

Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Interferenz von Molekülen
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Quantenphysik und Materie ♦ Quantenobjekte ♦ Grundlegende Aspekte der Quantentheorie: Stochastische Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung, Komplementarität ♦ Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Quantenobjekten
Materialien	♦ M 1 Interferenz von Farbstoffmolekülen ♦ M 2 Richard Feynman über die Natur des Elektrons ♦ M 3 Interferenzversuche mit Molekülen
Quellenangaben	♦ M 1, Abb. 1 und 2: Im Auftrag des IQB erstellt, in Anlehnung an Juffmann, T. et. al. (2012). Real-time single-molecule imaging of quantum interference. <i>Nature Nanotech</i>, 7, 297–300. doi: 10.1038/nnano.2012.34. Überarbeitet; Quelle der Überarbeitung: Abiturprüfung Physik, Bayern, 2014. ♦ M 2: Feynman, R. P. et. al. (2015). <i>Feynman-Vorlesungen über Physik 5, Quantenmechanik</i>. Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH. ♦ M 3: Prof. Dr. Markus Arndt, Quantum Nanophysics Group, Universität Wien (private Mitteilung)
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung

zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	♦ Funktionen von Interferenzexperimenten in der klassischen Wellenoptik und in der Quantenphysik, Aufbau eines Interferenzexperiments zur Wellenlängenbestimmung ♦ Rechnerische Auswertung des Doppelspaltexperiments inklusive der Kleinwinkelnäherung, Auswirkung von Variationen der Versuchsparameter auf das Interferenzmuster ♦ de-Broglie-Wellenlänge ♦ grundlegendes Bewusstsein für die Frage des Auflösungsvermögens bei Beobachtungen (ohne konkrete Anwendung auf den Kontext von Interferenzmustern) ♦ stochastische Deutung des Verhaltens von Quantenobjekten; Komplementarität von Welcher-Weg-Information und der Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten ♦ Begriff des Gültigkeitsbereichs einer Theorie.
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: -
Hinweise	♦ Hinweise für die Lehrkraft

1 Aufgabe

Interferenz von Molekülen

Interferenzexperimente sind eine wesentliche Methode zur Untersuchung von Quantenobjekten. Experimente mit Elektronen standen am Beginn dieser Forschungsarbeiten. In den vergangenen Jahrzehnten wurden solche Experimente mit immer größeren Molekülen durchgeführt.

	BE
In einem Experiment wurde 2012 an der Universität Wien die Interferenz von Farbstoffmolekülen an einem Gitter untersucht (M 1).	
1 Eine wesentliche Anwendung von Interferenzexperimenten in der klassischen Wellenoptik, wie der Interferenz am Doppelspalt oder an einem Gitter, ist die Wellenlängenbestimmung. Skizzieren Sie einen entsprechenden Versuchsaufbau.	3
2 Eine Funktion von Interferenzexperimenten in der Quantenphysik besteht darin, die charakteristischen Eigenschaften von Quantenobjekten zu untersuchen. Eine dieser Eigenschaften ist die stochastische Vorhersagbarkeit des Verhaltens von Quantenobjekten. Erläutern Sie das Auftreten dieser Eigenschaft beim Doppelspaltexperiment. Das Doppelspaltexperiment mit mikroskopischen Teilchen wird dahingehend erweitert, dass mittels einer Messvorrichtung untersucht wird, welchen der beiden Spalte ein Teilchen jeweils passiert. Erläutern Sie, wie sich diese Messung auf das zu beobachtende Schirmbild auswirkt.	3
3 Zeigen Sie, dass die in M 1 beschriebenen Farbstoffmoleküle bei einer Geschwindigkeit von $158 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ eine de-Broglie-Wellenlänge von $1,95 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ besitzen. Berechnen Sie den Abstand eines Maximums zweiter Ordnung vom Maximum nullter Ordnung auf dem Schirm. Ermitteln Sie, in welchem Bereich der Abstand zwischen dem Gitter und dem Beobachtungsschirm liegen muss, damit auf einer Beobachtungsfläche der Breite $50 \mu\text{m}$ auf dem Schirm mindestens sieben Interferenzmaxima auftreten.	2
4 Zur Abschätzung des Durchmessers D eines als kugelförmig angenommenen Moleküls, das aus N Atomen besteht, kann der folgende Zusammenhang verwendet werden: $D = 2 \cdot \sqrt[3]{N} \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Dabei wird 10^{-10} m als typischer Wert für den Radius eines Atoms angenommen. Begründen Sie diesen Zusammenhang. Gehen Sie dabei insbesondere auch darauf ein, welche vereinfachende Annahme über den Aufbau des betrachteten Moleküls dieser Abschätzung zugrunde liegt.	4

