

V602: Röntgenemission und -absorption

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 30.05.2017

Abgabe: 06.06.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	1
2	Theorie	1
3	Durchführung	4
3.1	Versuchsaufbau	4
3.2	Versuchsablauf	4
	Literatur	6

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird das Emissionsspektrum einer Kupfer-Röntgenröhre und verschiedene Absorptionsspektren untersucht.

2 Theorie

Röntgenstrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen im Energiebereich von mehreren keV. Sie wird erzeugt, indem Elektronen eine entsprechend große Beschleunigungsspannung durchlaufen und anschließend auf die Anode treffen. Im Coulombfeld des Anodenmaterials werden die Elektronen abgebremst. Dabei geben diese dann einen Teil ihrer Energie in Form von Röntgenstrahlung ab. Da die Elektronen dabei einen beliebigen Teil ihrer Energie abgeben können ist dieses Spektrum kontinuierlich. Es wird allgemein als Bremsspektrum bezeichnet. Die maximale Energie, der Röntgenstrahlung, entspricht dabei der kinetischen Energie der Elektronen. Da sich die Strahlungsenergie antiproportional zur Wellenlänge verhält, äußert sich dies in einer minimalen Wellenlänge:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e_0 U}. \quad (1)$$

Dabei ist $E_{\text{kin}} = e_0 U$ die kinetische Energie der Elektronen und $E = h \cdot \nu$, mit der Frequenz ν , die Energie der Strahlung. In Abbildung 1 ist ein solches Bremsspektrum schematisch dargestellt.

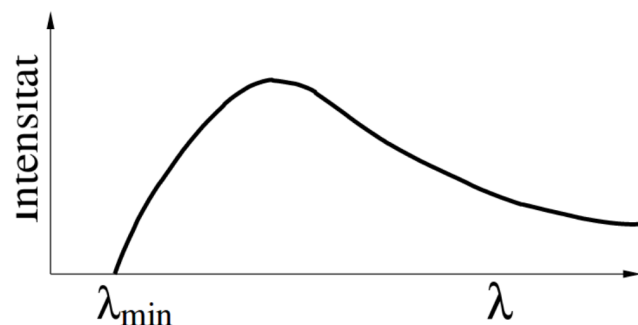


Abbildung 1: Schema des Bremsspektrums. [TuD17]

Für das sogenannte charakteristische Spektrum geben die Elektronen ihre Energie an eines der inneren Hüllenelektronen des Anodenmaterials ab. Diese werden dadurch ionisiert und ein äußeres Elektron rückt dafür nach. Bei dem abfallen auf das energetisch günstigere Niveau gibt es dann den Wert der Energiedifferenz in Form von Röntgenstrahlung ab:

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (2)$$

Das charakteristische Spektrum zeichnet sich deshalb durch scharfe, diskrete Peaks aus. Für diese Peaks werden verschiedene Bezeichnungen verwendet, die darauf basieren, von

welchem Zustand in welchen anderen Zustand der Übergang stattfindet. Z.B. werden die Bezeichnungen K_α , K_β , L_α , L_β usw. verwendet. Der Buchstabe steht dabei jeweils für den energetisch günstigeren Zustand, auf den das Elektron herabfällt. Sie sind von K aus aufwärts alphabetisch nummeriert. Die griechischen Indizes stehen für den Ursprung des Elektrons. So bedeutet der K_α Übergang, dass ein Elektron aus der L -Schale in die K -Schale wandert, und der K_β Übergang, dass ein Elektron aus der M -Schale in die K -Schale wandert.

Die Bindungsenergie der Elektronen im Anodenmaterial wird durch innere Elektronen geschwächt. Daher ergibt sich für diese:

$$E_n = -R_\infty z_{eff}^2 \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (3)$$

Dabei ist $z_{eff} = z - \sigma$ die effektive Kernladungszahl, mit der Abschirmkonstante σ , und $R_\infty = 13,6 \text{ eV}$ die Rydbergenergie. Der Index n nimmt von $K = 1$ aus aufsteigend ganze Zahlen an. Die Spektren treten parallel auf, weshalb sich das Emissionsspektrum aus beiden zusammensetzt.

Das Absorptionsspektrum von Röntgenstrahlung ist ebenfalls sehr materialabhängig. Allgemein nimmt das Absorptionsvermögen eines Absorbers mit zunehmender Energie ab. Es steigt jedoch abrupt, wenn die Strahlung die Ionisierungsenergie einer weiter innen gelegenen Schale erreicht. Dadurch werden sich dort befindliche Elektronen ionisiert. Die Absorptionskanten werden nach der Schale benannt, aus der das entsprechende Elektron stammt. Ein Schema des Absorptionsvermögens ist in Abbildung 2 dargestellt.

