



Physik Schülerlabor Initiative (PSI)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
<http://psi.physik.kit.edu>

„Quantenradierer“ Analogie Experiment mit dem Mach-Zehnder-Interferometer

Inhalt:

- 1.1 Kurze Beschreibung des „Quantenradierer“ Experiments
- 1.2 Aufbau und Justierung des Mach-Zehnder Interferometers
- 1.3 Experiment: Quantenradierer- Analogie mit dem Mach-Zehnder Interferometer
- 1.4 Komponentenliste und –beschreibung
- 1.5 Probleme?

1.1 Kurze Beschreibung des „Quantenradierer“ Experiments

In einem Mach-Zehnder Interferometer wird ein Lichtstrahl zunächst durch einen Strahlteiler in zwei Komponenten aufgeteilt und an einem zweiten Strahlteiler wieder vereint. Verursacht durch den optischen Gangunterschied der beiden Teilstrahlen können an zwei Schirmen hinter dem zweiten Strahlteiler zwei komplementäre Interferenzmuster beobachtet werden.

Ein Mach-Zehnder Interferometer ist sehr nützlich, um quantenmechanische „welcher-Weg“ Probleme zu veranschaulichen. Setzt man in jeden Arm des Interferometers einen Polarisator und sind deren Polarisations Ebenen um 90° gegeneinander verdreht, so verschwindet das Interferenzmuster. Natürlich kann man diese Beobachtung vollständig durch klassische Elektrodynamik erklären – man kann aber eine quantenmechanische Beschreibung wählen, wenn man sich den Lichtstrahl im Interferometer nun auf einzelne Photonen (bzw. nur ein einziges Photon) reduziert denkt. Durch das Einfügen der gekreuzten Polarisatoren in den Aufbau werden die beiden möglichen Lichtwege unterscheidbar gemacht – wir erhalten eine „welcher-Weg“ Information. Daher verschwindet das Interferenzmuster.

Fügen wir zwischen zweitem Strahlteiler und Schirm einen dritten Polarisator hinzu, den sogenannten „Radierer“, der gegenüber den anderen beiden nun um 45° orientiert ist, so besitzen alle Photonen, die den Schirm erreichen, wieder die selbe Polarisation. Da nun die Weginformation wieder verloren ist, also „ausradiert“ wurde, wird das Interferenzmuster wieder erscheinen.