- | | |
|--|----------|
| <p>5 Berechnen Sie mit der in Teilaufgabe 4 angegebenen Abschätzung einen Näherungswert für die Größe der verwendeten Farbstoffmoleküle.</p> | <p>2</p> |
| <p>Bei deutlich größeren Abständen zwischen den Spalten rücken die Interferenzmaxima entsprechend näher zusammen. Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Ausdehnung der verwendeten Moleküle eine Abschätzung dafür, ab welchem Abstand zwischen zwei benachbarten Spalten eines Gitters dies dazu führen würde, dass das Interferenzmuster nicht mehr beobachtet werden kann.</p> | <p>3</p> |
| <p>6 Die Moleküle bewegen sich unmittelbar vor dem Gitter auf den Ursprung eines x-y-Koordinatensystems zu, das auf dem Schirm festgelegt ist (siehe M 1).</p> | <p></p> |
| <p>Begründen Sie, dass die Auftreffpunkte auf den Linien 1 und 2 (vgl. M 1b) zu Molekülen mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 gehören.</p> | <p>2</p> |
| <p>Erklären Sie damit die Nichtparallelität der beiden Interferenzstreifen, die zu den Maxima 1. Ordnung gehören.</p> | <p>3</p> |
| <p>7 Erläutern Sie das Zitat in M 2 unter Bezugnahme auf das Verhalten von Teilchen an einem Doppelspalt oder einem Gitter.</p> | <p>4</p> |
| <p>8 Erläutern Sie anhand von M 3 das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment, insbesondere im Hinblick auf den Gültigkeitsbereich einer Theorie.</p> | <p>4</p> |

2 Material

Material 1

Interferenz von Farbstoffmolekülen

a) Versuchsaufbau

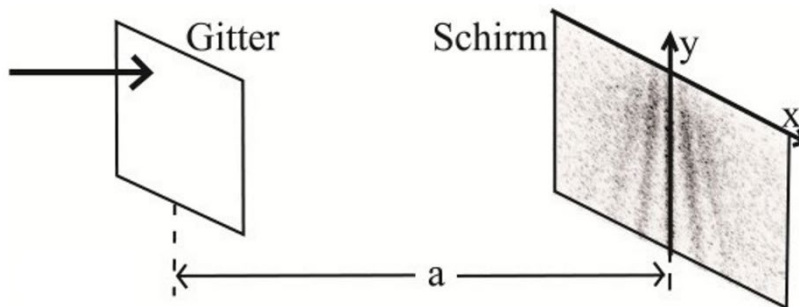


Abb. 1: Versuchsaufbau, IQB, in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

Die Interferenz erfolgt an einem Gitter. Dieses besteht aus einer großen Zahl enger Spalte. Der Abstand zweier benachbarter Spalte ist durchgehend konstant und wird als Gitterkonstante b bezeichnet. Die Bewegung der Moleküle erfolgt senkrecht zum Gitter, der Schirm ist parallel zum Gitter orientiert.

Die theoretische Untersuchung zeigt, dass die Bedingung, die der Gangunterschied zwischen zwei benachbarten Spalten für ein Maximum der Ordnung k erfüllen muss, die gleiche ist wie für einen Doppelspalt mit dem Spaltabstand b .

