

Kapitel 3

Wellen und Teilchen

3.1 Licht im Interferometer

Einer der interessantesten und rätselhaftesten Aspekte der Quantenmechanik ist die Tatsache, dass sich Photonen und andere Quantenobjekte unter gewissen Umständen wie Wellen und unter anderen Umständen wie Teilchen verhalten. Dieser sogenannte *Welle-Teilchen-Dualismus* wurde bereits in Abschnitt 1.4 angesprochen. Der Versuch, ein tieferes Verständnis dieses eigenartigen Quantenverhaltens zu gewinnen, soll Gegenstand der folgenden Abschnitte sein.

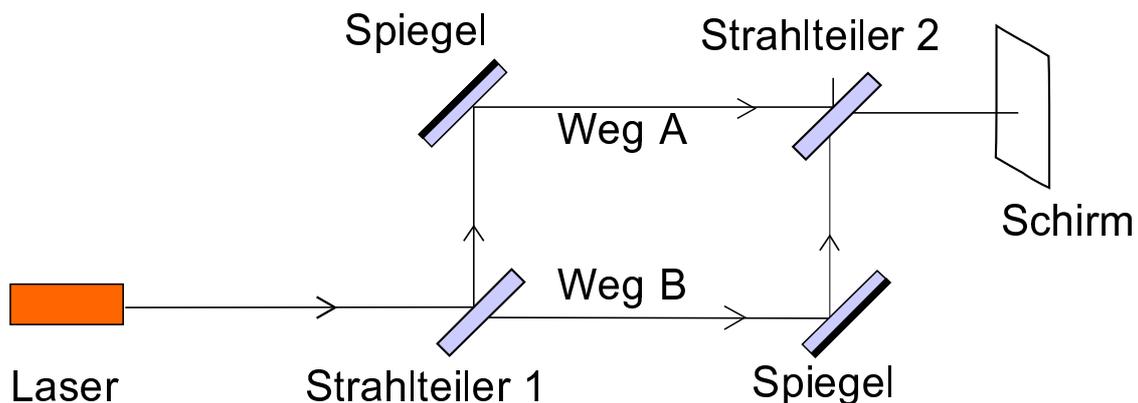


Abbildung 3.1: Mach-Zehnder-Interferometer

Ein charakteristisches Merkmal für Wellenverhalten ist das Auftreten von *Interferenz*. Betrachten wir deshalb einen Versuchsaufbau, bei dem die Interferenz im Vordergrund steht: ein Interferometer. Der folgende Versuch ist als Realexperiment durchführbar, wenn ein Interferometer zur Verfügung steht.¹ Andernfalls kann der Versuch als Computersimulation durchgeführt werden (Das Programm Interferometer.exe kann von <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer> heruntergeladen werden).

Experiment 3.1 (Realexperiment oder Computersimulation): Abb. 3.1 zeigt den Aufbau eines *Mach-Zehnder-Interferometers*. Das Licht eines Lasers fällt auf einen Strahlteiler (einen

¹Die Versuche im vorliegenden Abschnitt werden am Mach-Zehnder-Interferometer besprochen, da dieses einen einfach zu durchschauenden Aufbau besitzt. Sollte jedoch ein Michelson-Interferometer vorhanden sein, ist das Experiment auch damit durchführbar.

