

Protokoll zum
physikalischen Anfängerpraktikum:
Absorption von RÖNTGENstrahlen

Jan Korger, Studiengang Physik-Diplom, Universität Konstanz
Sonja Bernhardt, Studiengang Physik-Diplom, Universität Konstanz

durchgeführt am 04.10.2004

1 Theorie

1.1 Röntgenstrahlung

Der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen publizierte 1895 als Professor der Universität Würzburg “Über eine neue Art von Strahlen”, die er “X-Strahlen” nannte, welche er zufällig bei einem Experiment an einer Kathodenstrahlröhre entdeckt hatte. Im deutschen Sprachraum wurden diese Strahlen später nach ihm benannt, international heißen sie weiterhin “x rays”. Man geht davon aus, dass andere Wissenschaftler vor ihm, die auch an Kathodenstrahlröhren forschten, die Wirkung von Röntgenstrahlung beobachtet haben, ohne deren Bedeutung zu erkennen.

Röntgenstrahlung nennt man elektromagnetische Strahlung mit Frequenzen zwischen $3 \cdot 10^{16}$ Hz und $3 \cdot 10^{21}$ Hz bzw. Wellenlängen zwischen 0.1 pm und 1 nm. Dies entspricht einer Photonenenergie von 100 eV bis 250 keV.

Röntgenstrahlen entstehen durch starke Beschleunigung von Elektronen oder durch hochenergetische Übergänge in den Elektronenhüllen von Atomen oder Molekülen. Beides findet in der Röntgenröhre statt; die Entstehung von Röntgenstrahlung wird jedoch auch in Teilchenbeschleunigern beobachtet (*Synchrotronstrahlung*).

1.2 Erzeugung in der Röntgenröhre

Eine Röntgenröhre besteht aus Anode und Kathode in einem Glaskörper unter stark vermindertem Druck.

Elektronen werden durch eine hohe Spannung beschleunigt. Die Röntgenstrahlung entsteht in der Röntgenröhre jedoch nicht bei der Beschleunigung der Elektronen – die durch die angelegte Spannung verursachte Beschleunigung ist nicht stark genug –, sondern beim Auftreffen auf die Anode.

Einerseits werden hier die Elektronen stark abgebremst, wobei Energie unter anderem als Strahlung frei wird (*Bremsstrahlung*, *Bremskontinuum*). Andererseits werden Elektronen aus den Schalen¹ der Metall-Atome herausgeschlagen. Die Schalen werden wieder mit anderen Elektronen aufgefüllt, wobei elementarspezifische Strahlung entsteht (*charakteristische Röntgenstrahlung*).

Den Wirkungsgrad kann aus der angelegten Spannung U_0 und der Kernladungszahl Z des Anodenmaterials mit der Formel

$$\eta = 1 \cdot 10^{-6} \text{ V}^{-1} \cdot U_0 \cdot Z \quad (1)$$

berechnet werden. Er liegt bei etwa einem Prozent. Der Rest wird in Wärmeenergie umgesetzt. Daher ist eine Kühlung der Anode unbedingt erforderlich.

Röntgenröhren benötigen ein mit Blei ausgekleidetes Schutzgehäuse nach DIN 6814 Blatt 6.

1.3 Wirkung der Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung kann Materie durchdringen, sie wird dabei je nach Material unterschiedlich stark abgeschwächt.

Die Energie von Röntgenstrahlen reicht aus, um Elektronen aus einem Atom oder Molekül zu entfernen. Solche *ionisierende Strahlung* kann Krebs verursachen.

1.4 Dosiseinheiten

- Ionendosis J , Einheit C/kg
- Energiedosis D , Einheit Gy= J/kg
- Äquivalenzdosis und effektive Äquivalenzdosis berücksichtigen biologische Wirkung durch Bewertungsfaktoren, Einheit Sv= Gy

¹Schalenmodell des Atoms: siehe 1.8

1.5 Schwächung der Intensität beim Durchgang durch Materie

Die Stärke des Röntgenstrahls nimmt mit der im Material zurückgelegten Wegstrecke d exponentiell ab:

$$I(d) = I(0) \cdot e^{-\mu d} \quad (2)$$

wobei mit der Ordnungszahl Z und der Wellenlänge λ für den "linearen Schwächungskoeffizienten" näherungsweise gilt:

$$k \sim Z^{3...4} \lambda^3$$

Daraus lässt sich eine *Halbwertsdichte* berechnen:

$$I(d_{1/2}) = \frac{1}{2} I(0) \Leftrightarrow e^{-k d_{1/2}} = \frac{1}{2} \Leftrightarrow -k d_{1/2} = \ln \frac{1}{2} \Leftrightarrow d_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (3)$$

