



Name: _____

Abiturprüfung 2015

Physik, Leistungskurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe: Oberflächen- und Kristallanalyse mit Materiewellen

Teilaufgabe 1: Debye-Scherrer-Verfahren

Materiewellen wurden 1924 postuliert und kurze Zeit später mit Versuchen wie dem Debye-Scherrer-Verfahren nachgewiesen.

In einer Vakuumröhre treffen Elektronen, die aus einem Glühdraht (Heizspannung U_H) ausgetreten sind und durch die Spannung U_B beschleunigt werden, auf eine dünne, polykristalline Graphitfolie (siehe Abbildung 1). Dahinter werden sie auf einem Leuchtschirm sichtbar gemacht. Typischerweise beobachtet man um einen hellen Mittelpunkt konzentrische, helle Kreise (siehe Abbildung 2).

Bei der hier verwendeten Elektronenbeugungsröhre beträgt der Abstand zwischen der Graphitfolie und dem kreisförmigen Leuchtschirm $\ell = 13,3 \text{ cm}$.

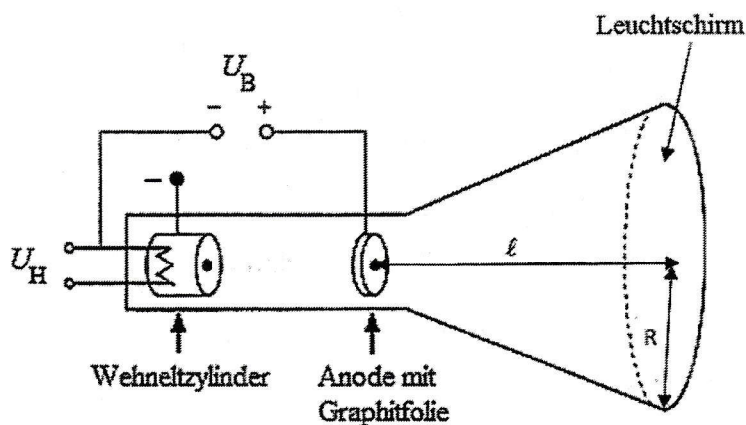


Abbildung 1: Skizze der Vakuumröhre

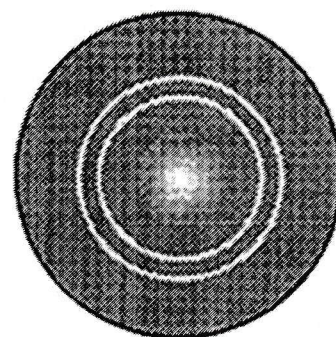


Abbildung 2: Bild auf dem Leuchtschirm



Name: _____

- a) Betrachten Sie zunächst das Auftreffen der Elektronen auf einen Einkristall.

Leiten Sie anhand einer geeigneten Skizze die Bragg-Gleichung her

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\vartheta_m) \quad \text{mit } m = 1; 2; 3; \dots,$$

also den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ der auftreffenden Welle und ihren möglichen Glanzwinkeln ϑ_m bei der Beugung an einem Einkristall mit Netzebenenabstand d .

(6 Punkte)

- b) Beim oben dargestellten Debye-Scherrer-Verfahren trifft der Elektronenstrahl nicht auf einen Einkristall, sondern auf ein Pulver aus Graphitkristallen, eine sogenannte polykristalline Probe (siehe Abbildung 3).

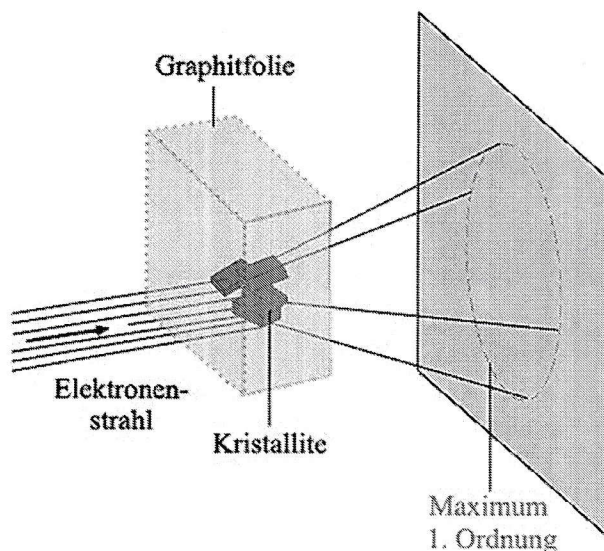


Abbildung 3

(Skizze aus: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche#Elektronenbeugung>)

Erläutern Sie, wie es zur Ausbildung von Ringen am Beobachtungsschirm kommt.

