

Quantenverschränkung bei optischen Interferometern



Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2010

Rebecca Hong An Pham Xuan (19 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

Leitung: StD Thomas Biedermann

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Theoretische Überlegungen | 3 |
| 2.1 | Licht | 3 |
| 2.2 | Interferenz | 3 |
| 2.3 | Kohärenz | 4 |
| 2.4 | Zeigerdarstellung | 4 |
| 2.5 | Quantenverschränkung | 5 |
| 3 | Interferometer | 6 |
| 3.1 | Interferometrie durch Beugung | 6 |
| 3.1.1 | Interferenz an regelmäßigen Strukturen | 6 |
| 3.1.2 | Interferenz an einfachen Objekten | 6 |
| 3.2 | Interferometrie durch unterschiedliche Lichtwege | 7 |
| 3.2.1 | Michelson-Interferometer | 7 |
| 3.2.2 | Mach- Zehnder- Interferometer | 8 |
| 3.2.3 | Fabry- Pérot- Interferometer (Vielstrahlinterferenz): | 8 |
| 3.3 | Interferenz an dünnen Schichten | 9 |
| 3.4 | Fresnelscher Spiegelversuch: | 9 |
| 4 | Welle- Teilchen- Dualismus | 9 |
| 4.1 | Komplementarität | 9 |
| 4.2 | Kopenhagener Deutung | 10 |
| 4.3 | Dekohärenz | 10 |
| 4.4 | Laser | 11 |
| 5 | Aufbau | 12 |
| 5.1 | Die Halbdurchlässigen Spiegel | 12 |
| 5.2 | Das Michelson-Interferometer | 13 |
| 5.3 | Das Mach-Zehnder-Interferometer | 13 |
| 5.3 | Das Mach-Zehnder-Interferometer | 14 |
| 6 | Beobachtung/ Auswertung | 15 |
| 7 | Verbesserungsvorschläge | 16 |
| 8 | Fazit | 16 |
| 9 | Quellenverzeichnis | 17 |
| 10 | Danksagungen | 17 |

1 Einleitung

Seit der Renaissance versucht der Mensch mehr Wissen zu erlangen. Glauben und Wissen wurden getrennt und dem Streben zur Erforschung und Erklärung naturwissenschaftlicher Vorgänge waren keine Grenzen mehr gesetzt.

Tatsächlich aber bewahrheitete sich mit der Vermehrung unseres Wissen die Aussage des allbekanntesten Philosophen Sokrates, der darauf hinwies, dass er wisse, dass er nichts wisse („scio nescio“).

Je mehr der Mensch lernt, versteht und erkennt, desto deutlicher wird die Unkenntnis im Großen: die Frage des Urknalls, wie im Kleinen: die Quantenphysik.

In meiner Arbeit habe ich mich mit der Quantenphysik beschäftigt, insbesondere mit den komplementären Eigenschaften von Laserlicht.

2 Theoretische Überlegungen

2.1 Licht

Licht wird zunächst als klassische Welle betrachtet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht und elektromagnetischen Wellen beträgt ca. $3 \cdot 10^8$ m/s. Dies ist einer der Anhaltspunkte dafür, dass auch Licht eine elektromagnetische Welle ist, Licht hat damit die größte bekannte Geschwindigkeit, die in der Natur auftritt.

Für Elementarwellen hat Christian Huygens 1678 ein Gesetz formuliert, das sogenannte Huygens'sche Prinzip. Darin formuliert er, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt von weiteren Elementarwellen angesehen werden kann. Diese breiten sich mit gleicher Phasengeschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Welle aus.

Wenn also Wellen auf einen Spalt zulaufen, so entstehen hinter dem Spalt mehrere kreisförmige Wellen. Wellen die durch ein Hindernis laufen, sind also nicht scharf begrenzt, sondern sie „umlaufen“ die Hindernisse. Treffen Wellen auf ein Hindernis, so lässt sich in ihrem weiteren Verlauf feststellen, dass sie nicht statisch gerade aus weiterlaufen, sondern sich durchaus auch wieder treffen können. Das Eindringen der Wellen in den sogenannten „Schattenraum“ wird als Beugung bezeichnet.

