

II.E.10

Quantenphysik

Beugung am Doppelspalt – Welle und Teilchen?

Ein Beitrag von Prof. Dr. Axel Donges



© RAABE 2020

© Matt Carter

Photonen, Elektronen und andere Objekte der Mikrophysik scheinen sich wie klassische Teilchen zu verhalten. Gleichzeitig weisen dieselben Teilchen aber auch Welleneigenschaften auf, wenn sie etwa durch einen Doppelspalt hindurchtreten. An diesem berühmten Experiment erläutert dieser Oberstufenbeitrag, auf welche unvorstellbare Weise es die moderne Physik schafft, das widersprüchliche Rätsel des Welle-Teilchen-Dualismus zu lösen.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	11–12
Dauer:	14 Unterrichtsstunden
Kompetenzen:	Wissen erwerben und anwenden, modellieren und mathematisieren, Grenzen physikalischer Modelle an Beispielen erläutern, Erkenntnisse verbalisieren
Thematische Bereiche:	Wellenoptik, Quantenphysik, Elementarteilchen, Beugung, Interferenz, Einzel- und Doppelspalt, Welle-Teilchen-Dualismus, Materiewellen, Beugung von einzelnen Photonen und Elektronen
Zusatzmaterial:	Lernerfolgskontrolle

Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt, LEK = Lernerfolgskontrolle, Lv = Lehrerversuch

1.–2. Stunde



Thema:

Wiederholung: Beugung

M 1 (Ab, Lv)

Beugung am Einzelspalt – Auffrischung

Benötigt:

- Laser
- Spalt
- Beobachtungsschirm mit Stativ



M 2 (Ab, Lv)

Beugung am Doppelspalt – Auffrischung

Benötigt:

- Laser
- Doppelspalt
- Beobachtungsschirm mit Stativ

3.–4. Stunde



Thema:

Wiederholung: Photon

M 3 (Ab)

Welle-Teilchen Dualismus – Auffrischung

5.–8. Stunde



Thema:

Beugungsexperimente mit einzelnen Photonen

M 4 (Ab)

Beugungsexperimente mit schwachen Lichtquellen

M 5 (Ab)

Zeitliche Entwicklung eines Beugungsbildes am Beispiel des Doppelspalts

9.–12. Stunde



Thema:

Interferenz mit Quantenobjekten

M 6 (Ab)

Durch welchen Spalt geht das Photon beim Doppelspalt-Experiment?

M 7 (Ab)

Das Photon als Quantenobjekt

M 8 (Ab)

Doppelspaltbeugung mit Elektronen

13.–14. Stunde



Thema:

Lernerfolgskontrolle

M 9 (LEK)

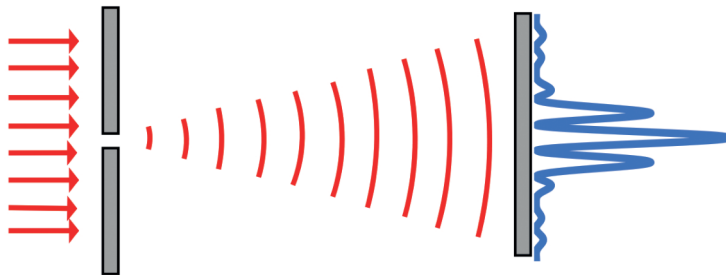
Prüfen Sie Ihr Wissen!

Beugung am Einzelspalt – Auffrischung

M 1

Lehrerexperiment

Ein Laserstrahl trifft als ebene Lichtwelle mit der Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$ auf einen Einzelspalt mit einer Breite von $2a = 4,0 \text{ }\mu\text{m}$. Ein Teil des Lichts geht durch den Spalt hindurch und trifft auf einen Beobachtungsschirm im Abstand L zwischen Spalt und Schirm von 2 m .



Das Licht wird gebeugt, denn es wird auch im Bereich des geometrischen Schattens beobachtet.

Für die Winkel Θ_n der Intensitätsnullstellen, zwischen der Einfallsrichtung des Lichts und den Verbindungslinien von der Spaltmitte zu den Intensitätsnullstellen auf dem Schirm, gilt:

