



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **ROE**

Aktualisiert: am 03.04.2019

Röntgenspektrum

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Röntgenröhre	2
2.2 Das Röntgenspektrum	3
2.3 Bragg-Reflexion	4
2.4 Analyse mit einem Einkristall	5
3 Versuchsdurchführung	6
3.1 Aufbau und Kalibrierung	6
3.2 Aufgabe 1	6
3.3 Aufgabe 2 (für Physik im Hauptfach)	8
4 Fragen	9
5 Anhang	11

1 Aufgabenstellung

Aufgabe 1: Analysieren Sie die charakteristische Röntgenstrahlung von Kupfer, Eisen, Molybdän oder Wolfram (für GPIII) wahlweise mit einem LiF oder KBr-Einkristall. Identifizieren Sie die atomaren Übergänge, die die gefundenen Linien im Röntgenspektrum erzeugen und berechnen Sie die zugehörigen Energien.

Aufgabe 2: (*Für Physik im Hauptfach*) Berechnen Sie die Plancksche Konstante aus der Abhängigkeit der minimalen Wellenlänge des Bremsstrahlungsspektrums von der Beschleunigungsspannung der Elektronen.

2 Theoretische Grundlagen

Am 8. November 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen bei Experimenten mit einer Entladungsröhre eine neuartige Strahlung, die er X-rays nannte und die später nach ihm benannt wurde. Röntgen zeigte, dass die Strahlung bei Beschuss von Festkörpern mit Elektronenstrahlen entsteht. 1901 wurde er für seine Entdeckung mit dem ersten Nobelpreis in Physik ausgezeichnet [1].

Max von Laue brachte einige Jahre später den Nachweis, dass es sich bei Röntgenstrahlung um elektromagnetische Wellen handelt, die an regelmäßigen Kristallen interferieren. Er wurde 1914 ebenfalls mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet [2] und die Methode, mit der er die Regelmäßigkeit der Kristallstruktur nachwies, wird auch heute noch für Strukturanalysen eingesetzt (Laue-Diagramme). Als dritte Nobelpreisträger in diesem Feld sind Vater und Sohn William und Lawrence Bragg zu nennen, die im darauffolgenden Jahr 1915 für Strukturanalysen von Kristallen mit Röntgenstrahlen ausgezeichnet wurden [3].

Röntgenstrahlung findet sich mit teilweisen Überschneidungen im elektromagnetischen Spektrum zwischen UV- und Gamma-Strahlung bei Wellenlängen im Bereich von 10 nm und 1 pm. Röntgenstrahlung hat ionisierende Wirkung und kann damit im menschlichen Körper Schäden bis hin zu Krebs erzeugen. Deshalb ist im Umgang mit Röntgenstrahlung auf Strahlenschutz zu achten. Das Röntgengerät in diesem Versuch ist dazu mit einem speziellem Schutzglas und Schutzfunktionen ausgestattet. Nur bei verschlossener Schiebetür kann die Röntgenröhre in Betrieb genommen werden. Röntgenstrahlung wird heutzutage vielfältig in verschiedenen Anwendungsgebiete eingesetzt, wie z. B. für medizinische Abbildungen und Strahlentherapie, Kristallographie, Mikroskopie und Spektroskopie.

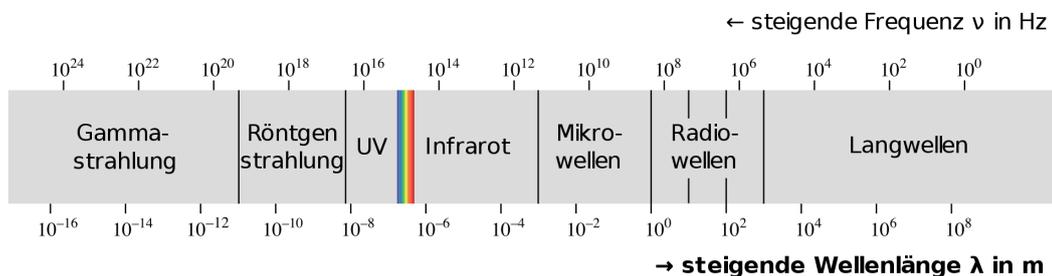


Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum, Quelle: Wikipedia

2.1 Röntgenröhre

Eine Röntgenröhre besteht aus zwei Elektroden, die sich in einem evakuierten Glaskolben befinden. An der Kathode werden Elektronen durch Glühemission erzeugt und zur Anode beschleunigt. Die

Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode wird auch als Anodenspannung U_{Anode} bzw. U_A bezeichnet und liegt typischerweise bei 10 bis 100 keV, in diesem Versuch bei 35 keV. Treffen die Elektronen auf der Anode auf, so wird die Energie der Elektronen teilweise in Form von elektromagnetischer Strahlung, der Röntgenstrahlung, freigesetzt. Der größere Teil wird jedoch in Wärme umgewandelt.

