Klausur 6 - LK (225 Min.)
Hilfsmittel: GeoGebra, Formelsammlung
Name: ____________________________

Hinweis: Achten Sie bei den Rechenaufgaben auf einen Antwortsatz und bei allen Rechnungen auf die korrekten Einheiten! Jegliche Reibung wird bei den Aufgaben vernachlässigt!

Aufgabe 1 – Röntgenstrahlung *(61 Punkte)*

Die Entdeckung der Röntgenstrahlung geht auf den deutschen Physiker Wilhelm Conrad Röntgen zurück, der am 8. November 1895 während Experimenten mit Gasentladungsröhren eine bisher unbekannte Strahlung beobachtete. Diese Strahlung war in der Lage, durch feste Materialien zu dringen und auf Fotoplatten Schattenbilder zu erzeugen, was Röntgen tief beeindruckte. Da die Natur dieser Strahlung zunächst unklar war, nannte er sie „X-Strahlen". Röntgens Entdeckung revolutionierte die Medizin und Physik: Bereits kurz nach der Entdeckung wurde die Strahlung zur Bildgebung im medizinischen Bereich genutzt, was die Diagnose von Knochenbrüchen und inneren Erkrankungen erheblich erleichterte. Röntgens Arbeit wurde 1901 mit dem ersten Nobelpreis für Physik gewürdigt, und seine Entdeckung markierte einen Meilenstein in der modernen Wissenschaft und Technik.

a) Erstellen Sie eine beschriftete Skizze, die den Aufbau einer Röntgenröhre sowie deren elektrische Beschaltung darstellt. *(10 Punkte)*

b) Erläutern Sie die Funktionsweise einer Röntgenröhre ohne die atomaren Vorgänge zur Erzeugung der Röntgenstrahlung zu berücksichtigen. *(3 Punkte)*

Das Spektrum einer Röntgenröhre besteht aus zwei Anteilen: der kontinuierlichen Bremsstrahlung und der charakteristischen Röntgenstrahlung.

c) Erklären Sie die Prozesse, die zur Entstehung der Bremsstrahlung und der charakteristischen Röntgenstrahlung führen, und beziehen Sie dabei den atomaren Aufbau des Anodenmaterials mit ein. *(5 Punkte)*

Im kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrum existiert eine kurzwellige Grenze.

d) Begründen Sie das Auftreten dieser kurzwelligen Grenze. *(3 Punkte)*

e) Leiten Sie die entsprechende Formel

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

für die Mindestwellenlänge in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung her. *(4 Punkte)*

Die Drehkristallmethode ist eine einfache und effektive Technik zur Aufnahme eines Röntgenspektrums. Die Methode ermöglicht es, ein Spektrum der Röntgenstrahlung zu erhalten, das Informationen über die Struktur des Kristalls und die Eigenschaften der Strahlung liefert. Aufgrund ihrer Einfachheit und Präzision ist die Drehkristallmethode besonders wertvoll in der Materialforschung und der Analyse von Kristallstrukturen.

f) Skizzieren Sie den Aufbau eines Einkristalls und die dabei auftretenden Reflexionen der Röntgenstrahlen an den Netzebenen des Kristalls. Die Skizze soll dazu den Netzebeneabstand d sowie den den Einfallswinkel θ zur Netzebene beinhalten. *(5 Punkte)*

g) Leiten Sie anhand dieser Skizze die Bragg-Bedingung

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot sin(\theta)$$

begründet her. *(5 Punkte)*

h) Begründen Sie mathematisch, wie sich der Winkel θ verändern muss, um für eine festgelegte Wellenlänge die Bragg-Bedingung in der zweiten Beugungsordnung zu erfüllen. *(2 Punkte)*

i) Benennen Sie drei Gründe, warum in praktischen Experimenten oft nur die erste Beugungsordnung genutzt wird. *(3 Punkte)*

