

Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Grundlegende Aspekte der Quantenphysik am Doppelspalt
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	♦ Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen ♦ Überlagerung von Wellen ♦ Interferenz am Doppelspalt ♦ Quantenphysik und Materie ♦ Quantenobjekte ♦ Grundlegende Aspekte der Quantentheorie
Materialien	♦ M 1 Material zum Doppelspaltexperiment ♦ M 2 Mit zunehmender Belichtungszeit aufgenommene Bilder ♦ M 3 Berechnete Intensitätsverteilungen
Quellenangaben	♦ Alle Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: -

1 Aufgabe

Grundlegende Aspekte der Quantenphysik am Doppelspalt

	BE
1 In M 1 ist ein Doppelspalt-Experiment mit Licht dargestellt. Der Licht-Detektor soll längs der eingezeichneten Strecke verschiebbar sein. Erläutern Sie auf der Grundlage von M 1, warum beim Verschieben des Detektors periodisch abwechselnde Helligkeit gemessen wird. Erklären Sie das aus dem Unterricht bekannte Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes mit einer Doppelspalt-Anordnung. Begründen Sie die dabei verwendete Gleichung.	4 4 4
2 Würde man ein Doppelspalt-Experiment mit einer Folge einzelner Photonen ausführen, so würde eine Folge verschieden lang belichteter „Aufnahmen“ mit einer speziellen, sehr empfindlichen Kamera die Bilder in M 2 ergeben. Erklären Sie die Aussage dieser Bilder für einzelne Photonen unter Verwendung der Begriffe <i>stochastische Vorhersagbarkeit</i>, <i>Superposition</i> und <i>Determiniertheit der Zufallsverteilung</i>.	8
3 Die untere Spaltöffnung in M 1 kann mit einer lichtundurchlässigen Blende verschlossen oder geöffnet werden. Man würde auf diese Weise Intensitätsverteilungen wie in M 3 (Bilder a und b) erhalten. Beschreiben Sie die zwischen den Bildern a und b erkennbaren Veränderungen. Erklären Sie die Veränderung an den Stellen A und B zwischen den beiden Bildern a und b.	3 2
4 Im Zusammenhang mit vergleichbaren Experimenten wird manchmal der Begriff Komplementarität verwendet. Dieser Begriff wird in einigen Quellen wie folgt erklärt: ♦ Bei einer Ortsmessung durch Bestimmung der jeweils durchquerten Spaltöffnung bildet sich beim Doppelspaltexperiment kein Interferenzmuster aus. ♦ Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Pfade schließen einander aus. Beurteilen Sie zunächst, ob mit diesen Aussagen die in den Bildern a und b (M 3) dargestellten Ergebnisse erklärt werden können. Beziehen Sie dann zusätzlich Bild c (M 3) in Ihre Beurteilung ein.	2 3

2 Material

Material 1

Material zum Doppelspaltexperiment



Abb. 1: Prinzipieller Aufbau, IQB

Der Lichtdetektor ist längs der eingezeichneten Strecke verschiebbar.
Die Abbildung rechts zeigt das entstehende Schirmbild (mit einer empfindlichen Kamera fotografiert).