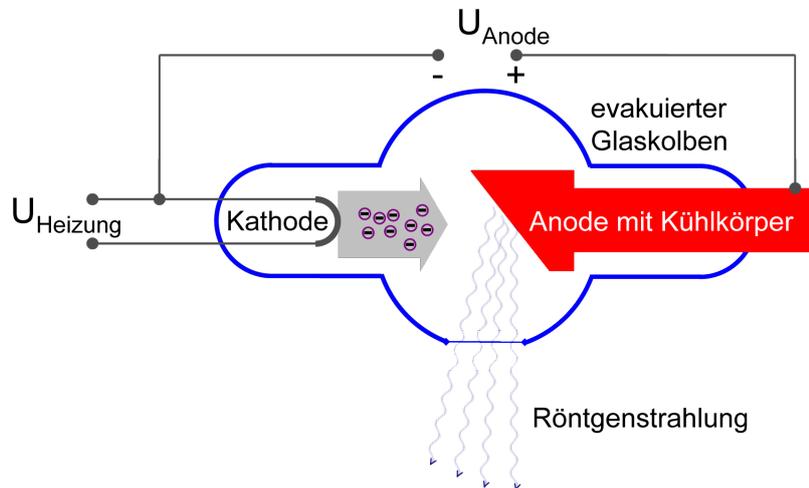


Abb. 2: Aufbau einer Röntgenröhre.

2.2 Das Röntgenspektrum

Für die Erzeugung der Röntgenstrahlung an der Anode spielen zwei verschiedene Prozesse eine Rolle. Zum einen werden die Elektronen im Coulombfeld der Atomkerne in der Anode gestreut bzw. abgebremst. Sie geben dabei unterschiedlich viel Energie als Röntgenphotonen (Röntgenstrahlung) ab. Die Folge ist ein kontinuierliches Spektrum, das als Bremsspektrum bezeichnet wird. Die Energie der Bremsstrahlung ist durch den Energieerhaltungssatz limitiert, die obere Grenze der Photonenenergie ist gleich der kinetischen Energie der Elektronen $e \cdot U_A$, die sie beim Durchlaufen der Anodenspannung erhalten. Üblicherweise wird jedoch das Spektrum in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und nicht von der Energie gezeigt. Aus der Beziehung

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda}, \quad (1)$$

mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js (Plancksches Wirkungsquantum) und $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), kann die kurzwellige Grenze λ_{min} im Bremsspektrum hergeleitet werden:

$$\lambda_{min} = \frac{h c}{e U_A}. \quad (2)$$

Überlagert wird dieses kontinuierliche Bremsspektrum mit einem für das Anodenmaterial charakteristischen Linienspektrum. Die zur Anode beschleunigten Elektronen haben ionisierende Wirkung. Besitzen sie genügend kinetische Energie, so können sie die stark gebundenen Elektronen in den inneren Schalen der Atome der Anode ausschlagen. Die freigewordenen Plätze werden mit Elektronen aus den weiter außen liegenden Schalen wieder aufgefüllt. Dabei wird die Energiedifferenz zwischen den beiden Schalen bzw. Energieniveaus in Form von Photonen freigesetzt. Die Differenz der Energieniveaus ist dabei gleich der freigesetzten Photonenenergie.

In Abb. 4 ist beispielhaft das Energieniveauschema für Kupfer gezeigt. Die Schalen werden als K-,

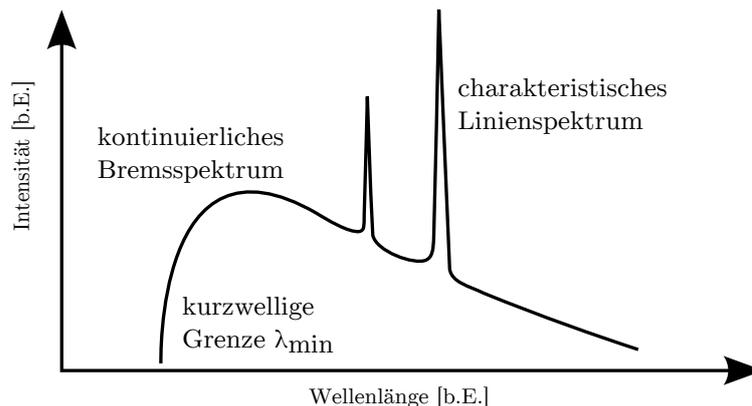


Abb. 3: Schematische Darstellung eines Röntgenspektrums.

