

# Übungen zur Vorlesung Mod. Experimentalphysik I

KIT, Sommersemester 2024

Prof. Dr. T. Müller, Dr. D. Hinz



---

Vorlesungen	Di 9:45 + Do 11:30, Gerthsen-Hörsaal 30.21
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30 (Anmeldung im Ilias)
Sprechstunde	Dr. Hinz: nach Vereinbarung (dominic.hinz@kit.edu)
Ilias	s.kit.edu/ex4ss24

---

## Übungsblatt 9 – Bearbeitung bis 01.07.2024

### (28) Röntgenstrahlung

- (a) Ein Strahl aus Elektronen mit einer kinetischen Energie von 100 keV wird auf ein Wolfram-Target gelenkt. Skizzieren Sie das entstehende Röntgenspektrum (als Funktion der Energie bzw.  $1/\lambda$ ). Zeichnen Sie die  $K$ -Röntgenlinien ein und bezeichnen Sie diese entsprechend.
- (b) Wenn Licht aus einer kontinuierlichen Lichtquelle ein (atomares) Gas passiert, so weist das transmittierte Licht ein sogenanntes Absorptionsspektrum auf. Im Fall von sichtbarer und ultravioletter Strahlung ist dies ein diskretes Linienspektrum. Dahingehend findet man im Röntgen-Bereich Absorptionskanten. Wieso gibt es diesen Unterschied und was ist der physikalische Grund für die beiden unterschiedlichen Phänomene?
- (c) Für Zn haben die Absorptionskanten folgende Energien (in keV):  
 $K = 9.67$ ,  $L_I = 1.21$ ,  $L_{II} = 1.05$ ,  $L_{III} = 1.03$ .
- Bestimmen Sie die Wellenlänge der  $K_\alpha$  Linie(n).
  - Nun wird Zn mit 5 keV Elektronen beschossen. Was ist die kürzeste Röntgen-Wellenlänge, die gemessen werden kann?
  - Was ist die kürzeste Wellenlänge einer charakteristischen Röntgenlinie in dieser Konfiguration?

### (-) Hinweise zur Röntgenstrahlung

- **Kontinuierliche Strahlung aus Bremsstrahlung.** Der Effekt der Bremsstrahlung wird in Röntgenröhren zur Erzeugung von Röntgenstrahlung verwendet. Dabei schießt man Elektronen mit einer kinetischen Energie  $E$  ab 30 keV auf eine Metallplatte, die häufig aus Wolfram besteht. Die Elektronen wechselwirken dann mit den Atomen des Materials aufgrund ihrer Ladung und den Ladungen des Materials (bei hohen  $Z$  hauptsächlich die Atomkerne). Ein kleiner Teil der beim

Abbremsen frei werdenden Energie wird in Röntgenstrahlung mit einem kontinuierlichen Spektrum (einem Röntgenkontinuum) umgewandelt. Die maximale Energie der Röntgenstrahlung erhält man für den Fall, wenn die komplette kinetische Energie in die Energie eines Röntgenphotons umgewandelt wird,  $E_{\max} = E_{\text{kin}}$ . Damit ist die kürzeste Wellenlänge

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

Die kontinuierliche Verteilung lässt sich dann durch die Kramersche Regel nähern:

$$J(\lambda) = K \cdot I \cdot Z \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda_{\min}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (2)$$

Hier bei ist  $K$  die Kramersche Konstante,  $I$  der Elektronenstrom, und  $Z$  die Kernladung des Targetelements.

- **Charakteristische Strahlung.** Charakteristische Strahlung ist Linienstrahlung und ist abhängig vom Material. Hierbei schlägt zunächst das einfliegende, hochenergetische Elektron ein tief liegendes Elektron aus der Atomhülle heraus. Diese Lücke wird durch ein Elektron aus der weiter außen liegenden Hülle aufgefüllt. Die Energiedifferenz zwischen dem Zustand des fehlenden Elektrons und dem des auffüllenden wird als monoenergetisches Photon emittiert.

Die Bezeichnung der Linien ist die folgende:  $X_{\eta,y}$ .  $X$  ist hierbei die Schale des herausgeschlagenen Elektrons (z.B. K, L, M, ...).  $\eta$  ist ein Index der angibt aus welcher Schale das auffüllende Elektron stammt.  $\alpha$  entspricht dabei einem  $\Delta n = 1$ ,  $\beta$  einem  $\Delta n = 2$ , und so weiter.  $y$  gibt zusätzlich eine Feinstrukturaufspaltung an, falls vorhanden. Die Auswahlregeln  $\Delta l = 1$  muss weiterhin gelten. Ein Beispiel für Übergänge in Kupfer ist in Abbildung 1 gegeben. Die Frequenz der Übergänge lässt sich mit dem Moseleysche Gesetz beschreiben:

$$f = \frac{c}{\lambda} = R Z_{\text{eff}}^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (3)$$

Hierbei ist  $R$  die Rydbergfrequenz (mit Korrektur der Kernmasse!).  $Z_{\text{eff}} = Z - S$  ist die effektive Kernladung. Hierbei ist  $S$  eine Konstante, die die Abschirmung der Kernladung durch Elektronen beschreibt, die sich zwischen Kern und dem betrachteten Elektron befinden. Diese Abschirmkonstante ist gegeben durch  $S = 1$  für  $K_{\alpha}$ ,  $S = 1.8$  für  $K_{\beta}$  und  $S = 7.4$  für  $L_{\alpha}$ .

