

Versuch B 10: Versuch mit Röntgenstrahlen

1. Literatur: Harbeck, Physik Oberstufe
 Gerthsen, Kneser, Vogel, Physik
 Pohl III, Optik u. Atomphysik
 Finkelnburg, Atomphysik
 Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen

Stichworte: Erzeugung von Röntgenstrahlen, Röntgenbremsspektrum, Bohrsches Atommodell, Termschema der Atome, charakteristisches Röntgenspektrum, Moseley Gesetz, Absorptionsspektrum, Kristallgitter (Netzebenen), Braggsches Reflexionsgesetz, Nachweis von Röntgenstrahlung, Funktionsweise eines Zählrohres

2. Grundlagen

2.1 Röntgenbremsspektrum

In einer Röntgenröhre (siehe schematische Darstellung in Abb. 1) erzeugt man durch thermische Emission aus einer Glühkathode K freie Elektronen, bündelt sie mit einem Wehneltzylinder W und beschleunigt sie (im Vakuum) zur Anode A hin durch die Anodenspannung U_A .

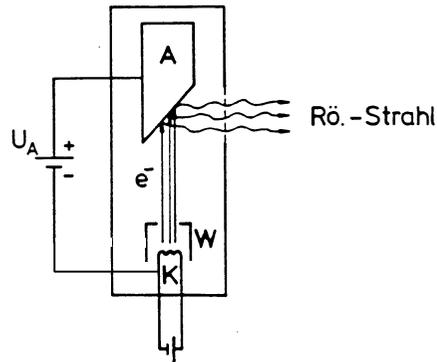


Abb.1:

Röntgenröhre
(schematisch)

Beim Auftreffen auf die Anode (Material z.B. W oder Cu) werden diese Elektronen in den Elektronenhüllen der Atome der Anode durch Coulombwechselwirkung (was ist das?) abgebremst. Dabei wird ein Teil ihrer

kinetischen Energie ($\frac{1}{2} mv^2 = eU_A$) in elektromagnetische Strahlung, der andere (größere) Teil in Wärme umgewandelt. Es entsteht Röntgenstrahlung mit einem kontinuierlichen Spektrum, dem sog. *Röntgenbremsspektrum* (weißes Röntgenlicht, erstmals entdeckt von W. Röntgen, 1895).

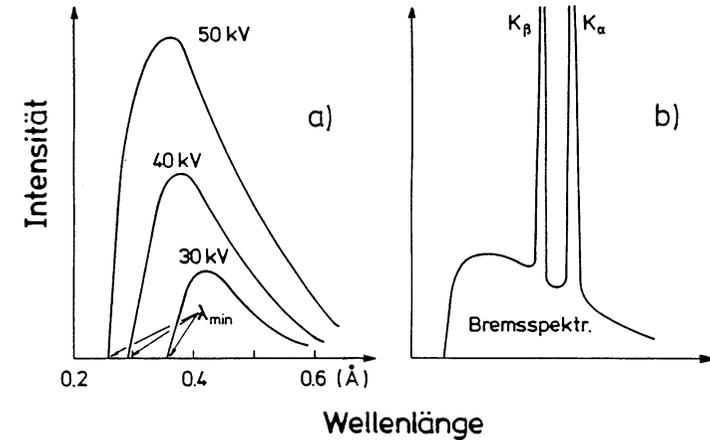


Abb.2: a) Röntgenbremsspektrum, b) Röntgenbremsspektrum und Linienpektrum (schematisch)

Abbildung 2a zeigt die spektrale Verteilung der Röntgenbremssstrahlung. Das Bremsspektrum ist vom Anodenmaterial unabhängig und besitzt eine allein von der vorgegebenen Anodenspannung abhängige, kurzwellige Grenze λ_{\min} . An dieser Grenze wird die gesamte kinetische Energie eines Elektrons auf einmal in Strahlung umgesetzt und es gilt die Beziehung:

$$\frac{1}{2} mv^2 = eU_A = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (1)$$

Dies bedeutet, λ_{\min} bzw. die Maximalfrequenz ν_{\max} des Röntgenbremsspektrums sind bei vorgegebener Spannung U_A allein durch die Elementarladung e und das Plancksche Wirkungsquantum h bestimmt.

Für viele technische Zwecke und auch im vorliegenden Versuch liegen die Beschleunigungsspannungen U_A im Bereich 20 - 50 kV und damit die Wellenlängen des Röntgenlichts (gem. Gl. 1) im Bereich unter $1 \text{ \AA} (= 10^{-10} \text{ m})$.

