



Name: _____

Abiturprüfung 2011

Physik, Leistungskurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe 1: Beschleunigung geladener Teilchen – direkter Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit

Protonen, α -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.

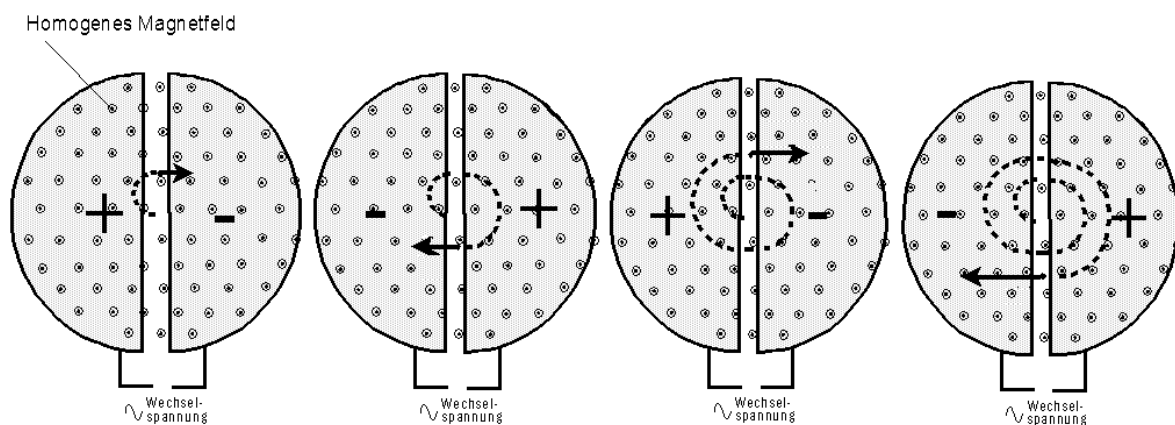


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Zyklotrons



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 $f_{\text{Uml.}}$ des Teilchens im Zyklotron her und kommentieren Sie Ihr Vorgehen.* $f_{\text{Uml.}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q \cdot B}{m}$. (14 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 V . Es sollen α -Teilchen ($q = +2e$, $m_{\alpha} = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) auf eine kinetische Energie von 10 MeV beschleunigt werden.
- a) *Bestimmen Sie die Anzahl der Umläufe der α -Teilchen in diesem Zyklotron.*
- b) *Berechnen Sie die Umlauffrequenz $f_{\text{Uml.}}$ der Teilchen sowie deren Verweildauer in der Maschine.*
- c) *Ermitteln Sie durch eine nichtrelativistische Rechnung den Bahnradius der α -Teilchen kurz vor dem Verlassen des Beschleunigers.* (14 Punkte)

- 1.3 Um Endenergien der beschleunigten Teilchen von über 30 MeV zu erreichen, ist es notwendig, die am Zyklotron anliegende Wechselspannung während eines Beschleunigungszyklus leicht zu korrigieren.

Erklären Sie diese Notwendigkeit qualitativ durch den Effekt der relativistischen Massenzunahme und geben Sie begründet an, ob die Wechselspannung dabei erhöht oder verringert werden muss. (5 Punkte)



Name: _____

- 1.4 Generell ist es nach der Relativitätstheorie unmöglich, dass ein materielles Teilchen Lichtgeschwindigkeit überschreitet bzw. auch nur erreichen kann. Ein sehr überzeugendes Experiment zur Bestätigung dieser theoretischen Vorhersage wurde 1964 von W. Bertozzi durchgeführt. Die Abbildung 2 zeigt den experimentellen Aufbau.

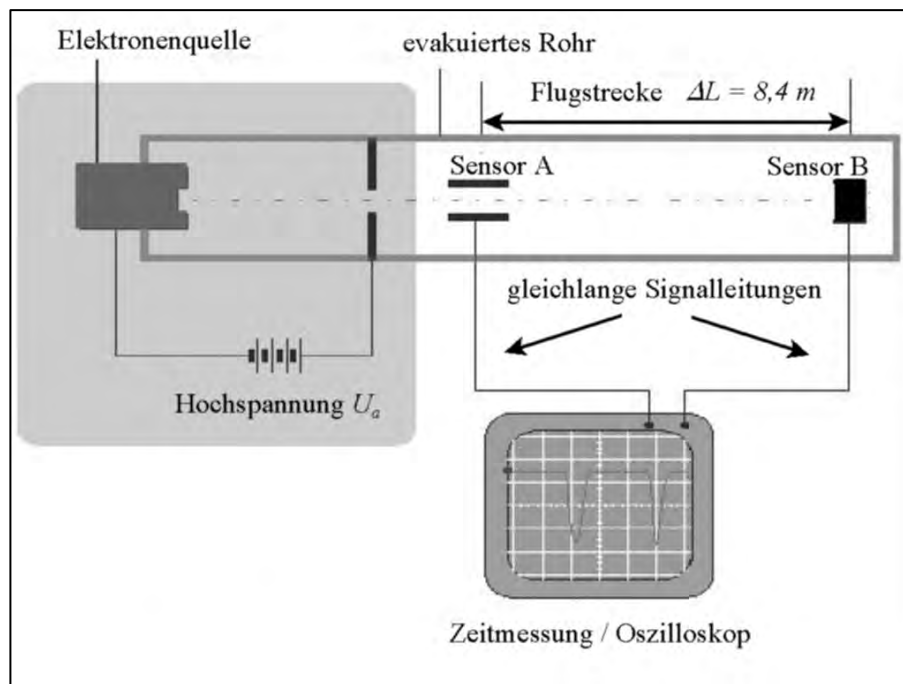


Abbildung 2: Aufbau des Bertozzi-Experiments (Quelle: <http://www.leifiphysik.de>)

Aufbau und Durchführung:

Ein elektrostatischer Beschleuniger liefert in regelmäßigen Intervallen zeitlich sehr kurze Elektronenpulse (Pulsdauer ca. $3 \cdot 10^{-9}$ s). Die Beschleunigung der Elektronen während einer Messung erfolgt über die anliegende konstante Beschleunigungsspannung U_a . Die austretenden Elektronen durchlaufen danach eine geradlinige Flugstrecke, in der keine weiteren Kräfte auf sie wirken. Zu Beginn der Flugstrecke verursacht jeder Elektronenimpuls in einem dortigen Sensor A ein kurzes Signal und etwas später am Ende des Strahlrohrs im Sensor B ein weiteres Signal. Die beiden Signale werden zusammen auf einem schnellen Oszilloskop dargestellt. Der Abstand zwischen Sensor A und B beträgt $\Delta L = 8,4$ m. Die Abbildung 3 zeigt die Anzeige des Oszilloskops bei einer Beschleunigungsspannung von $U_a = 500$ kV (ein Kästchen entspricht 10 ns).



Name: _____

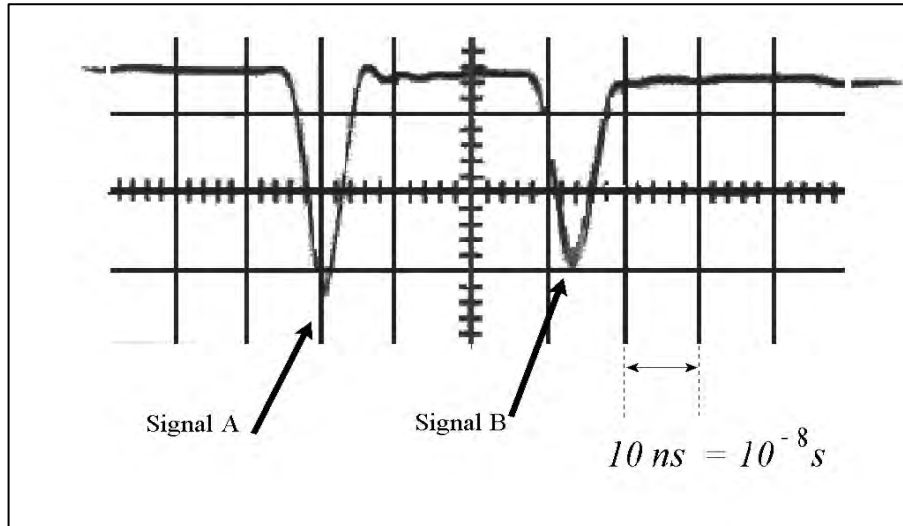


Abbildung 3: Bild auf dem Oszilloskop (Quelle: „Speed and Kinetic Energy of Relativistic Electrons“; William Bertozzi. Journ. of Physics, Vol. 32 (1964), S. 551 ff.)

- a) *Bestimmen Sie aus dem Oszilloskopbild den Messwert der Elektronengeschwindigkeit in diesem Experiment.*

[Kontrollergebnis: $v_{\text{gem.}} = 2,5 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$]

- b) *Berechnen Sie nichtrelativistisch die theoretische Elektronengeschwindigkeit nach Durchlaufen der verwendeten Beschleunigungsspannung.*
- c) *Kommentieren und bewerten Sie die Ergebnisse aus Teilaufgabe a) und b).*

(11 Punkte)



Name: _____

- 1.5 Die tatsächliche Formel für die Endgeschwindigkeit der Elektronen nach relativistischer Rechnung lautet :

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{m_0^2 \cdot c^4}{(m_0 \cdot c^2 + e \cdot U_a)^2}}$$

- a) *Geben Sie eine Gleichung an, aus der diese Formel hergeleitet werden kann, und begründen Sie diese physikalisch. (Die Herleitung ist nicht erforderlich.)*
- b) *Zeigen Sie durch eine Rechnung, dass das Messergebnis aus 1.4 mit der relativistisch berechneten Geschwindigkeit der Elektronen vereinbar ist und damit die Vorhersage der speziellen Relativitätstheorie durch dieses Experiment bestätigt wird.* (9 Punkte)
- 1.6 *Erläutern Sie, warum es beim experimentellen Aufbau des Bertozzi-Experiments wichtig ist, dass die beiden Signalleitungen von den Sensoren A und B zum Oszilloskop gleich lang sind.* (4 Punkte)



Name: _____

Aufgabe 2: Untersuchungen zur Natur der Elektronen

Gegeben ist eine Elektronenbeugungsröhre, bei der der Elektronenstrahl durch eine polykristalline Graphitfolie hindurch auf einen Fluoreszenzschirm gelenkt wird (siehe Abbildung 1).