In einer experimentellen Messung wird ein Einkristall mit einem Netzebenenabstand von d = 0,250 nm verwendet. Der Drehschritt beträgt Δθ = 0,5°, und die Messung beginnt bei einem Winkel θ = 5° und endet bei θ = 60°.

j) Berechnen Sie, wie viele Messpunkte bei dieser Messung erfasst werden. *(4 Punkte)*

k) Zeigen Sie, dass bei dieser Messung in erster Ordnung (n = 1) der Wellenlängenbereich zwischen $\lambda_{min} = 1{,}73 \cdot 10^{-10}$ m und $\lambda_{max} = 2{,}88 \cdot 10^{-10}$ m abgedeckt wird. *(5 Punkte)*

Bei einer weiteren Messung beträgt die Beschleunigungsspannung U = 35,0 kV.

l) Berechnen Sie die minimale Wellenlänge der Röntgenstrahlung, die durch diese Spannung erzeugt wird. *(4 Punkte)*

m) Geben Sie an, ob diese Wellenlänge (aus der vorherigen Teil-Aufgabe) im Wellenlängenbereich der beschriebenen Drehkristallmethode erfasst werden kann. *(2 Punkte)*

n) Begründen Sie, welche Auswirkungen eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung auf das Spektrum der erzeugten Röntgenstrahlung hätte. *(4 Punkte)*

o) Begründen Sie, wie eine Veränderung des Kristallmaterials (mit einem anderen Netzebenenabstand d) das Wellenlängenspektrum und die Auflösung der Messung beeinflussen würde. *(2 Punkte)*

Aufgabe 2 – Quantenobjekte und Wahrscheinlichkeitsdichte *(32 Punkte)*

Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen zeigt die charakteristische Interferenzstruktur, die für Quantenobjekte typisch ist. Richard Feynman beschreibt das Verhalten einzelner Elektronen am Doppelspalt folgendermaßen:

„Im Doppelspaltexperiment können wir den genauen Ort des Auftreffens eines Elektrons nicht vorhersehen, sondern nur die Wahrscheinlichkeit für verschiedene Orte vorhersagen."

a) Erklären Sie den Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus und seine Bedeutung für die Quantenmechanik am Beispiel eines Elektrons im Doppelspaltexperiment. *(5 Punkte)*

b) Erläutern Sie, den Zusammenhang zwischen der Wellenfunktion ψ und dem Betragsquadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2$ **und deren jeweilige Aussagen** für ein Elektron im Doppelspaltexperiment. *(2 Punkte)*

c) Beschreiben Sie, wie die Interferenzstruktur entsteht, wenn viele Elektronen nacheinander durch den Doppelspalt geschickt werden. *(3 Punkte)*

d) Erläutern Sie hierbei, warum das Verhalten einzelner Elektronen als zufällig, die Interferenzstruktur jedoch als determiniert gilt. *(2 Punkte)*

e) Führen Sie aus, warum das Experiment in einem Vakuum durchgeführt werden muss und die Elektronen eine einheitliche Energie besitzen sollten, um Interferenzmuster zu beobachten. *(2 Punkte)*

Gegeben sei der Abstand $g = 2\ \mu m$ zwischen den Mitten der beiden Spalten und der Abstand $L = 35\ cm$, zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm. Die De-Broglie-Wellenlänge der Elektronen beträgt $\lambda = 5{,}35\ pm$.

f) Berechnen Sie den Abstand der Interferenzmaxima 1. Ordnung auf dem Schirm. *(4 Punkte)*

g) Deuten Sie das Ergebnis im Kontext der Wahrscheinlichkeitsverteilung und erläutern Sie wie sich das Muster bei einer Variation der Wellenlänge, z.B. durch eine Änderung der Elektronenenergie verändert. *(3 Punkte)*

Der Anfangsimpuls des Elektrons vor dem Doppelspalt ist bekannt, jedoch ist sein genauer Ort unbestimmt.