2.2 Linienspektrum

Das in Abb. 2a gezeigte Bremspektrum ist meist noch von einer charakteristischen Eigenstrahlung der Atome der Anode überlagert. D.h. bei bestimmten Wellenlängen treten zusätzliche Röntgenlinien mit im Vergleich zum Bremspektrum hoher Intensität auf (siehe Abb. 2b). Diese Linien werden durch elektronische Übergänge in den Atomen des Anodenmaterials hervorgerufen.

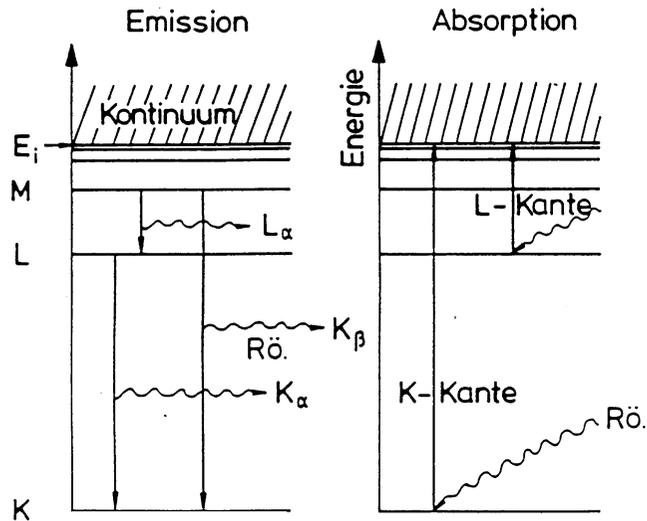


Abb.3: Termschema eines Atoms mit Vorgängen bei der Emission und Absorption von Röntgenlicht (E_i = Ionisierungsenergie)

Ihr physikalischer Ursprung kann im Rahmen des Bohrschen Atommodells leicht verstanden werden (vergl. Abb.3): Ein auf die Anode auftreffendes Elektron schlägt z.B. aus der (energetisch) untersten Schale (K-Schale) eines Atoms der Anode ein Elektron heraus. Beim Übergang eines Elektrons, z.B. aus der nächsthöheren Schale (L-Schale) des Atoms, auf den freien Platz in der K-Schale wird ein der Energiedifferenz der Schalen $\Delta E = h \nu = h c / \lambda$ entsprechendes charakteristisches Strahlungsquant (Röntgenphoton) ausgesandt, durch Übergänge z.B. von L nach K erscheint im Spektrum die sog. K_α -Röntgenlinie.

Übergänge von der M-Schale auf die K-Schale führen zur K_β -Linie, analog

Übergänge von M nach L zur L_α -Linie, usw. Je nach energetischer Lage der Terme eines Atoms entsteht so das charakteristische oder Linienspektrum. Die Änderung der Frequenz bzw. Wellenlänge dieser Linien von Element zu Element des Anodenmaterials ist vom Quadrat der Ordnungszahl Z des betreffenden Elements im Periodensystem abhängig. Es gilt z.B. für die K_α -Linie:

$$\nu_{K_\alpha} = \frac{3}{4} (Z - \sigma)^2 Ry, \quad \sigma = 1 \quad \text{Moseley - Gesetz} \quad (2)$$

mit der Rydbergfrequenz $Ry = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$. Die Abschirmkonstante σ berücksichtigt die Abschirmung der Kernladung durch kernnahe Atomelektronen.

2.3 Absorptionsspektrum

Die Schwächung von Röntgenstrahlung in Materie wird verursacht durch klassische (elastische) Streuung (Richtungsänderung der Röntgenphotonen ohne Energieabgabe an die durchstrahlte Materie), Comptonstreuung (teilweise Energieabgabe des Photons an freie oder lose gebundene Elektronen) und durch Absorption. Das Absorptionsvermögen eines Stoffes wird durch den Absorptionskoeffizienten τ_A beschrieben. Er hängt stark von der Ordnungszahl Z des Absorbermaterials und der Wellenlänge λ der Strahlung ab ($\tau_A \sim Z^4 \lambda^3$). Bei der Absorption werden Elektronen von inneren Schalen der Atome des Absorbermaterials unter Aufnahme der gesamten Photonenenergie energetisch angeregt. Aus der Darstellung, Abb.3, geht hervor, dass im Absorptionsspektrum der Röntgenstrahlung keine charakteristischen Linien - wie bei der Emission - beobachtet werden können. Dies würde z.B. bei der K_α -Linie das Anheben eines Elektrons von der K- auf die L-Schale erfordern. Diese Schale und auch die nächsthöheren sind jedoch i.a. bei den Elementen höherer Ordnungszahlen besetzt, so dass Übergänge bei Absorption bis zur Ionisierungsenergie oder höher (ins sog. Kontinuum) erfolgen müssen. Es entsteht das beispielhaft in Abb. 4 gezeigte Röntgenabsorptionsspektrum, in dem neben dem Anstieg ($\tau_A \sim \lambda^3$) sog. Absorptionskanten bei den für das Termschema des betreffenden Elements charakteristischen Wellenlängen auftreten. Die energetische Lage der Kanten (s. Abb. 3) ist wieder - bei Übergang von Element zu Element - durch das Moseley Gesetz, ähnlich (Gl. 2) gegeben.