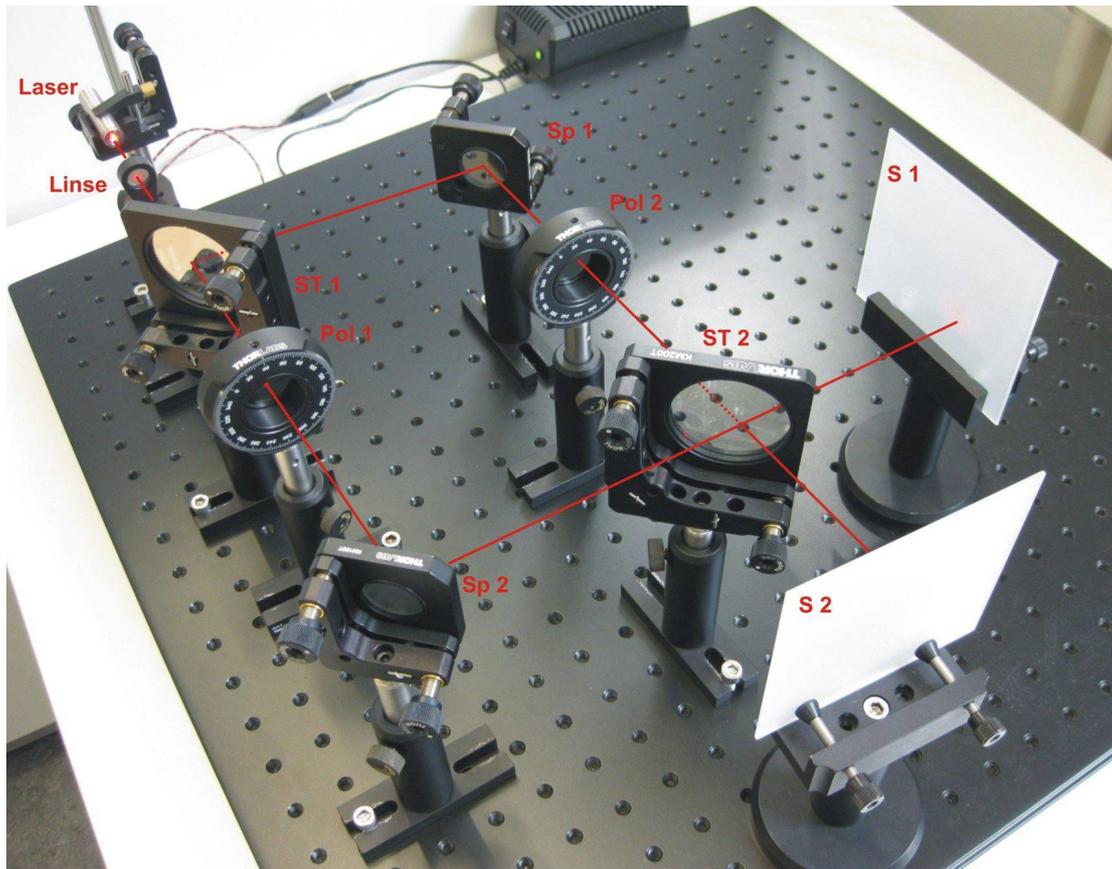


Abb. 1: Aufbau des Interferometers

Abb. 1 zeigt den fertigen Aufbau, der dritte Polarisator (der "Radierer") ist hier nicht gezeigt.

Beschreibung der Symbole:

ST 1/2 : Strahlteiler 1/2
Sp 1/2 : Spiegel 1/2
S 1/2 : Schirm 1/2
Pol 1/2 : Polarisator 1/2

1.2 Aufbau und Justierung des Mach-Zehnder Interferometers

Schritt 1 (Abb. 2):

Fixieren Sie den Laser an einem Ende des optischen Breadboards. Bei Verwendung einer Laserdiode können Sie diese in den Kinematic V-Groove mount einspannen, einen anderen Laser (z.B. HeNe) können Sie einfach in einen Postholder montieren. Schrauben Sie dann einen der Spiegel am anderen Ende des Boards fest, sodass der Laser in einem 90° Winkel davon reflektiert wird. Richten Sie den Laserstrahl idealerweise am Lochraster der Platte aus, wie in Abb. 2 skizziert. Passen Sie die Höhe beider Komponenten an, sodass der Strahl den Spiegel in der Mitte trifft und auch möglichst parallel zur Plattenoberfläche verläuft.

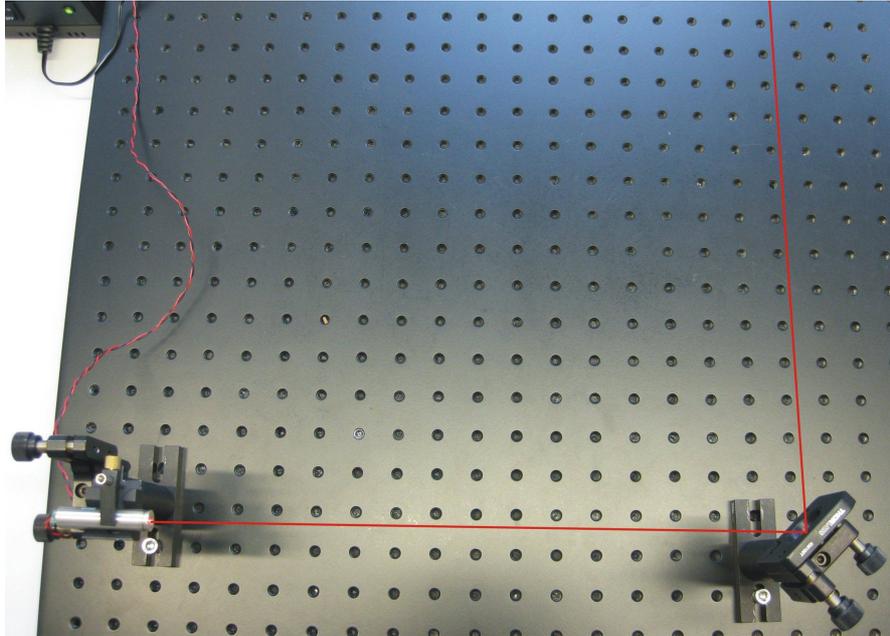


Abb. 2: Justierung – Schritt 1

Schritt 2 (Abb. 3):