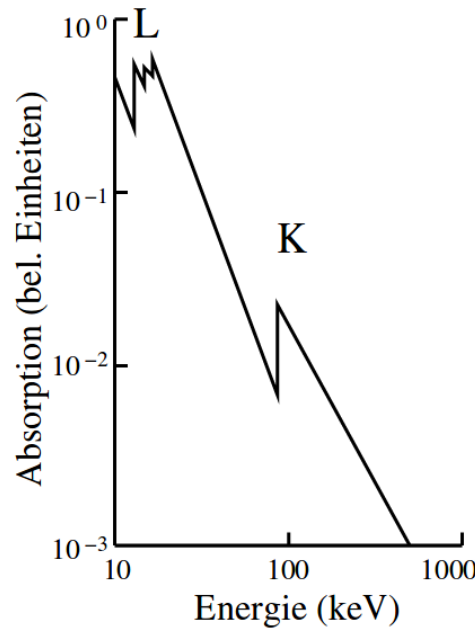


Abbildung 2: K- und L-Absorptionskante. [TuD17]

Die Position der Kanten ist mit

$$h\nu_{abs} = E_n - E_\infty \quad (4)$$

gegeben.

Theoretisch setzen sich die Kanten aus mehreren leicht versetzten Linien zusammen. Das liegt daran, dass die Bindungsenergie, aufgrund des Spins und des Bahndrehimpulses, innerhalb einer Schale leicht variiert. Mehrere Kanten sind jedoch praktisch nur bei den L -Kanten zu beobachten. Dabei ist dann die Sommerfeld'sche Feinstrukturformel

$$E_{n,j} = -R_\infty \left(z_{eff,1}^2 \cdot \frac{1}{n^2} + \alpha^2 z_{eff,2}^4 \cdot \frac{1}{n^3} \left(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) \right) \quad (5)$$

für die Bindungsenergien zu beachten. Das α steht für die Sommerfeld'sche Feinstrukturkonstante und j für den Gesamtdrehimpuls des Elektrons. Für die zweite effektive Kernladungszahl $z_{eff,2}$ wird eine neue Abschirmkonstante σ_L benötigt. Diese berechnet sich nach:

$$\sigma_L = Z - \left(\frac{4}{\alpha} \sqrt{\frac{\Delta E_L}{R_\infty}} - \frac{5\Delta E_L}{R_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{19}{32} \alpha^2 \frac{\Delta E_L}{R_\infty} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Hierbei ist $\Delta E_L = E_{L_{II}} - E_{L_{III}}$ die Energiedifferenz zwischen der L_{II} und der L_{III} Kante und Z die Ordnungszahl des Absorbers.

Bei diesem Versuch wird für die Messung der Spektren ein Effekt ausgenutzt, der Bragg'sche Reflexion genannt wird. Hierbei wird die Röntgenstrahlung an den verschiedenen Gitterebenen eines LiF-Kristalls reflektiert. Durch den dabei entstehenden Gangunterschied interferieren die Röntgenwellen. Nach

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (7)$$

lässt sich dann aus dem Glanzwinkel θ und der Gitterkonstante d die Wellenlänge der Röntgenstrahlung bestimmen. In Abbildung 3 ist dies schematisch dargestellt.

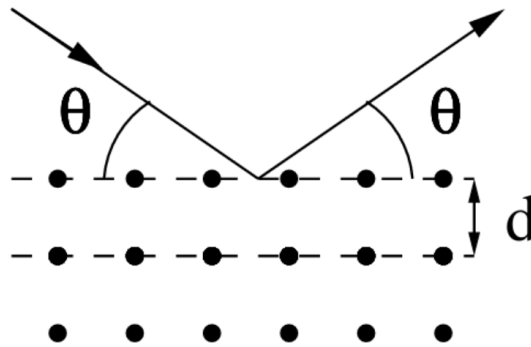


Abbildung 3: Schema der Bragg'schen Reflexion. [TuD17]

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 4 ist der Aufbau der Apparatur dargestellt. Die Röntgenröhre (2) erzeugt

