

Versuch 5

Röntgenstrahlung, Biologen

Versuchsziel

Physikalische Grundlagen

Röntgenstrahlung kann genau wie sichtbares Licht als elektromagnetische Welle beschrieben werden. Für die Absorption elektromagnetischer Wellen durch Materie gilt das Lambert-Beer-Gesetz, welches in diesem Fall folgende Form hat:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

J_0	:	Intensität des einfallenden Strahls
J	:	Intensität des auslaufenden Strahls
x	:	Schichtdicke
μ	:	Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient steigt mit zunehmender Elektronendichte, d.h. zunehmender Ordnungszahl der Elemente. Dies ist die Grundlage für alle Verfahren zur Erzeugung von Röntgenbildern (Röntgenaufnahme, Computer-Tomographie). Die Gleichung besagt damit, dass Materialien gleicher Elektronendichte nebeneinander nicht nachgewiesen werden können. Man erkennt also auf einem Röntgenbild **nicht** das Legoklötzchen im Magen oder in der Luftröhre eines Kleinkindes. Gleiches gilt für Haselnüsse, Mandeln, Rosinen, Rehbraten usw., wie in Monographien über Röntgendiagnostik nachzulesen ist.

Die Energie der Röntgenstrahlung wird, wie bei radioaktiver Strahlung auch, üblicherweise in eV (Elektronenvolt) angegeben. Beschleunigt man ein Teilchen, welches die Elementarladung e trägt, (z.B. ein Elektron) im Potentialgefälle 1V so erhält dies die Energie 1eV. In dieser Einheit lässt sich die maximale Energie der einzelnen Röntgenquanten aus den Betriebsdaten der Röntgenröhre errechnen. Zur Erzeugung der Röntgenstrahlen schießt man Elektronen in einer evakuierten Röhre, nach einer Beschleunigung durch 10–1000 kV, auf eine Anode aus einem Element mit hoher Ordnungszahl ($_{74}\text{W}$, $_{42}\text{Mo}$). Dabei werden die Elektronen abgebremst und geben insgesamt den größten Teil ihrer Energie in Form von Wärme ab. Etwa 1% der Energie wird in Röntgenstrahlung umgewandelt. Die maximale Energie eines Röntgenquants kann nicht größer als die Energie des aufprallenden Elektrons sein. Bei Kenntnis der Beschleunigungsspannung kann die Maximalenergie sofort in eV angegeben werden. Durch die Wechselwirkung der beschleunigten Elektronen mit dem Anodenmaterial entsteht ein kontinuierliches Bremsspektrum und das dies überlagernde diskrete, charakteristische Linienspektrum. Ein Teil des so erzeugten Gesamtspektrums einer Kupferanode soll in Teil 3 des Versuchs ausgemessen werden.

Mit 10–1000 keV ist die Energie der Röntgenstrahlung wesentlich höher als die Energie von chemischen Bindungen, die etwa bei 2–3 eV liegt. Daher wirkt Röntgenstrahlung bei der Absorption durch Materie ionisierend. Diese ionisierende Wirkung ist die Grundlage für die biologische Strahlenwirkung und für alle Nachweismethoden. Lässt man Röntgenstrahlen in einen Plattenkondensator einfallen, werden dort die Moleküle der Luft ionisiert. Wird nun eine genügend hohe Saugspannung angelegt, fließt ein Strom durch den Kondensator, der proportional zur einfallenden Strahlungsinten-

sität ansteigt. Die „Ionisationskammer“ arbeitet nach diesem Messprinzip. In Teil 2 des Versuchs soll die Kennlinie einer solchen Messanordnung aufgenommen werden.

Bei den anderen Versuchsteilen wird die Röntgenstrahlung mit dem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen. Mit diesem gasgefüllten Zählrohr kann man einzelne Ionisationsereignisse nachweisen. Die Anzahl der Ionisationen pro Zeiteinheit ist ein Maß für die Intensität der einfallenden Strahlung. Da wir aber dauernd einer Hintergrundstrahlung aus dem Weltraum und der Umgebungsradioaktivität ausgesetzt sind, wird mit dem Zählrohr auch bei ausgeschalteter Röntgenröhre ein Nulleffekt gemessen.