Tab. 1: Daten zum Experiment

Gitterkonstante b		100 nm
Abstand a zwischen Gitter und Schirm Der Schirm verläuft parallel zur Gitterebene.		564 mm
Verwendete Farbstoffmoleküle	Summenformel	$C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$
	Masse	1298 u

Quelle: in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

Die Geschwindigkeiten der Moleküle sind so gering, dass der Einfluss der Gewichtskraft zu berücksichtigen ist. Die Moleküle haben keine einheitliche Geschwindigkeit, sondern ein kontinuierliches Geschwindigkeitsspektrum.

b) Schirmbild

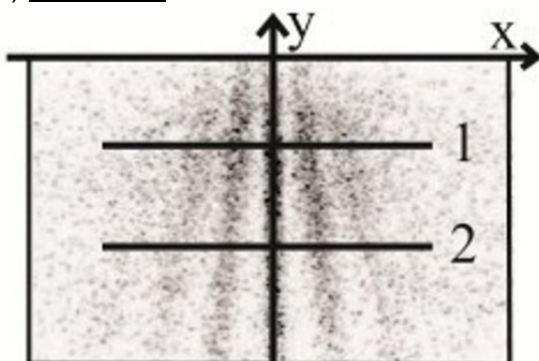


Abb. 2: Schirmbild, IQB, in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

Material 2

Richard Feynman über die Natur des Elektrons

„Ursprünglich glaubte man, das Elektron z. B. verhielte sich wie ein Teilchen, dann aber fand man, dass es sich in vieler Hinsicht wie eine Welle verhält. In Wirklichkeit verhält es sich also weder wie das eine noch wie das andere. Geben wir es also auf. Wir sagen: ‘Es ist wie keins von beiden.’“

(Richard P. Feynman, 1963)

Quelle: Feynman, 2015, S. 1.

