



Name: \_\_\_\_\_

# Abiturprüfung 2011

## Physik, Grundkurs

### Aufgabenstellung:

#### Aufgabe 1: Untersuchungen an der Perrin-Röhre

Unter einer „Perrin-Röhre“ versteht man eine evakuierte, meist kugelförmige Elektronenstrahlröhre, an deren Innenraum sich an einer bestimmten Stelle ein Metallbecher mit elektrischem Kontakt nach außen zum Nachweis des Elektronenstrahls anschließt. Der beschleunigte Elektronenstrahl tritt so in das Kugelvolumen ein, dass er unabgelenkt zunächst nicht den Metallbecher trifft (vgl. Abbildungen 1 und 2).



Abbildung 1: Die Perrin-Röhre

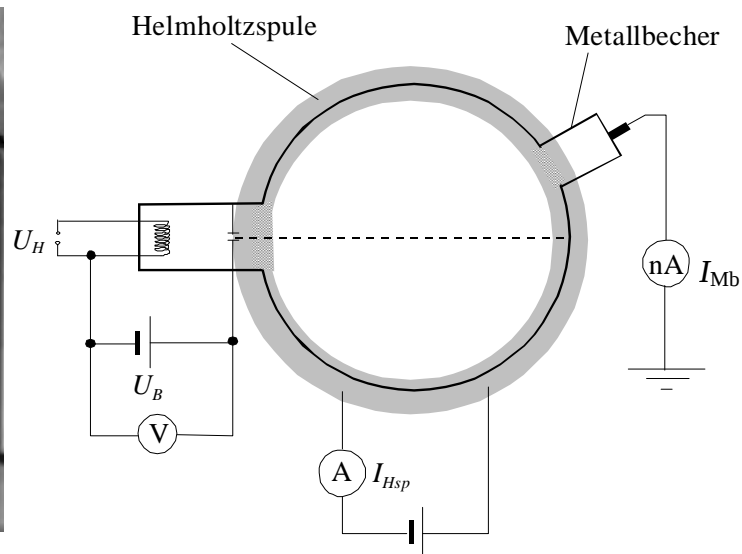


Abbildung 2: Messgrößen an der Perrin-Röhre

Ein anliegendes Helmholtzspulenpaar erzeugt im Kugelvolumen ein homogenes Magnetfeld senkrecht zum eintretenden Elektronenstrahl. Das Magnetfeld lenkt den Elektronenstrahl in der Perrinröhre je nach experimentellen Randbedingungen mehr oder weniger stark ab. Bei konstanter Beschleunigungsspannung  $U_B = 2,5 \text{ kV}$  wurde bei zwei unterschiedlichen Werten von  $U_H$  der über den Metallbecher fließende elektrische Strom  $I_{Mb}$  als Funktion der Stromstärke in den Helmholtzspulen  $I_{Hsp}$  gemessen:



Name: \_\_\_\_\_

**Bei  $U_H = 6 \text{ V}$ :**

$I_{Hsp}$ (in A)	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48	0,50
$I_{Mb}$ (in nA)	0,4	1,2	2,0	2,9	3,5	2,7	2,0	1,1	0,4

**Bei  $U_H = 5 \text{ V}$ :**

$I_{Hsp}$ (in A)	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48	0,50
$I_{Mb}$ (in nA)	0,2	0,7	1,1	1,8	2,4	1,6	1,0	0,5	0,1

- 1.1 a) Tragen Sie für beide an der Perrin-Röhre aufgenommene Messreihen den Strom im Metallbecher  $I_{Mb}$  in Abhängigkeit vom Helmholtzspulenstrom  $I_{Hsp}$  in einem Diagramm auf.
- b) Beschreiben Sie, worin sich die Ergebnisse beider Messreihen unterscheiden und welche Eigenschaft beiden gemeinsam ist.
- c) Erläutern Sie das Zustandekommen dieser Messreihen und erklären Sie den Unterschied beider Messreihen. (16 Punkte)
- 1.2 Der Elektronenstrahl wird nach Eintritt in die Perrin-Röhre durch das homogene Magnetfeld der Helmholtzspulen aus dem geradlinigen Verlauf in die obere Hälfte der Elektronenröhre abgelenkt.
- a) Bestimmen Sie daraus die Orientierung des wirkenden Magnetfelds relativ zur Blickrichtung für den Aufbau in Abbildung 2 und begründen Sie dies physikalisch.
- b) Skizzieren Sie den Verlauf des Elektronenstrahls im homogenen Magnetfeld.
- c) Benennen Sie die geometrische Form der Bahnkurve des Elektronenstrahls und begründen Sie qualitativ das Zustandekommen dieser Form der Bahnkurve. (12 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

- 1.3 a) Zeigen Sie, dass sich die Elektronengeschwindigkeit nach Eintritt in die Perrin-Röhre mit der Formel

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m_e}}$$

bestimmen lässt. Erläutern Sie Ihr Vorgehen.

- b) Leiten Sie unter Verwendung von 1.3 a) den folgenden Zusammenhang für die spezifische Ladung des Elektrons aus der weiteren Bewegung des Elektronenstrahls in der Perrin-Röhre her:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2 \cdot U_B}{B^2 \cdot r^2}$$

Kommentieren Sie Ihre Herleitung.

(12 Punkte)

- 1.4 Die Magnetfeldstärke  $B$  des Helmholtzspulenfeldes im Bereich der Elektronenröhre ergibt sich beim verwendeten Aufbau aus dem Spulenstrom anhand der Formel:

$$B_{\text{Hsp}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot I_{\text{Hsp}}$$

Trifft der Elektronenstrahl genau den Metallbecher der Perrin-Röhre, beträgt  $r = 12,5 \text{ cm}$ .

Ermitteln Sie aus den obigen Messreihen sowie den weiteren experimentellen Randbedingungen einen Wert für die spezifische Ladung des Elektrons.

(Zwischenergebnis:  $B_{\text{Hsp}} = 1,4 \text{ mT}$ )

(10 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

## Aufgabe 2: Interferenz von Licht am Gitter

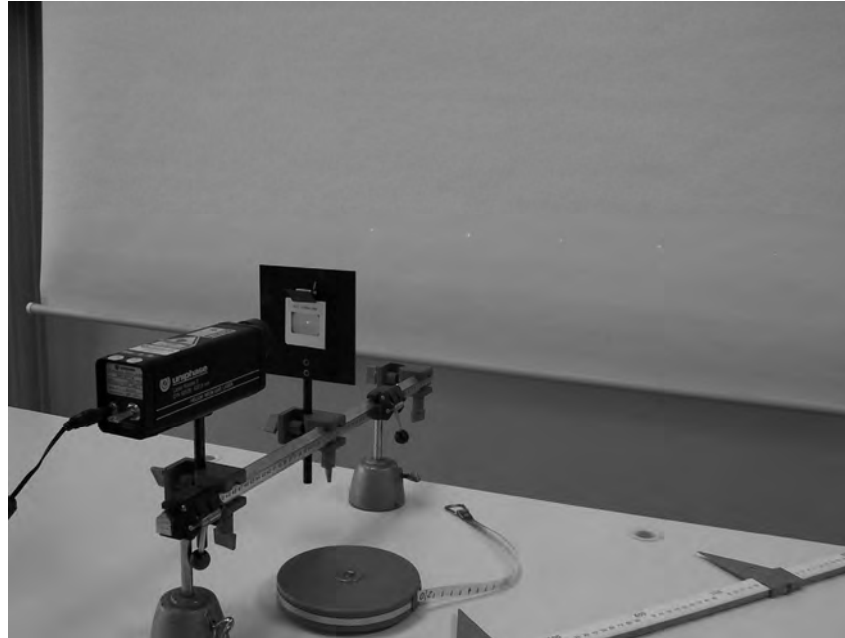


Abbildung 1

Auf ein optisches Gitter mit der Gitterkonstanten  $g$  fällt ein achsenparalleles Lichtbündel der unbekanntes Wellenlänge  $\lambda$ . Man beobachtet Helligkeitsmaxima auf einem Schirm im Abstand  $a$  hinter dem Gitter. Der Abstand des  $k$ -ten Helligkeitsmaximums („ $k$ -ter Ordnung“) auf dem Schirm von der optischen Achse wird mit  $x_k$  bezeichnet.

2.1 Zunächst wird angenommen, dass der Abstand  $x_k$  sehr klein gegenüber dem Abstand  $a$  zwischen Gitter und Schirm ist ( $x_k \ll a$ ).

- Erläutern Sie mit Hilfe des Huygens'schen Prinzips das Zustandekommen der Helligkeitsmaxima.
- Leiten Sie für die Wellenlänge  $\lambda$  des einfallenden Lichts mit Hilfe einer oder mehrerer geeigneter Skizzen die Bestimmungsgleichung  $\lambda = \frac{x_k \cdot g}{k \cdot a}$  her.

**Hinweis:** Wegen  $x_k \ll a$  gilt die Näherung  $\tan \alpha \approx \sin \alpha$ . (12 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

2.2 Das verwendete Gitter hat die Gitterkonstante  $g = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . Es wird von weißem Licht einer Glühlampe ( $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ ) beleuchtet. Dabei entstehen auf dem Schirm im Abstand  $a = 3,50 \text{ m}$  hinter dem Gitter mehrere Spektren, die sich teilweise überlagern.

