Mach-Zehnder und Welcher Weg

Strahlteiler, Phasenverschiebung, Weginformation, Komplementarität, Delayed Choice

Das können Sie nach diesem Skript

– den Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers beschreiben
– die Ausgangsintensitäten aus Phasenverschiebung berechnen
– Welcher-Weg-Information als Ursache des Interferenzverlusts erklären
– das Delayed-Choice-Experiment ohne Fehldeutung darstellen
– Komplementarität und Nichtlokalität am MZI deuten

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 Aufbau 3
2 Rechnung mit Amplituden 3
3 Welcher-Weg im MZI 4
4 Delayed Choice 5
5 Aufgaben 5
6 Typische Fehler 6
7 Wiederholung 6

1 Aufbau

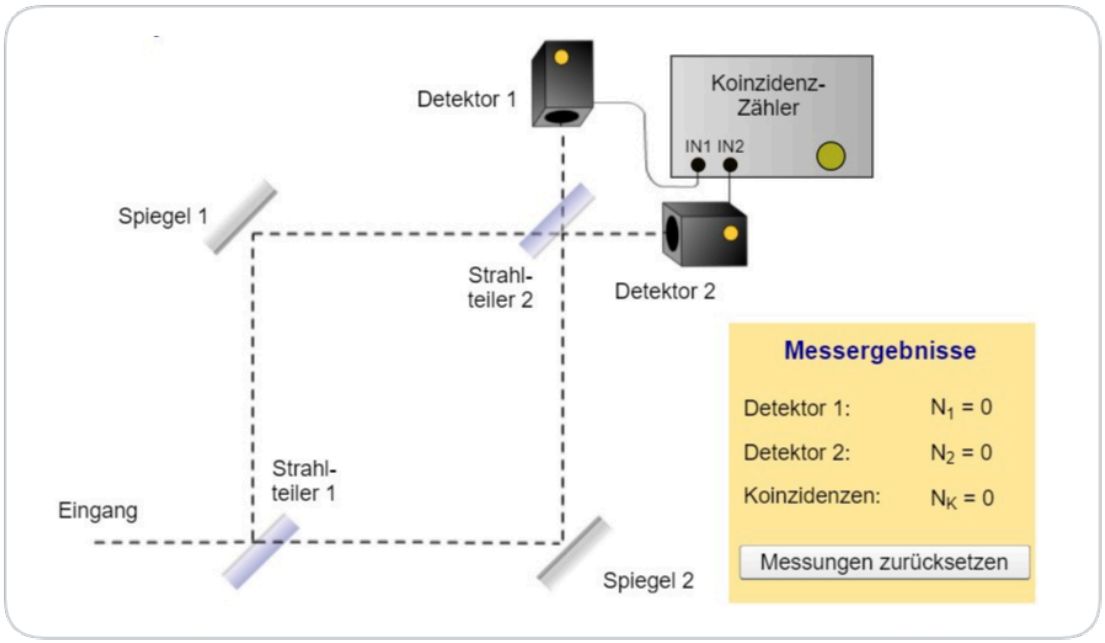


Abbildung 1: Mach-Zehnder-Aufbau aus dem Schulmaterial: Laser, Strahlteiler ST1 und ST2, Spiegel M1 und M2 sowie die Detektoren D1 und D2. Quelle: Schulseite.

Im idealen MZI sind beide Arme gleich lang; jede zusätzliche Phasenverschiebung im oberen Arm wirkt sich deshalb eins zu eins auf den Gangunterschied am zweiten Strahlteiler aus.

