

## Hochaufgelöste Feinstruktur der charakteristischen Röntgenstrahlung einer Wolfram-Anode

### Versuchsziele

- Hochaufgelöste Aufnahme des Spektrums einer Wolfram-Anode.
- Untersuchung der Struktur der L-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 heraus schlagen (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.

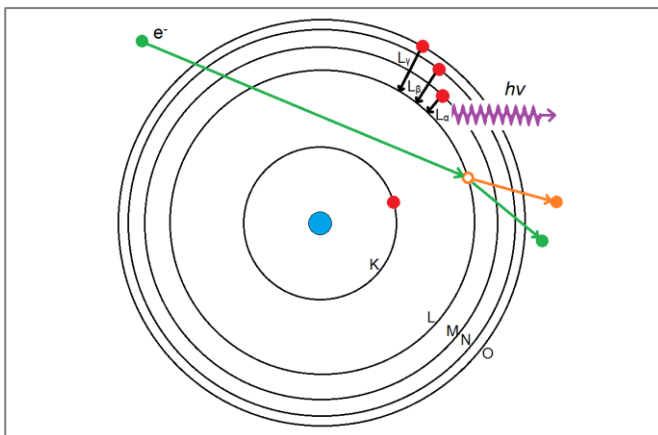


Fig. 1: Modell zur charakteristischen Röntgenstrahlung. Das ein-treffende Elektron schlägt ein Schalenelektron heraus.

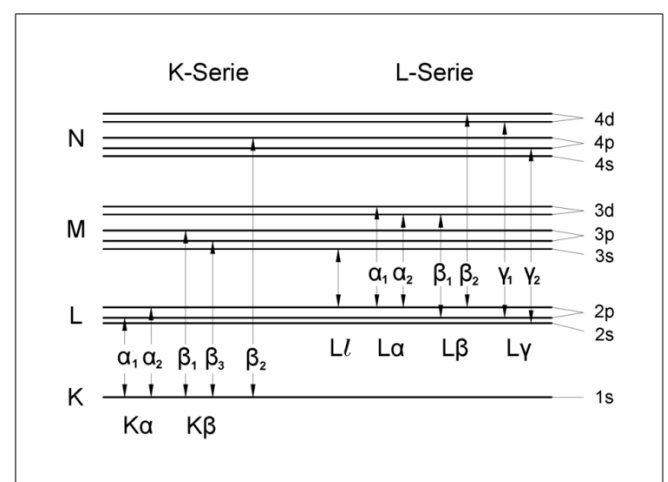


Fig. 2: Vereinfachtes Termschema eines Atoms mit einigen charakteristischen Röntgenlinien aus der K- und L-Serie

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 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  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].

