

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Interferenz von Fullerenen
Anforderungsniveau	erhöht
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 ◆ Quantenphysikalisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus
Materialien	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 1 Experiment von 1999 ◆ M 2 Thermische Strahlung zur Ortsmessung ◆ M 3 Interferenzbilder der Experimente von 1999 und 2003 ◆ M 4 Diskussion im Internetforum „Grenzen der Quantenphysik“
Quellenangaben	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 1, Abb. 1, M 3, Abb. 3 in Anlehnung an: Arndt, M., Zeilinger, A. (2000). Wo ist die Grenze der Quantenwelt? <i>Physikalische Blätter</i> 56 Nr. 3, 69-71. https://doi.org/10.1002/phbl.20000560316 © Copyright [2000] Wiley-VCH GmbH und verbundene Unternehmen. Alle Rechte vorbehalten, einschließlich derer für Text- und Data-Mining und Training von Technologien der Künstlichen Intelligenz oder ähnlichen Technologien. ◆ M 1, Abb. 2: Sponk (2010). Buckminsterfullerene_animated. Wikimedia Commons. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Buckminsterfullerene_animated.gif&oldid=540630741 (Zugriff am 08.03.2022) ◆ M 3, Abb. 4: Nairz, O., Arndt, M., Zeilinger, A. (2003). Quantum interference experiments with large molecules, <i>Am. J. Phys.</i>, Vol. 71, No. 4, 319–325. https://doi.org/10.1119/1.1531580

Hilfsmittel	<ul style="list-style-type: none">◆ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat¹◆ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein
Hinweise:	

¹ siehe „Hinweise zur Verwendung von Hilfsmitteln“

1 Aufgabe

Interferenz von Fullerenen

Fullerene, wie z. B. C_{60} -Moleküle, bestehen aus Kohlenstoffatomen und sind relativ massereiche Quantenobjekte. Im Jahr 1999 gelang es einer Forschergruppe, Interferenzerscheinungen auch bei Fullerenen nachzuweisen.

- | | BE |
|--|-----------|
| 1 Im Experiment aus dem Jahre 1999 trifft ein Strahl von C_{60} -Molekülen auf eine Interferenzanordnung. In Material 1 ist unter anderem der prinzipielle Aufbau des Experiments dargestellt. | |
| a Berechnen Sie die mittlere de-Broglie-Wellenlänge der C_{60} -Moleküle aus den Versuchsdaten in Material 1.
[Kontrollwert: $\lambda_{\text{de Broglie}} = 2,51 \cdot 10^{-12} \text{ m}$] | 3 |
| b Ermitteln Sie diese Wellenlänge mithilfe der Messdaten von Abbildung 3 (M 3).
[Kontrollwert: $\lambda_{\text{Abb.3}} \approx 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$] | 6 |
| c Berechnen Sie die prozentuale Abweichung Ihres Ergebnisses aus Teilaufgabe b von dem aus Teilaufgabe a und geben Sie eine mögliche Ursache für Abweichungen an. | 4 |
| d Erläutern Sie einen möglichen Grund dafür, dass in Abbildung 3 bei den Minima 1. Ordnung nicht null Zählerereignisse vorliegen.
Beschreiben Sie die Änderung von Abbildung 3, wenn die Geschwindigkeiten weniger stark streuen würden (schmale Geschwindigkeitsverteilung). | 5 |
| 2 Es befindet sich jeweils nur ein einzelnes Molekül zu jedem Zeitpunkt in der Messapparatur. | |
| a Begründen Sie rechnerisch, dass der mittlere Abstand zweier aufeinanderfolgender Moleküle theoretisch ca. 10 Meter beträgt (M 1). | 3 |
| b Beschreiben und begründen Sie die prinzipielle Veränderung des Bildes beim Detektor, wenn in einem Gedankenexperiment am Gitter detektiert werden würde, durch welchen Spalt das Molekül hindurchgeht. | 4 |
| 3 Im Jahr 2003 wurde das Experiment bei prinzipiell gleichem Versuchsaufbau wiederholt. Neben weiteren Verbesserungen des Aufbaus konnte auch die Ofentemperatur variiert werden. Die Größe der Öffnung des Ofens wurde nicht verändert. Die Einflüsse der Ofentemperatur auf den Strahl von C_{60} -Molekülen sind in Material 1 aufgeführt. | |
| a Erklären Sie anhand zweier Eigenschaften des Diagramms in Abbildung 4, dass bei der Messung von 2003 eine geringere Ofentemperatur als 1999 (Abb. 3) verwendet wurde. | 6 |
| b Erklären Sie mit Hilfe von Material 2, dass bei sehr hohen Ofentemperaturen kein Interferenzbild mehr beobachtet werden kann. Nehmen Sie vereinfachend an, dass alle Fullerene die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. | 4 |