L-, M-Schalen mit den Hauptquantenzahlen $n = 1, 2, 3$ bezeichnet. L- und M-Schale sind noch weiter in die Feinstruktur aufgespalten, die durch die Drehimpuls- und die Spinquantenzahl bestimmt wird. Charakteristische Strahlung durch Übergänge von der L- zur K-Schale heißen K_{α} -Strahlung, Übergänge von der M- zur K-Schale K_{β} -Strahlung. Quantenmechanische Auswahlregeln (Erhaltungssätze) verbieten einige der Übergänge, wie z. B. von L_1 nach K oder M_1 nach K. Die charakteristische Energie der Strahlung kann aus dem Energieniveauschema abgelesen werden, also z. B. für die K_{β} Strahlung von Kupfer: $8978,9 \text{ eV} - 73,6 \text{ eV} = 8,905 \text{ keV}$. Die Energieniveauschemata für die anderen Materialien finden Sie im Anhang.

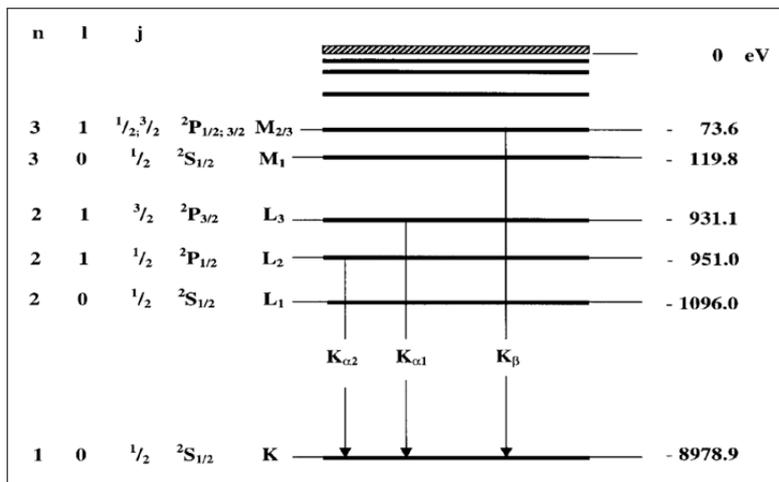


Abb. 4: Energieniveauschema von Kupfer, Quelle: PHYWE.

2.3 Bragg-Reflexion

Trifft Röntgenstrahlung unter einem bestimmten Winkel auf einen Kristall, so wird sie nicht nur an der Oberfläche, sondern auch an den darunter liegenden Netzebenen des Kristalls reflektiert. Betrachtet man zwei Strahlen, die an benachbarten Netzebenen reflektiert wurden, so lässt sich einfach herleiten, unter welchen Bedingungen die Strahlen konstruktiv interferieren. Hier ergibt sich ein Gangunterschied Δ zwischen den beiden Strahlen, der gemäß nebenste-

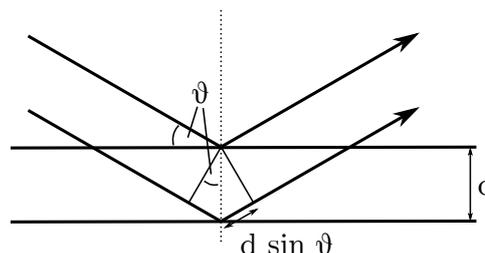


Abb. 5: Bragg-Reflexion im Glanzwinkel ϑ an zwei Netzebenen.

hender Skizze vom Einfallswinkel ϑ und dem Netzebenenabstand d abhängt.

$$\Delta = 2d \sin \vartheta \quad (3)$$

Beträgt der Gangunterschied ein Vielfaches der Wellenlänge, so sind die reflektierten Strahlen wieder in Phase und interferieren konstruktiv. In allen anderen Fällen sorgt die große Zahl von Netzebenen und Reflexionen dafür, dass sich die Strahlen gegenseitig auslöschen. Die Bragg-Gleichung lautet entsprechend:

$$2d \sin \vartheta = n \lambda, \quad (4)$$

mit d = Netzebenenabstand und n = Beugungsordnung. Die reflektierte Röntgenstrahlung wurde also monochromatisiert und die Wellenlänge kann aus dem Winkel ϑ (Glanzwinkel) und dem Netzebenenabstand d bestimmt werden. Dieser Effekt wird zur Analyse des Röntgenspektrums mit Hilfe der Drehkristallmethode ausgenutzt.