- **Röntgenabsorption.** Die beiden vorherigen Aufzählungspunkte haben die Erzeugung von Röntgenstrahlung mithilfe von Elektronen besprochen. In diesem Punkte wird besprochen, was passiert, wenn bereits erzeugte Röntgenstrahlung mit Materie wechselwirkt.

Arten der Wechselwirkung von Photonen mit Materie wurden zu Beginn des Semesters besprochen, d.h. Photoeffekt oder Comptoneffekt. Darüber hinaus kommt es zu den charakteristischen Absorptionskanten bei der Wechselwirkung mit Röntgenphotonen (siehe Vorlesung). Die Position der Absorptionskante entspricht der Ionisationsenergie eines der inneren Elektronen (z.b. auf K-Schale, L-Schale, etc.). Diese ist dann selbstverständlich wieder elementabhängig.

Für die Position für die  $n$ -te Schale gilt ähnlich dem Moseleyschem Gesetz

$$f = \frac{c}{\lambda} = R Z_{\text{eff}}^2 \left( \frac{1}{n^2} \right) \quad (4)$$

Für die Aufgabe 28c ist das folgende Zuordnungsbild in Abbildung2 hilfreich. Bitte beachten Sie die Auswahlregeln bei den Übergängen!

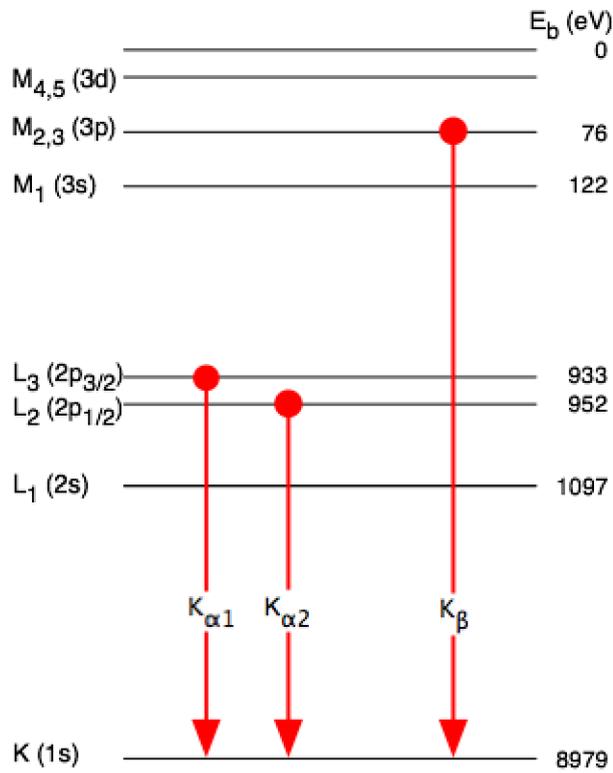


Abbildung 1: Beispiel für charakteristische Röntgenübergänge.

