

# Fortgeschrittenenpraktikum 2



## Experimente der Atom- und Quantenphysik mit Röntgenstrahlung *Röntgenfluoreszenzanalyse und Moseleysches Gesetz*

*Georg Koller*

UNIVERSITÄT GRAZ  
UNIVERSITY OF GRAZ



## Inhaltsverzeichnis

1.	Generelle Informationen zum Röntgengerät .....	3
1.1.	Angestrebte Lernziele.....	9
1.2.	Notwendige Vorkenntnisse .....	9
1.3.	Wichtige Informationen zu Hardware und Software .....	9
1.4.	Empfohlene Literatur .....	9
2.	Versuch zur Röntgenfluoreszenz .....	10
2.1.	Grundlagen .....	10
2.2.	Versuchsdurchführung .....	10
2.2.1.	Aufnahme und Energiekalibrierung eines Spektrums.....	10
2.2.2.	Moosleysches Gesetz .....	12
3.	Hinweise zu Ihrer Sicherheit und zum Umgang mit den Gerätschaften .....	13
4.	Kontrollfragen.....	17
5.	Informationen zu Auswertung und Bericht.....	17

## 1. Generelle Informationen zum Röntgengerät

Die folgenden Experimente werden an einem Röntgengerät der Fa. Leybold Didaktik durchgeführt. Das Röntgengerät (Mo-Anode) ist ein mikroprozessorgesteuertes Komplettgerät, welches Experimente von der Atomphysik bis hin zur Festkörperphysik ermöglicht. Zur Erstellung des Skriptums wurden die Leybold Didaktik Versuchsunterlagen P 554801, P 6372, P 55483d

### Allgemeine Gerätebeschreibung:

Das Gerät besteht aus drei Bereichen: dem Bedienfeld (b), dem Röhrenraum (d) und dem Experimentierraum (e).

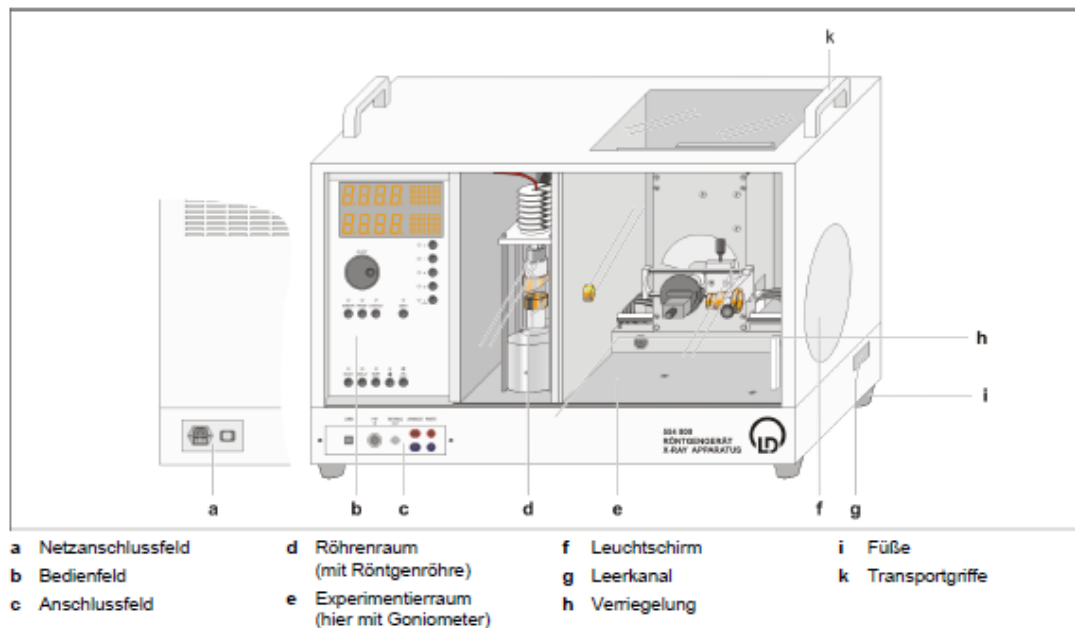


Abb. 1: Das Röntgengerät

**Bedienfeld (b):** Bedienung erfolgt über mehrere Taster (Auswahl) und einem Drehschalter (Werteeinstellung)

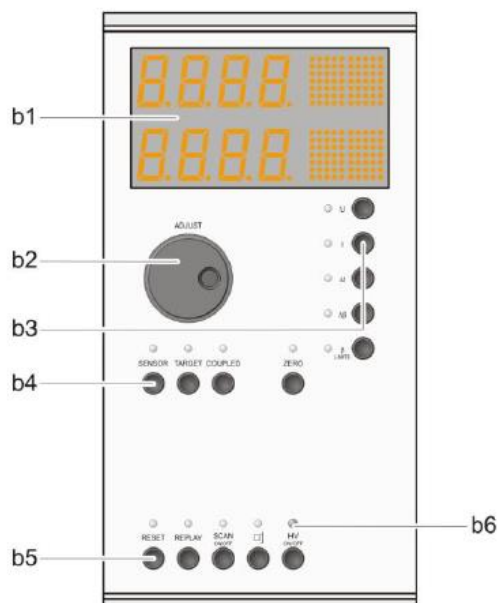


Abb. 2: Bedienfeld des Röntgengerätes

#### b1 Anzeigefeld

#### b2 Drehschalter zur Werteeinstellung

#### b3 Taster zur Wahl der Parameter

U...Röhrenhochspannung 0...35 kV

I...Röhrenemissionsstrom 0...1 mA

$\Delta t$ ...Messzeit pro Winkelschritt

$\Delta \beta$ ...Winkelschrittweite Goniometer

#### b4 Taster zur Wahl des Scan-Modus

Sensor...Sensorarm kann automat. Oder manuell bewegt werden

Target... Targetarm kann automat. Oder manuell bewegt werden

Coupled... Sensor- und Targetarm werden automat. oder manuell im Verhältnis 2:1 bewegt.