$$\nu_K = (Z - \sigma)^2 Ry, \quad \sigma \approx 1 \quad (3)$$

Durch geschickte Kombination des Anodenmaterials der Röhre (im vorliegenden Versuch Molybdän, $Z = 42$) und eines in den Strahlengang des austretenden

Röntgenspektrums geschalteten, absorbierenden Filtermaterials (hier z.B. Zirkon, $Z = 40$) kann man erreichen, dass das austretende Röntgenspektrum (Bremspektrum und charakteristisches Mo-Spektrum) im kurzwelligen Bereich so stark geschwächt wird, dass im wesentlichen nur die Mo K_{α} -Linie, also monochromatisches Röntgenlicht mit $\lambda_{K_{\alpha}} = 0,711 \text{ \AA} = 71,1 \text{ pm}$ erhalten bleibt.

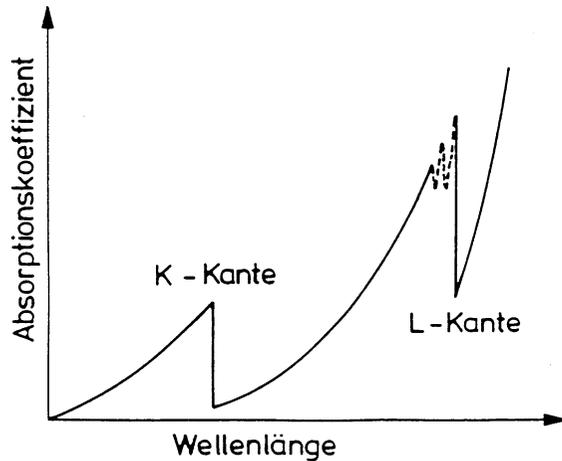


Abb.4: Röntgenabsorptionsspektrum (schematisch)

2.4 Nachweis von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen können durch ihre ionisierende Wirkung (Ionisationskammer, Zählrohre, Schwärzung von Photoplatten) nachgewiesen werden. Zum Verständnis der Arbeitsweise des hier verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs studiere man die angegebene Literatur.

2.5 Braggsche Reflexion von Röntgenstrahlen

Historisch gesehen bemühte sich Röntgen vergebens, den Nachweis zu führen, dass es sich bei der Röntgenstrahlung um elektromagnetische Wellen handelt. Er konnte weder Beugung noch Interferenzerscheinungen beobachten. Dies gelang erst 1912 v. Laue, der auf den Gedanken kam, Kristallgitter als Beugungsgitter für Rö-Strahlen zu benutzen. Kristalle bilden Raumgitter mit den Atomen auf festen Gitterplätzen (Gitterebenen oder Netzebenen) mit Abständen in der Größenordnung von \AA , d.h. von der Größenordnung der Wellenlänge des Rö-Lichts. (Warum ist das wichtig? Man überlege sich die Analogie zum Beugungsversuch D7).

Die Netz- oder Gitterebenen von Kristallen (im vorliegenden Versuch NaCl und LiF mit einfach kubischer Struktur) reflektieren Röntgenlicht mit einer bestimmten Wellenlänge λ nur unter ganz bestimmten Winkeln (sog. *Glanzwinkeln*). Da die Röntgenstrahlung in die Kristalle eindringt, spielen für die Reflexionen mehrere Netzebenen und damit der Netzebenenabstand d eine Rolle.

