Doppelspalt und Quantenphysik

Einzelphotonen, Einzelelektronen, Superposition, Welcher-Weg, Komplementarität, Unbestimmtheit, Wellenfunktion

Das können Sie nach diesem Skript

– den Aufbau des Quanten-Doppelspalts beschreiben
– das Auftreten einzelner Treffer und das entstehende Muster deuten
– Superposition und Wahrscheinlichkeitsinterpretation erklären
– Welcher-Weg-Information als Ursache des Interferenzverlusts begründen

Lernskript zur Vorbereitung auf das Vorabitur am 06.11.2026 · Gymnasium Westerstede, Niedersachsen
Grundlage: Kerncurriculum Physik (Niedersachsen 2022), Unterrichtsmaterialien www.physik.gym-wst.de, Aufgabenpool der Länder (IQB)

Inhalt

1 Klassisch: zwei Wellen 3
2 Quanten: ein Quant nach dem anderen 3
3 Superposition und Wahrscheinlichkeit 4
4 Welcher-Weg-Information 4
5 Unbestimmtheit 4
6 Aufgaben 5
7 Typische Fehler 6
8 Wiederholung 6

1 Klassisch: zwei Wellen

Beim Doppelspalt überlagern sich die Feldstärken beider Spalte. Die Intensität ist $I = |E_1 + E_2|^2$, also

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin(\alpha)}{\lambda}\right) \tag{1}$$

Die Minima liegen bei $\Delta s = (2n+1)\lambda/2$. Das ist Wellenoptik, kein Quantenproblem.

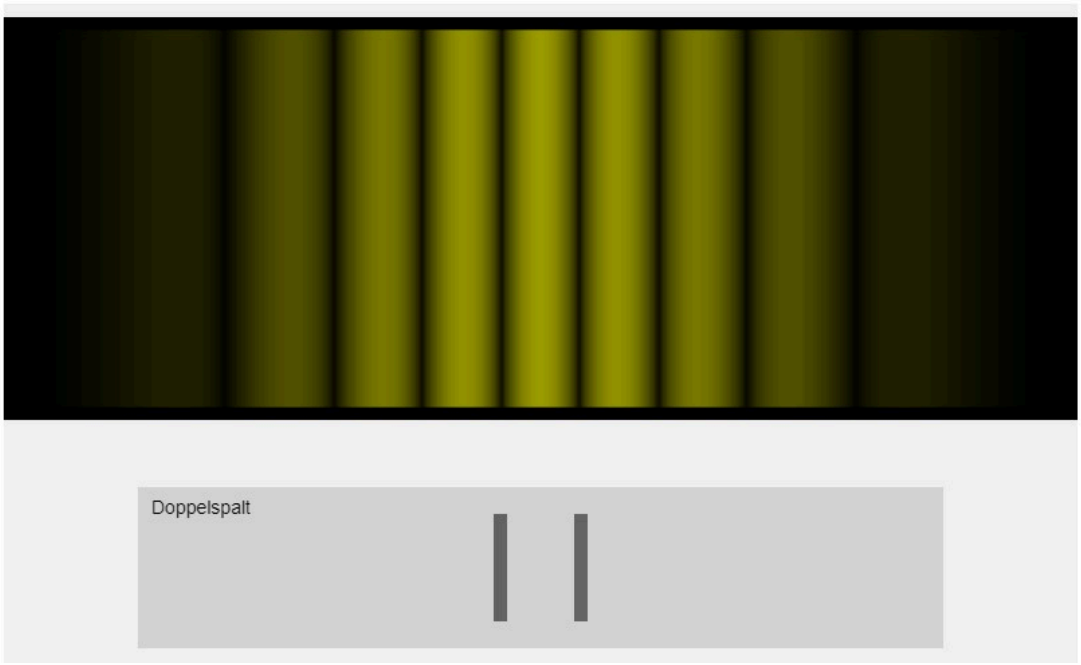


Abbildung 1: Interferenzbild am Doppelspalt aus dem Schulmaterial. Quelle: Schulseite.

Vom Zentralmaximum nach außen wechseln sich helle und dunkle Streifen ab; die Nullstellen liegen bei $\Delta s = (2n+1)\lambda/2$. Die Lage der Maxima hängt nur vom Verhältnis d/λ ab.

2 Quanten: ein Quant nach dem anderen

Experiment

Aufbau. Lichtquelle so stark gedämpft, dass im Mittel nur ein Photon gleichzeitig unterwegs ist; Detektor (CCD/ Photomultiplier) registriert einzelne Treffer.

Durchführung. Treffer über längere Zeit aufsummieren, anschließend Elektronen dasselbe.

Beobachtung.

- Jeder Treffer ist ein **Punkt** – ganzzahlig, nicht verschmiert.
- Nach wenigen Treffern: kein Muster erkennbar.
- Nach Tausenden Treffern: das bekannte Streifenmuster.