Biologische Wirkung

Bei der Untersuchung der biologischen Strahlenwirkung wurde bald die DNA als kritisches Zielmolekül identifiziert. Die Wechselwirkung mit der Strahlung kann zur Bildung von Ionenradikalen und Strangbrüchen führen (direkter Effekt). Ein großer Teil der Schäden wird durch die bei der Radiolyse des Wassers entstehenden Radikale erzeugt (indirekter Effekt). Die Radikalbildung an Basen kann z.B. zu Punktmutationen oder zur Vernetzung mit Proteinen oder einem anderen DNA-Strang führen. All diese Schäden entstehen auch durch die natürliche Hintergrundstrahlung. Normalerweise werden Strahlenschäden vom Organismus erkannt und durch Reparatursysteme eliminiert. Da diese Reparatur aber immer mit einer Fehlerquote behaftet ist, kann es zu bleibenden genetischen Veränderungen kommen. Diese können dazu führen, dass eine Zelle zur Tumorzelle entartet. Die Ausbildung der Primärschäden erfolgt, in Abhängigkeit von der Dosis, nach einem stochastischen Prozess. Darum existiert keine Schwelldosis, unterhalb derer kein genetischer Schaden auftritt. Im Gegensatz dazu treten somatische Schäden, wie Röntgenerythem, Katarakt (grauer Star) und Strahlenkrankheit erst oberhalb einer Schwelldosis auf. Zurzeit ist bei der gesetzlichen Festlegung von Grenzwerten für die zulässige Strahlenbelastung die Erhöhung des individuellen Krebsrisikos ausschlaggebend.

Versuchsteile

0. Bedienung des Röntgengeräts 35kV
1. Durchleuchtung eines Gegenstandes, Kontrastmittel
2. Prinzip der Ionisationskammer
3. Bestimmung der K_{α} - und K_{β} -Linie einer KupferAnode
4. Strukturbestimmung von Einkristallen mit Hilfe der Laue Methode

Durchführung

Teil 0 – Bedienung des Röntengeräts 35kV

Das Röntengerät wird **geöffnet** indem man den **roten Knopf drückt**, nach **rechts dreht** und anschließend die Scheibe nach links aufschiebt. Nach dem Verschließen der Scheibe muss der rote Knopf wieder nach links gedreht werden und wieder ganz heraus sein (Keine Gewalt anwenden!). Ist er dies nicht, so lässt sich die Hochspannung aus Strahlenschutzgründen nicht aktivieren. Zur Inbetriebnahme wird das Gerät zunächst mit dem Schalter „**0-I**“ an der Rückseite eingeschaltet. Dann wird mit dem Knopf unter „**HV**“ und „**I**“ und dem **Drehrad** die Spannung bzw. der Strom eingestellt und **jeweils** mit dem **Enter** Knopf bestätigt. Nun kann man über den Knopf „**HV-ON**“ (High-Voltage) die Hochspannung aktivieren.

Sollte dies nicht funktionieren, drücken sie den roten Sicherungsknopf einmal und versuchen es dann erneut!

Teil 1 – Kontrastmittel

Die Unterscheidung von Organen und dem sie umgebenden Gewebe ist in der radiologischen Diagnostik schwierig. Aus diesem Grund werden Kontrastmittel eingesetzt, um z.B. Verdauungstrakt oder Blutgefäße im Röntgenbild sichtbar zu machen. Da Iod ($_{53}\text{I}$) eine wesentlich höhere Ordnungszahl besitzt als die Elemente des organischen Gewebes ($_{1}\text{H}$, $_{6}\text{C}$, $_{7}\text{N}$, $_{8}\text{O}$, $_{15}\text{P}$, $_{16}\text{S}$) ist es aufgrund seiner hohen Absorptionsfähigkeit besonders gut als Kontrastmittel geeignet. Die Rolle von (nicht radioaktivem) Iod als Kontrastmittel in der Röntgendiagnostik ist nicht zu verwechseln mit der Rolle von radioaktiven Iod Isotopen in der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie, vorwiegend von Schilddrüsenerkrankungen.

!! Achtung !! Es darf keine Flüssigkeit in das Innere des Experimentierraums gelangen. Deshalb ist stets ein fester Anschluss der Schläuche zu gewährleisten und darauf zu achten, dass **vor der Entfernung des Modells** aus dem Experimentierraum die **Schlauchenden mit den Stopfen verschlossen sind**.

