

Hochaufgelöste Feinstruktur der charakteristischen Röntgenstrahlung einer Molybdän-Anode

Versuchsziele

- Hochaufgelöste Aufnahme des Spektrums einer Molybdän-Anode.
- Untersuchung der Struktur der K-Serie.
- Bestimmung der Aufspaltung der L-Schalen.

Grundlagen

Die charakteristische Röntgenstrahlung macht sich auf dem Kontinuum der Bremsstrahlung (resultierend aus der Beschleunigung der Elektronen auf der Anode) als Linienspektrum bemerkbar. Um das Auftreten der Linien der charakteristischen Röntgenstrahlung zu verstehen, schaut man sich ein Atom des Anodenmaterials an. Das Atom ist von Elektronen umgeben, die diskrete Energieniveaus besetzen. Ein Elektron, das von der Röhrenkathode auf die Anode beschleunigt wird, kann ein Elektron der inneren Schalen herausschlagen (wenn die kinetische Energie des beschleunigten Elektrons größer als die Bindungsenergie des Hüllenelektrons ist). In der Röntgenspektroskopie werden die Schalen als K-, L-, M-, usw. Schalen bezeichnet. Die Unterschalen werden z. B. als L1-, L2-, L3-Schalen bezeichnet.

Am „Ort“ des herausgeschlagenen Elektrons befindet sich dann ein Loch (Vakanz). Der Zustand dieses Atoms ist analog zu (bis auf das Vorzeichen) einem Ein-Elektron-Atom, bei dem sich das Elektron an der Stelle des Lochs befände. Man kann also das Atom mit Loch wie ein Ein-Elektron-Atom behandeln. Das Loch wird durch ein Elektron aus den oberen Schalen gefüllt. Beim Übergang von einem höheren Niveau in ein niedrigeres Niveau wird ein Photon emittiert, dessen Energie der Energiedifferenz der beiden Niveaus entspricht (siehe Fig. 1). Es gibt erlaubte Übergänge zwischen den Niveaus. Diese resultieren aus den Auswahlregeln der Quan-

tenzahlen (wie z. B. $\Delta L = \pm 1$, $\Delta j = 0, \pm 1$).

Es gibt eine Feinstruktur der Schalen in Unterschalen. Die Feinstruktur der Zustände lässt sich mit der Spin-Bahn-Kopplung des Atoms erklären (L2 ($2P_{1/2}$) und L3 ($2P_{3/2}$) bilden solch eine Feinstruktur). Das ist analog zu den beiden gelben Linien D1 und D2, die man von der Spektroskopie mit Hilfe einer Natriumlampe kennt. Da die Übergänge, die die Feinstrukturaufspaltung betreffen, sehr nah beieinander liegen, kann man diese nur mit hinreichender Auflösung des Röntgengeräts messen.

Die erlaubten Übergänge sind in Fig. 2 durch das Termschema dargestellt. Man erkennt, dass die M- und die N-Schale in 5 Unterschalen aufspalten, da auch andere Zustände besetzt werden können.

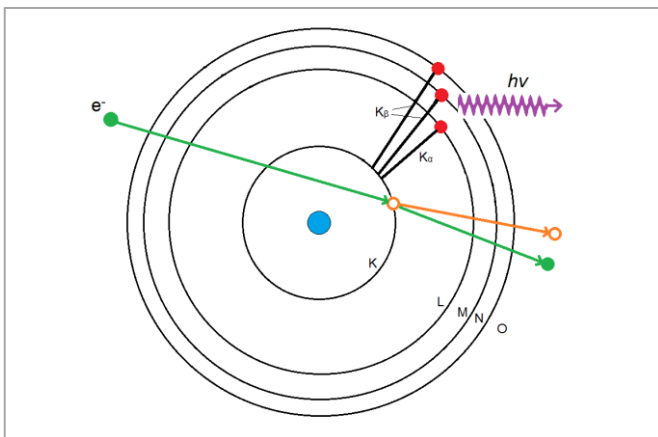


Fig. 1: Modell zur charakteristischen Röntgenstrahlung. Das ein-treffende Elektron schlägt ein Schalenelektron heraus.