Zero...Bewegt Sensor- und Targetarm in die messtechnische Nullposition

#### b5 Befehls-Taster

Reset... Bewegt Sensor- und Targetarm in die messtechnische Nullposition und alle Parameter auf Werkseinstellung. Hv = off

Replay...aktiviert Auslesen des Messwertespeichers

Scan on/off...testet Sicherheitskreise (Türen geschlossen?) und startet Messung

Lautsprecher...schaltet akkustische Impulsanzeige für den Sensor ein und aus.

HV on/off... testet Sicherheitskreise (Türen geschlossen?) und schaltet Hochspannung ein

#### b6 Hochspannungs-Kontrollleuchte

blinkt bei eingeschalteter Röhren-Hochspannung

**Röhrenraum(d): Beinhaltet Mo-Anode zur Erzeugung von Röntgenstrahlung**

Der Röhrenraum dient zur Aufnahme der Röntgenröhre und als Abschirmeinrichtung für die Röntgenröhre.

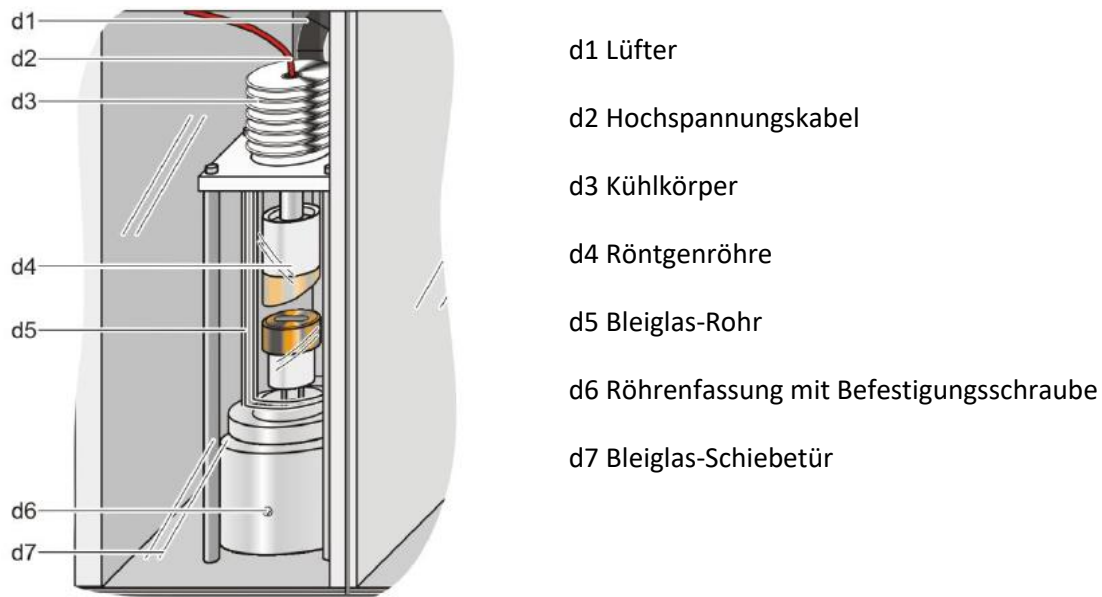
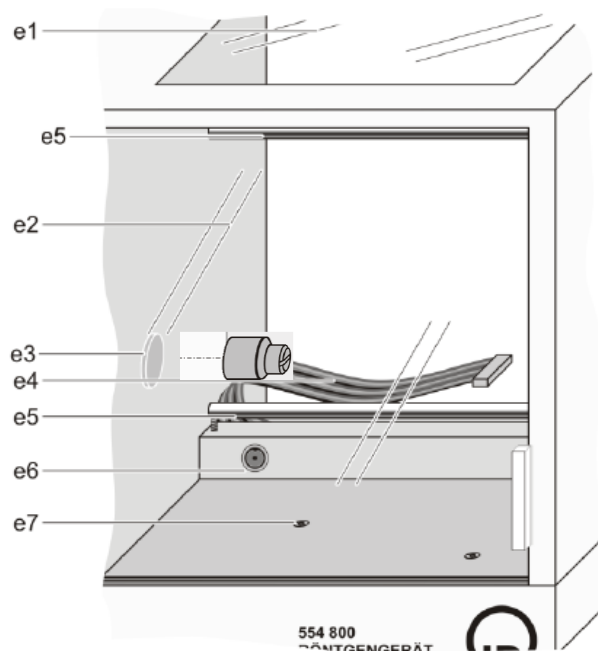


Abb. 3: Der Röhrenraum des Röntgengerätes

**Tür zum Röhrenraum stets geschlossen halten. Bei Problemen mit der Erzeugung von Röntgenstrahlung ist der Betreuer zu verständigen.**