Dieser Versuch wird als Demonstrationsversuch vom Betreuer durchgeführt:

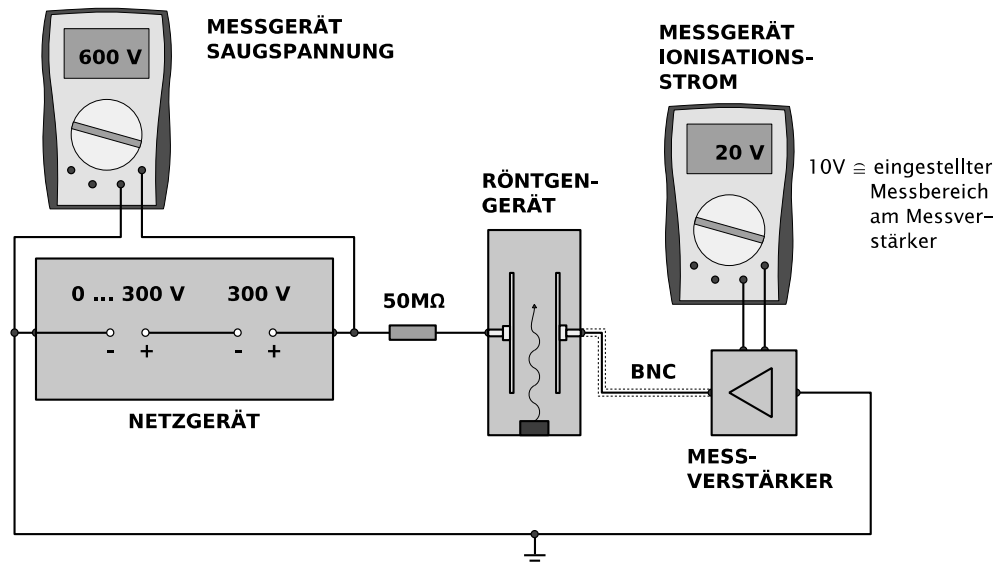
Falls kein Kontrastmittel vorhanden ist kann dies vom Betreuer hergestellt werden indem 50g Kaliumiodid in 100ml Wasser gelöst werden. Das **leere Adermodell** wird in dem kleinen Sicherheitstrog direkt **vor den Leuchtschirm** gebracht. Durch den Arbeitsschacht werden die **Schläuche** des Modells **nach außen** geführt. Eine der beiden Kunststoffspritzen wird mit Kontrastmittel gefüllt. Anschließend sind beide Spritzen mit den Schlauchenden zu verbinden. Dabei ist darauf zu achten, dass die **gefüllte Spritze** mit dem **unteren Einlass** des Modells verbunden ist. Die Durchleuchtung erfolgt **ohne Blendentubus** bei $U_A = 35\text{kV}$ und $I_A = 1\text{mA}$. Zur Beobachtung des Kontrastmittelverlaufs im Modell ist das Zimmer abzudunkeln. Nun wird langsam aus der gefüllten Spritze das Kontrastmittel in das Modell gedrückt.

Bevor das Modell nach Versuchsende aus dem Experimentierraum genommen wird, ist das Kontrastmittel aus dem Modell zu entfernen. Dazu wird die mit dem **unteren Einlass verbundene Spritze entfernt** und das **freie Schlauchende in das Vorratsgefäß** (Becherglas) geführt. Mit der anderen Spritze wird das Kontrastmittel nun herausgedrückt. Schließlich sind die freien Schlauchenden mit den **Kunststoffstöpseln zu verschließen**. Erst dann dürfen die Schläuche durch den Arbeitskanal gezogen werden.

Zur unbedingt erforderlichen Reinigung wird das Modell mehrmals mit Hilfe einer Spritze mit Wasser durchspült. Soweit wie möglich ist Restwasser aus dem Modell zu entfernen.

Teil 2 – Prinzip der Ionisationskammer

Die Luftmoleküle in einem offenen Plattenkondensator werden durch Röntgenstrahlung ionisiert und durch die am Plattenkondensator angelegte Saugspannung in dessen Richtung beschleunigt. Diese Anordnung ist als Ionisationskammer bekannt. Aus Sicherheitsgründen ist der positive Ausgang der variablen Gleichspannungsquelle (0-600V) über einen Schutzwiderstand von $50\text{M}\Omega$ an die rote Buchse des Plattenkondensators angeschlossen. Ein Digitalmultimeter dient zur Messung der Kondensatorspannung U_C , das andere wird mit dem Messausgang des Gleichstrom-Messverstärkers verbunden um den Ionisationsstrom I_C zu ermitteln.



Der am Gleichstrommessverstärker eingestellte Messbereich entspricht 10V am Ausgang. Am Messverstärker ist ein Messbereich von 10nA einzustellen. An dem zugehörigen Multimeter ist demnach ein Bereich von 20V einzustellen. Die Digitalmultimeter gehen nach gewisser Zeit in den Stand-by-Modus. Um sie wieder aufzuwecken muss man deren Powerknopf zweimal drücken.