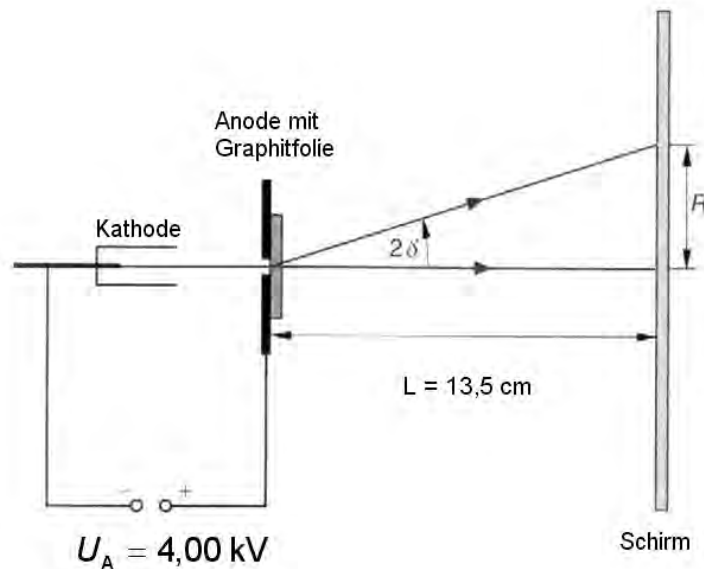


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Elektronenbeugungsröhre
(Quelle: Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, 3. Auflage. Hannover: Schroedel 1998, S. 386
(Schirmabstand an Aufgabentext angepasst))

Auf dem Fluoreszenzschirm wird ein Muster aus konzentrischen Kreisen sichtbar, deren Radien sich mit unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen U_A verändern (vgl. Abbildung 2).

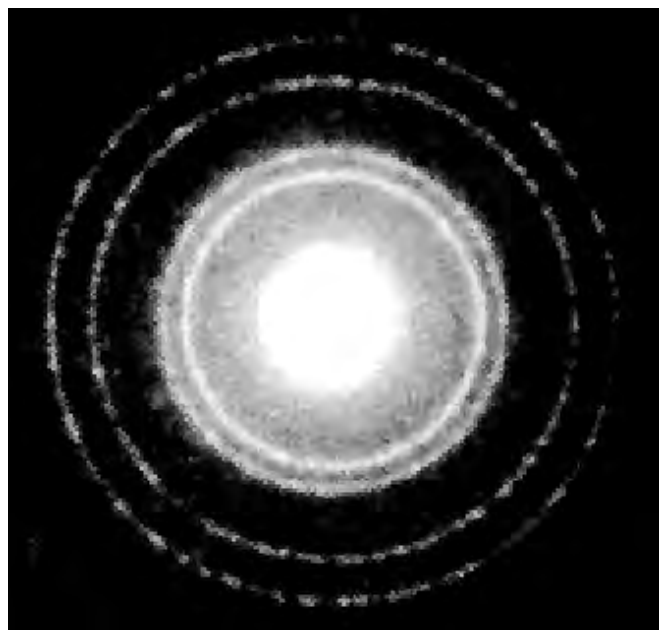


Abbildung 2:
Vom Elektronenstrahl erzeugtes Bild beim
Auftreffen auf die Fluoreszenz-Schicht
(Quelle: [http://www.pas-berlin.de/chemie/
ch-1/2_Atomistik/240_debroglie_
materiewel.html](http://www.pas-berlin.de/chemie/ch-1/2_Atomistik/240_debroglie_materiewel.html) (27.02.2006))



Name: _____

- 2.1 a) *Deuten Sie das Muster in Abbildung 2.*
- b) *Erörtern Sie dabei insbesondere, warum hier das klassische Teilchenmodell des Elektrons für die Erklärung nicht mehr ausreicht.* (7 Punkte)
- 2.2 Die Elektronenbeugung kann mit Hilfe der sog. Bragg-Reflexion beschrieben werden.
- a) *Nennen Sie die Bragg'sche Reflexionsbedingung und benennen Sie die in ihr vorkommenden Größen.*
- b) *Erklären Sie die Bragg'sche Reflexionsbedingung anhand einer geeigneten Skizze.* (10 Punkte)
- 2.3 Bei einer Beschleunigungsspannung $U_A = 4,00 \text{ kV}$ ergeben sich für die beiden inneren Kreise die Radien $R_1 = 1,3 \text{ cm}$ und $R_2 = 2,2 \text{ cm}$. Die Netzebenenabstände innerhalb der Graphitkristalle betragen $d_1 = 213 \text{ pm}$ und $d_2 = 123 \text{ pm}$.
- a) *Begründen Sie anhand einer Skizze, warum in Abbildung 1 der Ablenkungswinkel 2δ und nicht etwa δ (wie in der Bragg-Gleichung) auftritt.*
- b) *Ermitteln Sie unter Benutzung der geometrischen Größen R und L die zu den Netzebenenabständen d_1 und d_2 gehörenden Ablenkungswinkel (siehe Abbildung 1).*
- c) *Berechnen Sie damit die Wellenlänge der Elektronen.* (14 Punkte)
- 2.4 a) *Leiten Sie unter Benutzung der De-Broglie-Hypothese eine Formel für die Wellenlänge λ der Elektronen her, die U_A durchlaufen haben.*
- b) *Berechnen Sie für die angegebene Beschleunigungsspannung den Wert von λ .*
- c) *Erörtern Sie die weitgehende Übereinstimmung des aus der De-Broglie-Theorie berechneten Wellenlängenwertes mit dem experimentell ermittelten Wert.* (14 Punkte)



Name: _____

2.5 Die Beschleunigungsspannung U_A wird ausgehend von 4,00 kV um einige kV kontinuierlich erhöht.

- a) *Beschreiben Sie, wie sich das Leuchtschirmbild dabei verändert.*
- b) *Begründen Sie die Veränderung.* (7 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, Leistungskurs

1. Aufgabenart

- Bearbeitung von zwei Aufgaben, die fachspezifisches Material enthalten

2. Aufgabenstellung¹

Aufgabe 1: Beschleunigung geladener Teilchen – direkter Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit	(57 Punkte)
Aufgabe 2: Untersuchungen zur Natur der Elektronen	(52 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
- Relativitätstheorie
 - Relativistischer Impuls, Äquivalenz von Masse und Energie

Aufgabe 2:

- Ladungen und Felder
- Elektromagnetische Schwingungen und Wellen
 - Interferenz
- Quanteneffekte
 - De-Broglie-Theorie des Elektrons, Welleneigenschaften von Teilchen

2. Medien/Materialien

- entfällt

¹ 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: Beschleunigung geladener Teilchen – direkter Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit

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 anliegenden Wechselspannung.

- 1.1 b) Das geladene Teilchen wird durch die Wirkung der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn abgelenkt. Die Lorentzkraft wirkt stets orthogonal zur Momentangeschwindigkeit 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 $F_L = F_Z$:

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

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

- 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_{max} und nimmt dabei jeweils die Energiemenge $e \cdot U_{\text{max}}$ auf.

Wenn die Anfangsenergie des Alphateilchens vernachlässigt wird, sind

$$n = \frac{E_{\text{End}}}{2 \cdot e \cdot U_{\text{max}}} \text{ Umläufe erforderlich, um die Endenergie zu erreichen.}$$

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

- 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 α -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 des Bahnradius r vor Verlassen des Beschleunigers:

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

$$\text{und aus } q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \text{ ergibt sich: } r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \text{ und schließlich } r = \frac{\sqrt{2 \cdot m \cdot E_{\text{kin}}}}{q \cdot B}.$$

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

1.3 Die Umlauffrequenz $f_{\text{Uml.}}$ eines Teilchens im Zyklotron hängt u. a. von seiner Masse ab (vgl. Formel aus 1.1 c). Nach der speziellen Relativitätstheorie wächst im Laborsystem die Masse bewegter Teilchen mit zunehmender Geschwindigkeit immer weiter an und ist stets größer als ihre Ruhmasse. Dieser Effekt macht sich zwar bei kleinen Geschwindigkeiten praktisch nicht bemerkbar, wird jedoch bei höheren Geschwindigkeiten ($> 0,05 c$) immer bedeutender. Damit verringert sich mit zunehmender Geschwindigkeit im Laborsystem auch die Umlauffrequenz der Teilchen und stimmt dann nicht mehr mit der frequenzstabilen Wechselspannung überein.

1.4 Gegeben: Länge der Flugstrecke: $\Delta L = 8,4 \text{ m}$ und zeitlicher Abstand der Signale: $\Delta t = 34 \text{ ns}$ (abgelesen aus dem Oszilloskopbild).