Material 2

Mit zunehmender Belichtungszeit aufgenommene Bilder

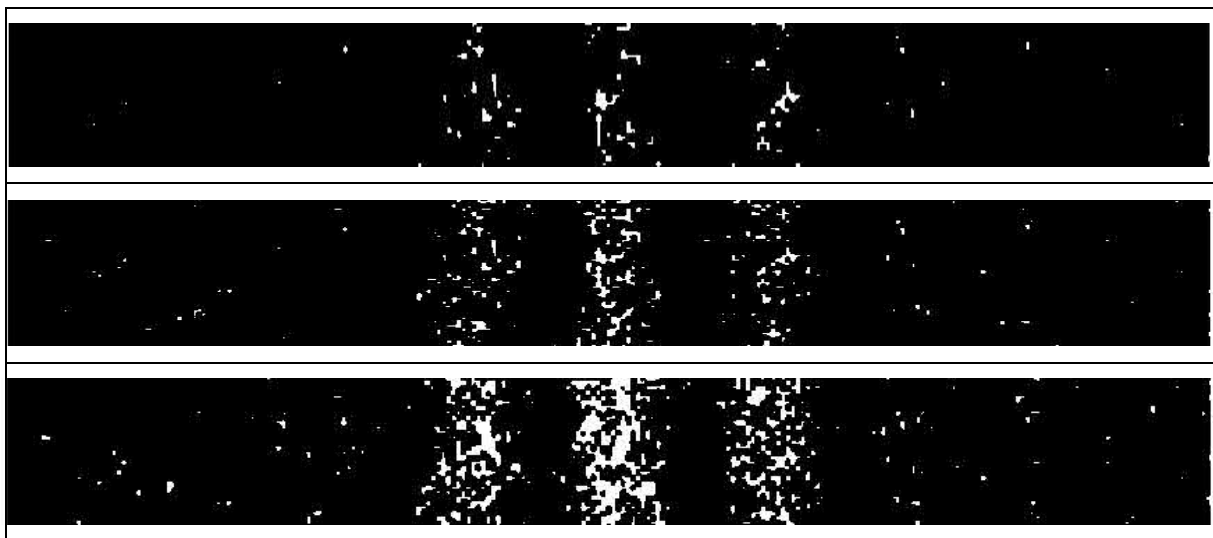


Abb. 2: Mit zunehmender Belichtungszeit aufgenommene Bilder der Erscheinung, IQB

Material 3

Berechnete Intensitätsverteilungen

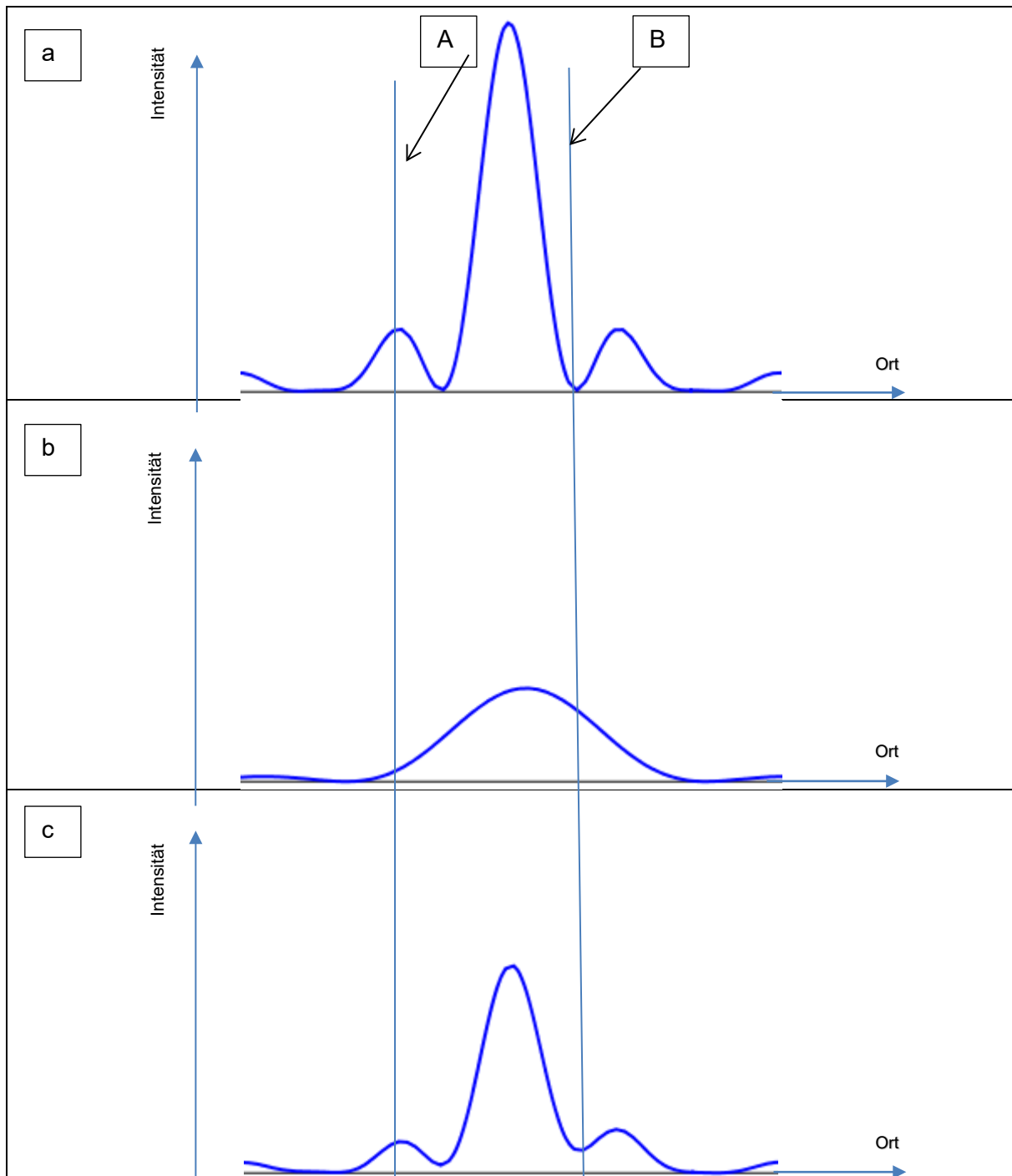


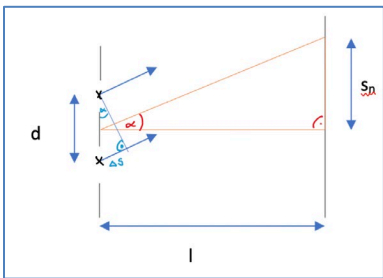
Abb. 3: Berechnete Intensitätsverteilungen bei verschiedenen Einstellungen der lichtundurchlässigen Blende vor dem unteren Spalt. a: Blende entfernt, b: Blende geschlossen. Der obere Spalt wird nicht verändert, IQB

In Bild c wird mit einem Filter anstelle einer undurchlässigen Blende die Lichtdurchlässigkeit des unteren Spalts etwas reduziert.

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>Erläutern Sie auf der Grundlage von M 1, warum beim Verschieben des Detektors periodisch abwechselnde Helligkeit gemessen wird.</i> Die Lernenden ... S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien; K 4 formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert. <i>Erläutern</i> mit den Kernpunkten Huygens-Prinzip, unterschiedliche Weglängen von den beiden Spalten zum Detektor, je nach Wegdifferenz konstruktive bzw. destruktive Interferenz. <i>Mögliche Lösung:</i> Die von der Quelle ausgehende Welle trifft auf beide Spalte, die nach dem Huygens-Prinzip als punktförmige Erreger neuer Elementarwellen interpretiert werden können. Diese Elementarwellen interferieren hinter dem DSP. Bis zum Ort des Detektors auf dem Schirm legen sie unterschiedliche Wege zurück. Je nach Wegdifferenz ergibt sich konstruktive (ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge) oder destruktive Interferenz (ungeradzahlige Vielfache der Wellenlänge). Folglich registriert der Detektor abwechselnd helle und dunkle Stellen.	4		
	<i>Erklären Sie das aus dem Unterricht bekannte Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes mit einer Doppelspalt-Anordnung.</i> Die Lernenden ... S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. <i>Erklären</i> mit den Kernpunkten Messung des Abstandes l Doppelspalt-Beobachtungsebene, Messung des Abstandes s_n zwischen dem möglichst weit entfernten Maximum n-ter Ordnung zum Maximum nullter Ordnung, Information über den Spaltabstand d, je nach Unterricht z.B. mit der Gleichung $n \cdot \lambda = d \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{s_n}{l}\right)\right)$. <i>Mögliche Lösung:</i> Die Wellenlänge kann man nach der Formel $n \cdot \lambda = d \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{s_n}{l}\right)\right) \text{ bestimmen.}$			

