

Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Interferenz von Molekülen
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Quantenphysik und Materie <ul style="list-style-type: none"> ◆ Quantenobjekte <ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 1 Interferenz von Farbstoffmolekülen ◆ M 2 Das Elektron als Quantenobjekt ◆ M 3 Interferenzversuche mit Molekülen
Quellenangaben	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Wissenschaftlicher Taschenrechner ◆ Formelsammlung
zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Rechnerische Auswertung des Doppelspaltexperiments inklusive der Kleinwinkelnäherung, Auswirkung von Variationen der Versuchsparameter auf das Interferenzmuster ◆ de-Broglie-Wellenlänge ◆ stochastische Deutung des Verhaltens von Quantenobjekten; Komplementarität von Welcher-Weg-Information und der Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten ◆ Begriff des Gültigkeitsbereichs einer Theorie.
fachpraktischer Anteil	ja <input type="checkbox"/> nein <input checked="" type="checkbox"/> Zeitzuschlag: -
Hinweise	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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 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.	2
2 Berechnen Sie den Abstand eines Maximums zweiter Ordnung vom Maximum nullter Ordnung auf dem Schirm. Erläutern Sie Ihr Vorgehen anhand aussagekräftiger Skizzen und gehen Sie auf verwendete Näherungen ein.	8
Beschreiben Sie qualitativ den Einfluss der Wellenlänge auf den Abstand Δd zweier benachbarter Interferenzmaxima auf dem Beobachtungsschirm.	2
3 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.	2
Erläutern Sie damit die Nichtparallelität der beiden Interferenzstreifen, die zu den Maxima 1. Ordnung gehören.	3
4 Erläutern Sie unter Bezugnahme auf die Aussagen in M 2a, wie Beobachtungen beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen dazu führen, dass das Elektron als ein neuartiges Objekt, ein so genanntes Quantenobjekt, betrachtet werden muss.	3
Erläutern Sie das in M 2b gezeigte Schirmbild bei einem Doppelspaltexperiment mit Elektronen anhand der Eigenschaften von Quantenobjekten.	3
5 Nun wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen dahingehend erweitert, dass mittels einer Messvorrichtung untersucht wird, welchen der beiden Spalte ein Elektron jeweils passiert. Erläutern Sie, wie sich diese Messung auf das zu beobachtende Schirmbild auswirkt.	3
6 Erläutern Sie den Begriff „Gültigkeitsbereich einer Theorie“.	4
Erläutern Sie anhand von M 3 den Einfluss von Experimenten auf den Gültigkeitsbereich einer Theorie.	

2 Material

Material 1

Interferenz von Farbstoffmolekülen

a) Versuchsaufbau

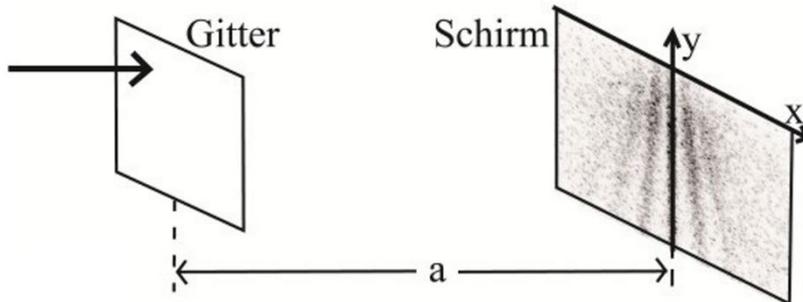


Abb. 1: Versuchsaufbau, IQB, in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

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
Masse der verwendeten Farbstoffmoleküle	$2,155 \cdot 10^{-24}$ kg

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

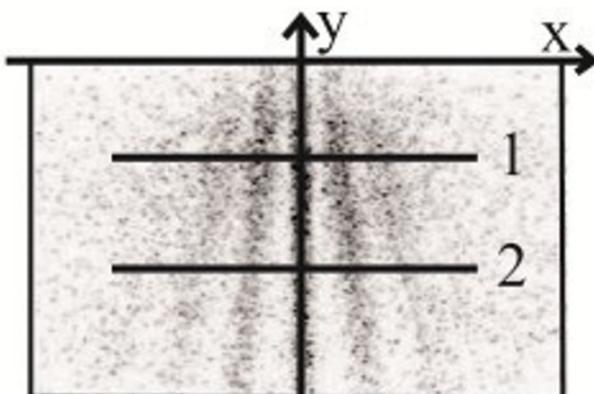


Abb. 2: Schirmbild, IQB, in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

Material 2

Das Elektron als Quantenobjekt

a) 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.