1.4 a) Berechnung der Geschwindigkeit der Elektronen auf der Flugstrecke:

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{8,4 \text{ m}}{3,4 \cdot 10^{-8} \text{ s}} = 2,5 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

1.4 b) Gegeben: $U_a = 5,00 \cdot 10^5 \text{ V}$; $m_{\text{Elektron}} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Nach dem nichtrelativistischen Energieerhaltungssatz gilt: $E_{\text{elektr.}} = E_{\text{kin.}}$,

also: $e \cdot U_a = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Damit ergibt sich:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_a}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 5,00 \cdot 10^5 \text{ V}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 4,19 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

1.4 c) Die nichtrelativistisch berechnete Geschwindigkeit ist erheblich größer als die gemessene Geschwindigkeit, sogar größer als die Lichtgeschwindigkeit, was nach der speziellen Relativitätstheorie unmöglich ist.

1.5 a) Der Ansatz zur Herleitung der exakten Formel basiert ebenfalls auf dem Energiesatz, für die kinetische Energie der Teilchen wird nun allerdings der relativistische Zusammenhang verwendet. Der Energiesatz für die Elektronen lautet nun:

$$e \cdot U_a = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Das Umstellen nach v liefert die Endgeschwindigkeit der Elektronen für die angegebene Beschleunigungsspannung U_B .

1.5 b) Das Einsetzen der Werte aus 1.4 liefert:

$$v = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 - \frac{(511 \text{ keV})^2}{(511 \text{ keV} + 500 \text{ keV})^2}} = 2,59 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

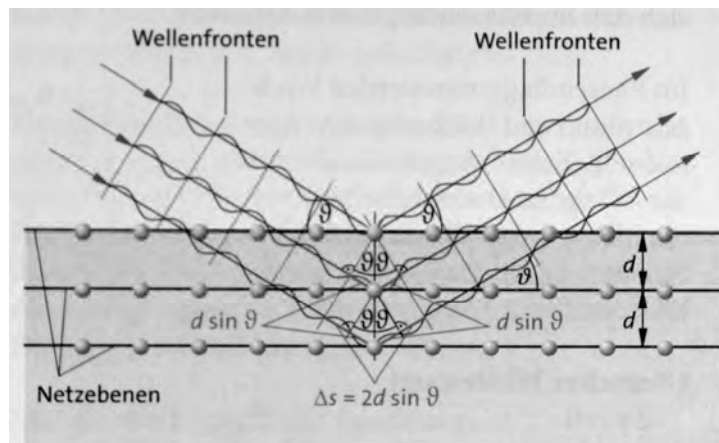
Das Ergebnis der Rechnung weicht nur ca. 4 % vom gemessenen Wert ab.

Die relativistische Formel für die Endgeschwindigkeit, und damit die spezielle Relativitätstheorie, wird in diesem Experiment bestätigt.

1.6 Die elektrischen Signale der Sensoren breiten sich auf den Kabeln mit Lichtgeschwindigkeit aus und benötigen eine gewisse Laufzeit, um das Oszilloskop zu erreichen. Die Laufzeiten der Signale sind vergleichbar mit der Driftzeit der Elektronen zwischen den Sensoren. Um die Zeitdifferenz zwischen beiden Sensorsignalen am Oszilloskop möglichst genau ablesen zu können, muss daher der Signalweg gleich lang sein.

Modelllösungen Aufgabe 2: Untersuchungen zur Natur der Elektronen

- 2.1 a) Das Muster zeigt das bekannte Interferenzbild, bestehend aus (zwei) konzentrischen Kreisen. Diese konzentrischen Kreise können entsprechend als Maxima verschiedener Ordnungen gedeutet werden. Die Maxima ergeben sich hierbei aus der atomaren Anordnung im Kristallgitter.
- 2.1 b) Das klassische Teilchenmodell würde eine kontinuierlich nach außen abnehmende Intensitätsverteilung liefern, jedoch kein Interferenzmuster.
- 2.2 a) Bragg'sche Reflexionsbedingung: Ein Beugungsmaximum ergibt sich bei einem Gangunterschied von $2 \cdot d \cdot \sin \delta = n \cdot \lambda$, wobei d der Netzebenenabstand, δ der Glanzwinkel, n die Beugungsordnung und λ die (Materie-)Wellenlänge bedeuten.
- 2.2 b) Der Prüfling muss eine der folgenden Abbildung ähnliche Skizze erstellen. In dieser Zeichnung müssen der Gangunterschied $\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sin \delta$, der Hauptnetzebenenabstand d sowie der Glanzwinkel δ kenntlich gemacht werden.



Zur Bragg'schen Reflexionsbedingung (Quelle: Metzler Physik, 4. Auflage. Hannover: Schroedel 2007, S. 335)

- 2.3 a) Die Abbildung 1 liefert für den Winkel δ den Zusammenhang $\tan(2\delta) = \frac{R}{L}$:

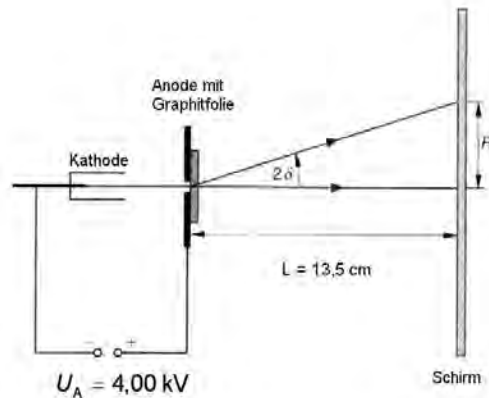
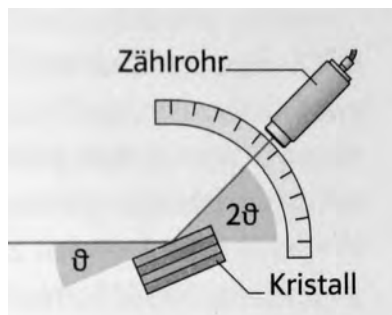


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Elektronenbeugungsröhre
(Quelle: Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, 3. Auflage. Hannover: Schroedel 1998, S. 386 (Schirmabstand an Aufgabentext angepasst))

Daher tritt in dieser Abbildung der Ablenkungswinkel 2δ und nicht δ auf.
Mit einer der folgenden Abbildung ähnlichen Skizze wird die in Abbildung 1 auftretende Winkelverdopplung 2δ als Gesamtablenkungswinkel begründet:



(Quelle: Impulse Physik, Oberstufe. Stuttgart: Klett 2007)

- 2.3 b) Für den Netzebenenabstand d_1 folgt aus $R_1 = 1,3 \text{ cm}$ und $L = 13,5 \text{ cm}$ mittels der vorstehenden Gleichung der Ablenkungswinkel (Glanzwinkel) $\delta_1 = 2,75^\circ$.
Für d_2 mit $R_2 = 2,2 \text{ cm}$ und $L = 13,5 \text{ cm}$ errechnet sich δ_2 zu $\delta_2 = 4,63^\circ$.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Hier wurde auf eine stärkere Rundung dieser Zwischenergebnisse verzichtet, um die nachfolgenden Rechnungen für die Wellenlängen nicht mit stärkeren Rundungsfehlern zu beeinträchtigen.

- 2.3 c) Da die beiden inneren Kreise betrachtet werden sollen, muss in der Bragg-Gleichung $n = 1$ angesetzt werden.

Einsetzen der zu $d_1 = 213 \text{ pm}$ und $d_2 = 123 \text{ pm}$ gehörenden, in b) berechneten Winkelwerte in die Bragg-Gleichung ergibt für die Elektronenwellenlänge λ die im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmenden Ergebnisse
 $\lambda_1 = 20,4 \text{ pm} \approx 20 \text{ pm}$ und $\lambda_2 = 19,9 \text{ pm} \approx 20 \text{ pm}$.

- 2.4 a) Nach de Broglie kann einem Elektron in Analogie zum Photon eine Wellenlänge zugeordnet werden:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \cdot v} \Leftrightarrow v = \frac{h}{m_e \cdot \lambda}, \text{ mit dem Energiesatz ergibt sich:}$$

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = \frac{1}{2} m_e \cdot \frac{h^2}{m_e^2 \cdot \lambda^2} = e \cdot U_A \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m_e \cdot U_A}}.$$

- 2.4 b) Bei $U_A = 4,00 \text{ kV}$ liefert de Broglies Theorie (Einsetzen der gegebenen Werte in obige Formel) eine Wellenlänge von $\lambda = 19,4 \text{ pm}$.

- 2.4 c) Der Wellenlängenwert aus Aufgabe b) ist im Rahmen der Messgenauigkeit (nahezu) identisch mit dem nach de Broglie vorhergesagten Wert. Diese gute Übereinstimmung rechtfertigt die zur Herleitung der Bragg'schen Reflexionsbedingung im Ansatz getroffene Interferenzannahme für Elektronen, deren Wellencharakter de Broglie postulierte.

- 2.5 a) Wenn die Beschleunigungsspannung U_A (kontinuierlich) erhöht wird, erhöht sich die kinetische Energie der Elektronen und damit deren Geschwindigkeit (kontinuierlich).

- 2.5 b) Nach der de Broglie'schen Beziehung $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$ wird dann die Elektronenwellenlänge kleiner.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Hier kann auch mit Hilfe der in 2.4 a) hergeleiteten Formel argumentiert werden: Da U_A im Nenner steht, wird bei Vergrößerung von U_A die Elektronenwellenlänge kleiner.

Für eine kleinere Wellenlänge als vorher folgt aus der Bragg-Gleichung, dass bei unverändertem Netzebenenabstand d der Glanzwinkel δ kleiner werden muss. Dies

bedeutet schließlich nach $\tan(2\delta) = \frac{R}{L}$, dass bei unverändertem Schirmabstand L

auch der Radius R der Beugungsringe (kontinuierlich) kleiner werden muss.