### Experimentierraum (e):

Der Experimentierraum dient zur Aufnahme der Experimentiereinrichtungen, wie z.B. des Goniometers, Detektor, etc.



e1 Bleiglas-Fenster

e2 Bleiglas-Schiebetür

e3 Kollimator mit -aufnahme

e4 Flachkabel, mit Pfofenstecker

e5 Führungsschienen

e6 Anschlussleiste

e7 Haltebuchsen

Abb. 4: Der Experimentierraum des Röntgengerätes

## Allgemeines zu Bedienung und Inbetriebnahme

**Inbetriebnahme:** Im Folgenden eine Kurzbeschreibung zur Inbetriebnahme des Röntgengerätes. Spezifische Details erfolgen in der jeweiligen Versuchsbeschreibung.

a) Inbetriebnahme des Röntgengerätes:

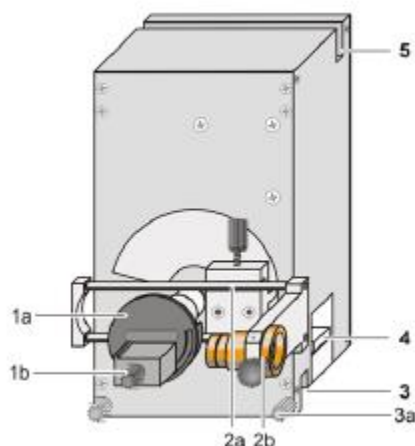
- Netzanschluss herstellen und Röntgengerät einschalten.
- Taster U drücken.
  - Mit Drehschalter z.B.  $U = 30 \text{ kV}$  einstellen.
  - Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Taster I drücken.
  - Mit Drehschalter z.B.  $I = 1,00 \text{ mA}$  einstellen.
  - Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Kontrollieren, ob die Bleiglas-Schiebetüren ordnungsgemäß verschlossen sind, und Taster HV ON/OFF drücken.
  - Die Hochspannungs-Kontrollleuchte blinkt und die Glühkathode der Röntgenröhre leuchtet. Es wird Röntgenstrahlung erzeugt.
- Taster I drücken und mit Drehschalter den Emissionsstrom I variieren.
  - Die Helligkeit der Glühkathode ändert sich.

b) Messparameter wählen:

- Taster U, I,  $\Delta t$ ,  $\Delta \beta$  oder  $\Delta \text{LIMITS}$  drücken.
- Mit Drehschalter gewünschten Wert einstellen.
- Im Anzeigefeld wird der Sollwert angezeigt.
- Beliebigen Taster drücken.
- Die Parameterwahl ist abgeschlossen.

c) Goniometerarme manuell (nicht computergesteuert!) positionieren:

**Goniometer niemals von Hand zu bewegen versuchen!**



- 1 Targetarm  
mit Targethalter (1a), Targettisch (1b)
- 2 Sensorarm  
mit Sensorhalter (2a), Sensoraufnahme (2b)
- 3 untere Führungsnut  
mit Rändelschrauben (3a)
- 4 Pfostenbuchse
- 5 obere Führungsnut

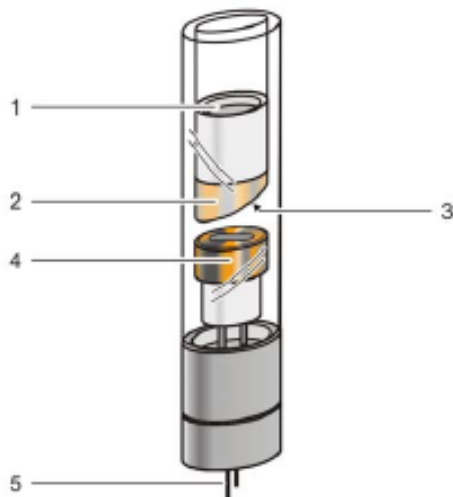
Abb. 5: Das Goniometer des Röntgengerätes

**Das Goniometer wird ausschließlich über elektrische Schrittmotoren verstellt:  
Targetarm und Sensorarm des Goniometers nicht blockieren und nicht mit Gewalt  
verstellen.**

- Mit Taster Zero „Nullposition“ anfahren
- Taster SENSOR bzw. TARGET drücken.
  - Mit dem Drehschalter ADJUST gewünschten Winkel einstellen.
- Im Anzeigefeld wird der Sollwert dargestellt, der Sensor- bzw. Targetarm bewegt sich zur gewünschten Winkelposition.

#### Die Molybden (Mo) Röntgenröhre:

Die Röntgenröhre Mo ist eine direkt geheizte Glühkathoden-Röhre. Ihre Molybdän-Anode ist zur Ableitung der Wärme in einen Kupferblock eingelagert.



- 1 Schraubgewinde, für Kühlkörper
- 2 Kupferblock
- 3 Molybdän-Anode
- 4 Glühkathode
- 5 Stiftsockel

#### **Technische Daten:**

Anodenmaterial: Molybdän

$K\alpha = 17,4 \text{ keV (71,1 pm)}$ ,  
 $K\beta = 19,6 \text{ keV (63,1 pm)}$

max. Anodenspannung: 35 kV

max. Emissionsstrom: 1 mA

Größe des Brennflecks: ca.  $2 \text{ mm}^2$

Abb. 6: Die Mo-Röntgenröhre



### 1.1. Angestrebte Lernziele

### 1.2. Notwendige Vorkenntnisse

- In Kapitel 7.5 Röntgenstrahlung aus Demtröder „Experimentalphysik 3“ [1] finden Sie die notwendigen Grundkenntnisse zu dieser Übung. Darin finden Sie auch die Antworten auf die Kontrollfragen.

