

A02 Röntgenstrahlung

Dr.P.Rabe, Fachhochschule Oldenburg, Ostfriesland ,Wilhelmshaven
Fachbereich Technik, Abteilung Photonik

Dok. 23. Januar 2002

1.1 Einführung

1.1.1 Ziel des Versuchs

Für das Verständnis des weiten Anwendungsbereiches von Röntgenstrahlen ist die Kenntnis der Eigenschaften dieser elektromagnetischen Wellen von grundlegender Bedeutung. Röntgenstrahlen werden u.a. im nichtmedizinischen Bereich in der Werkstoffanalytik (Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung der Elementart und -konzentration, Röntgenpulverdiffraktometrie zur Bestimmung kristalliner Phasen, Texturanalyse zur Bestimmung der Orientierungsverteilung in polykristallinen Werkstoffen, Einkristalldiffraktometrie zur Kristallstrukturbestimmung) sowie im medizinischen Bereich (diagnostische Verfahren wie Röntgenaufnahmen, Röntgentomographie, nichtinvasive Koronarangiographie) eingesetzt.

1.1.2 Aufgabenstellung

1. Funktionsprüfung der Röntgenröhre und Justierung des Goniometers
2. Aufnahme des Röntgenspektrums und Bestimmung der Ordnungszahl des Anodenmaterials mit Hilfe des Moseleyschen Gesetzes (Röntgenfluoreszenzanalyse).
3. Untersuchung der Wellenlängenabhängigkeit der Schwächung beim Durchtritt von Röntgenstrahlen durch Materie (Kupfer- und Zirkonfolie)
4. Untersuchung der Abhängigkeit der Schwächung von der Dicke des Absorbers (Bestimmung des linearen Schwächungskoeffizienten μ von Aluminium)

1.1.3 Hinweis

1. Vor dem Einschalten der Hochspannung sind die Betriebsparameter der Röntgenapparatur (Emissionsstrom und Hochspannung) auf die kleinstmöglichen Werte einzustellen.
2. Zufriedenstellende Ergebnisse lassen sich nur bei exakt justiertem Goniometer mit sorgfältig eingestellter $\varphi - 2\varphi$ -Kopplung erzielen. Dies geschieht nach Einweisung durch den Betreuenden.
3. Qualitative Messungen (Justierung und Auffinden der Extrema) erfolgen mit einem analogen Multimeter, quantitative Messungen mit einem Digitalzähler mit Zählzeiten von 30 s pro Meßpunkt.

1.1.4 Zubehör zum Röntgengerät

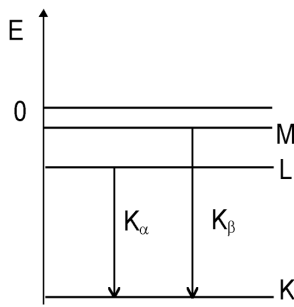
Goniometer, LiF1 -Einkristall, Geiger-Müller-Zählrohr mit Betriebsgerät (Zählratenmesser), Multimeter, Digitalzähler, Cu- und Zr-Folie, Abschwächer aus Al

1.1.5 Fragen zum Versuch (Stichworte)

Atomaufbau, Entstehung der Röntgenstrahlung (Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung (Serien, Moseleysches Gesetz)), spektrale Verteilung, Beugung von Röntgenstrahlen (Braggsche Reflexion), Wellenlängen-, Ordnungszahl- und Schichtdickenabhängigkeit der Absorption, Schutz vor Röntgenstrahlen, „Lage“ im elektromagnetischen Spektrum.

1.2 Theorie

1.2.1 Entstehung von Röntgenstrahlen



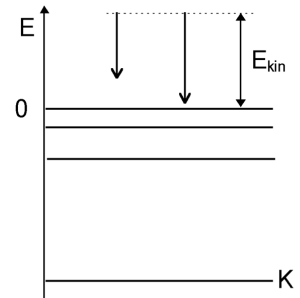
Die Entstehung von Röntgenstrahlen kann mit Hilfe eines einfachen Energieniveauschemas erklärt werden. Die charakteristische Röntgenstrahlung entsteht dadurch, daß durch ein Elektron hinreichend hoher Energie ein Atom des Anodenmaterials in einer inneren Schale ionisiert wurde. In einem Folgeprozeß erfolgt ein Übergang eines Elektrons aus einem Niveau höherer Energie in den freien Platz niedriger Energie. Die dabei frei werdende Energie wird in Form eines Quants der Röntgenstrahlung freigesetzt. Die Energie der K_α -Strahlung kann mit Hilfe des Moseleyschen Gesetzes abgeschätzt werden:

$$E_{K_\alpha} = \frac{3}{4} \cdot 13,6eV \cdot (Z - \sigma)^2 \tag{1.1}$$

Abbildung 1.1: Energieniveauschema mit Übergängen von gebundenen Elektronen zwischen diskreten Energiezuständen