6.2 Teilleistungen – Kriterien

Aufgabe 1: Beschleunigung geladener Teilchen – direkter Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit

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.	4
b)	begründet die Konstanz der kinetischen Energie bei Bewegung im Magnetfeld durch die fehlende Komponente der Lorentzkraft in Bewegungsrichtung.	4
c1)	verwendet den Ansatz: Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft, $F_L = F_Z$.	2
c2)	leitet die Formel für $f_{U_{ml}}$ her.	4

Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	bestimmt die Anzahl der Umläufe des α -Teilchens im Zyklotron.	2
b1)	berechnet die Umlauffrequenz des Teilchens im Zyklotron.	3
b2)	berechnet die Verweildauer des Teilchens im Zyklotron.	2
c1)	bestimmt die Endgeschwindigkeit des Teilchens nichtrelativistisch.	3
c2)	verwendet den Ansatz: Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft, $F_L = \frac{m \cdot v}{r}$, und bestimmt damit den maximalen Bahnradius.	4

Teilaufgabe 1.3

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
1	erklärt die Notwendigkeit der Frequenzanpassung durch die relativistische Massenzunahme sehr schneller Teilchen anhand der Formel für die Umlauffrequenz.	3
2	gibt begründet an, dass die Wechselfrequenz aufgrund dieses Effekts reduziert werden muss.	2

Teilaufgabe 1.4

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	liest aus dem Diagramm die Flugzeit der Elektronen ab und berechnet damit die Geschwindigkeit der Elektronen.	3
b1)	stellt den nichtrelativistischen Energieansatz für die Teilchen im Beschleuniger auf: $E_{\text{kin. nichtrel.}} = e \cdot U$.	2
b2)	berechnet mit dem Energieansatz die Endgeschwindigkeit der Elektronen bei der Messung.	3
c)	stellt die klare Diskrepanz zwischen gemessener und nichtrelativistisch berechneter Elektronengeschwindigkeit fest.	3

Teilaufgabe 1.5

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	gibt den relativistischen Energieansatz zur Berechnung der Endgeschwindigkeit an und begründet dies mit der hohen Energie der Elektronen.	5
b)	berechnet die Endgeschwindigkeit mit der Formel.	4

Teilaufgabe 1.6

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
1	erläutert, dass die Laufzeiten der Signale von den Sensoren zum Oszilloskop von der Kabellänge abhängen und in der gleichen Größenordnung liegen wie die Flugzeit der Elektronen.	4

Aufgabe 2: Untersuchungen zur Natur der Elektronen**Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	deutet das Auftreten der Ringe als Interferenzbild.	2
a2)	identifiziert die Doppelkreise als Maxima verschiedener Beugungsordnungen.	2
b)	begründet, dass dies mit dem klassischen Teilchenmodell für Elektronen nicht erklärt werden kann.	3

Teilaufgabe 2.2

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	nennt die Bragg'sche Reflexionsbedingung.	2
a2)	benennt die in der Bragg'schen Reflexionsbedingung auftretenden Größen.	2
b)	erklärt die Bragg-Bedingung anhand einer geeigneten Skizze.	6

Teilaufgabe 2.3

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet die Winkelverdopplung anhand einer geeigneten Skizze.	5
b1)	stellt die tan-Beziehung für den Quotienten R/L auf.	2
b2)	berechnet für d_1 und d_2 die Werte für die Ablenkungswinkel.	2
c1)	erklärt, dass in der Bragg-Gleichung $n = 1$ angesetzt werden muss.	2
c2)	berechnet für d_1 und d_2 die Elektronenwellenlänge.	3

Teilaufgabe 2.4

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	stellt die Hypothese von de Broglie auf.	2
a2)	leitet unter Benutzung des Energieansatzes für die beschleunigten Elektronen aus der De-Broglie-Formel eine Formel zur Berechnung von λ in Abhängigkeit von U_A her.	6
b)	berechnet für den angegebenen U_A -Wert die Wellenlänge λ .	4
c)	erörtert die Übereinstimmung des theoretischen und experimentellen Wertes.	2

Teilaufgabe 2.5

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	beschreibt, wie sich das Beugungsbild bei kontinuierlicher Erhöhung der Beschleunigungsspannung verändert.	2
b)	begründet, warum die Radien der Beugungsmaxima kontinuierlich kleiner werden.	5

7. Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: _____ Kursbezeichnung: _____

Schule: _____

Aufgabe 1: Beschleunigung geladener Teilchen – direkter Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit

Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK ²	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	begründet den Energiezuwachs ...	4			
b)	begründet die Konstanz ...	4			
c1)	verwendet den Ansatz ...	2			
c2)	leitet die Formel ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.1	14			

Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	bestimmt die Anzahl ...	2			
b1)	berechnet die Umlauffrequenz ...	3			
b2)	berechnet die Verweildauer ...	2			
c1)	bestimmt die Endgeschwindigkeit ...	3			
c2)	verwendet den Ansatz ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.2	14			

Teilaufgabe 1.3

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
1	erklärt die Notwendigkeit ...	3			
2	gibt begründet an ...	2			
	Summe Teilaufgabe 1.3	5			

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Teilaufgabe 1.4

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	liest aus dem ...	3			
b1)	stellt den nichtrelativistischen ...	2			
b2)	berechnet mit dem ...	3			
c)	stellt die klare ...	3			
	Summe Teilaufgabe 1.4	11			

Teilaufgabe 1.5

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	gibt den relativistischen ...	5			
b)	berechnet die Endgeschwindigkeit ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.5	9			

Teilaufgabe 1.6

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
1	erläutert, dass die ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.6	4			
	Summe Teilaufgaben 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 und 1.6	57			

Aufgabe 2: Untersuchungen zur Natur der Elektronen**Teilaufgabe 2.1**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	deutet das Auftreten ...	2			
a2)	identifiziert die Doppelkreise ...	2			
b)	begründet, dass dies ...	3			
Summe Teilaufgabe 2.1		7			

Teilaufgabe 2.2

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	nennt die Bragg'sche ...	2			
a2)	benennt die in ...	2			
b)	erklärt die Bragg-Bedingung ...	6			
Summe Teilaufgabe 2.2		10			

Teilaufgabe 2.3

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	begründet die Winkelverdopplung ...	5			
b1)	stellt die tan-Beziehung ...	2			
b2)	berechnet für d_1 ...	2			
c1)	erklärt, dass in ...	2			
c2)	berechnet für d_1 ...	3			
Summe Teilaufgabe 2.3		14			

Teilaufgabe 2.4

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a1)	stellt die Hypothese ...	2			
a2)	leitet unter Benutzung ...	6			
b)	berechnet für den ...	4			
c)	erörtert die Übereinstimmung ...	2			
	Summe Teilaufgabe 2.4	14			

Teilaufgabe 2.5

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	beschreibt, wie sich ...	2			
b)	begründet, warum die ...	5			
	Summe Teilaufgabe 2.5	7			
	Summe Teilaufgaben 2.1, 2.2, 2.3, 2,4 und 2.5	52			
	Summe der 1. und 2. Aufgabe	109			

	Summe insgesamt	109			
	aus der Punktsumme resultierende Note				
	Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST				
	Paraphe				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsummen 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:

Note	Punkte	Erreichte Punktzahl
sehr gut plus	15	109 – 104
sehr gut	14	103 – 98
sehr gut minus	13	97 – 93
gut plus	12	92 – 88
gut	11	87 – 82
gut minus	10	81 – 77
befriedigend plus	9	76 – 71
befriedigend	8	70 – 66
befriedigend minus	7	65 – 60
ausreichend plus	6	59 – 55
ausreichend	5	54 – 49
ausreichend minus	4	48 – 43
mangelhaft plus	3	42 – 36
mangelhaft	2	35 – 29
mangelhaft minus	1	28 – 22
ungenügend	0	21 – 0



Name: _____

Abiturprüfung 2011

Physik, Leistungskurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe 1: Induktions- und Schwingungsvorgänge

In dieser Aufgabe geht es um die elektromagnetische Induktion und elektromagnetische Schwingungen.

- 1.1 In dem vorgeführten Experiment des beschleunigten Herausziehens einer rechteckigen Induktionsspule mit der Windungszahl $n = 5$ und der Breite $l = 4$ cm aus einem homogenen Magnetfeld der Stärke $B = 0,055$ T wird die Induktionsspannung U_i als Funktion der Zeit t gemessen.

Abbildung 1 zeigt die Versuchsanordnung.



Abbildung 1: Rechteckige Induktionsspule teilweise im homogenen Magnetfeld

Im Experiment erhält man die folgenden Messwerte:

t in s	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
U_i in mV	0,00	0,55	1,65	2,70	3,90	4,95	5,90



Name: _____

- a) Fertigen Sie eine Skizze des Versuchs an und beschreiben Sie das vorgeführte Experiment.
- b) Stellen Sie die oben gegebene Messreihe grafisch dar und stellen Sie anhand dieser Darstellung eine Hypothese auf für den Zusammenhang zwischen der Induktionsspannung U_i und der Zeit t .
- c) Erläutern Sie, ausgehend vom Induktionsgesetz, warum beim Herausziehen der Spule aus dem Magnetfeld konstanter Stärke eine Induktionsspannung auftritt.
- d) Begründen Sie, dass unter der Voraussetzung des Vorliegens einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung der Induktionsspule die Induktionsspannung U_i proportional zur Zeit t anwächst.
- e) Zeigen Sie, dass für den Betrag a der Beschleunigung der Induktionsspule gilt:

$$a = \frac{U_i}{n \cdot B \cdot l \cdot t}.$$

- f) Bestimmen Sie anhand der grafischen Darstellung der Messreihe in Aufgabenteil d) die Beschleunigung a , mit der die Spule im Magnetfeld beschleunigt wird.