Nach einer Einschaltzeit von ca. 5min sollte bei maximaler Kondensatorspannung (**höchstens 500V!**) und ohne Betrieb der Röntgenröhre kein Strom zu messen sein (evtl. mit Nullsteller am Verstärker nachregeln). Bitte verwenden Sie den Blendentubus mit $d=5\text{mm}$ Lochdurchmesser.

Die Spannung kann entweder im Bereich von 0V-300V oder 300V-600V variiert werden. Um den Bereich zu wechseln ist es nötig am Netzgerät umzustecken. **Dies darf NUR der Betreuer!**

Messen Sie nun den durch den Kondensator fließenden Ionisationsstrom:

1. Als Funktion der Kondensatorspannung U_C . Die Saugspannung U_C ist zwischen 0V und 500V in 50V Schritten zu variieren. Die Anodenspannung ist dabei konstant $U_A=35\text{kV}$ und der Anodenstrom $I_A=1\text{mA}$.
2. Als Funktion der Röhrenspression bei konstanter Saugspannung von $U_C=500\text{V}$, wobei nun die Anodenspannung zu variieren ist (10-35kV in 5kV Schritten) und der Anodenstrom mit $I_A=1\text{mA}$ wieder konstant bleibt.

Die beiden Messreihen sind graphisch darzustellen.

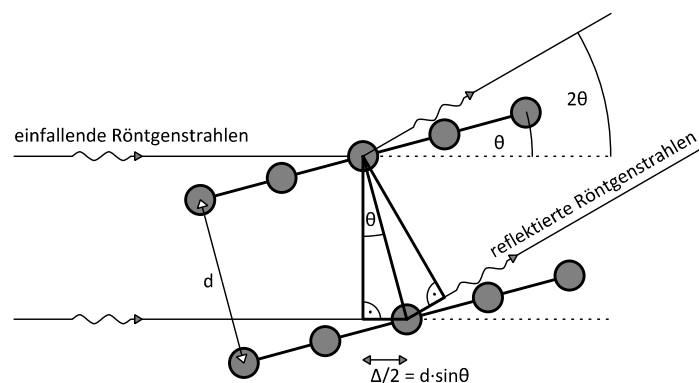
Teil 3 - Bragg

Während Röntgenstrahlen in der Medizin im Wesentlichen wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit und ionisierenden Wirkung zum Durchleuchten und zur Therapie eingesetzt werden, benutzt man sie in den Naturwissenschaften meistens zur Strukturaufklärung. Auf einem Kristall auftreffende Röntgenstrahlen werden an den Netzebenen des Kristalls reflektiert. Eine Verstärkung durch konstruktive Interferenz tritt nur auf, wenn ihre Wellenlänge der Braggschen Gleichung genügt.

$$\Delta = \lambda = 2d \sin \theta$$

Δ : Gangunterschied λ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung
 d : Abstand der Kristallebenen θ : Glanzwinkel (Winkel zwischen Strahl und Netzebene)

Die Skizze veranschaulicht diesen Zusammenhang



Man kann unter Anwendung dieser Gleichung

1. bei bekannter Wellenlänge λ die Abstände d der Netzebenen im Kristall bestimmen,
2. mit Hilfe einfach gebauter Kristalle mit bekannter Gitterkonstante Röntgenlicht in sein Spektrum zerlegen.

Im Versuch sollen die K_{α} - und K_{β} -Linien des charakteristischen Spektrums von Kupfer aus dem die Anode der Röntgenröhre besteht, gemessen werden. Dazu wird ein Lithium-Fluorid Kristall ($d=201\text{pm}$) in den Strahlengang gebracht und die Impulsrate (Meßzeit 30s) in Abhängigkeit vom Drehwinkel bestimmt.

(Älteres Gerät:) Stellen Sie zuerst eine Röhrenspannung von 20kV ein. Wählen Sie anschließend mit dem rechten Drehschalter das Symbol „Zählrohr“ und drehen Sie den Knopf für die Geschwindigkeitsvorwahl auf V_3 . Durch Drücken der Knöpfe zur Winkeleinstellung bringen Sie nun das Zählrohr in eine Position bei ca. 38° . Jetzt wählen Sie die Geschwindigkeit V_2 . Bei dieser Einstellung ändert sich der Winkel in Schritten von $0,2^\circ$. Stellen Sie nun das Zählrohr genau auf 38° . Danach wird der rechte Drehknopf auf das Symbol „Kristall“ gestellt und nach derselben Methode zwischen Kristall und Röntgenstrahl ein Winkel von 19° eingestellt. Wenn Sie jetzt das Symbol „Zählrohr + Kristall“ wählen, werden bei einer Winkeländerung Zählrohr und Kristall synchron bewegt. Da der Winkel nur in Schritten von $0,2^\circ$ geändert werden kann, können Sie nicht in Schritten von $0,5^\circ$ messen. Um eine hinreichend genaue Messkurve zu erhalten müssen Sie, außer bei den ganzzahligen Einstellungen, auch je einen Zwischenwert bei $0,4^\circ$ **oder** $0,6^\circ$ aufnehmen. Messen Sie bis zu einem Winkel von 25° zwischen Röntgenstrahl und Kristall. (/Älteres Gerät.)