### 1.3. Wichtige Informationen zu Hardware und Software

- Der Versuch wird an einem Röntgengerät der Fa. Leybold Didaktik durchgeführt, siehe Grundlagen Punkt 1.
- Zur Datenaufnahme verwenden wir das Programm Cassylab 2 der Fa Leybold. Dieses kann, muss aber nicht zur Datenauswertung verwendet werden. Diese kann z.B. auch mit qti-plot (aus dem Grundlabor bekannt) oder ähnlichem erfolgen. Eine ausführliche Beschreibung des Programmes Cassylab 2 unter <https://www.ld-didactic.de/software/524221de.pdf>

### 1.4. Empfohlene Literatur

[1] Wolfgang Demtröder, „Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper“, 2016, Springer, ISBN 978-3-642-03911-9 (eBook)

## 2. Versuch zur Röntgenfluoreszenz

### 2.1. Grundlagen

Werden Atome mit hochenergetischer Röntgenstrahlung bestrahlt, so können durch die zugeführte Energie Elektronen aus den inneren Schalen herausgeschlagen werden. Die Lücken in den inneren Schalen füllen sich dann durch Elektronen aus äußeren Schalen auf. Dabei verlieren diese Elektronen Energie, die wiederum in Form von Röntgenstrahlung emittiert wird. Dieses Phänomen wird als Röntgenfluoreszenz bezeichnet. Werden Elektronen aus der innersten 1.Schale, die auch K-Schale genannt wird, herausgeschlagen, so entsteht das sogenannte K-Spektrum (die K-Spektralserie). Dieses entsteht durch Elektronensprünge von der 2.( $K\alpha$ ) oder 3.( $K\beta$ ) Schale. Analog entsteht das L-Spektrum, wenn Elektronen auf die 2.Schale (L-Schale) zurückfallen. Die Energie der emittierten Strahlung einer Schale ist abhängig von der Kernladungszahl (Moseleysches Gesetz). Dies ermöglicht die eindeutige Bestimmung der Kernladungszahl eines Elements und war historisch ein wichtiger Bestandteil für die Vervollständigung des Periodensystems. Jedes Element (mit jeweils einer anderen Kernladungszahl) emittiert Röntgenstrahlung mit einer charakteristischen Energie. Die Energie ist dabei praktisch unabhängig von der Bindungsform des Elements, weil die inneren Elektronen praktisch nicht zur chemischen Bindung beitragen. So kann durch Röntgenfluoreszenzanalyse die Zusammensetzung von Materialien bestimmt werden, auch wenn diese in chemisch verschiedenen Formen vorliegen. Das Röntgenfluoreszenzspektrum einer homogenen Probe mit mehreren Komponenten ist in erster Näherung eine Addition der Einzelspektren. Deshalb kann mit dieser Methode die Zusammensetzung von beliebigen Proben qualitativ bestimmt werden. Dafür werden zunächst alle im Fluoreszenzspektrum vorhandenen Signale den Elementen zugeordnet. Dies geschieht mit Hilfe von Tabellenwerten für die Energien der charakteristischen Linien. Für die Zuordnung wird auch das Muster jeder Spektralserie berücksichtigt: Zu jeder  $K\alpha$ -Linie gehört eine  $K\beta$ -Linie mit ca. 5 –10-fach geringerer Intensität.

Ref.: [1] Wolfgang Demtröder, „Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper“, 2016, Springer, ISBN 978-3-642-03911-9 (eBook)

### 2.2. Versuchsdurchführung

Im Zuge des Beispiels Röntgenfluoreszenzanalyse sind folgende Versuche durchzuführen

- 1) Aufnahme und Kalibrierung eines Röntgenenergiespektrums
- 2) Zeigen Sie die Gültigkeit des Moseleyschen Gesetzes anhand der bereitgestellten Metalle und ermitteln Sie die Abschirmkonstante K-Linien
- 3) Analyse der Zusammensetzung mehrerer unbekannter Proben.

#### 2.2.1. Aufnahme und Energiekalibrierung eines Spektrums

- 1) Aufnahme und Kalibrierung eines Röntgenenergiespektrums

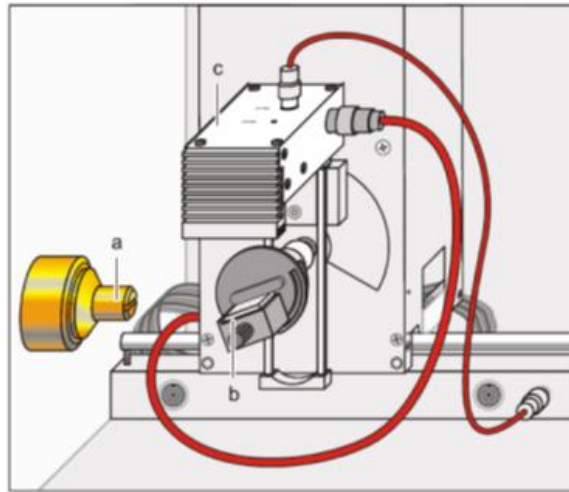


Abb. 7: Versuchsaufbau zur Aufnahme und Kalibrierung eines Röntgenenergiespektrums Kollimator (a), Kalibriertarget (b), Röntgenenergiedetektor (c)

