

## Versuch B 10: Versuch mit Röntgenstrahlen

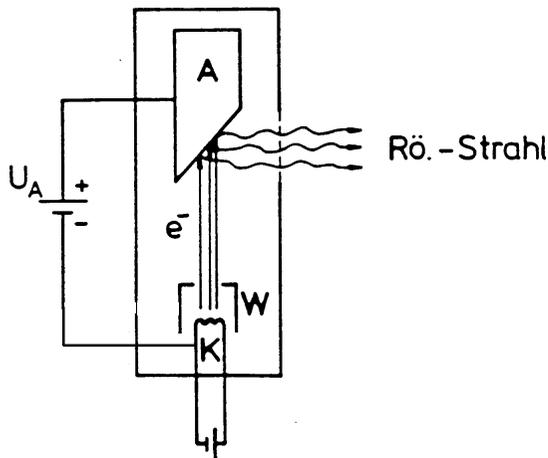
**1. Literatur:** Harbeck, Physik Oberstufe  
 Gerthsen, Kneser, Vogel, Physik  
 Pohl III, Optik u. Atomphysik  
 Finkelnburg, Atomphysik  
 Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen

**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

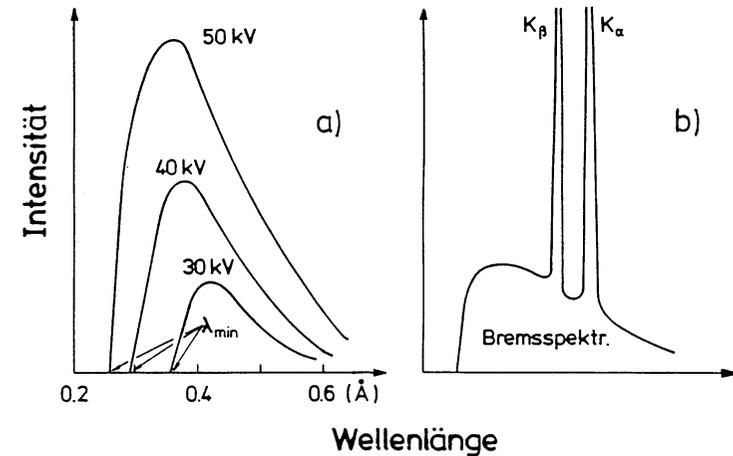
### 2.1 Röntgenbremsspektrum

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 Linienspektrum (schematisch)

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

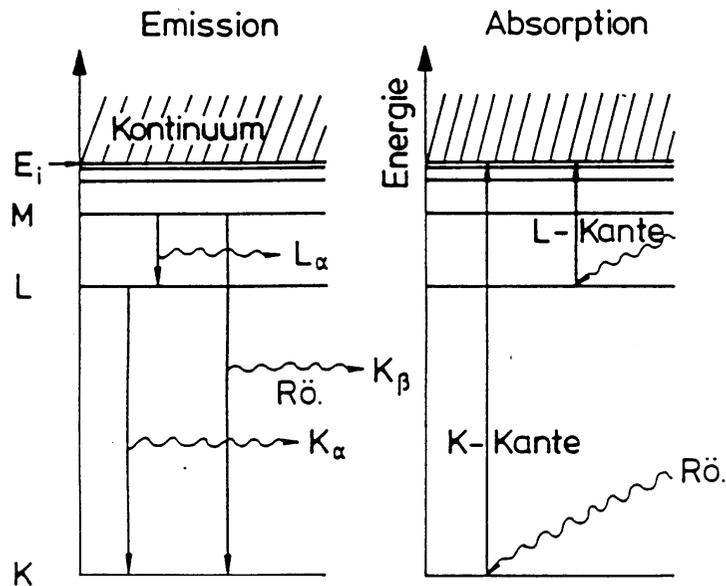
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_A = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (1)$$

Dies bedeutet,  $\lambda_{\min}$  bzw. die Maximalfrequenz  $\nu_{\max}$  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 Å (=  $10^{-10}$  m).

## 2.2 Linienspektrum

Das in Abb. 2a gezeigte Bremsspektrum ist meist noch von einer charakteristischen Eigenstrahlung der Atome der Anode überlagert. D.h. bei bestimmten Wellenlängen treten zusätzliche Röntgenlinien mit im Vergleich zum Bremsspektrum 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.  $K_\alpha$ -Röntgenlinie.

Übergänge von der M-Schale auf die K-Schale führen zur  $K_\beta$ -Linie, analog Übergänge von M nach L zur  $L_\alpha$ -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  $K_\alpha$ -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  $\sigma$  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  $\tau_A$  beschrieben. Er hängt stark von der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbermaterials und der Wellenlänge  $\lambda$  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  $K_\alpha$ -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 Ionisierungsgrenze 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.