Dabei sind Z die Ordnungszahl und $\sigma \approx 1$ die sog. Abschirmkonstante. Die Bremsstrahlung entsteht, nachdem ein Elektron hinreichend hoher Energie im Coulombfeld des Kernes eines Atoms des Anodenmaterials abgelenkt wurde, d.h. eine beschleunigte Bewegung ausgeführt hat.

Nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik ist dieser Vorgang mit der Aussendung elektromagnetischer Strahlung verbunden. Im Energieniveauschema kann man diese Energieverluste der Elektronen durch Übergänge im Bereich der kontinuierlichen Energiezustände erklären. Die dabei frei werdende Energie wird in Form eines Quants der Röntgenstrahlung freigesetzt. Aus der kurzwelligen Grenze der Bremsstrahlung kann die Beschleunigungsspannung der Röntgenröhre bestimmt werden. Die Wellenlängenabhängigkeit der Intensität $I(\lambda)$ der Bremsstrahlung kann mit einem von Kramers entwickelten Formalismus beschrieben werden:



$$I_\lambda = \frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = K \cdot i \cdot Z \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1\right) \cdot \frac{1}{\lambda^3} \tag{1.2}$$

Hierin sind i der Anodenstrom, Z die Ordnungszahl des Anodenmaterials, λ_0 die Grenzwellenlänge und K eine Konstante.

Abbildung 1.2: Energieniveauschema mit Übergängen von freien Elektronen zwischen kontinuierlichen Energiezuständen

1.2.2 Beugung, Reflexion und Monochromatisierung von Röntgenstrahlen

Da die Abstände der Atome von der gleichen Größenordnung wie die Wellenlänge der Röntgenstrahlung ist, treten merkliche Beugungserscheinungen auf. Fällt ein paralleles Bündel von Röntgenstrahlen auf ein Kristallgitter, d.h. eine räumlich periodische Anordnung von Gitterbausteinen (Atomen, Atomgruppen, Molekülen oder Molekülgruppen), so werden die Orte der Atome nach dem Huygensschen Prinzip Ausgangspunkte von Elementarwellen (Kugelwellen) gleicher Wellenlänge wie die der einfallenden Strahlung (elastische Streuung). Die Elementarwellen interferieren und verstärken sich, wenn der Gangunterschied von an benachbarten Atomen gestreuten Wellen, die in großem Abstand vom Kristallgitter beobachtet werden, ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge der Röntgenstrahlung beträgt. Vereinfachend kann man nach Bragg diese Beugung als Reflexion der Röntgenstrahlung an den Netzebenen des Kristallgitters auffassen. Die notwendige Bedingung für eine konstruktive Interferenz läßt sich dann mit dem Netzebenenabstand und dem Glanzwinkel φ durch die Braggsche Gleichung ausdrücken:

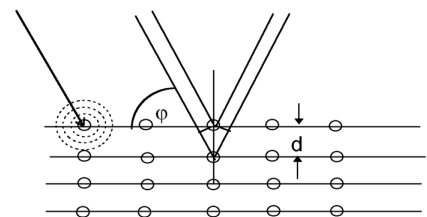


Abbildung 1.3: Braggsche Reflexion von Röntgenstrahlen am Einkristall

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \varphi \quad (1.3)$$

Hierin ist n die Beugungsordnung.