#### Aufnahme des Kalibrierspektrums:

- Abstände zwischen Spaltblende des Kollimators und Drehachse sowie zwischen Drehachse und Eintrittsöffnung des Röntgenenergiedetektors jeweils auf 5-6 cm einstellen.
- Kalibriertarget (Verzinktes Eisenblech) aus dem Lieferumfang des Röntgenenergiedetektors auf den Targettisch legen.
- Taster SENSOR drücken und den Sensorwinkel mit Dreheinsteller ADJUST von Hand auf 90° stellen.
- Taster TARGET drücken und den Targetwinkel mit Dreheinsteller ADJUST von Hand auf 45° stellen.
- Tischnetzgerät ans Netz anschließen (nach ca. 2 min leuchtet die Leuchtdiode „grün“ und der Röntgenenergiedetektor ist betriebsbereit).
- CASSY Lab2 aufrufen und die Messparameter „Vielkanalmessung, 512 Kanäle, negative Pulse, Verstärkung = -2,5, Messdauer = 300 s“ einstellen.
- Röhren-Hochspannung  $U = 30 \text{ kV}$ , Emissionsstrom  $I = 1,00 \text{ mA}$  einstellen und Hochspannung einschalten.
- Spektrumaufnahme nacheinander für Kalibrierprobe starten.
- Nach Ablauf der Messzeit das Spektrum unter einem passenden Namen speichern

#### Energiekalibrierung der Spektren in Cassylab2:

- Die Energiekalibrierung des Detektors erfolgt für die  $K\alpha$ -Linien von Eisen (Fe) und Zink (Zn).
- Öffnen Sie das Dialogfenster "Energiekalibrierung" mit Alt + E, wählen Sie "Globale Energiekalibrierung" und geben Sie die Energien für die Fe  $K\alpha$ -Linie (6,40 keV) und die Zn  $K\alpha$ -Linie (8,64 keV) ein.
- Wählen Sie im Popup-Menü des Diagrammfensters die Option Menüpunkt "Sonstige Auswertungen" ® "Peak berechnen Mitte ", wählen Sie die Fe  $K\alpha$ -Linie aus und geben Sie das Ergebnis in das Dialogfenster "Energiekalibrierung" ein.
- Bestimmen Sie dann analog das Zentrum für die Zn  $K\alpha$ -Linie und geben Sie dieses ein.

## 2.2.2. Moosleysches Gesetz

Gleiche Einstellungen wie bei Energiekalibrierung beibehalten!

- Titan (Ti) Target einlegen (Targetwinkel 45°)
- Spektrumaufnahme (F9) starten
- Anschließend Spektren für die weiteren Targets aus dem Targetsatz K-Linien-Fluoreszenz aufnehmen (Ti, Fe, Ni Cu, Zn, Zr, Mo, Ag).
- Gesamte Messung unter einem passenden Namen speichern.

*Die folgenden Auswertungen sind Hilfestellungen und können ganz leicht mit den Daten auch zuhause (QTI-Plot) durchgeführt werden*

Weitere Auswertung in CASSY Lab zum Moseleyschen Gesetz:

- Neue Größe „Ordnungszahl“ (als Parameter, Symbol: Z, von: 0, bis: 50, Dezimalstellen: 0) einrichten.
- Neue Größe „Moseley alpha“ (als Parameter, Symbol:  $\gamma_\alpha$ , von: 0, bis: 50, Dezimalstellen: 2) einrichten.
- Neue Größe „Moseley beta“ (als Parameter, Symbol:  $\gamma_\beta$ , von: 0, bis: 50, Dezimalstellen: 2) einrichten.
- Neue Darstellung „Moseley“ mit Ordnungszahl als x- Achse und  $\gamma_\alpha$ ,  $\gamma_\beta$  als y-Achsen einrichten.
- In die Tabelle der Darstellung „Moseley“ Ordnungszahl und Werte von  $E_{Ry}$  für die  $\alpha$ -Linien (als  $\gamma_\alpha$ ) und die  $\beta$ -Linien (als  $\gamma_\beta$ ) eintragen (siehe Abb)

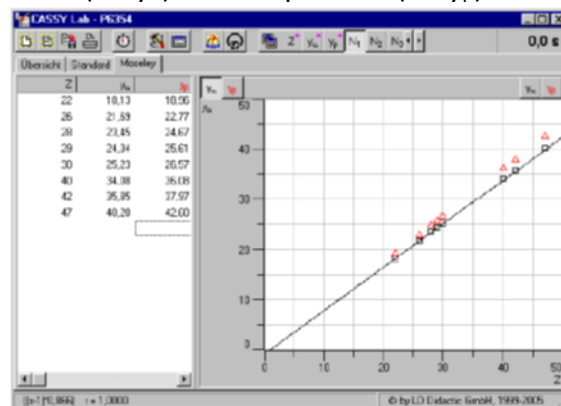


Abb.8 Grafische Darstellung zum Moseleyschen Gesetz. Experimentelle Werte von  $\sqrt{E/Ry}$  für die  $\alpha$ -Linien ( $\gamma_\alpha$ , Vierecke) und die  $\beta$ -Linien (als  $\gamma_\beta$ , Dreiecke) und die theoretische Gerade nach Gl. (III).