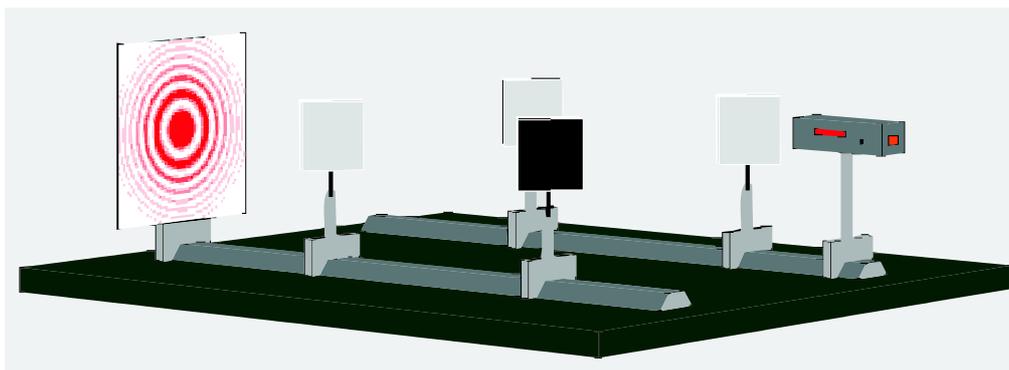


Abbildung 3.2: Interferenzmuster bei intensivem Laserlicht

halbdurchlässigen Spiegel) und wird von diesem in zwei Anteile aufgespalten, die entlang verschiedener Wege laufen (Weg A und Weg B). Beide Teilstrahlen werden durch Spiegel um 90° umgelenkt. An ihrem Schnittpunkt steht ein weiterer Strahlteiler, der die beiden Teilstrahlen wieder „mischt“.

Schalten Sie den Laser ein (mit der Maus auf den Einschaltknopf drücken). Auf dem Schirm erscheint ein Muster aus konzentrischen Kreisen (Abb. 3.2)

Das Wesentliche am Interferometer ist, dass das Licht in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird, die auf verschiedenen Wegen laufen, bis sie vom zweiten Strahlteiler wieder zusammengeführt werden. Die Gangunterschiede, die sich auf den verschiedenen Wegen von der Quelle zum Schirm ergeben, führen zu einem **Interferenzmuster**.

Experiment 3.1 ist ein Interferenzexperiment; es demonstriert also **Wellenverhalten** von Licht. Andererseits wissen wir, dass dies noch nicht die ganze Wahrheit ist. Im Photoeffekt (Kapitel 1) hat Licht auch **Teilcheneigenschaften** gezeigt. Dies führte zur Modellvorstellung von Licht als einem Strom von Energiequanten, den Photonen.

Es wäre eine spannende Angelegenheit, wenn man das Experiment mit *einzelnen Photonen* durchführen könnte. Was würde dann passieren? Könnte man Welleneigenschaften und Teilcheneigenschaften *im gleichen Experiment* beobachten? Würden die beiden Verhaltensweisen irgendwie koexistieren? Oder schließen sie sich gegenseitig aus? Wir sollten versuchen, das Experiment tatsächlich durchzuführen, um diese interessanten Fragen zu beantworten.

3.2 Vom Lichtstrahl zu einzelnen Photonen

Um Experimente mit einzelnen Photonen durchzuführen, muss man das Licht extrem „verdünnen“. Die Frage ist: Wie stellt man derartiges Licht her und wie weist man es nach? Die Erzeugung ist nicht schwierig:

Experiment 3.2: In einem gut abgedunkelten Raum wird vor einen Laser ein Graufilter nach dem anderen gestellt, so lange bis das Licht nicht mehr zu erkennen ist (Abb. 3.3).

Mit jedem Graufilter wird das Licht weiter abgeschwächt, bis die Intensität schließlich so gering ist, dass man nichts mehr wahrnimmt. Einzelne Photonen sieht man dabei aber nicht. „Schuld“ daran ist aber nicht unser Auge, sondern das visuelle Nervensystem, das für die Verarbeitung von optischen Reizen zuständig ist. Tatsächlich konnte nachgewiesen werden, dass die Stäbchen in der menschlichen

