer Röntgenröhre mit der einer Franck-Hertz-Röhre.

Bei sowohl der Röntgen- als auch bei der Franck-Hertz-Röhre werden Glühelktronen durch Hochspannung beschleunigt und dann an Atomen abgebremst, wodurch im bremsenden Atom Elektronen auf höhere Energieniveaus angeregt werden und beim Zurückfallen auf niedrigere Energieniveaus Photonen erzeugen. Bei einer Röntgenröhre ist die Röhre möglichst evakuiert und die Beschleunigungsspannung sehr hoch (im Kilovolt-Bereich), damit die Elektronen bis zur Anode beschleunigt werden und dort beim Auftreffen wegen ihrer hohen kinetischen Energie Röntgenstrahlung erzeugen. Eine Franck-Hertz-Röhre ist dagegen mit einem Gas (typischerweise Quecksilberdampf) gefüllt, so dass die Elektronen mit den Gasatomen kollidieren und entweder diese durch elastische Stöße beschleunigen oder anregen, falls sie ausreichend schnell sind (das kann erst ab einer bestimmten Beschleunigungsstrecke, die einer bestimmten Beschleunigungsspannung entspricht, passieren, erst dann haben die Glühelktronen genug Energie; die angeregten Atome erzeugen

Photonen, dort leuchtet das Gas). Haben die Elektronen genug Energie, werden manche Gasatome ionisiert, und die abgelösten Elektronen werden ebenfalls wieder beschleunigt und stoßen, wie die Elektronen aus der Kathode, weitere Atome. Wegen der geringen Spannung zwischen Kathode und Anode von einigen Volt können nur die Valenzelektronen angeregt werden (im Gegensatz zur Röntgenröhre), sodass Photonen (je nach Gas) aus dem sichtbaren Lichtspektrum entstehen.