h) Erläutern Sie formelbasiert, warum die Ortsunschärfe Δx des Elektrons durch die Breite der Spalte begrenzt ist, und wie sich dies auf die Unbestimmtheit des Impulses Δp hinter dem Spalt nach der Heisenberg'schen Unschärferelation auswirkt. *(3 Punkte)*

i) Begründen Sie mit der Unschärferelation, warum es unmöglich ist, gleichzeitig den genauen Ort und den Impuls eines Elektrons im Doppelspaltexperiment festzulegen. *(1 Punkt)*

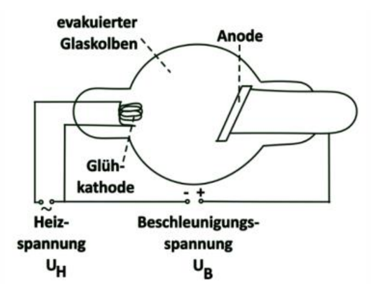
Im Experiment von Jönsson, bei dem Elektronen auf einen Doppelspalt geschossen werden, konnte ein Interferenzmuster auf dem Schirm beobachtet werden.

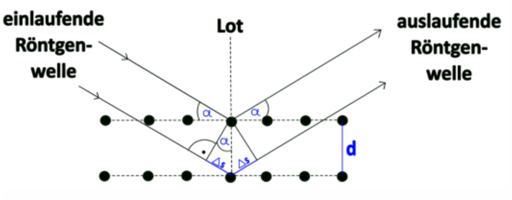
j) Erläutern Sie, wie die Unmöglichkeit, den genauen Ort und Impuls des Elektrons gleichzeitig zu kennen, zur Entstehung des Interferenzmusters beiträgt. *(2 Punkte)*

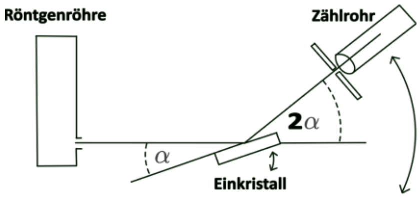
Angenommen, die Elektronen im Doppelspaltexperiment durchlaufen einen Spalt mit der Breite $b = 2\ \mu m$.

k) Schätzen Sie die minimale Unbestimmtheit Δp im Impuls des Elektrons in Querrichtung ab, die aus der Ortsunschärfe $\Delta x = b$ resultiert. *(5 Punkte)*

Physik Leistungskurs (Wichtrup)
Klausur Nr. 6 im Schuljahr 2024 / 2025
Bearbeitungszeit: 225 Minuten
Name des Prüflings: ______________________________

Aufgabe 1			
	Der Prüfling…	**erreichbare Punkte**	**erreichte Punkte**
a)	… erstellt eine korrekt beschriftete Skizze. 	10	
b)	erläutert die Funktionsweise einer Röntgenröhre korrekt. - Beim Betrieb der Röntgenröhre werden durch den glühelektrischen Effekt Elektronen an der Glühkathode freigesetzt - und anschließend durch die anliegende Spannung U_B zur Anode beschleunigt. - Beim Auftreffen dieser Elektronen auf das Anodenmaterial wird Röntgenstrahlung erzeugt, die dann die Röntgenröhre verlassen kann.	3	
c)	… erklärt die Prozesse, die zur Entstehung der Bremsstrahlung und der charakteristischen Röntgenstrahlung führen korrekt. - Die Bremsstrahlung entsteht, wenn ein schnelles Elektron, nachdem es in das Anodenmaterial eingedrungen ist, durch die Wechselwirkung mit einem Atomkern stark abgelenkt bzw. abgebremst wird - und dabei einen Teil seiner kinetischen Energie in Form eines Strahlungsquants abgibt. - Die charakteristische Röntgenstrahlung entsteht, wenn ein schnelles Elektron in das Anodenmaterial eindringt und dort ein Elektron aus einer inneren Schale eines Atoms herausschlägt. - Ein anderes Elektron aus einer äußeren Schale fällt anschließend auf diesen freien Platz. - Dabei wird die Energie freigesetzt, die für diesen Übergang charakteristisch ist.	5	
d)	… begründet das Auftreten der kurzwelligen Grenze korrekt. - Die kurzwellige Grenze im kontinuierlichen Spektrum der Bremsstrahlung entsteht, weil die Energie der ausgesendeten Röntgenstrahlung durch die kinetische Energie der auf die Anode auftreffenden Elektronen begrenzt ist. Die höchste Energie ist durch die Spannung an der Röntgenröhre vorgegeben. - Wenn ein Elektron seine gesamte kinetische Energie bei einem einzigen Abbremsvorgang vollständig in Röntgenstrahlung umwandelt, entsteht die maximale mögliche Photonenenergie. - Diese maximale Energie entspricht der kürzesten Wellenlänge im Spektrum.	3	