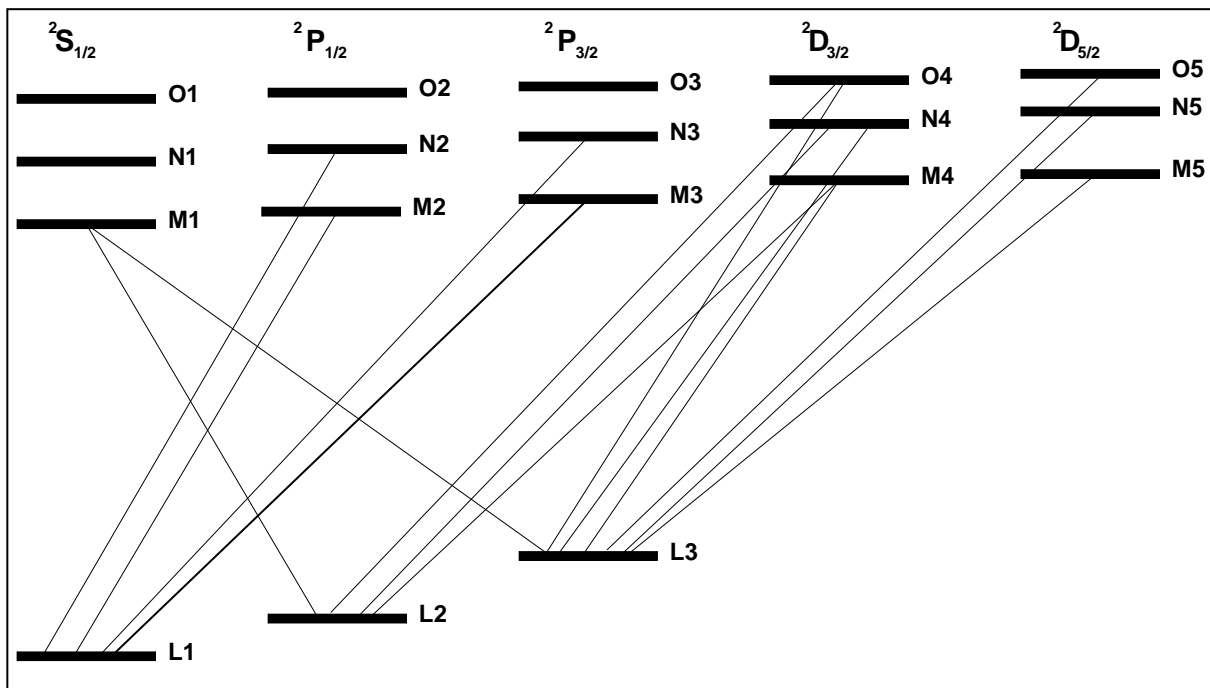


Fig. 3: Detaillierte Struktur der Schalen mit erlaubten Übergängen

	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				$L_{\gamma}$			$L_{\beta 1}$					$L_{\gamma 1}$		$L_{\gamma 6}$
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 Röntgenrundgerät .....	554 800
1 Röntgenröhre W .....	554 864
1 Goniometer .....	554 831
1 HD-Zusatz X-ray .....	554 835
1 LiF-Kristall für Bragg-Reflexion .....	554 77
1 Fensterzählrohr für $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - und Röntgenstrahlen mit Kabel .....	559 01

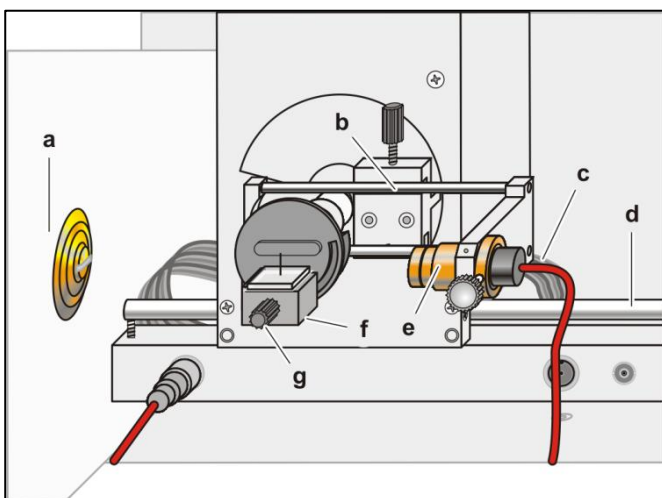


Fig. 4: Aufbau des Goniometers

### 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 Wolfram 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  $48,0^\circ$  stellen und Messzeit pro Winkelschritt  $\Delta t = 2 \text{ s}$  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 Wolfram-Anode dargestellt. Man erkennt hier das Kontinuum mit einem Maximum bei ca. 8°, dem die charakteristischen Linien überlagert sind.

Man erkennt zwischen 15° und 25° die L<sub>γ</sub>-, L<sub>β</sub>- und L<sub>α</sub>-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 Wolfram 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 L<sub>2</sub> und L<sub>3</sub> kann z. B. aus der Differenz der Übergangsenergien L<sub>α2</sub> und L<sub>β1</sub> berechnet werden. Im Messbeispiel ergibt sich hier 1,33 keV. Alternativ ergibt die Differenz der Übergangsenergien L<sub>β2</sub> und L<sub>γ1</sub> auch 1,33 keV. Mit den beobachteten Übergängen L<sub>I</sub> und L<sub>V</sub> ergibt sich eine Differenz zwischen den Energieniveaus L<sub>2</sub> und L<sub>3</sub> von 1,34 keV (siehe Tab. 2).