Als Einkristalle werden in dem Versuch entweder LiF oder KBr verwendet, deren Netzebenenabstand bekannt ist (s. Anhang). Mit der Bragg-Gleichung und Gl. (1) ergibt sich für die Energie der Strahlung:

$$E = \frac{n h c}{2d \sin \vartheta}. \quad (5)$$

2.4 Analyse mit einem Einkristall

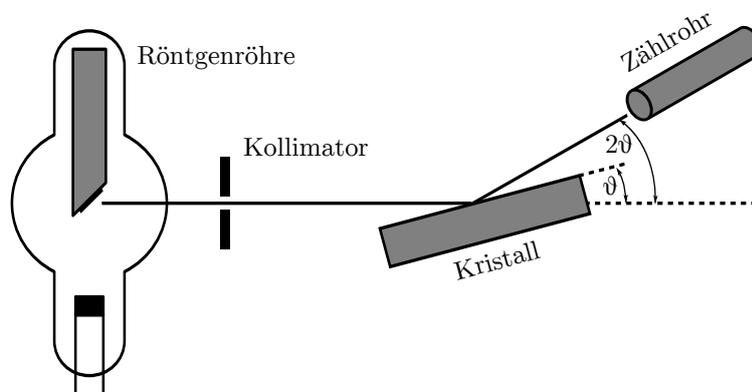


Abb. 6: Messung eines Röntgenspektrums mit der Drehkristallmethode

Die Röntgenstrahlen treffen unter dem Winkel ϑ auf den drehbaren Kristall und werden daran reflektiert. Der resultierende Winkel für die reflektierte Strahlung ist dabei immer doppelt so groß wie der Kristallwinkel. Um das Spektrum der Röntgenstrahlung mit der Drehkristallmethode zu bestimmen, muss entsprechend der Detektor (Zählrohr) jeweils so mit verfahren werden, dass das Winkelverhältnis erhalten bleibt.

Mit dieser Methode erhält man die Intensität der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit des Kristallwinkels, in der Literatur oft als Glanzwinkel bezeichnet. Aus dieser Auftragung können dann beispielsweise die Wellenlängen der charakteristischen Linien mithilfe der Bragg-Gleichung bestimmt werden. Die charakteristischen Linien des Spektrums tauchen dabei auch in höheren Beugungsordnungen ($n > 1$ s. Gl. (4)) im Spektrum auf. In Abb. 7 ist ein solches Spektrum für eine Kupfer-Anode mit dem vorliegenden Versuchsaufbau gemessen worden.

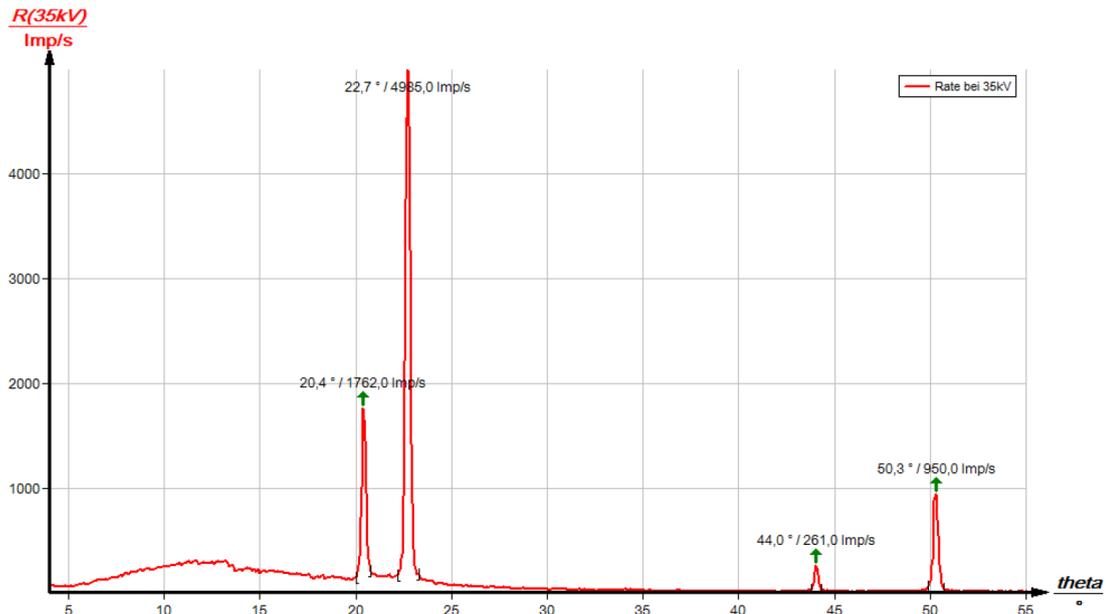


Abb. 7: Charakteristisches Röntgenspektrum von Kupfer als Funktion des Glanzwinkels ϑ mit einem LiF Analysatorkristall, Quelle: PHYWE.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Aufbau und Kalibrierung

