

## EP III - Seminar

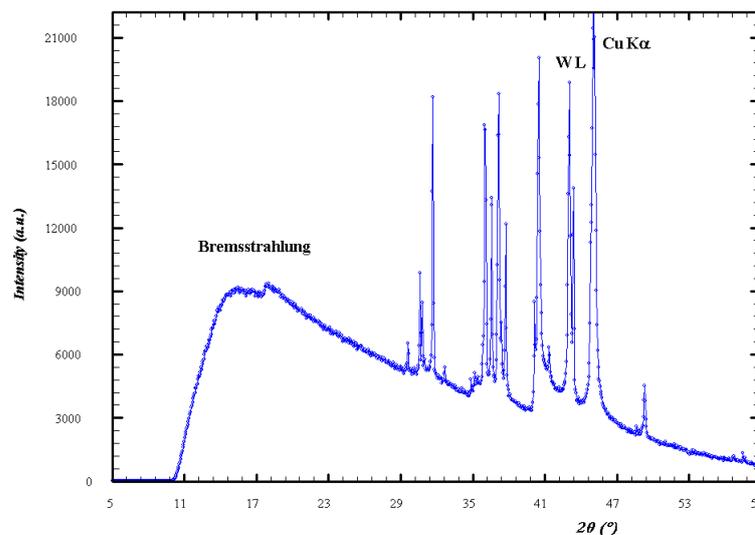
### Röntgenstrahlung (Kap. 6.6.)

**Allgemeines** Als Röntgenstrahlung wird Strahlung bezeichnet, die sich auf zwei verschiedene physikalische Phänomene zurückführen lässt. Das Spektrum der Röntgenstrahlung beginnt unterhalb der extremen UV-Strahlung bei einer Wellenlänge von 50 nm (weiche Röntgenstrahlung) und reicht bis zu ca. 5 pm hinab (harte Röntgenstrahlung). Röntgenstrahlung wird vor Allem auch in der Medizin eingesetzt und überall dort, wo tieferliegende Schichten eines Festkörpers untersucht werden sollen. Außerdem gibt es auch natürliche Röntgenstrahlung - man denke z.B. an aktive galaktische Kerne (AGNs). Aufgrund unterschiedlicher Entstehungsprozesse werden Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung unterschieden.

**Bremsstrahlung** In einer Glühkathode werden Elektronen herausgelöst. Diese werden dann durch eine Beschleunigungsspannung zur Anode hin beschleunigt. Diese Anode besteht aus einem *schweren* Material. Die Elektronen werden dann in den ersten Atomschichten abgebremst. Die Strahlung die dann emittiert wird, wird als Röntgenbremsstrahlung bezeichnet. Offensichtlich ist die Energie des Photons maximal, wenn die gesamte Energie eines beschleunigten Elektrons übernommen wird. Es gilt dann:

$$E_{e^-} = q \cdot U = h \cdot \nu_{max} = E_{ph}$$

Trägt man nun die Intensität gegen die Wellenlänge  $\lambda$  auf, so lässt sich diese Grenzwellenlänge erkennen:



In der oberen Grafik (Quelle: wikipedia.fr) ist die Intensität gegen einen Winkel aufgetragen. Dieser Winkel ist analog zu einer Wellenlänge. Zur Aufzeichnung des abgebildeten Röntgenspektrums wurde offenbar die Bedingung der Bragg-Reflexion ausgenutzt. Um einzelne Wellenlängen zu untersuchen können für das kurzwellige Licht keine optischen Gitter zum Einsatz kommen. Daher greift man auf die Struktur von Kristallgittern zurück. Die Bedingung für die Bragg-Reflexion lautet:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin(\theta)$$

Näheres zur Bragg-Bedingung kann z.B. im Demtröder, Band 2 oder in den Vorbereitungen zum Praktikumsversuch *D19 - Röntgenröhre* nachgelesen werden.

Auch der Anstieg und das Abfallen des Bremspektrums lässt sich erklären. Im linken Teil des Bremspektrums steigt die Intensität mit zunehmender Wellenlänge an, da es mehr Streueignisse kleinerer Ablenkung, d.h. kleinerer Energie gibt. Dies hängt mit der Proportionalität  $\sigma \propto \sin^{-4}(\frac{\theta}{2})$  zusammen. Allerdings sind auch Energien erforderlich, damit die Photonen aus der Anode heraustreten können, bevor sie von einem anderen Atom reabsorbiert werden. Von einer bestimmten Wellenlänge an wird die zunehmende Reabsorption dominant und die Intensität der Bremsstrahlung fällt ab. Es gilt, wie sich auch aus einer theoretischen Betrachtung des Teilchens als erzwungene Schwingung eines harmonischen Oszillators zeigen lässt:

$$\sigma_{Absorption} \propto Z^{3..4} \lambda^3$$

**Charakteristische Strahlung** Neben der Bremsstrahlung tritt auch eine charakteristische Strahlung auf. Die beschleunigten Elektronen können ein Elektron aus einer der Atomschichten herauslösen. Dieses Loch auf einer der Elektronenschalen wird dann von einem Elektron einer höheren Schale gefüllt. Hierbei kann ein strahlungsreicher Übergang (Röntgenfluoreszenz) auftreten. Zunächst soll jedoch der Übergang unter Emission eines (Röntgen-)photons betrachtet werden. Mit zunehmender Beschleunigungsspannung (bzw. Elektronenenergie) können zunächst Elektronen aus der M-Schale, dann aus der L-Schale und schlussendlich auch aus der K-Schale herausgelöst werden. Rückt ein Elektron von der L-Schale auf die K-Schale nach, so spricht man von einem  $K_\alpha$ -Übergang. Ein von der M-Schale nachrückendes Atom bewirkt entsprechend einen  $K_\beta$ -Übergang. Übergänge von der M-Schale auf die L-Schale werden als  $L_\alpha$ -Übergänge bezeichnet usw. Die Frequenzen können dabei näherungsweise über folgende Formeln bestimmt werden:

$$\nu = Ry \cdot Z_{eff}^2 \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ mit } n < m$$

