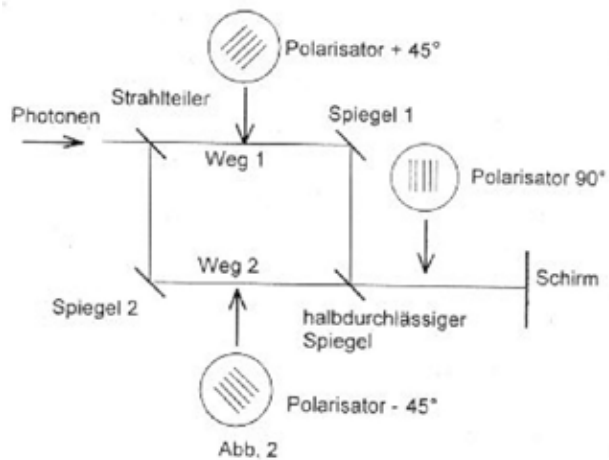


Physik-Abitur 2006 – Aufgabe II d

Photonen einer monochromatischen Lichtquelle stehen zwei Wege zur Verfügung, die über einen Strahlteiler, je einen Spiegel und einen halbdurchlässigen Spiegel auf den gleichen Schirm führen (siehe Abb. 2). Auf dem Schirm sind Interferenzen beobachtbar.

- In die beiden Wege werden nun Polarisatoren geschoben, deren Ebenen um $+45^\circ$ und -45° gegen die Horizontale gedreht sind. Beschreiben und begründen Sie die Wirkung auf das Schirnbild.
- Ein dritter Polarisator, dessen Ebene um 90° gegen die Horizontale gedreht ist, wird in den gemeinsamen Weg vor dem Schirm gebracht. Beschreiben und begründen Sie die Wirkung.



(8 VP)

Offizielle Lösungshinweise

Ohne Polarisatoren. Sind *keine* Polarisatoren in der Anordnung, sind die beiden Wege nicht unterscheidbar: es gibt keine Information darüber, wie die Photonen zum Zielpunkt kommen. Daher erhält man eine Interferenz auf dem Schirm.

Mit Polarisatoren mit $+45^\circ$ und -45° . Mit den Polarisatoren werden die beiden Wege unterscheidbar. Man beobachtet nun keine Interferenz mehr. Die Photonen verhalten sich wie Teilchen.

Mit zusätzlichem dritten Polarisator mit 90° . Hinter dem dritten Polarisator mit 90° haben wieder alle Photonen, die ihn passieren, die gleiche Polarisationsrichtung. Damit wird wieder nicht mehr unterscheidbar, ob sie vorher den Weg 1 oder den Weg 2 genommen haben. Nun wird wieder Interferenz beobachtet.

Operatorendefinitionen aus den EPA

beschreiben: Strukturen, Sachverhalte oder Zusammenhänge strukturiert und fachsprachlich richtig mit eigenen Worten wiedergeben

begründen/zeigen: Sachverhalte auf Regeln, Gesetzmäßigkeiten bzw. kausale Zusammenhänge zurückführen

Aufgabe II d – Schülerlösung 1*

Raum für Korrekturen

Das Interferenzbild auf dem Schirm verschwindet. Licht ist eine elektromagnetische Welle. Trifft es auf den Polarisationsfilter kommt nur der Anteil nicht durch, dessen E-Vektor senkrecht zum Filter steht. Hat man einen um $+45^\circ$ und einen um -45° verdrehten Polarisationsfilter, kommen jeweils unterschiedlich polarisierte Wellen am Schirm an. Man könnte jetzt feststellen welchen Weg das Licht genommen hat. Betrachtet man die Teilcheneigenschaft von Licht, könnte man sagen, woher das jeweilige Photon kam.

Der Weg eines Photons von einem Punkt P_1 zu einem Punkt P_2 ist aber unbestimmt. Könnte man den Weg bestimmen, wie hier durch die Polarisationsfilter, gibt es keine Interferenz mehr.

Wird ein dritter Polarisationsfilter vor den Schirm gebracht gibt es wieder Interferenz. Von beiden möglichen Wegen des Lichts kommt nur der Anteil Licht durch, dessen $\vec{E}$ -Vektoren senkrecht zum Filter stehen. Der Weg des Lichts ist wieder unbestimmt und es gibt wieder Interferenz.