Erklärung. Jedes Quant hat eine Wahrscheinlichkeitsverteilung; die Verteilung ist das Muster, der einzelne Treffer ist unvorhersagbar.

Bedeutung. Interferenz ist keine Folge vieler Quanten untereinander, sondern Eigenschaft des einzelnen Quants.

Fehler und Sicherheit. Dunkelzählrate und Zählstatistik begrenzen die Aussage; die Detektor-Effizienz wirkt systematisch. Laserleistung niedrig halten und den Strahlengang abschirmen.

Achtung – typische Fehlerquelle

Das Muster entsteht **nicht**, weil sich Photonen gegenseitig stören. Es entsteht auch mit einzelnen Quanten. Wer „Interferenz = Wechselwirkung zwischen Wellen“ sagt, verfehlt den Punkt.

Definition

Koinzidenzmethode: Zwei Detektoren werden gleichzeitig ausgelesen. Signale im selben kurzen Zeitfenster heißen Koinzidenz. Bei einem einzelnen Photon an einem Strahlteiler registriert immer nur **einer** der beiden Detektoren ein Ereignis, nie beide zugleich. Diese Antikoinzidenz weist einzelne Photonen nach.

3 Superposition und Wahrscheinlichkeit

Der Zustand „durch Spalt 1 oder Spalt 2“ wird als Summe der beiden Möglichkeiten beschrieben:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2) \tag{2}$$

Am Ort x haben die beiden Teilwellen eine Phasendifferenz $\delta = 2\pi\Delta s/\lambda$. Man kann deshalb $\psi_2 = \psi_1 e^{i\delta}$ schreiben. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist das Betragsquadrat:

$$w(x) = |\psi(x)|^2 = \frac{1}{2}\,|\psi_1|^2\;|1 + e^{i\delta}|^2 = |\psi_1|^2\cos^2\frac{\delta}{2} \tag{3}$$

Der Mischterm $2\mathfrak{R}(\psi_1^*\psi_2)$ steckt in dieser Rechnung; er ist für die Streifen verantwortlich. Bei $\delta = 0$ ist w maximal, bei $\delta = \pi$ null.

Merksatz
Amplituden addieren sich, Wahrscheinlichkeiten nicht. Der Mischterm $2\mathfrak{R}(\psi_1^*\psi_2)$ erzeugt die Streifen – er verschwindet, sobald man weiß, welcher Weg genommen wurde.

4 Welcher-Weg-Information

Wird an den Spalten gemessen, durch welchen Spalt das Quant ging, verschwindet das Muster:

Messung	Zustand	Muster
keine Weginformation	$\psi_1 + \psi_2$	Streifen
Weg bekannt (Detektor, Polarisator)	entweder ψ_1 oder ψ_2	keine Streifen

Definition
Komplementarität: Wellen- und Teilchenverhalten schließen sich nicht aus, aber sie sind nicht gleichzeitig vollständig beobachtbar. Je mehr Weginformation, desto weniger Interferenzkontrast – quantitativ $V^2 + \mathcal{D}^2 \leq 1$.

Dabei ist $V = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})$ die Visibilität (Kontrast) und $\mathcal{D}$ die Unterscheidbarkeit: $\mathcal{D} = 0$ bedeutet, die Wege sind nicht unterscheidbar; $\mathcal{D} = 1$ bedeutet, der Weg ist eindeutig bekannt. Die Ungleichung sagt, dass beide Eigenschaften nicht gleichzeitig vollständig ausgeprägt sein können.

5 Unbestimmtheit

Ort und Impuls sind keine gleichzeitig scharfen Größen:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{1}{2}\frac{h}{2\pi} \tag{4}$$

Das Schulmaterial verwendet für Abschätzungen die gröbere Schulnotation

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \tag{5}$$

Die exakte Form ist $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$; die Schulnotation $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$ lässt den Faktor $1/(4\pi)$ weg.