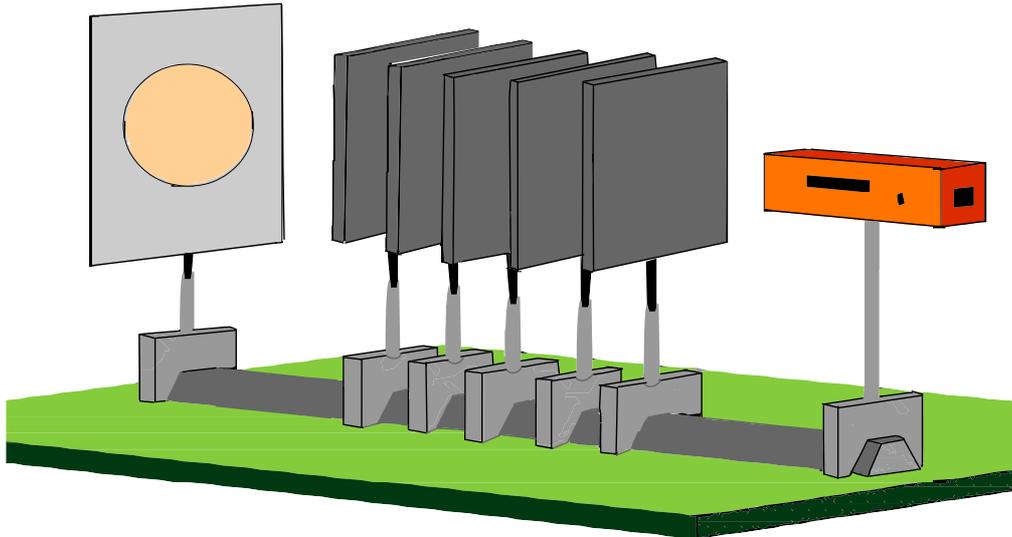


Abbildung 3.3: Abschwächen von Laserlicht

Netzhaut auf einzelne Photonen reagieren. Die Verschaltung der Nerven, die von der Netzhaut zum Gehirn führen, macht es aber notwendig, dass innerhalb von 100 ms etwa 9 Photonen in einem gewissen Netzhautbereich registriert werden, damit ein Signal ins Gehirn weitergeleitet wird.

Das Problem besteht also im Nachweis der Photonen. Das bloße Auge ist nicht dazu geeignet, einzelne Photonen nachzuweisen. Ein Gerät, mit dem dies gelingt, ist ein CCD-Element (einfachere Ausfertigungen werden z. B. in Videokameras verwendet). Ein CCD-Element ist eine flächenhafte Anordnung von Halbleiter-Detektorbausteinen, die die Photonen nachweisen. Empfindliche CCD-Elemente können sogar einzelne Photonen registrieren. Der Ort, wo die Photonen auftreffen, wird elektronisch gespeichert, so dass die räumliche Verteilung der Photonen sichtbar gemacht werden kann.

Damit sind die Grundvoraussetzungen erfüllt, um optische Experimente mit einzelnen Photonen diskutieren zu können. Da solche Experimente als Realexperimente nur sehr schwierig durchzuführen sind, müssen wir zur Computersimulation übergehen. Im Simulationsprogramm kann man zwischen dem Laser und der Quelle für einzelne Photonen einfach per Mausklick umschalten.

3.3 Interferometrie mit einzelnen Photonen

Führen wir das oben betrachtete Interferenzexperiment nun also mit einzelnen Photonen durch

Experiment 3.3 (Computersimulation): Starten Sie das Interferometer-Simulationsprogramm. Wählen Sie an der Lichtquelle „einzelne Photonen“ aus und schalten Sie die Quelle ein. Sie werden bemerken, dass jedes Photon nur einen einzelnen Detektorbaustein auf dem CCD-Element anspricht. Die räumliche Verteilung, die sich nach dem Nachweis von nur wenigen Photonen ergibt, ist in Abb. 3.4 gezeigt. Sie weist scheinbar keinerlei Regelmäßigkeit auf.

Wenn die Zahl der registrierten Photonen langsam ansteigt, sehen Sie, wie sich aus den Spuren der einzeln nachgewiesenen Photonen allmählich ein Muster herausbildet. Es handelt sich um das kreisförmige Interferenzmuster, das schon in Experiment 3.1 mit intensivem Licht