Bauteil	**Funktion**
Laser	kohärente Quelle, feste Phase
Strahlteiler 1	teilt die Amplitude je zur Hälfte: $\psi \leftarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2)$
Spiegel	Richtungsänderung, Phasensprung π
Strahlteiler 2	überlagert die beiden Teilwellen
Detektoren D1, D2	zählen Photonen

Experiment

Aufbau. Ein Laserstrahl trifft auf Strahlteiler ST1. Der eine Teilstrahl läuft senkrecht nach oben über Spiegel M1, der andere waagerecht nach rechts über Spiegel M2; an ST2 werden beide wieder überlagert. Hinter ST2 stehen die Detektoren D1 (geradeaus) und D2 (senkrecht). Ein Phasenplättchen im oberen Arm verändert $\Delta\varphi$.
Durchführung. Zähle die Photonen an D1 und D2 für verschiedene Phasenverschiebungen.
Beobachtung. D1 und D2 sind komplementär: Bei $\Delta\varphi = 0$ ist D1 dunkel und D2 hell, bei $\Delta\varphi = \pi$ umgekehrt.
Auswertung. $I_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$, $I_2 = \cos^2(\Delta\varphi/2)$; die Summe ist 1.
Fehler und Sicherheit. Spiegelverschiebung und Kontrast bestimmen die Unsicherheit; die Justage der Strahlteiler wirkt systematisch. Laser nicht ins Auge und die optische Bank gegen Stöße sichern.

2 Rechnung mit Amplituden

Jeder Strahlteiler halbiert die Amplitude ($1/\sqrt{2}$). Bei Reflexion am Strahlteiler springt die Phase um $\pi/2$, an den Spiegeln um π – so modelliert es auch das Schulmaterial. Für die beiden Wege zu D1 bleibt damit eine Differenz von π, zu D2 von 0. Die Amplituden am Ausgang sind

$$\psi_{D1} = \frac{1}{2}\left(1 - e^{i\Delta\varphi}\right), \quad \psi_{D2} = \frac{i}{2}\left(1 + e^{i\Delta\varphi}\right) \tag{1}$$

Die beiden Summanden in der Klammer sind die Amplituden der beiden Wege; ihre relative Phase ist $\Delta\varphi$. Für den Betrag gilt

$$|1 - e^{i\Delta\varphi}|^2 = 2 - 2\cos(\Delta\varphi) = 4\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2} \tag{2}$$

und entsprechend $|1 + e^{i\Delta\varphi}|^2 = 4\cos^2(\Delta\varphi/2)$. Damit folgen die Zählraten

$$I_1 = \sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}, \quad I_2 = \cos^2\frac{\Delta\varphi}{2} \tag{3}$$

und $I_1 + I_2 = 1$: Jedes Photon wird an genau einem der beiden Detektoren registriert.

Merksatz

Konvention: D1 ist der Ausgang, der bei $\Delta\varphi = 0$ dunkel ist, D2 der helle; bei $\Delta\varphi = \pi$ ist es umgekehrt. Die beiden Ausgänge sind komplementär: $I_1 + I_2 = 1$. Schon eine kleine Phasenänderung δ (Gas, Glasplatte, Spiegelverschiebung) ist messbar – daher die hohe Empfindlichkeit.