1.2.3 Absorption von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen werden in jeder Form von Materie teilweise absorbiert. Die Schwächung des Strahls ist sowohl von der Dicke D des Absorbers als auch von der Wellenlänge λ der verwendeten Strahlung und der Ordnungszahl Z der absorbierenden Atome abhängig. Die Abhängigkeit der Schwächung eines Röntgenstrahles von der Absorberdicke D wird durch das Beer-Lambertsche Gesetz beschrieben

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu D} \quad (1.4)$$

Hierin sind I_0 und I die Intensitäten des Röntgenstrahles beim Auftreffen und nach Durchgang durch den Absorber und μ der wellenlängen- und materieabhängige Absorptionskoeffizient (linearer Schwächungskoeffizient). Der Absorptionskoeffizient sinkt mit abnehmender Wellenlänge ($\mu \sim \lambda^3$) und mit abnehmender Ordnungszahl ($\mu \sim Z^4$). Bei vorgegebener Ordnungszahl der absorbierenden Atome treten bei bestimmten Wellenlängen sprunghafte Änderungen des Absorptionskoeffizienten auf. Da der Absorptionsprozeß praktisch immer mit einer Ionisation in einer inneren Schale verbunden ist, entsprechen diese Wellenlängen Photonenenergien, die gleich den Ionisationsenergien sind. Die energetische Lage einer Absorptionskante entspricht also der Bindungsenergie der Elektronen der betreffenden Schale. Zur Monochromatisierung der Röntgenstrahlung dient ein kubischer LiF-Einkristall mit der Gitterkonstanten $a = 0,40276$ nm. Die Untersuchungen werden in zweiter Beugungsordnung ($n = 2$) durch Beugung an den Atomen der Netzebenen mit dem Abstand a durchgeführt. Bei der Diskussion der experimentell ermittelten Spektren ist zu beachten, daß auch die vierte Beugungsordnung eine merkliche Intensität liefern kann. Die erste und die dritte Beugungsordnung verschwinden auf Grund der speziellen Kristallstruktur des LiF.

1.3 Versuch

1.3.1 Durchführung

1. Funktionsprüfung des Goniometers und Inbetriebnahme der Röntgenröhre in folgender Reihenfolge:

Stufenschalter für Hochspannung der Röntgenröhre auf Stufe 1 einstellen.

Schieber zum Einstellen des Emissionsstromes auf 0,05mA einstellen.

Kippschalter für Netzspannung auf I schalten.

Stufenschalter für die Hochspannung der Röntgenröhre auf Stufe 6 einstellen.

Schieber zum Einstellen des Emissionsstrom auf 1mA einstellen.

Zufriedenstellende Ergebnisse lassen sich nur bei exakt justiertem Goniometer mit sehr sorgfältig eingestellter $\varphi - 2\varphi$ - Kopplung erzielen.

Hierzu wird bei entkoppeltem $\varphi - 2\varphi$ - Betrieb mit dem Kristall ein Glanzwinkel von ca. 11° an der Kristallachse und ca. 22° an der Detektorachse eingestellt.

Dann wird durch abwechselndes Schwenken des Detektors bei festgehaltener Kristallposition und des Kristalles bei festgehaltener Detektorposition die Stellung maximaler Intensität gesucht.

In dieser Stellung werden die beiden Achsen gekoppelt.

2. Spektrale Verteilung der Röntgenstrahlung:

Für den Glanzwinkelbereich von $\varphi = 3^\circ$ bis $\varphi = 15^\circ$ ist die von der Röntgenröhre ausgesandte Strahlung im gekoppelten $\varphi - 2\varphi$ - Betrieb in Schritten von $\Delta\varphi = 0,5^\circ$ zu messen.

Dabei ist darauf zu achten, daß die ganzzahligen 2φ -Werte möglichst genau eingestellt werden, da diese Einstellungen in einem späteren Teilversuch reproduziert werden müssen.

Im Bereich linienartiger Strukturen (charakteristische Strahlung) ist der Winkel, bei der die maximale Intensität auftritt möglichst genau zu bestimmen, dies erfordert in der Regel drei zusätzliche Messungen, die durch die K_α, K_β -Linien und dem dazwischen liegenden Minimum erforderlich werden.

(Meßzeit pro Meßpunkt 30 s, Stufe 6, Stufe 8 für Justage)

3. Wellenlängenabhängigkeit der Schwächung von Röntgenstrahlen:

In den Strahlengang der Röntgenröhre sind nacheinander eine Kupferfolie (Dicke $D = 0,07$ mm) und eine Zirkonfolie (Dicke $D = 0,05$ mm) unterzubringen.