- Begründen Sie mit Hilfe von 2.1 b), dass die Annahme  $x_k \ll a$  bis zur 2. Ordnung gerechtfertigt ist.
- Berechnen Sie die Breite  $\Delta x$  des Spektrums 1. Ordnung auf dem Schirm.
- Ermitteln Sie, bis zu welcher Wellenlänge  $\lambda_{\text{max}}$  das Spektrum 2. Ordnung noch nicht vom Spektrum 3. Ordnung überlagert wird. (14 Punkte)

2.3 Wenn man den Raum zwischen Gitter und Schirm mit Wasser füllt, so ergibt sich eine neue Lage für die Helligkeitsmaxima.

- Begründen Sie mit Hilfe der Photonenvorstellung, warum sich beim Übergang des Lichts von Luft nach Wasser seine Frequenz  $f$  nicht ändert.
- Im Wasser ist die Lichtgeschwindigkeit geringer als in Luft.

Begründen Sie, dass sich bei konstanter Frequenz  $f$  die Wellenlängen wie die Ausbreitungsgeschwindigkeiten verhalten:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_w} = \frac{c_0}{c_w}.$$

( $\lambda_0, c_0$  in Luft bzw.  $\lambda_w, c_w$  in Wasser)

- Berechnen Sie die Breite  $\Delta x'$  des Spektrums 1. Ordnung in Teilaufgabe 2.2 b), wenn man den Raum zwischen Gitter und Schirm mit Wasser füllt  $\left( \frac{c_0}{c_w} = 1,33 \right)$ .

(12 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

2.4 In dieser Teilaufgabe soll mit Hilfe eines Gitters die Wellenlänge  $\lambda$  eines Helium-Neon-Lasers ermittelt werden. Dazu steht ein sogenanntes *Rowland-Gitter* mit 600 Strichen pro Millimeter zur Verfügung. Mit einem solchen Gitter stellt man die Maxima der Intensität auf dem Schirm unter so großen Winkeln  $\alpha_k$  fest, dass die Näherung aus Teilaufgabe 2.1 nicht mehr gilt.

- a) Bestimmen Sie die Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers für  $a = 3,50\text{ m}$  und  $x_1 = 1,44\text{ m}$ .
- b) Prüfen Sie, ob hinter dem Gitter unendlich viele Maxima zu finden sind.
- c) Prüfen Sie, ob es ein Gitter gibt, bei dem gar keine Maxima höherer Ordnung ( $k \geq 1$ ) zu sehen sind. (12 Punkte)

**Zugelassene Hilfsmittel:**

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

## Unterlagen für die Lehrkraft

# Abiturprüfung 2011

## Physik, Grundkurs

---

### 1. Aufgabenart

- Bearbeitung eines Demonstrationsexperiments
- Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

Aufgabe 1: Untersuchungen an der Perrin-Röhre	(50 Punkte)
Aufgabe 2: Interferenz von Licht am Gitter	(50 Punkte)

### 3. Materialgrundlage

#### Versuchsmaterial und -aufbau

#### **Hinweise zum Experiment in Aufgabe 2**

##### **Erforderliche Geräte:**

- Helium-Neon-Laser der Wellenlänge  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (z. B. von PHYWE, Best.-Nr. 08760.99 bzw. 08701.00, oder vergleichbare Geräte) mit entsprechender Stromquelle
- Optisches Gitter, möglichst ein „Rowland-Gitter“ mit 600 Strichen/mm (z. B. von PHYWE, Best.-Nr. 08546.00, oder vergleichbare Gitter); sollte kein „Rowland-Gitter“ zur Verfügung stehen, so wird ein gewöhnliches Strichgitter mit einer möglichst kleinen Gitterkonstanten verwendet.
- Optische Bank
- Leinwand bzw. Schirm von geeigneter Größe in hinreichend großer Entfernung

##### **Versuchsaufbau:**

Der Aufbau erfolgt gemäß der Abbildung 1 in der Aufgabenstellung für die Prüflinge. Da der Versuch nur qualitativ durchgeführt wird, kann auch ein anderes optisches Strichgitter als ein „Rowland-Gitter“ verwendet werden.

---

<sup>1</sup> Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

**Versuchsdurchführung:**

Vorgeführt wird nur der Versuch gemäß Teilaufgabe 2.4, bei dem es um die Wellenlängenbestimmung des monochromatischen Laserlichts geht (siehe Abbildung 1 in der Aufgabenstellung für die Prüflinge). Es ist **nicht** vorgesehen, das Farbspektrum einer Glühlampe aus Teilaufgabe 2.2 zu erzeugen. Ferner soll auch **nicht** gemäß Teilaufgabe 2.3 der Raum zwischen Gitter und Schirm mit Wasser gefüllt werden.

Das Demonstrationsexperiment wird zu Beginn der Klausur gezeigt. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten dann die Aufgabe mit dem mitgelieferten Datenmaterial.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Gitterkonstante nicht in der Form des „Strichabstandes“, sondern in der Form „Anzahl der Striche je mm Gitterbreite“ gegeben ist.

Es ist darauf zu achten, dass auf dem Schirm mindestens das Hauptmaximum („0-ter Ordnung“) sowie beiderseits davon mindestens zwei weitere Maxima zu erkennen sind. Gemessen wird in diesem Versuch allerdings **nichts**.

**4. Bezüge zu den Vorgaben 2011***1. Inhaltliche Schwerpunkte*

## Aufgabe 1:

- Ladungen und Felder
  - Lorentzkraft
  - Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern

## Aufgabe 2:

- Elektromagnetische Schwingungen und Wellen einschließlich Resonanz
  - Interferenz (Lichtbeugung am Gitter, Wellenlängenmessung)
- Atom- und Kernphysik
  - Linienspektren in Absorption und Emission und Energiequantelung des Atoms, Atommodelle (Beobachtung von Spektrallinien am Gitter)

*2. Medien/Materialien*

- entfällt

**5. Zugelassene Hilfsmittel**

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



## 6. Vorgaben für die Bewertung der Schülerleistungen

### 6.1 Modellösungen

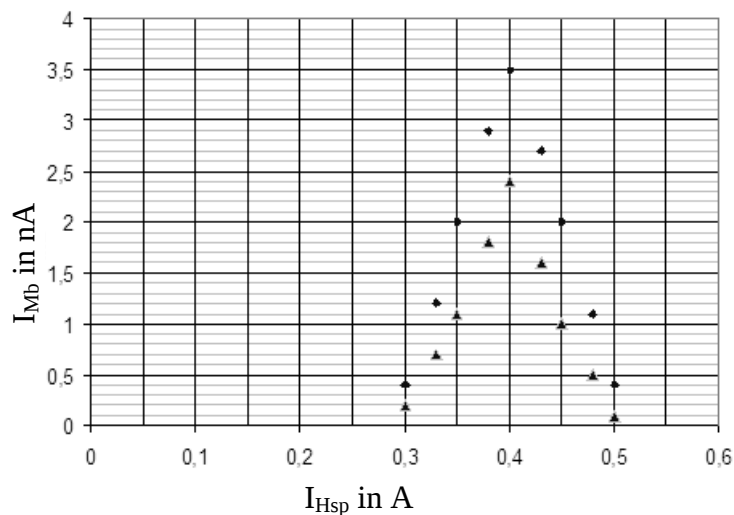
#### Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Die nachfolgenden Modellösungen erfassen nicht notwendigerweise alle sachlich richtigen Lösungsalternativen.

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

#### Modellösungen Aufgabe 1: Untersuchungen an der Perrin-Röhre

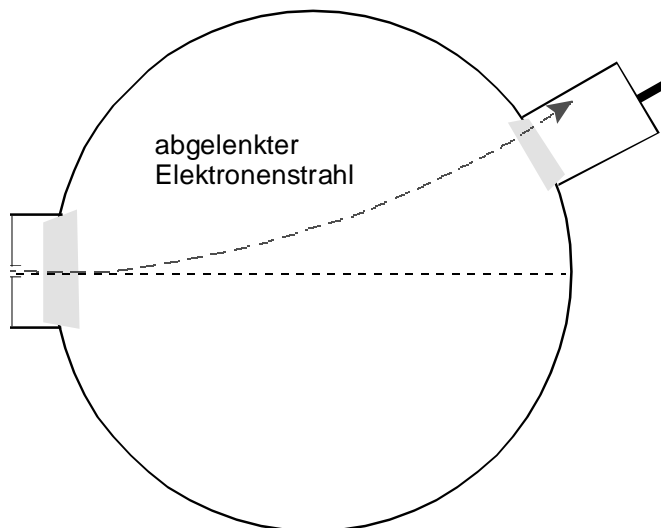
1.1 a) Das Auftragen der Messwerte ergibt:



1.1 b) Gemeinsamkeit: Die beiden Kurven besitzen für denselben Wert des Spulenstroms ihr Maximum.

Unterschied: Die bei geringerer Heizspannung aufgenommenen Werte zeigen, dass auch der Elektronenstrahl einen geringeren elektrischen Strom verursacht.