(38 Punkte)

1.2 Die rechteckige Induktionsspule wird nun an einer Feder aufgehängt und schwingt harmonisch in einem homogenen Magnetfeld, ohne dabei vollständig in das Magnetfeld einzutauchen. Dabei ist die Spule so angebracht, dass die Spulenachse parallel zu den Magnetfeldlinien verläuft und dass sich das obere Leiterstück nur außerhalb und das untere immer innerhalb des Magnetfeldes bewegt.

Gegeben sind die Werte:

Federkonstante: $D = 1,85 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, Masse der Induktionsspule: $m = 30 \text{ g}$,

Amplitude der Schwingung: $s_m = 2,0 \text{ cm}$, Magnetfeld: $B = 0,055 \text{ T}$.

Für die ungedämpfte harmonische Federschwingung gilt:

$$s(t) = s_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ mit } \omega = \sqrt{\frac{D}{m}}.$$



Name: _____

- a) Zeigen Sie, dass sich, ausgehend vom Induktionsgesetz, für den Idealfall einer ungedämpften Schwingung die Induktionsspannung U_i als Funktion der Zeit t berechnen lässt zu: $U_i(t) = -s_m \cdot \omega \cdot n \cdot l \cdot B \cdot \cos(\omega t)$.
- b) Berechnen Sie den Maximalwert U_m der bei der o. g. Schwingung aufgetretenen Induktionsspannung.

Im realen Experiment ist die Federschwingung gedämpft. Das vom Schreiber aufgezeichnete $U_i(t)$ -Diagramm zeigt daher die in Abbildung 2 dargestellte gedämpfte Schwingung.

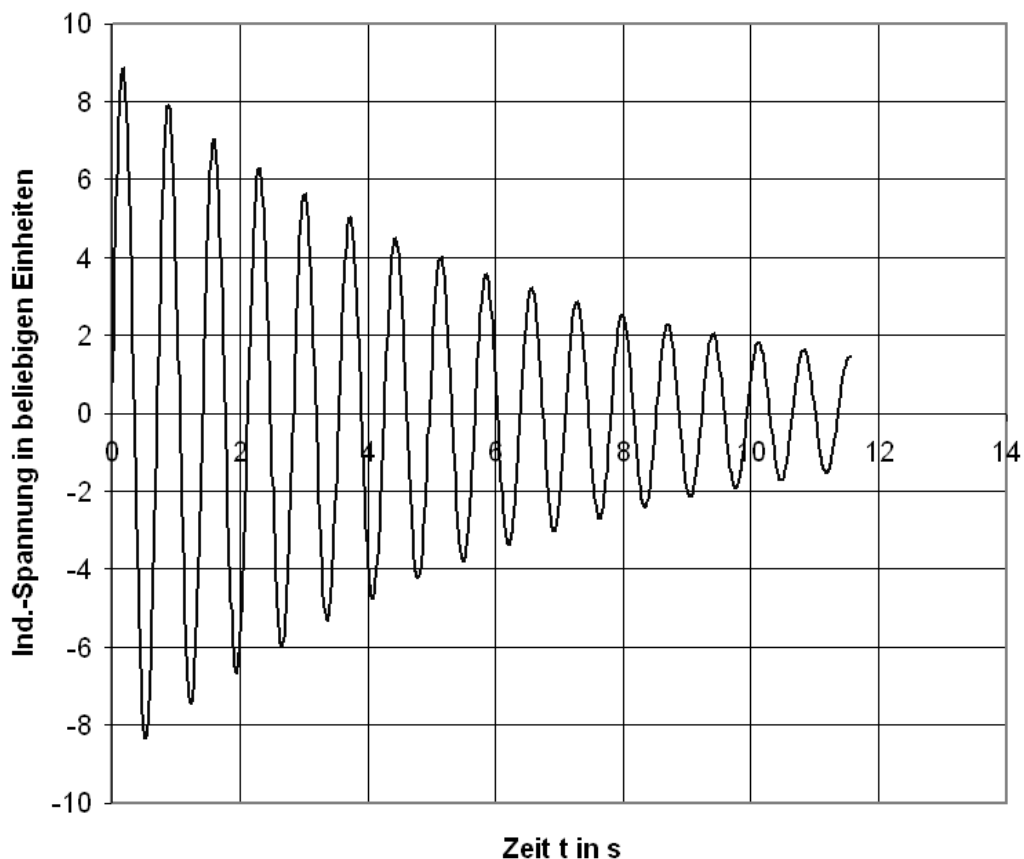


Abbildung 2: Gedämpfte Schwingung

- c) Zeigen Sie mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 2, dass die Amplitude U_m dieser gedämpften Schwingung gemäß $U_m(t) = U_0 \cdot e^{-\delta t}$ exponentiell abnimmt. Ermitteln Sie aus dem Diagramm in Abbildung 2 den Wert der Dämpfungs-konstanten δ . (22 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.
- Bestimmen Sie für ein mit $U_b = 25 \text{ kV}$ beschleunigtes Elektron die prozentualen Abweichungen von Masse und Geschwindigkeit, die sich im Vergleich einer relativistischen zu einer klassischen Rechnung ergeben.

(Hinweis: Die Ladung des Elektrons ist $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, die Ruhemasse des Elektrons ist $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.) \quad (13 \text{ Punkte})$$

2.2 Bei der Spektralanalyse trifft die Röntgenstrahlung unter verschiedenen Winkeln ϑ auf einen Einkristall.

- Leiten Sie mit Hilfe einer kommentierten Skizze die Bragg-Gleichung $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$ her.
- Erläutern Sie, warum in der Röntgenröhre der Arm mit dem Detektor immer auf den doppelten Winkel 2ϑ zum Primärstrahl eingestellt werden muss, wenn der Kristall im Winkel ϑ 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 1 dargestellt. Deutlich sind die K_{α} - und die K_{β} -Linie in der Mitte zu erkennen.

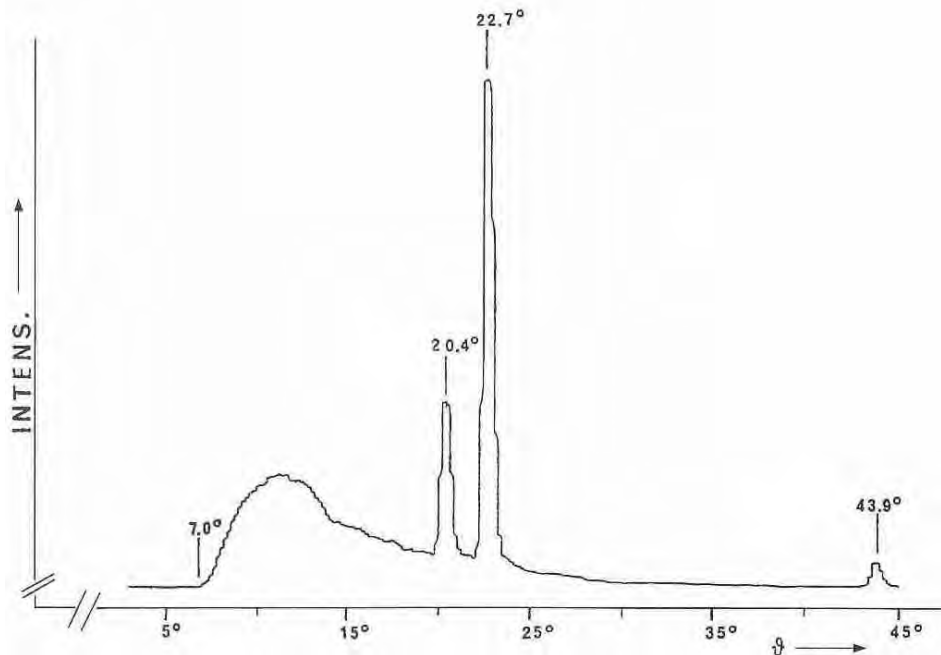


Abbildung 1: Röntgenspektrum einer Kupferanode nach Beugung an einem LiF-Kristall, Beschleunigungsspannung $U_b = 25 \text{ kV}$ (Quelle: Phywe-Handbuch, leicht verändert)

- Erläutern Sie das Röntgenspektrum in Abbildung 1.
- Bestimmen Sie rechnerisch für die verwendete Beschleunigungsspannung von $U_b = 25 \text{ kV}$ den Grenzwinkel ϑ_{\min} .
- Bestimmen Sie die Wellenlängen aller (erkennbaren) charakteristischen Linien.
[Zur Kontrolle: $\lambda(\text{Cu-}K_{\alpha}) = 155,4 \text{ pm}$] (14 Punkte)

2.4 Das Moseley-Gesetz lautet $\Delta E = 13,6 \text{ eV} \cdot (Z - 1)^2 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$.

- Erklären Sie die in dieser Gleichung auftretenden Größen ΔE , Z , n und m , die Konstante $13,6 \text{ eV}$ sowie die physikalische Bedeutung des Terms $(Z - 1)^2$.
- Berechnen Sie die Wellenlängen der K_{α} - und der K_{β} -Linie von Kupfer ($Z = 29$) mit Hilfe des Moseley-Gesetzes und vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen, die Sie in 2.3 c) ermittelt haben. (10 Punkte)



Name: _____

- 2.5 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 2 dargestellt.