Dabei gibt sich die effektive Kernladungszahl  $Z_{eff}$  aus Betrachtung der Zahl an Elektronen, die ein betrachtetes Elektron vom Kernpotential abschirmen. Also liefert diese Theorie für die K-Schale  $Z_{eff} = Z - 1$  und für die L-Schale  $Z_{eff} = Z - 9$ . Genauere theoretische Überlegungen und auch experimentelle Untersuchungen ergeben jedoch:

$$\nu_{K(\alpha)} = \frac{3}{4} Ry (Z - 1)^2$$

$$\nu_{L(\alpha)} = \frac{5}{36} Ry (Z - 7,4)^2$$

Diese Gleichungen werden auch als Gesetz von Moseley bezeichnet.

In der Theorie wird häufig anstelle der entfernten Elektronen ein vorhandenes Positron betrachtet oder es wird eine zusätzliche Schale mit einem Elektron eingefügt.

**Feinstruktur** Da die Bahnentartung aufgehoben ist, gibt es eine Feinstruktur. Diese entsteht durch eine Spin-Bahn-Wechselwirkung und ist aufgrund einer Proportionalität der Wechselwirkungsenergie von  $E_{WW} \propto Z^4$  nicht zu vernachlässigen, insbesondere nicht für schwere Atome (z.B. Uran, hier bis zu 2 keV).

Infolge dieser Feinstrukturaufspaltung gibt es nicht eine  $K_\alpha$ -Linie sondern zwei Linien:

- eine  $K_{\alpha 1}$ -Linie für den Übergang  $2^2P_{1/2} \Rightarrow 2^1S_{1/2}$
- eine  $K_{\alpha 2}$ -Linie für den Übergang  $2^2P_{3/2} \Rightarrow 2^1S_{1/2}$

Verboten ist indes der Übergang

$$2^2S_{1/2} \Rightarrow 2^1S_{1/2}$$

Bei diesem Übergang würde eine Auswahlregel für optische Übergänge ( $\Delta s = 0$ ) missachtet (siehe dort).

**Absorption von Röntgenstrahlen** Bei der Absorption von Röntgenstrahlen sind drei unterschiedliche Effekte von Belang:

- der bekannte Photoeffekt - ein Röntgenphoton kann ein Elektron aus einem Festkörper herauslösen
- der Comptoneffekt - eine Wechselwirkung zwischen den hochenergetischen Röntgenphotonen und freien oder schwach gebundenen Elektronen
- die Paarbildung - beim Eindringen in Materie entsteht dann ein Elektron-Positron-Paar. Es gilt gemäß Energieerhaltung  $h \cdot \nu = 2m_e c^2 + 2E_{kin}$ .

Für die Absorption von Röntgenstrahlung gilt das Lambert-Beer-Gesetz:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

wobei  $x$  die Eindringtiefe und  $\mu$  den Dämpfungsfaktor oder Absorptionskoeffizienten des Materials bezeichnen.

**Absorptionskanten** Betrachtet man das Spektrum der Absorption, so lassen sich charakteristische Kanten erkennen. Haben die Röntgenphotonen z.B. eine Frequenz, die unterhalb der so genannten K-Kante liegt, sind selbige energetisch nicht mehr in der Lage, ein 1s-Elektron auf ein unbesetztes Niveau anzuheben. Damit nimmt die Absorption der Röntgenstrahlung dann schlagartig ab. Mit niedrigerer Energie nimmt dann die Absorption wieder zu, bis dann die L-Kanten (für die unterschiedlichen Bindungsenergien der L-Elektronen) auftreten. Eine entsprechende Grafik kann dem Skript zur Vorlesung entnommen werden.

**Weitere Anmerkungen**

- Eine relative neue Methode der Verwendung von Röntgenstrahlung stellt die **Photoelektronen-Spektroskopie** dar. Hierbei werden Photonen bekannter Frequenz und somit auch bekannter Energie verwendet um Elektronen herauszulösen. Die kinetische Energie dieser Elektronen kann dann bestimmt werden (z.B. indem man sie auf eine Kreisbahn zwingt, wie bei der e/m-Bestimmung). Es gilt sodann:  $E_{kin} = h\nu - E_{Bindung}$ . Somit kann die Bindungsenergie der Elektronen in einer Stoffprobe bestimmt werden. Dies ist eine charakteristische Eigenschaft.

- Bei der Verwendung von Röntgenstrahlung erweist es sich als problematisch, dass nur bestimmte, diskrete Wellenlängen erzeugt werden können. Das kontinuierliche Bremsspektrum ist zur experimentellen Verwendung oft zu schwach. Daher greift man im Labor oft auf Synchrotronstrahlung zurück, die erzeugt wird, indem Elektronen große Energien (z.B. in Ringbeschleunigern) zugeführt werden.
- Interessante **Aufgaben** sind z.B. im Haken/Wolf zu finden. Hier sind die Aufgaben 18.1.-18.9. interessant, v.a. jedoch die Aufgaben 18.1.,18.2.,18.3.,18.4.,18.8. und 18.9.