Material 3

Interferenzversuche mit Molekülen

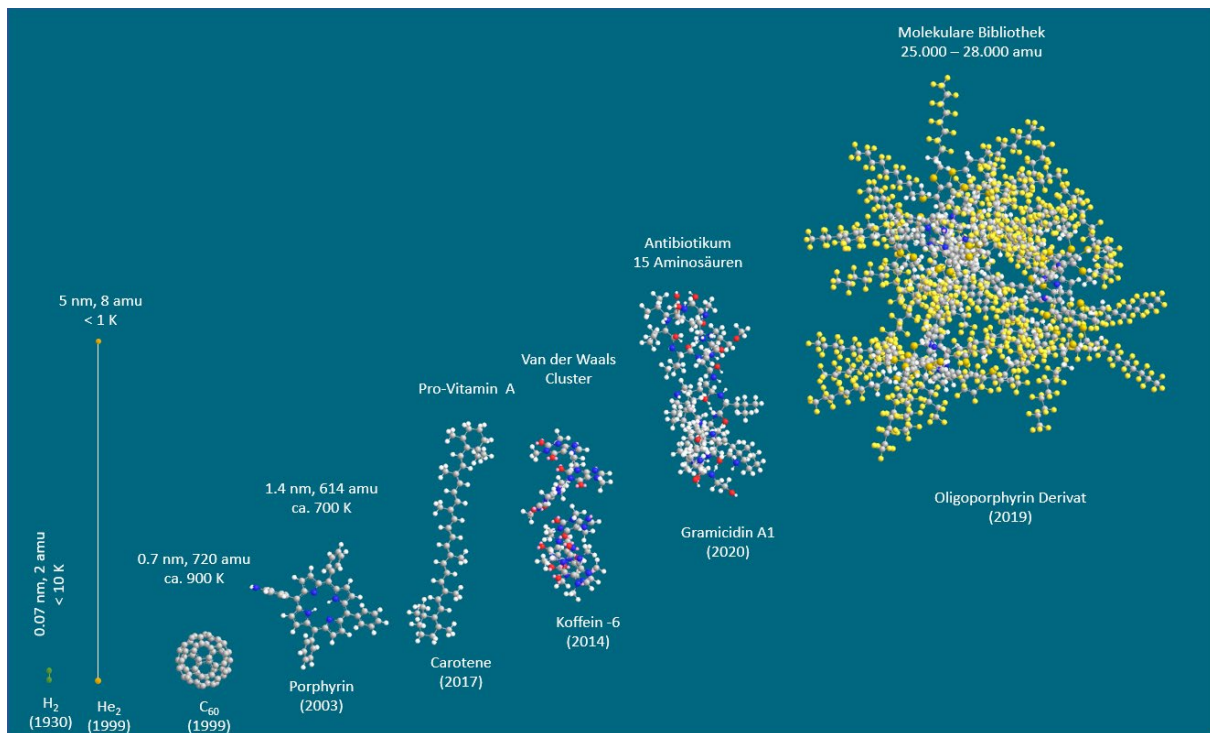


Abb. 3: Durchgeführte Interferenzversuche mit Molekülen

Seit 1930 gelangen Interferenzexperimente mit immer komplexeren Systemen. Dem ersten zweiatomaren System H₂ folgte über sechzig Jahre später mit He₂ das am schwächsten gebundene und größte diatomare System (Bindungsenergie von wenigen 100 neV). Die Interferenz eines heißen polyatomaren Moleküls wurde mit C₆₀ beobachtet. Seitdem wurden Gitterbeugungsexperimente und Molekülinterferometrie auf viele Systeme ausgeweitet, von organischen Farbstoffen (TPP) über Vitamine (β -Carotene) und van-der-Waals gebundene Koffein-Cluster bis hin zu polypeptidischen Antibiotika (Gramicidin) und komplexen organischen Molekülen, die bis zu 2000 Atome in einem Teilchen binden.

Quelle: Prof. Dr. Markus Arndt, Quantum Nanophysics Group, Universität Wien (private Mitteilung)

3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	<i>Eine wesentliche Anwendung von Interferenzexperimenten in der klassischen Wellenoptik, wie der Interferenz am Doppelspalt oder an einem Gitter, ist die Wellenlängenbestimmung. Skizzieren Sie einen entsprechenden Versuchsaufbau.</i> Die Lernenden ... S 5 erläutern bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. Versuchsaufbau: Lichtquelle, Sammellinse zur Ausleuchtung des Kohärenzspalts mit hoher Intensität, Kohärenzspalt, Doppelspalt/Gitter, Sammellinse zur Abbildung, Beobachtungsschirm. <i>Die Erwartungen an die Skizze des Versuchsaufbaus orientieren sich an im Unterricht durchgeführten oder besprochenen Experimenten. Für einen Aufbau alleine aus Lichtquelle, Doppelspalt/Gitter und Beobachtungsschirm kann nur dann die volle Anzahl an Bewertungseinheiten vergeben werden, wenn explizit angegeben wird, dass ein Laser (oder eine andere kohärente Lichtquelle) verwendet wird.</i>	3		
2	<i>Eine Funktion von Interferenzexperimenten in der Quantenphysik besteht darin, die charakteristischen Eigenschaften von Quantenobjekten zu untersuchen. Eine dieser Eigenschaften ist die stochastische Vorhersagbarkeit des Verhaltens von Quantenobjekten. Erläutern Sie das Auftreten dieser Eigenschaft beim Doppelspaltexperiment.</i> Die Lernenden ... E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen. <u>Stochastische Vorhersagbarkeit:</u> Das Verhalten eines einzelnen Quantenobjekts, z. B. eines Elektrons, am Doppelspalt ist nicht determiniert. Der Auftreffort jedes einzelnen Quantenobjekts auf dem Beobachtungsschirm ist somit nicht vorhersagbar. Das Interferenzmuster der zugehörigen Materiewelle beschreibt das stochastische Verhalten, etwa die Häufigkeitsverteilung der Beobachtungsorte bei einer großen Zahl von Quantenobjekten.	3		

