

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.

Weitere Untersuchungen klärten dann die genaue Struktur der einzelnen Unterniveaus, die in Fig. 3 dargestellt ist [1].

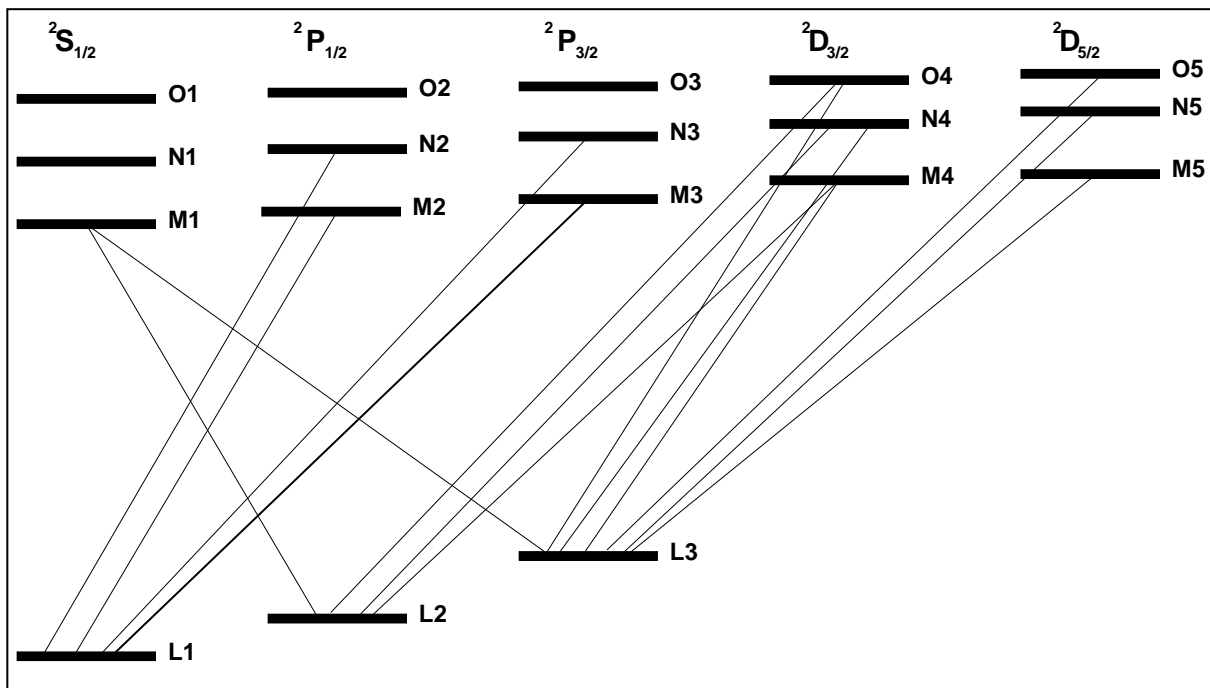


Fig. 3: Detaillierte Struktur der Schalen mit erlaubten Übergängen

	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_{γ}			$L_{\beta 1}$					$L_{\gamma 1}$		$L_{\gamma 6}$
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 werksseitig 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 Röntgenrundgerät	554 800
1 Röntgenröhre Au.....	554 866
1 Goniometer	554 831
1 HD-Zusatz X-ray	554 835
1 LiF-Kristall für Bragg-Reflexion	554 77
1 Fensterzählrohr für α -, β -, γ - und Röntgenstrahlen mit Kabel.....	559 01

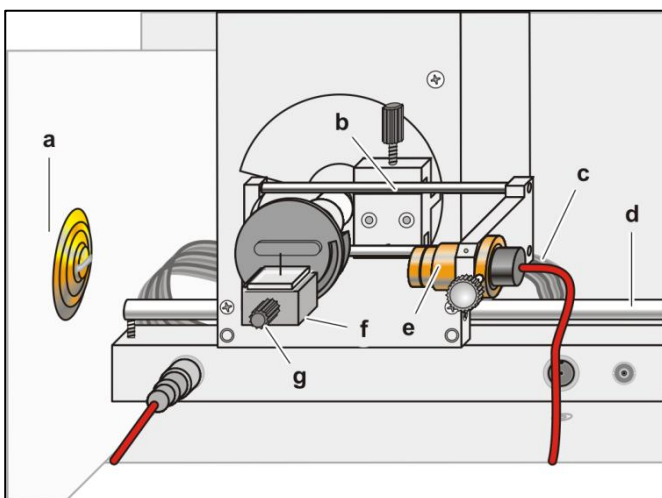


Fig. 4: Aufbau des Goniometers

Aufbau

Einige wichtige Details zum Versuchsaufbau sind in Fig. 4 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, LiF-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 aufgefordert, 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 Gold 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 $41,0^\circ$ stellen und Messzeit pro Winkelschritt $\Delta t = 5 \text{ s}$ 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. 5 ist ein typisches Spektrum der Gold-Anode dargestellt. Man erkennt hier das Kontinuum mit einem Maximum bei ca. 9°, dem die charakteristischen Linien überlagert sind.