Für den Versuch steht ein vollständig eingerichteter Messplatz zur Verfügung (Abb. 8). Zur Auswahl stehen Röntgenröhren mit verschiedenen Anodenmaterialien: Wolfram, Kupfer, Eisen und Molybdän. Setzen Sie den Einschub mit der Röhre in das Röntgengerät ein. Nehmen Sie anschließend die 2 mm Kollimatorblende aus der Schublade des Röntgengeräts (unten) und setzen Sie sie wie in Abb. 9 dargestellt ein. Wählen Sie als Analysatorkristall entweder LiF oder KBr und stecken Sie die Halterungen mit den Kristallen in die dafür vorgesehenen Löcher am Goniometer. Als Detektor wird ein Geiger-Müller-Zähler verwendet, der bereits am Ende des Goniometerarms befestigt ist. Das Röntgengerät kann entweder über das Bedienfeld oder über den per USB verbundenen Computer mit der Software *measure* gesteuert werden.

Wenn alle Komponenten eingesetzt und angeschlossen sind, kann das Röntgengerät eingeschaltet werden. Das Goniometer muss vor Beginn der Experimente kalibriert werden. Über das Bedienfeld am Röntgengerät wird dazu zunächst eingestellt, welcher Analysatorkristall verwendet wird und anschließend die Autokalibrierung gestartet (unter Goniometer - Parameter - Kristall und danach Goniometer - Autokalibrierung). Die Autokalibrierung sowie anschließende Messungen können nur gestartet werden, wenn die Glastür geschlossen und verriegelt (Schloss-Symbol am Gerät).

3.2 Aufgabe 1

Starten Sie das Programm *measure*. Durch Klicken in die verschiedenen Bereiche des angezeigten Röntgengeräts können Sie die entsprechenden Einstellungen ändern (Abb. 10). Kontrollieren Sie, dass in den Röhreneinstellungen die Röhrenspannung auf 35 kV und der Emissionsstrom auf 1 mA eingestellt sind. Die Goniometereinstellungen sind unterschiedlich zu wählen, je nachdem welche Röntgenröhre und welchen Analysatorkristall Sie benutzen. Der Detektorwinkel soll immer so gewählt werden, dass die im Glanzwinkel reflektierte Röntgenstrahlen gemessen werden, d.h. dass der Detektorwinkel immer doppelt so groß wie der Kristallwinkel sein muss (vgl. Abb. 5). Dieses feste Verhältnis wird im Modus „1:2 Kopplung“ automatisch beibehalten.



Abb. 8: PHYWE X-ray expert unit.

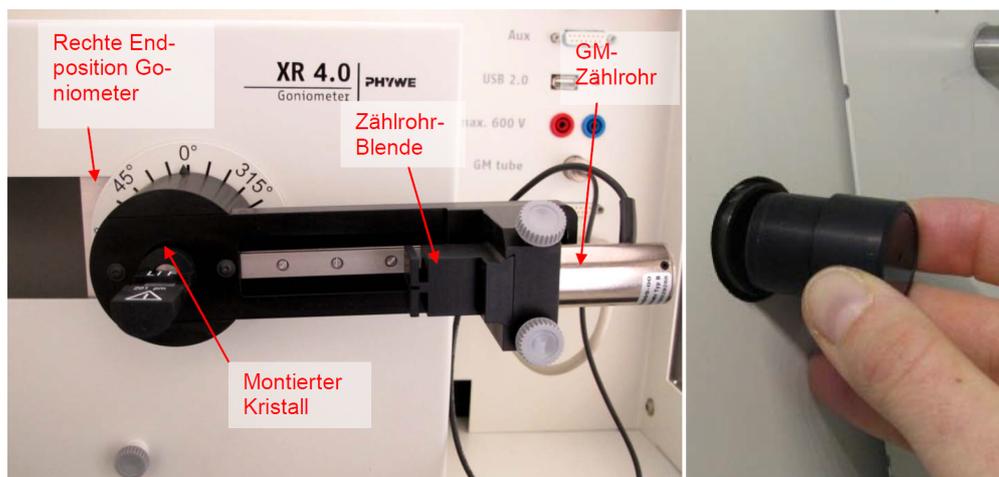


Abb. 9: Aufbau des Experimentierraums mit Goniometer und Einsetzen der Kollimatorblende, Quelle: PHYWE.



Abb. 10: Röhren- und Goniometereinstellungen mit dem Programm *measure*, Quelle: PHYWE.