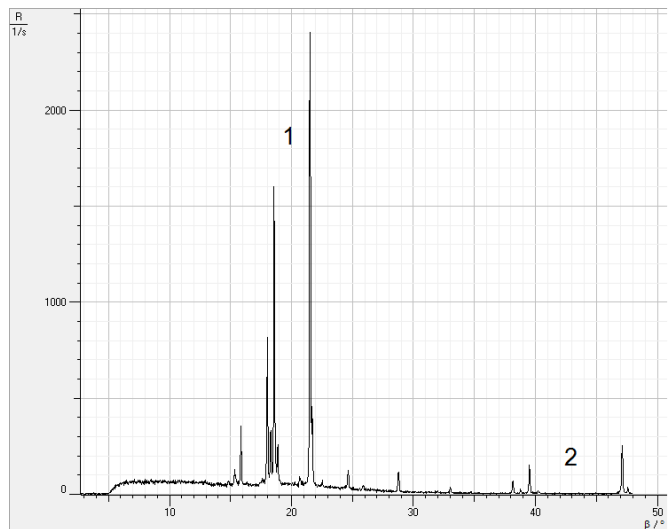


Fig. 5: Spektrum der Wolframröhre in Winkeldarstellung

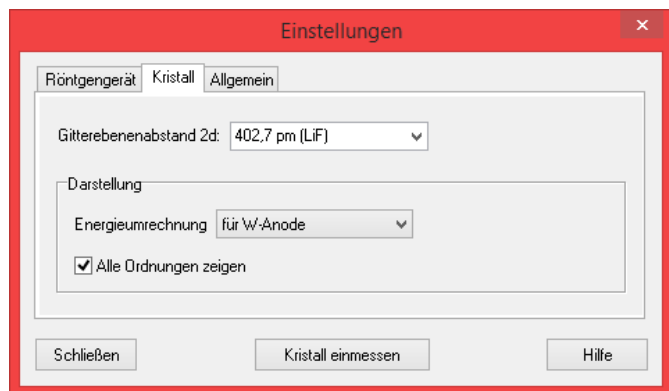


Fig. 6: Auswahl für die Energiedarstellung

Übergang	Messwerte / keV		Literaturwert [2]
	1	2	
$L_{\alpha 1}$	8,39	8,40	8,39
$L_{\alpha 2}$	8,33	8,34	8,33
$L_{\beta 1}$	9,66	9,68	9,67
$L_{\beta 2}$	9,94	9,96	9,95
$L_{\beta 3}$	9,80	9,83	9,82
$L_{\beta 4}$	9,51	9,54	9,52
$L_{\gamma 1}$	11,27	11,29	11,29
$L_{\gamma 2}$	11,64	11,62	11,61
$L_{\gamma 3}$		11,69	11,67
$L_{\gamma 6}$		11,55	11,54
$L_I$	7,38		7,39
$L_V$	8,72	8,72	8,72

Tab. 2: Vergleich zwischen Messwerten und Literaturwerten

## Vergleich Wolfram-Gold

Vergleicht man das L-Linien-Spektrum von Wolfram (P6.3.6.5 oder P6.3.6.15) mit dem von Gold (P6.3.6.7 oder P6.3.6.17), 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  $L_{\beta}$ -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  $L_{\beta}$ -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.

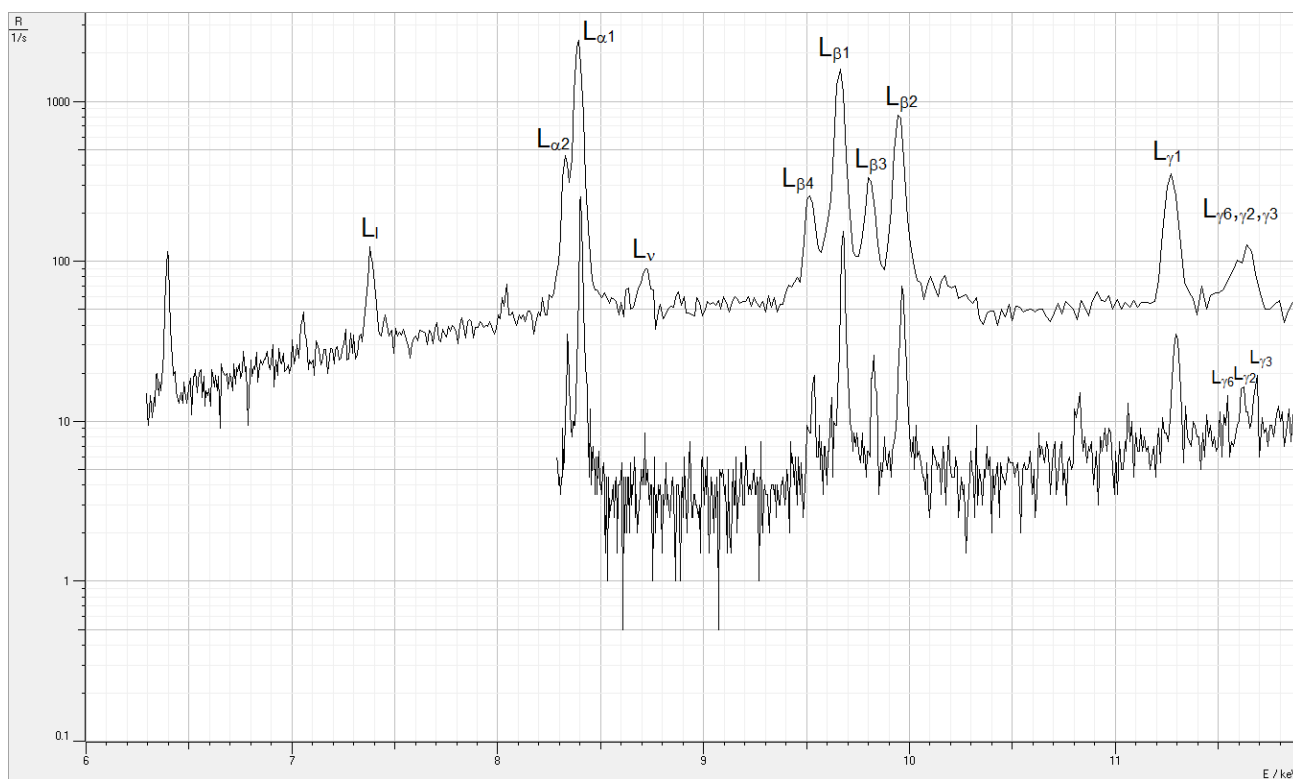


Fig. 7: Energiedarstellung des Spektrums in den ersten zwei Ordnungen in logarithmischer Darstellung