(Neueres Gerät:) Stellen Sie zunächst eine Röhrenspannung von 35kV und einen Strom von 1mA ein und aktivieren Sie die Spannung „HV on“. Unter dem Punkt Goniometer wählen Sie per Knopfdruck das „Zählrohrsymbol“ und stellen Sie das Zählrohr über das Drehrad auf 0°. Selbiges führen Sie für den „Kristall“ durch. Nun wählen Sie „Zählrohr + Kristall“ und stellen dies auf 19°. Die Messzeit wird über den Punkt „Gate“ auf 30s eingestellt und mit „Enter“ bestätigt. Dies bedeutet, dass sich die Anzeige Impulse/s (sichtbar, wenn Zählrohr + Kristall gewählt ist) alle 30s erneuert und das über 30s gemittelte Ergebnis anzeigt. Um korrekt zu messen müssen Sie also nach einer Winkeländerung das nächste Ergebnis ignorieren und erst das übernächste Ergebnis notieren. Messen Sie nun alle Impulsraten zu den Winkeln zwischen 19,0° und 25,0° in 0,5° Schritten. (/Neueres Gerät.)

Tragen Sie die Impulsrate als Funktion des Winkels zwischen Röntgenstrahl und Kristall in eine Graphik ein und markieren Sie die K_{α} - und K_{β} -Linie. Eine Messzeit von 30s ist für die Bestimmung der Impulsraten ausreichend.

Berechnen Sie die Energie der beiden charakteristischen Linien nach der Beziehung

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad hc = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ eVm.}$$

Teil 4 – Laue Beugung

In diesem Versuchsteil wird ein Einkristall mit polychromatischer Röntgenstrahlung durchstrahlt. Das resultierende Beugungsmuster wird fotografiert und ausgewertet. Zur Aufklärung der räumlichen Struktur von Biomakromolekülen wird vorwiegend Röntgenstrukturanalyse und NMR eingesetzt. Es lohnt sich also für Ihr weiteres Studium, dass Sie als Biologen/Biochemiker versuchen die Grundlagen der Kristallographie und der Röntgenstrukturanalyse zu verstehen. Weder diese Anleitung noch die Vorlesung kann hier das Lesen weiterer Literatur ersetzen.

Informieren Sie sich über die Begriffe: Kristallgitter, Basis, sc, fcc, LiF, Millersche Indizes, Interferenz, Bragg-Gleichung (siehe Teil 3) und Laue Methode.

Hier eine kleine vorab Hilfe zu den Millerschen Indizes. Die Orientierungen von gedachten Flächen im Kristallgitter, welche für die Streuung von Röntgenstrahlen relevant sind, werden in runden Klammern (hkl) geschrieben. Dabei sind h,k und l das Multiplikativinverse der Achsenschnittpunkte x, y und z, jeweils multipliziert mit einer ganzen Zahl a, so dass die Ergebnisse (also h, k und l) ganze Zahlen sind. Sehen Sie sich das Beispiel an:

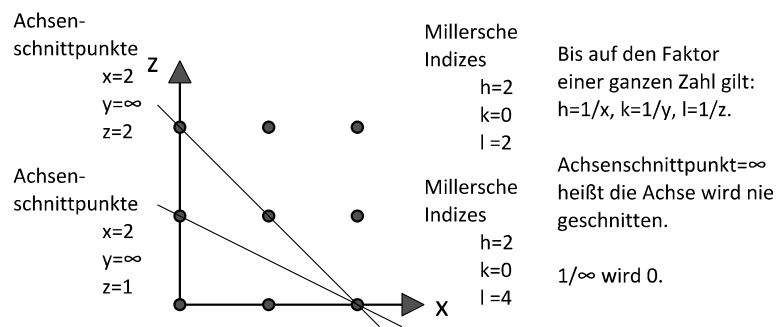


Abbildung 1

Nehmen wir z.B. als Achsenschnittpunkte $x=2, y=\infty$ und $z=1$, damit ergibt sich $h = \frac{a}{x} = \frac{a}{2}, k = \frac{a}{y} = \frac{a}{\infty} = 0$ und $l = \frac{a}{z} = \frac{a}{1} = a$. Zusammengefasst ist also $h=0,5a, k=0$ und $l=a$. Dies sind bis auf 0,5 alles ganze Zahlen. Damit nun alle Produkte ganze Zahlen ergeben muss a (eine ganze Zahl) folglich mindestens 2 sein, d.h. (hkl) ist (102). Im Beispiel oben ist dies mit (204) bezeichnet. Hier wurde a also gleich vier gesetzt. Dadurch wird zusätzlich berücksichtigt, dass LiF ein fcc-Gitter und kein sc-Gitter bildet (diese Details könnte man unter dem Begriff „Strukturfaktor“ nachschlagen, was allerdings zu weit führen würde).

Daneben gibt es auch noch ganz normale Vektoren, durch die also Richtungen im Kristall festgelegt werden können (vgl. Abb. 3, Ebene (204) und Richtung [204]). Im sc-Gitter stehen (siehe auch Abb. 4) die Ebene (204) und die Richtung [204], bzw. (hkl) und [hkl] senkrecht zueinander. Daraus wird auch klar, warum die Millerschen Indizes so konstruiert worden sind, wie oben beschrieben wurde.

Laue-Diagramme werden bei Durchstrahlung von Einkristallen mit polychromatischer Röntgenstrahlung erzeugt. Die Methode wird hauptsächlich zur Bestimmung von Kristallsymmetrien und zur Orientierung von Kristallen benutzt. Eine vollständige Analyse der Diagramme ist nur bei einfachen Kristallstrukturen möglich. In diesem Versuch wird das Laue-Diagramm eines LiF(100)-Einkristalls, der ein kubisch flächenzentriertes (fcc = face centered cubic) Kristallgitter bildet, aufgenommen.

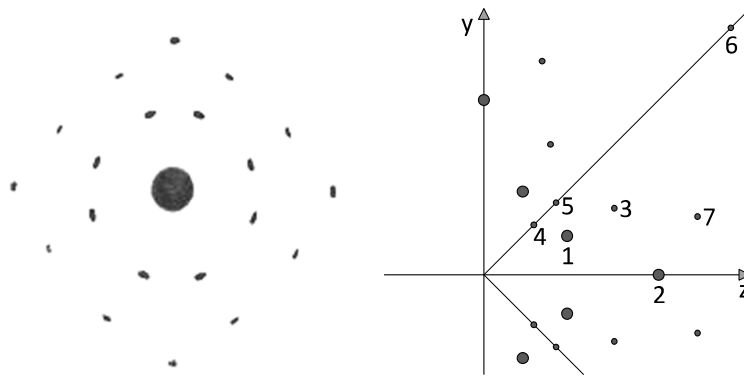


Abbildung 2

Eine Drehung des obigen Beugungsmusters um 90° um die Richtung des Primärstrahls (großer Fleck in der Mitte des Bildes) bringt das Muster wieder zur Deckung. Da der Primärstrahl hier senkrecht auf die (100)-Fläche des LiF-Kristalls trifft (s. Abb. 3 und 4), ist die [100]-Kristallrichtung eine vierzählige Symmetrieachse. Die Intensität der einzelnen Reflexe hängt sowohl von der reflektierenden Fläche als auch von der spektralen Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlung ab.

Eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für konstruktive Reflexion an den einzelnen Netzebenen ist die Bragg-Bedingung (siehe Teil 3).

Mit der Gitterkonstanten a eines kubischen Kristalls gilt für die Abstände $d(hkl)$ zwischen den einzelnen Netzebenen:

$$d(hkl) = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Ist L der Abstand eines Reflexes vom Zentrum des Laue Diagramms und D die Entfernung des Films vom Kristall (wie im Bild unten), so beträgt der aus dem Experiment ermittelte Glanzwinkel θ_{exp} :

$$\theta_{exp} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{L}{D} \right); \quad L = \sqrt{y^2 + z^2}; \quad (1)$$

Darin bedeuten y und z die Koordinaten des Reflexes in einem rechtwinkligen Koordinatensystem mit seinem Ursprung im Zentrum des Diagramms/Photos.