Die Absorption ist das Resultat mehrere Phänomene:

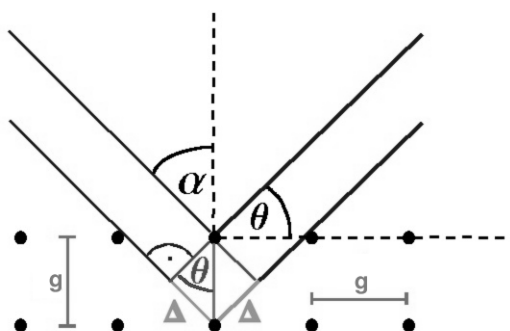
- **Photoabsorption:** Ein Photon kann sofern es über eine bestimmte Mindestenergie verfügt ein Elektron aus der Hülle eines Atoms heraus schlagen. Es entsteht der Lumineszenzeffekt. Im Absorptionsspektrum entstehen sogenannte "Absorptionskanten", wenn die notwendige Energie zur Photoabsorption erreicht ist, je eine pro Schale.
- **Compton-Streuung:** Ein Photon kann auch an ungebunden oder schwach gebunden Elektronen gestreut werden. Hierbei verliert es Energie bzw. erfährt eine Verlängerung seiner Wellenlänge
- **Rayleigh-Streuung** nennt man die kohärente Streuung eines Photons ohne Energieverlust.
- **Paarbildung** bedeutet Erzeugung von Elektron und Positron aus einem Photon. Hierzu von sind Energien ab ca. 1 MeV erforderlich.

In unserem Versuch wird hauptsächlich die Photoabsorption beobachtet. Bei hohen Photonen-Energien und bei leichten Atomen dominiert der Compton-Effekt. Rayleigh-Streuung spielt eine untergeordnete Rolle. Die zu Paarbildung notwendige Photonenergie wird nicht erreicht.

1.6 Beugung am Kristallgitter

Trifft Röntgenstrahlung (Wellenlänge λ) auf einen Kristall (oder kristallines Pulver) mit geeignetem Netzebenenabstand g , tritt unter dem sogenannten Glanzwinkel θ konstruktive Interferenz auf, wenn die Phasendifferenz Δ ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. Die *Bragg-Beziehung* folgt direkt aus einer geometrischen Betrachtung, die bereits aus der Schulzeit wohl bekannt ist:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot g \cdot \sin \theta \quad (4)$$



1.7 Nachweis von Röntgenstrahlung

- **Geiger-Müller-Zählrohr:** 1928 erfanden Hans Geiger und Walter Müller einen Detektor für ionisierende Strahlung. Er besteht aus einem Metallrohr als Kathode und einem Anodendraht. Eine Seite ist ein strahlendurchlässiges Fenster, die andere ein Isolator. Im Innern befindet sich ein Edelgas. Zwischen den beiden Elektroden legt man eine Spannung von mehreren hundert Volt an. Tritt Röntgenstrahlung ein, ionisiert diese Edelgas-Atome indem Elektronen aus deren äußeren Schale entfernt werden. Diese werden (wenn sie sich nahe genug an der Anode befinden, hier ist das

E-Feld wegen der geringen Oberfläche des Anodendrahtes sehr groß) stark beschleunigt und ionisieren durch Stöße andere Gas-Atome. Diese Kettenreaktion ermöglicht einen messbaren Stromfluss. Üblicherweise wird der Spannungsabfall an einem Widerstand im Stromkreis verstärkt und durch einen Lautsprecher oder Lämpchen hör- bzw. sichtbar gemacht. Der Strom fließt nicht konstant sondern in Impulsen. Die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit ist ein Maß für die Intensität der Strahlung.

