

AUFGABEN

- Aufbau und Justierung eines Mach-Zehnder-Interferometers
- Beobachtung des Interferenzmuster bei nicht möglicher, bei möglicher und bei ausradiert Weg-Information.

ZIEL

Veranschaulichung des Quantenradierers in einem Analogieexperiment

ZUSAMMENFASSUNG

Auch Licht wird in der Quantenmechanik mit Hilfe von Wellenfunktionen beschrieben, aus denen sich die räumliche Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte als Betragsquadrat der Wellenfunktion berechnen lässt. Licht eignet sich somit zur Veranschaulichung von quantenmechanischen Phänomenen in Analogieexperimenten. Zur Veranschaulichung des sogenannten Quantenradierers wird in einem Analogieexperiment ein Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut und Interferenz der beiden Teilbündel auf einem Schirm beobachtet. Befinden sich zwei zueinander senkrechte Polarisatoren in den Strahlengängen der Teilbündel, verschwindet die Interferenz, da sich quantenmechanisch betrachtet eine Information darüber gewinnen ließe, welchen Weg ein Photon genommen hat. Mit einem dritten, unter 45° eingestellten Polarisator unmittelbar vor dem Schirm lässt sich diese Weg-Information löschen und Interferenz wieder beobachten.

BENÖTIGTE GERÄTE

Anzahl	Geräte	Art.-Nr.
1	Mach-Zehnder Interferometer	1014617
1	He-Ne-Laser	1003165

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Auch Licht wird in der Quantenmechanik mit Hilfe von Wellenfunktionen beschrieben, aus denen sich die räumliche Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte als Betragsquadrat der Wellenfunktion berechnen lässt. Die Zusammenführung von zwei Strahlengängen entspricht einer Superposition von zwei Wellenfunktionen. Die Wahrscheinlichkeitsdichte enthält dann einen Mischterm, der das Interferenzmuster beschreibt. Licht eignet sich somit zur Veranschaulichung von quantenmechanischen Phänomenen in Analogieexperimenten.

2

Zur Veranschaulichung des Quantenradierers wird in einem Analogieexperiment ein Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut. Als kohärentes Lichtbündel dient das aufgeweitete Bündel eines Lasers. Es wird mit Hilfe eines Strahlteilers BS1 in zwei Teilbündel aufgeteilt, wobei ein Polarisator P für gleiche Intensität in beiden Teilbündeln sorgt (siehe Abb. 1). Anschließend durchlaufen die Teilbündel unterschiedliche Wege und werden schließlich mit einem zweiten Strahlteiler BS2 wieder zur Überlagerung gebracht. Dabei addieren sich – im klassischen Wellenbild betrachtet – die elektrischen Felder E_1 und E_2 der beiden Teilstrahlen zu

$$(1) \quad E = E_1 + E_2$$

und – quantenmechanisch betrachtet – deren Wellenfunktionen Ψ_1 und Ψ_2 zu

$$(2) \quad \Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

Es gilt daher

$$(3) \quad |E|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2$$

bzw.

$$(4) \quad |\Psi|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2 \cdot \langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle,$$

wobei der gemischte Term in (3) und (4) jeweils das auf einem Schirm beobachtbare Interferenzmuster beschreibt. Gleichung 4 beschreibt das Verhalten eines einzelnen Photons. Es interferiert mit sich selber, solange nicht durch einen Messprozess beobachtet wird oder beobachtet werden könnte, „welchen Weg es zurücklegt“. Man sagt in diesem Zusammenhang, dass das Photon sich „bei nicht vorhandener Weg-Information wie eine Welle verhält“ und Interferenz zeigt. Bei vorhandener Weg-Information jedoch „verhält“ sich das Photon wie ein klassisches Teilchen und es ist keine Interferenz möglich.

Durch zwei zusätzliche Polarisatoren P1 und P2 in den Teilbündeln 1 und 2 wird das Interferenzmuster beeinflusst. Bei zueinander senkrechter Ausrichtung der Polarisatoren verschwindet in der klassischen Beschreibung (3) das Skalarprodukt $E_1 \cdot E_2$ bzw. in der quantenmechanischen Beschreibung (4) der Interferenzterm $\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle$ und somit auch das Interferenzmuster. Letzteres ist quantenmechanisch betrachtet der Fall, weil anhand der Polarisation eindeutig festgestellt werden kann, ob das Photon Weg 1 oder Weg 2 durchlaufen hat.