- 1.1 c) Diese Abhängigkeit des gemessenen Stroms im Metallbecher von der Stromstärke in der Helmholtzspule kommt dadurch zustande, dass der Elektronenstrahl in der Perrin-Röhre durch das Magnetfeld der Helmholtzspulen abgelenkt wird und bei einem bestimmten Strom durch die Spulen gerade in den Metallbecher trifft. Bei weiterer Erhöhung des Spulenstroms trifft der Elektronenstrahl nicht mehr auf den Metallbecher und der gemessene Strom dort geht wieder auf 0 zurück. Bei geringerer Heizspannung wird die Glühkathode der Elektronenröhre weniger heiß und somit treten aufgrund des glühelektrischen Effektes weniger Elektronen dort aus. Die Intensität des Elektronenstrahls ist dann geringer.
- 1.2 a) Nach der Linke-Hand-Regel für die Richtung der Lorentzkraft ergibt sich, dass die magnetische Feldstärke für die in Abbildung 2 dargestellte Situation aus der Papierebene heraus (entgegen der Blickrichtung) orientiert sein muss, damit der Elektronenstrahl in den Metallbecher abgelenkt wird.
- 1.2 b) Skizze des abgelenkten Elektronenstrahls im homogenen Magnetfeld:



- 1.2 c) Es handelt sich bei der Form der Bahnkurve im homogenen Magnetfeld um den Teil eines Kreisbogens. Die Lorentzkraft wirkt in jedem Moment senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen, lenkt sie ab, verändert aber nicht den Betrag der Geschwindigkeit. Im homogenen Bereich des Magnetfeldes wirkt sie damit als betragsmäßig konstante Zentripetalkraft und der Elektronenstrahl wird auf eine Kreisbahn abgelenkt mit der Lorentzkraft als Zentripetalkraft.

- 1.3 a) Die an der Glühkathode austretenden Elektronen werden durch das elektrische Feld der anliegenden Spannung  $U_B$  beschleunigt. Der Zuwachs an kinetischer Energie der Elektronen ergibt sich aus der aufgenommenen elektrischen Energie im Feld. Bei Vernachlässigung der Anfangsenergie gilt:

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{elekt.}} \rightarrow \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = e \cdot U_B \text{ (Energieansatz).}$$

Daraus ergibt sich durch Umstellen nach  $v$ :  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m_e}}$ .

- 1.3 b) Die Elektronen treten mit der in 1.3 a) angegebenen Geschwindigkeit ins homogene Magnetfeld ein. Hier wirkt die maximale Lorentzkraft (die Elektronen treten senkrecht zum Magnetfeld ein) als Zentripetalkraft.

Es gilt hierbei der Kraftansatz:  $F_{\text{Lorentz}} = F_Z \rightarrow e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$ . Der Parameter  $r$

in dieser Formel entspricht dabei dem Radius der Kreisbahn in der Perrin-Röhre.

$$\rightarrow e \cdot B = \frac{m_e \cdot v}{r} \rightarrow e \cdot B = \frac{m_e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}}{r}$$

$$\rightarrow \left( \frac{e}{m_e} \cdot B \cdot r \right)^2 = 2 \cdot U \cdot \frac{e}{m_e} \rightarrow \frac{e}{m_e} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2}$$

- 1.4 Gegeben:  $U_B = 2500 \text{ V}$ ,  $I_{\text{Hsp}} = 0,400 \text{ A}$ . Bei dieser Spulenstromstärke wird der Elektronenstrahl genau in den Metallbecher abgelenkt – der Strom über den Metallbecher ist maximal.

Dies entspricht dem Magnetfeld:  $B_{\text{Hsp}} = 3,40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot 0,40 \text{ A} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ .

In diesem Fall beträgt der Bahnradius des Elektronenstrahls  $r = 12,5 \text{ cm} = 0,125 \text{ m}$ .

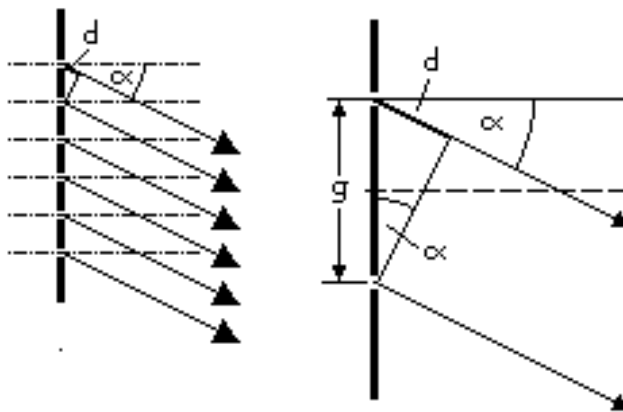
Daraus ergibt sich dann:  $\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 2500 \text{ V}}{(1,4 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 0,125 \text{ m})^2} \approx 1,6 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$ .

**Modelllösungen Aufgabe 2: Interferenz von Licht am Gitter**

- 2.1 a) Nach dem Huygens'schen Prinzip entsteht in jeder Gitteröffnung eine Elementarwelle. Diese überlagern sich im Raum hinter dem Spalt, insbesondere auch in jedem Punkt auf dem Schirm. Dabei kommt es im jeweiligen Schirmpunkt zu einem Helligkeitsmaximum, wenn sich die Elementarwellen dort verstärken. Dies ist der Fall, wenn der Gangunterschied  $d$  benachbarter Elementarwellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  ist:

$$d = k \cdot \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

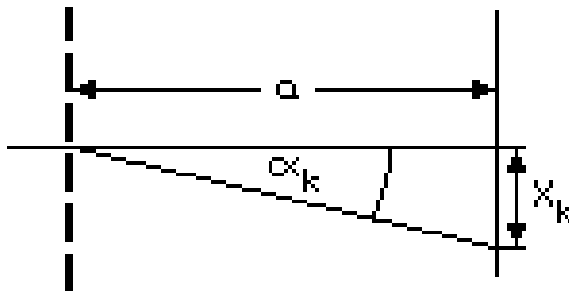
- 2.1 b)



Anhand der Skizze erkennt man, dass  $\sin \alpha = \frac{d}{g}$  gilt. Nach 2.1 a) erhält man nur

für diskrete Werte  $\alpha_k$  ein Helligkeitsmaximum:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$



Anhand dieser Skizze erkennt man, dass  $\tan \alpha_k = \frac{x_k}{a}$  gilt. Mit der gegebenen

Näherung erhält man die gesuchte Gleichung.

**Anmerkung für die korrigierende Lehrkraft:**

Die Schülerlösung sollte beide Skizzen beinhalten. Es ist möglich, diese beiden Skizzen zusammenzufassen, so dass alle relevanten Größen mit einer einzigen Skizze erläutert werden.

- 2.2 a) Auflösen der Bestimmungsgleichung in 2.1 b) liefert die Schirmorte  $x_k = \frac{k \cdot \lambda}{g} \cdot a$ .
- Einsetzen von  $k = 2$  und  $\lambda = 800 \text{ nm}$  (rotes Licht) liefert  $x_2 = 0,04 \cdot a$ .
- Damit lässt sich die Annahme rechtfertigen.
- 2.2 b) Durch Bestimmung der Schirmorte für rotes bzw. violetteres Licht und  $k = 1$  erhält man eine Breite des Spektrums 1. Ordnung von  $\Delta x = 3,5 \text{ cm}$ .
- 2.2 c) Zunächst bestimmt man die Lage des Schirmortes, an dem das Spektrum 3. Ordnung mit  $\lambda = 400 \text{ nm}$  (violetteres Licht) beginnt. Danach wird dieser Schirmort mit dem des Spektrums 2. Ordnung gleichgesetzt, woraus sich die gesuchte Wellenlänge  $\lambda_{\text{max}} = 600 \text{ nm}$  ergibt.
- 2.3 a) Die Frequenz  $f$  des Lichts ist durch die Photonenenergie  $E = h \cdot f$  festgelegt, die durch die Lichtemission im Atom beim Übergang von einem höheren zu einem niedrigeren Energieniveau frei wird. Somit ist die Frequenz  $f$  unabhängig vom Medium, in dem sich das Licht ausbreitet.
- 2.3 b) Für die Lichtgeschwindigkeit in Luft gilt  $c_0 = \lambda_0 \cdot f$  bzw. in Wasser  $c_w = \lambda_w \cdot f$  aufgrund der Konstanz der Frequenz  $f$ . Bildet man aus beiden Gleichungen den Quotienten, so erhält man die gegebene Gleichung.
- 2.3 c) Die Verringerung der Wellenlängen um den Faktor 1,33 führt dazu, dass die neuen Schirmorte und somit auch die neue Breite um den Faktor 1,33 verringert werden:  $\Delta x' = 2,63 \text{ cm}$ .

- 2.4 a) Da bei der Verwendung von „Rowland-Gittern“ die Maxima der Intensität unter so großen Winkeln auftreten, dass die Näherung aus Teilaufgabe 2.1 nicht mehr gilt, muss man hier mit den trigonometrischen Funktionen operieren.

Für den Winkel  $\alpha_k$ , der zum  $k$ -ten Intensitätsmaximum gehört, gilt die Beziehung

$$\tan\alpha_k = \frac{x_k}{a}.$$

Mit den gegebenen Werten erhält man  $\alpha_k = 22,36^\circ$ . Für die Wellenlänge gilt

$$\lambda = \frac{g}{k} \cdot \sin\alpha_k.$$

Nach Einsetzen des Winkels erhält man für  $k = 1$  die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts  $\lambda = 634 \text{ nm}$ .

**Anmerkung für die korrigierende Lehrkraft:**

Sollte der Hinweis in der Aufgabenstellung missachtet und stattdessen die Bestimmungsgleichung in 2.1 b) verwendet werden, gilt die Aufgabe als nicht gelöst.

- 2.4 b) Die Zahl der Maxima wird durch die Bedingung  $\sin\alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g} \leq 1$  begrenzt und ist damit nicht unendlich groß.

- 2.4 c) Für den Fall  $\sin\alpha_1 = \frac{\lambda}{g} > 1$  gibt es kein Maximum höherer Ordnung.