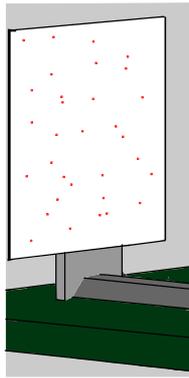


Abbildung 3.4: Verteilung weniger nachgewiesener Photonen

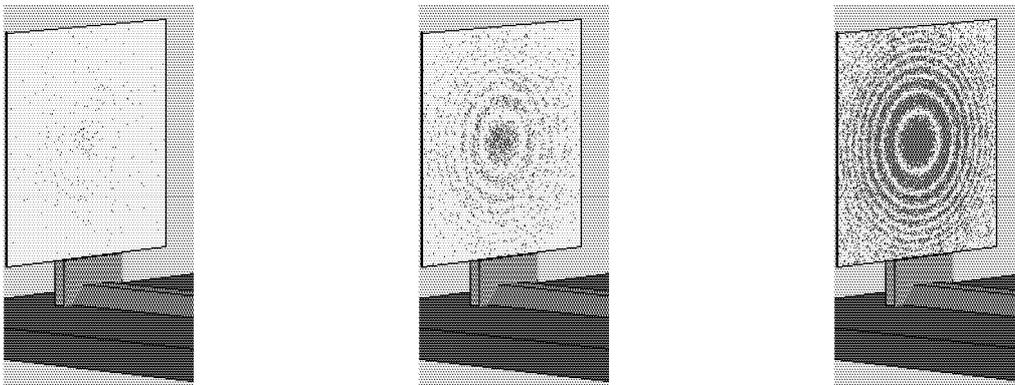


Abbildung 3.5: Aufbau des Interferenzmusters aus den Spuren einzelner Photonen

beobachtet wurde. Abbildung 3.5 zeigt den allmählichen Aufbau des Musters aus einzelnen Photonen-„Einschlägen“.

Dieses Experiment ist ein Beispiel für den „Dualismus“ von Welle und Teilchen für Photonen. Jedes Photon überträgt seine ganze Energie auf einen einzigen Detektorbaustein. Ein solches Verhalten, bei dem eine Wechselwirkung ganz lokalisiert erfolgt, ist typisch für Teilchen. Eine Welle ist dagegen über den ganzen Bereich ausgedehnt. Sie würde ihre Energie gleichmäßig verteilen. Sie würde also eine ganze Anzahl von Detektorbausteinen ansprechen. Das Interferenzmuster wäre von Anfang an vorhanden, wenn auch in abgeschwächter Form.

Aber auch das Teilchenmodell reicht alleine nicht aus, um das Experiment zu erklären. Das Interferenzmuster, das sich aus vielen Einzeleinschlägen von Photonen aufbaut, ist ein charakteristisches Merkmal einer Welle. Es ist nicht klar, wie ein Teilchenmodell die Entstehung dieses Musters erklären könnte. Dies illustriert noch einmal deutlich: *Eine einfache Alternative zwischen Welle und Teilchen gibt es in der Quantenmechanik nicht* (vgl. Abschnitt 1.4).

Es ist nicht möglich, das physikalische Verhalten von Photonen in einem reinen Teilchen- oder Wellenmodell zu beschreiben. Eine befriedigende Erklärung muss Kennzeichen beider Modelle in sich vereinigen.

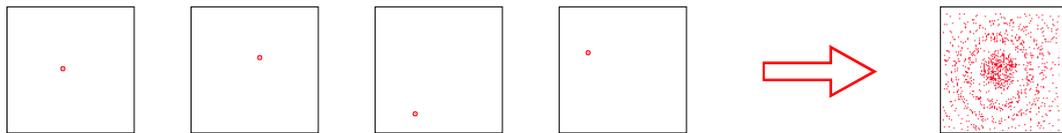


Abbildung 3.6: Serie von Experimenten mit einzelnen Photonen

Man kann den scheinbaren Konflikt zwischen Wellen- und Teilchenverhalten sogar noch verschärfen. Wir stellen uns dazu eine Serie von Experiment mit einzelnen Photonen vor. Das heisst, dass in jedem Experiment nur ein einzelnes Photon nachgewiesen wird (Abb. 3.6). Die Experimente sollen zeitlich so weit auseinanderliegen, daß ein gegenseitiger Einfluß ausgeschlossen ist. In jedem dieser Einzelexperimente findet man einen Fleck, der vom Nachweis des Photons herrührt. Er befindet sich an einer vermeintlich zufälligen Stelle. Notiert man bei jedem dieser Experimente die Koordinaten der Flecke und trägt sie in ein gemeinsames Diagramm ein, zeigt sich in den Eintragungen eine überraschende Struktur: das bekannte Interferenzmuster. Obwohl jedes der Experimente für sich nur einen einzelnen Fleck lieferte, der sicherlich nicht als ein Wellenphänomen oder als ein abgeschwächtes Interferenzbild aufgefaßt werden kann, liefert die Gesamtheit der unabhängigen Experimente das wellentypische Beugungsmuster.