- 4 Nehmen Sie begründet Stellung dazu, ob weitere Experimente zur Grundlagenforschung zu Quantenobjekten, wie in Material 4 diskutiert, finanziert werden sollten. Beziehen Sie sich dabei auf mehrere Aussagen aus Material 4.

5

2 Material

Material 1: Experiment von 1999

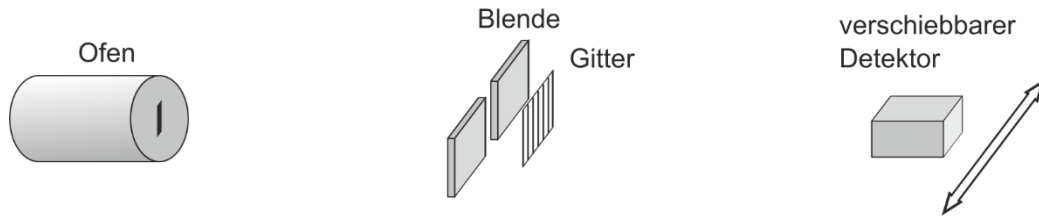


Abb. 1: Vereinfachter schematischer Versuchsaufbau, wobei das Gitter wie ein Doppelspalt betrachtet werden kann

Informationen zum Versuchsaufbau von 1999 mit C₆₀-Molekülen:

Der Ausgangsstoff Graphit zur Erzeugung der Fullerene liegt bei Raumtemperatur als Feststoff vor. Vereinfacht betrachtet wird diesem Feststoff im Ofen Energie zugeführt, wodurch Atome aus dem Atomgitter herausgelöst werden, die sich in Folgeprozessen zu C₆₀-Molekülen verbinden. Die C₆₀-Moleküle besitzen eine breite Geschwindigkeitsverteilung. Die mittlere Geschwindigkeit der C₆₀-Moleküle steigt mit zunehmender Ofentemperatur. Durch die Öffnung an der Stirnseite des Ofens treten C₆₀-Moleküle aus. Mithilfe der Blende entsteht ein Strahl, dessen Intensität ebenfalls mit zunehmender Ofentemperatur steigt. Ein Gitter besteht aus vielen nebeneinander angeordneten Einzelspalten. Das Gitter kann hier wie ein Doppelspalt behandelt werden. Die Maxima und Minima liegen an denselben Stellen. Durch die Verschiebung des Detektors ist eine orts aufgelöste Messung der C₆₀-Moleküle hinter dem Gitter möglich.

Versuchsdaten von 1999:

- ◆ Masse eines C₆₀-Moleküls: $m = 1,20 \cdot 10^{-24}$ kg
- ◆ Durchmesser eines C₆₀-Moleküls: $D = 0,7$ nm
- ◆ Ofentemperatur: $\mathbb{J} = 627$ °C
- ◆ mittlere Geschwindigkeit der C₆₀-Moleküle: $v = 220 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ◆ mittlerer Zeitabstand zweier hintereinander aus dem Ofen austretender C₆₀-Moleküle: $\Delta t = 45$ ms
- ◆ Spaltmittenabstand benachbarter Spalte des Doppelspalts (vereinfacht statt eines Gitters): $g = 100$ nm
- ◆ Abstand Gitter–Detektor: $a = 1,25$ m