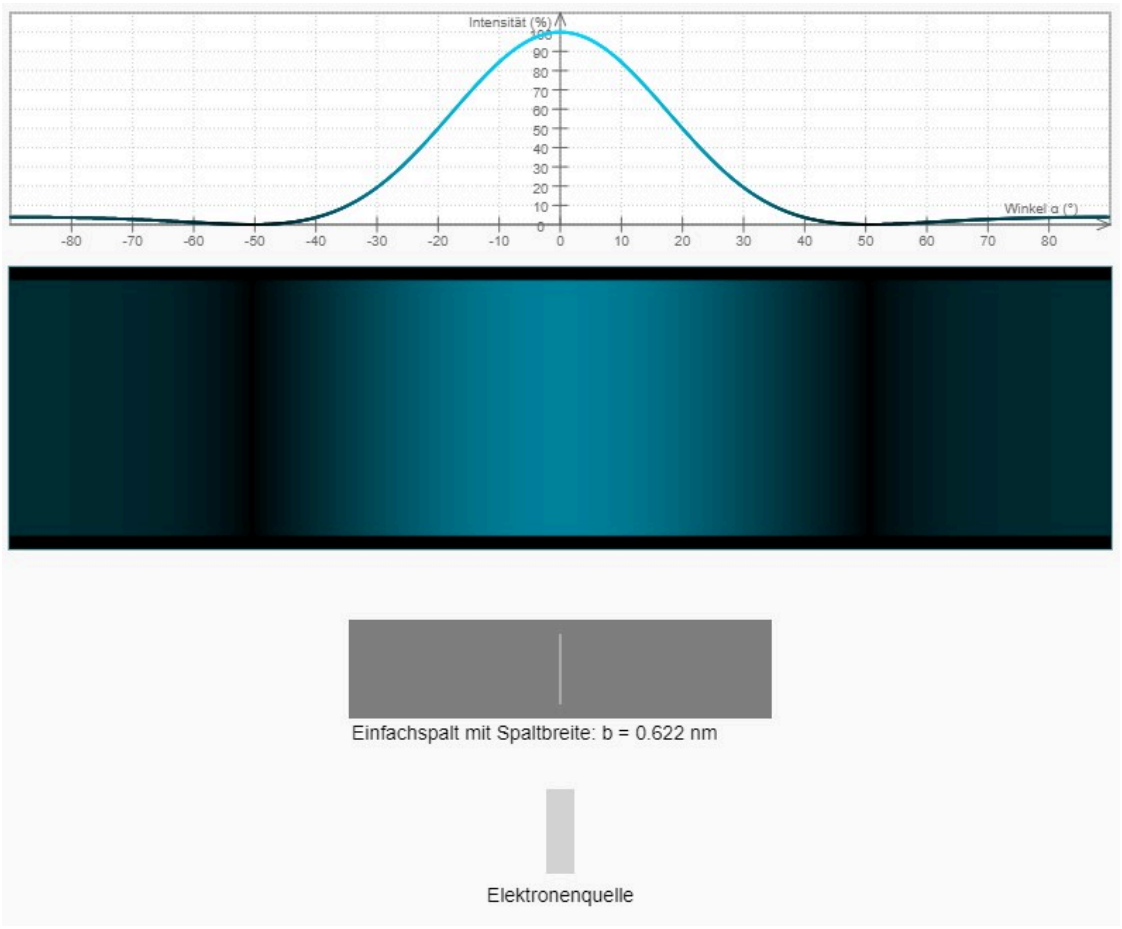


Abbildung 2: Einzelspalt und Unbestimmtheit aus dem Schulmaterial. Quelle: Schulseite.

Die Spaltbreite entspricht der Ortsunschärfe Δx. Je schmaler der Spalt, desto breiter wird die Beugungsfigur und damit die Impulsunschärfe Δp; bei einem breiten Spalt ist es umgekehrt.

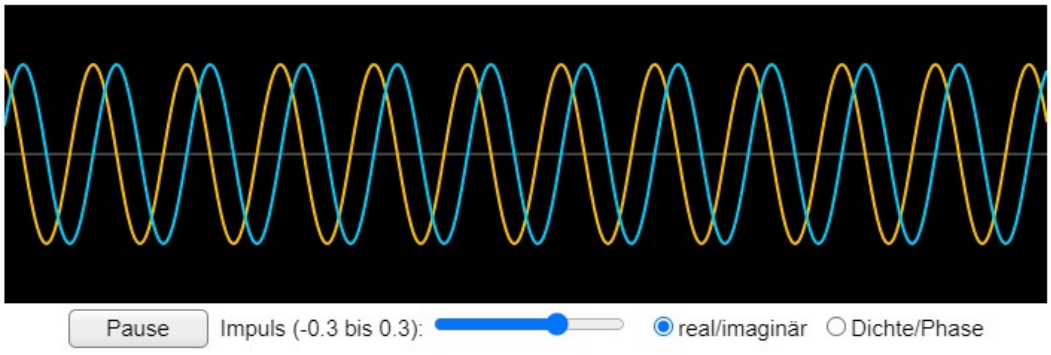


Abbildung 3: Real- und Imaginärteil der Wellenfunktion aus dem Schulmaterial. Quelle: Schulseite.

Das Bild zeigt Real- und Imaginärteil der Wellenfunktion. Erst das Betragsquadrat $|\psi|^2$ gibt an, wo das Teilchen mit welcher Wahrscheinlichkeit gefunden wird.

Achtung – typische Fehlerquelle
Δx ist die **Streuung** der Messwerte bei vielen gleichen Präparationen, nicht der Fehler eines einzelnen Experiments. „Das Elektron ist unbestimmt“ heißt: Es hat keinen scharfen Ort – nicht: „wir wissen ihn nur nicht“.