<table>
<tr><td>e)</td><td>… leitet die entsprechende Formel korrekt her.
$E_{\mathrm{kin}} = e \cdot U$
$E_\gamma = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
$e \cdot U = h \cdot f_{\max} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\min}}$
$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$</td><td>4</td><td></td></tr>
<tr><td>f)</td><td>… skizziert den Aufbau und die dabei auftretenden Reflexionen der Röntgenstrahlen an den Netzebenen des Kristalls korrekt.

</td><td>5</td><td></td></tr>
<tr><td>g)</td><td>… leitet die Bragg-Bedingung korrekt her.
- Der Wegunterschied, den eine einlaufende Wellenfront bis zur Streuung an der nächst tieferen Netzebene des Kristalls zurücklegt, beträgt Δs.
- Aus der Skizze ergibt sich, dass für diesen Wegunterschied der Zusammenhang Δs = d · sinα gilt, wobei d den Abstand benachbarter Netzebenen bezeichnet.
- Nach der Streuung an der nächst tieferliegenden Netzebene muss die auslaufende Wellenfront, unter Berücksichtigung der Reflexionsbedingung (Einfallswinkel = Ausfallswinkel = α), erneut den Wegunterschied Δs zurücklegen.
- Dadurch ergibt sich ein Gesamtgangunterschied von 2·Δs = 2·d · sinα zwischen den an benachbarten Netzebenen reflektierten Wellenfronten.
- Eine konstruktive Interferenz der reflektierten Wellenfronten tritt nur auf, wenn dieser Gesamtgangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist: n · λ = 2 · d · sinα (mit n=1,2,3,…).</td><td>5</td><td></td></tr>
<tr><td>h)</td><td>… begründet mathematisch, wie sich der Winkel θ verändern muss korrekt.
Für die erste Beugungsordnung gilt
$\lambda = 2 \cdot d \cdot sin(\theta_1)$
Für die zweite Beugungsordnung gilt
$\lambda = 2 \cdot d \cdot \frac{sin(\theta_2)}{2}$
Und damit
$\sin \theta_2 = 2 \cdot \sin \theta_1$
Antwort: Der Sinus von Θ_2 muss doppelt so groß sein, wie der Sinus von Θ_1.</td><td>2</td><td></td></tr>
</table>