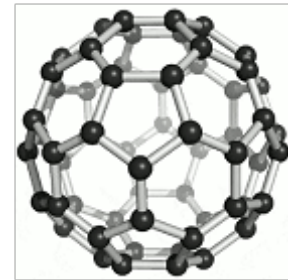


Abb. 2: C₆₀-Molekül

Material 2: Thermische Strahlung zur Ortsmessung

Die C₆₀-Moleküle emittieren zwischen dem Ofen und dem Detektor elektromagnetische Strahlung, sogenannte thermische Strahlung. Die mittlere Photonenenergie dieser thermischen Strahlung sowie die Anzahl der pro Zeit emittierten Photonen steigt mit zunehmender Ofentemperatur (bzw. Temperatur der Moleküle) an. Die Detektion dieser thermischen Strahlung ermöglicht eine Messung des Orts der Moleküle. Je kürzer die Wellenlänge der emittierten Strahlung, desto genauer ist die Ortsmessung.

Material 3: Interferenzbilder der Experimente von 1999 und 2003

Beide Diagramme geben jeweils die Anzahl der Zählerereignisse des Detektors an einer bestimmten Position während einer festgelegten Zeit an. Die Position des Detektors variiert parallel zur Gitterebene wie in M 1, Abb. 1 dargestellt.

Interferenzbild der Messung von 1999

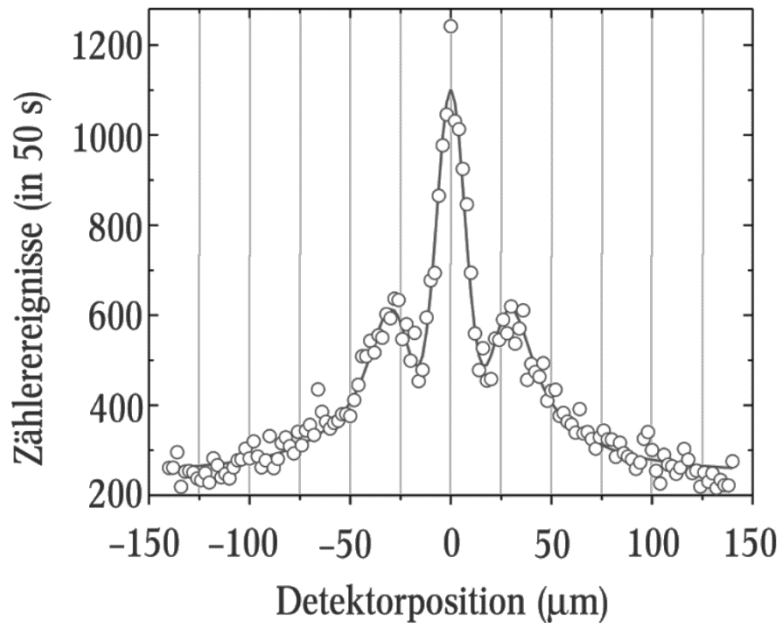


Abb. 3: Interferenzbild der Messung von 1999

© Copyright [2000] Wiley-VCH GmbH und verbundene Unternehmen. Alle Rechte vorbehalten, einschließlich derer für Text- und Data-Mining und Training von Technologien der Künstlichen Intelligenz oder ähnlichen Technologien.

