

## UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN



VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

---

# B10 Versuch mit Röntgenstrahlen

---

9. September 2024

Raum ME150

# 1 Informationen

## 1.1 Literatur

1. Harbeck, Physik Oberstufe
2. Gerthsen, Kneser, Vogel, Physik
3. Pohl III, Optik und Atomphysik
4. Finkelburg, Atomphysik
5. Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen
6. Deslattes *et al.*, Rev. Mod. Phys. **75**, 35–99 (2003), *X-ray transition energies*

## 1.2 Stichworte

- Erzeugung von Röntgenstrahlen
- Röntgenbremsspektrum
- Bohrsches Atommodell
- Termschema der Atome
- Charakteristisches Röntgenspektrum
- Moseley-Gesetz
- Absorptionsspektrum
- Kristallgitter/Netzebenen
- Braggsches Reflexionsgesetz
- Nachweis von Röntgenstrahlung
- Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres
- Lambert-Beersches Gesetz

## 2 Theoretische 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  $U_A$ .

Beim Auftreffen auf die Anode (Material z.B. Mo, W oder Cu) werden diese Elektronen in den Elektronenhüllen der Atome der Anode durch Coulombwechselwirkung ( $\rightarrow$  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 ("Rö" in Abb. 1) mit einem kontinuierlichen Spektrum, dem sog. *Röntgenbremsspektrum* (*weißes Röntgenlicht*), erstmals entdeckt von Wilhelm Conrad Röntgen in 1895.

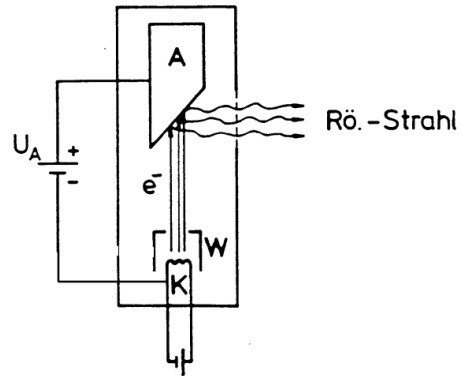


Abbildung 1: Röntgenröhre (schematisch)

Abb. 2(a) u. (c) zeigen die spektrale Verteilung der Röntgenbremsstrahlung. 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:

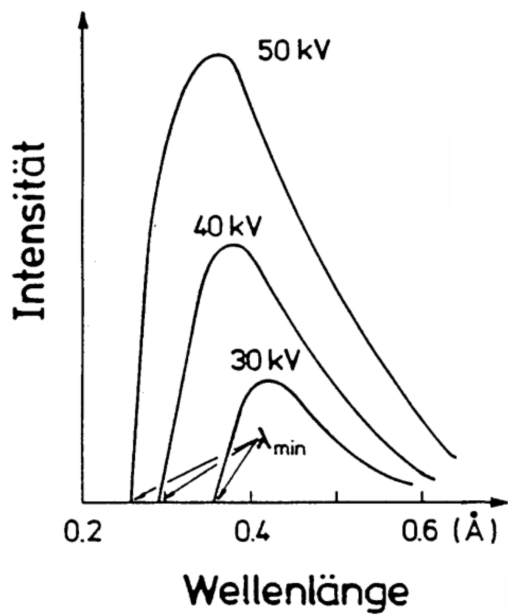
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_A = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}. \quad (1)$$

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.

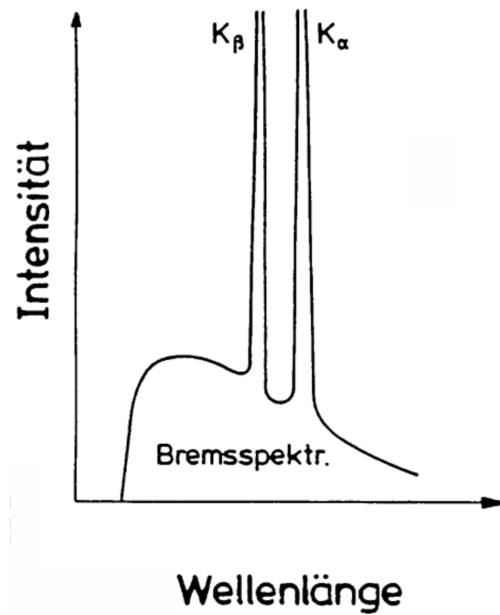
Für viele technische Zwecke und auch im vorliegenden Versuch liegen die Beschleunigungsspannungen  $U_A$  im Bereich 20–50 kV und damit die Wellenlängen des Röntgenlichts gemäß Gl. (1) im Bereich unter  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ .

### 2.2 Linienspektrum

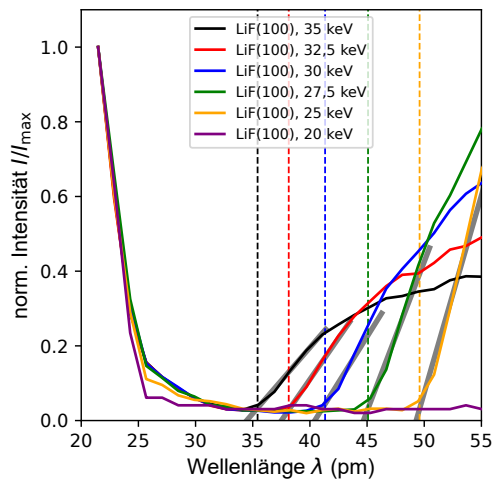
Das in Abb. 2(a) gezeigte Bremspektrum ist meist noch von einer charakteristischen Eigenstrahlung der Atome der Anode überlagert. D.h. bei bestimmten Wellenlängen treten zusätzliche Röntgenlinien mit im Vergleich zum Bremspektrum hoher Intensität auf (Abb. 2(b) u. (d)). Diese Linien werden durch elektronische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



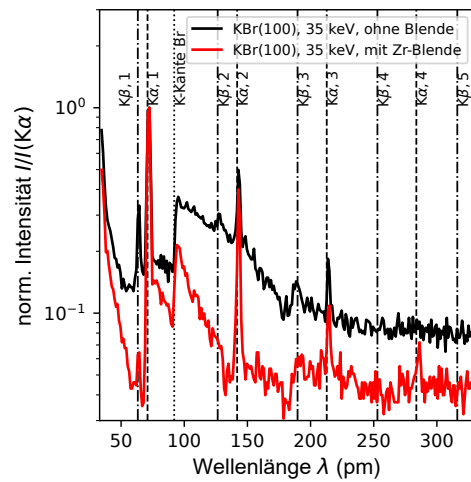
(a) Bremspektrum (schematisch)



(b) Brems- und Linienspektrum (schematisch)



(c) Bestimmung der minimalen Wellenlänge im Experiment

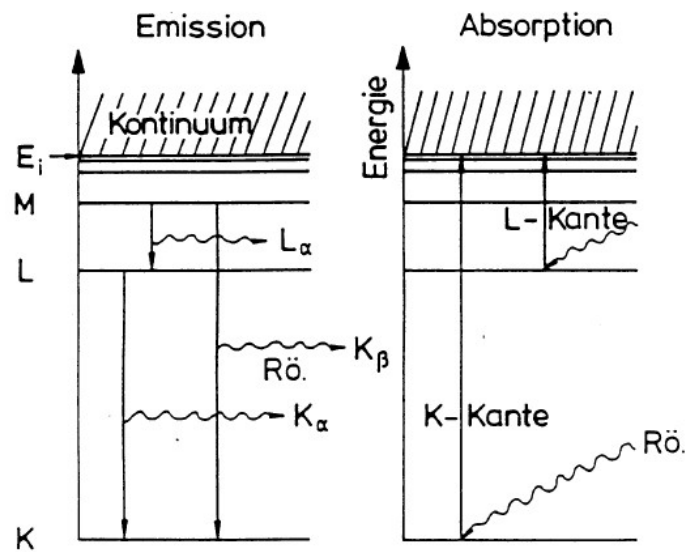


(d) Spektren von KBr(100) im Experiment mit und ohne Zirkon-Blende

Abbildung 2: Röntgenspektren

des Anodenmaterials hervorgerufen.

Ihr physikalischer Ursprung kann im Rahmen des Bohrschen Atommodells leicht verstanden werden (Vgl. 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  $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$  entsprechendes charakteristisches Strahlungsquant (Röntgenphoton) ausgesandt, durch Übergänge z.B. von L nach K erscheint im Spektrum die sog.  $K\alpha$ -Röntgenlinie.



