

# A12 Röntgenstrahlung

## Physikalische Grundlagen

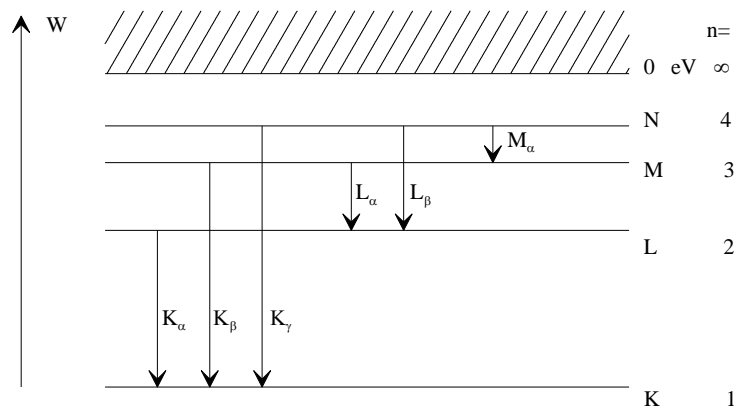
In einer Vakuumröhre werden Elektronen beschleunigt und treffen auf eine Antikathode. Dabei werden die Elektronen abgebremst und es entsteht eine energiereiche elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von ca.  $10^{-12}\text{m}$  bis  $10^{-8}\text{m}$ . Conrad Wilhelm Röntgen entdeckte diese Strahlung im Jahre 1895. Diese Strahlung wird X-Strahlung oder auch Röntgenstrahlung genannt. Sie besitzt ein hohes Durchdringungs- und Ionisationsvermögen.

Das Spektrum der Röntgenstrahlung setzt sich aus der kontinuierlichen Bremsstrahlung und einem charakteristischen Anteil zusammen. Bremsstrahlung entsteht durch Ablenkung von Elektronen im Coulombfeld des Kerns. Bei vollständiger Abbremsung des Elektrons ergibt sich eine kurzwellige Grenze  $\lambda_{\min}$  für das Bremsspektrum bei entsprechender Beschleunigungsspannung  $U_b$  mit:

$$\lambda_{\min} = \frac{c \cdot h}{e \cdot U_b} \quad (1)$$

Die kurzwellige Grenze verschiebt sich je nach verwendeter Beschleunigungsspannung.

Treffen schnelle Elektronen auf die metallische Antikathode, so werden Elektronen innerer Schalen herausgeschlagen. So können Übergänge von Elektronen mit höheren Hauptquantenzahlen  $m$  in diese Löcher erfolgen. Die charakteristische Röntgenstrahlung überlagert das kontinuierliche Spektrum und besteht aus scharfen Linien. Dabei ist die jeweilige Wellenlänge unabhängig von der Beschleunigungsspannung  $U_b$ . Die Übergänge im Termschema werden entsprechend Abb.1 bezeichnet.



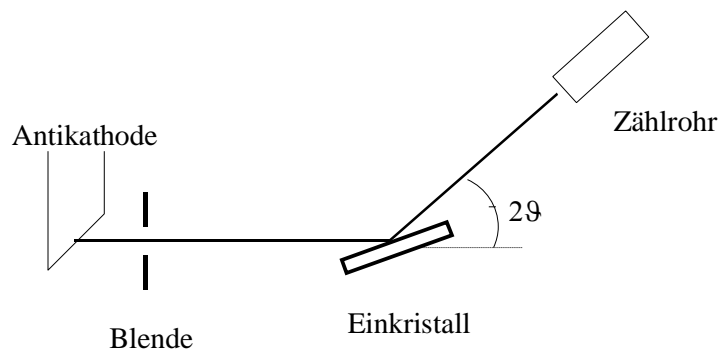
**Abb.1** Röntgenübergänge im Energie-Termschema

Werden Atome eines Kristalls von einem Röntgenstrahl getroffen, so entstehen nach dem Huygensschen Prinzip Elementarwellen. Bei einem Einkristall erfolgt die Reflexion jeweils an den Netzebenen unter dem eingestellten Einfallswinkel  $\vartheta$ . Durch Interferenz des reflektierten Röntgenlichtes werden entsprechend der „Bragg-Reflexion“ Maxima n-ter Ordnung ( $n=1,2,3\dots$ ) registriert.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta \quad (2)$$

Aufgrund der ionisierenden Wirkung kann die Intensität der reflektierten Strahlung mit einem Zählrohr detektiert und in Abhängigkeit des Winkels bzw. der Wellenlänge abgetragen werden. So kann man mit Hilfe eines Einkristalls, welcher als Gitter dient, das Spektrum einer Röntgenquelle aufnehmen.