Interferenzbild der Messung von 2003

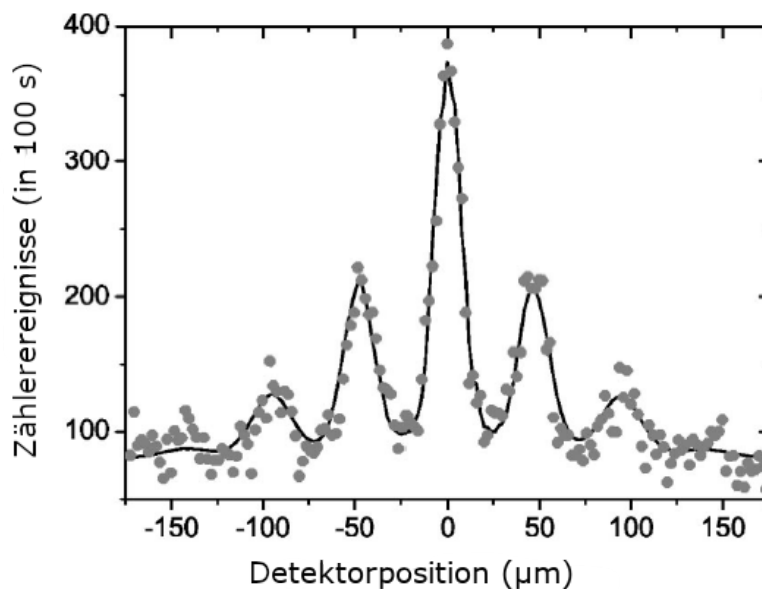


Abb. 4: Interferenzbild der Messung von 2003 mit geringerer Ofentemperatur als 1999

Reprinted with permission Nairz, O., Arndt, M., Zeilinger, A. (2003). Quantum interference experiments with large molecules, *Am. J. Phys.*, Vol. 71, No. 4, 319–325. Copyright 2003, AIP Publishing. This article may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the author and the AIP Publishing.

Material 4: Diskussion im Internetforum „Grenzen der Quantenphysik“

Person 1: „Es wurden in den letzten Jahrzehnten Interferenzversuche mit immer größeren Quantenobjekten durchgeführt, um die Grenzen der Gesetze der Quantenphysik auszuloten. Ich finde, das ganze Geld dafür sollte man sparen oder z. B. in den Ausbau von Schulen stecken.“

Person 2: „Grundlagenforschung stellt eine Investition in die Zukunft dar und führt langfristig häufig zu großen Weiterentwicklungen. Zum Beispiel entwickelte ein australischer Astronom bei der Optimierung seines Radioteleskops zur Untersuchung schwarzer Löcher die heute wichtige Wi-Fi-Technologie.“

Person 1: „Schön. Aber ich kann doch nicht sicher sein, dass diese Erkenntnis später jemandem nützt. In meinem Alltag hilft es mir auf jeden Fall nicht, dass ich weiß, dass Interferenzversuche auch mit größeren Quantenobjekten möglich sind. Ich würde keine Grundlagenforschung finanzieren.“

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	a $\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{1,20 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot 220 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,51 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	3		
	b Der Abstand d des 1. Maximums vom Maximum 0. Ordnung muss aus Abb. 3 entnommen werden. Mit beispielsweise $d = 30 \mu\text{m}$ ergibt sich für den Beugungswinkel α : $\tan \alpha = \frac{d}{a} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,25 \text{ m}}$ Mit der Beziehung für den Gangunterschied und $k = 1$ ergibt sich für die Wellenlänge: $\Delta s = g \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$ $\lambda = 100 \text{ nm} \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{30 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,25 \text{ m}} \right) \right) = 2,40 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ Hinweis: Eine Lösung mit Hilfe der Kleinwinkelnäherung ist auch möglich.	4	2	
	c Vergleich der Ergebnisse der Teilaufgaben a und b: $\frac{ \lambda_{\text{Interferenz}} - \lambda_{\text{de Broglie}} }{\lambda_{\text{de Broglie}}} = \frac{ 2,40 \cdot 10^{-12} \text{ m} - 2,51 \cdot 10^{-12} \text{ m} }{2,51 \cdot 10^{-12} \text{ m}} = 4\%$ Eine mögliche Ursache für den Unterschied der beiden Ergebnisse ist die Ablesegenauigkeit bei Abb. 3.	2	2	
	d Verschiedene Geschwindigkeiten der Moleküle führen aufgrund daraus folgender unterschiedlicher de-Broglie-Wellenlängen dazu, dass die Moleküle unterschiedlicher Geschwindigkeiten an unterschiedlichen Stellen ihr Minimum 1. Ordnung aufweisen. Insofern können die Zählerereignisse der Geschwindigkeit, die am häufigsten auftritt und somit das Minimum 1. Ordnung verursacht, nicht auf null abfallen. Das Interferenzbild würde die Maxima und Minima an denselben Stellen aufweisen, aber sie wären schmaler.		3	2
2	a Der mittlere Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Molekülen ergibt sich zu $\Delta s = v \cdot \Delta t = 220 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 9,9 \text{ m} \approx 10 \text{ m}$	3		
	b Da bei dem Gedankenexperiment die Welcher-Weg-Information vorliegen würde, kann aufgrund der Komplementarität von Welcher-Weg-Information und Interferenzfähigkeit keine Interferenz mehr auftreten. Das Bild am Detektor würde der klassischen Überlagerung der Schirmbilder aller einzelnen Spalte entsprechen. Es wäre kein scharfes Interferenzbild mehr zu erkennen.		4	