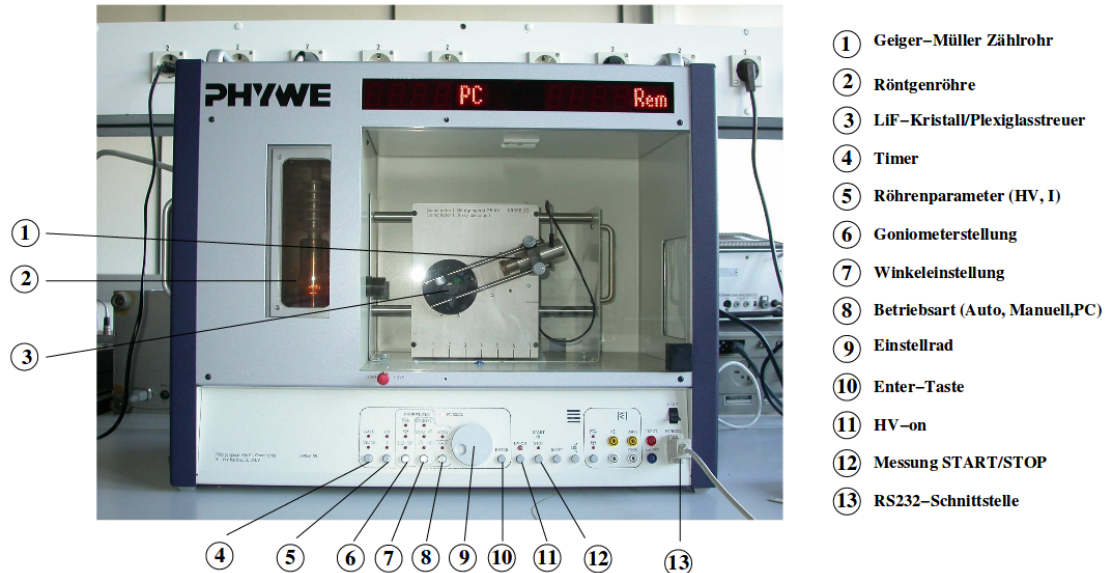


Abbildung 4: Aufbau der Apparatur. [TuD17]

Röntgenstrahlung. Diese wird am Kristall (3) reflektiert und am Geiger-Müller-Zählrohr (1) wird die Intensität gemessen. Für die Messung der Absorptionsspektren lässt sich am Geiger-Müller-Zählrohr ein entsprechender Absorber befestigen. Die Schalter an der unteren Seite der Apparatur (4-13) werden für den Versuch nicht benötigt, da die Apparatur mit einem Computer gesteuert wird.

3.2 Versuchsablauf

Zu Beginn wird die Bragg'sche Bedingung überprüft, indem der Kristall auf einen Winkel von 14° fest eingestellt wird und dann die Intensität für Zählrohrwinkel α_{GM} von 26° bis 30° in $0,2^\circ$ -Schritten gemessen wird. Im Idealfall sollte das Maximum der Intensität bei 28° liegen.

Für alle weiteren Messungen wird der 2:1 Koppelmodus verwendet. Das bedeutet, dass der Zählrohrwinkel immer den doppelten Winkel des Kristalls annimmt. Dadurch wird die Intensität immer am Interferenzmaximum gemessen. Nun wird das Emissionsspektrum der Röntgenröhre gemessen. Hierzu wird die Intensität bei einem Kristallwinkel von 4° bis 26° in $0,2^\circ$ -Schritten gemessen. Als Integrationszeit pro Winkel wird $\Delta t = 5\text{ s}$ verwendet.

Für die Messung der Absorptionsspektren wird jeweils ein Absorber am Zählrohr befestigt.

Vor der Messung wird nach Literaturwerten jeweils der theoretische Winkel der Absorptionskante, die beobachtet werden soll, bestimmt. Dieser Wert wird auf eine ganze Zahl gerundet und die Intensität im Bereich von $\pm 2^\circ$ um den Wert herum in $0,1^\circ$ -Schritten gemessen. Dabei wird eine Integrationszeit von $\Delta t = 20$ s verwendet. Es werden die K -Kanten von 4 leichten Elementen ($30 \leq Z \leq 50$) vermessen und die L_{II} - und L_{III} -Kanten eines schweren Elements. Bei dem schweren Element wird die Intensität im Bereich von $\pm 3^\circ$ um die beiden Kanten gemessen. Die Schrittweite sowie die Integrationszeit bleiben dabei gleich. Die verwendeten Elemente und Winkelbereiche stehen in Tabelle 1.

Tabelle 1: Verwendete Elemente und Winkel.

Element	Z	Winkelbereich von θ in $^\circ$
Germanium (Ge)	32	14° bis 18°
Zirkonium (Zr)	40	8° bis 12°
Zink (Zn)	30	17° bis 21°
Brom (Br)	35	11° bis 15°
Bismut (Bi)	83	8° bis 16°

Literatur

- [Hun07] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [J+] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u.a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [Leb] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [Oli07] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [TuD17] Tu-Dortmund. *Versuch 602: Röntgenemission und -absorption*. 1. Juni 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/RoentgenAbs.pdf>.