	<i>Das Doppelspaltexperiment mit mikroskopischen Teilchen wird dahingehend erweitert, dass mittels einer Messvorrichtung untersucht wird, welchen der beiden Spalte ein Teilchen jeweils passiert. Erläutern Sie, wie sich diese Messung auf das zu beobachtende Schirmbild auswirkt.</i> Die Lernenden ... S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien. Durch die Messvorrichtung wird eine Information über den Weg gewonnen, den ein Teilchen durchlaufen hat. Aufgrund der Komplementarität geht dadurch die Fähigkeit zur Interferenz zwischen den beiden Spalten verloren. Anstelle eines Doppelspalt-Interferenzmusters ergibt sich nun eine Überlagerung der Schirmbilder bei jeweils nur einem geöffneten Spalt.		3	
3	<i>Zeigen Sie, dass die in M 1 beschriebenen Farbstoffmoleküle bei einer Geschwindigkeit von $158 \frac{m}{s}$ eine de-Broglie-Wellenlänge von $1,95 \cdot 10^{-12} m$ besitzen.</i> Die Lernenden ... S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. $m = 1298 \text{ u} = 2,155 \cdot 10^{-24} \text{ kg}$ $p = m \cdot v = 3,41 \cdot 10^{-22} \text{ kg} \frac{m}{s}$ $\lambda = \frac{h}{p} = 1,95 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ <i>Berechnen Sie den Abstand eines Maximums zweiter Ordnung vom Maximum nullter Ordnung auf dem Schirm.</i> Die Lernenden ... S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. Für Interferenzmaximum 2. Ordnung: $\Delta s = b \sin \alpha_2 = 2 \lambda$ Lage des Maximums 2. Ordnung auf dem Schirm: $\tan \alpha_2 = \frac{d_2}{a}$ In Kleinwinkelnäherung: $\sin \alpha_2 = \tan \alpha_2 \Rightarrow \frac{2 \lambda}{b} = \frac{d_2}{a}$ $\Rightarrow d_2 = \frac{2 \lambda \cdot a}{b} = \frac{2 \cdot 1,95 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot 0,564 \text{ m}}{100 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ $d_2 = 22,0 \text{ } \mu\text{m}$ <i>Ermitteln Sie, in welchem Bereich der Abstand zwischen dem Gitter und dem Beobachtungsschirm liegen muss, damit auf einer Beobachtungsfläche der Breite $50 \text{ } \mu\text{m}$ auf dem Schirm mindestens sieben Interferenzmaxima auftreten.</i>	2	4	

	Die Lernenden ... S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. Es gilt: $d_k = \frac{k \cdot \lambda \cdot a}{b} \Rightarrow \Delta d = \frac{\lambda \cdot a}{b}$ Um die Forderung zu erfüllen, muss $6 \cdot \Delta d \leq 50 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta d \leq 8,3 \mu\text{m}$ sein, also $\frac{\lambda \cdot a}{b} \leq 8,3 \mu\text{m} \Rightarrow a \leq 0,43 \text{ m}$ <i>Die in dieser Lösung durchgeführte Rechnung bringt mit sich, dass die Zentren der beiden äußersten beiden Maxima jeweils genau am Rand des Schirms liegen. Gleichmaßen als sinnvoll akzeptiert werden sollte eine Lösung, die vom Ansatz $7 \cdot \Delta d \leq 50 \mu\text{m}$ ausgeht.</i>		3	
4	Zur Abschätzung des Durchmessers D eines als kugelförmig angenommenen Moleküls, das aus N Atomen besteht, kann der folgende Zusammenhang verwendet werden: $D = 2 \cdot \sqrt[3]{N} \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Dabei wird 10^{-10} m als typischer Wert für den Radius eines Atoms angenommen. Begründen Sie diesen Zusammenhang. Gehen Sie dabei insbesondere auch darauf ein, welche vereinfachende Annahme über den Aufbau des betrachteten Moleküls dieser Abschätzung zugrunde liegt. Die Lernenden ... E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen. Zugrundeliegende Vorstellung: Ein kugelförmiges Molekül, das ohne Freiräume aus N vielen kugelförmigen Atomen des angegebenen Radius r_{Atom} aufgebaut ist. $V_{\text{Molekül}} = N \cdot V_{\text{Atom}}$ $\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \pi = N \cdot \frac{4}{3} r_{\text{Atom}}^3 \pi \Rightarrow \left(\frac{D}{2}\right)^3 = N \cdot r_{\text{Atom}}^3$ $\Rightarrow \frac{D}{2} = \sqrt[3]{N} \cdot r_{\text{Atom}} \Rightarrow D = 2 \cdot \sqrt[3]{N} \cdot 10^{-10} \text{ m}$		1	3
5	Berechnen Sie mit der in Teilaufgabe 4 angegebenen Abschätzung einen Näherungswert für die Größe der verwendeten Farbstoffmoleküle. Die Lernenden ... S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. Für das Molekül $\text{C}_{48}\text{H}_{26}\text{F}_{24}\text{N}_8\text{O}_8$ ist $N = 114 \Rightarrow D = 9,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$		2	