i)	… benennt drei korrekte Gründe, warum in praktischen Experimenten oft nur die erste Beugungsordnung genutzt wird. In praktischen Experimenten wird oft nur die erste Beugungsordnung genutzt, da: • Höhere Ordnungen treten auf, wenn folgendes gilt $\sin\theta_2 = 2 \cdot \sin\theta_1$ Das führt schnell dazu, dass der Winkel in der zweiten Beugungsordnung sehr groß wird, was experimentell schwerer umzusetzen ist. (Hinweis: α = Θ)  • In höheren Ordnungen ist die Intensität der reflektierten Strahlung oft deutlich geringer, da der Anteil der Streuung mit zunehmendem Winkel abnimmt. • Höhere Ordnungen können die Interpretation des Spektrums erschweren, da mehrere Wellenlängen sich überschneiden können.	3	
j)	… berechnet, wie viele Messpunkte bei dieser Messung erfasst werden korrekt. $\Delta\theta_{ges} = \theta_{Ende} - \theta_{Start} = 60^\circ - 5^\circ = 55^\circ$ $Anzahl = \frac{\Delta\theta_{ges}}{\Delta\theta} + 1 = \frac{55^\circ}{0,5^\circ} + 1 = 111$ Antwort: Es werden 111 Messpunkte erfasst.	4 Punkte (Formel, korrektes einsetzen, korrektes Ergebnis, Antwort)	
k)	… zeigt, dass bei dieser Messung der Wellenlängenbereich abgedeckt wird. $\lambda_{min} = \frac{2 \cdot d \cdot sin(60^\circ)}{n}$ $\lambda_{min} = 2 \cdot d \cdot sin(60^\circ) = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-9}m \cdot 0,866 \approx 0,433 \times 10^{-9}m$ $\lambda_{max} = 2 \cdot d \cdot sin(5^\circ) = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-9}m \cdot 0,0872 \approx 0,0436 \times 10^{-9}m$ Antwort: Damit wird gezeigt, dass bei dieser Messung in erster Ordnung der Wellenlängenbereich zwischen $\lambda_{min} = 1,73 \cdot 10^{-10}$m und $\lambda_{max} = 2,88 \cdot 10^{-10}$m abgedeckt wird.	5 Punkte (Formel, korrektes einsetzen, korrekte Ergebnisse, Antwort)	

l)	… berechnet die minimale Wellenlänge der Röntgenstrahlung korrekt. $\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_B}$ $\lambda_{min} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s \cdot 3,00 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}}{1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 35,0 \cdot 10^{3} V} \approx 3,545 \times 10^{-11} m = 0,0355\ nm$ Antwort: Die minimale Wellenlänge, die durch die Spannung U = 35,0 kV erzeugt wird ist λ_{min} = 0,0355 nm.	4 Punkte (Formel, korrektes einsetzen, korrektes Ergebnis, Antwort)	
m)	… gibt an, ob diese Wellenlänge erfasst werden kann. - In der vorherigen Aufgabe haben wir gezeigt, dass die Drehkristallmethode Wellenlängen im Bereich von etwa $1,73 \cdot 10^{-10}$ m bis $2,88 \cdot 10^{-10}$ m erfassen kann. - Die minimale Wellenlänge, die durch die Spannung U = 35,0 kV erzeugt wird (λ_{min} = 0,0355 nm), liegt deutlich unter diesem Bereich. Diese Wellenlänge kann daher nicht im Wellenlängenbereich der Drehkristallmethode erfasst werden.	2	
n)	… begründet, welche Auswirkungen eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung auf das Spektrum der erzeugten Röntgenstrahlung hätte korrekt. - wenn U erhöht wird, verringert sich λ_{min}. Dies bedeutet, dass bei höherer Spannung kürzere Wellenlängen (höhere Energien) erzeugt werden. - Da die Energieverteilung der Bremsstrahlung von der Beschleunigungsspannung abhängt, verschiebt sich das Spektrum insgesamt zu höheren Energien. - Eine höhere Beschleunigungsspannung erhöht die Energie der Elektronen, die auf das Target treffen. Dies führt zu einer intensiveren Abstrahlung im kontinuierlichen Spektrum, da die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Elektronen bei der Abbremsung mehr Energie in Form von Röntgenstrahlung abgeben. Die Gesamtintensität des Röntgenspektrums wird also höher. - Die Lage der charakteristischen Linien wird durch die inneren Elektronenübergänge im Targetmaterial bestimmt und hängt nicht direkt von der Beschleunigungsspannung ab. Eine höhere Spannung kann jedoch zur Erzeugung weiterer Linien führen, falls die Energie der Elektronen ausreicht, um tiefere Elektronenschalen des Targets zu ionisieren. Zum Beispiel kann bei genügend hoher Spannung eine zusätzliche K_α-Linie oder andere Übergänge auftreten.	4	
o)	… begründet, wie eine Veränderung des Kristallmaterials (mit einem anderen Netzebenenabstand d) das Wellenlängenspektrum und die Auflösung der Messung beeinflussen würde korrekt. - Ein größerer Netzebenenabstand d verschiebt das Wellenlängenspektrum zu längeren Wellenlängen und kann die Messauflösung verbessern, da Winkelunterschiede deutlicher werden. - Ein kleinerer Netzebenenabstand d verschiebt das Wellenlängenspektrum zu kürzeren Wellenlängen, was für hochenergetische Röntgenstrahlung nützlich sein kann, jedoch die Auflösung verschlechtern kann.	2	
Gesamtpunktzahl		**61**	