Für jede Folie ist die transmittierte Intensität im gekoppelten $\varphi - 2\varphi$ - Betrieb im Glanzwinkelbereich $\varphi = 5^\circ$ bis $\varphi = 15^\circ$ in Schritten von $0,5^\circ$ zu messen. Bei der Einstellung der Winkel ist darauf zu achten, daß die Winkeleinstellungen von Teilversuch 2 möglichst genau reproduziert werden. Dies gilt insbesondere für den Winkelbereich, in dem die charakteristische Strahlung auftritt. Die Betriebsparameter der Röntgenröhre müssen mit denen von Teilversuch 2 identisch sein.

(Meßzeit pro Meßpunkt 30 s, Stufe 6)

4. Abhängigkeit der Schwächung von Röntgenstrahlen von der Dicke des Absorbers:

Für Dicken eines Aluminiumabsorbers von $D = 0,5$ mm bis $D = 3,0$ mm ist in Schritten von $0,5$ mm für die in Teilversuch 2 beobachtete K_α - Strahlung die durch die Proben transmittierte sowie die auf die Proben einfallende Strahlungsleistung zu bestimmen.

Bei diesem Versuch ist in den Strahlengang zusätzlich die in Teilversuch 3 verwendete Zirkonfolie unterzubringen. Diese Folie hat die Aufgabe, die K_β -Strahlung der Röntgenröhre stark zu absorbieren, während die K_α -Strahlung nur schwach absorbiert wird (K_β -Filter). Auf diese Weise wird eine nahezu monochromatische Röntgenstrahlung erzeugt.

Für diese Messungen werden die Achsen von Kristall und Detektor entkoppelt und der Kristall entfernt. Der Detektor wird in eine Position gebracht, so daß Röntgenquelle, Absorber und Detektor auf einer Geraden liegen.

(Meßzeit pro Meßpunkt 30s, Stufe 1)

1.3.2 Auswertung

1. Zu Versuch 2: Die Intensität der Röntgenstrahlung ist als Funktion der Wellenlänge darzustellen.

Mit der Wellenlänge der beobachteten K_α -Strahlung ist durch Anwendung des Moseleyschen Gesetzes die Ordnungszahl des Anodenmaterials zu bestimmen.

Aus der kurzwelligen Grenze der Bremsstrahlung ist die Betriebsspannung der Röntgenröhre zu bestimmen. Für diese Größe ist ein Fehler anzugeben.

Der spektrale Verlauf der Bremsstrahlung ist mit dem Kramersschen Formalismus zu vergleichen, d.h. der mit dem Kramersschen Formalismus berechnete Verlauf ist in die graphische Darstellung des experimentellen Verlaufs einzuzichnen. Beide Darstellungen sind an den Stellen maximaler Intensität der Bremsstrahlung anzupassen. Bei dem Vergleich ist zu berücksichtigen, daß im Experiment die Intensität bei konstantem Winkelintervall bestimmt wird, während die Theorie die Intensität für ein konstantes Wellenlängenintervall angibt.

2. Zu Versuch 3: Mit den gemessenen Intensitäten I und den in Teilversuch 2 bestimmten, auf die Proben einfallenden Intensitäten I_0 sind die Wellenlängenabhängigkeiten der Schwächungskoeffizienten μ zu bestimmen. Die Darstellung erfolgt in Form einer Tabelle und einer Grafik.

Der Verlauf der Schwächungskoeffizienten mit der Wellenlänge ist zu diskutieren.

Mit Hilfe des Zirkonspektrums ist die Bindungsenergie der Elektronen der K-Schale des Zirkons zu bestimmen. Für diese Größe ist ein Fehler anzugeben. Bei der Diskussion des Spektrums ist der Einfluß der 4. Beugungsordnung zu erörtern.

3. Zu Versuch 4:

Mit den gemessenen Intensitäten ist der Verlauf des Absorptionskoeffizienten $\frac{I}{I_0}$ in Abhängigkeit von der Schichtdicke zu ermitteln. Der Verlauf ist als Tabelle sowie als Grafik in linearem und halblogarithmischem Maßstab darzustellen.

Für die Wellenlänge der verwendeten K_α -Strahlung ist der lineare Schwächungskoeffizient einschließlich seines Fehlers zu bestimmen.