- **Photographischer Effekt:** Röntgenstrahlen schwärzen wie auch sichtbares Licht photographische Filme. Da Röntgenstrahlung Materie durchdringt, kann der Film leicht vor Licht geschützt werden und trotzdem Röntgenstrahlung nachweisen.
- **Lumineszenzeffekt** (kaltes Leuchten): Röntgenstrahlen regen manche Materialien zu einem optischen Phänomen an, das man Fluoreszenz nennt. Dabei absorbiert ein Atom ein Photon und emittiert später eines niedrigerer Energie (im sichtbaren Spektrum). (Die Wellenlänge des emittierten Photons genügt Bohrs zweitem Postulat, wodurch sich das absorbierende Material identifizieren lässt.) (Lumineszenz ist ein Überbegriff für eine Klasse ähnlicher Phänomene.)

1.8 Bohr'sches Atommodell und Quantenzahlen

Das *Bohr'sche Atommodell* beruht auf zwei Postulaten, die sich erst später – mit Hilfe der Quantenmechanik – begründen ließen und die der klassischen Mechanik und Elektrodynamik widersprechen:

1. Ein atomares System hat stationäre Zustände mit bestimmten diskreten Energiewerten. Elektronen können sich nur auf bestimmten diskreten Kreisbahnen um den Atomkern bewegen.
2. Ein atomares System kann seine Energie nur ändern, indem es von einem stationären Zustand in einen anderen stationären Zustand übergeht. Wenn mit dem Übergang Emission oder Absorption von Strahlung verknüpft ist, so entspricht die Energie derer Photonen exakt der Energieänderung.

Hierzu kommt die *Auswahlbedingung*: Der Drehimpuls des Elektrons ist ein ganzzahliges Vielfaches von

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (5)$$

Das Bohr'sche Atommodell war auch das erste *Schalenmodell*, nach dem Elektronen in konzentrischen Schalen um den Kern angeordnet sind.

Das Bohr'sche Atommodell wurde vom Orbitalmodell abgelöst. Es basiert auf den Erkenntnissen der Quantenmechanik und benutzt an Stelle von Kreisbahnen lediglich Aufenthaltswahrscheinlichkeiten. Orbitale werden hier durch die Quantenzahlen m , n , l und s klassifiziert.

2 Experiment

2.1 Durchführung

Die von der Röntgenröhre ausgestrahlten Röntgenphotonen werden an einem Kalkspatkristall mit der Gitterkonstante $g = 3029.45 \cdot 10^{-13} \text{ m}$ gebeugt. Man misst die mit Hilfe des Geiger-Müller-Zählrohres die Impulse pro Minute (ein Maß für die Anzahl der Röntgenquanten) in Abhängigkeit des Glanzwinkels ϑ . Wird der Kristall um ϑ gedreht, bewegt sich das Zählrohr um 2ϑ . Wegen des toten Ganges wird das Messgerät stets nur in einer Richtung bewegt.

In den Strahlengang wird einer von drei Absorbern eingebracht:

1. Strontium-Sulfat auf Plexiglas sedimentiert
2. Bleifolie auf Plexiglas als Trägermaterial
3. unbeschichtetes Plexiglas

Die Plexiglas-Filter haben stets dieselbe Dicke.

Die Messung umschließt den Winkelbereich von $2\vartheta = 3^\circ$ bis $2\vartheta = 20^\circ$. Die kritischen Bereiche für Strontium ($14^\circ \leq 2\vartheta \leq 15^\circ$) und Blei ($14.3^\circ \leq 2\vartheta \leq 16^\circ$) werden besonders fein unterteilt untersucht bei längerer Messzeit.

Vor und nach der Messung wird der Nulleffekt gemessen. Die Betriebsspannung der Röntgenröhre wird notiert.

Aus den Messdaten soll die K-Absorptionskante des Strontiums und die drei L-Absorptionskanten des Blei ermittelt werden.

2.2 Auswertung

2.2.1 Nulleffekt

Vor und nach der eigentlichen Messung, wurde der Nulleffekt gemessen. Er schwankt zwischen 0.2 s^{-1} und 2.9 s^{-1} , mit einem Mittelwert von $1.04 \text{ Impulsen pro Sekunde}$.