## 6.2 Teilleistungen – Kriterien

### Aufgabe 1: Untersuchungen an der Perrin-Röhre

#### Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	stellt die beiden Messreihen in einem Diagramm zusammen dar.	4
b)	beschreibt den Unterschied beider Messreihen (verschiedenes $I_{Mb}$ bei gleicher Spulenstromstärke $I_{Hsp}$ ) und ihre Gemeinsamkeit (maximales $I_{Mb}$ bei gleicher Spulenstromstärke $I_{Hsp}$ ).	4
c1)	erläutert das Zustandekommen dieser Messreihen durch die zunehmende magnetische Ablenkung des Elektronenstrahls, bis er in den Metallbecher trifft.	4
c2)	erklärt die unterschiedlichen Werte von $I_{Mb}$ bei verschiedenen Heizspannungen durch den unterschiedlich starken glühelektrischen Effekt in der Glühkathode.	4

**Teilaufgabe 1.2**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	gibt an, dass das Magnetfeld der Helmholtzspulen aus der Papierebene – entgegen der Blickrichtung – orientiert sein muss, um den Elektronenstrahl in Richtung Becher abzulenken.	2
a2)	begründet dies mit der Linke-Hand-Regel (bzw. Rechte-Hand-Regel) für die Lorentzkraft.	3
b)	skizziert qualitativ den Verlauf des Elektronenstrahls in der Perrin-Röhre.	2
c1)	benennt die Bahnkurve als Teil einer Kreisbahn.	2
c2)	begründet das Zustandekommen der Kreisbahn durch die Wirkung der Lorentzkraft in einem homogenen Magnetfeld.	3

**Teilaufgabe 1.3**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	leitet die Formel für die Geschwindigkeit der Elektronen aus dem Energieerhaltungssatz her und erläutert sein Vorgehen.	4
b1)	verwendet den Kraftansatz $F_Z = F_{\text{Lorentz}}$ für die Elektronen im homogenen Magnetfeld.	2
b2)	leitet den Zusammenhang für die spezifische Ladung des Elektrons her und kommentiert sein Vorgehen.	6

**Teilaufgabe 1.4**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
1	entnimmt den Messreihen die korrekte Spulenstromstärke $I_{\text{Hsp}}$ , für die der Metallbecherstrom $I_{\text{Mb}}$ maximal ist, und berechnet damit das Magnetfeld der Helmholtzspulen in diesem Fall.	4
2	bestimmt einen Messwert für die spezifische Ladung des Elektrons aus den angegebenen Werten.	6

**Aufgabe 2: Interferenz von Licht am Gitter****Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	erläutert mit Hilfe des Huygens'schen Prinzips das Zustandekommen der Helligkeitsmaxima.	5
b)	leitet mit Hilfe einer oder mehrerer geeigneter Skizzen die Bestimmungsgleichung für die Wellenlänge $\lambda$ her.	7

**Teilaufgabe 2.2**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet mit Hilfe von 2.1 b), dass die Annahme $x_k \ll a$ bis zur 2. Ordnung gerechtfertigt ist.	4
b)	berechnet die Breite $\Delta x$ des Spektrums 1. Ordnung auf dem Schirm.	4
c)	ermittelt, bis zu welcher Wellenlänge $\lambda_{\max}$ das Spektrum 2. Ordnung noch nicht vom Spektrum 3. Ordnung überlagert wird.	6

**Teilaufgabe 2.3**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet mit Hilfe der Photonenvorstellung, warum sich beim Übergang des Lichts von Luft nach Wasser seine Frequenz $f$ nicht ändert.	4
b)	begründet, dass sich bei konstanter Frequenz $f$ die Wellenlängen wie die Ausbreitungsgeschwindigkeiten verhalten.	4
c)	berechnet die Breite $\Delta x'$ des Spektrums 1. Ordnung in Teilaufgabe 2.2 b), wenn man den Raum zwischen Gitter und Schirm mit Wasser füllt.	4

**Teilaufgabe 2.4**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	bestimmt die Wellenlänge $\lambda$ des Lasers mit den gegebenen Werten.	6
b)	prüft, ob hinter dem Gitter unendlich viele Maxima zu finden sind.	4
c)	prüft, ob es ein Gitter gibt, bei dem gar keine Maxima höherer Ordnung zu sehen sind.	2



## 7. Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

### Aufgabe 1: Untersuchungen an der Perrin-Röhre

#### Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	stellt die beiden ...	4			
b)	beschreibt den Unterschied ...	4			
c1)	erläutert das Zustandekommen ...	4			
c2)	erklärt die unterschiedlichen ...	4			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.1</b>	<b>16</b>			

#### Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	gibt an, dass ...	2			
a2)	begründet dies mit ...	3			
b)	skizziert qualitativ den ...	2			
c1)	benennt die Bahnkurve ...	2			
c2)	begründet das Zustandekommen ...	3			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.2</b>	<b>12</b>			

#### Teilaufgabe 1.3

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	leitet die Formel ...	4			
b1)	verwendet den Kraftansatz ...	2			
b2)	leitet den Zusammenhang ...	6			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.3</b>	<b>12</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Teilaufgabe 1.4**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
1	entnimmt den Messreihen ...	4			
2	bestimmt einen Messwert ...	6			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.4</b>	<b>10</b>			
	<b>Summe Teilaufgaben 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4</b>	<b>50</b>			

**Aufgabe 2: Interferenz von Licht am Gitter****Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	erläutert mit Hilfe ...	5			
b)	leitet mit Hilfe ...	7			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.1</b>	<b>12</b>			

**Teilaufgabe 2.2**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	begründet mit Hilfe ...	4			
b)	berechnet die Breite ...	4			
c)	ermittelt, bis zu ...	6			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.2</b>	<b>14</b>			

**Teilaufgabe 2.3**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	begründet mit Hilfe ...	4			
b)	begründet, dass sich ...	4			
c)	berechnet die Breite ...	4			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.3</b>	<b>12</b>			

**Teilaufgabe 2.4**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	bestimmt die Wellenlänge ...	6			
b)	prüft, ob hinter ...	4			
c)	prüft, ob es ...	2			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.4</b>	<b>12</b>			
	<b>Summe Teilaufgaben 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4</b>	<b>50</b>			
	<b>Summe der 1. und 2. Aufgabe</b>	<b>100</b>			

	<b>Summe insgesamt</b>	<b>100</b>			
	<b>aus der Punktsomme resultierende Note</b>				
	<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
	<b>Paraphe</b>				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsommen aus EK und ZK: \_\_\_\_\_

ggf. arithmetisches Mittel der Notenurteile aus EK und ZK: \_\_\_\_\_

Die Klausur wird abschließend mit der Note: \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

**Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)**

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

<b>Note</b>	<b>Punkte</b>	<b>Erreichte Punktzahl</b>
sehr gut plus	15	100 – 95
sehr gut	14	94 – 90
sehr gut minus	13	89 – 85
gut plus	12	84 – 80
gut	11	79 – 75
gut minus	10	74 – 70
befriedigend plus	9	69 – 65
befriedigend	8	64 – 60
befriedigend minus	7	59 – 55
ausreichend plus	6	54 – 50
ausreichend	5	49 – 45
ausreichend minus	4	44 – 39
mangelhaft plus	3	38 – 33
mangelhaft	2	32 – 27
mangelhaft minus	1	26 – 20
ungenügend	0	19 – 0



Name: \_\_\_\_\_

# Abiturprüfung 2011

## Physik, Grundkurs

---

### Aufgabenstellung:

#### Aufgabe 1: Zyklotron mit medizinischer Anwendung

Protonen,  $\alpha$ -Teilchen und andere Atomkerne können mit einem Zyklotron beschleunigt werden. Ein einfaches Zyklotron besteht dabei aus zwei sich gegenüberstehenden metallischen, hohlen Halbzylindern, die sich in einem homogenen Magnetfeld befinden. Zwischen den Zylindern liegt eine Wechselspannung an.

Die Teilchen werden zu Beginn eines Beschleunigungszyklus in die Mitte zwischen die Halbzylinder eingebracht und durchlaufen in der Folge in den beiden Zyklotronhälften halbkreisförmige Bahnen mit wachsenden Radien.

Die Abbildung 1 zeigt den Geschwindigkeitsvektor beim Durchgang eines positiv geladenen Teilchens mit der Ladung  $q$  durch den Spalt eines einfachen Zyklotrons zu vier aufeinanderfolgenden Zeitpunkten mit den zugehörigen Ladungszuständen der Zyklotronhälften.