**Abbildung 3:** Termschema eines Atoms mit Vorgängen bei der Emission und Absorption von Röntgenlicht ( $E_i =$  Ionisierungsquelle)

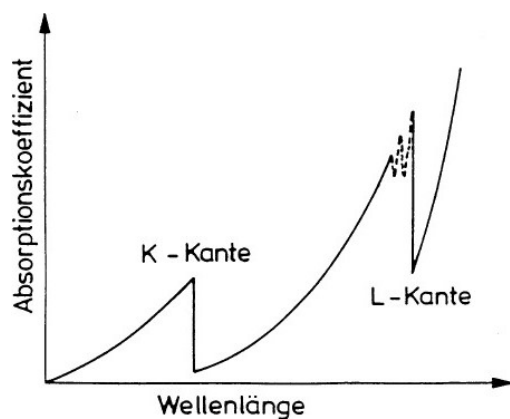
Übergänge von der M-Schale auf die K-Schale führen zur  $K\beta$ -Linie, analog Übergänge von M nach L zur  $L\alpha$ -Linie, usw. Je nach energetischer Lage der Terme eines Atoms entsteht so das charakteristische oder Linienspektrum. Die Änderung der Frequenz bzw. Wellenlänge dieser Linien von Element zu Element des Anodenmaterials ist vom Quadrat der Ordnungszahl  $Z$  des betreffenden Elements im Periodensystem abhängig. Das *Moseley-Gesetz* beschreibt den entsprechenden Zusammenhang für den Übergang eines Elektrons von der  $m$ -ten zur  $n$ -ten Schale

$$\nu_{n,m} \approx \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) (Z - \sigma_{n,m})^2 \cdot \nu_{\text{Ry}} \quad (2)$$

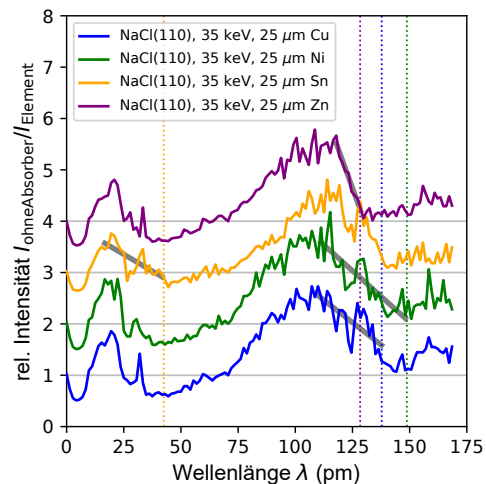
mit der *Rydbergfrequenz*  $\nu_{\text{Ry}} = 3,289 \cdot 10^{15}$  Hz. So gilt z.B. für die  $K\alpha$ -Linie  $n = 1$ ,  $m = 2$  und für die  $L\alpha$ -Linie  $n = 2$ ,  $m = 3$ . Die *Abschirmkonstante*  $\sigma_{n,m}$  berücksichtigt die Abschirmung der Kernladung durch kernnahe Atomelektronen und ist für jeden Übergang spezifisch.

### 2.3 Absorptionsspektren

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*  $\mu$  beschrieben. Er hängt stark von der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbermaterials und der Wellenlänge  $\lambda$  der Strahlung ab ( $\mu \propto Z^4 \lambda^3$ ). Bei der Absorption werden Elektronen von inneren Schalen der Atome des Absorbermaterials unter Aufnahme der gesamten Photonenenergie energetisch angeregt.



(a) Schematische Darstellung



(b) K-Kante im Experiment für verschiedene Absorberelemente

**Abbildung 4:** Röntgenabsorptionsspektrum

Aus Abb. 4 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(a)

gezeigte Röntgenabsorptionsspektrum, in dem neben dem Anstieg ( $\mu \propto \lambda^3$ ) sog. *Absorptionskanten* bei den für das Termschema des betreffenden Elements charakteristischen Wellenlängen auftreten. Die energetische Lage der Kanten (s. Abb. 3 u. Abb. 4(b)) ist wieder – bei Übergang von Element zu Element – durch das *Moseley-Gesetz* für die Kanten, ähnlich Gl. (2), gegeben:

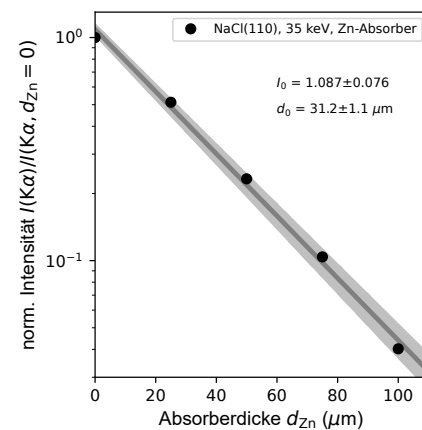
$$\nu_n = \left( \frac{Z - \sigma_n}{n} \right)^2 \cdot \nu_{\text{Ry}}. \quad (3)$$

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  $K\alpha$ -Linie, also monochromatisches Röntgenlicht mit  $\lambda_{K\alpha} = 0,709 \text{ \AA} = 70,9 \text{ pm}$  erhalten bleibt.