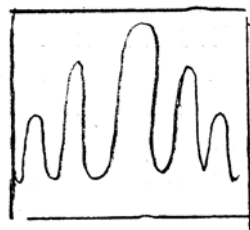
Aufgabe II d – Schülerlösung 2

Raum für Korrekturen

Auf dem ersten Weg gelangen nur Photonen hindurch, die um $+45^\circ$ „gedreht“ wurden. Auf dem zweiten Weg dient der Polarisator dazu um die Photonen in die andere Richtung um -45° zu drehen. Weiß man nun, welchen Weg die Photonen „gegangen“ sind, so ergibt sich auf dem Schirm kein Interferenzbild, es entsteht ein verwaschenes Bild:



Ein dritter Polarisator, der die um 90° gegen die Horizontale gedreht ist, wird auf den gemeinsame Weg vor dem Schirm angebracht. Nun ist nicht mehr klar aus welchen der beiden Wege die Photonen gewählt haben. Aus diesem Grund entsteht auf dem Schirm ein typisches Interferenzbild mit Maxima und Minima.



* Vielen Dank an Wolfgang Zeh, der die fiktiven Schülerantworten zur Verfügung gestellt hat.

Aufgabe II d – Schülerlösung 3

Raum für Korrekturen

1. Fall: Wenn zwei Polarisatoren verwendet werden, der eine um $+45^\circ$ und der andere um -45° gegen die Horizontale gedreht, dann verschwindet das Interferenzbild auf dem Schirm.

Das nun polarisierte Licht liegt in einer Ebene. Am Schirm könnte man deshalb theoretisch feststellen, welchen Weg jedes einzelne Photon genommen hat. Nur aufgrund seiner Polarisation. Da dies jedoch in der Quantenphysik nicht möglich ist, einem Photon einen bestimmten Weg zuzuordnen, verschwindet das Interferenzbild. Denn auch schon beim Doppelspalt konnte man nicht sagen, durch welchen Spalt ein Photon gegangen ist. Man musste immer beide Möglichkeiten als gleichberechtigt in Betracht ziehen.

Wenn man im Experiment dem Photon nun eine Information mitgibt, auf welchem Weg es zum Schirm gelangte, dann verschwindet die Interferenz.

2. Fall: Wenn man nun einen dritten Polarisator direkt vor den Schirm einbringt und diesen alle Photonen aus Weg 1 und Weg 2 durchlaufen, so tritt auf dem Schirm wieder Interferenz auf, da die Information der Photonen wieder gelöscht wird, diese nun in die gleiche Ebene polarisiert werden. Man kann hinter dem dritten Polarisator nicht mehr erkennen, welchen Weg ein Photon genommen hat.

Aufgabe II d – Schülerlösung 4

Raum für Korrekturen

Photonen einer monochromatischen Lichtquelle bewegen sich durch einen Strahlteiler. Die beiden getrennten Lichtstrahlen werden über Spiegel wieder zusammengeführt und treffen sich in einem halbdurchlässigen Spiegel. Anschließend trifft das Licht auf einen Schirm, wo Interferenzen beobachtet werden können.

In die Wege der getrennten Lichtstrahlen werden Polarisatoren gebracht, die um die Winkel $+45^\circ$ und -45° zur Horizontalen gedreht sind.

Gesucht: Wirkung auf das Schirmbild

Vor dem Einbringen der Polarisationsfolie verhalten sich Spiegel 1 und 2 wie zwei kohärente Lichtquellen. Denn jedes im Strahlteiler eingestrahle Photon wechselwirkt nicht mit anderer Materie und verhält sich deshalb wie eine Welle, die aufgespalten wird und an den Spiegeln reflektiert wird. So kann jedes Photon mit sich selbst interferieren. Dementsprechend sieht man auf dem Schirm Interferenzringe, die durch kleine Gangunterschiede zwischen Spiegel 1 und 2 begründet sind.

Allerdings bewirken die Filter, dass beide Wellen von Spiegel 1 und 2 nicht mehr kohärent sein können, da ihre Schwingungsebenen insgesamt um 90° verdreht sind. Solche Wellen können nicht interferieren. Auf dem Schirm ergibt sich also ein kreisförmiger Fleck, dessen Intensität nach außen abnimmt.

Aufgabe II d – Schülerlösung 5

Raum für Korrekturen

Nach dem Einsetzen der beiden Polarisatoren ist eine Verteilung auf dem Schirm wie bei klassischen Teilchen zu beobachten und keine Interferenz mehr. Dies kommt daher, dass nun die Wege 1 und 2 unterscheidbar sind. Man kann über die Polarisation also sagen welchen Weg ein Photon genommen hat. Dadurch kollabiert die Zustandsfunktion Ψ . Dies ist das Prinzip des Quantenradierers. In diesem Fall wird der Wellencharakter des Photons ausradiert.