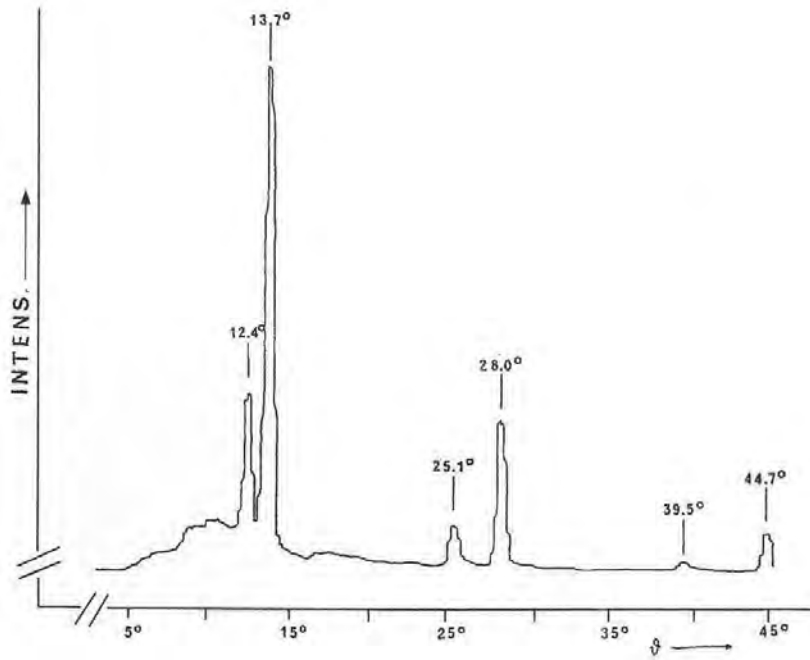


Abbildung 2: Röntgenspektrum einer Kupferanode nach Beugung an einem KBr-Kristall, Beschleunigungsspannung $U_b = 25$ kV (Quelle: Phywe-Handbuch, leicht verändert)

- Erläutern Sie die Unterschiede zwischen den charakteristischen Spektren in Abbildung 1 und 2 sowie deren Ursache.
 - Begründen Sie die mit ϑ wachsenden Abstände benachbarter Linien.
 - Bestimmen Sie den Netzebenenabstand d für den KBr-Kristall. (12 Punkte)
- 2.6 Für die Röntgenstrukturanalyse unbekannter Kristalle benötigt man möglichst monoenergetische Röntgenstrahlung, also Röntgenstrahlung mit einer bestimmten Wellenlänge. In Abbildung 3 ist das Absorptionsvermögen verschiedener Materialien vereinfacht dargestellt.



Name: _____

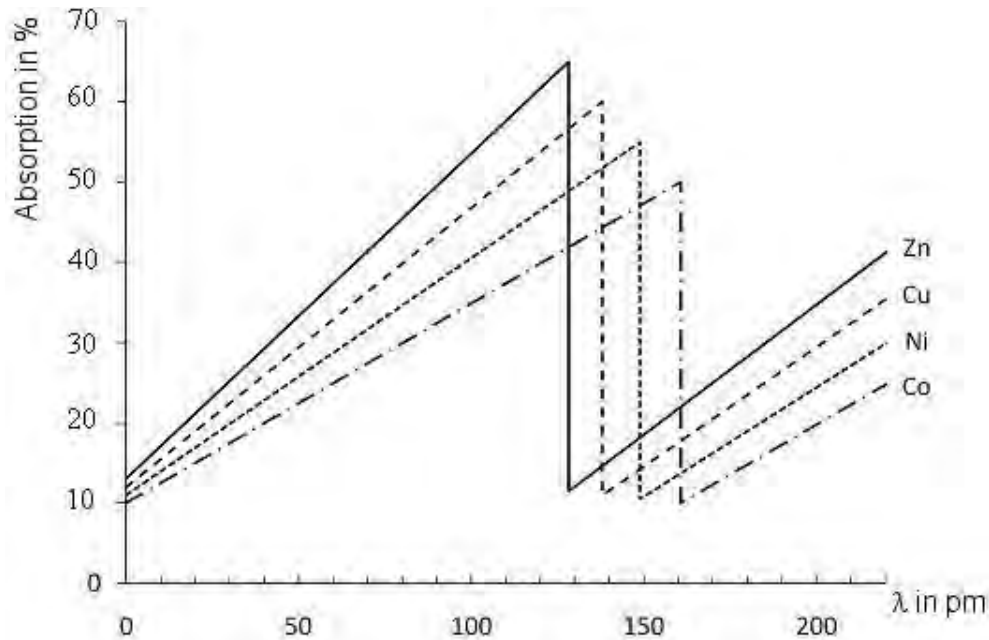


Abbildung 3: Schematische Röntgenabsorptionsspektren von Zink, Kupfer, Nickel und Cobalt

- a) Begründen Sie mit Hilfe der in Abbildung 3 gezeigten Röntgenabsorptionsspektren, aus welchem der dort angegebenen Materialien ein Filter bestehen sollte, um aus der Röntgenstrahlung mit dem Spektrum aus Abbildung 1 möglichst monochromatische 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, Leistungskurs

1. Aufgabenart

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

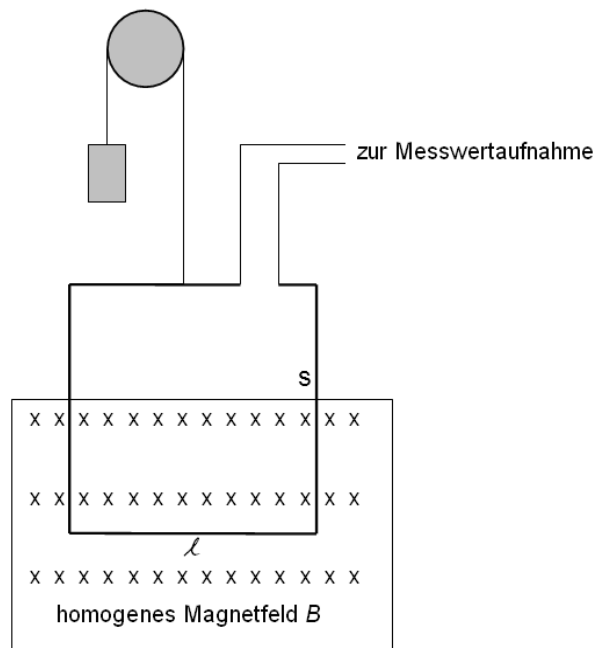
2. Aufgabenstellung¹

Aufgabe 1: Induktions- und Schwingungsvorgänge	(60 Punkte)
Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse	(66 Punkte)

3. Materialgrundlage

Hinweise zum Experiment in Aufgabe 1

Skizze:

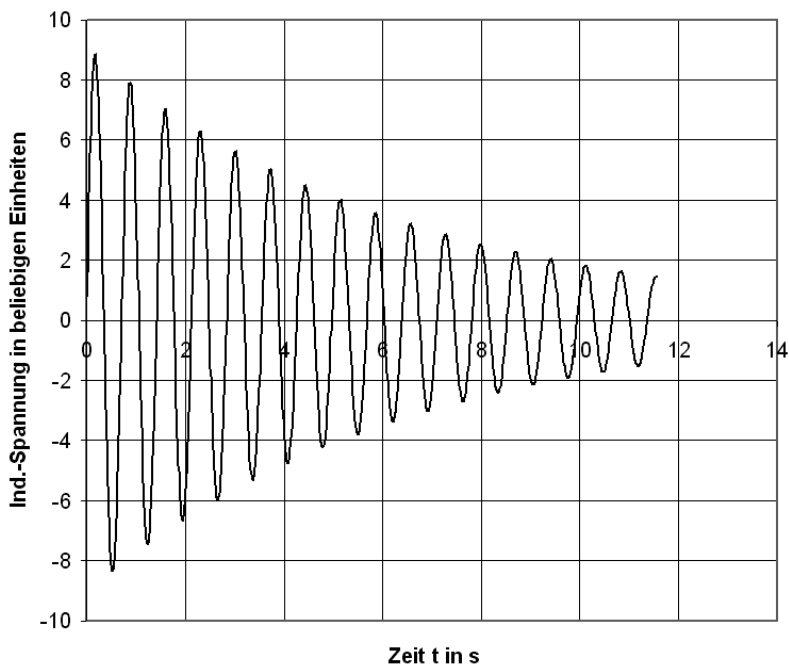


¹ Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

Anleitungstext zur Versuchsdurchführung für die Lehrkraft

Eine rechteckige Induktionsspule wird über eine Umlenkrolle aus einem homogenen Magnetfeld beschleunigt herausgezogen. Als Induktionsspule lässt sich eine kleine Aluminiumspule (hier: $n = 5$) verwenden. Zur Demonstration des Anstiegs der Induktionsspannung genügt ein Zeigerinstrument mit Mikrovoltverstärker oder ein t-y-Schreiber. Zur Auswertung werden die mitgelieferten Messwerte benutzt. Das Magnetfeld lässt sich hinreichend homogen entsprechend dem Versuchsaufbau zur Stromwaage erzeugen.

Im zweiten Teil des Versuchs wird die Induktionsspule an einer Feder aufgehängt und schwingt im gleichen Magnetfeld, ohne vollständig in das Magnetfeld einzutauchen. Die Induktionsspannung sollte mit einem Schreiber zu Demonstrationszwecken aufgezeichnet werden. Durch Veränderung der Masse des Schwingkörpers kann die Schwingungsdauer passend beeinflusst werden. Die Auswertung durch die Schülerinnen und Schüler/Studierenden erfolgt hier mit Hilfe des beigefügten Diagramms.