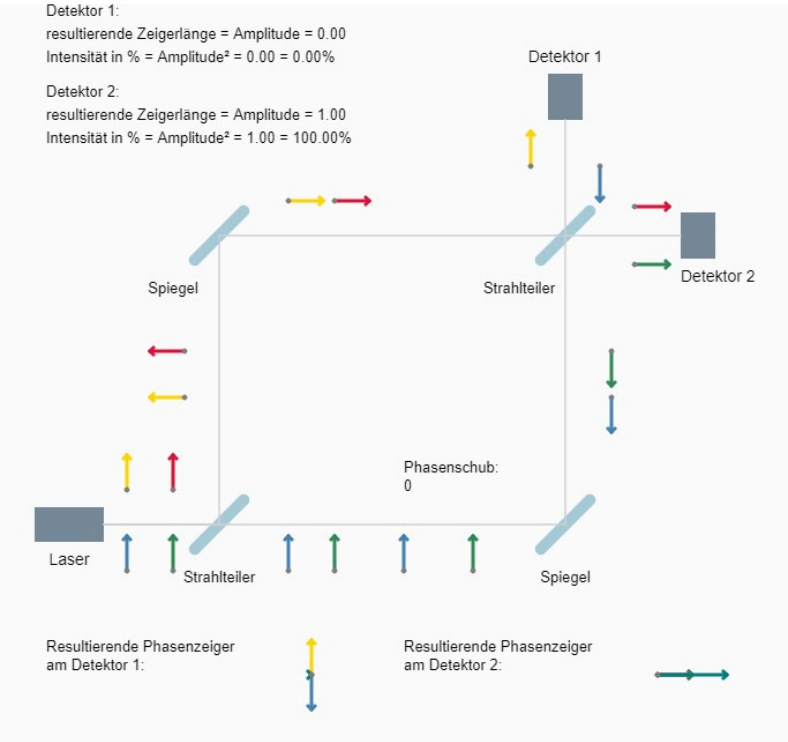


Abbildung 2: Zeigerbild zur Überlagerung der Amplituden am MZI aus dem Schulmaterial. Quelle: Schulseite.

Im Zeigerbild addieren sich die beiden Amplituden vektoriell; bei $\Delta\varphi = 0$ zeigen sie in entgegengesetzte Richtungen und löschen sich aus – das ist D1.

3 Welcher-Weg im MZI

Eingriff	Weg bekannt?	Beobachtung
nichts	nein	Interferenz, Zählraten hängen von $\Delta\varphi$ ab
Markierung in Weg 1 (Polarisator)	ja	keine Interferenz, je 50 % pro Detektor
ein Weg blockiert	ja	nur der andere Weg trägt bei, kein Muster

Wird die Weginformation im Prinzip verfügbar, verschwinden die Interferenzstreifen. Das Quant wird dabei nicht „gestört“; entscheidend ist, ob die beiden Möglichkeiten unterscheidbar sind.

4 Delayed Choice

Aufbau nach Wheeler: Die Entscheidung, ob ein Welcher-Weg-Detektor eingeschaltet wird, fällt **erst**, wenn das Quant den ersten Strahlteiler längst passiert hat – die Laufzeit ist so lang, dass „später“ physikalisch später ist.

Nichtlokalität. Die beiden Möglichkeiten gehören zu einem einzigen Quantenzustand. Die Weginformation ist nicht einem lokalen Bahnstück zuzuordnen; erst die gesamte Anordnung entscheidet, ob Interferenz oder Welcher-Weg sichtbar wird. Das ist keine Signalübertragung schneller als Licht und keine Änderung der Vergangenheit, sondern die quantenmechanische Beschreibung des ganzen Experiments.

Die Anordnung ist zugleich eine Anwendung der Quantenphysik: Sie zeigt, dass Welcher-Weg- Information und Interferenz komplementär sind, und sie wird in verschränkten Systemen als Quantenradierer genutzt – wird die Markierung gelöscht, erscheint die Interferenz wieder.

Achtung – typische Fehlerquelle

Dabei wird die Vergangenheit **nicht** geändert. Beobachtet wird:

- Detektor aus: Interferenz.
- Detektor an: Welcher-Weg, keine Interferenz.
- Auswertung nachträglich getrennt: Beide Teilensembles zeigen für sich kein Muster; erst die **gemeinsame** Auswertung (Koinzidenz mit dem Markierungsdetektor) zeigt Interferenz.

Falsch ist die Formulierung „das Photon entscheidet sich nachträglich, ob es Welle oder Teilchen war“. Richtig ist: Das Quant hat keinen der beiden Zustände vor der Messung; das Experiment legt fest, welche Eigenschaft sichtbar wird.

5 Aufgaben

Aufgabe 1 AFB II 10 P.

In einem MZI wird das Phasenplättchen so gedreht, dass $\Delta\varphi = 60°$ entsteht.

1. Berechnen Sie die relativen Zählraten in D1 und D2.
2. Erklären Sie, warum eine Verschiebung eines Spiegels um $\lambda/4$ das Signal umkehrt.