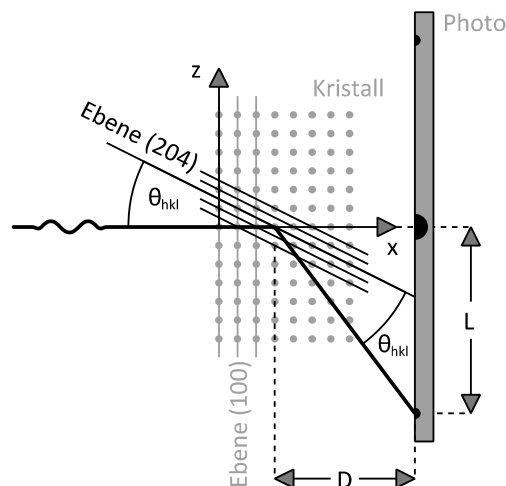


Abbildung 3

Wenn der Röntgenstrahl mit einer bestimmten kristallographischen Richtung $[h^*k^*l^*]$ übereinstimmt (hier ist es die $[100]$ -Richtung) und auf eine Kristallfläche (hkl) trifft, dann ist der Einfallswinkel α auf diese Fläche (siehe Abb. 4) durch das Skalarprodukt aus dem Normalenvektor dieser Fläche und der Einfallrichtung bestimmt (erinnern Sie sich an die Bildung des Skalarprodukts zweier Vektoren, an die Berechnung des Betrags eines Vektors und an die Formel $\vec{a} \circ \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha$):

$$\cos \alpha = \frac{hh^* + kk^* + ll^*}{\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2) \cdot (h^{*2} + k^{*2} + l^{*2})}} \quad (2)$$

Für den Glanzwinkel gilt dann: $\theta_{\text{cal}} = 90^\circ - \alpha$.

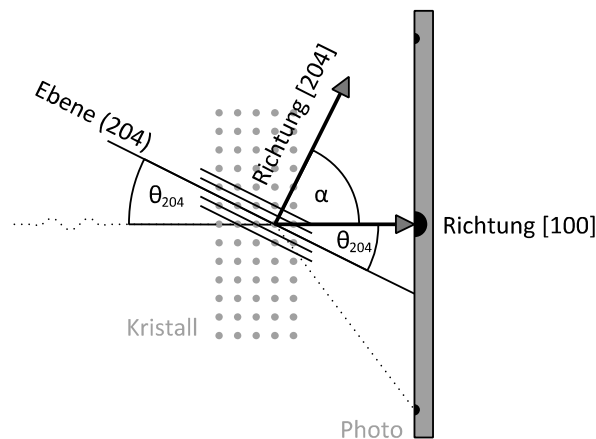


Abbildung 4

Wegen $\cos(90^\circ - \theta) = \sin(\theta)$ und mit $[h^*k^*l^*] = [100]$ folgt somit aus Formel (2):

$$\sin \theta_{\text{cal}} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3)$$

Man berechnet nun für alle Netzebenen niedriger (hkl) -Indizierung mit Formel (3) die Werte θ_{cal} und außerdem mit (1) aus dem Diagramm die Werte θ_{exp} . Eine Zuordnung der Reflexe zu den entsprechenden Netzebenen ist dann erreicht, wenn zum einen die Winkel übereinstimmen ($\theta_{\text{cal}} = \theta_{\text{exp}}$) und zum anderen die Bedingung $k/l = y/z$ erfüllt ist, wobei y und z die Koordinaten der Reflexe sind. Ein Teil dieser Arbeit wurde Ihnen mit der Tabelle unten bereits abgenommen. **Überprüfen** Sie mindestens je einen Wert stichprobenartig (dies können Sie auch schon vorher zuhause erledigen). Die Gitterkonstante a von LiF beträgt 402,6 pm.

Aus Symmetriegründen braucht nur 1/8-Segment des Diagramms ausgewertet werden (siehe Abb. 2, bitte auch die **Punkte wie in der Abbildung bezeichnen**, damit dies mit der Tabelle konsistent ist). Die übrigen Reflexe ergeben sich durch Permutation der Indizes und Wechsel des Vorzeichens. Es wird sich bei der Auswertung zeigen, dass nur Reflexe zu beobachten sind, deren Millerindizes entweder ausschließlich gerade oder ungerade sind. Dies liegt daran, dass wir in den Rechnungen oben mit einem einfach-kubischen Gitter (sc) gerechnet haben. Berücksichtigt man die fcc Struktur, was den Rahmen dieser Praktikumsanleitung noch mehr sprengen würde, so ergibt sich gerade eine Auslöschung der anderen Reflexe.