4. Bezüge zu den Vorgaben 2011

1. Inhaltliche Schwerpunkte

Aufgabe 1:

- Elektromagnetismus
 - Elektromagnetische Induktion, Induktionsgesetz
- Elektromagnetische Schwingungen

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

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

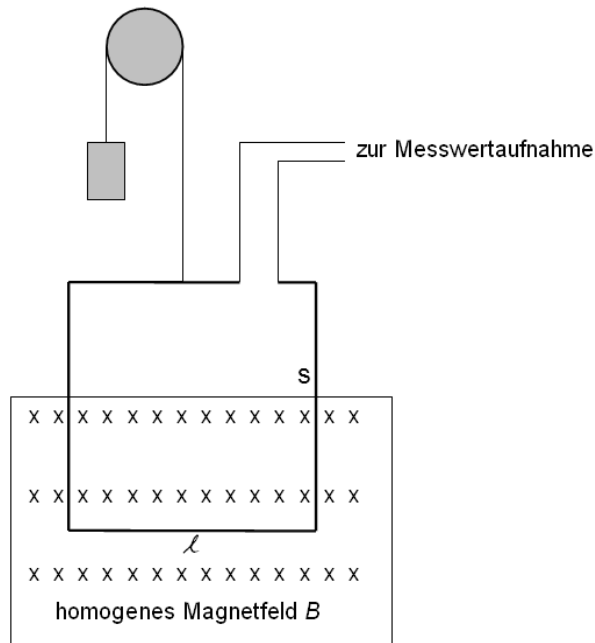
Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

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: Induktions- und Schwingungsvorgänge

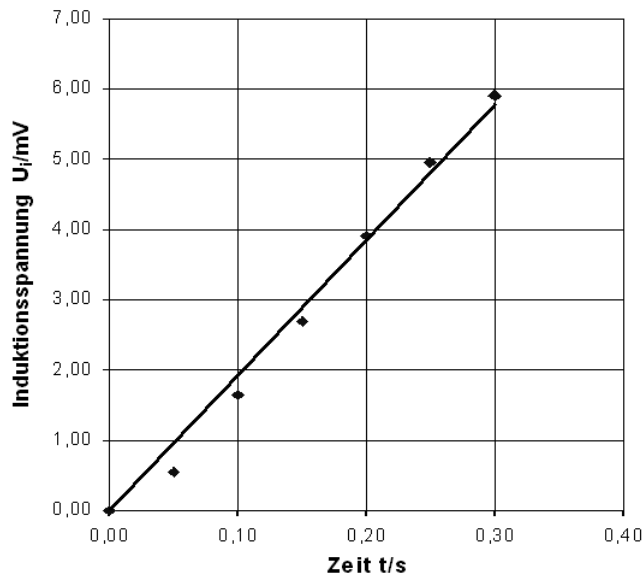
1.1 a) Skizze des Versuchsaufbaus:



Eine rechteckige Induktionsspule ist so in einem eng begrenzten homogenen Magnetfeld angebracht, dass die Spulenachse parallel zu den Feldlinien verläuft. Ein Massestück ist mittels eines Seils über eine Umlenkrolle mit der Spule verbunden. Die Gewichtskraft des Massestücks ist größer als die Gewichtskraft der Spule. Dadurch wirkt eine resultierende Kraft auf die Spule, die eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung a verursacht. Durch die Bewegung der Spule relativ zum Magnetfeld wird eine Spannung induziert.

Über ein Messwerterfassungssystem wird die in Abhängigkeit von der Zeit t sich ergebende induzierte Spannung U_i gemessen und notiert.

1.1 b) Grafische Darstellung der Messreihe:



Hypothese: Induktionsspannung U_i und Zeit t sind zueinander proportional, da es sich in der grafischen Darstellung um eine Ursprungs(halb)gerade handeln könnte.

1.1 c) Mit dem Induktionsgesetz $U_i = -n \cdot \dot{\Phi}$ folgt bei konstanter Stärke B des magnetischen Feldes: $U_i = -n \cdot B \cdot \dot{A}$. Da sich der im Magnetfeld befindliche Anteil der Fläche der Spule mit der Zeit verändert, entsteht eine Induktionsspannung.

1.1 d) Nach Aufgabenteil c) ist $U_i = -n \cdot B \cdot \dot{A}$. Es ist weiter $A = l \cdot s = l \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$, also gilt: $\dot{A} = l \cdot \dot{s} = l \cdot a \cdot t$. Damit ergibt sich: $U_i = -n \cdot B \cdot l \cdot a \cdot t$, also $U_i \sim t$.

1.1 e) Mit $U_i = -n \cdot B \cdot l \cdot a \cdot t$ ergibt sich unmittelbar: $a = \frac{U_i}{n \cdot B \cdot l \cdot t}$.

- 1.1 f) Aus der grafischen Darstellung der Aufgabe b) kann man die Steigung entnehmen:

$$m = \frac{\Delta U_i}{\Delta t} = 0,0195 \frac{\text{V}}{\text{s}}.$$

Damit errechnet sich der Betrag der Beschleunigung zu:

$$m = n \cdot B \cdot l \cdot a \Leftrightarrow a = \frac{m}{n \cdot B \cdot l}.$$

Mit den gegebenen Zahlenwerten also: $a \approx 1,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

- 1.2 a) Nach dem Induktionsgesetz gilt:

$$U_i = -n \cdot \dot{\Phi}(t) = -n \cdot B \cdot \dot{A}(t) = -n \cdot B \cdot l \cdot \dot{s}(t).$$

Damit folgt mit $\dot{s}(t) = s_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$:

$$U_i(t) = -s_m \cdot \omega \cdot n \cdot B \cdot l \cdot \cos(\omega t) = -U_m \cdot \cos(\omega t)$$

und wegen $\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$ also: $U_m = s_m \cdot n \cdot B \cdot l \cdot \sqrt{\frac{D}{m}}$.

- 1.2 b) Einsetzen der Messwerte ergibt: $U_m \approx 1,7 \text{ mV}$.

- 1.2 c) Das aufgezeichnete $U_i(t)$ -Diagramm zeigt, dass die Quotienten zweier aufeinander

folgender Amplituden nahezu konstant sind: $\frac{U_{m(i+1)}}{U_{m(i)}} = k \quad (i = 0, 1, 2, \dots)$.

Es handelt sich also um eine zeitlich exponentielle Abnahme der Amplituden, die

sich allgemein mit $U_m(t) = U_{m(0)} \cdot e^{-\delta t}$ beschreiben lässt, wobei $\delta = -\frac{\ln k}{T}$ ist.

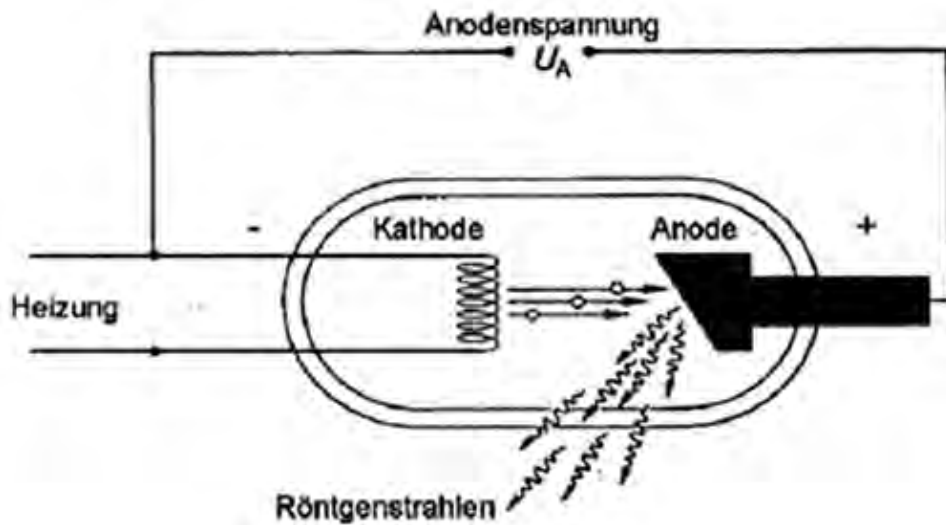
Hinweis für die korrigierende Lehrkraft: Selbstverständlich ist hier auch eine grafische Auswertung, etwa durch einfach logarithmisches Auftragen der Amplitudenwerte, möglich.

Berechnung der Dämpfungskonstanten δ :

Für die Quotienten aus zwei benachbarten Amplituden ermittelt man aus dem Diagramm den Durchschnittswert $k \approx 0,89$. Die Schwingungsdauer T lässt sich aus dem Diagramm zu $T \approx 0,70 \text{ s}$ ermitteln. Daraus folgt: $\delta \approx 0,17 \text{ s}^{-1}$.

Modelllösungen Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse

2.1 a)



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.

2.1 b) Die klassische Rechnung mit dem Ansatz $eU = \frac{1}{2}m_0v^2$ aufgrund der Energieerhaltung liefert die Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}} = 9,377 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}} = 9,377 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die relativistische Rechnung mit dem energetischen Ansatz $m_0c^2 + eU = mc^2$

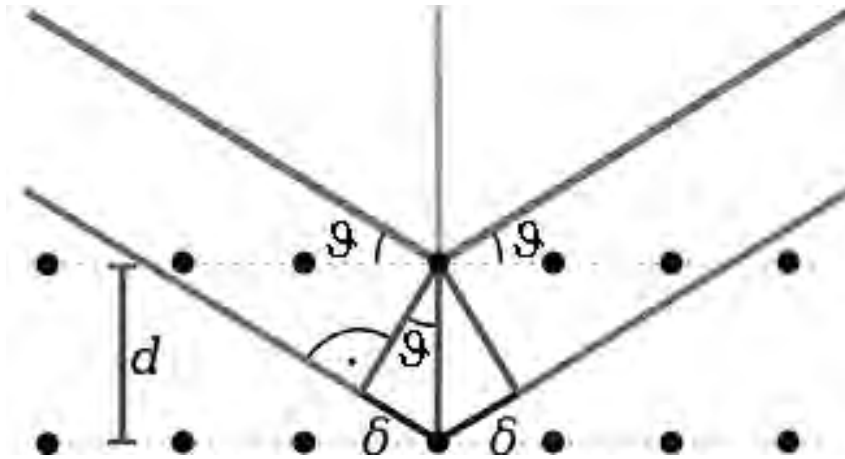
liefert zunächst die relativistische Masse $m = \frac{m_0c^2 + eU}{c^2} = 9,555 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Des Weiteren gilt $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, so dass man durch Umformen die relativistische

Geschwindigkeit $v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{m_0^2}{m^2}} = 9,049 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erhält.