6 Aufgaben

Aufgabe 1 AFB II 10 P.
Ein Doppelspalt ($d = 1{,}0\ \mu\text{m}$) wird mit einzelnen Photonen ($\lambda = 633\ \text{nm}$) beleuchtet, Schirmabstand $e = 1{,}0\ \text{m}$.

1. Berechnen Sie den Streifenabstand.
2. Nach 100 Treffern ist kein Muster zu sehen. Erklären Sie.

Lösung
(1) $a = \frac{\lambda e}{d} = \frac{633 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}0}{1{,}0 \cdot 10^{-6}} = 0{,}63\ \text{mm}$.
(2) Die Treffer sind statistisch verteilt; um 0,63 mm Struktur von der Zufallsstreuung zu unterscheiden, braucht man viele Treffer. Bei 100 Treffern verteilen sich im Mittel etwa 5 auf ein Maximum – zu wenig für ein erkennbares Bild.

Aufgabe 2 AFB II 12 P.
An den beiden Spalten wird mit Polarisatoren markiert, welchen Weg ein Quant genommen hat.

1. Beschreiben Sie die Beobachtung auf dem Schirm.
2. Erklären Sie sie mit dem Superpositionsprinzip.
3. Beurteilen Sie die Aussage: „Die Messung stört das Quant."

Lösung
(1) Die Streifen verschwinden; es bleibt eine breite Verteilung ohne Modulation.
(2) Mit Polarisationsmarkierung sind die beiden Möglichkeiten unterscheidbar, also $\psi = \psi_1 + \psi_2$ geht in ein Gemisch über; der Mischterm und damit die Streifen fallen weg.
(3) Die Formulierung ist zu grob. Die Messung muss das Quant nicht „anstoßen"; es genügt, dass die Weginformation im Prinzip verfügbar ist.

Aufgabe 3 AFB III 12 P.
Diskutieren Sie die Aussage: „Der Welcher-Weg-Detektor zerstört das Interferenzmuster." Beziehen Sie die Komplementarität und $V^2 + \mathcal{D}^2 \leq 1$ ein.

Lösung
Der Detektor zerstört das Muster nicht mechanisch; er macht die Weginformation verfügbar. Dadurch werden die beiden Möglichkeiten unterscheidbar ($\mathcal{D} > 0$), und der Mischterm $2\Re(\psi_1^* \psi_2)$ verschwindet. Die Komplementarität beschreibt den Zusammenhang: Je größer die Unterscheidbarkeit, desto kleiner die Visibilität. Ohne Weginformation bleibt $\mathcal{D} = 0$ und $V = 1$; mit vollständiger Information wird $V = 0$.

7 Typische Fehler

Fehler	Richtig
„Photonen stören sich gegenseitig"	Interferenz tritt auch bei einzelnen Quanten auf
Wahrscheinlichkeiten addieren	Amplituden addieren, dann Betragsquadrat
Unbestimmtheit als Messfehler	Streuung des Zustands, nicht Gerätefehler
Wegmessung „zerstört" das Quant	Weginformation macht die Möglichkeiten unterscheidbar

8 Wiederholung

Kern	Aussage
Einzeltreffer	punktuell, unvorhersagbar
Muster	Wahrscheinlichkeitsverteilung vieler Quanten
Superposition	$\psi_1 + \psi_2$, Amplituden addieren
Messbar	$\lvert\psi\rvert^2$

Welcher-Weg	Information vorhanden → keine Streifen
Komplementarität	$V^2 + \mathcal{D}^2 \leq 1$
Unbestimmtheit	$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$

Verstehen, nicht auswendig: warum einzelne Treffer und ein Muster zusammenpassen; warum Weginformation die Streifen löscht, ohne das Quant zu „treffen“.

Prüfungsrelevanz

Das musst du können:

- **erklären**, was Komplementarität bedeutet und warum Welcher-Weg-Information die Interferenz zerstört;
- **begründen**, warum ein einzelnes Quant trotzdem ein Interferenzmuster aufbaut;
- **berechnen**: Wahrscheinlichkeiten aus Amplituden und die Unbestimmtheit $\Delta x \Delta p$;
- **skizzieren**: Intensitätsverteilung mit und ohne Welcher-Weg-Markierung.

Quellen (Abruf 2026-11-02).

- Quanten-Doppelspalt: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/04doppelspaltexperiment/docs.md
- Unbestimmtheit: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/13unbestimmtheit/docs.md
- Wellenfunktion: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/14wellenfunktion/docs.md
- Kerncurriculum Physik Niedersachsen 2022: https://cuvo.nibis.de/
- Abbildungen: Unterrichtsmaterialien der Schulwebsite (`05_Grafiken/schule/`).