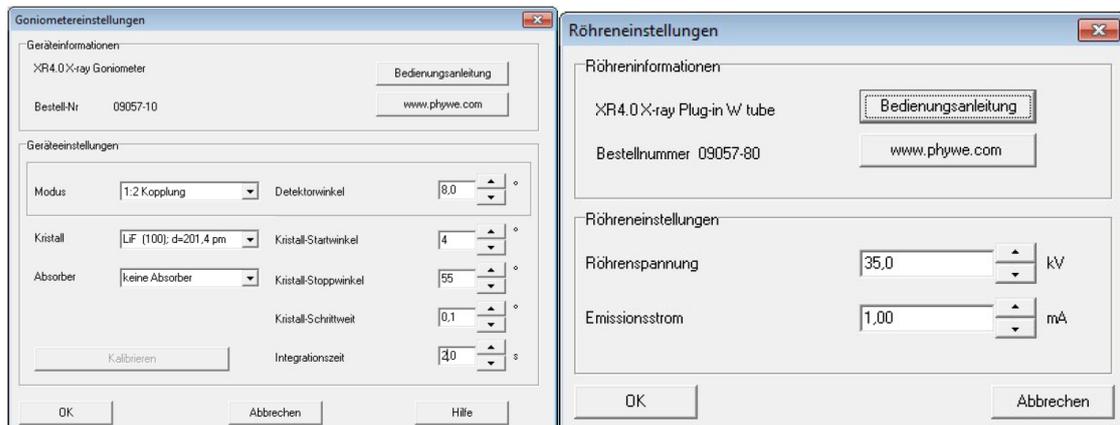


Abb. 11: Einstellungen für Goniometer und Röntgenröhre, Quelle: PHYWE

ACHTUNG: Stellen Sie keine Winkel unterhalb von 3° ein, um den Geiger-Müller-Zähler nicht dem Primärstrahl auszusetzen!

Hinweise zum Programm *measure*:

Um das Experiment zu starten klicken Sie schließlich auf den roten *record* Knopf. Nach der Messung wählen Sie „alle Messungen an *measure* übertragen“. Speichern Sie Ihre Messung zunächst und werten Sie anschließend das charakteristische Spektrum aus. Sie können dazu in *measure* vorhandenen Funktionen nutzen. Markieren Sie im Spektrum den Bereich, in dem Sie die Peaks analysieren wollen und klicken Sie auf *Peakanalyse*. Aus den Winkeln des Schwerpunkts des Peaks und unter Beachtung der Ordnung berechnen Sie die zugehörige Energie E der Röntgenstrahlung. Aus der charakteristischen Breite der Peaks berechnen Sie die jeweilige Messunsicherheit ΔE der Energie.

3.3 Aufgabe 2 (für Physik im Hauptfach)

Benutzen Sie in diesem Versuch LiF als Analysatorkristall und kalibrieren Sie das Goniometer ggf. erneut, falls Sie den Kristall gewechselt haben. Bestimmen Sie dann die kurzwellige Grenze des Bremsspektrums für verschiedene Anodenspannungen. Dazu genügt es im Winkelbereich von 4° bis

Anodenmaterial	Kristall	Startwinkel	Stoppwinkel	Schrittweite	Integrationszeit
Cu	LiF	4°	55°	0,1°	2 s
Cu	KBr	3°	75°	0,1°	2 s
Fe	LiF	4°	80°	0,1°	2 s
Fe	KBr	4°	65°	0,1°	2 s
Mo	LiF	3°	65°	0,1°	2 s
Mo	KBr	3°	30°	0,1°	2 s
W (für GP III)	LiF	4°	80°	0,1°	6 s

Tabelle 1: Goniometereinstellungen

17° bei einer Schrittweite von 0,1° zu messen. Variieren Sie die Anodenspannung von 15 bis 31 kV in 2 kV Schritten. Die anderen Parameter bleiben unverändert wie in Aufgabe 1. Tragen Sie λ_{\min} über der reziproken Beschleunigungsspannung auf (Duane-Hunt Gerade) und bestimmen Sie daraus das Plancksche Wirkungsquantum.

Hinweise zur Auswertung mit *measure* (Vereinfachung für Lehramt Physik):

Wählen Sie „Messungen hinzufügen (Wiederholungsmessung)“ bis Sie die Spektren für alle Anodenspannungen aufgenommen haben und erst anschließend „alle Messungen an *measure* übertragen“. Für die Auswertung finden Sie ein paar hilfreiche Funktionen unter „Messauswertung - Röntgenspektroskopie“.