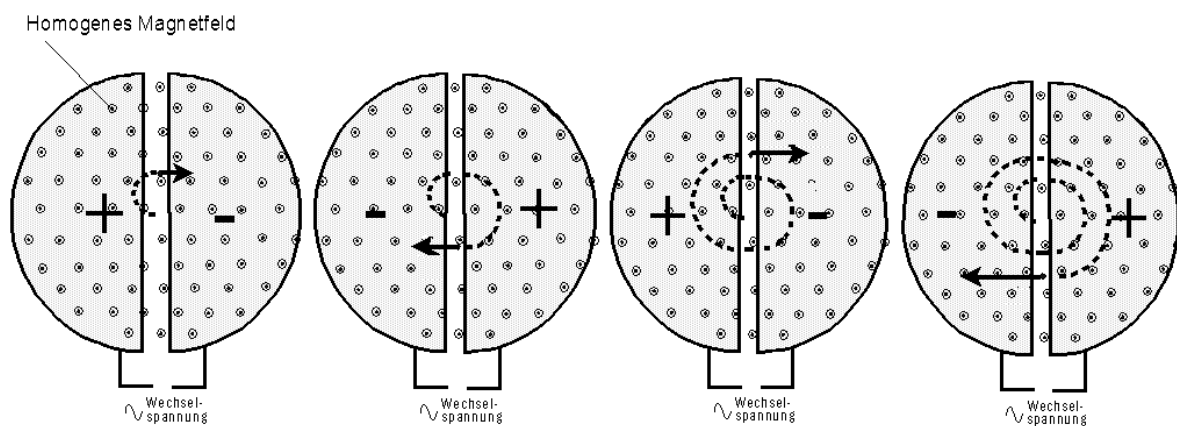


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Zyklotrons



Name: \_\_\_\_\_

- 1.1 a) *Begründen Sie anhand von Abbildung 1 den Energiezuwachs des Teilchens bei den vier Spaltdurchquerungen.*
- b) *Begründen Sie, warum das Teilchen beim Durchlaufen der Zyklotronhälften keinen Energiezuwachs durch die Wirkung des Magnetfeldes erfährt.*
- c) *Leiten Sie den folgenden Zusammenhang zwischen der Magnetfeldstärke  $B$ , Teilchenmasse  $m$  und der Umlauffrequenz  $f_{Uml.}$  des Teilchens im Zyklotron her und kommentieren Sie Ihr Vorgehen.*  $f_{Uml.} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q \cdot B}{m}$  (20 Punkte)

1.2 Ein wie oben beschriebenes Zyklotron wird mit einem homogenen Magnetfeld der Stärke  $B = 1,50 \text{ T}$  betrieben. Die Amplitude der Wechselspannung zwischen den Zyklotronhälften beträgt  $12500 \text{ V}$ . Es sollen  $\alpha$ -Teilchen ( $q = +2e$ ,  $m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ) auf eine kinetische Energie von  $10 \text{ MeV}$  beschleunigt werden.

- a) *Bestimmen Sie die Anzahl  $n$  der Umläufe der  $\alpha$ -Teilchen in diesem Zyklotron.*  
[Zur Kontrolle:  $n = 400$ ]
- b) *Berechnen Sie die Umlauffrequenz  $f_{Uml.}$  der Teilchen sowie deren Verweildauer in der Maschine.*
- c) *Ermitteln Sie die Geschwindigkeit, mit der das  $\alpha$ -Teilchen bei dieser Endenergie den Beschleuniger verlässt.*

[Kontrollergebnis:  $v_{\text{end}} = 2,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

- d) *Bestimmen Sie den Bahnradius des  $\alpha$ -Teilchens kurz vor dem Verlassen des Beschleunigers.* (18 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

1.3 Ein wichtiges Anwendungsfeld des Zyklotrons ist die Strahlentherapie in der Medizin. Allgemein nutzt man hierbei ionisierende Strahlung (d. h. Röntgen-,  $\gamma$ - bzw. Teilchenstrahlung), um gezielt krankes Gewebe im Körper zu zerstören und gleichzeitig das umliegende gesunde Gewebe möglichst wenig zu schädigen.

Die beiden folgenden Diagramme zeigen qualitativ die Energieabgabe von  $\gamma$ -Strahlung und Protonenstrahlung entlang der Wegstrecke in Wasser, was mit dem Verhalten dieser Strahlungsarten in Gewebe sehr gut vergleichbar ist.

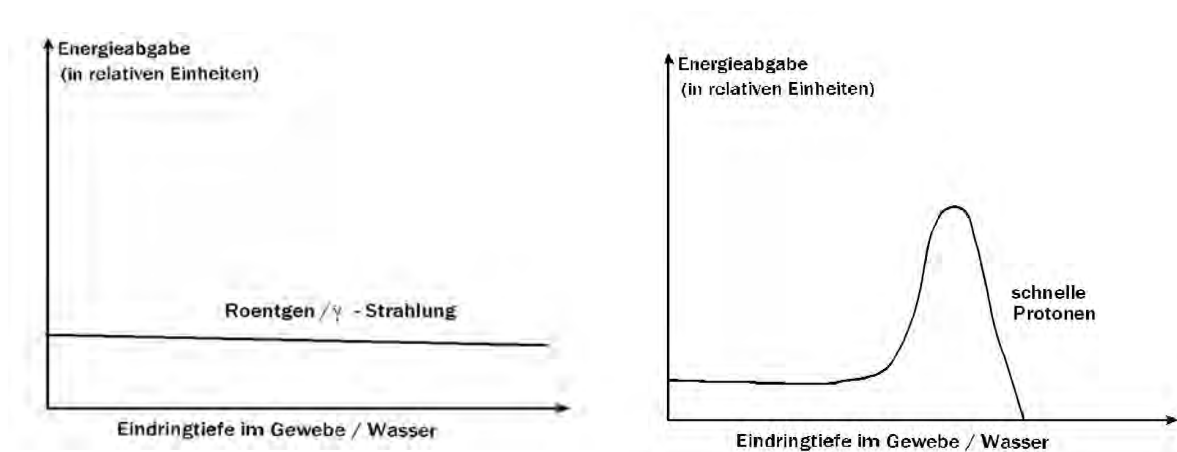


Abbildung 2: Energieabgabe von  $\gamma$ -Strahlung und von Protonen in Gewebe

- Beschreiben Sie anhand der Diagramme in Abbildung 2 die durch die Strahlungsarten bewirkte Verteilung der abgegebenen Energie im bestrahlten Gewebe.
- Erläutern Sie den wesentlichen Vorteil einer Strahlentherapie mit schnellen Protonen gegenüber der Verwendung von  $\gamma$ -Strahlung. (12 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

## Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse

Die Röntgenstrukturanalyse ist eine Standardmethode, um die Gitterstruktur eines kristallinen Stoffes zu untersuchen. Hierfür wird ausgenutzt, dass Röntgenstrahlung, deren Wellenlänge in der Größenordnung von Atomabständen liegt, von den in Kristallen regelmäßig angeordneten Atomen gemäß der Bragg-Bedingung gebeugt wird. Aufgrund des Beugungsbildes lassen sich Rückschlüsse auf die Netzebenenabstände im Kristall ziehen.

Die Grundlagen dieser Methode sollen hier für einen LiF-Kristall und einen KBr-Kristall nachvollzogen werden.

2.1 Die Röntgenstrahlung wird mittels einer Röntgenröhre erzeugt.

Skizzieren Sie den Aufbau einer Röntgenröhre und beschreiben Sie ihre Funktionsweise. (6 Punkte)

2.2 Bei der Spektralanalyse trifft die Röntgenstrahlung unter verschiedenen Winkeln  $\vartheta$  auf einen Einkristall.

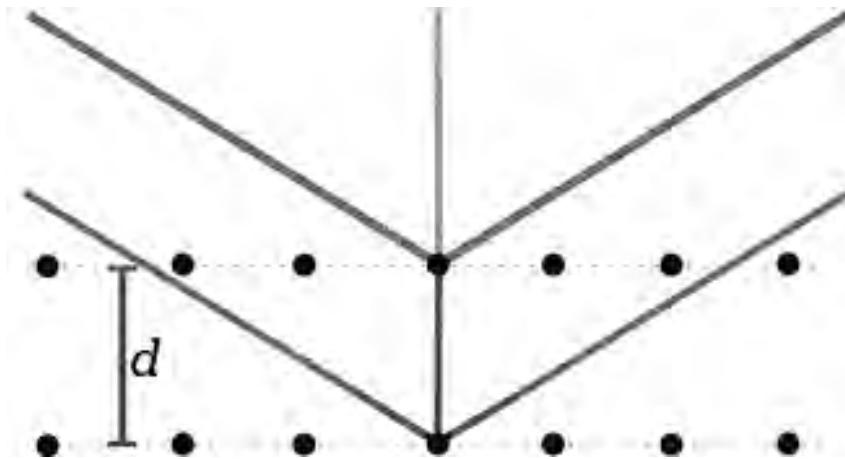


Abbildung 1

- a) Leiten Sie die Bragg-Gleichung  $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$  her. Vervollständigen Sie dazu auch die Skizze in Abbildung 1.
- b) Erläutern Sie, warum der Arm mit dem Detektor immer auf den doppelten Winkel  $2\vartheta$  zum Primärstrahl eingestellt werden muss, wenn der Kristall im Winkel  $\vartheta$  zum Primärstrahl ausgerichtet ist. (9 Punkte)





Name: \_\_\_\_\_

- 2.3 Das Röntgenspektrum einer Kupferanode nach Beugung an einem LiF-Kristall mit dem Netzebenenabstand  $d = 201,4 \text{ pm}$  ist in Abbildung 2 dargestellt. Deutlich sind die  $K_\alpha$ -Linie und die  $K_\beta$ -Linie in der Mitte zu erkennen.