(4 Punkte)



Name: _____

- c) Zwischen der De-Broglie-Wellenlänge λ , dem Netzebenenabstand d in einem Kristallit, dem Radius r eines Interferenzringes und dem Abstand ℓ der Kristallite vom Leuchtschirm besteht unter Verwendung der Kleinwinkelnäherung $2 \cdot \sin(\vartheta) \approx \sin(2 \cdot \vartheta) \approx \tan(2 \cdot \vartheta)$ die folgende Beziehung für die Maxima 1. Ordnung (siehe Abbildung 4):

$$\frac{r}{\ell} = \frac{\lambda}{d}$$

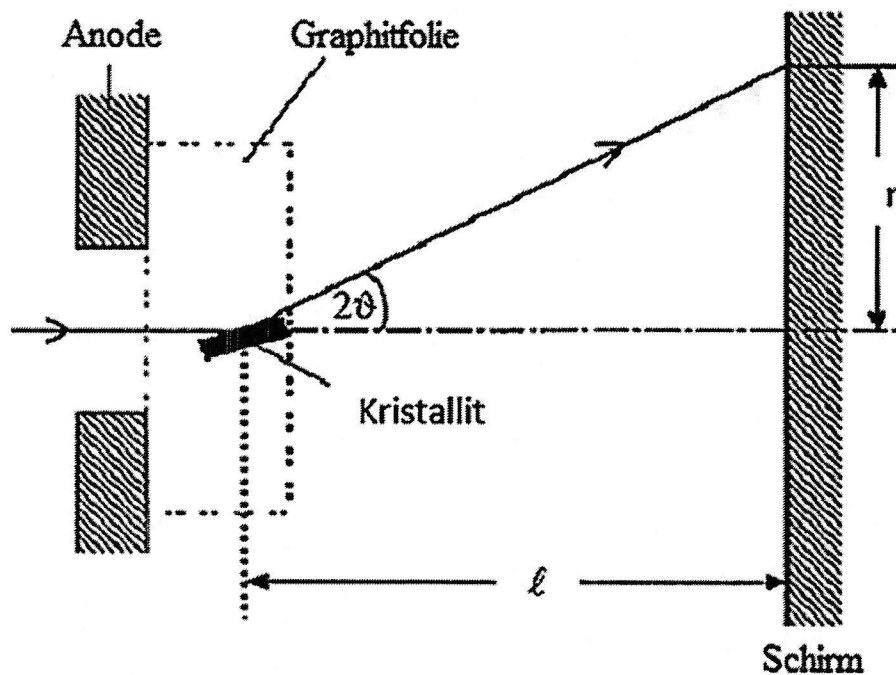


Abbildung 4: Skizze zur Veranschaulichung der Größen

- Begründen Sie diese Beziehung mit Hilfe der Bragg-Gleichung und der Geometrie der Anordnung.

Für den Radius des näherungsweise als eben angenommenen Leuchtschirms gilt $R = 4,7 \text{ cm}$.

- Bestimmen Sie den größten Ablenkswinkel $2 \cdot \vartheta_{\max}$, der mit dieser Elektronenröhre theoretisch noch beobachtet werden kann.

(7 Punkte)



Name: _____

d) Der Graphitkristall hat zwei verschiedene Netzebenenabstände: $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ und $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Bei den beiden Kreisringen im Interferenzbild handelt es sich um die Maxima 1. Ordnung, die durch Reflexion an den Netzebenen im Abstand d_1 bzw. d_2 entstehen.

- Begründen Sie, dass die Beugung an den Netzebenen mit Abstand $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ zur Ausbildung des inneren Interferenzringes führt.
- Zeigen Sie für den Fall kleiner Beschleunigungsspannungen (in nicht-relativistischer Rechnung), dass für den Zusammenhang zwischen der Beschleunigungsspannung U_B und der De-Broglie-Wellenlänge λ gilt:

$$U_B = \frac{h^2}{2 \cdot e \cdot m_e \cdot \lambda^2}$$

- Bestimmen Sie die kleinstmögliche Beschleunigungsspannung U_B , ab der erstmalig ein Interferenzkreis auf dem Leuchtschirm zu erwarten ist.

(17 Punkte)

e) Für unterschiedliche Beschleunigungsspannungen werden unterschiedliche Radien der Beugungsringe gemessen.

- Zeigen Sie allgemein, dass zwischen der Beschleunigungsspannung U_B und dem Radius r folgender Zusammenhang besteht:

$$r \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}}$$

Die folgende Tabelle gibt die Messwerte für den innersten Beugungsring mit Radius r_1 an:

U_B in kV	3,0	3,5	4,0	4,5
r_1 in mm	14,5	13,0	12,0	11,5

Tabelle: Radius des Beugungsringes in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung

- Überprüfen Sie, ob die Messwerte in der Tabelle diese Proportionalität recht gut wiedergeben.