b) Schirmbild beim Doppelspaltexperiment

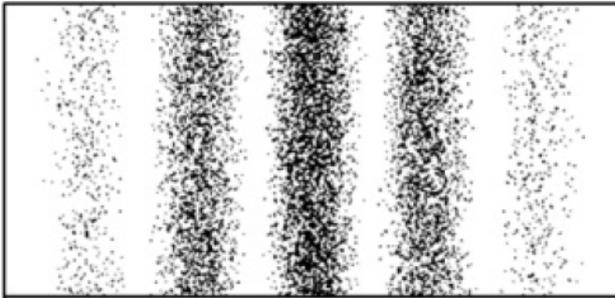


Abb.3: Schirmbild beim Doppelspaltexperiment, IQB, in Anlehnung an Juffmann et al., 2012.

Material 3

Interferenzversuche mit Molekülen

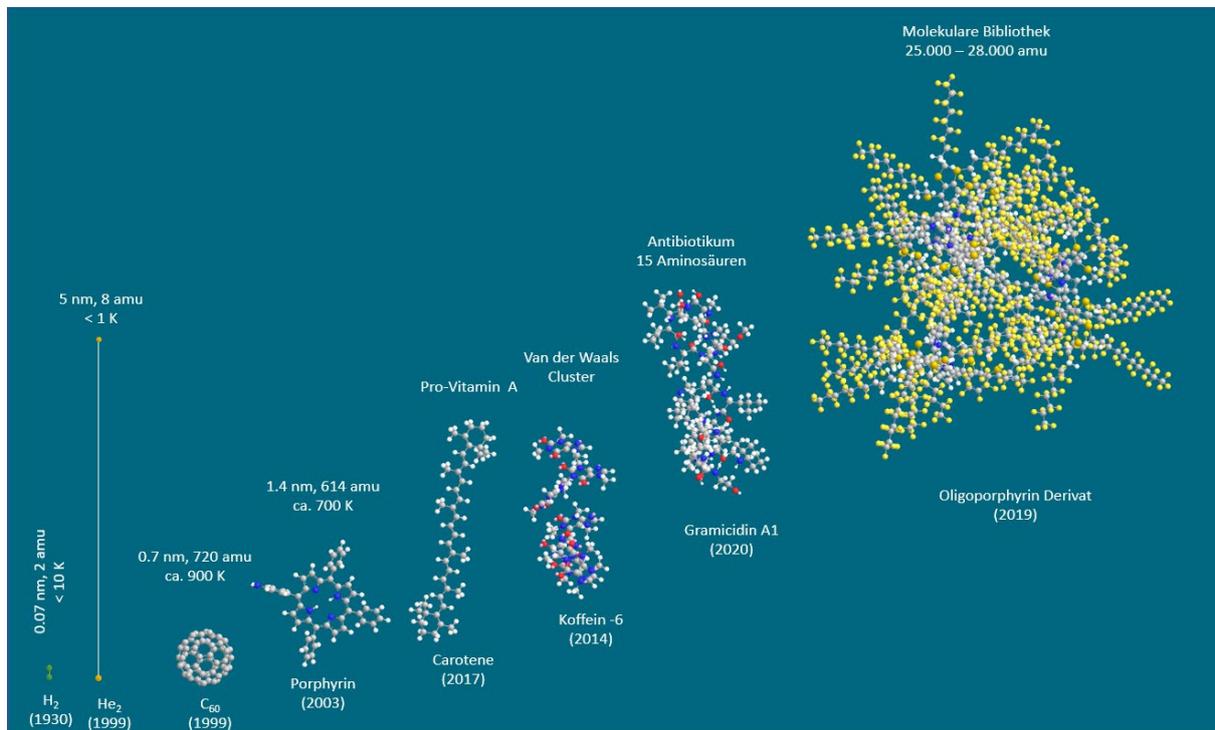


Abb. 4: Durchgeführte Interferenzversuche mit Molekülen

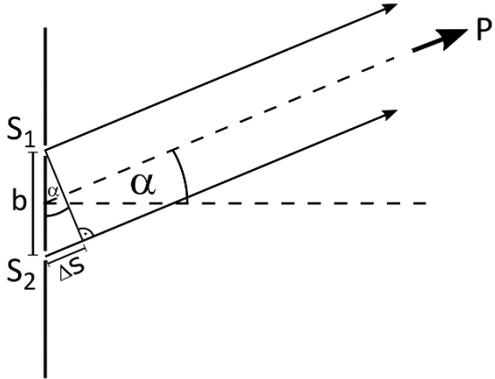
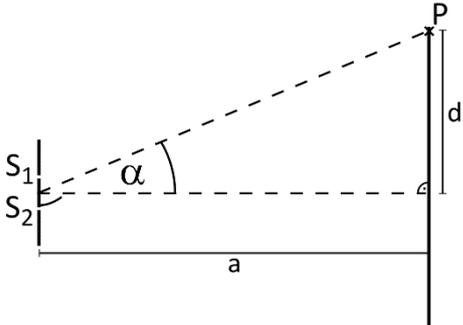
Seit 1930 gelangen Interferenzexperimente mit immer komplexeren Systemen. Dem ersten zweiatomaren System H_2 folgte über sechzig Jahre später mit He_2 das am schwächsten gebundene und größte diatomare System (Bindungsenergie von wenigen 100 neV). Die Interferenz eines heißen polyatomaren Moleküls wurde mit C_{60} 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	<p>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.</p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.</p> $p = m \cdot v = 3,41 \cdot 10^{-22} \text{ kg} \frac{m}{s}$ $\lambda = \frac{h}{p} = 1,95 \cdot 10^{-12} m$	2		
2	<p>Berechnen Sie den Abstand eines Maximums zweiter Ordnung vom Maximum nullter Ordnung auf dem Schirm. Erläutern Sie Ihr Vorgehen anhand aussagekräftiger Skizzen und gehen Sie auf verwendete Näherungen ein.</p> <p>Beschreiben Sie qualitativ den Einfluss der Wellenlänge auf den Abstand Δd zweier benachbarter Interferenzmaxima auf dem Beobachtungsschirm.</p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an;</p> <p>K 4 formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert.</p> <p><i>Die strukturierte Darstellung, insbesondere die Qualität der Skizzen und die Erläuterungen zu den Näherungen und den Voraussetzungen für diese, ist für die Bewertung maßgeblich.</i></p> <p><i>Bei der Verteilung der Bewertungseinheiten ist zu berücksichtigen, welche Inhalte unmittelbar aus der verwendeten Formelsammlung entnommen werden können.</i></p>			