Sie können die Winkel mit der Bragg-Gleichung direkt in Wellenlängen umrechnen. Die Funktion „x-Achse umrechnen“ macht dies für Sie, wenn Sie die Beugungsordnung (überlegen Sie sich, welche das bei der kurzwelligen Grenze sein muss) und die Netzebenenabstand von LiF angeben.

Die Auftragung λ_{\min} gegen $1/U_A$ wird auch Duane-Hunt-Gerade genannt. Die gleichnamige Funktion in *measure* können Sie nutzen, um λ_{\min} aus den gemessenen Spektren zu extrahieren. Wählen Sie die entsprechenden Stellen in den Spektren mit dem „Markieren“-Werkzeug aus und klicken Sie auf „Wert übernehmen“ in dem „Duane-Hunt-Gerade“-Dialog. Die Anodenspannungen geben Sie per Hand ein. Mit „Duane-Hunt-Gerade erstellen“ wird der entsprechende Plot erstellt.

Aus der so erhaltenen Auftragung können Sie das Plancksche Wirkungsquantum aus der Steigung bestimmen. Dazu können Sie die Funktion „Kurvenfitting“ oder „Planck-Konstante bestimmen“ benutzen.

4 Fragen

1. In welchem Wellenlängen- und in welchem Energiebereich liegt die Röntgenstrahlung?
2. Welche verschiedenen Röntgenspektren unterscheidet man?
3. Wieso gibt es eine kurzwellige Grenze des Bremsspektrums?
4. Wie kommt das charakteristische Röntgenspektrum zustande?
5. Wie lautet die Bragg-Gleichung?
6. Wie funktioniert die Drehkristallmethode?

Autorenschaft

Diese Versuchsanleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von J. Krämer erstellt. Aktuelle Änderungen werden von der Praktikumsleitung durchgeführt.

Literatur

- [1] Nobelprize.org: The Nobel Prize in Physics 1901. 5. April 2013.
URL http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/
- [2] Nobelprize.org: The Nobel Prize in Physics 1914. 5. April 2013.
URL http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1914/
- [3] Nobelprize.org: The Nobel Prize in Physics 1915. 5. April 2013.
URL http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1915/
- [4] Demtröder, W.: Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper. Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch), ISBN 9783540214731

5 Anhang

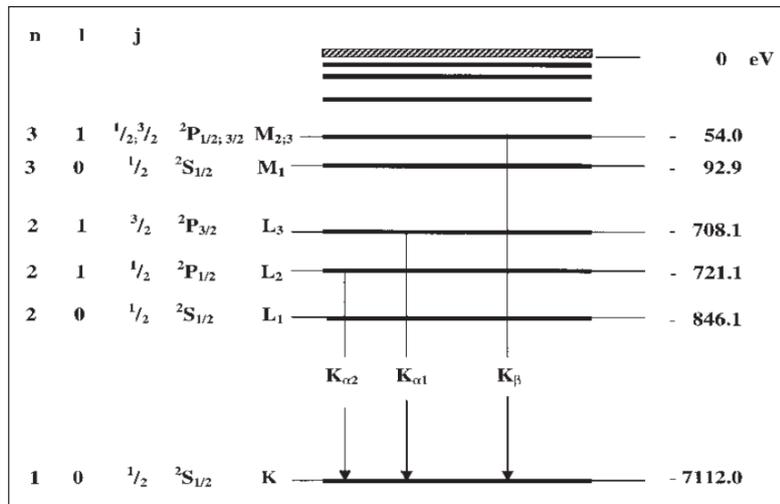


Abb. 12: Energieniveauschema von Eisen, Quelle: PHYWE.

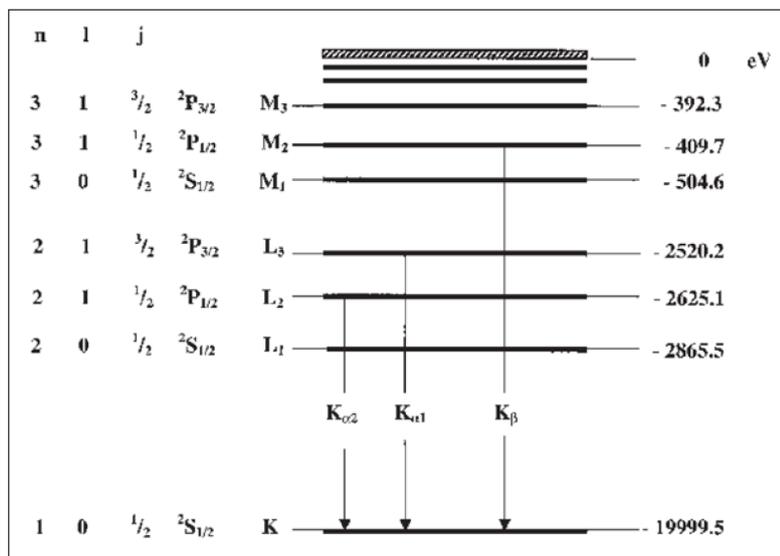


Abb. 13: Energieniveauschema von Molybdän, Quelle: PHYWE.