2.2 Interferenz

Interferenz ist das Phänomen, das auftritt, wenn sich zwei oder mehrere Wellen überlappen.

Bei Licht sieht ein Beobachter bei Interferenz auf dem Schirm ein Muster von abwechselnd hellen und dunklen Streifen. Diese Streifen entstehen durch Auslöschung (destruktive Interferenz) bzw. durch zusätzliche Verstärkung (konstruktive Interferenz). Destruktive Interferenz entsteht, wenn der Gangunterschied der Teilstrahlen auf dem Schirm ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt, also

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Konstruktive Interferenz entsteht, wenn der Gangunterschied einen ganzzahligen Wert der Wellenlänge

annimmt, also

$$\Delta s = k \cdot \lambda \quad (2)$$

Interferenz unterliegt verschiedenen Bedingungen. Die Lichtbündel, die zur Interferenz genutzt werden sollten

- möglichst monochromatisch sein. Bei nicht monochromatischem Licht, wie es z.B. von einer Glühlampe kommt, wird das Licht spektral aufgespalten. Das Licht, das sich also aus verschiedenen Wellenlängen zusammensetzt, wird wieder in seine einzelnen Wellenlängen aufgespalten.
- kohärent sein. Die einzelnen Lichtbündel sollten also zueinander eine konstante Phasenbeziehung haben. Je länger die räumliche Distanz ist, über die diese Kohärenz anhält, umso größer ist die sogenannte Kohärenzlänge.
- Ziel eines jeden Interferometers ist es also, ein Lichtbündel in zwei aufzuspalten, denn so ist eine der Rahmenbedingungen erfüllt, dass die Lichtbündel in einer festen Beziehung zueinander stehen.
- in einer Schwingungsebene liegen, d.h. die gleiche Polarisationsrichtung haben.

2.3 Kohärenz

Kohärenz ist eine Interferenzbedingung. Kohärenz bedeutet dabei, dass die einzelnen Teilstrahlen zu einander eine konstante Phasenverschiebung haben.

Kohärenz kann allerdings auch bedeuten, dass ein System in einer Superposition interferenzfähig ist. Superposition heißt, dass sich ein Teilchen in einem sogenannten kohärenten Überlagerungszustand befindet. Dies bedeutet, dass sich das Teilchen an keinem bestimmten Ort befindet, sondern an allen möglichen Orten gleichzeitig. Die Kopenhagener Deutung bzw. auch die Dekohärenztheorie erklärt, warum sich ein Teilchen bei einer Messung nicht mehr in Superposition befindet, sondern an einem bestimmten Ort vorzufinden ist.

2.4 Zeigerdarstellung

Die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in Raum und Zeit lässt sich durch eine Wellenfunktion der Form $\Psi(s, t)$ darstellen. Eine elektromagnetische Welle setzt sich aus elektrischen und magnetischen Feldern zusammen, dabei stehen deren Feldvektoren senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Bei der Ausbreitung der Welle wird nach Maxwell die elektromagnetische Feldkomponente in die magnetische Komponente überführt und umgekehrt.

Für die elektrische Feldkomponente einer Welle heißt das also, dass diese zwischen zwei Maximalwerten oszilliert und dabei auch den Wert Null annimmt, während die magnetische Feldkomponente gegenläufig dazu oszilliert.

Die Interferenz zweier solcher Wellen wird durch die Überlagerung der elektrischen Feldkomponente beschrieben. Bei einer Phasenverschiebung von 180° , also π , nimmt die Resultierende den Wert Null an, obwohl beide Einzelwellen nach wie vor vorhanden sind. Da dies leicht suggeriert, dass an einigen Orten keine elektromagnetische Welle existiert, wird vielfach auf die Erklärung der Interferenz über die

Zeigerdarstellung zurückgegriffen.