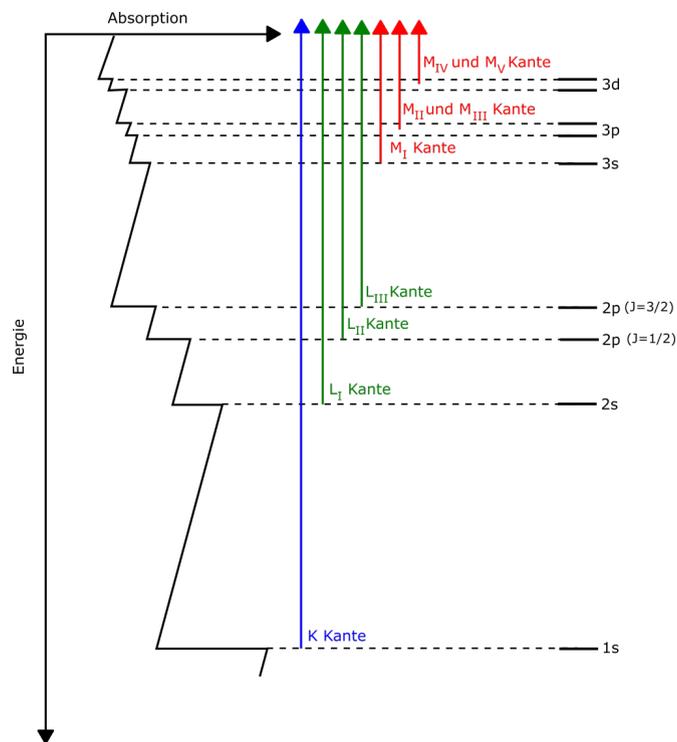


Abbildung 2: Absorptionskanten

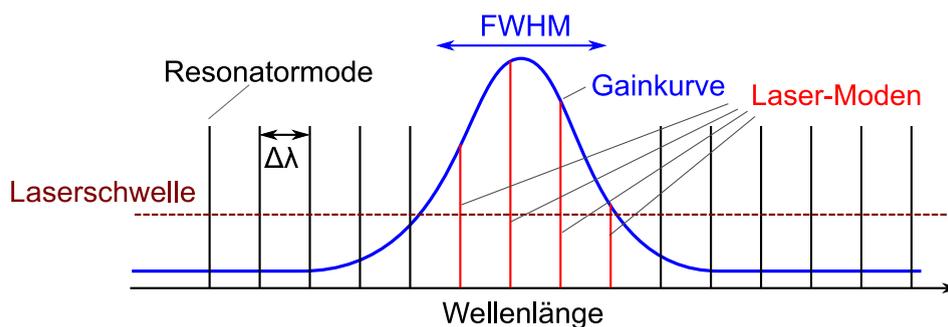
## (29) Laser

Ein Laser besteht im Allgemeinen aus drei Komponenten: einem aktiven Medium, einem Resonator und einer Pumpquelle. Da es sich beim Laser um einen optischen Oszillator handelt, kann er mit einem selbsterregten, schwingenden elektronischen Oszillator verglichen werden. So dient das aktive Medium als Verstärker, der Resonator als Rückkopplung und die Pumpquelle als Energiequelle.

Wir betrachten in dieser Übungsaufgabe zunächst einen Helium-Neon-Laser.

- Erklären Sie, wie das aktive Medium, der Resonator und die Pumpquelle in diesem Laser umgesetzt sind. Nutzen Sie hierbei auch eine Skizze des Energiediagramms und beschränken Sie sich auf den charakteristischen Laserübergang bei  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .
- Im Laserresonator sind nur diejenigen Wellenlängen resonant, die stehende Wellen ausbilden können. Jede dieser Wellenlängen entspricht einer sogenannten Resonatormode, siehe dazu Abbildung 3. Berechnen Sie die Wellenlänge  $\lambda_n$  für die  $n$ te Mode sowie den Abstand zwischen zwei Moden. Nehmen Sie an, dass der Laserresonator eine Länge von  $\ell = 500 \text{ mm}$  hat.
- Die Gainkurve von Neon hat eine Breite von ca.  $1.5 \text{ GHz}$  (FWHM bei der typischen Wellenlänge von  $632.8 \text{ nm}$ ). Der Laser kann auf allen (Resonator-)Moden lasern, die innerhalb der Gainkurve und über der Laserschwelle liegen. Wie viele Moden werden für den gegebenen Fall innerhalb der  $1.5 \text{ GHz}$  liegen unter der Annahme, dass dies genau der Bereich oberhalb der Laserschwelle ist?
- Der Laser arbeitet meist gleichzeitig nur auf einer Lasermode. Kleine Störungen können aber bewirken, dass es zu Modensprüngen kommt und diese können unter Umständen unvorhersagbar sein. Daher fügt man in der Regel in einen Laserresonator noch ein zusätzliches *Etalon* ein, mit dem man alle unerwünschten Moden unterdrücken kann. Dabei handelt es sich um ein Glaspättchen mit aufgedampften Spiegeln auf beiden Seiten, das wie ein Fabry-Perot-Interferometer arbeitet (ähnlich dem Laserresonator selbst). Es werden nur diejenigen Wellenlängen durchgelassen (d. h. überleben im Laserresonator), die innerhalb der Etalondicke stehende Wellen ausbilden. Das Etalon hat eine feste Dicke  $d$ ; der Lichtweg kann aber durch Verkippung etwas variiert werden. Berechnen Sie die Etalon-Moden für eine Dicke von  $6 \text{ mm}$  und einem Brechungsindex von  $n = 1.46$ . Zeichnen Sie in Abbildung 3 ein, wie mit der Wahl der Etalon-Mode nur eine Resonatormode zum Lasern gebracht werden kann.

Betrachten wir nun einen gepulsten Laser, z. B. für das Laserentfernungsmesssystem der Fundamentaltalstation Wettzell. In dem System ist ein gepulster Laser verbaut, der Pulse mit einer Pulsbreite von etwa  $200 \text{ ps}$  und einer Pulsenergie von  $150 \text{ mJ}$  bei einer Wellenlänge von  $532 \text{ nm}$  liefert.



**Abbildung 3:** Moden im Laserresonator und Gainkurve.

- (e) Wie ist die Momentanleistung während des Pulses im Vergleich zu der Leistung eines Kraftwerks?
- (f) Wie viele Photonen werden in jedem Puls emittiert?
- (g) Mit Dauerstrichlasern (englisch continuous wave, cw) können sehr schmale Bandbreiten in der Laseremission erreicht werden. Gepulste Laser haben hier eine physikalische Begrenzung, die wir auch schon in ähnlicher Form auf einem früheren Übungsblatt kennen gelernt haben. Welche ist das und was ist das kleinste  $\Delta\lambda$ , das mit obigem Laser erreicht werden kann?

**(\*) Punkteverteilung**

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
28	a, b	je 1
28	c	2
29	a-g	je 1

Bei Verständnisfragen gerne das Forum im ILIAS nutzen.