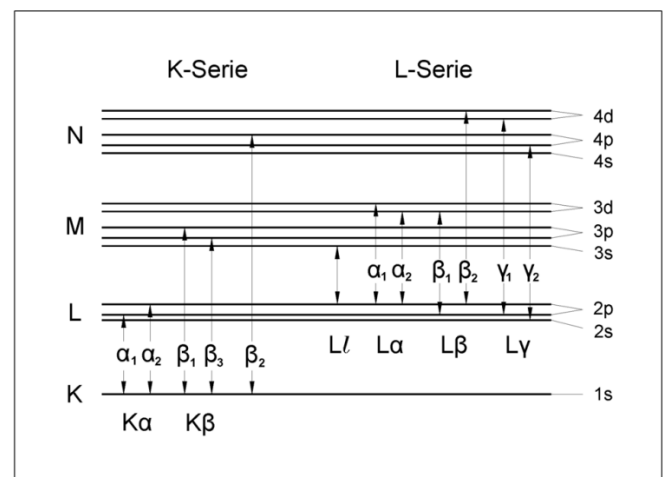


Fig. 2: Vereinfachtes Termschema eines Atoms mit einigen charakteristischen Röntgenlinien aus der K- und L-Serie

Es gibt heute zwei verschiedene Systeme der Nomenklatur der Röntgenlinien. Das historische System nach dem schwedischen Physiker M. Siegbahn (z. B. $L_{\alpha 1}$), und das systematische, von der IUPAC empfohlene (z. B. L3-M5) System (siehe Tab. 1).

Die historischen Bezeichnungen der charakteristischen Röntgenlinien werden aus dem Symbol der Elektronenschale (K, L, M usw.) und einem griechischen Kleinbuchstaben (α , β , γ usw.) oder einem lateinischen Kleinbuchstaben zusammengesetzt. So steht die Bezeichnung $K\alpha$ -Linie für die Übergänge aus den L-Schalen in die K-Schale. Bei höherer Auflösung entdeckte man die Aufspaltung der einzelnen Linien und benannte diese Feinstrukturaufspaltungen dann mit Ziffern entsprechend der Intensität [1].

| | L1 | L2 | L3 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | O4,O5 |
|----|----|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| L3 | | | | $L_{\gamma 1}$ | | | $L_{\alpha 2}$ | $L_{\alpha 1}$ | $L_{\beta 6}$ | | | $L_{\beta 2}$ | $L_{\beta 2}$ | $L_{\beta 5}$ |
| L2 | | | | $L_{\gamma 2}$ | | | $L_{\beta 1}$ | | | | | $L_{\gamma 1}$ | | $L_{\gamma 6}$ |
| L1 | | | | | $L_{\beta 4}$ | $L_{\beta 3}$ | | | | $L_{\gamma 2}$ | $L_{\gamma 3}$ | | | |
| K | | $K_{\alpha 2}$ | $K_{\alpha 1}$ | | $K_{\beta 3}$ | $K_{\beta 1}$ | $K_{\beta 2}$ | $K_{\beta 5}$ | | $K_{\beta 2}$ | $K_{\beta 2}$ | $K_{\beta 4}$ | $K_{\beta 4}$ | |

Tab. 1: Liste der erlaubten Übergänge und Vergleich von Siegbahn und IUPAC Nomenklatur

Sicherheitshinweise

Das Röntgengerät erfüllt die Vorschriften über die Bauart einer Schulröntgeneinrichtung und eines Vollschutzgeräts und ist als Schulröntgengerät und Vollschutzgerät unter BfS 05/07 V/Sch RöV bauartzugelassen.

Durch die werkseitig eingebauten Schutz- und Abschirmvorrichtungen ist die Dosisleistung außerhalb des Röntgengeräts auf unter $1 \mu\text{Sv/h}$ reduziert, einen Wert, der in der Größenordnung der natürlichen Strahlenbelastung liegt.