Bei der Zeigerdarstellung wird die fortschreitende elektromagnetische Welle in Form eines rotierenden Zeigers dargestellt. Die Überlagerung zweier Wellen wird durch die vektorielle Addition der beiden Zeiger, deren Summe durchaus Null sein kann, dargestellt. Die beiden Zeiger behalten dabei allerdings ihre ursprüngliche Länge bei. Zu jedem Zeitpunkt bzw. bei jedem Ort der Welle behält der Zeiger eine Länge, so wird deutlich, dass sich die Energie einer fortschreitenden Welle nicht verändert. Aus diesem Grunde ist das Zeigerkonzept zur Darstellung elektromagnetischer Wellen besser geeignet als das Wellenmodell, zumal es sich auf Quantenobjekte ebenfalls problemlos anwenden lässt:

In der Quantenphysik wird der Ort, von dem die Wellen ausgehen, als Quelle der Quantenobjekte betrachtet. Um die Antreffwahrscheinlichkeiten der Quantenobjekte an einem Ort bzw. auf einem Schirm zu berechnen, werden alle möglichen Wege, die das Quantenobjekt genommen haben könnte, beachtet - nicht wie in der klassischen Physik, bei der nur die tatsächlichen Wege betrachtet werden. Jedem möglichen Weg wird dann ein Zeiger zugeordnet, diese stellen die Wahrscheinlichkeitsamplitude Ψ dar. Das Betragsquadrat der Summe aller Zeiger ist also $|\Psi_{\text{res}}|^2$, die Antreffwahrscheinlichkeit für ein Quantenobjekt.

2.5 Quantenverschränkung

Sogenannte „nichtlokale Theorien“ sind ein weiterer Punkt, bei dem sich die Quantenphysik deutlich von der klassischen Physik absetzt. In der klassischen Physik spricht man von „Nahwirkungen“- eine Ursache erzeugt eine Wirkung, und diese tritt nach einer endlichen Geschwindigkeit, und sei es Lichtgeschwindigkeit, ein. Bei den „nichtlokalen Theorien“ hat eine Ursache eine augenblickliche Wirkung auf ein Objekt, unabhängig von der Quelle der Ursache und dem Ort des Objektes. Dies beschreibt die Theorie der Verschränkung.

Allbekannt ist die Tatsache, dass Einstein sich nicht mit der Konsequenzen der Quantenphysik abfinden konnte - daher zusammen mit Podolsky und Rosen ein Experiment machte, worauf heute das EPR-Paradoxon beruht. Darin wird ein Atom angeregt, das durch Abstrahlung von zwei Photonen α und β in den Grundzustand übergeht. Die Impulse dieser Photonen zeigen in gegensätzliche Richtungen, zusätzlich wird jeweils ein Polfilter in die „Wege „ der Photonen gebracht. Mit den Polfiltern erfolgt die Messung, zudem ist im weiteren Wellenzug jeweils ein Detektor zu finden. Beobachtet wurde dabei, dass häufig eine Gleichzeitigkeit der Nachweise – Korrelation - gegeben war, wenn die Einstellung der Polfilter dieselbe war. Standen die Filter senkrecht zueinander, nur sehr selten. Dies bedeutet, dass die Messung des einen Photons die Eigenschaften des Photons auf der anderen Seite beeinflusst.

Über weitere Überlegungen kam man dann schließlich zu dem Schluss, dass Photonen nur durch eine nichtlokale Theorie beschrieben werden können. In der Quantenphysik wird eine solche Theorie durch vielfältige Experimente beschrieben.

Bezogen auf die Interferometer ist nun abzuwägen, ob bei der bisher genannten Strahlteilung im Photonenbild zwei Photonen entstehen, die miteinander verschränkt sind. Diese Verschränkung führt letztlich zu dem für Quantenobjekte typischen Interferenzbild. Durch eine Messung – die zwei Polfilter -

wird diese Verschränkung aufgehoben, es findet eine Dekohärenz statt.

