

## Aufgabe 1: Mach-Zehnder-Interferometer - Lösungen

---

- 1.1 Mit einem Mach-Zehnder-Interferometer werden Interferenzphänomene untersucht. Das Licht fällt auf einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel), der die Wellenzüge in jeweils zwei Anteile aufspaltet, die auf verschiedenen Wegen laufen. Beide Anteile werden durch Spiegel um  $90^\circ$  umgelenkt. Am Schnittpunkt der Wellenzüge steht ein weiterer Strahlteiler, der die beiden Anteile wieder zusammenführt. Die sich ergebenden Gangunterschiede führen zur Interferenz und somit zum Nachweis der Wellennatur des Lichts. Wird der Photonenstrom stark ausgedünnt, lassen sich Experimente mit einzelnen Photonen durchführen. Wellen- und Teilcheneigenschaften zeigen sich dann im gleichen Experiment.
- 1.2 Laserlicht ist monochromatisch und kohärent. D.h., Wellenzüge, die den Laser verlassen, sind zeitlich und räumlich in Phase. Teilt man die Wellenzüge auf und führt sie später wieder zusammen, ergibt sich eine Phasenlage, die nur durch die optischen Wegunterschiede begründet sind. Geometrisch betrachtet, sind die Wege gleichlang, weil sowohl die Spiegel als auch die Strahlteiler die Ecken eines Rechtecks bilden. Weglängendifferenzen (Gangunterschiede) können deshalb nur optische Ursachen, z.B. Phasensprünge, haben.

Prinzipiell mögliche Lichtwege

|        |                                                                                                                                                                   |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Weg A1 | $L \rightarrow \text{HS1 Durchgang} \rightarrow \text{S1 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{HS2 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{D1}$ |
| Weg B1 | $L \rightarrow \text{HS1 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{S2 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{HS2 Durchgang} \rightarrow \text{D1}$ |
| Weg A2 | $L \rightarrow \text{HS1 Durchgang} \rightarrow \text{S1 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{HS2 Durchgang} \rightarrow \text{D2}$                    |
| Weg B2 | $L \rightarrow \text{HS1 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{S2 Reflexion } \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{HS2 Reflexion} \rightarrow \text{D2}$ |

- 1.3 Bei der Verwendung von Laserlicht spricht immer nur der Detektor **D1** an.  
Begründung:  
 Nach Durchlaufen der Wege A1 und B1 ergibt sich durch die jeweils zweimaligen Phasensprünge von  $\frac{\lambda}{2}$  ein Gangunterschied von Null. Es kommt zur konstruktiven Interferenz.  
 Nach Durchlaufen der Wege A2 und B2 ergibt sich durch die unterschiedlichen Phasensprünge ein Gangunterschied von  $\frac{\lambda}{2}$ . Es kommt zur destruktiven Interferenz.  
Hinweis:  
 An HS2 erfolgt kein Phasensprung.  
 Entscheidend ist, dass die Welle bei Reflexion an einer Grenzfläche zu einem optisch **dichteren** Medium hin einen Phasensprung um  $180^\circ$  erfährt. Bei Reflexion an einer Grenzfläche zu einem optisch **dünneren** Medium hin erfolgt kein Phasensprung.  
 Bei Transmission findet in keinem Fall ein Phasensprung statt.  
 Ein einfacher Strahlteiler ist eine Glasplatte. Allerdings wird hier ein Großteil des Lichts transmittiert, nur ein kleiner Bruchteil reflektiert. Für das Mach-Zehnder-Interferometer benötigt man jedoch Strahlteiler, welche die Hälfte des Lichts transmittieren und die andere Hälfte reflektieren.  
 Das Aufbringen einer dünnen Metallschicht auf eine Seite der Glasplatte erhöht den reflektierten Anteil auf das gewünschte Maß. Nun muss man jedoch darauf achten, wie der Strahlteiler in den Strahlengang eingebracht wird. Befindet sich die Metallschicht auf der Seite des einfallenden Lichts, wird das Licht am optisch dichteren Material reflektiert, es findet wie oben beschrieben ein Phasensprung von  $180^\circ$  (Gangunterschied von  $\lambda/2$ ) statt.  
 Befindet sich die Metallschicht hingegen auf der entgegengesetzten Seite, wird das Licht am optisch dünneren Medium zweimal gebrochen. Es findet kein Phasensprung statt.

- 1.4 Bei der Verwendung einer Glühlampe ist das Licht weder monochromatisch noch kohärent. Man würde deshalb beobachten, dass beide Detektoren D1 und D2 gleichartig ansprechen.

Begründung

Das Licht einer Glühlampe kann quantenmechanisch nicht durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben werden. Es liegen daher keine festen Phasenbeziehungen vor. Die Intensität ergibt sich als Mittelwert aller beteiligten Teilfunktionen. Damit entsteht kein Interferenzbild und somit auch keine Auslöschung oder Verstärkung.

- 1.5 Wird der Detektor D1 durch einen Schirm ersetzt, erhält man beim Versuch mit Laserlicht Interferenzringe. Bei korrekter Justierung und Strahlführung sind diese Interferenzringe nahezu konzentrisch.

- 2.1 Nach kurzer Zeit entsteht auf dem Schirm zunächst eine scheinbar willkürliche und regellose Verteilung von Flecken. Nach endlicher Zeit bildet sich aus der vergrößerten Anzahl von Flecken allmählich ein ringförmiges Interferenzmuster. Nach sehr langer Zeit entspricht das Interferenzmuster dem von intensivem Laserlicht.

- 2.2 Ohne Hindernis gelangen die Photonen in D1. Blockiert man einen der beiden Wege, werden 50 % vom Hindernis absorbiert, da der (erste) Strahlteiler ja die Eigenschaft hat, die Hälfte hindurch zu lassen. Die restlichen 50 % der Photonen passieren den zweiten Strahlteiler und verteilen sich wiederum stochastisch in D1 oder in D2. Die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in einem der beiden Detektoren zu registrieren, beträgt also jeweils 25 %.
- Die Registrierung eines Impulses im Detektor 2 gibt also eine Information über das Hindernis selbst, ohne dass das Photon einen Kontakt im klassischen Sinne (wechselwirkungsfreie Messung) mit dem Hindernis hatte, sonst wäre es nämlich vom Hindernis absorbiert worden. Dies ist jedoch nicht erfolgt, es wurde ja in Detektor D2 registriert.

Die Anordnung könnte man sich nun so vorstellen.

Man hat ein gewisses Zeitfenster zum Registrieren. Dann ergeben sich folgend Möglichkeiten:

- Wenn in diesem Zeitintervall D1 anspricht, kann keine Aussage getroffen werden.
- Spricht D2 an, dann weiß man sicher, dass ein absorbierendes Hindernis vorhanden ist.
- Tritt im Zeitfenster gar kein Signal an den Detektoren auf, dann wurde das Photon absorbiert. Es ist also ein Hindernis vorhanden.