	<p>Für Interferenzmaximum 2. Ordnung: $\Delta s = b \sin \alpha_2 = 2 \lambda$</p>  <p>Näherung: Parallele Geraden, näherungsweise erfüllt für $a \gg b$ (Schirmabstand wesentlich größer als Spaltabstand)</p> <p>Lage des Maximums 2. Ordnung auf dem Schirm: $\tan \alpha_2 = \frac{d_2}{a}$</p>  <p>Kleinwinkelnäherung: $\sin \alpha_2 = \tan \alpha_2$, näherungsweise erfüllt für $d \ll a$.</p> <p>Damit: $\frac{2 \lambda}{b} = \frac{d_2}{a}$</p> $\Rightarrow d_2 = \frac{2 \lambda \cdot a}{b} = \frac{2 \cdot 1,95 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot 0,564 \text{ m}}{100 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2,20 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ $d_2 = 22,0 \text{ } \mu\text{m}$ <p>Allgemein: $d_k = \frac{k \lambda \cdot a}{b} \Rightarrow \Delta d = \frac{\lambda \cdot a}{b}$</p> <p>Dieser Abstand nimmt somit (linear) mit der Wellenlänge zu.</p>	<p>4</p>	<p>4</p>	
<p>3</p>	<p><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></p>			

	<p>Die Lernenden ...</p> <p>E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen.</p> <p><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></p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p>		<p>2</p> <p>1</p> <p>2</p>	
<p>4</p>	<p><i>Erklären Sie unter Bezugnahme auf die Aussagen in M 2a, wie Beobachtungen beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen dazu führen, dass das Elektron als ein neuartiges Objekt, ein so genanntes Quantenobjekt, betrachtet werden muss.</i></p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>K 3 entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder.</p> <p><i>Zur Bearbeitung dieser Teilaufgabe gehört notwendigerweise, dass sowohl auf die Aussagen der Textquelle als auch auf das Doppelspaltexperiment mit Elektronen Bezug genommen wird. Die Aussagen der Textquelle müssen mit Beobachtungen in Verbindung gebracht werden. Auch die angemessene Verwendung der Fachsprache ist für die Bewertung relevant.</i></p> <p>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.</p> <p>Das Elektron verhält sich in diesen Experimenten also weder wie ein klassisches Teilchen noch wie eine klassische Welle, sondern zeigt sich als etwas völlig Neues, ein Quantenobjekt.</p>		<p>3</p>	