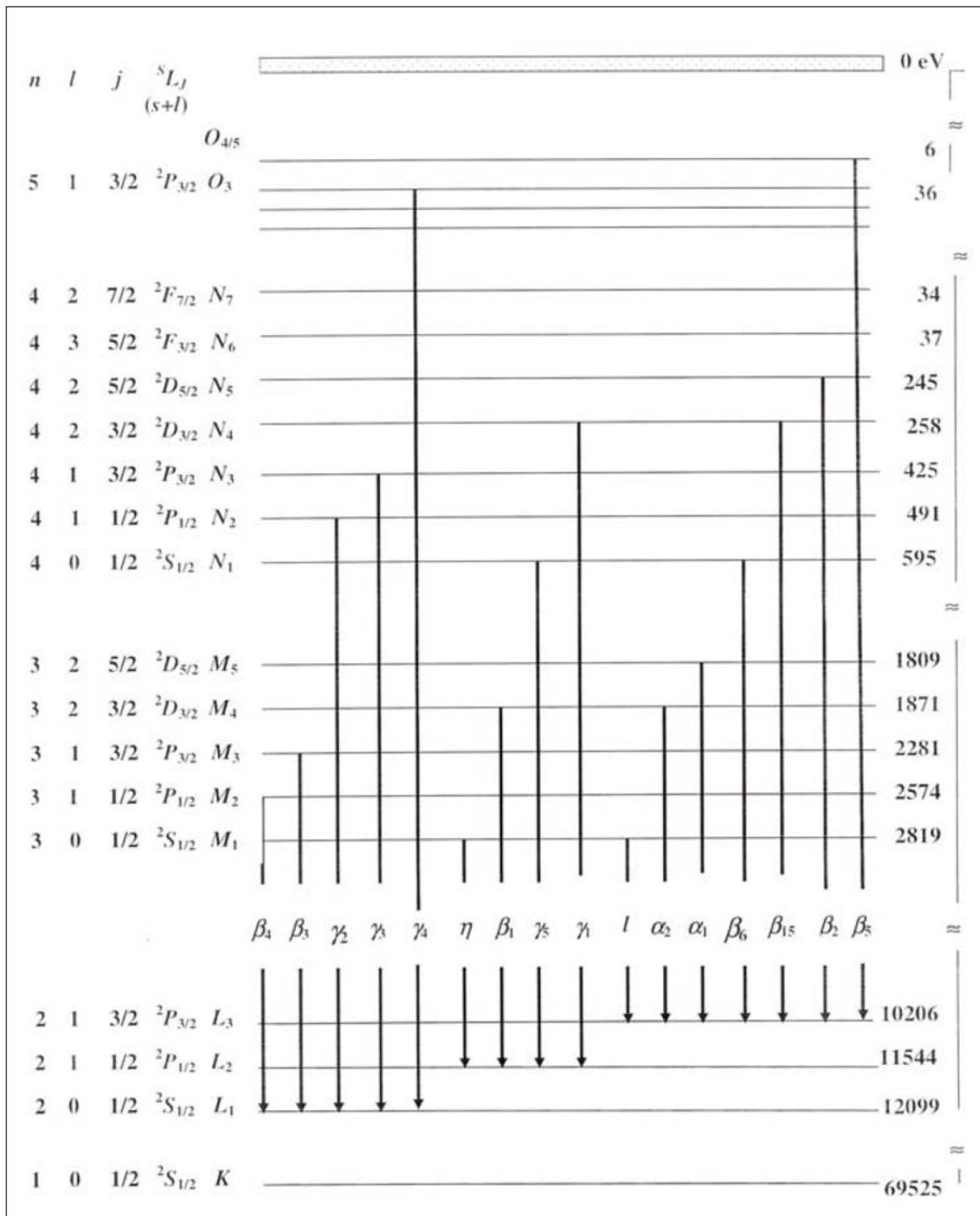


Abb. 14: Energieniveauschema von Wolfram, Quelle: PHYWE.

Planck-Konstante	h	$= 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Lichtgeschwindigkeit	c	$= 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Netzebenenabstand LiF (200)	d	$= 2,014 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
Netzebenenabstand KBr (200)	d	$= 3,290 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
1 eV		$= 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Tabelle 2: Konstanten