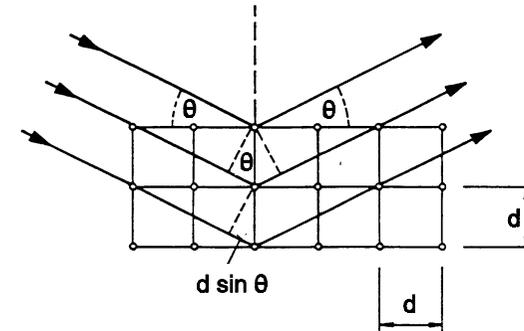


Abb.5: Braggsche Reflexion am Einkristall

Die Vorgänge verdeutlicht vereinfacht Abb. 5. Monochromatisches Rö-Licht fällt unter einem Winkel θ auf die zueinander parallelen, im Abstand d voneinander angeordneten Netzebenen eines Einkristalls (was ist das?) und wird an diesen Netzebenen reflektiert. *Braggsche Reflexion*, d.h. Intensitätsverstärkung der unter dem Winkel θ ausfallenden Strahlen erfolgt nur dann, wenn der Gangunterschied benachbarter Strahlen gleich einem ganzzahligen Vielfachen n der Wellenlänge λ ist. Der Gangunterschied berechnet sich in einfachster Weise aus den geometrischen Verhältnissen entsprechend Abb. 5. Es gilt:

$$n\lambda = 2d\sin\theta_n \quad \text{Braggsche Gleichung} \quad (4)$$

Die Reflexion an den Netzebenen kann physikalisch folgendermaßen verstanden werden: Jeder Gitterbaustein des Kristalls führt unter Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle (Rö-Strahl) erzwungene (Dipol-) Schwingungen aus und sendet in alle Raumrichtungen Strahlung der Wellenlänge λ aus. Diese Strahlen verstärken sich durch positive Interferenz in Reflexionsrichtung, während sie sich in anderen Richtungen auslöschen. Da die Interferenzmaxima besonders intensiv sind, hat man den Eindruck, als ob der Kristall die einfallende Strahlung unter festen Winkeln $\theta_1, \theta_2, \text{etc.}$ reflektiert.

Mit Braggscher Reflexion kann man also den Netzebenenabstand d eines unbekanntes Gitters bestimmen, wenn die Wellenlänge λ des verwendeten monochromatischen Röntgenlichts bekannt ist, oder umgekehrt λ , wenn der Netzebenenabstand d des verwendeten Kristalls bekannt ist. Das erste hat technische Bedeutung bei der Strukturbestimmung von Kristallen (Debye-Scherrer-Verfahren, Drehkristall-Verfahren) wie überhaupt die Untersuchungen mit Röntgenstrahlen in der Materialprüfung einen breiten Raum einnehmen.

3. Aufgabenstellung

1. Aufgabe: Mit dem Röntgengerät ist die Intensität der an einem LiF-Einkristall reflektierten Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für vier verschiedene Anodenspannungen U_{AS} zu bestimmen ($d_{LiF} = 201,4 \text{ pm}$). Aus den der Intensität entsprechenden Kurven $R(\lambda)$ der von einem Zählrohr registrierten Impulsrate R ist die kurzwellige Grenze λ_{min} des Röntgenspektrums graphisch zu bestimmen und aus der Auftragung $e U_{AS} = f(v_{max})$ die Plancksche Konstante h .

2. Aufgabe: Mit dem Röntgengerät (Mo-Anode und vorgeschaltetem Zr-Filter: $\lambda_{K\alpha} = 71,1 \text{ pm}$) sind für einen NaCl-Einkristall die Braggschen Winkel θ zu bestimmen. Berechnen Sie daraus den Netzebenenabstand d von NaCl und vergleichen Sie diesen mit dem Literaturwert $d_{NaCl} = 282,5 \text{ pm}$.

3. Aufgabe: Mit dem Röntgengerät und dem NaCl-Kristall ist in einem begrenzten Winkelbereich die Zählrate $R(\theta)$ sowohl ohne Filter als auch mit Filtern aus den Elementen Zr, Mo, Ag und In zu bestimmen. Aus dem Verhältnis der Raten der gefilterten Spektren zu der des ungefilterten Spektrums sind die Wellenlängen der K-Kanten λ_K für diese Elemente zu bestimmen. Aus der Auftragung $1/\lambda_K(Z^2)$ ist das Moseleysche Gesetz Gl. (3) zu bestätigen.