Vergleich der experimentellen Werten mit den aus Gl. (III) berechneten theoretischen Werten:

- Darstellung „Moseley“ wählen und mit Alt+F das Dialogfenster „Freie Anpassung“ öffnen.
- Gl. (III) als Formel  $f(x,A,B,C,D) = (x-1)*\sqrt{3/4}$  eintragen.
- „Weiter mit Bereich markieren“ anklicken und beliebige Messpunkte im Diagramm markieren.

- Da die eingegebene Formel keine freien Parameter enthält, wird sie ohne Anpassung dargestellt. Das Resultat ist eine gemäß Gl. (III) berechnete theoretische Gerade, die mit den Messwerten gut übereinstimmt (siehe Abb.).

Weitere Auswertung in CASSY Lab zu den Abschirmkonstanten:

- Neue Größe  $\sigma_\alpha$  einrichten (als Parameter, Name: „Abschirmung alpha“, Symbol:  $\sigma_\alpha$ , von: 0, bis: 3, Dezimalstellen: 2).
- Neue Größe  $\sigma_\beta$  einrichten (als Parameter, Name: „Abschirmung beta“, Symbol:  $\sigma_\beta$ , von: 0, bis: 3, Dezimalstellen: 2).
- Neue Darstellung „Abschirmung“ mit Ordnungszahl als x-Achse und  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$  als y-Achsen einrichten.
- In die Tabelle der Darstellung „Abschirmung“ Ordnungszahl und Werte von  $\sigma_{2,1}$  für die  $\alpha$ -Linien (als  $\sigma_\alpha$ ) und Werte von  $\sigma_{3,1}$  für die  $\beta$ -Linien (als  $\sigma_\beta$ ) eintragen (siehe Abb.8).

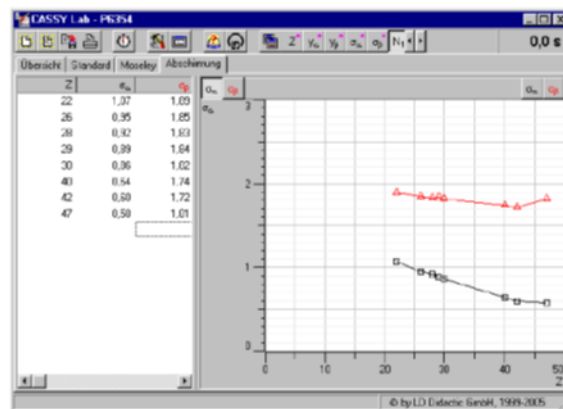


Abb. 9: Effektive Abschirmkonstanten für die Elektronenübergänge der K-Linien.

Die aus den experimentellen Werten nach der Gl. (II) ausgerechneten Werte  $\sigma_{2,1}$  für die Ka-Linien zeigen, dass die Abweichung von der theoretisch erwarteten  $s=1$  mit wachsender Ordnungszahl Z größer wird. Das ist damit zu erklären, dass der Einfluss der äußeren Elektronen mit steigender Elektronenzahl größer wird.

Die Abschirmkonstanten  $\sigma_{3,1}$  für die K $\beta$ -Linien haben Zahlenwerte »2, was wie erwartet eine größere effektive Abschirmung der Kernladung für die Elektronenübergänge aus dem höheren Niveau  $n_2 = 3$  zeigt.

### 2.2.3. Analyse der Zusammensetzung mehrerer unbekannter Proben

Gleiche Einstellungen wie bei Energiekalibrierung beibehalten! Messzeit auf 600s erhöhen.

Sie können gerne auch Proben mitnehmen, deren Zusammensetzung Sie kennen möchten. Größe des Probestisches ca. 2 cm x 2 cm.

- Unbekanntes Target einlegen (Targetwinkel 45°)
- Spektrumaufnahme (F9) starten
- Ermittlung der Bindungsenergien der gefundenen Peaks.
- Identifikation der gefundenen Elemente
- Abschätzung der Zusammensetzung aus Peakhöhe

- Peaks fitten und Fläche ermitteln
- Zusammensetzung der Proben aus Peakfläche

## 2.3. Zur Auswertung notwendige Zusammenhänge:

### Zur Energiekalibrierung:

Mit dem Röntgenenergiedetektor kann die Energie von Röntgenstrahlung bestimmt werden. Kern des Detektors ist eine Si-PIN-Photodiode, die zur Verringerung des Leckstromes mit einem Peltierelement gekühlt wird. In der PIN-Diode produziert die einfallende Röntgenstrahlung durch Wechselwirkung mit den Kristallatomen Elektron-Loch-Paare. Diese werden in einem elektrischen Feld getrennt und anschließend in einen Spannungsimpuls gewandelt. Die Anzahl der Elektron-Loch-Paare und die Impulshöhe sind proportional zur Röntgenenergie. Zur Impulshöhenanalyse wird ein Vielkanal-Analysator (VKA) verwendet, der an einen Computer (PC) angeschlossen ist.