Setzen Sie nun einen der Strahlteiler zwischen Laser und ersten Spiegel (Pfad 1), sodass der Strahl in zwei aufeinander senkrechte Teilstrahlen zerlegt wird. Der Strahl, der nun den Pfad 2 bildet muss dann über den zweiten Spiegel so reflektiert werden, dass der reflektierte Strahl parallel zum ersten Strahl in Pfad 1 verläuft. Achten Sie wieder darauf, dass der Strahl parallel zum Lochraster steht und justieren Sie die Höhe der Komponenten ein.

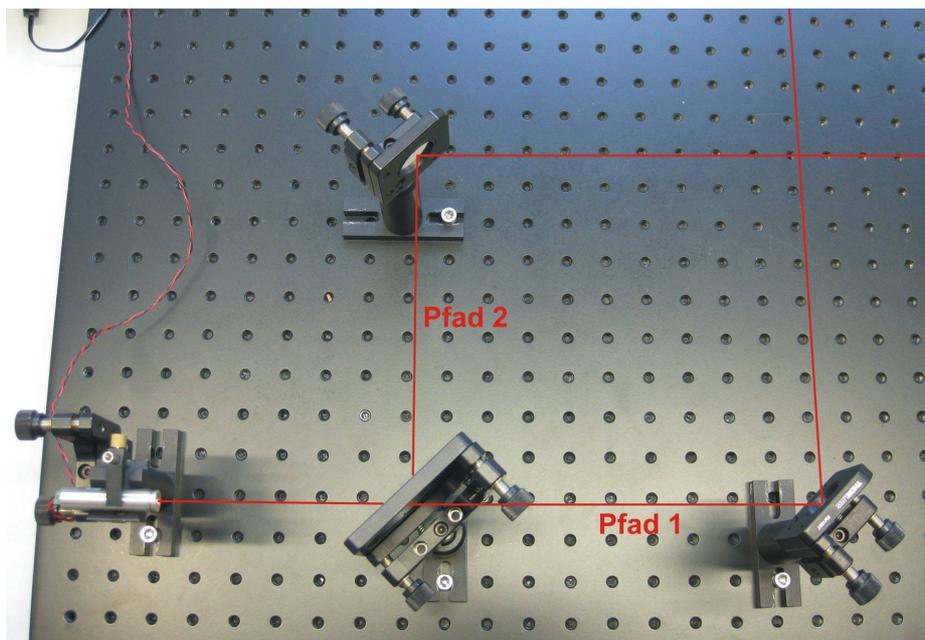


Abb. 3: Justierung – Schritt 2

Schritt 3 (Abb 4):

Bringen Sie den zweiten Strahlteiler am Schnittpunkt der beiden Teilstrahlen in den Aufbau ein. Stellen Sie dann einen der Beobachtungsschirme relativ nah hinter dem Strahlteiler auf (Schirm 1), den anderen in einem Abstand von etwa 2-3 Metern. Ziel ist es nun, beide Teilstrahlen zu überlagern, sodass sie interferieren können.

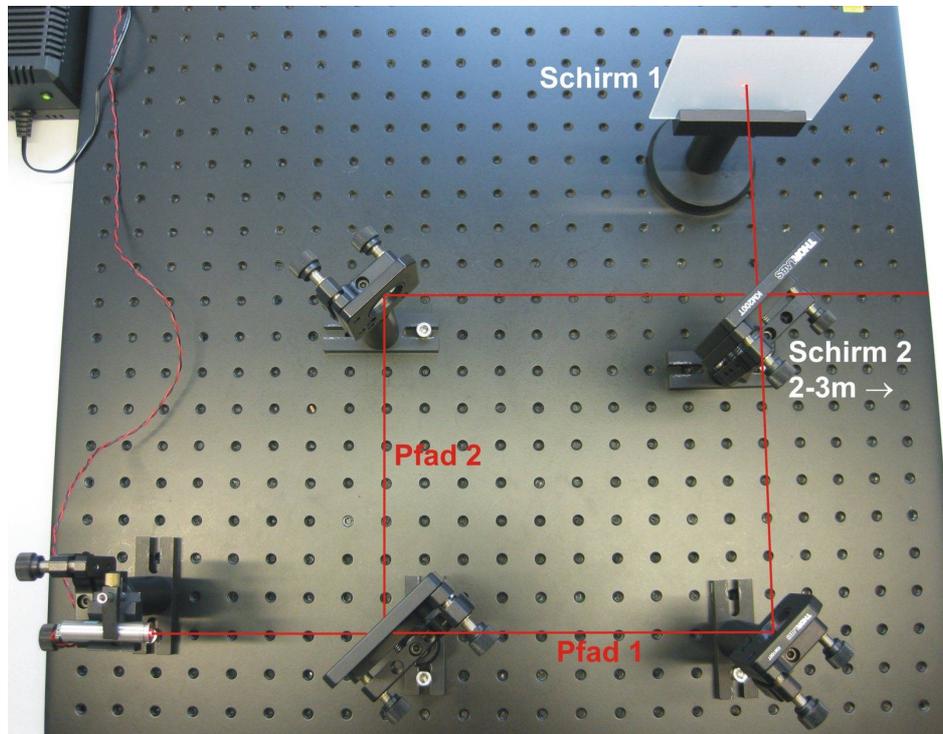


Abb. 4: Justierung – Schritt 3

Zunächst werden Sie höchstwahrscheinlich zwei Laserspots auf den Schirmen sehen. Sie müssen nun versuchen, diese beiden zu überlagern. Sie können die Spots nun mit Hilfe der Feinjustierschrauben an den Spiegel- und den Strahlteilerhalterungen positionieren. Hinweis: Wenn Sie die Schrauben an den Spiegeln verstellen, wird sich der Laserspot natürlich an beiden Schirmen in die gleiche Richtung bewegen. Wenn Sie einen Spot nur an einem Schirm bewegen möchten, müssen Sie den Strahlteiler verkippen, indem Sie die Schrauben an der entsprechenden Halterung benutzen.

Wenn Interferenz eintritt, können Sie dies an einem Flackern im (nun überlagerten) Laserspot beobachten. Dann können Sie zu Schritt 4 übergehen.

Schritt 4 (Abb. 5):

Wenn die Spots übereinander liegen und Sie ein Flackern darin erkennen können, müssen Sie den Strahl divergent aufweiten, um das Interferenz-Ringmuster zu erhalten. Montieren Sie dazu die Aufweitungslinse zwischen Laser und ersten Strahlteiler. Die Linse befindet sich in einem klappbaren Halter (flip frame). Damit können Sie die Linse einfach aus dem Strahlengang herausklappen, wenn Sie z.B. nachjustieren wollen. Wenn Sie ein Interferenzmuster erhalten haben (s. Abb. 6 unten), können Sie schließlich in jedem Pfad einen Polarisator platzieren. Bei gleichgestellten Polarisierungsebenen erhalten Sie Interferenz, bei gekreuzten

verschwindet sie (s. Kapitel 1.3). Der dritte Polarisator („Radierer“) kann schließlich noch direkt vor einen der Schirme gesetzt werden.

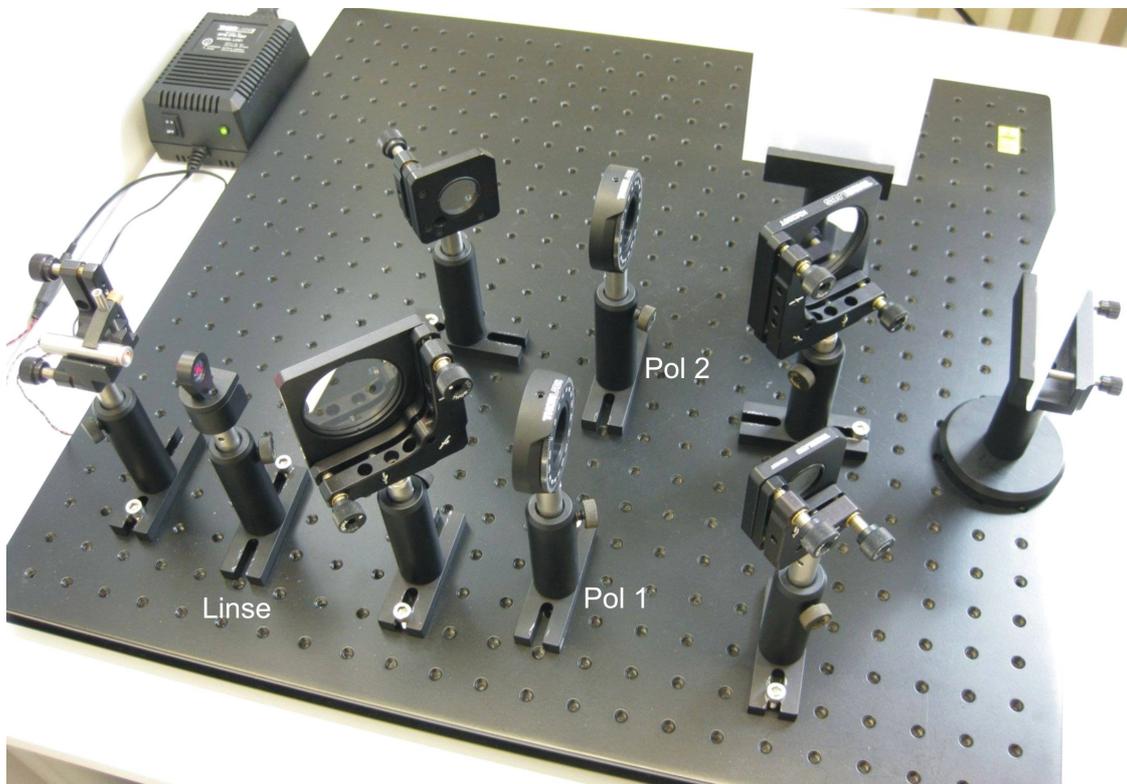


Abb. 5: Justierung – Schritt 4

1.3 Experiment: Quantenradierer- Analogie mit dem Mach-Zehnder Interferometer

Zunächst sei noch einmal darauf hingewiesen, dass dieses Experiment ein Analogie-Experiment zum „echten Quantenradierer“ darstellt, da es auch rein klassisch erklärt werden kann. Ansonsten müsste man tatsächlich Einzelphotonen verwenden, bei denen die klassische Physik schließlich versagt. Man kann das Experiment aber trotzdem mit quantenmechanischen Prinzipien und Termini beschreiben, was letztlich nicht falsch ist. Den Übergang zum einzelnen Photon kann man schließlich gedanklich durchführen.

Der Quantenradierer dient dazu, einige grundlegende quantenmechanische Prinzipien und „Mysterien“ anschaulich zu machen, wie z.B. Komplementarität oder den quantenmechanischen Messprozess im Zusammenhang mit Interferenzphänomenen. Die beiden möglichen Pfade im Interferometer repräsentieren zwei Möglichkeiten für ein Photon, sich zu bewegen. Man hat also ein typisches „welcher-Weg“ Problem. Die beiden Polarisatoren werden genutzt um die Pfade zu markieren, d.h. sie unterscheidbar zu machen.

Experiment 1: Welcher-Weg Information in der Quantenphysik

Setzen Sie einen Polarisator in jeden Arm des Interferometers und stellen Sie die Polarisationssebene bei beiden in gleicher Orientierung ein.

Sie sollten nun Interferenzringe auf beiden Schirmen sehen. Man stelle sich nun vor, dass jeweils nur ein einziges Photon durch den Aufbau läuft. Man drückt das oft so aus, dass das Photon „mit sich selbst“ interferiert. Quantenmechanisch gesehen bedeutet das, dass der Zustand des Photons eine Überlagerung der beiden Zustände „Photon befindet sich in Pfad 1“ und „Photon befindet sich in Pfad 2“ ist. Die Wahrscheinlichkeit für beide Möglichkeiten ist jeweils 50%. Das Intensitätsmuster, das man also am Schirm beobachten kann, nachdem viele einzelne Photonen den Aufbau durchlaufen haben, d.h. die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser Photonen, stellt sich als Interferenzmuster heraus (s. Abb. 6). Wir wissen nicht, „welchen Weg es genommen hat“, da beide Wege ununterscheidbar sind.