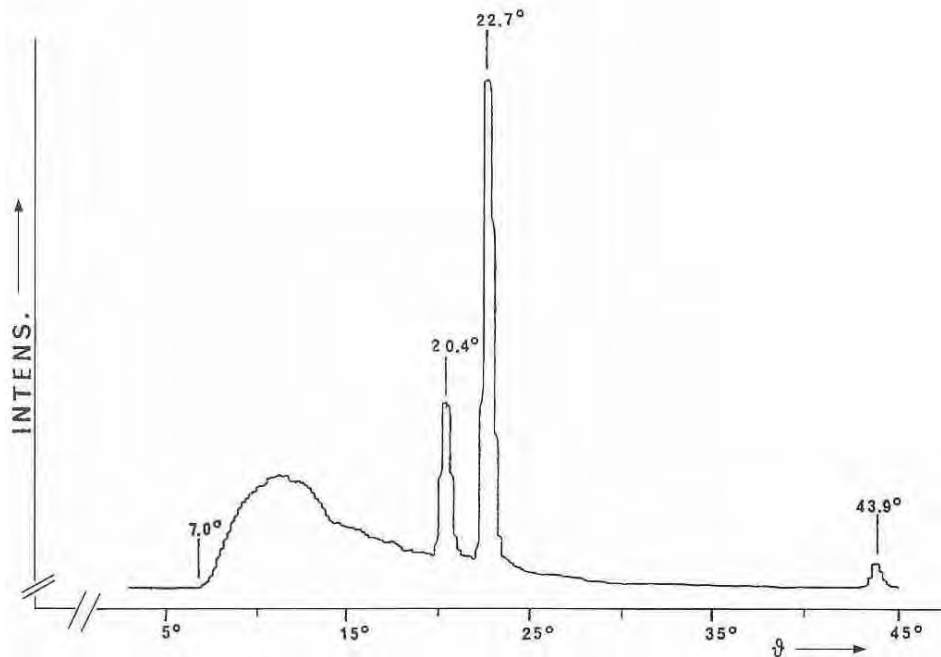


Abbildung 2: Röntgenspektrum einer Kupferanode nach Beugung an einem LiF-Kristall, Beschleunigungsspannung  $U_b = 25 \text{ kV}$  (Quelle: Phywe-Handbuch, leicht verändert)

- Erläutern Sie das Röntgenspektrum in Abbildung 2.
- Bestimmen Sie rechnerisch für die verwendete Beschleunigungsspannung von  $U_b = 25 \text{ kV}$  den Grenzwinkel  $\vartheta_{\min}$ .
- Bestimmen Sie die Wellenlängen aller (erkennbaren) charakteristischen Linien.  
[Zur Kontrolle:  $\lambda(\text{Cu-}K_\alpha) = 155,4 \text{ pm}$ ] (17 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

- 2.4 Statt des LiF-Kristalls wird bei einer weiteren Messung ein KBr-Kristall verwendet. Das Röntgenspektrum der Kupferanode nach Beugung an diesem Kristall ist in Abbildung 3 dargestellt.

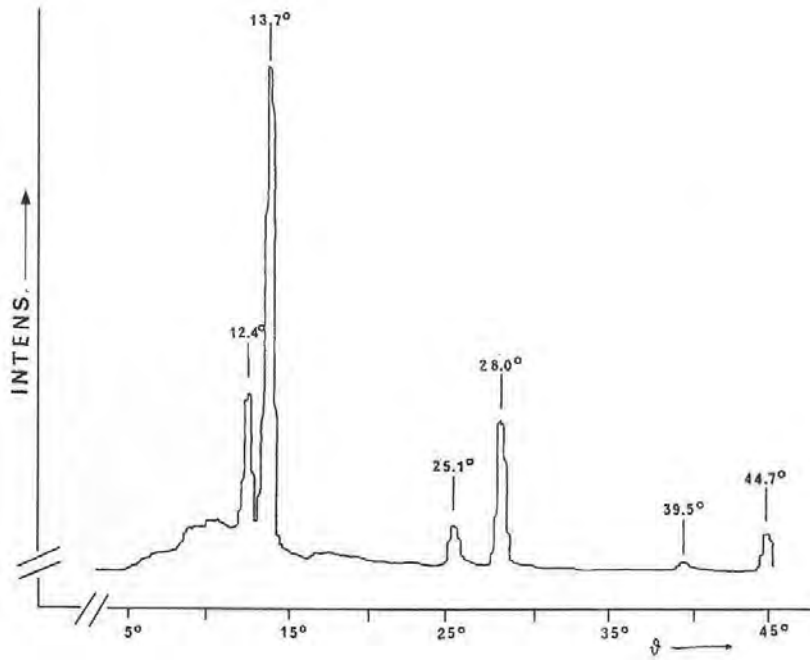


Abbildung 3: Röntgenspektrum einer Kupferanode nach Beugung an einem KBr-Kristall, Beschleunigungsspannung  $U_b = 25$  kV (Quelle: Phywe-Handbuch, leicht verändert)

- a) Erläutern Sie die Unterschiede zwischen den charakteristischen Spektren in Abbildung 2 und 3 sowie deren Ursache.
- b) Bestimmen Sie den Netzebenenabstand  $d$  für den KBr-Kristall. (10 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

2.5 Für die Röntgenstrukturanalyse unbekannter Kristalle benötigt man möglichst monoenergetische Röntgenstrahlung, also Röntgenstrahlung mit einer bestimmten Wellenlänge. In Abbildung 4 ist das Absorptionsvermögen verschiedener Materialien vereinfacht dargestellt.

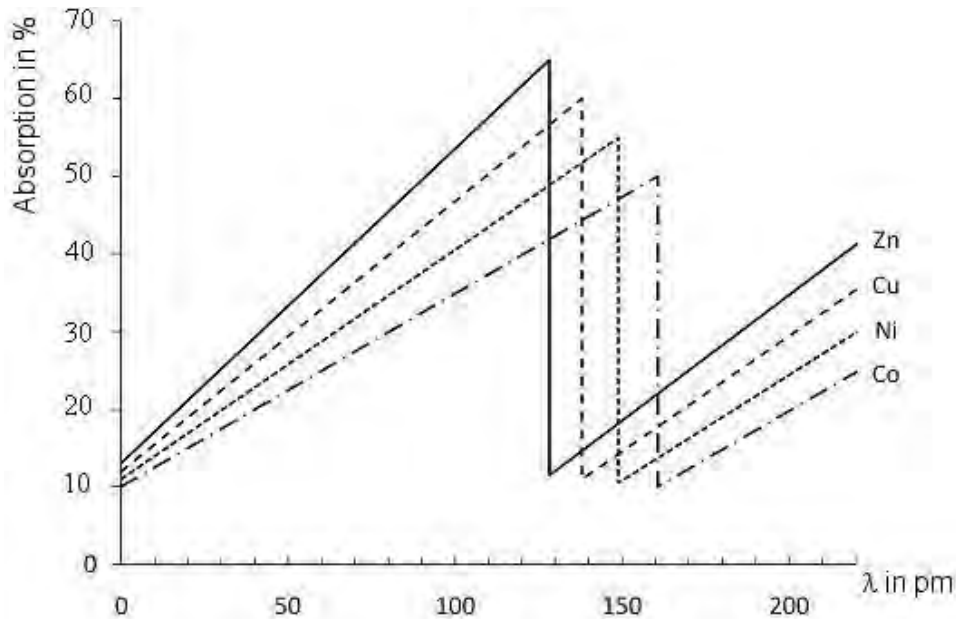


Abbildung 4: Schematische Röntgenabsorptionsspektren von Zink, Kupfer, Nickel und Cobalt

- a) Begründen Sie mit Hilfe der in Abbildung 4 gezeigten Röntgenabsorptionsspektren, aus welchem der dort angegebenen Materialien ein Filter bestehen sollte, um aus der Röntgenstrahlung mit dem Spektrum aus Abbildung 2 möglichst monoenergetische Strahlung zu erzeugen.
- b) Erklären Sie, warum der Einsatz monoenergetischer Röntgenstrahlung bei der Bestimmung eines Netzebenenabstands in einem unbekanntem Kristallgitter erforderlich ist. (8 Punkte)

### Zugelassene Hilfsmittel:

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

## Unterlagen für die Lehrkraft

# Abiturprüfung 2011

## Physik, Grundkurs

### 1. Aufgabenart

- Bearbeitung von zwei Aufgaben, die fachspezifisches Material enthalten

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

Aufgabe 1: Zyklotron mit medizinischer Anwendung	(50 Punkte)
Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse	(50 Punkte)

### 3. Materialgrundlage

- entfällt

### 4. Bezüge zu den Vorgaben 2011

#### 1. Inhaltliche Schwerpunkte

##### Aufgabe 1:

- Ladungen und Felder
  - Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern
- Atom- und Kernphysik
  - Radioaktiver Zerfall (Reichweite von Gammastrahlung)

##### Aufgabe 2:

- Atom- und Kernphysik
  - Linienspektren in Absorption und Emission und Energiequantelung des Atoms, Atommodelle
  - Ionisierende Strahlung und ihre Energieverteilung (Röntgenspektroskopie, Röntgenbeugung)

#### 2. Medien/Materialien

- entfällt

<sup>1</sup> Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

## 5. Zugelassene Hilfsmittel

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

## 6. Vorgaben für die Bewertung der Schülerleistungen

### 6.1 Modelllösungen

#### Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Die nachfolgenden Modelllösungen erfassen nicht notwendigerweise alle sachlich richtigen Lösungsalternativen.

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

### Modelllösungen Aufgabe 1: Zyklotron mit medizinischer Anwendung

Die Abbildung1 (siehe Schülerteil) zeigt den Beschleunigungsvorgang eines geladenen Teilchens in einem einfachen Zyklotron.

- 1.1 a) Eine optimale Beschleunigung findet dann statt, wenn bei jedem Passieren des Zwischenraums zwischen beiden Zyklotronhälften die maximale Beschleunigungsspannung in Bewegungsrichtung des Teilchens anliegt. Die Umlauffrequenz des Teilchens entspricht in diesem Fall exakt der Frequenz der anliegenden Wechselspannung.
- 1.1 b) Das geladene Teilchen wird durch die Wirkung der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn abgelenkt. Die Lorentzkraft wirkt stets orthogonal zur Momentangeswindigkeit und besitzt damit keine Komponente in Bewegungsrichtung. Sie kann aus diesem Grund den Betrag der Geschwindigkeit und damit auch die kinetische Energie nicht verändern.