- Röntgengerät vor dem Zugriff Unbefugter schützen.
- Eine Überhitzung der Anode in der Röntgenröhre ist zu vermeiden.
- Bei Einschalten des Röntgengeräts überprüfen, ob sich der Lüfter im Röhrenraum dreht.

Das Goniometer wird ausschließlich über elektrische Schrittmotoren verstellt.

- Targetarm und Sensorarm des Goniometers nicht blockieren und nicht mit Gewalt verstellen.

Geräte

| | |
|--|---------|
| 1 Röntgengerät Mo, komplett..... | 554 801 |
| 1 HD-Zusatz X-ray | 554 835 |
| 1 Fensterzählrohr für α -, β -, γ - und Röntgenstrahlen mit Kabel..... | 559 01 |

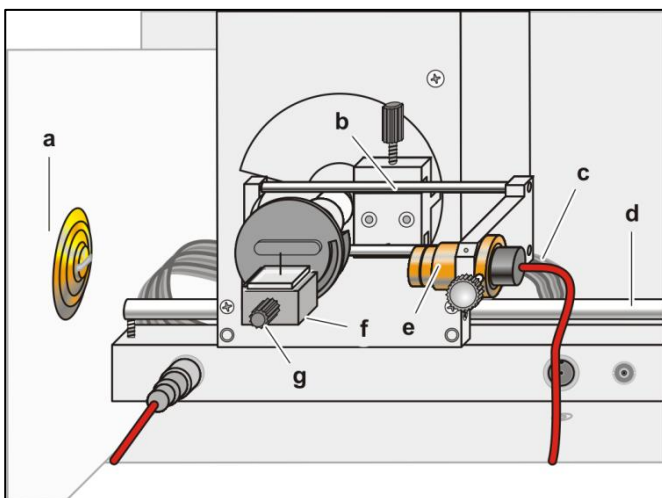


Fig. 3: Aufbau des Goniometers

Aufbau

Einige wichtige Details zum Versuchsaufbau sind in Fig. 3 dargestellt. Im Einzelnen sind folgende Schritte erforderlich (siehe auch Gebrauchsanweisung zum Röntgengerät):

- HD-Kollimator in die Kollimatoraufnahme (**a**) einbauen (Führungsstifte in Führungsnut einbringen).
- Goniometer so an den Führungsstangen (**d**) befestigen, dass der Abstand s_1 zwischen der Spaltblende des Kollimators und dem Targetarm ca. 5 cm beträgt. Flachbandkabel (**c**) für die Goniometersteuerung aufstecken.
- Schutzkappe des Fensterzählrohrs entfernen, Fensterzählrohr in die HD-Sensoraufnahme (**e**) einsetzen und Zählrohrkabel an die Buchse GM-TUBE anschließen.
- Durch Verschieben des HD-Sensorhalters (**b**) den Abstand s_2 zwischen dem Targetarm und der Spaltblende der HD-Sensoraufnahme auf ca. 6 cm einstellen.
- Targethalter mit Targettisch (**f**) einbauen.
- Rändelschraube (**g**) lösen, NaCl-Kristall flach auf den Targettisch legen, Targettisch mit Kristall vorsichtig bis zum Anschlag anheben und Rändelschraube gefühlvoll anziehen (dabei mögliches Verkanten durch leichtes Anpressen vermeiden).