Aufgabe 2			
	Der Prüfling…	**erreichbare Punkte**	**erreichte Punkte**
a)	… erklärt den Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus und seine Bedeutung für die Quantenmechanik am Beispiel eines Elektrons im Doppelspaltexperiment. - Im Doppelspaltexperiment werden Elektronen nacheinander durch zwei Spalte geschickt und anschließend auf einem Detektor registriert, der hinter den Spalten angebracht ist. Intuitiv könnte man erwarten, dass jedes Elektron sich wie ein Teilchen verhält und entweder durch den einen oder den anderen Spalt hindurchfliegt, sodass auf dem Detektor zwei Häufungen (jeweils eine hinter jedem Spalt) entstehen. Tatsächlich jedoch zeigt das Experiment ein völlig anderes Bild: Es entsteht ein Interferenzmuster, wie man es von Wellen kennt. - Die Interferenzstruktur auf dem Detektor deutet darauf hin, dass das Elektron sich beim Durchgang durch die Spalte wie eine Welle verhält. - Diese Welle breitet sich durch beide Spalte aus und überlagert sich, wodurch ein Muster aus Maxima und Minima (Interferenzmuster) entsteht. - Obwohl das Elektron ein Wellenverhalten zeigt, wird auf dem Detektor immer nur ein einzelner "Punkt" registriert, als ob das Elektron als Teilchen dort auftreffen würde. Es scheint also, dass das Elektron als Teilchen auftritt, wenn wir es am Detektor „messen“ oder „beobachten“. - Der Welle-Teilchen-Dualismus zeigt, dass Quantenobjekte wie Elektronen nicht eindeutig als Teilchen oder Wellen klassifiziert werden können. Stattdessen ist ihre Natur kontextabhängig – sie verhalten sich wie Wellen, wenn sie sich ausbreiten und interferieren, aber wie Teilchen, wenn sie detektiert werden.	5	
b)	… erläutert den Zusammenhang zwischen der Wellenfunktion ψ und dem Betragsquadrat der Wellenfunktion $\lvert\psi\rvert 2$ und deren jeweilige Aussagen für ein Elektron im Doppelspaltexperiment korrekt. - Die Wellenfunktion ψ ist eine mathematische Funktion, die den Zustand des Elektrons beschreibt. Die Wellenfunktion kann jedoch nicht direkt gemessen werden, da sie eine abstrakte, komplexe Größe ist. - Das Betragsquadrat $\lvert\psi\rvert^2$ der Wellenfunktion ist eine reelle und positive Größe, die als Wahrscheinlichkeitsdichte interpretiert wird. Das bedeutet, dass $\lvert\psi\rvert^2$ an einem bestimmten Ort im Raum die Wahrscheinlichkeit pro Einheit (zum Beispiel pro Fläche auf dem Detektor) angibt, das Elektron dort zu finden. Es beschreibt also die Verteilung, mit der die Elektronen bei vielen Durchläufen des Experiments auf dem Detektor aufschlagen würden.	2	
c)	… beschreibt, wie die Interferenzstruktur entsteht, wenn viele Elektronen nacheinander durch den Doppelspalt geschickt werden korrekt. - Wenn ein einzelnes Elektron auf den Doppelspalt trifft, breitet sich seine Wellenfunktion durch beide Spalte aus, als ob das Elektron gleichzeitig durch beide Spalte "gehen" würde. - Diese Wellenfunktionen, die durch die beiden Spalte entstanden sind, überlagern sich hinter den Spalten und interferieren miteinander. - Das bedeutet, dass sich die Wellenkämme und -täler der Wellenfunktion addieren (konstruktive Interferenz) oder gegenseitig auslöschen (destruktive Interferenz), je nach den relativen Phasen der Wellen an einem bestimmten Punkt auf dem Detektor.	3	