**Anmerkung:** Hier kann eine korrekte Skizze der geometrischen Situation einen Teil der verbalen Argumentation ersetzen.

- 1.1 c) Entlang der Bahn des Teilchens wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft.

Mit  $F_L = q \cdot v \cdot B$  (denn  $\vec{B}$  ist  $\perp$  zu  $\vec{v}$ ) und  $F_Z = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot r$  sowie  $v = 2\pi \cdot r \cdot f$

ergibt sich aus  $F_L = F_Z$ :

$$q \cdot 2\pi \cdot r \cdot f \cdot B = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot r.$$

Auflösen nach  $f$  ergibt schließlich:  $f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q \cdot B}{m}$ .

- 1.2 Gegeben:  $m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $q = 2e$ ;  $E_{\text{End}} = 10 \text{ MeV}$ ;  $B = 1,50 \text{ T}$ ;  $U_{\text{max}} = 12500 \text{ V}$

- 1.2 a) Pro Umlauf durchläuft das Teilchen zweimal die maximale Beschleunigungsspannung  $U_{\text{max}}$  und nimmt dabei jeweils die Energiemenge  $e \cdot U_{\text{max}}$  auf. Wenn

die Anfangsenergie des Alphateilchens vernachlässigt wird, sind  $n = \frac{E_{\text{End}}}{2 \cdot e \cdot U_{\text{max}}}$

Umläufe erforderlich, um die Endenergie zu erreichen.

$$\text{Also } n = \frac{10^7 \text{ eV}}{25000 \text{ eV}} = 400 \text{ Umläufe.}$$

- 1.2 b) Die Zyklotronfrequenz ergibt sich zu

$$f_{\text{Uml.}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1,5 \text{ T}}{6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 1,15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{s}}.$$

Die Verweildauer des  $\alpha$ -Teilchens im Beschleuniger beträgt

$$t_{\text{ges.}} = \frac{n}{f_{\text{Uml.}}} = \frac{400}{1,15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{s}}} = 3,48 \cdot 10^{-5} \text{ s.}$$

- 1.2 c) Berechnung der Endgeschwindigkeit anhand der kinetischen Energie:

Aus  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  ergibt sich:  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}}$  und damit

$$v_{\text{end}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} = 2,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

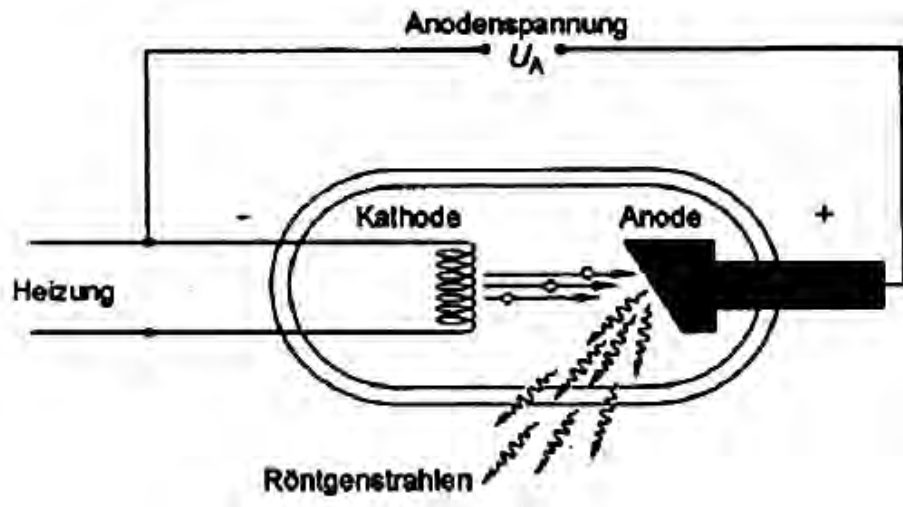
- 1.2 d) Aus dem Kraftansatz  $F_L = F_Z \rightarrow q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$  ergibt sich:  $r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$  und

$$\text{eingesetzt folgt dann: } r = \frac{6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 2,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1,50 \text{ T}} = 0,304 \text{ m.}$$

- 1.3 a) Die  $\gamma$ -Strahlung besitzt eine große Reichweite im Gewebe und die Energieabgabe erfolgt entlang des Weges fast gleichmäßig. Im Gegensatz dazu besitzt die Protonenstrahlung nur eine bestimmte Reichweite im Gewebe und gibt auf dem letzten Stück ihrer zurückgelegten Strecke im Gewebe besonders viel Energie ab.
- 1.3 b) Die gezielte Zerstörung von krankem Gewebe im Körperinnern ist durch den Einsatz von Protonenstrahlung besser möglich, da man bei richtig gewählter Eindringtiefe der Protonenstrahlung den Bereich im Körper mit maximaler Energieabgabe genau bestimmen kann. Umliegendes Gewebe wird im Gegensatz zur Verwendung von  $\gamma$ -Strahlung deutlich weniger bzw. gar nicht durch die Strahlung beeinträchtigt.

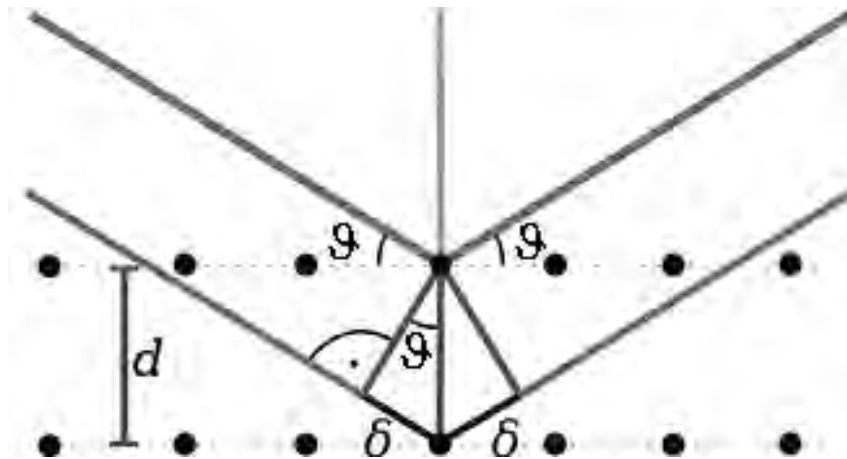
## Modelllösungen Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse

2.1



In einer Röntgenröhre befinden sich eine Glühkathode und eine Anode. Die aus der Glühkathode freigesetzten Elektronen werden durch eine Hochspannung in Richtung Anode beschleunigt. Wenn sie dort auftreffen, werden sie stark abgebremst. Die Bewegungsenergie der Elektronen wird dabei zum Teil in Wärme, zum Teil aber auch in Strahlung umgesetzt.

2.2 a)



Damit die an den einzelnen Netzebenen reflektierten Wellen konstruktiv interferieren, müssen sie in Phase sein. Dies ist der Fall, wenn die Gangunterschiede jeweils ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge betragen:  $n \cdot \lambda = 2\delta$ .

Anhand der Skizze erkennt man  $\delta = d \cdot \sin\theta$ . Daraus folgt die Bragg-Gleichung.



2.2 b) Man sorgt bei der Bragg-Beugung dafür, dass der Ausfallswinkel immer gleich dem Einfallswinkel ist. Intensitätsmaxima erhält man nur unter den Einfallswinkeln, die die Bragg-Gleichung erfüllen. Da die Strahlenquelle üblicherweise fest ist, muss der Detektor relativ zur Strahlenquelle entsprechend doppelt so weit wie das Gitter gedreht werden.

2.3 a) Das Röntgenspektrum zeigt die Intensität der an einer Kupferanode erzeugten Röntgenstrahlung, nachdem diese unter verschiedenen Winkeln  $\vartheta$  an einem LiF-Einkristall gebeugt wurde. Jeder Winkel  $\vartheta$  entspricht dabei einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  der Röntgenstrahlung.

Das Röntgenspektrum setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Das kontinuierliche Bremspektrum steigt ab  $\vartheta = 7^\circ$  zunächst steil bis zu einem Maximum zwischen  $\vartheta = 11^\circ$  und  $\vartheta = 12^\circ$  an, um dann bis  $\vartheta = 45^\circ$  kontinuierlich abzufallen.

Diesem Spektrum ist das charakteristische Spektrum von Kupfer überlagert, wobei das Maximum für den Übergang von der L- zur K-Schale ( $K_\alpha$ -Linie) bei  $\vartheta = 22,7^\circ$  und das für den Übergang von der M- zur K-Schale ( $K_\beta$ -Linie) bei  $\vartheta = 20,4^\circ$  deutlich zu erkennen sind. Das Maximum bei  $\vartheta = 43,9^\circ$  gehört zur 2. Beugungsordnung der  $K_\beta$ -Linie.

2.3 b) Aus der Maximalenergie von  $E_{\max} = 25 \text{ keV}$  ergibt sich die minimale Wellenlänge  $\lambda_{\min}$  gemäß  $E_{\max} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\min}}$ . Man erhält  $\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{E_{\max}} = 49,6 \text{ pm}$ .

Aus dieser Wellenlänge lässt sich mit Hilfe der Bragg-Gleichung für  $n = 1$  der Grenzwinkel berechnen:  $\vartheta_{\min} \approx 7,1^\circ$ .

2.3 c) Man berechnet die Wellenlängen der  $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linie von Kupfer mit der Bragg-Gleichung aus dem Emissionsspektrum.

