

Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer – ein Zugang zur Deutung der Quantenphysik

Rainer Müller und Hartmut Wiesner

1. Der „Welle-Teilchen-Dualismus“ im Unterricht

Ein wichtiges Thema im Quantenphysik-Unterricht ist der „Dualismus von Welle und Teilchen“: Quantenobjekte zeigen unter bestimmten experimentellen Bedingungen Wellenverhalten, während sie sich in anderen Experimenten teilchenartig verhalten. Dieses „dualistische“ Verhalten widerspricht dem klassischen Weltbild der Schülerinnen und Schüler; es ist die erste harte Nuss, die ihnen die Quantenmechanik zum Knacken aufgibt.

Obwohl man den Welle-Teilchen-Dualismus im Unterricht im allgemeinen ausführlich behandelt, wird nach unserer Meinung das didaktische Potential, das in ihm steckt, meist nicht vollständig ausgenutzt. Dies hat zwei Gründe: Erstens wird der scheinbare Widerspruch zwischen Wellen- und Teilchenmodell meistens durch den Hinweis aufgelöst, dass sich hier die Grenzen der klassischen Modelle zeigen. Beim Wellen- und Teilchenmodell handelt es sich eben nur um Modelle, von denen eines allein nicht ausreicht um alle Quantenphänomene vollständig zu beschreiben.

Diese Feststellung ist sicher richtig. Nur bringt sie uns der Frage nicht näher, *wann* Elektronen und Photonen teilchenhaftes Verhalten zeigen und wann wellenhaftes. Diese zentrale Frage bleibt unaufgeklärt. Liegt hier das indeterministische Element der Quantenmechanik? Im Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik (/1/, s. auch /2/) haben wir daher dafür plädiert, den Welle-Teilchen-Dualismus durch eine sorgfältige Formulierung der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation aufzulösen. Die Vorgehensweise dabei wird in Abschnitt 2 näher erläutert.

Zuvor soll aber der zweite Grund genannt werden, warum sich nach unserer Ansicht eine ausführlichere Beschäftigung mit der „Dualismus-Problematik“ lohnt. Das merkwürdige Verhalten von Quantenobjekten erschöpft sich nämlich nicht darin, dass sie sich manchmal wie Wellen und manchmal wie Teilchen verhalten. Die Quantenphysik widerspricht dem gesunden Menschenverstand noch in viel stärkerem Maße. Durch Interferenzexperimente mit einzelnen Quantenobjekten lässt sich zeigen, dass man Elektronen und Photonen klassisch wohldefinierte Eigenschaften wie „Ort“ im allgemeinen *nicht* zuschreiben darf.

Diese erstaunliche Tatsache ist ein zentrales Lernziel im Münchener Unterrichtskonzept und wurde in /1/ bereits summarisch erläutert. In den Abschnitten 3 – 5 soll ausführlicher dargelegt werden, wie die in /1/ vorgestellten Ideen im Unterricht umgesetzt werden können.

2. Interferenzexperimente mit einzelnen Quantenobjekten

Um das ungewöhnliche Verhalten von Quantenobjekten näher zu untersuchen, wird ein Versuch näher untersucht, bei dem die Interferenz im Vordergrund steht: ein Interferometer. Abb. 1 zeigt den Aufbau eines *Mach-Zehnder-Interferometers*. (Manche Schulen besitzen ein Michelson-Interferometer, mit dem dieses Experiment und die sich anschließenden Gedankenexperimente ebenfalls durchführbar sind. Das Mach-Zehnder-Interferometer wurde gewählt, weil die Lichtwege hier, im Gegensatz zum Michelson-Interferometer, nur einmal durchlaufen werden).

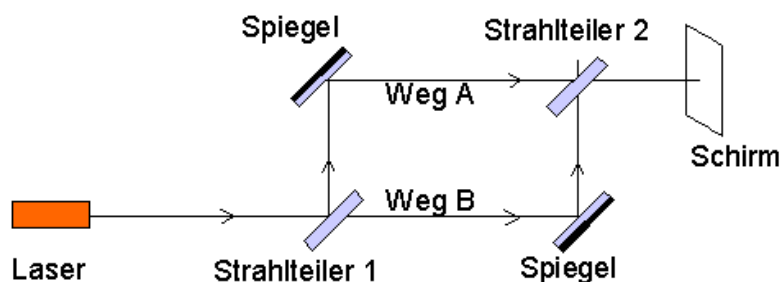


Abb. 1 Schema eines Mach-Zehnder-Interferometers

Das Licht eines Lasers fällt auf einen Strahlteiler (einen 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“.

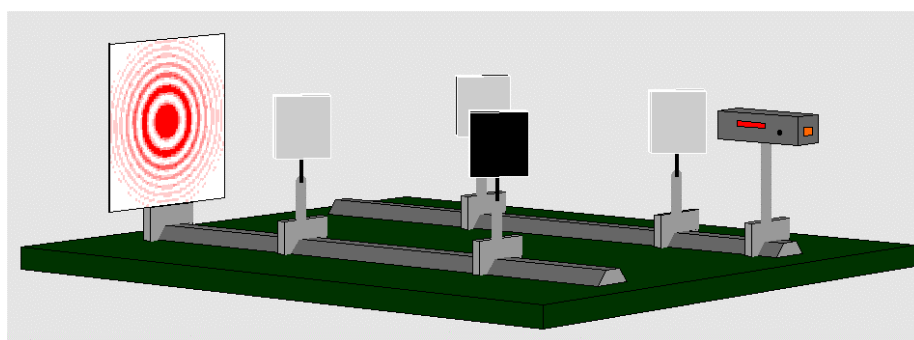


Abb. 2: Interferenzmuster beim Mach-Zehnder-Interferometer

Experiment 1: Man schaltet man den Laser ein. Es zeigt sich ein Interferenzmuster wie in Abb. 2 (dessen genaue Form von der Justierung der Spiegel abhängt).

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 sich dabei ergebenden Gangunterschiede führen zur Interferenz; der Versuch demonstriert also Wellenverhalten von Licht.

Das Interessante an diesem Versuch ist, dass man ihn mit einzelnen Photonen durchführen kann. Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts zeigen sich dann *im gleichen Experiment*. Allerdings stößt ein solches Interferenzexperiment mit einzelnen Photonen in der Praxis auf Schwierigkeiten. Die Erzeugung von extrem „verdünntem“ Licht ist im Prinzip einfach und kann mit Graufiltern geschehen. Das Problem ist der Nachweis einzelner Photonen. Der experimentelle Aufwand ist dabei so groß, dass ein solches Experiment mit den Mitteln der Schulphysik kaum durchzuführen ist.

Um nicht ausschließlich auf die Diskussion von Gedankenexperimenten angewiesen zu sein, gehen wir zu Computersimulation über. Ein Simulationsprogramm, mit dem sich alle in diesem Artikel besprochenen Experimente simulieren lassen, wurde am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität München entwickelt /3/ und ist kostenlos unter www.physik.uni-muenchen.de/Computer/interfer/interfer.html erhältlich.

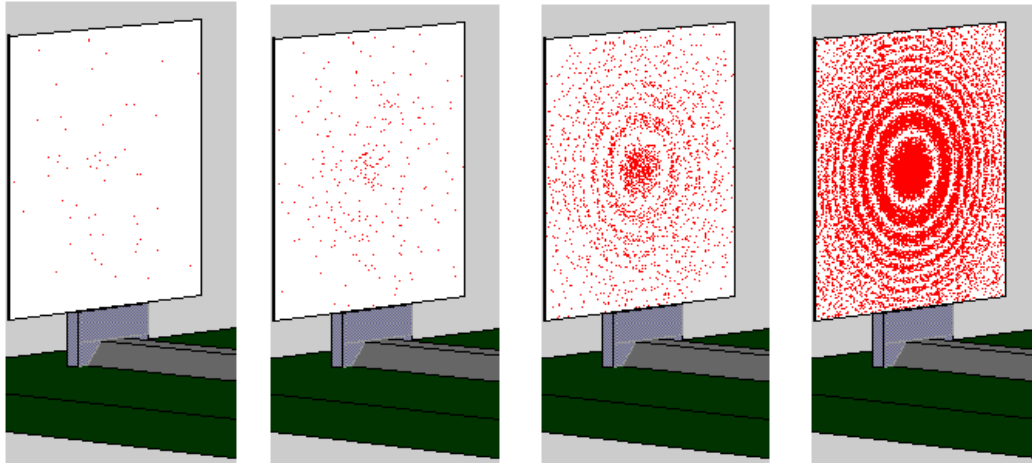


Abb. 3 Aufbau des Interferenzmusters aus den von einzelnen Photonen hinterlassenen „Flecken“

Experiment 2 (Computersimulation): Man startet das Simulationsprogramm und wählt „einzelne Photonen“. Jedes nachgewiesene Photon hinterlässt einen lokalisierten „Fleck“ auf dem Schirm. Die räumliche Verteilung, die sich nach dem Nachweis von nur wenigen Photonen ergibt, weist scheinbar keinerlei Regelmäßigkeit auf (erstes Bild in Abb. 3). Wenn die Zahl der registrierten Photonen langsam ansteigt, sieht man, wie sich aus den „Flecken“ allmählich ein Muster herausbildet. Es handelt sich um das ringförmige Interferenzmuster, das schon im Versuch mit intensivem Licht beobachtet wurde.

Wie erwähnt ist dieses Experiment ein Beispiel dafür, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchenverhalten im gleichen Experiment zeigen kann. Jedes Photon überträgt seine ganze Energie auf eine einzige Stelle auf dem Schirm. Eine derartig lokalisierte Wechselwirkung ist typisch für das klassische Teilchenmodell. Eine Welle dagegen ist über den ganzen Bereich des Schirms ausgedehnt. Sie würde ihre Energie gleichmäßig verteilen. Das Interferenzmuster wäre von Anfang an da, wenn auch in abgeschwächter Form. Aber auch das klassische Teilchenmodell reicht alleine nicht aus, um das Experiment zu erklären. Das Interferenzmuster, das sich aus den Einschlägen vieler Photonen aufbaut, ist ein charakteristisches Merkmal einer Welle. Es ist nicht klar, wie ein Teilchenmodell die Entstehung dieses Musters erklären könnte.

Ein ganz analoges Verhalten findet man im bekannten Doppelspaltversuch /4/, den man nicht nur mit einzelnen Photonen, sondern auch mit Elektronen durchführen kann. In jüngster Zeit konnte auch Interferenz ganzer Atome /5/, und sogar von fußballförmigen C_{60} -Molekülen (sogenannten Fullerenen) beobachtet werden /6/. Diese Experimente illustrieren die Grundproblematik des Welle-Teilchen-Dualismus: Eine einfache Alternative zwischen Welle und Teilchen gibt es in der Quantenmechanik nicht. Ein einzelnes Modell reicht zur Beschreibung des Verhaltens von Quantenobjekten nicht aus. Die Natur ist komplexer als die Modelle, die der menschliche Geist zu konstruieren vermag.

Bereits in /1/ wurde kurz angesprochen, dass man bei dieser Feststellung nicht stehenbleiben muss. Dem Verständnis der Quantenmechanik kommt man durch eine gründliche Diskussion der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation sehr viel näher. Dazu wird die Beschreibung von Quantenobjekten durch *Wellenfunktionen* $\psi(x)$ eingeführt, deren Quadrat die Wahrscheinlichkeit bestimmt, an der betreffenden Stelle ein Quantenobjekt nachzuweisen. Allerdings lassen sich nur Elektronen durch eine Wellenfunktion beschreiben (für eine Diskussion der Frage, inwieweit sich auch Photonen durch Wellenfunktionen beschreiben lassen s. /7/). Die Diskussion der Wahrscheinlichkeitsinterpretation muss deshalb mit Elektronen erfolgen. Im Münchener Unterrichtskonzept werden die begrifflichen Fragen der Quantenphysik in

einem spiralförmigen Aufbau zweimal (zuerst mit Photonen, dann mit Elektronen) durchlaufen. Erst im zweiten Durchgang mit Elektronen wird die Beschreibung durch Wellenfunktionen eingeführt.

Das Wellenverhalten, das sich in der Regel im Auftreten von Interferenz äußert, findet seine Erklärung darin, dass sich die Wellenfunktion räumlich und zeitlich ganz ähnlich wie eine klassische Welle (z. B. Wasserwelle) ausbreitet und dabei Phänomene wie Überlagerung und Interferenz zeigt. Beim Doppelspaltexperiment geht z. B. von jedem der Spalte eine zylindrische Welle aus. Die Interferenz zwischen diesen beiden Anteilen der Wellenfunktion erklärt das Zustandekommen des Interferenzmusters auf dem Schirm.

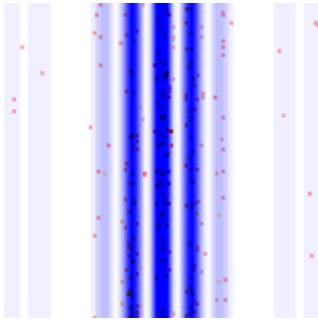


Abb. 4: Der Verlauf von $|\psi(x)|^2$ beim Doppelspalt-Experiment ist als Schattierung dargestellt. Die Verteilung der nachgewiesenen Elektronen (Punkte) folgt der Verteilung.

Andererseits wird das Teilchenverhalten durch die *Interpretation* der Wellenfunktion erklärt. Die Wellenfunktion ist nämlich keine direkt messbare Größe. Wie erwähnt, gibt $|\psi(x)|^2$ nur die *Wahrscheinlichkeit* an, mit der man am Ort x ein Quantenobjekt findet. Beim Nachweis verhalten sich Quantenobjekte aber teilchenhaft. Ein Photon schwärzt die Photoplatte nur an einer fest umrissenen Stelle, ein Elektron gibt seine Energie an einer einzigen Stelle auf dem Leuchtschirm ab. Für den Fall des Doppelspaltexperiments ist dies noch einmal in Abb. 4 illustriert: Die Schattierung zeigt den Verlauf der Wahrscheinlichkeitsverteilung (also das Quadrat der Wellenfunktion). Die dunklen Flecke geben die Verteilung der nachgewiesenen Elektronen wieder.

Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation mit ihrer Verbindung aus wellenhafter Ausbreitung und teilchenhaftem Nachweis erklärt auf diese Weise den Hintergrund des Welle-Teilchen-Dualismus. Damit bleibt es kein Geheimnis mehr, unter welchen Umständen man Wellen- oder Teilchenverhalten erwarten kann.

Um die Erklärungskraft der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation zu betonen, kann man den scheinbaren Konflikt zwischen Wellen- und Teilchenverhalten sogar noch dramatisieren. Wir stellen uns dazu eine Serie von Experimenten mit einzelnen Elektronen vor. In jedem Experiment wird nur ein einzelnes Elektron nachgewiesen. 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 Elektrons herrührt (Abb 5). 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.

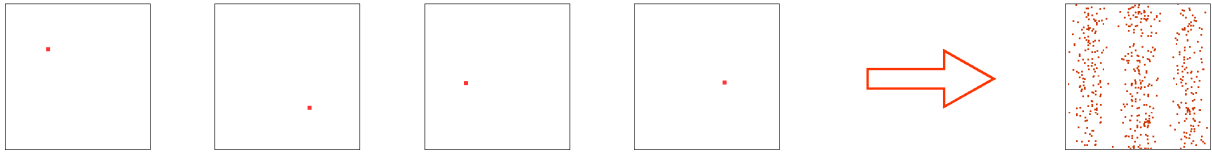


Abb. 5: Jedes Elektron wird in einem eigenen Experiment registriert. Trotzdem ergibt sich das Interferenzmuster, wenn man die „Flecke“ vieler Elektronen in ein gemeinsames Diagramm überträgt.

Mit diesem Experiment sieht man auch deutlich, dass das Interferenzmuster nicht auf eine – wie auch immer geartete – Wechselwirkung der Quantenobjekte untereinander zurückzuführen ist. In jedem der Einzelexperimente ist nur ein Elektron beteiligt, eine Wechselwirkung zwischen verschiedenen Elektronen ist also ausgeschlossen.

3. Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben?

Das Rätsel, das die Quantenobjekte unserer Vorstellungskraft aufgeben, erschöpft sich keineswegs nur im Welle-Teilchen-Dualismus. Der Konflikt mit klassischen Vorstellungen reicht noch tiefer. Kehren wir zu Photonen und zur Interferometeranordnung aus Abschnitt 2 zurück. Mit ihr kann man eine Reihe von Experimenten simulieren, deren Ergebnisse sich gegenseitig zu widersprechen scheinen, wenn man sie im Rahmen der klassischen Vorstellungen interpretieren will. Sie illustrieren so, dass Quantenphänomene nicht auf einfache Weise in das gewohnte klassische Weltbild zu integrieren sind; eine grundlegende Revision unserer Denkweisen und Anschauungen ist notwendig.

Man geht dazu von folgender Überlegung aus: Beim Nachweis auf dem Schirm regen Photonen nur einen einzigen Detektorbaustein an. Es ist naheliegend, sie sich auch innerhalb des Interferometers ähnlich gut lokalisiert (also teilchenhaft) vorzustellen. Nehmen wir dies als (zu widerlegende) Arbeitshypothese zunächst an. Dass die Hypothese tatsächlich *falsch* ist, zeigt die folgende Überlegung.

Wenn ein Photon ein lokalisiertes Objekt wäre, müsste jedes einzelne Photon entweder auf Weg A oder auf Weg B in Abb. 1 zum Detektor gekommen sein (und zwar genau auf einem der beiden Wege). Das gilt auch, wenn man sich Photonen als „nur ungefähr lokalisierte“ Objekte vorstellt, nicht nur für klassische Punktteilchen.

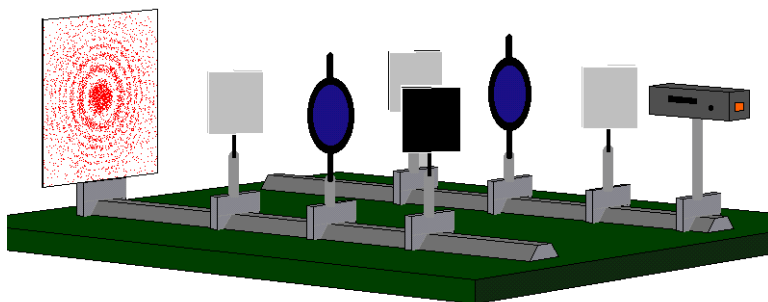


Abb. 6: Mach-Zehnder-Interferometer mit parallel eingestellten Polarisationsfiltern

Wir fragen, ob wir einem Photon, das am Schirm nachgewiesen wird, genau einen der beiden Wege zuordnen können. Besitzt es die Eigenschaft „Weg“? 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 ihre Polarisation benutzen (der Begriff der Polarisation sollte bereits vorher eingeführt worden sein).

Dazu betrachtet man zunächst einen Vorversuch im Interferometer-Simulationsprogramm.

Experiment 3 (Computersimulation): Durch Aktivieren der Kontrollkästchen „Polfilter 1“ und „Polfilter 2“ bringt man zwei Polarisationsfilter in die jeweiligen Strahlengänge (Abb. 6). Beide Polarisationsfilter werden zunächst in waagerechte Stellung gebracht (mit der Maus an den Hebeln ziehen). Nach Einschalten der Quelle baut sich wie vorher aus den „Einschlägen“ vieler einzelner Photonen nach und nach das Interferenzmuster auf

Das Einbringen der beiden gleich eingestellten Polarisationsfilter hat im Vergleich zu Experiment 2 nichts verändert. Der einzige Unterschied ist, dass die Polarisationsfilter im Mittel die Hälfte der Photonen absorbieren, so dass es länger dauert, bis sich das Interferenzmuster zusammensetzt. Man kann den Versuch noch einmal mit senkrecht gestellten 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 (Abb. 7).

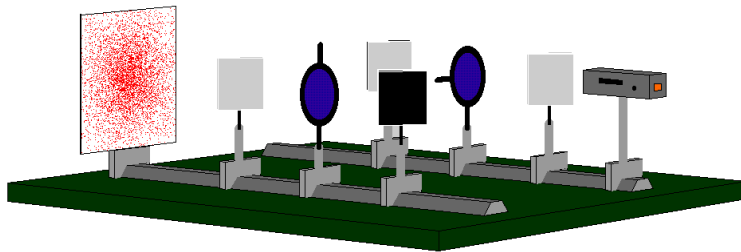


Abb. 7: Interferometer mit orthogonal zueinander eingestellten Polarisationsfiltern. Es baut sich kein Interferenzmuster auf.

Jedes Photon trägt nun eine Markierung, aus der man zurückschließen kann, 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?

Experiment 4 (Computersimulation): Das Polarisationsfilter in Weg B wird in waagerechte Stellung gebracht, das in Weg A bleibt senkrecht eingestellt. Nach Einschalten der Quelle regt wieder jedes einzelne Photon nur einen einzelnen Detektorbaustein an. Aus den Spuren vieler Photonen bildet sich diesmal jedoch *kein* Interferenzmuster, sondern eine strukturlose Verteilung (Abb. 7).

Vergleichen wir die Experimente 3 und 4: 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, dass es einen der beiden Wege 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 richtig, 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.

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.*

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. Die Arbeitshypothese vom Photon als lokalisiertem Gebilde kann damit als widerlegt gelten.

Man kann sich dieses auch auf andere, anschaulichere Weise plausibel machen: In Experiment 3 (parallele Polarisationsfilter) erscheint das Interferenzmuster. Dabei spielt es keine Rolle, 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 4 (orthogonal zueinander eingestellte Polarisationsfilter) ergibt sich kein Interferenzmuster, und an den erwähnten Stellen findet man Photonen.

Um entscheiden zu können, ob in den betreffenden Gebieten Photonen gefunden werden, muss man die Stellung *beider* Polarisationsfilter kennen. Wäre nun ein Photon tatsächlich ein lokalisiertes Gebilde, das genau eines der beiden Polarisationsfilter durchquert, müsste es auf wundersame Weise „wissen“, wie das Polarisationsfilter im *anderen* Weg eingestellt ist, um sich am Schirm „korrekt zu verhalten“.

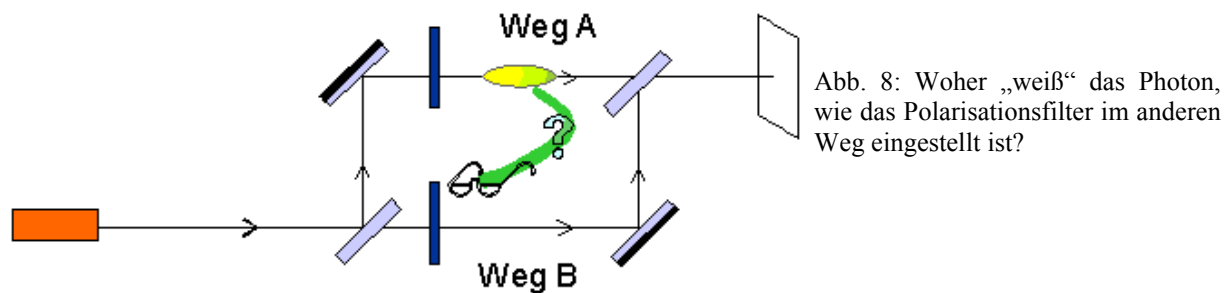


Abb. 8: Woher „weiß“ das Photon, wie das Polarisationsfilter im anderen Weg eingestellt ist?

Es ist nicht leicht, sich auszumalen, wie das Photon das „Wissen“ über die Stellung des Polarisationsfilters im anderen Arm erlangt haben kann (Abb. 8). 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. 8 vermeiden, bleibt nur der Schluss, dass unsere Arbeitshypothese falsch war. Es ist also physikalisch nicht richtig, sich ein Photon als lokalisiertes Gebilde vorzustellen; man kann es noch nicht einmal auf einen der beiden Interferometerwege eingrenzen.

Die Diskussion des Mach-Zehnder-Interferometers mit Polarisationsfiltern ist in der physikdidaktischen Literatur nicht neu. Sie wurde bereits von Brachner und Fichtner /8,9/ betrachtet, allerdings unter einem anderen Gesichtspunkt. Während in der vorliegenden Arbeit der quantenmechanische Eigenschaftsbegriff im Vordergrund steht (Photonen besitzen die Eigenschaft „Weg“ nicht), wurde das Experiment in /8,9/ zur Illustration des *quantenmechanischen Fundamentalprinzips* benutzt (Interferenz tritt nur bei nicht unterscheidbaren Realisierungsmöglichkeiten für ein Ereignis auf).

4. Teilt sich das Photon?

Wir haben gesehen, dass man einem Photon im Interferometer die Eigenschaft „Weg“ nicht zuschreiben kann. 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.

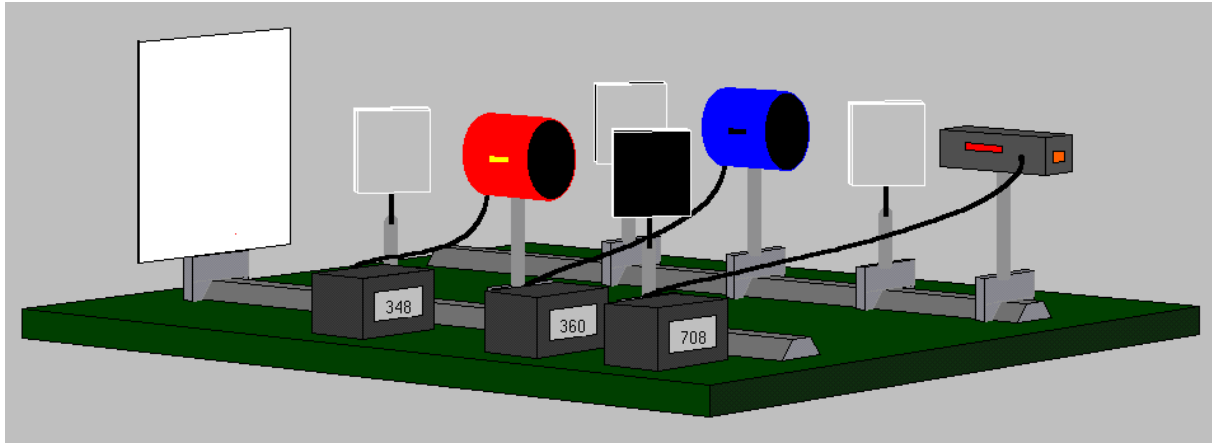


Abb. 9: Experiment mit Photonendetektoren

Experiment 5 (Computersimulation): In die beiden Wege des Mach-Zehnder-Interferometers wird wie in Abb. 9 je ein Photonendetektor gestellt. Man schaltet die Lichtquelle ein und lässt 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.*

Dieses Experiment ist 1986 von Grangier, Roger und Aspect als Realexperiment durchgeführt worden /9/. Das Problem bestand darin, auf kontrollierte Weise einzelne Photonen herzustellen. Als Quelle einzelner Photonen wurden in diesem Experiment Calcium-Atome benutzt, die nach Laseranregung in einen höhergelegenen s-Zustand aus Drehimpulserhaltungsgründen nur unter Emission von *zwei* Photonen in den Grundzustand zurückkehren konnten. Eines der beiden Photonen fiel auf den Strahlteiler, das andere wurde separat nachgewiesen und zeigte an, dass sich tatsächlich ein Photon in der Apparatur befand. Auf diese Weise konnte man kontrolliert mit einzelnen Photonen umgehen.

Man kann das Experiment auch unter dem Aspekt des Welle-Teilchen-Dualismus betrachten. Es lässt sich als Widerspruch zur Vorstellung auffassen, dass sich Photonen *innerhalb* des Interferometers gemäß dem Wellenmodell verhalten. Nach der Wellentheorie würde nämlich die Intensität des einfallenden Strahls am halbdurchlässigen Spiegel gleichmäßig auf die beiden Arme des Interferometers aufgeteilt. Man würde erwarten, dass die beiden Detektoren zu jedem Zeitpunkt die gleiche, wenn auch gegenüber dem einfallenden Strahl verminderte Intensität registrieren. Das ist im Experiment nicht der Fall. Es ist sogar so, dass die beiden Detektoren *niemals zugleich* ansprechen. Die Vorhersage der Wellentheorie wird vom Experiment nicht bestätigt.

Dagegen stimmt das experimentelle Ergebnis mit dem Teilchenmodell überein. Die Tatsache, dass immer nur einer der beiden Detektoren anspricht, bedeutet, dass Photonen immer nur ungeteilt und als Ganzes nachgewiesen werden. Ihre gesamte Energie wird an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit vom Detektor absorbiert. Das entspricht einer teilchenhaften Vorstellung.

Die Experimente 3 und 4 mit Polarisationsfiltern deuteten dagegen stark darauf hin, dass man einem Photon keinen Weg zuordnen kann. Sie widersprechen somit dem Teilchenmodell. Zusammen zeigen die Experimente noch einmal, dass Wellen- und Teilchenmodell einzeln nicht ausreichen um die beobachteten Phänomene zu beschreiben.

5. Eigenschaften und ihre Messung

Wie können wir die Ergebnisse der sich scheinbar gegenseitig widersprechenden Experimente dennoch verstehen? Der wichtigste Schritt besteht darin, die entscheidende Rolle der *Messung* in der Quantenmechanik zu erkennen. Dies kam bereits im Zusammenhang mit der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation zum Ausdruck. Eine Messung ist in der Quantenmechanik nicht mehr eine einfache Zurkenntnisnahme einer dem gemessenen Objekt bereits zukommenden Eigenschaft. Sie stellt im allgemeinen eine nicht zu vernachlässigende Beeinflussung des Systems dar.

In Experiment 5 (Detektoren) wird am Photon eine *Messung* durchgeführt, es wird von den Detektoren lokalisiert nachgewiesen. Bei dieser „Wegmessung“ verhält es sich als lokalisiertes Objekt. Das Ergebnis illustriert eine zentrale Aussage der Quantenmechanik: das *Messpostulat*. Dieses Postulat besagt, dass bei *jeder* Messung einer der Eigenwerte der gemessenen Größe gefunden wird. In Experiment 5 wird die Größe „Weg“ gemessen; die möglichen Messwerte sind „Weg A“ oder „Weg B“. Immer wird genau einer der beiden möglichen Messwerte gefunden: Genau einer der beiden Detektoren spricht an. Das Messpostulat ist der Grund, warum man in der theoretischen Quantenmechanik Eigenwerte berechnet: Sie sind die möglichen Messergebnisse.

Dass man bei einer Messung immer einen bestimmten Messwert findet, trifft auch zu, wenn ein Quantenobjekt die gemessene Eigenschaft gar nicht besitzt. Dies klärt nun den scheinbaren Widerspruch in den experimentellen Ergebnissen auf. Nach dem ersten Strahlteiler besitzt ein Photon die Eigenschaft „Weg“ *nicht*. Dies kommt in den Experimenten 3 und 4 (Polarisationsfilter) zum Ausdruck. Doch obwohl es diese Eigenschaft nicht besitzt, wird bei einer messung (Experiment 5) immer genau einer der möglichen Messwerte „Weg A“ oder „Weg B“ gefunden.

Allgemein kann man diese Erkenntnis folgendermaßen formulieren: *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“).*

Fassen wir die gewonnenen Ergebnisse noch einmal zusammen. Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation (Abschnitt 2) klärt den scheinbaren Widerspruch zwischen Wellen- und Teilchenverhalten auf. Man kann nun vorhersagen, unter welchen Umständen Wellenverhalten und wann Teilchenverhalten zu erwarten ist. Auf der anderen Seite klärt das Messpostulat den Gegensatz zwischen dem „Nichtbesitzen von Eigenschaften“ (das ja für sich genommen schon rätselhaft genug ist) und der Tatsache, dass man bei jeder Messung einen wohldefinierten Wert der gemessenen Größe findet. Mit diesen Erkenntnissen ist das zuvor einfach nur mysteriöse Verhalten der Quantenobjekte ein Stück verständlicher geworden.

/1/ Müller, R; Wiesner, H., *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*, Physik in der Schule (im Druck).

/2/ Müller, R, in Kuhn Physik II, Kapitel *Quanten und Atome*, Westermann-Verlag, erscheint im Frühjahr 2000.

/3/ Huber, A., Zulassungsarbeit, Didaktik der Physik, Universität München (1999).

- /4/ Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., *Vorlesungen über Physik Bd. III*, Oldenbourg, München (1971).
- /5/ O. Carnal, J. Mlynek, *Young's Double-Slit Experiment with Atoms: A Simple Atom Interferometer*, Phys. Rev. Lett. **66**, 2689 (1991).
- /6/ M. Arndt et al., Wave-particle duality of C₆₀, Nature **401**, 680-682, 14. Oktober 1999.
- /7/ Sipe, J. E., *Photon wave functions*, Phys. Rev. A **52**, 1875 (1995).
- /8/ A. Brachner, R. Fichtner, *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*, Schroedel; Hannover (1977).
- /9/ R. Fichtner, *Das quantenmechanische Fundamentalprinzip*, phys. did. **7**, S. 17 (1980)
- /10/ Grangier, P.; Rogier, G; Aspect, A., *Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beamsplitter*, Europhys. Lett. **1** (1986), S. 173.