Man erkennt zwischen 13° und 22° die L_γ-, L_β- und L_α-Gruppen, die schon eine teilweise Aufspaltung zeigen. Bei ca. den doppelten Winkeln erscheinen die gleichen Linien in zweiter Ordnung, mit deutlich verbesserter Auflösung.

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. 6 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 in der Energiedarstellung deutlich abnimmt, wie auch in Fig. 7 zu sehen ist. Die Linien der zweiten Ordnung sind weniger als halb so breit wie die der ersten Ordnung und zeigen deutlich besser die Struktur der Röntgenübergänge.

Auswertung

Die Energieniveaus der einzelnen Schalen samt Unterschalen lassen sich durch die gemessenen Übergänge bestimmen. Da das Röntgengerät nur mit Anodenspannungen bis 35 kV betrieben werden kann, reicht die kinetische Energie der beschleunigten Elektronen nicht aus, um Übergänge der K-Linie auszulösen, die bei Gold höher sind als 35 keV. Der Betrag der kinetischen Energie der beschleunigten Elektronen muss höher als die Bindungsenergie der Schalelektronen sein. Die Feinaufspaltung der Energieniveaus L₂ und L₃ kann z. B. aus der Differenz der Übergangsenergien L_{α2} und L_{β1} berechnet werden. Im Messbeispiel ergibt sich hier 1,81 keV. Alternativ ergibt die Differenz der Übergangsenergien L_{β2} und L_{γ1} auch 1,80 keV (siehe Tab. 2).

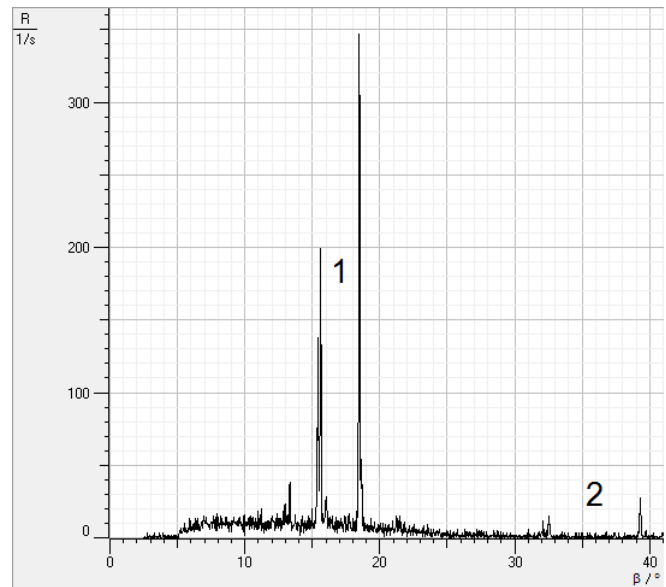


Fig. 5: Spektrum der Goldröhre in Winkeldarstellung

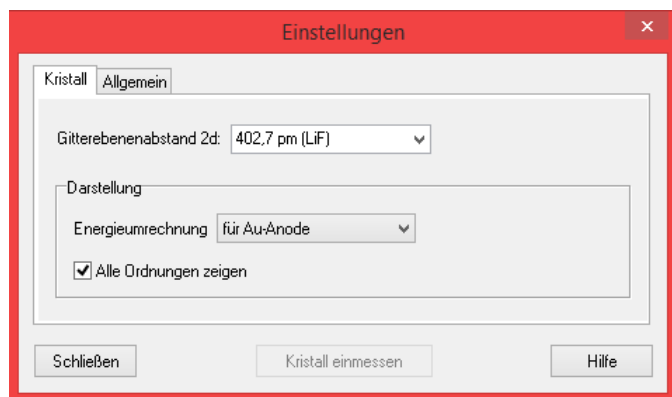


Fig. 6: Auswahl für die Energiedarstellung

Übergang	Messwerte / keV		Literaturwert [2]
	1	2	
$L_{\alpha 1}$	9,72	9,72	9,71
$L_{\alpha 2}$	9,63	9,63	9,63
$L_{\beta 1}$	11,44	11,45	11,44
$L_{\beta 2}$	11,57	11,59	11,58
$L_{\beta 3}$			11,61
$L_{\beta 4}$	11,19	11,23	11,21
$L_{\beta 5}$	11,93	11,91	11,92
$L_{\gamma 1}$	13,38	13,38	13,38
$L_{\gamma 2}$	13,69		13,71
$L_{\gamma 3}$	13,78	13,81	13,81
L_I	8,49		8,49
L_V			10,31

Tab. 2: Vergleich zwischen Messwerten und Literaturwerten

Vergleich Wolfram-Gold

Vergleicht man das L-Linien-Spektrum von Wolfram (P6.3.6.5/15) mit dem von Gold (P6.3.6.7/17), so fällt auf, dass sich nicht nur die absolute Position der Linien ein wenig verschoben hat, sondern auch das Spektrum stellenweise ganz anders aussieht.