4. Versuchsaufbau

4.1 Versuchsanordnung

Abb. 6 zeigt das im Versuch benutzte Röntgengerät, Abb. 7 den gesamten Versuchsaufbau schematisch. Die von der Röntgenröhre erzeugte Röntgenstrahlung tritt durch eine Blende (Kollimator), in die ein Filter (z.B. eine Zr-Folie)

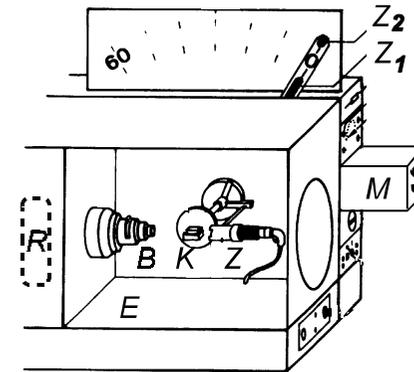


Abb.6:

Röntgengerät mit Röntgenröhre, Experimentierkammer, Blende, Kristall, Zählrohr, Zeiger 1 (θ), Zeiger 2 (2θ), Motorantrieb (2θ)

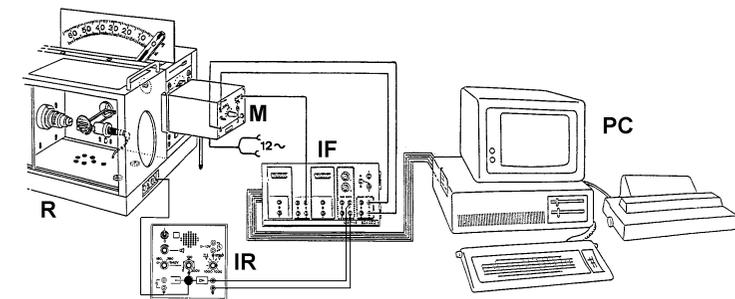


Abb.7: Versuchsaufbau mit Röntgengerät, Motorantrieb für θ , 2θ , Impulsratenmesser, Interface, Personal-Computer mit Drucker

eingeschoben werden kann, in die Experimentierkammer und trifft dort auf einen Kristall (LiF o. NaCl), der an einer senkrecht zur Strahlrichtung drehbaren Achse befestigt ist. Die Winkelstellung θ der Kristalloberfläche (= Lage der Netzebenen, s. Abb. 5) zum einfallenden Röntgenstrahl wird mit einem Zeiger auf einer Winkelskala angezeigt. Um die gleiche Drehachse ist das Zählrohr zur Intensitätsmessung der reflektierten Rö-Strahlung drehbar, dessen Winkelstellung 2θ zum einfallenden Rö-Strahl mit einem weiteren, längeren Zeiger auf einer parallel zu θ liegenden 2θ -Skala angezeigt wird. Beide Winkelstellungen sind durch Drehknöpfe an der Seite des Geräts verstellbar und über eine mech. Kopplung so verbunden, das bei Verstellen der einen die andere jeweils entsprechend nachgeführt wird. Bei der Stellung $2\theta = \theta = 0$ stehen beide Zeiger übereinander. Vor den Stellknopf für den Winkel 2θ ist ein Motortrieb montiert, welcher über ein Interface von einem Computer gesteuert wird. Entsprechend der

Winkelposition des Motors wird an einem Potentiometer, welches mittels Rutschkupplung mit der Motorachse verbunden ist, eine Spannung im Bereich $\pm 3V$ abgegriffen, die am Eingang C des Interface anliegt. Über den Zählereingang F dieses Interface wird ebenfalls die (der Strahlungsintensität proportionale) Impulsrate R des Zählrohrs registriert, so dass eine automatische Aufnahme der Zählrate $R(\theta)$ (bzw. $R(\lambda)$ bei bekanntem Netzebenenabstand unter Benutzung der Zählrate Bragg'schen Gleichung) möglich ist. Die Benutzung eines Computers macht es zudem möglich, die Rate $R(\theta)$ oder $R(\lambda)$ während der Messung auf dem Monitor sofort graphisch darzustellen und zu beurteilen sowie die Messergebnisse im Anschluss weiter zu verrechnen, zu speichern und als Tabelle oder Graph auszudrucken.

Beachte! Der Motorantrieb wird durch eine 12 V~ Spannungsquelle versorgt. Diese ist erst bei laufendem Messprogramm anzuschließen. Sollte der Motor vor oder während der Messung (unbeabsichtigt) durchlaufen, so ist die Spannungsversorgung zu unterbrechen, evtl. eine neue Winkelkalibrierung (s.u.) durchzuführen.

Zusätzlich zu beachten ist, dass der reglbare Emissionsstrom der Röntgenröhre während der Messung konstant bleibt (ca. 1 mA). Dieses wird mit einem Gleichstrommesser (o. Abb.) kontrolliert. Ein Wechselspannungsmesser (o. Abb.) dient darüber hinaus zur Bestimmung des Scheitel(=Maximal-)werts U_{AS} der stufenweise (1...8) einstellbaren Anodenspannung U_A . Dieser ergibt sich aus dem gemessenen Effektivwert der Wechselspannung U über die Beziehung

$$U_{AS} = \sqrt{2} 10^3 U$$

Zur Abschirmung der Umgebung von der Röntgenstrahlung des Röntgengerätes sind die Röntgenröhre selbst und die Experimentierkammer durch Stahlplatten und Bleiglasfenster umschlossen (warum Bleiglas?). Das seitliche Fenster kann nur bei abgeschalteter Anodenspannung, z.B. zur Montage des Kristalls, geöffnet werden. Der Betrieb der Röntgenröhre (eingeschaltete Anodenspannung) wird durch eine rote Warnlampe auf der Oberseite des Gerätes angezeigt.