Mit diesem Experiment sieht man deutlich, dass das Interferenzmuster nicht auf eine – wie auch immer geartete – Wechselwirkung der Photonen untereinander zurückgeführt werden kann. In jedem der Einzelexperimente ist nur ein einzelnes Photon beteiligt, eine Wechselwirkung zwischen verschiedenen Photonen ist also ausgeschlossen.

3.4 Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben?

Die Tatsache, dass im selben Experiment sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften sichtbar werden, ist schon recht eigentümlich. In der Tat verhalten sich Photonen aber noch viel erstaunlicher. Beim Nachweis regt ein Photon nur einen einzigen Detektorbaustein an. Dürfen wir es uns *innerhalb* des Interferometers ähnlich gut lokalisiert (also teilchenhaft) vorstellen? Wenn das der Fall wäre, müsste jedes einzelne Photon entweder auf Weg A oder auf Weg B in Abb. 3.1 zum Detektor gekommen sein (und zwar auf genau einem der beiden Wege).

Um dies zu klären, benutzen wir den Begriff der dynamischen Eigenschaft. Wir fragen, ob ein Photon innerhalb des Interferometers die Eigenschaft „Weg“ besitzt. Das ist sicher dann der Fall, wenn man an jedem Photon eine *Markierung* anbringen kann, die eine Entscheidung zwischen Weg A und Weg B erlaubt. Um die Photonen zu markieren, kann man die Eigenschaft „Polarisation“ benutzen (vgl. Abschnitt 2.3). Dazu zunächst ein Vorversuch:

Experiment 3.4 (Computersimulation): Bringen Sie im Simulationsprogramm ein Polarisationsfilter in jeden der beiden Interferometerwege (Polarisationsfilter 1 und 2 auswählen). Mit den Hebeln an den Polarisationsfiltern können Sie mit der Maus die jeweilige Polarisationsrichtung einstellen. Stellen Sie beide Polarisationsfilter zunächst senkrecht ein und schalten Sie die Quelle ein. Sie werden feststellen, dass sich wie in Versuch 3.3 aus den „Einschlägen“ vieler einzelner Photonen nach und nach das Interferenzmuster zusammensetzt (Abb. 3.7).

Das Einbringen der beiden gleich eingestellten Polarisationsfilter hat an dem Ergebnis des Experiments nichts verändert. Der einzige Unterschied zu Experiment 3.3 ist, dass die Polarisationsfilter im Mittel die Hälfte der Photonen absorbieren, so dass es länger dauert, bis sich das Interferenzmuster zusammensetzt.

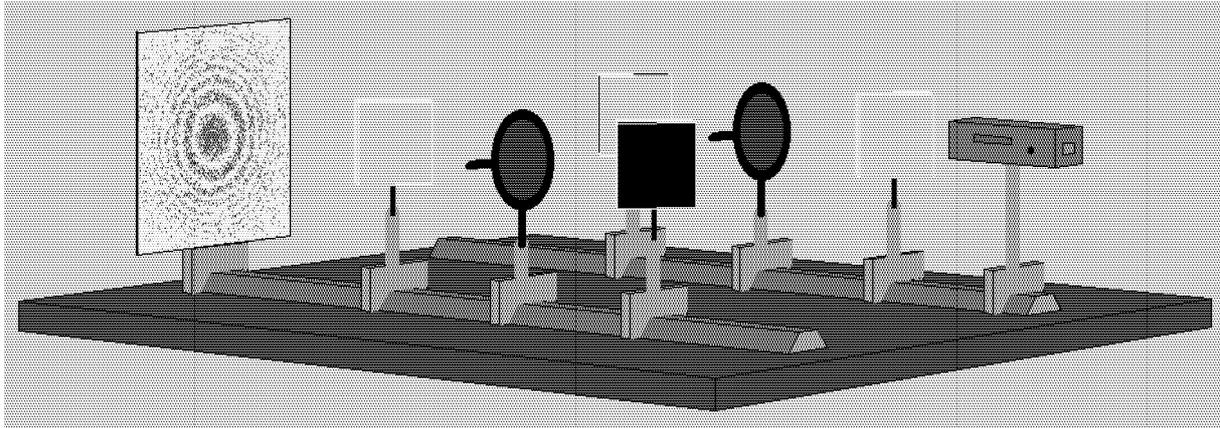


Abbildung 3.7: Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern

Wir können den Versuch noch einmal mit waagrecht eingestellten Polarisationsfiltern wiederholen; solange die Polarisationsfilter parallel stehen, ergibt sich immer das gleiche Ergebnis.