Aufgrund von Reflexion und Absorption ist die Intensität  $I$  eines Röntgenstrahls nach Durchlaufen von Materie geringer als zuvor. Die Transmission des Strahls durch ein Medium der Dicke  $d$  wird dabei durch das Lambert-Beersche Gesetz (s. Abb. 5) beschrieben:

$$I(d) = I_0 e^{-d/d_0} = I_0 e^{-\mu d}. \quad (4)$$

Dabei ist  $d_0$  die sog. *Absorptionslänge* und  $\mu = d_0^{-1}$  der Absorptionskoeffizient. Wie oben beschrieben, ist der Absorptionskoeffizient aufgrund der Streuung an den Elektronen der Atome stark von der Kernladungszahl  $Z$  der durchdrungenen Materie abhängig ( $\mu \propto Z^4$ ). Daher wird häufig Blei ( $Z = 82$ ) zur Abschirmung von Röntgenstrahlen benutzt.



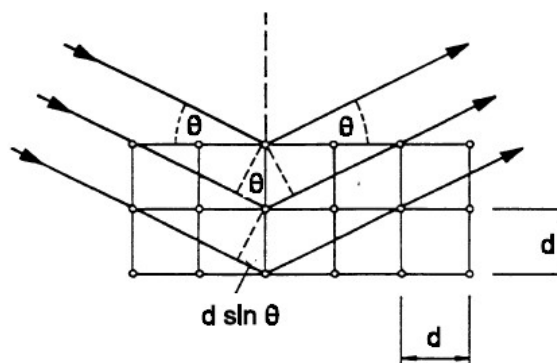
**Abbildung 5:** Röntgenabsorption der Mo  $K\alpha$ -Linie in Zink

## 2.4 Nachweis von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen können durch ihre ionisierende Wirkung (Ionisationskammer, Zählrohre, Schwärzung von Fotoplatten) 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 Max von 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 wenigen Å, 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, KBr und LiF mit einfach kubischer Struktur → **Bei diesen Kristallen entspricht der Netzebenenabstand  $d$  nicht der Gitterkonstante  $a$ ! Warum?**) 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 eine Rolle.



**Abbildung 6:** Braggsche Reflexion am Einkristall

Die Vorgänge verdeutlicht Abb. 6. 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. 6. Es gilt:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta_n . \quad \text{Braggsche Gleichung} \quad (5)$$

Die Reflexion an den Netzebenen kann physikalisch folgendermaßen verstanden wer-



den: Jeder Gitterbaustein des Kristalls führt unter Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle (Röntgenstrahl) 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  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  reflektiert.

Mit Bragg'scher 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. Ersteres 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 Versuchsaufbau

Abb. 7 zeigt den im Praktikum verwendeten Röntgenapparat. Die von der Röntgenröhre erzeugte Röntgenstrahlung tritt durch eine Blende (Kollimator), welche aus verschiedenen Materialien bestehen kann, in die Experimentierkammer. Die Röntgenstrahlung trifft dort auf einen Kristall (LiF, KBr, NaCl), der an einer drehbaren Achse senkrecht zur einfallenden Strahlung befestigt ist. Die Winkelstellung  $\theta$  der Kristalloberfläche (= Lage der Netzebenen) zum einfallenden Röntgenstrahl wird auf dem Display und in der Software angezeigt. Um die gleiche Drehachse ist das Zählrohr zur Intensitätsmessung der reflektierten Röntgenstrahlung drehbar, dessen Winkelstellung  $2\theta$  zum einfallenden Röntgenstrahl ebenfalls auf dem Display und in der Software angezeigt wird.

Beide Winkel werden automatisch vom Gerät eingestellt. Während des Versuchs muss daher unbedingt auf eine gute Kalibration geachtet werden ( $\theta = 0^\circ$ ) und die Randbedingungen (Anfangswinkel, Winkeländerung, Auswahl des richtigen Kristalls) müssen stimmen. Der Motor wird dann automatisch über das Programm gesteuert und der Zähler ausgelesen.