d)	… erläutert, warum das Verhalten einzelner Elektronen als zufällig, die Interferenzstruktur jedoch als determiniert gilt korrekt. - Wenn ein einzelnes Elektron durch das Doppelspaltexperiment geschickt wird, kann man nicht vorhersagen, an welchem genauen Punkt auf dem Detektor es auftreffen wird. Das individuelle Auftreffen eines Elektrons erscheint daher zufällig, weil das Ergebnis einer Messung – d.h., der Ort, an dem das Elektron auf dem Detektor registriert wird – nicht deterministisch festgelegt ist, sondern nur durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden kann. - Wenn viele Elektronen nacheinander durch das Doppelspaltexperiment geschickt werden, bildet sich auf dem Detektor ein charakteristisches Interferenzmuster. Dieses Muster ist reproduzierbar und zeigt sich jedes Mal, wenn genügend Elektronen durch das Experiment geschickt werden.	2	
e)	… führt aus, warum das Experiment in einem Vakuum durchgeführt werden muss und die Elektronen eine einheitliche Energie besitzen sollten, um Interferenzmuster zu beobachten. - Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen muss in einem Vakuum durchgeführt werden, um äußere Störungen durch Luftmoleküle zu vermeiden, die die kohärente Ausbreitung der Elektronenwelle stören könnten. - Außerdem ist es wichtig, dass die Elektronen eine einheitliche Energie besitzen, um eine konsistente Wellenlänge zu gewährleisten, die ein scharfes und klares Interferenzmuster entstehen lässt. Andernfalls würden Störungen oder unterschiedliche Wellenlängen das Interferenzmuster verfälschen oder sogar vollständig zerstören.	2	
f)	… berechnet den Abstand der Interferenzmaxima 1. Ordnung auf dem Schirm. $a_k = \frac{\lambda \cdot L}{g}$ $a_k = \frac{5,35 \cdot 10^{-12}m \cdot 0,35m}{2 \cdot 10^{-6}m} = 9,3625 \cdot 10^{-7}m = 0,93625\ mm$ Antwort: Der Abstand der Interferenzmaxima 1. Ordnung auf dem Schirm beträgt somit etwa 0,936 mm.	4 Punkte (Formel, korrektes einsetzen, korrektes Ergebnis, Antwort)	
g)	… deutet das Ergebnis im Kontext der Wahrscheinlichkeitsverteilung und erläutert wie sich das Muster bei einer Variation der Wellenlänge, z.B. durch eine Änderung der Elektronenenergie verändert korrekt. - Der berechnete Abstand der Interferenzmaxima 1. Ordnung von etwa 0,936 mm zeigt, wie sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronen auf dem Schirm darstellt. In einem Doppelspaltexperiment ist die Position der Maxima und Minima durch die Überlagerung der Wahrscheinlichkeitswellen bestimmt, die durch die beiden Spalte hindurchgehen. Ein hohes Maximum in der Wahrscheinlichkeitsdichte bedeutet, dass die Elektronen mit höherer Wahrscheinlichkeit in diesen Bereichen auftreffen. Jede helle Linie repräsentiert einen Bereich mit einer hohen Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreffen der Elektronen. Während zwischen den Maxima (den Minima) eine niedrigere Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen besteht. Jede dunkele Stelle repräsentiert einen Bereich mit einer niedriger Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreffen der Elektronen. - Eine Erhöhung der Elektronenenergie (kleinere Wellenlänge) verdichtet das Interferenzmuster, das heißt, die Maxima liegen näher beieinander. - Eine Verringerung der Elektronenenergie (größere Wellenlänge) führt dazu, dass die Maxima weiter auseinander liegen.	3	