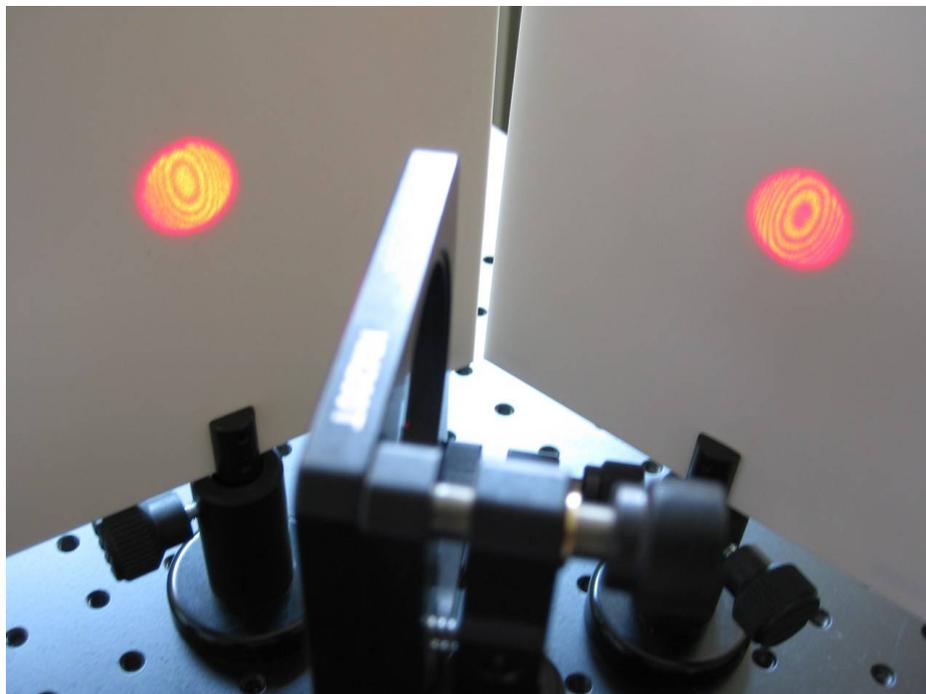


Abb. 6: Interferenzmuster

Da ein Photon unteilbar ist, kann es letztlich nur an einem Schirm „landen“. Dies macht die Komplementarität des Musters anschaulich – wo an einem Schirm ein Maximum auftritt, hat man am anderen ein Minimum (dies sieht man besonders gut im Zentrum des Musters).

Verdrehen Sie nun einen der Polarisatoren um 90° . Da die welcher-Weg Information aber in der Polarisationsrichtung enthalten ist, gewinnen wir die Information über den Weg, den das Photon genommen hat. Dies resultiert im Verschwinden des Interferenzmusters, da die beiden Wege nun unterscheidbar sind. Auf dem Schirm erscheint eine Intensitätsverteilung ohne Interferenzmuster (s. Abb. 7)

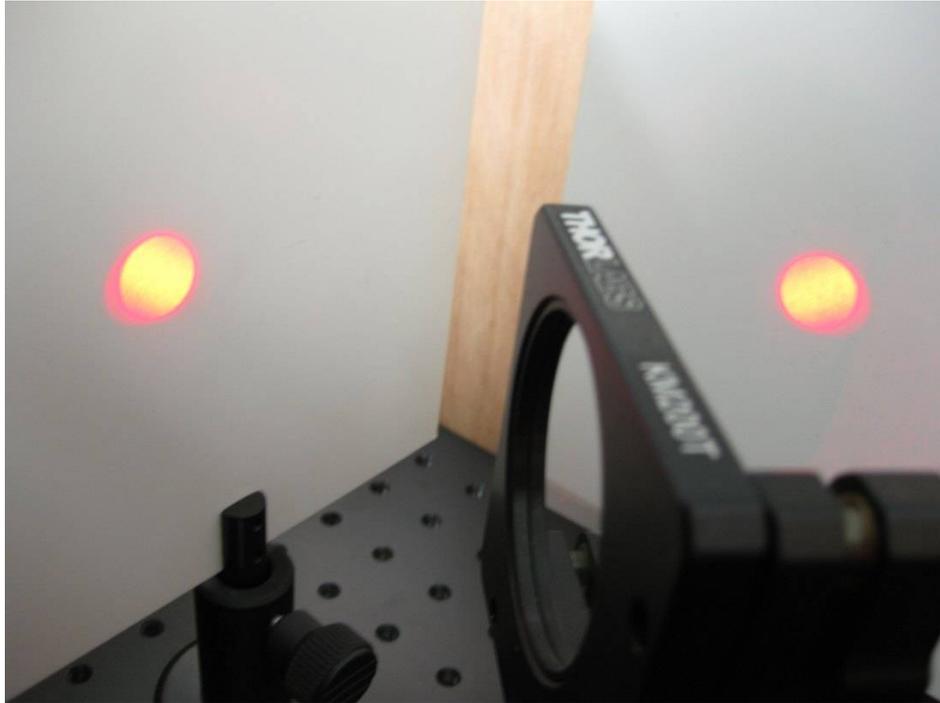


Abb. 7: Verschwinden des Interferenzmusters

Experiment 2: Quantenradierer

In diesem Experiment sollten die beiden Polarisatoren im Aufbau zunächst um 90° gegeneinander verdreht sein, sodass - aufgrund der Weginformation - keine Interferenz beobachtbar ist. Dann wird der dritte Polarisator zwischen den letzten Strahlteiler und einen Schirm mit eingebaut, der sog. „Radierer“. Der „Radierer“ ist um 45° gegenüber den beiden anderen Polarisatoren orientiert. Was beobachtet man nun an diesem Schirm?

Wie man in Abb. 8 und 9 erkennen kann, erscheint hier wieder ein Interferenzmuster. Abb. 8 zeigt nur den Schirm mit dem „Radierer“ davor, in Abb. 9 sieht man denselben Schirm mit „Radierer“ auf der rechten Seite. Links zu sehen ist die Rückseite des anderen Schirms ohne „Radierer“ davor – auf diesem ist kein Interferenzmuster beobachtbar.

Diese Beobachtungen können wir folgt erklärt werden: Der „Radierer“ stellt die Interferenz wieder her, da die Weginformation der Photonen nun nicht mehr vorhanden ist. Alle Photonen, die auf den Schirm treffen, weisen eine 45° Polarisation auf. Die Photonen, die am anderen Schirm ohne „Radierer“ ankommen tragen diese Weginformation noch – es kann bestimmt werden, ob sie über Pfad 1 (0° Polarisator) oder Pfad 2 (90° Polarisator) gekommen sind.



Abb. 8: Interferenzmuster hinter dem "Radierer"

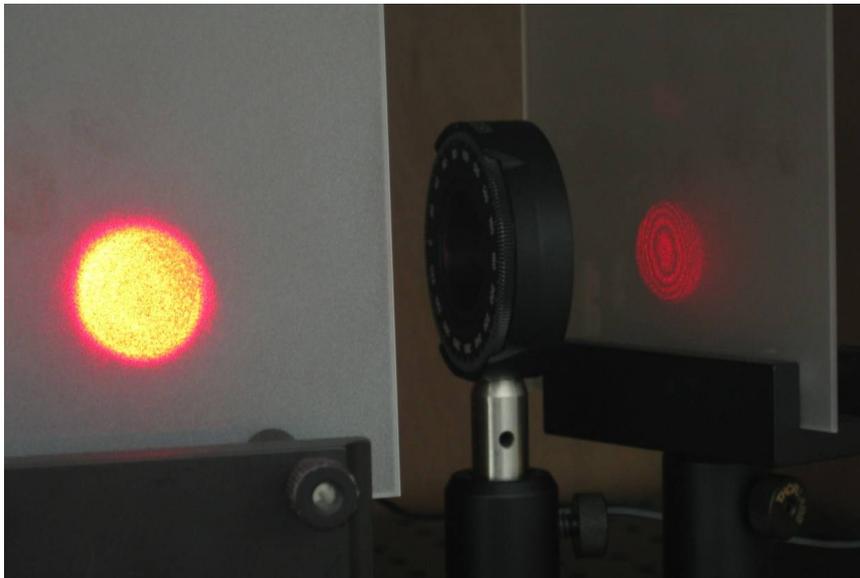


Abb. 9: Rechter Schirm: Interferenzmuster hinter dem "Radierer"
 Linker Schirm: Kein Interferenzmuster ohne "Radierer"

Experiment 3: Gedankenexperiment

Der Physiker John Wheeler hat sich folgendes Gedankenexperiment überlegt:
 Man stelle sich vor, man bringt den „Radierer“ bei bestehender keine-Interferenz-Situation erst in den Aufbau ein, nachdem sich das Photon (nach klassischer Vorstellung) bereits für einen der beiden möglichen Wege im Interferometer „entschieden“ haben müsste. Welches Ergebnis erwarten Sie – Interferenz oder nicht?

Tatsächlich spielt es keine Rolle, zu welchem Zeitpunkt der „Radierer“ hinzugefügt wurde oder ob er zwischendurch mehrmals herein- und herausgenommen wurde, denn das Photon trifft nie wirklich eine Entscheidung über den Weg. Es ist gleichzeitig in beiden Wegen, also beiden Interferometer-Armen, vorhanden – als

Superposition quantenmechanischer Zustände. Alles, was letztlich zählt, ist, wie der Aufbau in dem Augenblick aussieht, in dem die Messung am Photon gemacht wird, wenn es beispielsweise auf dem Schirm auftritt oder anderweitig detektiert wird. Wenn sich der „Radierer“ zu diesem Zeitpunkt im Aufbau befindet, wird man Interferenz beobachten. Wenn nicht, gibt es keine Interferenz. Es spielt keine Rolle, was geschah, bevor die Messung durchgeführt wurde.

Das bedeutet, dass die Entscheidung des Beobachters, was er wann messen möchte, das Ergebnis des Experiments beeinflusst. Es scheint fast so, als ob der Beobachter die Vergangenheit festlegt, indem er in der Gegenwart eine Entscheidung trifft – nach klassischer Denkweise. Quantenmechanisch gesehen ist der Zustand des Photons einfach nicht festgelegt, solange keine Messung an ihm durchgeführt wird.

Dieses Experiment ist mittlerweile tatsächlich durchgeführt und diese Erklärung bewiesen worden (s. z.B. *Hellmuth, Walther, Zajonc, Schleich, Phys. Rev. A* **35**, 2532 (1987)).

Es zeigt die äußerst nicht-intuitive Natur der Quantenmechanik und des quantenmechanischen Messprozesses.

1.4 **Komponentenliste und -beschreibung**

Den oben vorgestellten Aufbau können Sie sehr leicht selbst zusammenbauen und mit obiger Anleitung justieren.

Der Aufbau wurde aus Komponenten der Firma Thorlabs zusammengestellt. Unter der Bezeichnung „Quantum Eraser Analogy Kit, Metric“ erhalten Sie den ganzen Bausatz, wobei Sie natürlich hier auf Wunsch auch individuell variieren können.

Kontaktieren Sie einfach Herrn Dr. Küchenmeister (jkuechenmeister@thorlabs.com).

1.5 **Probleme?**

- *Problem: Die Laserspots überlagern sich zwar, aber es gibt keine Interferenz*

Sehen Sie in der Überlagerung ein Flackern? Wenn nicht, prüfen Sie nach, ob alle Komponenten möglichst exakt ausgerichtet sind (90° Winkel des Strahls nach Reflexion? Ist die Höhe des Strahls über der Platte am Schirm die gleiche wie am Laser direkt?). Wenn diese Bedingungen gegeben sind, müssen Sie evtl. einfach noch etwas herumprobieren und einen Spot immer wieder leicht verändern, ohne dass die Überlagerung ganz verloren geht.

- *Problem: Das Interferenzmuster ist schlecht erkennbar – das Ringmuster ist zu groß/klein.*

Wenn Sie beispielsweise ein sehr billiges Lasermodul verwenden, das selbst schon eine größere Divergenz aufweist, ist möglicherweise die Brennweite der mitgelieferten Aufweitungslinse nicht mehr passend. Falls sich die Divergenz Ihres Lasers mit Hilfe eines darin eingebauten Kollimators verändern lässt, können Sie das Problem ganz einfach beheben. Falls nicht, verändern Sie die Position der Linse im Aufbau oder probieren Sie eine Linse mit einer anderen Brennweite aus.

- *Problem: Die Interferenz verschwindet manchmal, ohne dass der Aufbau berührt wurde, ohne ersichtlichen Grund.*

Verwenden Sie einen Laserpointer oder eine ähnliche Laserdiode? Durch Temperaturänderungen im Halbleiter können sich Veränderungen in den Lasermoden ergeben. Legen Sie die Hand auf das Lasermodul und erwärmen Sie es dadurch leicht – die Interferenz sollte wieder erscheinen.