4.2 Programmierung

Die Durchführung der Messungen geschieht mit dem Unterprogramm *Bragg-Reflexionen* des Programms *BRAGG*, welches von der Festplatte in den Arbeitsspeicher des DOS-Rechners geladen wurde. Ein weiteres Unterprogramm *XYZ-Input* erlaubt die Verrechnung von Messdaten innerhalb einer Messdatei, wie z.B. die Bildung des Transmissionskoeffizienten $T_1 = R_1(\theta)/R_0(\theta)$, dem Ratenverhältnis

eines gefilterten zu dem des ungefilterten Spektrums für die 3. Aufgabe des Versuchs. Dazu müssen jedoch zuvor jeweils zwei Messdateien, z.B. $R_0(\theta)$, das Spektrum ohne Filter und $R_1(\theta)$, das mit einem Filter, die im Programm *Bragg-Reflexionen* erstellt und gespeichert wurden, zu einer neuen Datei kombiniert werden. Dies geschieht außerhalb des Programms *BRAGG* durch das Utility-Programm *DTITrans*.

Das Programm *BRAGG* ist menügeführt und wird im wesentlichen gesteuert durch die Cursor-Tasten (Auswahl von Menüpunkten), die Return-Taste (Aktivierung eines Menüpunktes bzw. Bestätigung der Eingabe von Parametern etc.), die Esc-Taste (Verlassen einer Menüebene bzw. Bildschirmgraphik, Abbrechen einer Eingabe oder Messung, Rücksetzung einer Fehlermeldung) sowie der Funktionstasten F1 - F10 (haupts. F1 u. F2 für Befehle im Graphikmodus des Bildschirms).

Ist der Menübildschirm von *Bragg-Reflexionen* gewählt, stehen im **Kopfbereich** alle wichtigen Parameter des laufenden Messprogramms bzw. der aktuell erstellten oder geladenen Messdatei, im **Hauptmenü** die Befehle: - *Messung starten* - *Kalibrieren / Bereiche* (Kalibrierung der Winkel, Einstellung von Bereich und Schrittweite der Winkel sowie der Messzeit) - *Formel wählen* (Umrechnung von Parametern) - *Diskettenoperation* - *Beschreibung/Kommentar* - *Ende* -.

Nach einer Messung bzw. dem Laden einer Messdatei ist das **Hauptmenü** automatisch um die Punkte: - *Messwerte ausgeben* - *Graphisch auswerten* - *Darstellung auswählen* - erweitert. Im Menüpunkt - *Messwerte ausgeben* - können die erstellten bzw. geladenen Messdaten in Tabellenform angezeigt oder ausgedruckt werden, im Menüpunkt - *Graphisch auswerten* - werden die Daten als Graph dargestellt, wobei im Menüpunkt - *Darstellung auswählen* - die Wahl der Achsen, die Messpunktdarstellung sowie weitere Optionen möglich sind.

Zur späteren graphischen Auswertung der Messdaten kann der Bildschirminhalt durch gleichzeitiges Drücken der Tasten *Shift* u. *PrtSc* bzw. *Shift* u. *Druck* auf den Drucker ausgegeben werden.

Das Unterprogramm *XYZ-Input* ist entsprechend strukturiert. Unter dem Menüpunkt *Parameter/Formel* kann die aus den Messdaten zu berechnende Größe definiert werden.

5. Versuchsdurchführung und Auswertung

5.0 Versuchsbeginn, Winkelkalibrierung u. Winkelkorrektur

Zuerst ist der Computer mit Drucker, danach das Röntgengerät (zunächst ohne

Hochspannung), der Ratemesser, zuletzt die Spannungsversorgung des Stellmotors einzustellen.