Relativistisch gerechnet ist die Masse etwa 4,9 % größer und die Geschwindigkeit etwa 3,5 % kleiner als klassisch gerechnet.

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 $\delta = d \cdot \sin\vartheta$. 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 ϑ an einem LiF-Einkristall gebeugt wurde. Jeder Winkel ϑ entspricht dabei einer bestimmten Wellenlänge λ 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_α -Linie) bei $\vartheta = 22,7^\circ$ und das für den Übergang von der M- zur K-Schale (K_β -Linie) bei $\vartheta = 20,4^\circ$ deutlich zu erkennen sind. Das Maximum bei $\vartheta = 43,9^\circ$ gehört zur 2. Beugungsordnung der K_β -Linie.

- 2.3 b) Aus der Maximalenergie von $E_{\max} = 25 \text{ keV}$ ergibt sich die minimale Wellenlänge

$$\lambda_{\min} \text{ gemäß } E_{\max} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\min}}. \text{ Man erhält } \lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{E_{\max}} = 49,6 \text{ pm}. \text{ Aus dieser}$$

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_α - und K_β -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 Moseley-Gesetz beschreibt die Energie ΔE der Röntgenphotonen des charakteristischen Spektrums bei einem Atom mit der Kernladungszahl Z . Die Röntgenphotonen unterscheiden sich von den Photonen der Wasserstoffserien – 13,6 eV ist die Ionisationsenergie des Wasserstoffatoms – durch den Faktor $(Z - 1)^2$, der die größere Kernladung Z berücksichtigt, vermindert um die Ladung eines Abschirmelektrons, das sich nach Entfernung eines Elektrons aus der K-Schale noch in der K-Schale befindet.
 n und m sind die Quantenzahlen der Energieniveaus, zwischen denen die Übergänge stattfinden.

- 2.4 b) Für Übergänge aus der L-Schale bzw. M-Schale in die K-Schale gilt $m = 2$ bzw.

$$m = 3 \text{ und } n = 1. \text{ Mit } Z = 29 \text{ für Kupfer ergeben sich aus } \Delta E = \frac{hc}{\lambda} \text{ die Werte}$$

$$\lambda(\text{Cu-}K_\alpha) = 155,1 \text{ pm} \text{ und } \lambda(\text{Cu-}K_\beta) = 130,8 \text{ pm}. \text{ Die Abweichungen der}$$

berechneten von den gemessenen Wellenlängen sind gering. Sie fallen bei der K_β -Linie größer aus als bei der K_α -Linie.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Es wird an dieser Stelle nicht erwartet, dass die etwas größere Abweichung bei der K_β -Linie mit einer von 1 abweichenden Abschirmzahl begründet wird.

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

2.5 b) Die mit höherer Beugungsordnung wachsenden Abstände zwischen der K_{β} - und der K_{α} -Linie sind durch den Sinus in der Bragg-Gleichung (und die damit verbundene Nichtlinearität) zu erklären.

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

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

2.6 a) Um möglichst monoenergetische Röntgenstrahlung zu erzeugen, kann man hier sinnvollerweise die Cu- K_{α} -Linie durchlassen und den Rest des Spektrums, insbesondere die Cu- K_{β} -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_{β} -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.

- 2.6 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: Induktions- und Schwingungsvorgänge

Teilaufgabe 1.1

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	fertigt eine Versuchsskizze an.	4
a2)	beschreibt das Demonstrationsexperiment.	6
b1)	stellt die gegebene Messreihe grafisch dar.	4
b2)	stellt eine Hypothese auf für den Zusammenhang zwischen U_i und t .	2
c)	erläutert das Auftreten einer Induktionsspannung.	4
d)	begründet die Proportionalität zwischen Induktionsspannung und Zeit.	5
e)	zeigt, dass sich der formelmäßig gegebene Wert a der Beschleunigung ergibt.	5
f1)	entnimmt dem Diagramm die Steigung.	4
f2)	bestimmt den (konkreten) Wert der Beschleunigung a .	4

Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	berechnet die Induktionsspannung als Funktion der Zeit.	8
b)	bestimmt den Maximalwert der Induktionsspannung.	4
c1)	zeigt, dass die Amplitude der gedämpften Schwingung exponentiell abnimmt.	6
c2)	ermittelt den Wert der Dämpfungskonstanten.	4

Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse**Teilaufgabe 2.1**

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	skizziert den Aufbau einer Röntgenröhre.	2
a2)	beschreibt die Funktionsweise einer Röntgenröhre.	3
b)	bestimmt die prozentualen Abweichungen von Masse und Geschwindigkeit, die sich relativistisch im Vergleich zur klassischen Rechnung ergeben.	8

Teilaufgabe 2.2

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	leitet mit Hilfe einer kommentierten Skizze die Bragg-Gleichung 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 1.	5
b)	bestimmt rechnerisch den Grenzwinkel ϑ_{\min} .	5
c)	bestimmt die Wellenlängen aller (erkennbaren) charakteristischen Linien.	4

Teilaufgabe 2.4

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	erklärt die verschiedenen Größen in der Gleichung.	5
b)	berechnet die Wellenlängen der K_{α} -Linie und der K_{β} -Linie mit Hilfe des Moseley-Gesetzes und vergleicht die Ergebnisse mit denen in 2.3 c).	5

Teilaufgabe 2.5

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a1)	erläutert die Unterschiede zwischen den charakteristischen Spektren in Abbildung 1 und 2.	4
a2)	erläutert deren Ursache.	3
b)	begründet die mit ϑ wachsenden Abstände benachbarter Linien.	2
c)	bestimmt den Netzebenenabstand d für den KBr-Kristall.	3

Teilaufgabe 2.6

	Anforderungen	maximal erreichbare Punktzahl
	Der Prüfling	
a)	begründet mit Hilfe der in Abbildung 3 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: Induktions- und Schwingungsvorgänge**Teilaufgabe 1.1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK ²	ZK	DK
	Der Prüfling				
a1)	fertigt eine Versuchsskizze ...	4			
a2)	beschreibt das Demonstrationsexperiment.	6			
b1)	stellt die gegebene ...	4			
b2)	stellt eine Hypothese ...	2			
c)	erläutert das Auftreten ...	4			
d)	begründet die Proportionalität ...	5			
e)	zeigt, dass sich ...	5			
f1)	entnimmt dem Diagramm ...	4			
f2)	bestimmt den (konkreten) ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.1	38			

Teilaufgabe 1.2

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	berechnet die Induktionsspannung ...	8			
b)	bestimmt den Maximalwert ...	4			
c1)	zeigt, dass die ...	6			
c2)	ermittelt den Wert ...	4			
	Summe Teilaufgabe 1.2	22			
	Summe Teilaufgaben 1.1 und 1.2	60			

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Aufgabe 2: Röntgenstrukturanalyse**Teilaufgabe 2.1**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	skizziert den Aufbau ...	2			
a2)	beschreibt die Funktionsweise ...	3			
b)	bestimmt die prozentualen ...	8			
Summe Teilaufgabe 2.1		13			

Teilaufgabe 2.2

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	leitet mit Hilfe ...	6			
b)	erläutert, warum der ...	3			
Summe Teilaufgabe 2.2		9			

Teilaufgabe 2.3

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	erläutert das Röntgenspektrum ...	5			
b)	bestimmt rechnerisch den ...	5			
c)	bestimmt die Wellenlängen ...	4			
Summe Teilaufgabe 2.3		14			

Teilaufgabe 2.4

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	erklärt die verschiedenen ...	5			
b)	berechnet die Wellenlängen ...	5			
Summe Teilaufgabe 2.4		10			

Teilaufgabe 2.5

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a1)	erläutert die Unterschiede ...	4			
a2)	erläutert deren Ursache.	3			
b)	begründet die mit ...	2			
c)	bestimmt den Netzebenenabstand ...	3			
	Summe Teilaufgabe 2.5	12			

Teilaufgabe 2.6

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	Der Prüfling				
a)	begründet mit Hilfe ...	5			
b)	erklärt, warum der ...	3			
	Summe Teilaufgabe 2.6	8			
	Summe Teilaufgaben 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 und 2.6	66			
	Summe der 1. und 2. Aufgabe	126			

	Summe insgesamt	126			
	aus der Punktsumme resultierende Note				
	Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST				
	Paraphe				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsummen 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:

Note	Punkte	Erreichte Punktzahl
sehr gut plus	15	126 – 120
sehr gut	14	119 – 114
sehr gut minus	13	113 – 107
gut plus	12	106 – 101
gut	11	100 – 95
gut minus	10	94 – 89
befriedigend plus	9	88 – 82
befriedigend	8	81 – 76
befriedigend minus	7	75 – 70
ausreichend plus	6	69 – 63
ausreichend	5	62 – 57
ausreichend minus	4	56 – 49
mangelhaft plus	3	48 – 41
mangelhaft	2	40 – 33
mangelhaft minus	1	32 – 26
ungenügend	0	25 – 0