**Abbildung 7:** Röntgenapparat mit Röntgenröhre  
 Experimentierkammer  
 Blende **B**  
 Kristall **K**  
 Zählrohr **Z**  
 Motorantrieb und Winkelanzeige  
 Display  
 Schubfach mit Zubehör

Bei unserem Gerät handelt es sich um ein Vollschutzgerät mit Fenstern aus Bleiglas, d.h. die Tür muss verschlossen sein, um eine Messung starten zu können und es kann keinerlei Strahlung nach außen dringen.

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Vorbereitung

- Lochblende (Durchmesser 2 mm) einsetzen
- Schlitzblende vor dem Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ) einbauen
- Anodenspannung  $U_A = 35$  kV, Anodenstrom  $I = 1$  mA

### 4.2 Versuch 1: Messungen mit LiF(100)-Kristall

- Halter mit LiF-Kristall einsetzen
- Goniometer: beide Winkel (Probe ( $\rightarrow \theta$ ) und GMZ ( $\rightarrow 2\theta$ ) auf  $0^\circ$  stellen (Sichtprüfung!), Autokalibrierung, erneute Sichtprüfung
- **Messung 1: Übersichtsspektrum**  
 $U_A = 35$  kV,  $I = 1$  mA, Winkel  $\theta = 3 - 35^\circ$ , Winkelschrittweite  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ , Integrationszeit  $\tau = 2$  s
- **Messung 2: Serie mit verschiedenen Beschleunigungsspannungen  $U_A$**   
 $U_A = 25 - 35$  kV,  $\Delta U_A = 2,5$  kV,  $\theta = 3 - 8^\circ$ ,  $\Delta\theta = 0,2^\circ$ ,  $\tau = 10$  s

### 4.3 Versuch 2: Messungen mit KBr(100)-Kristall

- Halter mit KBr-Kristall einsetzen
- Goniometer neu kalibrieren, Sichtprüfung
- **Messung 3: Übersichtsspektrum**  
 $U_A = 35$  kV,  $I = 1$  mA,  $\theta = 3 - 20^\circ$ ,  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ,  $\tau = 2$  s
- Austausch Lochblende gegen Zr-Blende (Durchmesser 2 mm, Dicke  $d = 50 \mu\text{m}$ )
- **Messung 4: Übersichtsspektrum**  
 $U_A = 35$  kV,  $I = 1$  mA,  $\theta = 3 - 20^\circ$ ,  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ,  $\tau = 2$  s

#### 4.4 Versuch 3: Messungen mit NaCl(110)-Kristall

- Halter mit NaCl-Kristall und Zr-Blende einsetzen
- Goniometer neu kalibrieren, Sichtprüfung
- **Messung 5: Übersichtsspektrum**  
 $U_A = 35 \text{ kV}$ ,  $I = 1 \text{ mA}$ ,  $\theta = 3 - 25^\circ$ ,  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ,  $\tau = 2 \text{ s}$
- Austausch Schlitzblende gegen Halterung für Absorber am GMZ
- Goniometer neu kalibrieren, Sichtprüfung
- **Messung 6: Spektren mit verschiedenen Absorbern**  
 $U_A = 35 \text{ kV}$ ,  $I = 1 \text{ mA}$ ,  $\Delta\theta = 0,2^\circ$ ,  $\tau = 5 \text{ s}$ 
  1. ohne Absorber,  $\theta = 2,5 - 9,5^\circ$  und  $\theta = 15 - 25^\circ$
  2. Sn:  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 2,5 - 9,5^\circ$
  3. Cu:  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 15 - 25^\circ$
  4. Ni:  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 15 - 25^\circ$
  5. Zn:  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 15 - 25^\circ$
- **Messung 7: Absorber mit verschiedener Dicke  $d$**   
 $U_A = 35 \text{ kV}$ ,  $I = 1 \text{ mA}$ ,  $\theta = 9 - 12^\circ$ ,  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ,  $\tau = 5 \text{ s}$ 
  1. ohne Absorber
  2. Zn:  $d = 25 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $75 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$
  3. Al:  $d = 20 \mu\text{m}$ ,  $40 \mu\text{m}$ ,  $60 \mu\text{m}$ ,  $80 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$

## 5 Aufgabenstellung & Versuchsauswertung

### 1. Aufgabe: Charakteristisches Spektrum & Gitterkonstante

Erstellen Sie analog zu Abb. 2(d) eine graphische Darstellung der Intensität  $I$  gegen die Wellenlänge  $\lambda$  für die Übersichtsspektren der Kristalle LiF(100), KBr(100) und NaCl(110) aus den Messungen 1, 3, 4 und 5. Ordnen Sie die Intensitätsmaxima dem jeweiligen Linienspektrum ( $K\alpha$ ,  $K\beta$ , K-Kante) zu. Beachten Sie höhere Beugungsordnungen.