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

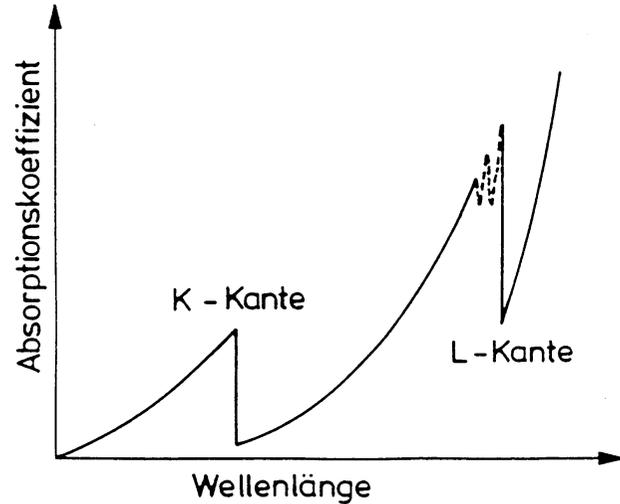


Abb.4: Röntgenabsorptionsspektrum (schematisch)

Durch geschickte Kombination des Anodenmaterials der Röhre (im vorliegenden Versuch Kupfer,  $Z = 29$ ) und eines in den Strahlengang des austretenden Röntgenspektrums geschalteten, absorbierenden Filtermaterials (hier z.B. Nickel,  $Z = 28$ ) kann man erreichen, dass das austretende Röntgenspektrum (Bremspektrum und charakteristisches Cu-Spektrum) im kurzwelligen Bereich so stark geschwächt wird, dass im wesentlichen nur die  $\text{Cu } K_\alpha$ -Linie, also monochromatisches Röntgenlicht mit  $\lambda_{K_\alpha} = 1,54 \text{ \AA} = 154 \text{ pm}$  erhalten bleibt.

## 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 Röntgenstrahlen zu benutzen. Kristalle bilden Raumgitter mit den Atomen auf festen Gitterplätzen (Gitterebenen oder Netzebenen) mit Abständen in der Größenordnung von  $\text{\AA}$ , d.h. von der Größenordnung der Wellenlänge des Röntgenlichts. (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  $\lambda$  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.

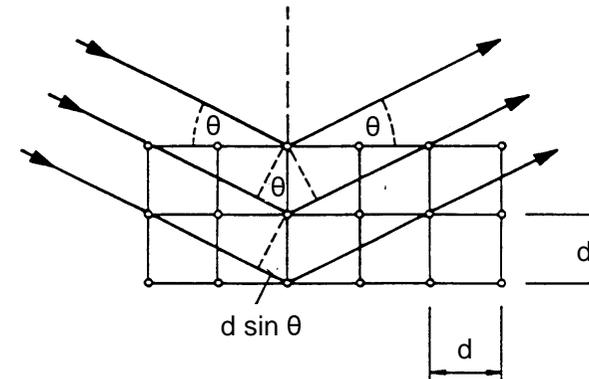


Abb.5: Braggsche Reflexion am Einkristall

Die Vorgänge verdeutlicht vereinfacht Abb. 5. Monochromatisches Röntgenlicht fällt unter einem Winkel  $\theta$  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  $\theta$  ausfallenden Strahlen erfolgt nur dann, wenn der Gangunterschied benachbarter Strahlen gleich einem ganzzahligen Vielfachen  $n$  der Wellenlänge  $\lambda$  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  $\lambda$  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  $\lambda$  des verwendeten monochromatischen Röntgenlichts bekannt ist, oder umgekehrt  $\lambda$ , 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

Mit dem Röntgengerät (Cu-Anode und vorgeschaltetem Ni-Filter:  $\lambda_{\text{K}\alpha} = 154 \text{ pm}$ ) sind für einen NaCl-Einkristall die Braggschen Winkel  $\theta$  zu bestimmen. Berechnen Sie daraus den Netzebenenabstand  $d$  von NaCl und vergleichen Sie diesen mit dem Literaturwert  $d_{\text{NaCl}} = 282,0 \text{ pm}$ .