h)	… erläutert formelbasiert, warum die Ortsunschärfe Δx des Elektrons durch die Breite der Spalte begrenzt ist, und wie sich dies auf die Unbestimmtheit des Impulses Δp hinter dem Spalt nach der Heisenberg'schen Unschärferelation auswirkt. $$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$ - Die Ortsunschärfe Δx des Elektrons wird durch die Breite des Spalts begrenzt, da dies der Bereich ist, in dem das Elektron lokalisiert werden kann. - Nach der Heisenbergschen Unschärferelation führt eine Verringerung der Ortsunschärfe zu einer Erhöhung der Unbestimmtheit des Impulses Δp. Dies bedeutet, dass das Elektron nach dem Passieren des Spalts eine größere Streuung in seinem Impuls erfährt.	3	
i)	… begründet mit der Unschärferelation, warum es unmöglich ist, gleichzeitig den genauen Ort und den Impuls eines Elektrons im Doppelspaltexperiment festzulegen korrekt. $$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$ Dadurch wäre das Ergebnis gleich 0, was laut der Unschärferelation nicht erlaubt ist.	1	
j)	… erläutert, wie die Unmöglichkeit, den genauen Ort und Impuls des Elektrons gleichzeitig zu kennen, zur Entstehung des Interferenzmusters beiträgt korrekt. - Die Unmöglichkeit, den genauen Ort und Impuls des Elektrons gleichzeitig zu kennen, führt zur Entstehung des Interferenzmusters, da die Ortsbestimmung durch die Spalte die Impulsunschärfe erhöht. - Diese Impulsunschärfe sorgt für eine Beugung der Elektronenwellen an den Spalten. Die beiden Wellen überlagern sich hinter den Spalten und bilden eine Wahrscheinlichkeitswelle, die auf dem Schirm (nach und nach) ein Interfernzmuster erzeugt.	2	
k)	chätzt die minimale Unbestimmtheit Δp im Impuls des Elektrons in Querrichtung ab, die aus der Ortsunschärfe Δx = b resultiert korrekt. $$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$ $$\Delta p \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta x} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} Js}{4\pi \cdot 2 \cdot 10^{-6} m} = 2,63 \cdot 10^{-29} kg \cdot \frac{m}{s}$$ Antwort: Die minimale Unbestimmtheit Δp im Impuls des Elektrons in Querrichtung beträgt etwa $2{,}63 \cdot 10^{-29}$ kg·m/s.	5 Punkte (Formel, umstellen, korrektes einsetzen, korrektes Ergebnis, Antwort)	
		32	

Zusammenfassende Bewertung

Gesamtpunktzahl	**erreichbare Punkte**	**erreichte Punkte**	**Prozent**
Punktzahl Aufgabe 1	**61**		---
Punktzahl Aufgabe 2	**32**		---
Gestaltung	**3**		---
Gesamtsumme	**96**		
Note			

Note	1+	1	1-	2+	2	2-	3+	3	3-	4+	4	4-	5+	5	5-	6
Prozent	100 – 95	94 – 90	89 – 85	84 – 80	79 – 75	74 – 70	69 – 65	64 – 60	59 – 55	54 – 50	49 – 45	44 – 40	39 – 33	32 – 27	26 – 20	< 20