Wird nun ein dritter, auf 45° eingestellter Polarisator A hinter dem zweiten Strahlteiler in Position gebracht, erscheint das Interferenzmuster wieder. Quantenmechanisch betrachtet ist dies der Fall, weil der Polarisator A die Weg-Information „ausradiert“, d.h. weil hinter dem Polarisator A nicht mehr entscheidbar ist, welchen Weg das Photon genommen hat. Im klassischen Wellenbild des Lichts sorgt der dritte Polarisator dafür, dass die polarisierten Teilbündel zwar abgeschwächt werden, jedoch wieder die gleiche Polarisation haben.

AUSWERTUNG

Ohne die beiden Polarisatoren P1 und P2 ist eine Weg-Information nicht vorhanden; es tritt Interferenz auf.

Nach Einsatz der beiden Polarisatoren lässt sich eine Weg-Information gewinnen; Interferenz tritt nicht auf.

Der dritte Polarisator A radiert die Weg-Information aus; Interferenz tritt wieder auf.

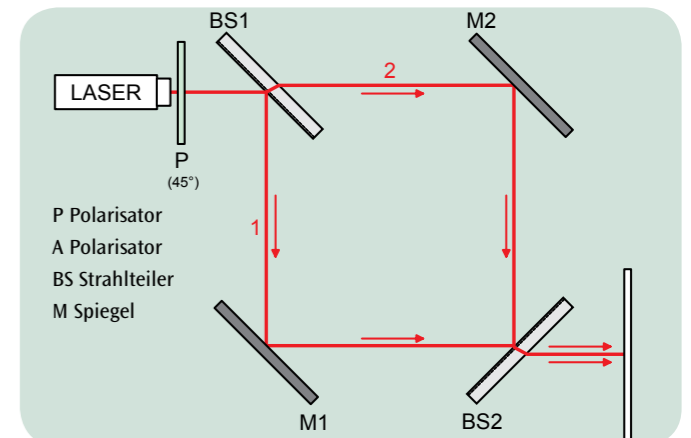


Abb. 1: Strahlengang im Mach-Zehnder-Interferometer (ohne Weg-Information)

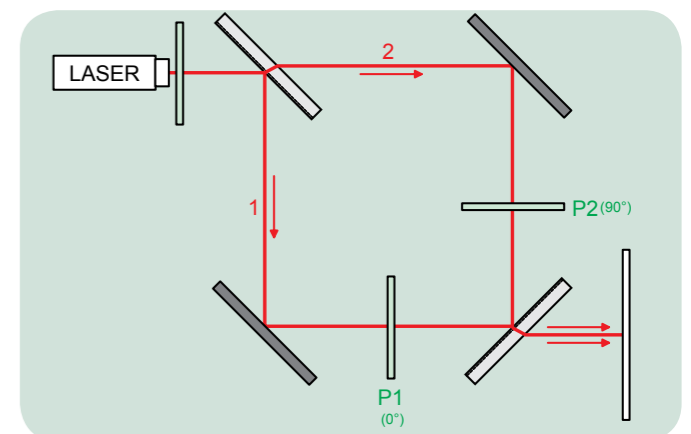


Abb. 2: Strahlengang im Mach-Zehnder-Interferometer (mit Polarisatoren P1 und P2 in den Teilbündeln zur Gewinnung der Weg-Information)

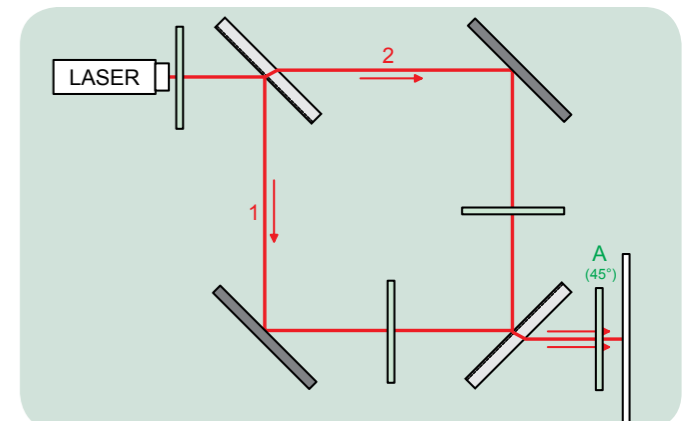


Abb. 3: Strahlengang im Mach-Zehnder-Interferometer (mit Polarisator A zur Auslöschung der Weg-Information)