Im allg. ist vor Versuchsbeginn eine Kalibrierung der Winkeleinstellung des Motors nötig. Dazu wird der Menüpunkt *Kalibrieren/Bereiche* danach *Winkelkalibrierung* gewählt, dann F1, wonach die auf dem Bildschirm dargestellte Spannung U des Motorpotentiometers auf den Wert von ca. -2,95 V gefahren wird, welcher der Winkelstellung $2\theta = \theta = 0$ entsprechen sollte. Eine geringfügige Verstellung der Zeiger ist durch die Tasten +/-S (größerer / kleinerer Winkel / Stop) möglich. Sollte auf diese Weise ($U \geq -3$ V) die Nullstellung des 2θ -Zeigers nicht möglich sein, so ist der Motor mittels der Rändelschrauben von der Frontplatte des Gerätes zu lösen, die Nullstellung per Hand vorzunehmen, danach der Motor (U: ca. -2,95 V) wieder anzubringen und dann die Feineinstellung mit +/-S vorzunehmen. Die Nullstellung wird durch F2 bestätigt, d.h. der eingestellte Spannungswert als $2\theta = \theta = 0$ übernommen. Die am Gerät eingestellte $2\theta/\theta$ -Kopplung (Offset Δ_1 für θ bei $2\theta = 0$) ist gerätespezifisch und sollte nicht verändert werden. (Fragen Sie den stud. Betreuer!).

Darauf wird mit den Tasten +/-S der Winkel $2\theta = 60^\circ$ angefahren. Die nun im Bildschirm angezeigte Spannung entspricht $\theta = 30^\circ$, was wieder durch F2 bestätigt wird. Danach ist die Kalibrierung beendet und kann mit ESC verlassen werden.

In der Auswertung der Versuchsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Spektren um einen Winkel Δ versetzt erscheinen. Dieser Winkelfehler hängt stark von der benutzten Kristalloberfläche und ihrer Lage im Kristallhalter ab. Δ kann für die 2. und 3. Aufgabe mit Hilfe der Bragg-Gleichung bestimmt werden. Sind θ_1^m und θ_2^m die gemessenen Winkel für das Intensitätsmaximum in 1. und 2. Ordnung, so gilt für die Winkelkorrektur $\Delta = \theta_1 - \theta_1^m = \theta_2 - \theta_2^m$ mit der Randbedingung, dass aus den korrigierten Winkeln θ_1 und θ_2 jeweils der gleiche Netzebenenabstand für NaCl resultiert, die Beziehung

$$\tan \Delta = \frac{\sin \theta_2^m - 2 \sin \theta_1^m}{2 \cos \theta_1^m - \cos \theta_2^m} \quad (5)$$

5.1 1. Aufgabe:

Die Messung wird mit dem LiF-Kristall **ohne** Filter für 5 verschiedene Anodenspannungen (Stufen 4 - 8) durchgeführt. Einschalten der Hochspannung und Emission **nur durch den studentischen Betreuer!** Die jeweiligen Spannungen U_{eff} sind zu notieren u. direkt die Hochspannung U_{AS} zu berechnen!

Vor der 1. Messung:

Kalibr./Bereiche: Winkelbereich: $\theta: 3 - 8^\circ, \Delta\theta: 0,4^\circ$
Torzeit: $\tau: 10$ s
Einkristall def.: LiF (für Umrechn. $\theta - \lambda$)

Messung: starten: F1

Nach jeder Messreihe:

Darstellung ausw.: x-Achse wählen: l (wie λ) (in pm)
Messwerte ausgeben: Tabelle drucken: .. , darauf Spannungsstufe und U_{AS} zur Auswertung notieren
Diskettenoperation: Messdaten speichern: Filename: VER1SpannungsstufeGr.-Nr. (z.B. VER18202)

Nach allen Messreihen der 1. Aufgabe:

Diskettenoperation: Multigraphik ein: Messreihen nacheinander laden: VER1...., VER1...., (alle Dateien für einen gemeinsamen Graph laden)
Graphisch auswerten: Bildschirmausdruck zur späteren Auswertung

In der Auswertung ist der Untergrund der Spektren (s. Messbeispiel als Aushang am Messplatz) bei kleinen Wellenlängen zu großem l hin, der Intensitätsabfall bei großen Wellenlängen zu kleinem l hin extrapolieren. Der Schnittpunkt der Extrapolationen liegt bei I_{min} . Bestimmen Sie die Plancksche Konstante aus der Auftragung $c/I_{\text{min}}(eU_{\text{AS}})$. (Proportionalität: $I_{\text{min}}^{-1} \sim U_{\text{AS}}$!)

5.2 2. Aufgabe:

Die Messung ist mit NaCl-Kristall und **mit** Zr-Filter, Spannungsstufe 8. durchzuführen.