PIN-Diode: Die PIN-Diode besteht aus einem Silizium-Einkristall mit einer ungefähr 150 µm breiten intrinsischen (undotierten) Zone zwischen einer p- und einer n-Zone. In dieser Zone wird ein Teil der einfallenden Röntgenstrahlung absorbiert. Die Absorption eines Röntgenphotons geschieht durch Photoeffekt unter Auslösen eines schnellen Photoelektrons. Bis auf den der Bindungsenergie entsprechenden Anteil wird die Röntgenenergie also in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt. Das Elektron verliert seine Energie in Stößen mit den Kristallatomen, wobei die Atome ionisiert werden und somit Elektron-Loch-Paare entstehen. Das erste, durch Photoeffekt ionisierte Atom kann seinerseits ein charakteristisches Röntgenphoton emittieren. Auch dessen Energie wird meist vollständig im Detektor absorbiert. Dann entspricht die insgesamt absorbierte und in Elektron-Loch-Paare gewandelte Energie der zu messenden Photonenenergie  $E_X$ . Im anliegenden elektrischen Feld der PIN-Diode werden Elektronen und Löcher getrennt und zu den Elektroden gezogen, bevor sie rekombinieren können. Zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares in Silizium ist im Mittel die Energie  $\epsilon = 3,8 \text{ eV}$  erforderlich. Die deutlich größere, absorbierte Röntgenenergie  $E_X$  wird somit in etwa

$$N_x = \frac{E_x}{\epsilon} \quad (1)$$

Elektron-Loch-Paare umgesetzt. D.h. die Zahl der Elektron-Loch-Paare ist proportional zu  $E_X$  und die zu den Elektroden gezogene Ladung beträgt

$$Q_x = \epsilon N_x \quad (2).$$

Diese Ladung gelangt in einen ladungsempfindlichen Vorverstärker und wird in einem Rückkopplungskondensator  $C_F \approx 1 \text{ pF}$  aufgesammelt. Am Ausgang des Vorverstärkers entsteht also ein Spannungssignal

$$U_x = \frac{Q_x}{C_F} \quad (3).$$

Dieses Signal ist außerordentlich klein und wird deshalb mit einem linearen rauscharmen Verstärker vielfach elektronisch verstärkt. Schließlich erhält man das zur Röntgenenergie Exproportionale Ausgangssignal

$$U'_x = A \times U_x, \text{ mit } A \sim 1000 \quad (4)$$

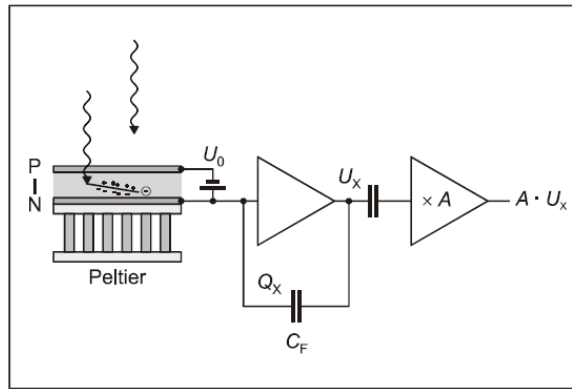


Abb. 10: Schematische Darstellung des Röntgenenergiedetektors

### Vielkanal-Impulshöhenanalyse:

Die Weiterverarbeitung der Detektorsignale erfolgt in einem Vielkanal-Analysator (Sensor-CASSY + VKA-Box), dessen zentrale Komponente ein Analog-Digital-Wandler ist. Dieser misst die Impulshöhe  $U'_x$  und wandelt den Messwert in einen dazu proportionalen digitalen Wert  $n_x$ . Genauer entspricht  $n_x$  einem Impulshöhenintervall, dessen Breite von der Auflösung des Analog-Digital-Wandlers abhängt. Der Computer ordnet jedem digitalen Wert einen Speicherplatz zu und zählt die Ereignisse in jedem Speicherplatz. Ergebnis ist ein Histogramm, das die Häufigkeitsverteilung der Impulshöhen repräsentiert. Zur quantitativen Auswertung erforderlich ist eine Zweipunkt-Energiekalibrierung

$$E_x = A \times n_x \times b \quad (5),$$

da die Faktoren der Proportionalitäten  $E_x \sim Q_x \sim U'_x \sim n_x$  unbekannt sind und außerdem der Nullpunkt des Analog-Digital-Wandlers nicht exakt justiert werden kann.

### K-Linienabsorption – Moseleysches Gesetz:

Die Bezeichnungen der charakteristischen Röntgenlinien werden aus dem Symbol der Elektronenschale (K, L, M usw.) und einem griechischen Buchstaben ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  usw.) zusammengesetzt. Dabei ist die Elektronenschale gemeint, die vor dem Elektronenübergang ionisiert war. So steht die Bezeichnung  $K_\alpha$ -Linie für den Übergang aus der L-Schale in die K-Schale,  $K_\beta$  für den Übergang aus der M-Schale in die K-Schale. Die  $L_\alpha$ - und  $L_\beta$ -Linien bezeichnen die Übergänge aus der M- und N-Schale in die L-Schale.