Im Bereich der L_{β} -Linien sehen die beiden Spektren deutlich anders aus. Offenbar bewegt sich die $L_{\beta 2}$ -Linie mit einer Änderung der Kernladungszahl anders als die restlichen L_{β} -Linien.

Entsprechend Tab. 1 endet die $L_{\beta 2}$ Linie im L3-Niveau, während $L_{\beta 1}$, $L_{\beta 3}$ und $L_{\beta 4}$ in den L1- und L2-Niveaus enden.

Die Änderung der L-Energieniveaus erfolgt mit $(Z-a)^2$ (siehe P6.3.5.5). Zusätzlich verschiebt sich aber die L3-Unterschale relativ zu L1 und L2. Diese Aufspaltung erfolgt proportional zu Z^4 [1] und führt zur beobachteten Änderung im Spektrum.

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.

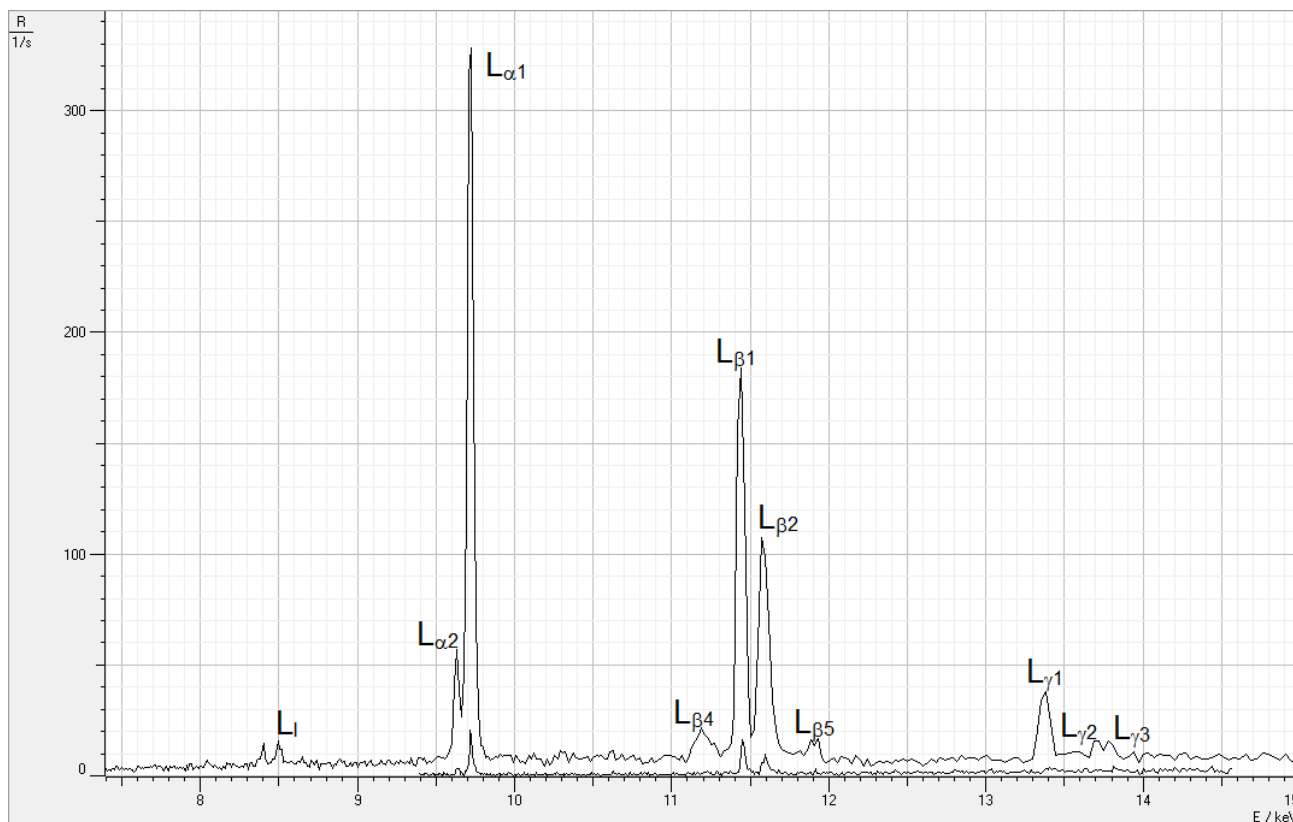


Fig. 7: Energiedarstellung des Spektrums in den ersten zwei Ordnungen