Vor der Messung:

Diskettenoperation: Multigraphik löschen:
Messdaten laden: (letzte Messdatei nur zur Übernahme der Winkelkalibrierung)
Kalibr./Bereiche: Winkelbereich: $\theta: 2 - 25^\circ, \Delta\theta: 0,2^\circ$
Torzeit: $\tau: 5$ s

Messung: starten: F1

Nach der Messung:

Darstellung ausw.: x-Achse wählen: θ (in $^\circ$)
 Graphiktitel eingeben: NaCl-Zr
 Graphisch auswerten: Bildschirmausdruck zur späteren Auswertung
 Diskettenoperation: Messdaten speichern: Filename:
 VER2Gr.-Nr. (z.B. VER2202)
 Messwerte ausgeben: Tabelle drucken (zur späteren Auswertung und
 Korrektur der Maximawinkel)

5.3 3. Aufgabe:

Die Messung wird mit dem NaCl-Kristall ohne Filter und mit Filtern in der Reihenfolge Zr, Mo, Ag, In durchgeführt; Spannungsstufe 8.

Vor der 1. Messung:

Kalibr./Bereiche: Winkelbereich: $\theta: 3 - 10^\circ, \Delta\theta: 0,25^\circ$
 Torzeit: $\tau: 10 \text{ s}$

Messung: starten: F1

Nach jeder Messreihe:

Darstellung ausw.: x-Achse wählen: θ (in $^\circ$)
 Graphiktitel eingeben: NaCl + ..
 Diskettenoperation: Messdaten speichern: Filename:
 VER30Gr.-Nr. bis VER34Gr.-Nr.
 (z.B. VER30202 bis VER34202)

Zur Auswertung der Daten BRAGG verlassen und nach - cd \cassy\files - mit dem Befehl: - dtitrans_VER30Gr.-Nr..dbg_VER31Gr.-Nr..dbg_VER31Gr.-Nr..dti - die beiden zuerst genannten, vom Programm Bragg-Reflexionen mit der Kennung *.dbg gespeicherten Dateien in die zuletzt genannte Datei mit der Kennung *.dti zusammenfügen. Die darauf folgende Abfrage der ersten und zweiten Größe und des Parameters der neuen Datei ist mit den Ziffern 13 (R1 = Rate VER30.. in 1/s), 23 (R2 = Rate VER31.. in 1/s) und 12 (θ in $^\circ$) zu beantworten. Ebenso ist die Datei VER30.. auch mit den drei anderen zu kombinieren. Danach ist zum Programm BRAGG und dem Unterprogramm XYZ-Input zur Berechnung, Darstellung und Ausgabe der Fkt. $T(\theta, R_1, R_0)$ zurückzukehren:

Diskettenoperation: Messdaten laden: erste Datei VER31Gr.-Nr..dti
 Paramater/Formel: Formel eingeben:
 Physikal. Symbol: T

Nachkommastellen: 3

Formel: $T(n, \theta, R1, R2) = R2/R1$

Darstellung ausw.: x-Achse: θ
 y₁-Achse: T
 Graphiktitel: z.B. NaCl + Zr
 Optionen w.: Messpunkte als Kreuze
 Graphisch auswerten: Bildschirmskopie zur graphischen Auswertung

Auf gleichem Papier im Anschluss:

Messwerte ausgeben: Tabelle drucken

Ebenso ist mit den anderen 3 Dateien zu verfahren. In der graphischen Auswertung ist der Mittelwert zwischen Maximum und Minimum von T im Bereich der K-Kante zu markieren, der entsprechende Winkel zu bestimmen und mit Δ (s. 2. Aufgabe) zu korrigieren. Nach Berechnung der Wellenlängen λ_K für die K-Kanten der verschiedenen Filterelemente ist mit einer Auftragung $1/\lambda_K(Z^2)$ das Moseleysche Gesetz, d.h. $1/\lambda_K \sim Z^2$ zu bestätigen.

6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie funktioniert eine Röntgenröhre?
- 2) Welche verschiedenen Röntgenspektren unterscheidet man (Zeichnung)?
- 3) Wieso gibt es eine kurzwellige Grenze des Bremspektrums?
- 4) Wie kommt das charakteristische Spektrum zustande?
- 5) Wie lautet das Moseley-Gesetz?
- 6) Wie sieht ein Röntgenspektrum in Absorption aus? Wie kommt es zustande?
- 7) Wie weist man Röntgenstrahlen nach, wie, dass es sich hierbei um elektromagnetische Wellen handelt?
- 8) Wie lautet das Braggsche Gesetz?
- 9) Wie funktioniert ein Zählrohr?
- 10) Leiten Sie die Gleichung (5) für die Korrektur der Bragg-Winkel ab!