Dabei wird der Kristall im Winkel  $\vartheta$  und das Zählrohr gleichzeitig im doppelten Winkel  $2\vartheta$  gedreht. Der reflektierte Strahl wird dann mit Hilfe eines Impulsratenmessers analysiert.



**Abb.2** Röntgenspektrometer

Wenn Röntgenstrahlen der Intensität  $I_0$  eine Materialschicht der Dicke  $d$  durchdringen, wird die Intensität  $I$  hinter der Schicht bestimmt durch die Gleichung:

$$I = I_0 e^{-\mu(\lambda)d} \quad (3)$$

Der Wert von  $\mu(\lambda)$  mit der Einheit  $\text{cm}^{-1}$  heißt linearer Schwächungskoeffizient und ist abhängig von der Wellenlänge der Primärstrahlung.

Um verschiedene Materialien vergleichen zu können, ist es vorteilhaft die sogenannte Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  einzuführen. Das ist die Materialdicke, welche die Intensität der Primärstrahlung auf die Hälfte reduziert. Für die Halbwertsdicke ergibt sich:

$$d_{1/2} = 0,69 \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

Weil der Schwächungskoeffizient proportional zur Masse ist, wird oft der Massenabsorptionskoeffizient  $\mu/\rho$  ( $\rho$  = Massendichte) mit der Maßeinheit  $\text{cm}^2/\text{g}$  verwendet.

Die Absorption von Röntgenstrahlen wird durch drei Vorgänge bestimmt:

1. photoelektrischer Effekt
2. Streuung
3. Paarbildung

Zur Paarbildung beträgt die mindestens notwendige Energie der Strahlung gleich dem Doppelten der Elektronenruheenergie:

$$2E_0 = 2m_0c^2 = 1,02\text{MeV} \quad (5)$$

Der Schwächungskoeffizient für Röntgenstrahlen setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$\mu = \tau + \sigma \quad (6)$$

$\tau$  = photoelektrischer Absorptionskoeffizient

$\sigma$  = Streukoeffizient

Für den Wellenlängenbereich, welcher hier benutzt wird, nimmt der photoelektrische Effekt den Hauptanteil bei der Absorption ein. Folglich ist  $\tau > \sigma$

Es gilt näherungsweise folgende Beziehung für den Massenabsorptionskoeffizienten:

$$\mu / \rho \sim \tau / \rho = f(\lambda^3, Z^{3,12}) \quad (7)$$

$\mu / \rho$  = Massenabsorptionskoeffizient

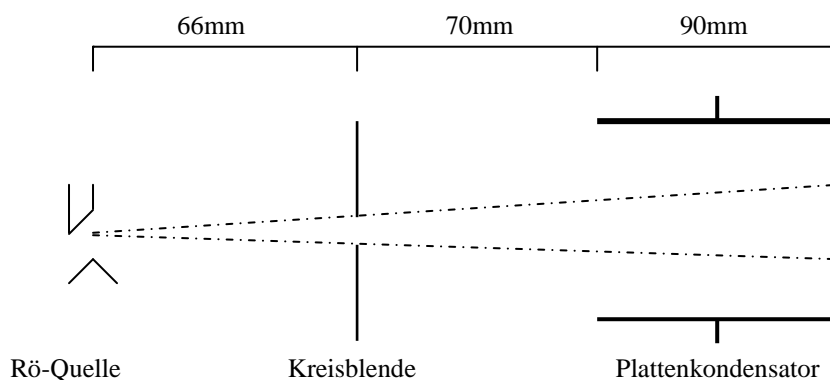
$\tau / \rho$  = photoelektrischer Anteil

$\lambda$  = Wellenlänge

$Z$  = Massenzahl

Röntgenstrahlen ionisieren die umgebenen Luftmoleküle. Mit Hilfe einer Ionisationskammer z.B. in Form eines Plattenkondensators kann man die Strahlung nachweisen. Legt man eine genügend hohe Gleichspannung an die Kondensatorplatten, so werden die Ionen in Richtung der Platten abgesaugt bevor sie rekombinieren können.