Durchführung

- Programm „Röntgengerät HD“ (im Lieferumfang zum HD-Zusatz X-ray) installieren.
- Programm „Röntgengerät HD“ starten, korrekten Anschluss des Röntgengeräts überprüfen und falls dazu aufgefodert, die Firmware des Röntgengeräts aktualisieren.
- Kristall automatisch einmessen lassen, dazu im Programm mit dem Button oder der Taste F5 Dialogfenster öffnen, unter Kristall „Kristall einmessen“ auswählen, die Röntgenröhre Molybdän und den eingesetzten Kristall auswählen. Nach Klick auf „Suche starten“ beginnt die automatische Justage, die nach ca. 1 Minute erfolgreich beendet ist. Die Werte werden nach Klick auf „Übernehmen“ im Gerät gespeichert.
- Röhren-Hochspannung $U = 35 \text{ kV}$, Emissionsstrom $I = 1,00 \text{ mA}$ und Winkelschrittweite $\Delta\beta = 0,03^\circ$ wählen. Den unteren Grenzwert des Targetwinkels auf $2,5^\circ$, den oberen Grenzwert auf $25,0^\circ$ stellen und Messzeit pro Winkelschritt $\Delta t = 5 \text{ s}$ wählen.
- Für eine Betrachtung der Feinstruktur $U = 35 \text{ kV}$, Emissionsstrom $I = 1,00 \text{ mA}$ und Winkelschrittweite $\Delta\beta = 0,03^\circ$ wählen. Den unteren Grenzwert des Targetwinkels auf $21,5^\circ$, den oberen Grenzwert auf $23,0^\circ$ stellen und Messzeit pro Winkelschritt $\Delta t = 20 \text{ s}$ wählen.
- Taster COUPLED für die 29-Kopplung von Target und Sensor betätigen.
- Mit dem Taster SCAN Messung und Datenübertragung zum PC starten.
- Die Messreihe mit dem Button oder der Taste F2 unter einem passenden Namen speichern.

Messbeispiel

In Fig. 4 ist ein typisches Spektrum der Molybdän-Anode dargestellt. Man erkennt hier das Kontinuum mit einem Maximum bei ca. 4,5°, dem die charakteristischen Linien überlagert sind.

Man erkennt zwischen 6° und 7,5° die K_α- und K_β-Gruppen. Bei ca. den doppelten Winkeln erscheinen die gleichen Linien in zweiter Ordnung, mit deutlich verbesserter Auflösung (siehe Fig. 4).

Durch eine Messung zwischen 21,5° und 23° mit einer Torzeit von Δt = 20 s, kann man durch die verbesserte Statistik die Feinstruktur der K_α-Linie erkennen.

Höhere Ordnungen

Wählt man nun im Programm „Röntgengerät“ unter „Kristall“ die korrekten Einstellungen für den Gitterebenenabstand des Kristalls und die verwendete Röhre, wie in Fig. 5 dargestellt, und aktiviert dann „Alle Ordnungen zeigen“ werden die gemessenen Winkel β in Energien umgerechnet. Im Experiment wird mit festen Winkelschritten von 0,03° gearbeitet, die Energieänderung dE/dβ pro Messpunkt ist damit nicht konstant, sondern je höher die Ordnung des Spektrums ist, desto feiner werden die Winkelschritte.

Aus der Bragg-Gleichung

$$\lambda = 2d \cdot \frac{\sin \beta}{n}$$

und

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

ergibt sich

$$E \sim \frac{n}{\sin \beta}$$

und

$$\frac{dE}{d\beta} \sim \frac{n \cdot \cos \beta}{\sin^2 \beta}$$

Die Linienbreite der einzelnen charakteristischen Linien wird im vorliegenden Experiment durch die Spalte des Kollimators und vor dem Zählrohr bestimmt und beträgt bei allen Winkeln ca. 0,1°. In der Energiedarstellung bedeutet dies aber, dass in höheren Ordnungen die Linienbreite deutlich abnimmt, wie auch in Fig. 6 zu sehen ist.

Auswertung

Die Energieeinas der einzelnen Schalen samt Unterschalen lassen sich durch die gemessenen Übergänge bestimmen. Die Feinaufspaltung der Energieeinas L2 und L3 kann aus der Differenz der Übergangsenergien K_{α1} und K_{α2} berechnet werden. Im Messbeispiel ergibt sich hier 0,12 keV (siehe Tab. 2). In der fünften Ordnung haben die beiden K_α-Übergänge einen größeren Winkelabstand. Die Zählrate in dieser Ordnung ist so gering, sodass mit an einer höhere Torzeit messen muss, um die statistische Unsicherheit hinreichend zu minimieren.