Nun können wir zum eigentlich interessanten Punkt kommen. Wir markieren mit den Polarisationsfiltern die beiden Wege A und B. Dazu wird das Polarisationsfilter in Weg B waagrecht eingestellt, das Polarisationsfilter in Weg A bleibt senkrecht eingestellt.

Jedes Photon trägt nun eine Markierung, aus der wir zurückschließen können, welches Polarisationsfilter es passiert hat. Überlegen wir uns, was wir folgern können, wenn wir ein senkrecht polarisiertes Photon auf dem Schirm nachweisen. Es muss offenbar auf Weg A zum Detektor gekommen sein. Weg B scheidet aus, denn das Polarisationsfilter ist dort waagrecht eingestellt und würde kein senkrecht polarisiertes Photon durchlassen. Durch Messung der Polarisationsrichtung können wir für jedes einzelne Photon entscheiden, ob es Polarisationsfilter A oder B passiert hat. So wird die Eigenschaft „Weg“ durch die Polarisation markiert.

Die Frage ist: Hat die Tatsache, dass man von jedem Photon sagen kann, dass es entweder Weg A oder Weg B genommen hat, irgendwelche Auswirkungen auf das Versuchsergebnis? Führen wir das Experiment durch:

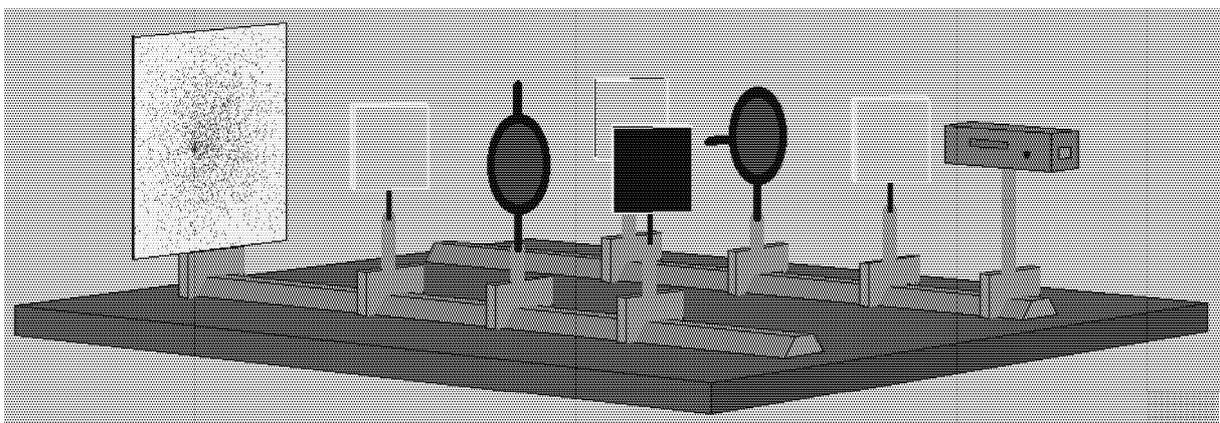


Abbildung 3.8: Schirmbild bei orthogonal eingestellten Polarisationsfiltern

Experiment 3.5 (Computersimulation): Bringen Sie das Polarisationsfilter in Weg B in waagerechte Stellung, das in Weg A bleibt senkrecht eingestellt. Schalten Sie die Quelle ein. Wieder regt jedes einzelne Photon nur einen Detektorbaustein an. Aus den Spuren vieler Photonen bildet sich jedoch *kein* Interferenzmuster, sondern eine strukturlose Verteilung (Abb. 3.8).

Vergleichen wir die Experimente 3.4 und 3.5: Das einfache Verstellen des Polarisationsfilters in Weg B von der senkrechten in die waagerechte Stellung hat ausgereicht, um das Interferenzmuster zu verhindern. Der kleine, aber wesentliche Unterschied liegt darin, dass man im zweiten Experiment jedem Photon, das am Detektor eintrifft, die Eigenschaft „Weg“ zuschreiben kann, d. h. man kann mit Sicherheit sagen, welchen der beiden Wege es genommen hat.