	<i>Bei deutlich größeren Abständen zwischen den Spalten rücken die Interferenzmaxima entsprechend näher zusammen. Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Ausdehnung der verwendeten Moleküle eine Abschätzung dafür, ab welchem Abstand zwischen zwei benachbarten Spalten eines Gitters dies dazu führen würde, dass das Interferenzmuster nicht mehr beobachtet werden kann.</i> Die Lernenden ... S 3 Die Lernenden wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. Damit auf dem Schirm das Interferenzmuster als eine Abfolge von Stellen hoher Auftreffwahrscheinlichkeit und Stellen geringer Auftreffwahrscheinlichkeit beobachtet werden kann, ist eine sinnvolle Forderung an den Abstand Δd zwischen zwei Interferenzmaxima zu stellen. Ein mögliches Kriterium ist $\Delta d > 2 D$. Aus der Bearbeitung von Teilaufgabe c): $\Delta d = \frac{\lambda \cdot a}{b}$ Damit folgt: $\frac{\lambda \cdot a}{b} > 2 D \Rightarrow b < \frac{\lambda \cdot a}{2 D} = 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ <i>Andere schlüssige Argumentationen können auch zur Erteilung der vollen Anzahl an Bewertungseinheiten führen.</i>			1	
				2	
6	<i>Die Moleküle bewegen sich unmittelbar vor dem Gitter auf den Ursprung eines x-y-Koordinatensystems zu, das auf dem Schirm festgelegt ist (siehe M 1). Begründen Sie, dass die Auftreffpunkte auf den Linien 1 und 2 (vgl. M 1b) zu Molekülen mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 gehören. Erklären Sie damit die Nichtparallelität der beiden Interferenzstreifen, die zu den Maxima 1. Ordnung gehören.</i> Die Lernenden ... E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen. <i>Entscheidend für eine gelungene Argumentation ist die Synthese der beiden ersten Teile der Antwort (Aussagen über die Bewegung in y-Richtung bzw. die Verteilung der Auftrefforte in x-Richtung) zur im dritten Absatz folgenden Erklärung des beobachteten Phänomens.</i> Moleküle mit geringerer Geschwindigkeit befinden sich länger in der Versuchsanordnung und werden somit stärker durch ihre Gewichtskraft abgelenkt. Darum treffen sie weiter unten auf dem Schirm auf. Je kleiner die Geschwindigkeit der Moleküle ist, desto größer ist ihre de-Broglie-Wellenlänge und somit auch der Abstand Δd zwischen zwei Interferenzmaxima auf dem Schirm.			2	
				3	

	Für Moleküle geringerer Geschwindigkeit befindet sich das Maximum einer bestimmten Ordnung also sowohl weiter unten auf dem Schirm als auch weiter vom Maximum nullter Ordnung entfernt. Das erklärt den nichtparallelen Verlauf der Interferenzstreifen.			
7	<i>Erläutern Sie das Zitat in M 2 unter Bezugnahme auf das Verhalten von Teilchen an einem Doppelspalt oder einem Gitter.</i> Die Lernenden ... K 3 entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder. <i>Zur Bearbeitung dieser Teilaufgabe gehört notwendigerweise, dass sowohl auf die Aussagen der Textquelle als auch auf Interferenzexperimente mit Teilchen, hier konkret dem Elektron, Bezug genommen wird. Die Aussagen der Textquelle müssen mit Beobachtungen bei Interferenzexperimenten in Verbindung gebracht werden. Auch die angemessene Verwendung der Fachsprache ist für die Bewertung relevant.</i> Ein Elektron verhält sich in einem Interferenzversuch in mancher Hinsicht wie ein Teilchen. Beispielsweise werden auf dem Schirm stets einzelne Elektronen nachgewiesen. Andererseits zeigt es in diesen Versuchen Welleneigenschaften, konkret die Fähigkeit zur Interferenz. Das Elektron verhält sich in diesen Experimenten also weder wie ein klassisches Teilchen noch wie eine klassische Welle, sondern zeigt sich als etwas völlig neuartiges, ein Quantenobjekt.		4	
8	<i>Erläutern Sie anhand von M 3 das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment, insbesondere im Hinblick auf den Gültigkeitsbereich einer Theorie.</i> Die Lernenden ... S 2 erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten; E 9 reflektieren die Relevanz von Modellen, Theorien, Hypothesen und Experimenten für die physikalische Erkenntnisgewinnung. <i>Ein Teil der hier zu erbringenden Leistung besteht darin, dass die gegebene Erläuterung in einer angemessenen Struktur gegeben wird. Dazu gehört beispielsweise die Klärung des Begriffs „Gültigkeitsbereich“, ehe anschließend die diesbezügliche Relevanz von Experimenten erläutert wird.</i> <i>Eine Bezugnahme auf in der Abbildung dargestellte Informationen muss erkennbar sein.</i> Jede physikalische Theorie muss experimentellen Überprüfungen der Vorhersagen, die sie macht, Stand halten. Der Gültigkeitsbereich einer		2	2