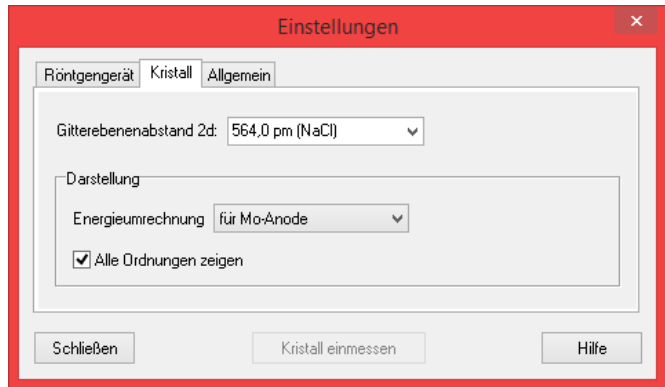


Fig. 5: Auswahl für Energiedarstellung

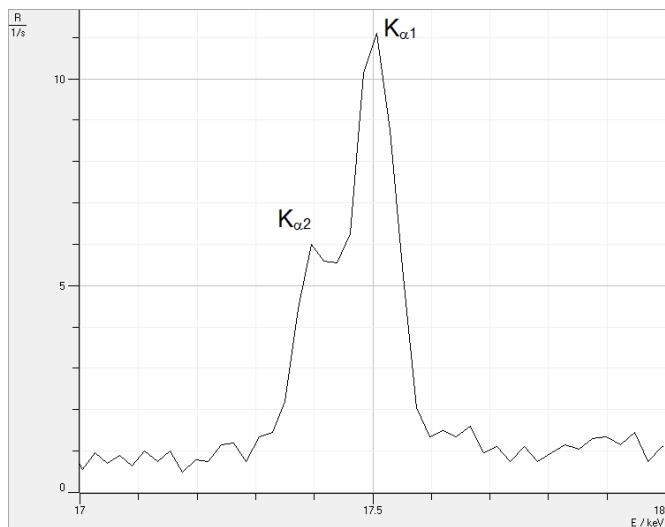


Fig. 6: K_α-Feinstruktur der Molybdänröhre in dritter Ordnung in Energiedarstellung

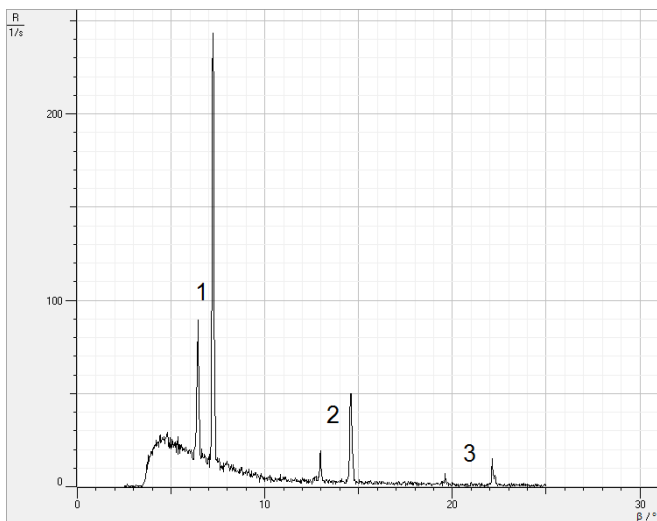


Fig. 4: Spektrum der Molybdänröhre in Winkeldarstellung

| | Messwerte / keV | | | Literaturwert[2] |
|----------------|-----------------|-------|-------|------------------|
| | Ordnung | | | |
| Übergang | 1 | 2 | 3 | |
| $K_{\alpha 1}$ | 17,44 | 17,49 | 17,51 | 17,48 |
| $K_{\alpha 2}$ | | | 17,39 | 17,37 |
| K_{β} | 19,63 | 19,59 | 19,63 | 19,79 |

Tab. 2: Vergleich zwischen Messwerten und Literaturwerten

Literatur

[1] H. Haken und H. C. Wolf, Atom- und Quantenphysik, 3. Auflage Hrsg., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1987.

[2] R. B. Firestone und V. S. Shirley, Table of Isotopes, 8th Edition Hrsg., New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.