	Der Abstand d der Spalte ist in der Regel bekannt. l ist der Abstand des Doppelspalts zur Beobachtungsebene und muss gemessen werden. s_n ist der Abstand des Maximums n-ter Ordnung zum Maximum nullter Ordnung in der Beobachtungsebene. Um die Wellenlänge möglichst genau zu bestimmen, sollte n so groß wie möglich gewählt werden (dann ist die Messunsicherheit bei der Messung von s_n so gering wie möglich).	4		
	<i>Begründen Sie die dabei verwendete Gleichung.</i> Die Lernenden ... S 6 erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an; S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. <i>Begründen je nach Unterricht (ggf. unter Hinzuziehen einer geeigneten Skizze) z.B. mit den Kernpunkten Dreieck Doppelspalt-Detektor und Dreieck Spaltabstand-Wegdifferenz, zugehörige Größen und Winkel, Anwenden der Winkelbeziehungen.</i> <i>Mögliche Lösung:</i>  Durch Einzeichnen einer Senkrechten erhält man den Wegunterschied der vom Doppelspalt ausgehenden parallelen Lichtwege. Für den Winkel α im (blauen) Dreieck gilt: $\sin(\alpha) = \frac{s}{d} \quad (1)$ Für den gleichen Winkel α im ähnlichen (roten) Dreieck gilt $\tan(\alpha) = \frac{s_n}{l} \quad (2).$ Damit der Detektor auf dem Schirm ein Maximum (konstruktive Interferenz) nachweist, muss gelten: $\Delta s = n \cdot \lambda \quad (3)$ Durch Umformen von Gleichung (1) nach α, Einsetzen von α und Δs in Gleichung (2) und geeignete Umformungen erhält man die gesuchte Gleichung.		4	
2	<i>Erklären Sie die Aussage dieser Bilder für einzelne Photonen unter Verwendung der Begriffe stochastische Vorhersagbarkeit, Superposition und Determiniertheit der Zufallsverteilung.</i> Die Lernenden ... S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien; 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>Erklären</i> mit den Kernpunkten einzelne Treffer, zunehmende Dichte bei gleichbleibender Hüllkurve (stochastische Vorhersagbarkeit), Superposition z.B. durch: Hüllkurve ist Ergebnis der Superposition der Wellenfunktionen zu beiden Spaltöffnungen. Zufallsverteilung in ihren Minima. <i>Mögliche Lösung:</i> In den Bildern sind einzelne Treffer als helle Punkte zu erkennen. Der Auftreffpunkt für ein einzelnes Photon ist nicht vorherzusagen. Mit zunehmender Dichte (bei gleichbleibender Hüllkurve) ergibt sich jedoch eine stochastische Vorhersagbarkeit. Die Hüllkurve ist das Ergebnis der Superposition der Wellenfunktionen zu beiden Spaltöffnungen. Die Zufallsverteilung ist dadurch determiniert: z. B., in ihren Minima wird niemals ein Photon registriert. <i>Die volle Anzahl an BE kann nur erteilt werden, wenn die Forderung nach Struktur und angemessener Fachsprache erfüllt ist.</i>		8	
3	<i>Beschreiben Sie die zwischen den Bildern a und b erkennbaren Veränderungen.</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>Beschreiben</i> mit den Kernpunkten ◆ Abnahme der Intensität an allen Stellen des Spektrums ◆ Verschwinden des Maximums an der Stelle A und ◆ Verschwinden des Minimums an der Stelle B, wenn der untere Spalt geschlossen ist. <i>Je nach Unterricht ist ggf. ein Hinweis auf Doppelspalt-/ Einzelspaltmuster bei Verschließen des unteren Spalts möglich.</i>		3	
	<i>Erklären Sie die Veränderung an den Stellen A und B zwischen den beiden Bildern a und b.</i> Die Lernenden ... E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen [...] Daten gefundenen Strukturen [...]. <i>Erklären je nach Unterricht</i> <i>Mögliche Lösung</i> (z.B. in der Zeigerdarstellung): Bei geschlossenem unterem Spalt fällt der zugehörige Zeiger weg und an der Stelle B gibt es keine destruktive Interferenz mehr. Daher ist die Intensität hier nicht mehr null. Bei A ergibt sich aus dem gleichen Grund keine konstruktive Interferenz mehr, folglich sinkt die Intensität.			2

4	Beurteilen Sie zunächst, ob mit diesen Aussagen die in den Bildern a und b (M 3) dargestellten Ergebnisse erklärt werden können. Die Lernenden ... E 8 beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen. <i>Mögliche Lösung:</i> Beim Übergang von Bild a zu Bild b wird der Durchtrittsort genau bekannt. Die Maxima außer dem Hauptmaximum verschwinden bei Kenntnis des Durchtritts-Ortes, so dass die Doppelspalt-Interferenz nicht mehr erkennbar ist. Die Bilder a und b unterstützen den Erklärungsversuch daher.		2	
	Beziehen Sie dann zusätzlich Bild c (M 3) in Ihre Beurteilung ein. Die Lernenden ... E 8 beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen. <i>Mögliche Lösung:</i> Wenn der Durchtrittsort nicht genau bekannt, sind weiterhin Maxima zu erkennen. Also ist die Doppelspalt-Interferenz nicht völlig verschwunden, wie der Erklärungsversuch nahelegt. Er muss also ergänzt werden, um gültig zu bleiben.			3
	Summe	8	17	5
	Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	26,7	56,7	16,6

4 Standardbezug

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

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.