Bestimmen Sie die charakteristischen Wellenlängen  $\lambda_c$ .

Bestimmen Sie die Gitterkonstante  $a$  für alle drei Kristalle und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den entsprechenden Literaturwerten  $d_{\text{LiF}} = 4,026 \text{ \AA}$ ,  $d_{\text{KBr}} = 6,600 \text{ \AA}$ ,  $a_{\text{NaCl}} = 5,640 \text{ \AA}$ . Führen Sie eine Fehlerrechnung durch.

Wie monochromatisch ist die Röntgenstrahlung? Vergleichen Sie die Intensitätsverhältnisse  $I(K\alpha_1)/I(K\beta_1)$  der Messungen 3 und 4 mit und ohne Zr-Blende.

### 2. Aufgabe: Bestimmung der Planck-Konstante $h$

Bestimmen Sie in Messung 2 in einem begrenzten Winkelbereich die Intensität  $I$  der an einem LiF(100)-Einkristall reflektierten Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  für fünf verschiedene Anodenspannungen  $U_A$ .

Bestimmen Sie aus der graphischen Darstellung analog zu Abb. 2(c) die kurzwellige Grenze  $\lambda_{\min}$  des Bremsspektrums durch lineare Extrapolation als Schnittpunkt mit dem konstanten Untergrund.

Aus der graphischen Auftragung  $eU_A = f(\nu_{\max})$  ist die Planck-Konstante  $h$  zu bestimmen und mit dem Literaturwert zu vergleichen. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch.

### 3. Aufgabe: Moseley-Gesetz & Bestimmung der Rydberg-Frequenz $\nu_{\text{Ry}}$

In einem begrenzten Winkelbereich ist in Messung 6 für den NaCl(110)-Kristall die Intensität  $I$  sowohl ohne Absorber als auch mit Absorbern aus den Elementen Cu, Ni, Sn und Zn der Dicke  $d = 25 \mu\text{m}$  zu bestimmen.

Bestimmen Sie ebenfalls die Lage der K-Kante von Br aus Messung 3 und 4.

Stellen Sie die Intensitätsverhältnisse des Spektrums ohne Absorber zu den Spektren mit Absorber analog zu Abb. 4(b) graphisch dar und bestimmen Sie die Wellenlängen der K-Kanten  $\lambda_{\text{K-Kante}}$  durch lineare Extrapolation für diese Elemente.

Aus der graphischen Auftragung  $E(\lambda_{\text{K-Kante}})$  gegen  $Z_{\text{eff}}^2$  ist das Moseley-Gesetz zu bestätigen. Benutzen Sie  $Z_{\text{eff}} = Z - \sigma_{n,m}$  mit  $\sigma_{n,m} = 3, 42$ .

Aus der Steigung ist die Rydberg-Frequenz  $\nu_{\text{Ry}}$  zu bestimmen und mit dem Literaturwert zu vergleichen. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch.

### 4. Aufgabe: Lambert-Beersches Gesetz

Bestimmen Sie aus der Intensität  $I$  der Mo K $\alpha$ -Linie in Messung 7 die jeweilige Absorptionslänge  $d_0$  für die Absorber aus Al und Zn.

Bestätigen Sie in einer halblogarithmischen Auftragung analog zu Abb. 5 das Lambert-Beersche Gesetz. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch.

Welchen Einfluss hat die Wahl eines leichteren bzw. schwereren Elements als Absorber?

## 6 Fragen zur Selbstkontrolle

- Wie funktioniert eine Röntgenröhre?
- Welche verschiedenen Röntgenspektren unterscheidet man?
- Wieso gibt es eine kurzwellige Grenze des Bremsspektrums?
- Wie kommt das charakteristische Spektrum zustande?
- Wie lautet das Moseley-Gesetz?

- Wie sieht ein Röntgenspektrum in Absorption aus? Wie kommt es zustande?
- Wie weist man Röntgenstrahlen nach, wie, dass es sich hierbei um elektromagnetische Wellen handelt?
- Wie lautet das Braggsche Gesetz?
- Wie funktioniert ein Geiger-Müller-Zählrohr?
- Wie lautet das Lambert-Beersche Gesetz?