3	<p>a Bei einer geringeren Ofentemperatur besitzen die C_{60}-Moleküle eine geringere mittlere Geschwindigkeit und somit eine größere mittlere de-Broglie-Wellenlänge. Daher sind die Abstände zwischen den Maxima beim Interferenzbild von 2003 größer als beim Interferenzbild von 1999.</p> <p>Zudem führt eine niedrigere Ofentemperatur zu einer geringeren Emission von C_{60}-Molekülen, weshalb die Zählrate im Jahr 2003 deutlich geringer war als im Jahr 1999.</p>		4	2
	<p>b Bei einer sehr hohen Ofentemperatur ist die mittlere Photonenenergie so groß und damit die emittierte elektromagnetische Strahlung so kurzweilig, dass ein Rückschluss auf den Weg des Quantenobjekts in der Apparatur gezogen werden kann. Aufgrund dieser Welcher-Weg-Information findet nach der Komplementarität von Weginformation und Interferenzfähigkeit keine Interferenz mehr statt.</p>			4
4	<p><i>Die Stellungnahme soll zu einem individuellen Fazit kommen. Dabei sollen verschiedene Argumente gegeneinander abgewogen und nicht nur ein Argument berücksichtigt werden.</i></p> <p><i>Mögliche Aspekte bei der Argumentation:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn ◆ Wissenschaftlicher Fortschritt / zufällige Entdeckungen ◆ Finanzierung anderer sinnvoller Projekte ◆ Unsicherheit des langfristigen Nutzens <p><i>Beispielsweise:</i></p> <p>Ich würde mich dafür aussprechen, solche Grundlagenforschung weiterhin zu finanzieren, obwohl der mögliche wissenschaftliche Fortschritt, der dabei stattfinden kann, nicht abgeschätzt werden kann. Ein wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn besteht darin, dass auch das Verhalten großer Moleküle mit der heutigen Theorie der Quantenphysik richtig beschrieben werden kann. Das alleine stellt für mich schon einen ausreichenden Mehrwert dar.</p>		5	
Summe²		12	20	8

² Bei jeder Aufgabe liegen die Anzahlen der Bewertungseinheiten – abhängig vom Anforderungsniveau – in den Bereichen, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Anforderungsniveau	erhöht			grundlegend		
Anforderungsbereich	I	II	III	I	II	III
Anzahl der BE	11 - 13	17 - 21	8 - 10	10 - 12	13 - 16	4 - 6

4 Standardbezug³

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1 a	3			
b	3			
c		7		
d	1			
2 a	1, 3			
b	1			
3 a		6	3	
b	1			
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 Bewertungsraster⁴ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

³ Zu jeder Teilaufgabe sind zu jedem Kompetenzbereich die Nummern der Standards gemäß den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife zu nennen, die zur Bearbeitung der Teilaufgabe erforderlich sind.

⁴ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.