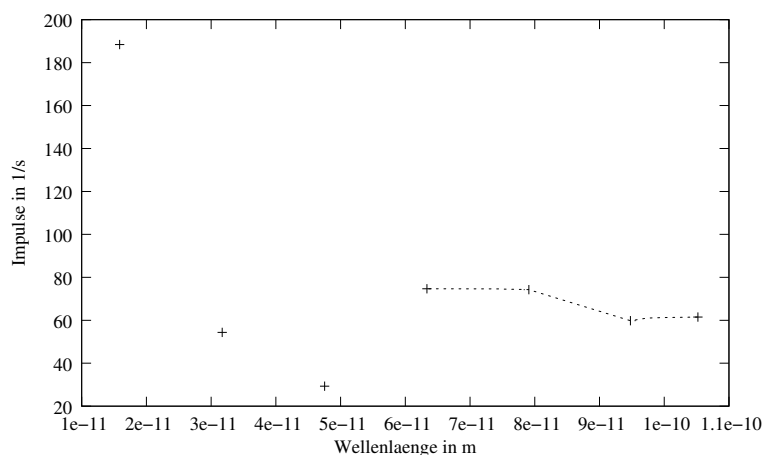
2.2.2 Wellenlänge

Nach (4) erhält die Wellenlänge mit $n = 1$ aus dem gemessenen Winkel:

$$\lambda = 2 \cdot g \cdot \sin \vartheta \quad (6)$$

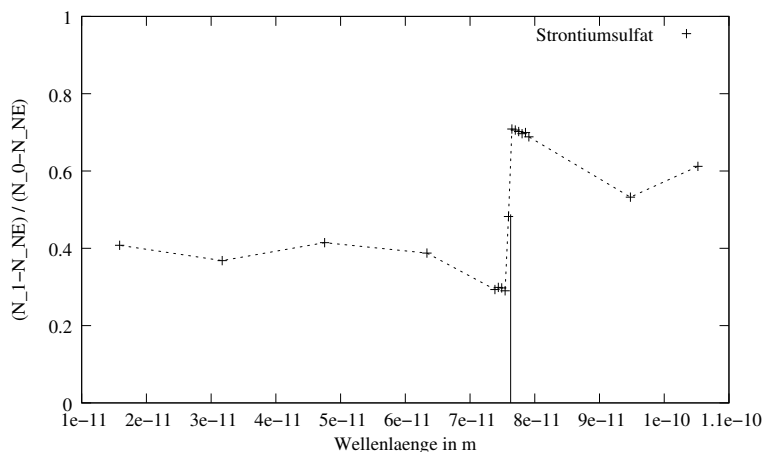
2.2.3 Intensität ohne Absorber, d.h. mit unbeschichtetem Plexiglas

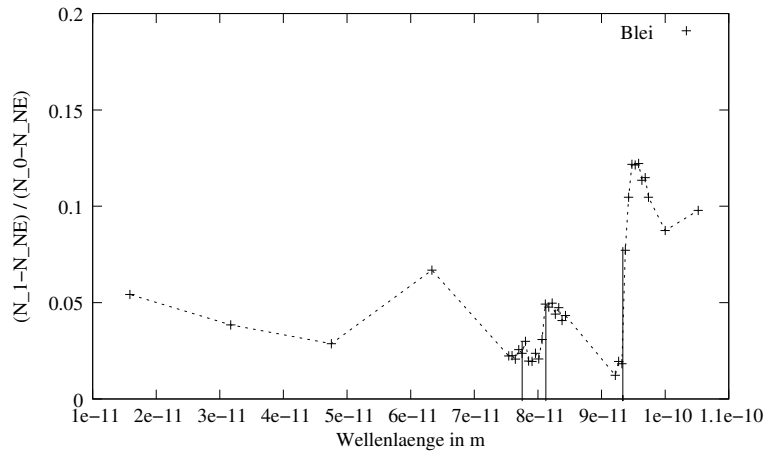
Der durchschnittliche Nulleffekt-Wert wurde abgezogen. Fehlenden Werte, die für die weitere Auswertung notwendig sind, wurden linear interpoliert.



2.2.4 Relative Intensität mit Absorber

Der durchschnittliche Nulleffekt-Wert wurde wieder berücksichtigt. Zu besserer Lesbarkeit wurden die Messwerte im Diagramm verbunden.





2.2.5 Absorptionskanten

Die Lage der Absorptionskanten lässt sich ablesen. Die Energie berechnet man gemäß Abschnitt 3.1.