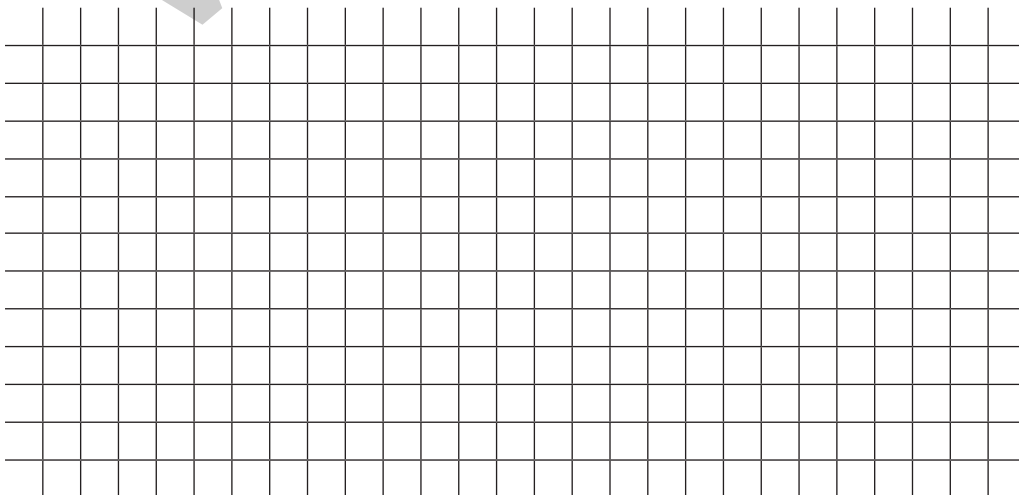
$$\sin(\Theta_n) = n \cdot \frac{\lambda}{2a} \text{ mit } n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Die Zahlen für n bezeichnen die Ordnung der Nullstellen (Minima).



Aufgaben

- Berechnen** Sie mit den im Lehrerexperiment genannten Zahlenwerten den Nullstellen-Winkel Θ_1 des Minimums erster Ordnung (d. h. $n = 1$).
- Bestimmen** Sie den Abstand zwischen dem Intensitätsmaximum in der Mitte und der ersten Intensitätsnullstelle auf dem Schirm.
- Recherchieren** Sie im Internet, in Lehrbüchern oder Ihren Unterrichtsmitschriften und **leiten** Sie die Formel $\sin(\Theta_1) = \frac{\lambda}{2a}$ für das Intensitätsminimum der ersten Ordnung **her**.



Prüfen Sie Ihr Wissen!

M 9



Aufgabe 1:

Ein paralleler Laserstrahl hat eine Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$.

- a) Das Licht trifft senkrecht auf einen Spalt mit der Spaltbreite $2a = 3,0 \mu\text{m}$.

Berechnen Sie den Abstand x , den die beiden Intensitätsminima links und rechts vom zentralen Maximum auf einem $L = 6,0 \text{ m}$ entfernten Schirm haben.

- b) Der Spalt wird nun ersetzt durch einen Doppelspalt mit der Spaltbreite $2a = 3,0 \mu\text{m}$ und den Spaltabstand $2b = 10 \mu\text{m}$.

Bestimmen Sie den Abstand y der beiden Minima links und rechts des zentralen Maximums, wenn sich der Schirm unverändert im Abstand $L = 6,0 \text{ m}$ vom Spalt entfernt befindet.

- c) Das Experiment aus Teilaufgabe b) wird mit einem vergrößerten Spaltabstand von $2b = 15 \mu\text{m}$ erneut durchgeführt. Abwechselnd werden rechter und linker Spalt verschlossen.

Geben Sie die Strecke z an, um die die beiden Einzelspalt-Beugungsbilder auf dem Schirm voneinander entfernt liegen.

- d) **Vergleichen** Sie die Strecke y mit der Strecke x aus Aufgabenteil a).

Aufgabe 2:

- a) **Berechnen** Sie die Leistung P eines Lasers, dessen Wellenlänge $\lambda = 800 \text{ nm}$ beträgt und der eine Milliarde Photonen pro Sekunde emittiert.

- b) **Ermitteln** Sie den räumlichen Abstand x der Photonen, wenn man annimmt, dass sie wie auf einer Perlenschnur angeordnet sind?

Aufgabe 3:

Durch einen Doppelspalt fliegen 3 Photonen und werden auf einem Film registriert.

Stellen Sie dar, welche Aussagen über das Doppelspalt-Beugungsbild gemacht werden können.

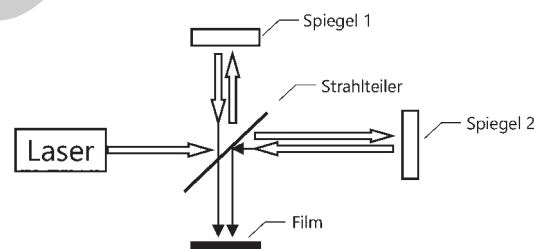
Aufgabe 4:

Nennen Sie mindestens drei Quantenobjekte.

Aufgabe 5:

Erläutern Sie die Bedeutung der

Welcher-Weg-Information für Quantenobjekte.



A. Donges

Aufgabe 6:

Die obige Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines sogenannten Michelson-Interferometers. Mithilfe eines Strahlteilers wird ein Laserstrahl in zwei Teilstrahlen zerlegt und – nachdem die beiden Teilstrahlen unterschiedliche Interferometerarme durchlaufen haben – auf dem Film wieder vereinigt. Der verwendete Laser ist sehr schwach, sodass sich stets maximal nur ein Photon in dem Interferometer befindet.

- a) Wird ein Interferenzmuster beobachtet, obwohl nur mit einzelnen Photonen experimentiert wird? **Begründen** Sie Ihre Antwort.

- b) Wie müsste der Aufbau modifiziert werden, damit kein Interferenzmuster auftritt?

Begründen Sie Ihre Antwort.