Lösung

(1) $I_1 = \sin^2 30° = 0{,}25$, $I_2 = \cos^2 30° = 0{,}75$. Also 25 % in D1, 75 % in D2.

(2) $\lambda/4$ Hin- und Rückweg ergibt $\lambda/2$ Wegdifferenz, also $\Delta\varphi = \pi$: Aus $I_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$ wird $\sin^2(90°) = 1$ – das Signal wechselt vollständig zum anderen Detektor.

Aufgabe 2 AFB II 10 P.

In Weg 1 des MZI steht ein Polarisator, in Weg 2 nicht.

1. Erklären Sie, warum das Interferenzmuster verschwindet.
2. Begründen Sie, ob der Polarisator das Photon absorbiert.

Lösung

(1) Die Polarisation markiert den Weg. Die beiden Möglichkeiten sind damit im Prinzip unterscheidbar; die Amplituden addieren sich nicht mehr zu einem streifenförmigen Muster.

(2) Nein. Der Polarisator lässt einen Teil der Amplitude durch; die Interferenz verschwindet allein deshalb, weil die Weginformation verfügbar ist.

Aufgabe 3 AFB III 12 P.

In populären Darstellungen heißt es, das Photon „entscheide sich nachträglich“, ob es Welle oder Teilchen sei. Bewerten Sie diese Formulierung mithilfe des Delayed-Choice-Aufbaus.

Lösung

> Die Formulierung ist irreführend. Das Photon hat vor der Messung keinen festen Zustand „Welle“ oder „Teilchen“; der Zustand beschreibt beide Möglichkeiten. Erst die gesamte Anordnung – einschließlich der späteren Wahl des Detektors – legt fest, welche Eigenschaft sichtbar wird. Es gibt keine Signalübertragung in die Vergangenheit und keine nachträgliche Änderung eines schon abgelaufenen Ereignisses.

6 Typische Fehler

Fehler	Richtig
„Das Photon entscheidet sich nachträglich“	der Zustand ist vor der Messung nicht festgelegt; das Experiment wählt die sichtbare Eigenschaft
Intensitäten statt Amplituden addieren	erst Amplituden, dann Betragsquadrat
Phasensprung π an Spiegeln vergessen	Vorzeichen prüfen – sonst vertauschte Ausgänge
Delayed Choice als Zeitreise	keine Änderung der Vergangenheit, nur Auswahl der Messung

7 Wiederholung

Kern	Aussage
Strahlteiler	halbe Amplitude, Faktor $1/\sqrt{2}$
Ausgänge	$I_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$, $I_2 = \cos^2(\Delta\varphi/2)$
Welcher-Weg	unterscheidbar $\rightarrow$ keine Interferenz
Delayed Choice	späte Messwahl ändert die sichtbare Eigenschaft, nicht die Vergangenheit

Verstehen, nicht auswendig: warum $I_1 + I_2 = 1$ gilt und warum „später entscheiden“ keine Kausalitätsverletzung ist.

Prüfungsrelevanz

Das musst du können:

- **erklären**, wie Strahlteiler und Spiegel die Phase ändern und warum D1 bei $\Delta\varphi = 0$ dunkel ist;
- **berechnen**: Detektorwahrscheinlichkeiten aus Phasendifferenz und Amplituden;
- **begründen**, warum Delayed Choice die Vergangenheit nicht ändert;
- **skizzieren**: Zeigerdiagramm für beide Wege und beide Detektoren.

Quellen (Abruf 2026-11-02).

- Mach-Zehnder: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/06machzehnderinterferometer/docs.md
- MZI-Labor: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/07mzilabor/docs.md
- Welcher Weg: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/08welcherweg/docs.md
- Delayed Choice: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/10delayedchoice/docs.md
- Kerncurriculum Physik Niedersachsen 2022: https://cuvo.nibis.de/
- Abbildungen: Unterrichtsmaterialien der Schulwebsite (`05_Grafiken/schule/`).