Durch geeignete Blenden wird eine direkte Bestrahlung der Kondensatorplatten verhindert, so dass keine Fotoelektronen zusätzlich herausgelöst werden. Das Volumen der durchstrahlten Luft wird aus der Geometrie der punktförmig angenommenen Röntgenquelle, Blende und Kondensator berechnet.



**Abb.3** Verlauf der Röntgenstrahlung im Plattenkondensator

Die Ionendosisleistung  $j$  beschreibt die durch die Strahlung erzeugte und auf Masse und Zeit bezogene Ladungsmenge  $\Delta Q$ .

$$j = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t} \quad (8)$$

Da in Luft zur Erzeugung eines Ions etwa 34eV benötigt werden, kann man aus der Ionendosisleistung die Energiedosisleistung  $k$  berechnen.

$$k = \frac{\Delta W}{m \cdot \Delta t} = 34 \frac{J}{C} \cdot j \quad (9)$$

Die erzeugte Ladungsmenge  $\Delta Q$  ergibt sich für den Sättigungsstrom  $I_k$  der Ionisationskammer mit

$$\Delta Q = I_k \cdot \Delta t \quad (10)$$

## Versuchsvorbereitung

- Erzeugung und Eigenschaften von Röntgenstrahlen
- Wirkungsweise von Zählrohren
- Erläutern Sie die Braggsche Drehkristallmethode zur Aufnahme des Emissionsspektrums einer Röntgenröhre
- Erklären Sie prinzipiell das Debye-Scherrer-Verfahren und Laue-Interferenzen zur Charakterisierung von Kristallen.
- charakteristische- und Röntgenbremsstrahlung
- Erläutern Sie die grundlegenden Vorgänge bei der Absorption von Röntgenstrahlung.
- Energiedosis, Ionendosis
- Wirkungsweise einer Ionisationskammer
- Röntgenfluoreszenz

## Aufgaben

1. Nehmen Sie das Röntgenspektrum als Funktion des Glanzwinkels ( $4^\circ$ - $14^\circ$ ) mit Hilfe eines LiF – Einkristalls bei verschiedenen Anodenspannungen auf und bestimmen sie aus der kurzwelligen Grenze des kontinuierlichen Spektrums jeweils die dazugehörige Wellenlänge! (Anodenspannung 15kV, 20kV, 25kV, 30kV, 35kV ; Wolfram- Röhre)
2. Stellen sie die Wellenlänge  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Sinus des Kristallwinkels  $\vartheta$  grafisch dar und extrapolieren sie die Darstellung bis ca.  $15^\circ$ .
3. Nehmen Sie das Röntgenspektrum einer Mo – Röhre im Bereich von  $4^\circ$ - $35^\circ$  auf, bestimmen sie die Quantenenergien der  $K_\beta$  - und  $K_\alpha$  - Linie und vergleichen sie diese mit den Tabellenwerten.
4. Ermitteln Sie die Gitterkonstante des LiF – Einkristalls.
5. Unter welchen Glanzwinkeln sind die Maxima zweiter und dritter Ordnung für die  $K_\alpha$  und  $K_\beta$ -Linie zu erwarten und überprüfen Sie das Ergebnis.
6. Bestimmen Sie den Massenabsorptionskoeffizienten und die Halbwertsdicke von Zink für die Wellenlängen 72,5pm und 50pm und überprüfen sie die Wellenlängenabhängigkeit lt. Gleichung (7) für den Massenabsorptionskoeffizienten.
7. Messen Sie den Ionisationsstrom in einem Plattenkondensator bei einer Anodenspannung von 35kV und einer Blende von 0,5cm in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung bis in den Bereich der Sättigung und tragen Sie die Abhängigkeit grafisch ab.  
Berechnen Sie das bestrahlte Luftvolumen im Plattenkondensator und die Energiedosisleistung  $k$  in mGy/s.
8. Bestimmen Sie die Bestandteile einer unbekanntenen Legierung mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz. Kalibrieren Sie zuvor den Energiedetektor mit Hilfe der Elemente Nickel und Silber. (Vorsicht: Der Röntgenstrahl darf niemals direkt auf die Detektorfläche treffen!)