	Wellenlänge λ	Photonenergie (Messung)	Literaturwert
Strontium	$7.72 \cdot 10^{-11}$ m	16.1 keV	16.105 keV
Blei	$7.78 \cdot 10^{-11}$ m	15.9 keV	15.861 keV
Blei	$8.10 \cdot 10^{-11}$ m	15.3 keV	15.200 keV
Blei	$9.39 \cdot 10^{-11}$ m	13.1 keV	13.035 keV

3 Fragen

3.1 Wie berechnet sich aus der Wellenlänge die Energie eines Photons?

Es gilt mit

$$c = f \cdot \lambda \Leftrightarrow f = \frac{c}{\lambda} \tag{7}$$

für die Energie eines Röntgenquanten

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda} \tag{8}$$

mit der Planck-Konstante

$$6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \tag{9}$$

$$1 \text{ eV} = 1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ J} \tag{10}$$

3.2 Wie läßt sich bei konstant gehaltener Hochspannung die Intensität der von der Röntgenröhre erzeugten Röntgenstrahlen über den Röntgenröhrenstrom regeln?

Die Intensität ist dem Strom proportional.

3.3 Warum gibt es eine K-Kante, drei L-Kanten und fünf M-Kanten?

Die Energie einer Schale hängt hauptsächlich von der Haupt- und Drehimpulsquantenzahl ab. Die Drehimpulsquantenzahl ist jedoch mit dem Spin gekoppelt, so dass es mit Ausnahme der K-Schale in jeder Schale zwei Unterschiedliche Drehmomente für die Drehimpulsquantenzahl gibt. Um dies zu unterscheiden definiert mal die Gesamtdrehimpulsquantenzahl $j = l \pm \frac{1}{2}$

Schale	n	l	j
K	1	0	$\frac{1}{2}$
L	2	0	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$
		1	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$
M	3	0	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$
		1	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$
		2	$\frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$

3.4 Was verstehen wir unter Röntgenemissions- und was unter Röntgenabsorptions-Analyse?

1. **Röntgenemissionsanalyse** basiert auf dem Prinzip der Röntgenfluoreszenz; siehe Abschnitt 1.7.
2. **Röntgenabsorptionsanalyse**: Auf Grund der Absorption eines Stoffe schließt man auf seine elementare Zusammensetzung.

3.5 Was wissen Sie über die Dispersion von Röntgenstrahlen? Warum gibt es für Röntgenstrahlen keine Linsen?

Es gibt keine Linsen für Röntgenstrahlen, da der Brechungsindex n von Materie für Röntgenstrahlen nur wenig von 1 abweicht. Grund dafür ist, dass die Brechung von Licht von der Polarisierbarkeit des Mediums durch die Lichtquelle abhängt und Röntgenstrahlung zu hochfrequent ist, um Materie polarisieren zu können.

Dispersion ist definiert als $\frac{dn}{d\lambda}$. Aus $n \approx 1$ folgt $\frac{dn}{d\lambda} \approx 0$.

4 Anhang

4.1 Literatur

- Wikipedia, die freie Enzyklopädie
<http://de.wikipedia.org>
- Silke Schindler: Roentgen
http://home.t-online.de/home/silke-schindler/Medizinische_Datenbank/R%F6ntgen/R%F6ntgen.htm
- Prof. Dr. K. J. Klose: Material zur Vorlesung "Einführung in die Radiologie – Anatomie in der Bildgebung"
<http://online-media.uni-marburg.de/radiologie/glossar/r2.htm>
- Grundlagen der Medizinischen Physik: Röntgenstrahlung
<http://i115srv.vu-wien.ac.at/physik/ws95/w9590dir/w9593g10.txt>
- Prof. Dr. E. Tiemann: Physik für Mediziner: Ionisierende Strahlung, Röntgenstrahlung
<http://www.ubicampus.mh-hannover.de/~physik/vorlesung/kap72/kap72.html>
- Immo Wedekind: Röntgenstrahlen
<http://www.physik3.gwdg.de/~wedekind/cgi-bin/cog.pl?thisis=Anfaengerpraktikum&versuch=29>
- X-Ray Data Booklet: Section 1.1: ELECTRON BINDING ENERGIES
http://xdb.lbl.gov/Section1/Sec_1-1.html
- Beste: Versuchsanleitungen zum physikalischen Anfängerpraktikum
1994