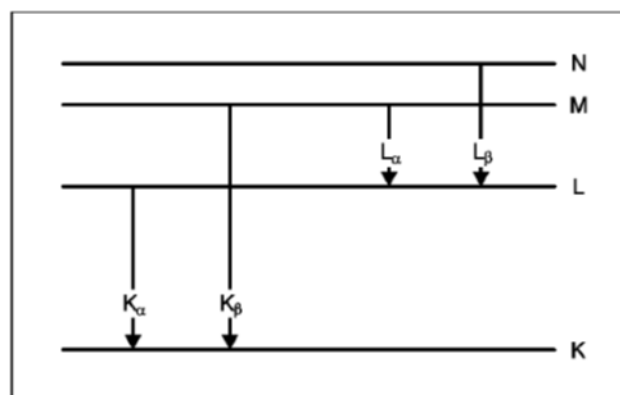


Abb. 11: Vereinfachtes Termschema eines Atoms mit den charakteristischen Röntgenlinien.

Um die Energien der charakteristischen Linien zu berechnen, müssen die Energieniveaus im Atom (Bindungsenergien der Elektronenschalen) bekannt sein. Diese können wasserstoffähnlich behandelt

werden, indem statt der realen Kernladung  $Z$  eine effektive Kernladung  $Z_{\text{eff}} = Z - \sigma_n$  mit einer Abschirmkonstanten  $\sigma_n$  eingesetzt wird.

Der Energiezustand eines Elektrons einer inneren Schale wird dann approximativ durch eine modifizierte Bohrsche Formel mit der Hauptquantenzahl  $n$  und  $Z - \sigma_n$  dargestellt:

$$E_n = -Rhc \frac{(Z - \sigma_n)^2}{n^2}, \text{ wobei } R \text{ die Rydbergkonstante mit } R = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \text{ darstellt.}$$

Die Hauptquantenzahl  $n$  bezeichnet die Elektronenschalen:  $n = 1$  für die K-Schale,  $n = 2$  für die L-Schale,  $n = 3$  für die M-Schale usw. Diese Formel beschreibt die Grobstruktur der Energie eines Elektrons einer inneren Schale. Die Abschirmkonstante  $\sigma_n$  hängt im allgemeinen Fall von  $n$  und  $Z$  ab. Für die Frequenzen der charakteristischen Linien  $\sigma = (E_2 - E_1)/h$  bei den Übergängen  $n_2 \rightarrow n_1$  ( $n_2 > n_1$ ) gilt

$$\nu = cR \left[ \frac{(Z - \sigma_{n1})^2}{n_1^2} - \frac{(Z - \sigma_{n2})^2}{n_2^2} \right]$$

Wird statt  $\sigma_{n1}$  und  $\sigma_{n2}$  eine einzige mittlere Abschirmkonstante  $\sigma_{2,1}$  für Übergänge von  $n_2$  nach  $n_1$  eingeführt, lässt sich diese Formel zum Moseleyschen Gesetz umschreiben:

$$\sqrt{\frac{\nu}{\nu_R}} = (Z - \sigma_{2,1}) \sqrt{\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}},$$

mit der Rydberg-Frequenz  $\sigma_R = cR$ . Danach hängt die Quadratwurzel der Frequenz der charakteristischen Linien einer Serie linear von der Ordnungszahl  $Z$  ab. Umgeschrieben für die Energie der charakteristischen Linie lautet Gl. (I):

$$\sqrt{\frac{E}{R_y}} = (Z - \sigma_{2,1}) \sqrt{\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}}$$

Dabei ist der Zahlenwert von  $R_y = Rhc \approx 2,18 \times 10^{-18} \text{ J} \approx 13,6 \text{ eV}$ .

Für die  $K\alpha$ -Linien leichterer Elemente ( $Z < 30$ ) ist die Abschirmkonstante  $\sigma_{2,1} \approx \sigma_1$  und somit

$$\sqrt{\frac{E}{R_y}} = (Z - 1) \sqrt{\frac{3}{4}}$$

Mit wachsender Ordnungszahl wird  $\sigma_{2,1}$  kleiner und für  $Z \geq 55$  sogar negativ, d.h. bei diesen  $Z$  überwiegt der Einfluss der äußeren Elektronen die Abschirmung durch die inneren.



### 3. Hinweise zu Ihrer Sicherheit und zum Umgang mit den Gerätschaften

Das Röntgengerät erfüllt die Vorschriften über die Bauart einer Schulröntgeneinrichtung und eines Vollschutzgeräts und ist als Schulröntgengerät und Vollschutzgerät 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.

■ Vor der Inbetriebnahme das Röntgengerät auf Unversehrtheit überprüfen  
(siehe Gebrauchsanweisung zum Röntgengerät).

■ Röntgengerät vor dem Zugriff Unbefugter schützen.

Eine Überhitzung der Anode in der Röntgenröhre Mo 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.

### 4. Kontrollfragen

- Wie wird in einer Röntgenröhre Röntgenstrahlung erzeugt?
- Erklären Sie die Nomenklatur der Röntgenlinien.
- Röntgenstrahlung welcher Energie (eV) bzw. Wellenlänge werden durch Röntgenröhren typischerweise erzeugt? (Bsp.  $\text{CuK}\alpha$ -,  $\text{WoK}\alpha$ -,  $\text{AlK}\alpha$ -Strahlung)
- Eine Röntgenröhre liefert Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung. Erklären Sie die beiden Begriffe.
- Wie kann man Röntgenlicht detektieren?
- Wie funktioniert der hierverwendete energieauflösende Detektor? Warum muss er erst kalibriert werden?
- Wie funktioniert ein Szintillationszähler?

### 5. Informationen zu Auswertung und Bericht

Siehe allg. Informationen zum Labor.