	<p><i>Erklären Sie das in M 2b gezeigte Schirmbild bei einem Doppelspaltexperiment mit Elektronen anhand der Eigenschaften von Quantenobjekten.</i></p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen.</p> <p>Das Verhalten eines einzelnen Quantenobjekts, hier eines Elektrons, am Doppelspalt ist nicht determiniert. Es trifft an einem zufälligen Ort auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt auf. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser Auftrefforte resultiert aus dem Interferenzmuster der zugehörigen Materiewelle. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt sich als Häufigkeitsverteilung der Auftrefforte bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments mit einer großen Zahl von Elektronen.</p>	3		
5	<p><i>Nun wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen dahingehend erweitert, dass mittels einer Messvorrichtung untersucht wird, welchen der beiden Spalte ein Elektron jeweils passiert. Erläutern Sie, wie sich diese Messung auf das zu beobachtende Schirmbild auswirkt.</i></p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien.</p> <p>Durch die Messvorrichtung wird eine Information über den Weg gewonnen, den ein Elektron 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.</p>	3		
6	<p><i>Erklären Sie den Begriff „Gültigkeitsbereich einer Theorie“.</i></p> <p><i>Erläutern Sie anhand von M 3 den Einfluss von Experimenten auf den Gültigkeitsbereich einer Theorie.</i></p> <p>Die Lernenden ...</p> <p>S 2 erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten;</p> <p>E 9 reflektieren die Relevanz von Modellen, Theorien, Hypothesen und Experimenten für die physikalische Erkenntnisgewinnung;</p> <p>K 3 entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder.</p>			

<p><i>Zu einer vollständigen Antwort gehört zwingend eine klare Definition des Begriffs „Gültigkeitsbereich“, ehe anschließend die diesbezügliche Relevanz von Experimenten erläutert wird.</i></p> <p><i>Eine Bezugnahme auf in der Abbildung dargestellte Informationen muss erkennbar sein.</i></p> <p>Der Gültigkeitsbereich einer Theorie bezeichnet den Bereich von Parametern, z. B. Größenordnungen wie hier die Ausdehnung oder die Masse der untersuchten Teilchen, in welchem die Theorie als gültig angesehen wird, in dem sie beispielsweise durch Experimente bestätigt werden kann.</p> <p>In Material 3 ist dargestellt, mit welchen Molekülen im Laufe der Zeit erfolgreich Interferenzexperimente durchgeführt werden konnten. Die Durchführung von Interferenzexperimenten mit immer größeren Molekülen zeigte, dass auch diese Teilchen das stochastische Verhalten zeigen, das von der Quantentheorie vorhergesagt wird. Damit trugen diese Experimente dazu bei, den Gültigkeitsbereich der Quantentheorie zu erweitern.</p>	2		2
Summe	11	15	4
Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	37	50	13

4 Standardbezug

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

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.

6 Hinweise für die Lehrkraft

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

- ◆ Teilaufgabe 1: In der Aufgabenstellung für das erhöhte Anforderungsniveau ist die Masse der Moleküle in atomaren Masseneinheiten angegeben. Auf die Umrechnung dieser Angabe in die Einheit Kilogramm ist hier verzichtet.
- ◆ Teilaufgabe 2: In der Aufgabenstellung für das grundlegende Anforderungsniveau werden (in den Anforderungsbereich II eingestuft) Erläuterungen zu den durchgeführten Berechnungen und eine Diskussion der verwendeten Näherungen gefordert. In der Aufgabenstellung für das erhöhte Anforderungsniveau wird davon ausgegangen, dass diese Hintergründe gesichert vorhanden sind. Die Aufgabenstellung dort beschränkt sich auf die Durchführung der vertrauten Berechnungen (im Wesentlichen Anforderungsbereich I).
- ◆ Teilaufgabe 3: 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. Damit ist dieser Schritt dort dem Anforderungsniveau II zugeordnet.
- ◆ Teilaufgabe 4: Im erhöhten Anforderungsniveau wird ohne weitere inhaltliche Vorbereitung die Interpretation des Feynman-Zitats gefordert. In der entsprechenden Teilaufgabe für das grundlegende Anforderungsniveau wird dies zunächst durch die Erklärung eines konkret vorgelegten Versuchsergebnisses vorbereitet.
- ◆ Teilaufgabe 6: Im grundlegenden Anforderungsniveau beginnt die Aufgabenstellung mit der Wiedergabe der Definition des Begriffs „Gültigkeitsbereich einer Theorie“. In der entsprechenden Aufgabenstellung für das erhöhte Anforderungsniveau wird vorausgesetzt, dass die Lernenden mit diesem Begriff so weit vertraut sind, dass er unmittelbar im Rahmen der Erläuterung aufgegriffen wird.

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