Für  $n = 1$ :

$$\lambda(\text{Cu-}K_\alpha) = 155,4 \text{ pm} \text{ und } \lambda(\text{Cu-}K_\beta) = 140,4 \text{ pm}$$

Für  $n = 2$ :

$$\lambda(\text{Cu-}K_\beta) = 139,7 \text{ pm}$$

- 2.4 a) Das Kupferspektrum mit KBr-Kristall in Abbildung 3 zeigt in 1. Ordnung eine  $K_{\alpha}$ -Linie bei  $\vartheta = 13,7^{\circ}$  und eine  $K_{\beta}$ -Linie bei  $\vartheta = 12,4^{\circ}$ . Demnach sind diese charakteristischen Linien im Gegensatz zu Abbildung 2 zu kleineren Winkeln hin verschoben. Zudem weist das Spektrum in Abbildung 3 mehr charakteristische Linien auf. Von links nach rechts sind auch in der 2. und 3. Beugungsordnung jeweils die  $K_{\beta}$ - und  $K_{\alpha}$ -Linie zu erkennen, im Gegensatz zu Abbildung 2, wo in 2. Ordnung nur noch die  $K_{\beta}$ -Linie zu sehen ist.

Die Anzahl der darstellbaren Beugungsordnungen hängt vom Netzebenenabstand ab.

- 2.4 b) Der unbekannte Netzebenenabstand  $d$  im KBr-Kristall lässt sich mit Hilfe des Ergebnisses aus 2.3 c) für die Wellenlänge der  $K_{\alpha}$ -Linie in 1. Ordnung bestimmen:

$$d = \frac{\lambda(\text{Cu-}K_{\alpha})}{2 \cdot \sin\vartheta} = 328,1 \text{ pm}.$$

- 2.5 a) Um möglichst monoenergetische Röntgenstrahlung zu erzeugen, kann man hier sinnvollerweise die Cu- $K_{\alpha}$ -Linie durchlassen und den Rest des Spektrums, insbesondere die Cu- $K_{\beta}$ -Linie, absorbieren.

Vergleicht man die Lage der Absorptionskanten mit den Cu-Emissionslinien in 2.3 c), so ist also ein Filter optimal, das Wellenlängen von etwa 155 pm möglichst ungehindert durchlässt (dort also ein Absorptionsminimum hat) und alle anderen Wellenlängen (Bremspektrum), insbesondere aber bei ca. 140 pm ( $K_{\beta}$ -Linie), möglichst gut absorbiert.

Hierfür bietet sich von den vier dargestellten Materialien Nickel am besten an.

Die Absorptionskante von Nickel liegt bei ca. 150 pm. Im Bereich um 140 pm wird vergleichsweise am meisten absorbiert, im Bereich um 155 pm am meisten durchgelassen.

**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Die Absorptionskante von Kupfer liegt bei ca. 140 pm. Im Bereich um 155 pm wird bei Kupfer ebenfalls wenig absorbiert. Für die Antwort Kupferfilter sollten also Teilpunkte gegeben werden.

- 2.5 b) Bei einer zu untersuchenden Probe mit unbekanntem Kristallgitter kann man zunächst nicht davon ausgehen, dass die Lage der Netzebenen so regelmäßig wie bei einem Einkristall ist. Monoenergetische Röntgenstrahlung hat dann den entscheidenden Vorteil, dass das entstehende Beugungsbild eine einfachere Struktur besitzt und sich dadurch erst der Netzebenenabstand eindeutig bestimmen lässt.

## 6.2 Teilleistungen – Kriterien

### Aufgabe 1: Zyklotron mit medizinischer Anwendung

#### Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet den Energiezuwachs des Teilchens anhand des periodischen Durchlaufens des elektrischen Feldes zwischen den Zyklotronhälften.	6
b)	begründet die Konstanz der kinetischen Energie bei Bewegung im Magnetfeld durch die fehlende Komponente der Lorentzkraft in Bewegungsrichtung.	6
c1)	verwendet den Ansatz: Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft, $F_L = F_Z$ .	3
c2)	leitet die Formel für $f_{Uml.}$ her.	5

#### Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	bestimmt die Anzahl der Umläufe des $\alpha$ -Teilchens im Zyklotron.	3
b1)	berechnet die Umlauffrequenz des Teilchens im Zyklotron.	3
b2)	berechnet die Verweildauer des Teilchens im Zyklotron.	3
c)	bestimmt die Endgeschwindigkeit des Teilchens nichtrelativistisch.	4
d)	verwendet den Ansatz: Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft, $F_L = mv^2 / r$ , und bestimmt damit den maximalen Bahnradius.	5

#### Teilaufgabe 1.3

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	beschreibt den Unterschied in der räumlichen Verteilung der Energieabgabe zwischen den beiden Strahlungsarten.	6
b)	begründet den Vorteil der Protonenstrahlung durch die räumlich begrenzte Energieabgabe mit der Schonung des umliegenden Gewebes.	6

**Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse****Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
1	skizziert den Aufbau einer Röntgenröhre.	2
2	beschreibt die Funktionsweise einer Röntgenröhre.	4

**Teilaufgabe 2.2**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	leitet die Bragg-Gleichung mit Hilfe der Skizze in Abbildung 1 her.	6
b)	erläutert, warum der Arm mit dem Detektor immer auf den doppelten Winkel eingestellt werden muss.	3

**Teilaufgabe 2.3**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	erläutert das Röntgenspektrum in Abbildung 2.	7
b)	bestimmt rechnerisch den Grenzwinkel $\vartheta_{\min}$ .	6
c)	bestimmt die Wellenlängen aller (erkennbaren) charakteristischen Linien.	4

**Teilaufgabe 2.4**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	erläutert die Unterschiede zwischen den charakteristischen Spektren in Abbildung 2 und 3.	4
a2)	erläutert deren Ursache.	3
b)	bestimmt den Netzebenenabstand $d$ für den KBr-Kristall.	3

**Teilaufgabe 2.5**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet mit Hilfe der in Abbildung 4 gezeigten Röntgenabsorptionsspektren, aus welchem der dort angegebenen Materialien ein Filter bestehen sollte.	5
b)	erklärt, warum der Einsatz monoenergetischer Röntgenstrahlung bei der Bestimmung von Netzebenenabständen in unbekanntem Kristallgittern erforderlich ist.	3

## 7. Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

### Aufgabe 1: Zyklotron mit medizinischer Anwendung

#### Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	begründet den Energiezuwachs ...	6			
b)	begründet die Konstanz ...	6			
c1)	verwendet den Ansatz ...	3			
c2)	leitet die Formel ...	5			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.1</b>	<b>20</b>			

#### Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	bestimmt die Anzahl ...	3			
b1)	berechnet die Umlauffrequenz ...	3			
b2)	berechnet die Verweildauer ...	3			
c)	bestimmt die Endgeschwindigkeit ...	4			
d)	verwendet den Ansatz ...	5			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.2</b>	<b>18</b>			

#### Teilaufgabe 1.3

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	beschreibt den Unterschied ...	6			
b)	begründet den Vorteil ...	6			
	<b>Summe Teilaufgabe 1.3</b>	<b>12</b>			
	<b>Summe Teilaufgaben 1.1, 1.2 und 1.3</b>	<b>50</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse****Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
	Der Prüfling	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
1	skizziert den Aufbau ...	2			
2	beschreibt die Funktionsweise ...	4			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.1</b>	<b>6</b>			

**Teilaufgabe 2.2**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
	Der Prüfling	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	leitet die Bragg-Gleichung ...	6			
b)	erläutert, warum der ...	3			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.2</b>	<b>9</b>			

**Teilaufgabe 2.3**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
	Der Prüfling	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	erläutert das Röntgenspektrum ...	7			
b)	bestimmt rechnerisch den ...	6			
c)	bestimmt die Wellenlängen ...	4			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.3</b>	<b>17</b>			

**Teilaufgabe 2.4**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
	Der Prüfling	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	erläutert die Unterschiede ...	4			
a2)	erläutert deren Ursache.	3			
b)	bestimmt den Netzebenenabstand ...	3			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.4</b>	<b>10</b>			

**Teilaufgabe 2.5**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	begründet mit Hilfe ...	5			
b)	erklärt, warum der ...	3			
	<b>Summe Teilaufgabe 2.5</b>	<b>8</b>			
	<b>Summe Teilaufgaben 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 und 2.5</b>	<b>50</b>			
	<b>Summe der 1. und 2. Aufgabe</b>	<b>100</b>			

	<b>Summe insgesamt</b>	<b>100</b>			
	<b>aus der Punktsomme resultierende Note</b>				
	<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
	<b>Paraphe</b>				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsommen aus EK und ZK: \_\_\_\_\_

ggf. arithmetisches Mittel der Noteneurteile aus EK und ZK: \_\_\_\_\_

Die Klausur wird abschließend mit der Note: \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

**Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)**

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

<b>Note</b>	<b>Punkte</b>	<b>Erreichte Punktzahl</b>
sehr gut plus	15	100 – 95
sehr gut	14	94 – 90
sehr gut minus	13	89 – 85
gut plus	12	84 – 80
gut	11	79 – 75
gut minus	10	74 – 70
befriedigend plus	9	69 – 65
befriedigend	8	64 – 60
befriedigend minus	7	59 – 55
ausreichend plus	6	54 – 50
ausreichend	5	49 – 45
ausreichend minus	4	44 – 39
mangelhaft plus	3	38 – 33
mangelhaft	2	32 – 27
mangelhaft minus	1	26 – 20
ungenügend	0	19 – 0