Reflex	y/mm	x/mm	L/mm	h	k	l	$\theta_{\text{exp}}/^\circ$	$\theta_{\text{cal}}/^\circ$	k/l	y/z	d/pm	$\lambda/\mu\text{m}$
				1	1	1		35,26	1,00		232,6	268,4
				1	1	3		17,55	0,33		121,4	73,2
				1	3	3		13,26	1,00		92,4	42,4
				3	1	5		30,47	0,20		68,1	69,0
				2	0	4		26,57	0,00		90,1	80,5
				2	2	4		24,09	0,50		82,2	67,1
				2	4	4		19,47	1,00		67,1	44,7
				4	0	6		33,69	0,00		55,9	61,9

Nun zur praktischen Durchführung. An dem Aufbau mit der Molybdän-Röntgenröhre wird ein Blendentubus mit 1mm Lochdurchmesser verwendet. Über diesen steckt man den Halter für Laue-Aufnahmen. In diesen wiederum setzt man den LiF-Kristall mit seinen Stiften so ein, dass die runden Seiten des Kristallhalters in Richtung der Röntgenröhre zeigen. Den in dem Filmhalter mit den Magnetstreifen befestigten Film positioniert man in einem Abstand von $D = 1,5\text{-}2,0\text{ cm}$ vom Kristall (s. Abb. 5). Die genaue Bestimmung dieses Abstandes mit dem Messschieber ist für die spätere Auswertung wichtig. Die Filmebene soll zur Kristalloberfläche parallel verlaufen.

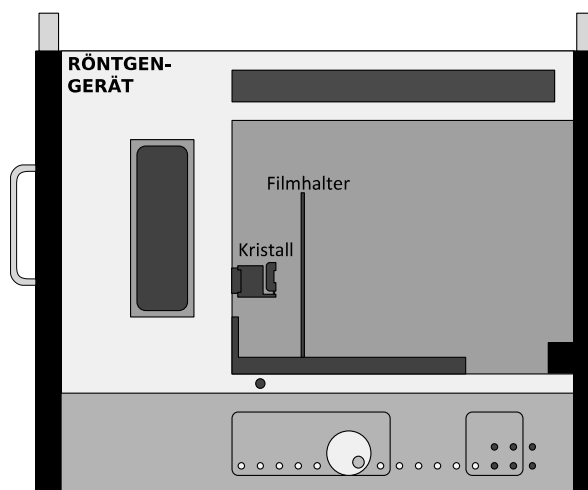


Abbildung 5

Die Röntgenröhre wird mit maximaler Leistung betrieben (35kV, 1mA). Die Belichtungszeit beträgt 30min und wird folgendermaßen eingestellt und aktiviert:

- Die Röhrenbetriebsdaten einstellen und jeweils mit „Enter“ bestätigen.
- „Timer“ aktivieren und mit dem Stellrad 30 Minuten einstellen und anschließend wieder mit „Enter“ bestätigen.
- Die Hochspannung aktivieren („HV“-Taste) und sofort danach die „Start“-Taste drücken.

Jetzt erfolgt die Durchstrahlung, die nach der eingestellten Belichtungszeit automatisch beendet wird. Der Polaroid Röntgenfilm wird nun nach der im Praktikum ausliegenden Anleitung vom Betreuer (oder selbst) entwickelt.

Zur Auswertung vermessen Sie das so erzeugte Bild (d.h. 1/8-Segment davon) und nutzen die obigen Formeln um die **obenstehende Tabelle** Ihren **Messungen entsprechend** zu **vervollständigen**.

Fragen zum Versuch

1. Was sind Röntgenstrahlen?
2. Wie erzeugt man Röntgenstrahlen und wie ist eine Röntgenröhre aufgebaut?
3. Wie groß ist der Wirkungsgrad einer Röntgenröhre?
4. Wovon ist die Energie der Röntgenstrahlung abhängig?
5. Was ist kontinuierliche Röntgenstrahlung (Bremsstrahlung)?
6. Was ist die charakteristische Röntgenstrahlung?
7. Wie entsteht Streustrahlung und wie kann ihr Einfluss im Röntgenbild verhindert werden?
8. Welche Stoffe verwendet man zur Abschirmung von Röntgenstrahlung?
9. Mit welchen physikalischen Begriffen kann man Röntgenstrahlung charakterisieren?
10. Welche Wirkung haben Röntgenstrahlen?
11. Welche Methoden zum Nachweis von Röntgenstrahlung gibt es?
12. Wozu wird Röntgenstrahlung in Medizin und Technik verwendet?
13. Wie arbeitet eine Ionisationskammer?
14. Wie sind Ionendosis, Energiedosis und Äquivalentdosis definiert?
15. Welche sind die drei wichtigsten Grundregeln des Strahlenschutzes?
16. In Teil 4 (Laue) sind einige Aufgaben für Sie versteckt, die Sie bitte zur Vorbereitung erledigen.