Umgekehrt können wir schließen – und das ist das eigentlich Erstaunliche bei diesem Experiment: Beim Experiment ohne Polarisationsfilter besitzen die Photonen die Eigenschaft „Weg“ *nicht*. Es ist nicht erlaubt, sich vorzustellen, dass ein bestimmtes Photon genau einen der beiden Wege genommen hat. Denn prägt man dem Photon eine Weginformation auf, erhält man kein Interferenzmuster.

Dabei macht es nichts aus, dass im Detektor die Polarisation der Photonen gar nicht gemessen wird. Es ist ausreichend, dass die Photonen die Information über den Weg in sich tragen, um die Interferenz zu verhindern.

Allgemein lässt sich sagen:

In der Quantenmechanik ist es möglich, dass einem Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft (z. B. „Weg A“ oder „Weg B“) nicht zugeschrieben werden kann.

3.5 Anschauliche Erklärung des Ergebnisses

Man kann sich die Folgerung aus dem letzten Abschnitt auch auf anschauliche Art plausibel machen: In Experiment 3.4 erscheint das Interferenzmuster, unabhängig davon, ob beide Polarisationsfilter waagrecht oder senkrecht stehen. Entscheidend ist nur, dass sie parallel stehen. Bei diesem Experiment gibt es Gebiete auf dem Schirm (die Interferenzminima), in denen mit Sicherheit kein Photon nachgewiesen wird.

In Experiment 3.5, in dem die Polarisationsfilter orthogonal zueinander eingestellt sind, findet man an diesen Stellen dagegen Photonen. Was bedeutet das für unsere Vorstellung von Photonen? Um entscheiden zu können, ob in den betreffenden Gebieten Photonen gefunden werden, muss man die Stellung

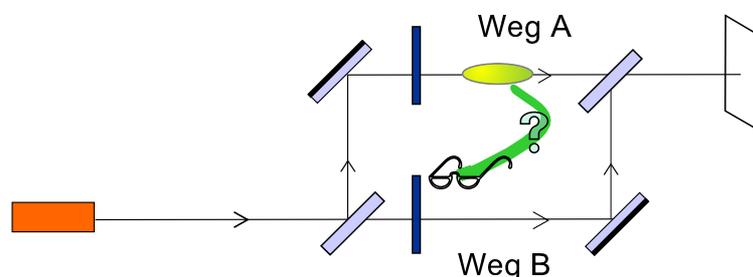


Abbildung 3.9: Wie kann ein lokalisiertes Photon „wissen“, wie das andere Polarisationsfilter eingestellt ist?

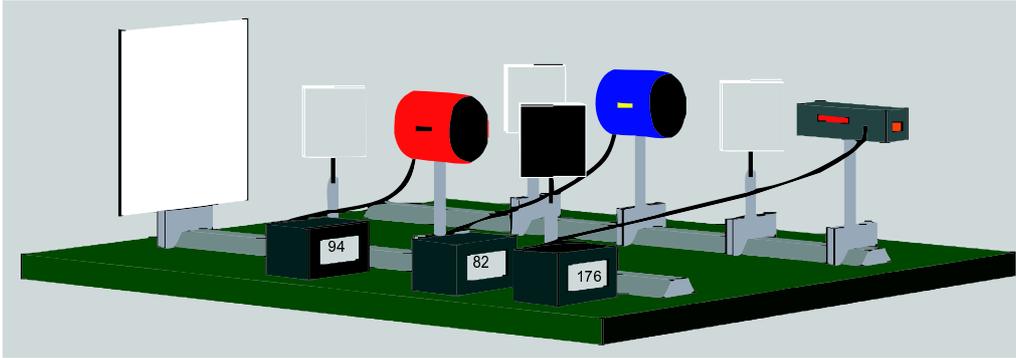


Abbildung 3.10: Photonendetektoren in den Interferometerarmen

beider Polarisationsfilter kennen. Wäre nun ein Photon tatsächlich ein lokalisiertes Gebilde, das auf genau einem der beiden Wege durch das Interferometer läuft, müsste es auf wundersame Weise „wissen“, wie das Polarisationsfilter im anderen Weg eingestellt ist, um sich am Schirm „korrekt zu verhalten“.