	Theorie entspricht dem Bereich von Parametern, in dem Experimente sie bestätigen. In Material 3 ist dargestellt, mit welchen Molekülen im Laufe der Zeit erfolgreich Interferenzexperimente durchgeführt werden konnten. Diese Experimente mit Teilchen bestätigen bestimmte Aspekte der Quantentheorie, das stochastische Verhalten und die Interferenzfähigkeit von Teilchen. Die erfolgreiche Durchführung solcher Experimente mit immer größeren Molekülen trug dazu bei, die Gültigkeit der Quantenphysik im Bereich massereicherer Teilchen zu bestätigen.			
	Summe	12	19	9
	Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	30	47,5	22,5

4 Standardbezug

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	5			
2	1	6		
3	7			
4		6		
5	3, 7			
6		6		
7			3	
8	2	9		

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster¹ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

¹ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.

6 Hinweise für die Lehrkraft

Vergleich der vorliegenden Aufgabe mit der Aufgabe zum gleichen Themenbereich für das erhöhte Anforderungsniveau

- ◆ Teilaufgaben 1 und 2: Diese beiden Teilaufgaben bilden einen relativ leicht zugänglichen Einstieg in die Aufgabe, der nicht auf dafür häufig bevorzugten Rechenaufgaben basiert.
- ◆ Teilaufgabe 3: Hier ist im Vergleich zur entsprechenden Teilaufgabe für das grundlegende Anforderungsniveau zusätzlich der Umgang mit der Masseneinheit 1 u gefordert. Diese Umrechnung sollte im erhöhten Anforderungsniveau hinreichend vertraut sein (→ Anforderungsbereich I). Die durchzuführenden Berechnungen sollten abgesehen vom letzten Teil der Aufgabe sehr vertraut sein (→ Anforderungsbereich I).
- ◆ Teilaufgaben 4 und 5: Diese Teilaufgaben sind in der Aufgabenstellung für das grundlegende Anforderungsniveau nicht enthalten. In der Aufgabenstellung für das erhöhte Anforderungsniveau sind sie die wesentlichen Teile, die dem Anforderungsbereich III zuzuordnen sind.
- ◆ Teilaufgabe 6: Die als letzter Schritt vorzunehmende Synthese der einzelnen Aussagen über die beiden Koordinatenrichtungen ist im grundlegenden Anforderungsniveau dem Anforderungsbereich III zugeordnet. Im erhöhten Anforderungsniveau wird davon ausgegangen, dass die Lernenden mit der Betrachtung solcher zweidimensionaler Situationen vertrauter sind. Daher ist dieser Schritt hier dem Anforderungsniveau II zugeordnet.
- ◆ Teilaufgabe 7: Im der entsprechenden Teilaufgabe für das grundlegende Anforderungsniveau wird die Erläuterung des Zitats zunächst durch die Erklärung eines konkret vorgelegten Versuchsergebnisses vorbereitet. Im erhöhten Anforderungsniveau wird die Interpretation ohne eine solche inhaltliche Vorbereitung gefordert, die entsprechenden Verbindungen zum Doppelspaltversuch bzw. der Interferenz am Gitter müssen selbständig hergestellt werden.
- ◆ Teilaufgabe 8: Im grundlegenden Anforderungsniveau ist die in der Aufgabenstellung geforderte Erläuterung stärker vorstrukturiert. In der Aufgabenstellung für das erhöhte Anforderungsniveau wird gefordert, dass die Lernenden der Erläuterung selbständig eine angemessene Struktur geben, zu der u. a. auch die Klärung des Begriffs „Gültigkeitsbereich“ gehört.