Nachdem der dritte Polarisator eingesetzt wurde wird auf dem Schirm wieder ein Interferenzmuster sichtbar. Dies kommt daher, dass die Wege 1 und 2 nun nicht mehr unterscheidbar sind, da der horizontale polarisierte Teil des Photons vom dritten Polarisator rausgefiltert wird. Damit kann man nicht sagen, welchen Weg das Photon genommen hat. Die Möglichkeiten werden nun wieder superponiert, die Zustandsfunktion Ψ kollabiert nicht. In diesem Fall „radiert“ der Quantenradierer den Teilchencharakter des Photons aus.

Aufgabe II d – Schülerlösung 6

Raum für Korrekturen

Das Schirmbild zeigt nun nicht mehr die oben beschriebene Interferenz, sondern eine klassische Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dies liegt am Komplementaritätsprinzip der Quantenphysik. Ist eine „Weg-Information“ bekannt (durch die Polarisatoren haben die Photonen jeweils eine unterschiedliche Polarisationssebene, können also unterschieden werden) tritt keine Interferenz mehr auf.

Jetzt lassen sich die Photonen von Weg 1 und Weg 2 nicht mehr unterscheiden, da nach dem 3. Polarisator alle die gleiche Polarisationssebene besitzen. Man hat also keine „Weg-Information“ mehr. Nun tritt wieder das am Anfang beschriebene Interferenzmuster auf. Man sagt hier, den Photonen wäre der Teilchenaspekt (die „welche-Weg-Information“) „ausradiert“ worden und spricht deshalb von einem sog. „Quantenradierer“.

Aufgabe II d – Schülerlösung 7

Raum für Korrekturen

Die Helligkeit bzw. Intensität des Schirmbildes nimmt ab. Die Intensität der Maxima nimmt ab und sie sind schwerer von den Minima zu unterscheiden. Da die Polarisatoren nur die Photonen durchlassen, welche mit $+45^\circ$ bzw. -45° gegen die horizontale Schwingungsebene verschoben sind. Jedoch kann man nicht sagen, welches Photon welchen Weg genommen hat, also Weg 1 oder Weg 2 oder beide.

Da das Schirmbild eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt.

Kein Photon erreicht den Schirm, es kann nichts, weder Interferenzbild noch eine andere Verteilung, beobachtet werden. Jedes der Photonen, das den 3. Polarisator erreicht ist entweder $+45^\circ$ oder -45° polarisiert und kann somit den Polarisator mit 90° nicht passieren.

[kleine Skizze]

Da dieser Polarisator nur Photonen, die 90° polarisiert sind, durchlässt.

Aufgabe II d – Schülerlösung 8

Raum für Korrekturen

Die Intensität des Interferenzbildes nimmt ab, da nicht mehr alles Licht, sondern nur noch $+45^\circ$ und -45° polarisiertes Licht an dem Schirm ankommt.

Schiebt man einen dritten Polarisator mit 90° ein, ist auf dem Schirm kein Bild mehr zu erkennen., da er das schon vorher polarisierte Licht komplett absorbiert, da er nur Licht durchlässt, das um 90° polarisiert ist. Das Licht ist aber um $+45^\circ$ und -45° polarisiert.

Aufgabe II d – Schülerlösung 9

Raum für Korrekturen

Durch die Polarisatoren werden jeweils nur die Wellen durchgelassen, deren Winkel bei $\pm 45^\circ$ liegen. Mit Hilfe der Polarisatoren kann man feststellen, welchen Weg das Licht nimmt. Je nachdem welches polarisiertes Licht am Schirm ankommt ist klar welchen Weg die einzelnen Photonen genommen haben. Da Photonen Quantenobjekte sind, tritt hier das Komplementaritätsprinzip auf. Umso mehr „Welcher-Weg-Information“ man hat umso weniger ist die Interferenz zu beobachten. Durch die Polarisatoren kennt man genau den Weg, den das Photon genommen hat und deshalb lässt sich keine Interferenz mehr feststellen.

Durch diesen dritten Polarisator lässt sich jetzt wieder Interferenz am Schirm beobachten. Der dritte Polarisator ist zu beiden Polarisatoren um 45° gedreht. Dieser lässt von den beiden kommenden Licht nur schwach durch, aber beide Wege sind gleichberechtigt. Durch diese erneute Polarisation kann nicht mehr festgestellt werden, welchen Weg das Photon genommen hat, also entsteht wieder Interferenz am Schirm, aber eine schwächere.