### 4. Versuchsaufbau

Den Versuchsaufbau mit dem Röntgengerät zeigt Abb. 6 schematisch. Die Röntgenröhre ist in einer runden Experimentierkammer sichtbar unterhalb einer Bleiglasabschirmung montiert (warum Bleiglas?). Durch eine Blendenöffnung gelangt der Röntgenstrahl in der Mitte der Experimentierkammer auf den um eine vertikale Achse drehbaren NaCl-Einkristall, wird dort (*Bragg*)-reflektiert und gelangt nach Passieren des Ni-Filters in das Zählrohr, die beide auf einem um die Drehachse schwenkbaren Messarm angeordnet sind. Dessen Winklereinstellung  $2\theta$  kann auf dem äußeren Rand des Kammerbodens abgelesen werden. Durch mechanische Kopplung wird der Kristall entsprechend auf den Winkel  $\theta$  eingestellt. Zur Bestimmung der vom Zählrohr registrierten Strahlintensität (~Impulsrate, Impulse/s) dient ein Impulszähler mit Start-Stopp-Schalter und Rückstelltaste, zur akustischen Anzeige ein kleiner, auf den Zähler aufgesteckter Lautsprecher. Bedingt durch die geringe Strahlintensität des Röntgengerätes genügt zur Abschirmung der Kammer nach außen eine Aluminium/Blei-Platte

sowie eine Plexiglashaube, die den von der Röhre ausgehenden Primärstrahl sowie die Streustrahlung absorbieren bzw. so stark abschwächen, dass eine Gefährdung des Experimentators ausgeschlossen ist. Das Gerät kann nur bei geschlossener

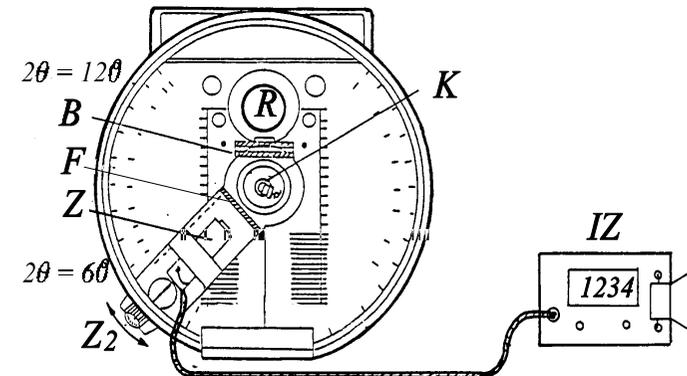


Abb. 6: Röntgengerät: R Röntgenröhre, B Blende, K Kristall, F Filter, Z Zählrohr, Z<sub>2</sub> Zeiger (2 $\theta$ ), IZ Impulszähler

Haube betrieben werden. Der Betriebszustand (eingeschaltete Hochspannung) wird durch Leuchten einer roten Warnlampe (neben der Röhre) angezeigt.

### 5. Versuchsdurchführung und Auswertung

Zunächst wird bei abgeschaltetem Röntgengerät die Impulsrate  $N_0$  (in Imp/s) (entsprechend der Intensität der Umgebungsstrahlung) mit einer Zählzeit von 100 s bestimmt. Diese Rate ist gegebenenfalls von den im nachfolgenden Versuch ermittelten Impulsraten abzuziehen. Danach ist das Röntgengerät *nur durch den betreuenden Assistenten* einschalten zu lassen.

Bestimmen Sie nun die Impulsrate  $N(2\theta)$ , bei kleinem Winkel beginnend, im Winkelbereich  $2\theta$  von  $20^\circ$  bis  $120^\circ$  in Stufen von jeweils  $4^\circ$ . Die Angabe der Zählzeiten pro Winkel erfolgt durch den betreuenden Assistenten. Zur genaueren Ermittlung der Bragg-Winkel ist in einem zweiten Messdurchgang wieder mit ansteigendem Winkel die Impulsrate in unmittelbarer Nähe der zuvor beobachteten Maxima in entsprechend kleineren Winkelintervallen zu messen ( $2\theta = 2^\circ; 1^\circ; \dots$ ). Tragen Sie zur Kontrolle während des Versuches die gemessenen Raten über  $\theta$  auf!

**Hinweis:** Man benutze zur Bestimmung der Bragg-Winkel auch die akustische Anzeige der Impulse bei gleichzeitiger, langsamer Winkeländerung!

In der Auswertung trage man (auf Millimeterpapier) die Impulsrate  $N$  über  $\theta$  auf und bestimme die Bragg-Winkel. Mit Gl. (4) und  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  für  $\text{Cu K}_\alpha$  bestimme man den Netzebenenabstand  $d$  von  $\text{NaCl}$ . Schätzen Sie die Fehler für die ermittelten Bragg-Winkel und  $d$  ab!

## 6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie funktioniert eine Röntgenröhre?
- 2) Welche verschiedenen Röntgenspektren unterscheidet man (Zeichnung)?
- 3) Wieso gibt es eine kurzweilige Grenze des Bremsspektrums?
- 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 nach, dass es sich bei Röntgenstrahlen um elektromagnetische Wellen handelt?
- 8) Wie lautet das Braggsche Gesetz?
- 9) Wie kann man Röntgenstrahlen nachweisen?
- 10) Wie funktioniert ein Zählrohr?