(7 Punkte)



Name: _____

- f) *Geben Sie eine experimentelle Möglichkeit an, um nachzuweisen, dass das Beugungsbild tatsächlich durch Elektronen und nicht von Röntgenstrahlung, die beim Auftreffen der Elektronen auf das Pulver entstanden sein könnte, erzeugt wurde.*

(3 Punkte)

Teilaufgabe 2: LEED-Verfahren

Beim LEED-Verfahren (Low Energy Electron Diffraction) werden Elektronen mit Beschleunigungsspannungen U_B von 50 V bis 200 V beschleunigt und senkrecht zur Oberfläche auf die Probe geschossen (siehe Abbildung 5). Man kann näherungsweise davon ausgehen, dass die Elektronen nicht in den Kristall eindringen und nur von den einzelnen Oberflächenatomen der kristallinen Probe und nicht von den Netzebenen des Einkristalls reflektiert werden. Die reflektierten Elektronen erzeugen auf dem Leuchtschirm ein Bild scharf begrenzter Flecken, das Schirmbild wird anschließend ausgewertet. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel eines solchen Schirmbildes.

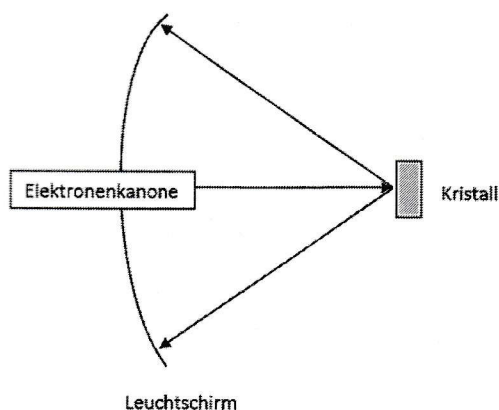


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer LEED-Apparatur.

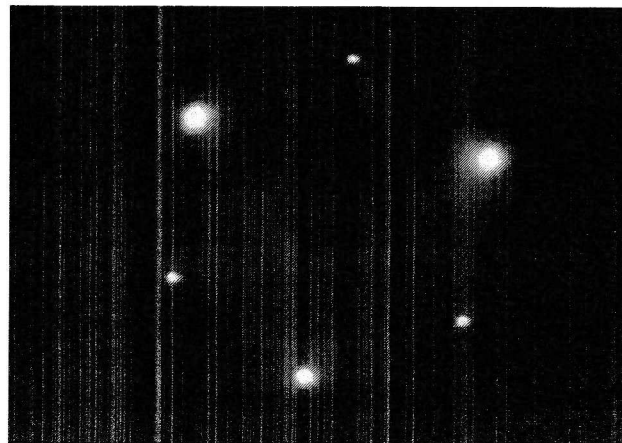


Abbildung 6: Schirmbild einer Kristalloberfläche
(Bild aus: http://www.uni-leipzig.de/~xray/download/study/netzoa4_5_ped_leed_sims_f1_19.pdf)

- a) *Erläutern Sie, warum das Schirmbild nicht mit der Teilchenvorstellung von Elektronen erklärbar ist.*

(3 Punkte)



Name: _____

- b) Die Atome der Kristalloberfläche bilden ein Gitter. Wenn man nur eine Reihe der Atome betrachtet, erhält man ein eindimensionales Gitter.

In einem Gedankenexperiment soll ein solches eindimensionales Gitter mit dem Atomabstand b mit Elektronen beschossen werden (siehe Abbildung 7).

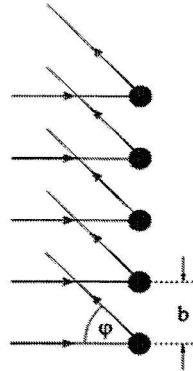


Abbildung 7: Bild eines eindimensionalen Atomgitters

(Skizze aus: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/aufgaben#lightbox=/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/lb/reflexionsgitter-fuer-elektronen>)

Begründen Sie, dass helle Schirmpunkte nur unter den Winkeln φ_n zur Einfallsrichtung auftreten, für die gilt:

$$\sin(\varphi_n) = \frac{n \cdot \lambda}{b} \quad \text{mit } n = 1; 2; 3; \dots$$

(5 Punkte)

- c) In dem Gedankenexperiment bilden die hellen Punkte auf dem Leuchtschirm ebenfalls ein eindimensionales Gitter. Nehmen Sie im Folgenden näherungsweise an, dass die Schirmpunkte unter einem kleinen Winkel φ (Kleinwinkelnäherung) erscheinen und es sich um einen ebenen Schirm handelt, der sich im Abstand L von dem eindimensionalen Atomgitter befindet.

Bestimmen Sie eine Gleichung, die den Zusammenhang zwischen der Gitterkonstanten b des eindimensionalen Atomgitters und der Gitterkonstanten k des Gitters auf dem Schirm beschreibt.

(6 Punkte)



Name: _____

- d) Zur Bestimmung der Gitterkonstanten eines Nickelkristalls werden Elektronen der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = 200 \text{ eV}$ verwendet. Das Maximum 1. Ordnung wird unter einem Winkel von $\varphi_1 = 25^\circ$ beobachtet.

Bestimmen Sie die Gitterkonstante des Nickelkristalls.

(6 Punkte)

Zugelassene Hilfsmittel:

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung