

Lösungsvorschläge

Kapitel 3: Wegentscheidungsexperimente und Messprozess

3.1 Welcher-Weg-Experimente

3.1.1. ... mit klassischen Wellen im Mach-Zehnder-Interferometer

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.1.1.:

a) *Polarisationsfilter lassen Licht (allg. elektromagnetische Wellen) nur einer bestimmten Schwingungsebene passieren (Polarisator).*

Polarisation ist ein Merkmal von Transversalwellen. Stellt man einen weiteren Polarisationsfilter (Analysator) in den Strahlengang, muss er zum ersten die gleiche Ausrichtung haben, damit Licht passieren kann. Bei einer 90° -Stellung gelangt kein Licht mehr durch.

b) 1. *Ein Polarisationsfilter lässt weniger Licht bzw. Photonen passieren (s. Anzahl von Photonen) als ohne Filter. Er schwächt die Intensität im Mittel um die Hälfte. Dabei ist die Winkelstellung des Polarisators egal.[Dies könnte man als Nachweis dafür sehen, dass Licht im Allgemeinen nicht polarisiert ist, d. h. in allen Richtungen schwingt.]*

2. In der 90° -Stellung des Analysators zum Polarisator (gekreuzt) gelangt kein Licht auf Schirm bzw. Detektor. Sind die beiden Filter gleichgerichtet, ist nur die Intensität geschwächt (weniger Photonen gelangen zum Detektor). Damit kann man Licht eine bestimmte Eigenschaft (polarisiert) zuschreiben und nachweisen. Stellungen dazwischen führen zu einer kontinuierlichen Abschwächung bzw. Verstärkung der Intensität/Anzahl.

3. Sobald zwei Polarisatoren gekreuzt sind, gelangt kein Licht hindurch. Ein dritter Polarisator kann als Nachweis für die Schwingungsrichtung der zuvor polarisierten Wellen dienen bzw. hebt er diese wieder auf, wenn er auf 45° gestellt wird.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.1.2.:

a) *Nur in einer gekreuzten Stellung der beiden Polarisatoren ist kein Interferenzbild zu sehen. In allen anderen Stellungen bildet es sich allenfalls schwächer aus. Klassisch lässt sich dieses Phänomen leicht begründen, da nur Lichtbündel mit gleicher Polarisationsrichtung miteinander interferieren können.*

b) *Klassisch selbstverständlich überlagern sich nun die 45° -Komponenten der beiden Schwingungsvektoren – es kommt wieder zur Interferenz. Vgl. auch Lösung zu Aufgabe 1b3*

3. 1. 2. ... mit Quantenobjekten im Mach-Zehnder-Interferometer

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.2.1.:

a) Die Photonen werden auf dem Schirm scheinbar völlig zufällig und voneinander unabhängig registriert (Kennzeichen des Teilchencharakters), erst allmählich nach sehr vielen Auftreffpunkten bildet sich das Interferenzmuster aus. Offenbar kann man über den Auftreffpunkt einzelner Photonen keine Aussagen machen, wohl aber über sehr viele Objekte (statistisches Verhalten, Wellenverhalten).

b) Die Verteilung der Auftreffpunkte ist bei diesem Versuch tatsächlich völlig wahllos und ungeordnet – es ergibt sich kein Interferenzmuster. Man bedenke jedoch, dass beide Anfangsbilder für a) und b) gleich ungeordnet aussehen.

Zu den Leitfragen:

- Ja, Photonen kommen auf beiden Wegen auf dem Schirm an, sie werden durch die Polfilter nicht aufgehalten.
- Wir können nicht erklären, was polarisiert für ein Teilchen bedeutet.
- Auf dem Schirm registriert man einzelne Licht-, genauer: Energieflecken.
- Diese Flecken sprechen für die Teilcheneigenschaft der Photonen.
- Ja, im Grunde ist das eine Messung, genauer eine Lokalisierung, allerdings existiert das Photon danach nicht mehr.
- Mit Hilfe des dritten Polfilters kann man genau sagen, welchen Weg die auftreffenden Photonen genommen haben. Die Polfilter präparieren die Photonen, sodass man sie lokalisieren könnte.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.2.2.:

Da wir hier nicht mehr von einem Wellenphänomen sprechen können, fällt es schwer, sich vorzustellen, wieso die Photonen (die ja doch auch einzeln durch die Anordnung gelangen können), sich mal zu einem Interferenzbild vereinigen und dabei in bestimmten Gebieten (Minima) nicht registriert werden, nämlich wenn sie nachweislich präpariert sind und mal nicht, wenn man ihren Weg **nicht** nachweisen kann. Bei einer Registrierung auf dem Schirm mittels CCD dürfte es keine Rolle spielen, welche Polarisations-eigenschaft das jeweilige Photon besitzt. Wie kommt es also, dass die Photonen nicht interferieren, wenn man ihren Weg kennt oder provokanter ausgedrückt: Woher wissen die Photonen des einen Weges eigentlich, ob die Photonen des anderen Weges nachgewiesen werden können?

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.2.3.:

a) Erst bei 45° ergibt sich wieder das Interferenzmuster.

b) Mit den entsprechenden Polfiltern werden die Photonen präpariert und können durch den 3. Filter in 0° - und 90° -Stellung eindeutig

nachgewiesen werden. (Vgl. Aufg. 2b) Zumindest theoretisch ist es auf diese Weise möglich, einem Photon zuzuschreiben, welchen der beiden Interferometerwege es genommen hat. Nicht jedoch im 45° -Winkel. Nun ist es auf dem Schirm wieder völlig unklar, welchen Weg ein registriertes Photon genommen hat – das Interferenzbild ist wieder zu sehen.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.1.2.4.:

siehe blauen Merktext.

3.2. Der Messprozess in der Quantenphysik

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.2.1.: vgl.: [Lösung3.2.1.docx](#)

Die Lampe gestattet es, aufgrund der an den Elektronen gestreuten Lichtblitze, anzugeben, durch welchen Spalt die Quantenobjekte jeweils geflogen sind oder anders ausgedrückt: Es findet eine Ortsmessung der Teilchen statt (vgl. 3.1.).

Bei a) und b) (langwellige Strahlung, geringes Auflösungsvermögen) entsteht das übliche Interferenzmuster. Je kürzer die Wellenlänge der Lampe, also je genauer man angeben könnte, durch welchen Spalt ein Elektron geflogen ist, desto stärker geht die Interferenzerscheinung verloren. Ortseigenschaft und Interferenzmuster sind nicht gleichzeitig realisierbar.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.2.2.: vgl.: [Lösung3.2.2.docx](#)

Die Lampe wirkt wie ein Detektor, mit ihr können die von der Quelle ausgesandten Quanten (hier Elektronen) nachgewiesen werden, indem sie von der Lampe ausgehendes Licht als sichtbare Lichtblitze streuen. Solange man ausgehend von Intensität und Wellenlänge den Durchgang durch einen bestimmten Spalt nachweisen kann, bildet sich kein Interferenzmuster.

Je höher die Intensität, desto deutlicher sind die Streuungen an den Spalten zu erkennen, d. h. man kann den Durchgang durch einen bestimmten Spalt recht genau zuordnen – das Interferenzbild bildet sich nicht aus. Je geringer die Intensität, desto geringer die Streuung, d. h. man kann nicht mehr genau erkennen, durch welchen Spalt das Quant fliegt – das Interferenzbild ist zu sehen. Der Übergang ist kontinuierlich.

3.3 Interpretationsprobleme der Quantenphysik

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.3.1.:

siehe blauen Merktext

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 3.3.2.:

Als Beobachtung können jede Art von Wechselwirkungen (z. B. mit Luftmolekülen, Lichtstrahlen etc.) gelten. Demnach kann man theoretisch immer z. B. eine Ortsmessung vornehmen, was bedeutet, dass eine Interferenz nicht mehr beobachtet werden kann (s.o.)