Es ist nicht leicht, sich auszumalen, wie das Photon das „Wissen“ über die Stellung des Polarisationsfilters im anderen Arm erlangt haben kann (Abb. 3.9). Die Vorstellung vom Photon als einem lokalisiertem Gebilde, das entweder auf Weg A oder auf Weg B zum Schirm gelangt, gerät hier in Schwierigkeiten. Will man eine Fernwirkungsvorstellung wie in Abb. 3.9 vermeiden, bleibt nur der Schluss, dass unsere Ausgangsannahme falsch war. Also:

Man darf sich ein Photon nicht als lokalisiertes Gebilde mit einem festen Ort vorstellen; man kann ihm nicht einen der beiden Wege zuschreiben.

3.6 Teilt sich das Photon?

Wir haben bisher gesehen, dass man ein Photon im Interferometer weder als Teilchen noch als Welle betrachten kann. Ebenso darf man ihm nicht ohne weiteres die Eigenschaft „Weg“ zuschreiben. Ein naheliegender Ausweg, um das Verhalten der Photonen trotzdem mit anschaulichen Begriffen zu beschreiben, ist die Vorstellung, dass sich ein Photon am ersten halbdurchlässigen Spiegel irgendwie „aufspaltet“. Die getrennten Teile des Photons – so könnte man sich vorstellen – würden dann auf verschiedenen Wegen zum zweiten halbdurchlässigen Spiegel gelangen und sich dort wieder vereinigen. Diese Vorstellung böte eine elegante Lösung des Problems. Ihr einziger Nachteil ist: Sie ist falsch. Man kann experimentell demonstrieren, dass bei einer Messung keine „halben“ Photonen gefunden werden.

Experiment 3.6 (Computersimulation): Stellen Sie wie in Abb. 3.10 in die beiden Wege des Mach-Zehnder-Interferometers je einen Photonendetektor (mit der Maus auswählen). Schalten Sie die Lichtquelle ein und lassen Sie sie einzelne Photonen emittieren. An den Detektoren blinkt ein Signal auf, wenn ein Photon nachgewiesen wurde. Es spricht jeweils nur einer der beiden Detektoren an, niemals beide gleichzeitig. Mehrere „Teile“ von Photonen werden demnach nicht gefunden.

Photonen spalten sich also an dem halbdurchlässigen Spiegel im Interferometer nicht in „Teile“ auf. Bei einer Messung wird ein Photon immer nur als Ganzes in einem der Wege A oder B gefunden. Dies wird

auch dadurch bestätigt, dass an einem Detektor immer der gesamte Energiebetrag hf nachgewiesen wird, den die einzelnen Photonen beim Verlassen der Lampe besessen haben.

Die Ergebnisse von Experiment 3.5 und 3.6 scheinen sich zunächst zu widersprechen: Experiment 3.5 sagt, dass man einem Photon keinen Weg zuordnen kann, wohingegen Experiment 3.6 zeigt, dass man bei einer Messung immer ein ganzes Photon in einem der Wege A oder B findet. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um einen Widerspruch, sondern um einen zentralen Zug der Quantenmechanik: Obwohl ein Photon im Interferometer keine der Eigenschaften „Weg A“ oder „Weg B“ besitzt, wird es bei einer *Messung* immer als ganzes in einem der Arme gefunden. Der Begriff der Messung stellt in der Quantenmechanik nicht mehr eine einfache Zurkenntnisnahme einer dem Quantenobjekt bereits zukommenden Eigenschaft dar. Sie stellt im allgemeinen eine nicht zu vernachlässigende Beeinflussung des Systems dar. Bevor wir in den nachfolgenden Kapiteln zu einer tiefergehenden Analyse dieser Probleme übergehen, soll hier eine vorläufige Formulierung dieses Grundprinzips gegeben werden:

Obwohl ein Quantenobjekt eine Eigenschaft (z. B. „Weg im Interferometer“) nicht besitzen muss, wird bei einer Messung dieser Eigenschaft immer ein bestimmter Wert gefunden (z. B. „Weg A“ oder „Weg B“).