3 Interferometer

3.1 Interferometrie durch Beugung

Bei der Interferometrie durch Beugung erzeugt man die verschiedenen Lichtwege durch Beugung. Ein Lichtbündel wird also in zwei oder mehr aufgespalten, wodurch mehrere kohärente Lichtquellen entstehen, die miteinander interferieren können.

3.1.1 Interferenz an regelmäßigen Strukturen

Bsp. Beugung am Doppelspalt:

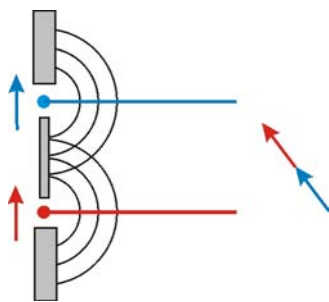


Abb. 1 Zeigerdarstellung am Doppelspalt, Hauptmaximum

Bei der Beugung am Doppelspalt wird ein Lichtstrahl durch einen Doppelspalt geschickt. Da der Spalt ebenso wie der Lichtstrahl selber nur sehr klein ist, treffen die Lichtstrahlen hinter dem Doppelspalt infolge von Beugung aufeinander und interferieren.

Das Interferenzbild beim Doppelspalt zeigt regelmäßige Streifen symmetrisch neben dem Hauptmaximum 0. Ordnung, die mit zunehmendem Abstand rasch schwächer werden.

Durch die zwei Spalte entstehen zwei Teilstrahlen, von beiden Spalten aus werden die Teilbündel gebeugt. Da der Abstand vom Doppelspalt zum Schirm weitaus größer ist als der Spaltmittenabstand, also $e \ll d$, kann man die Strahlen nahezu als parallel zueinander betrachten.

Helle Streifen entstehen durch konstruktive Interferenz (s. Formel (2)), im Zeigerbild addieren sich die Zeiger der beiden Lichtwege, da sie gleichgerichtet sind. Die dunklen Streifen entstehen durch destruktive Interferenz (s. Formel (1)), die Zeiger stehen in entgegengesetzten Richtungen, es findet daher eine Auslöschung statt. Bilden die Zeiger zueinander einen Winkel $0^\circ < \varphi < 180^\circ$, ist die gegenseitige Auslöschung umso ausgeprägter, je weiter sich die Phasendifferenz 180° nähert.

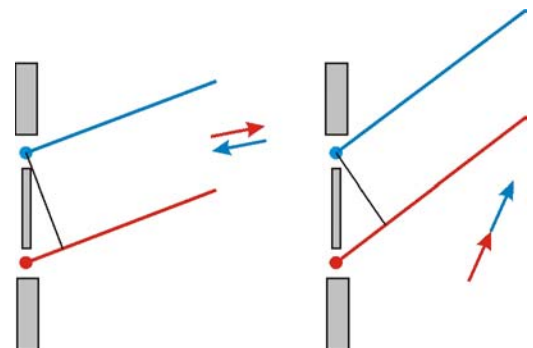


Abb.2 Zeigerdarstellung am Doppelspalt, destruktive und konstruktive Interferenz.

3.1.2 Interferenz an einfachen Objekten

Bsp. Beugung am Spalt:

Beugung am Spalt ist nahezu dieselbe Versuchsanordnung wie bei der Interferenz am Doppelspalt mit dem Unterschied, dass das Licht nur an einem Spalt gebeugt wird. Bei dieser Versuchsanordnung ist als Interferenzbild ein besonders heller Streifen, das Hauptmaximum, zu sehen, daneben schmalere Nebenmaxima.

Die Welle eines Lichtstrahls fällt auf einen Einfachspalt. In der Spaltebene entstehen viele einzelne Punkte, von an allen diesen Punkten gehen phasengleiche, kugelförmige Wellen aus.

Betrachtet man nun die Wellenzüge, die den Spalt senkrecht, also im 0° Winkel dazu verlassen, dann wird deutlich, dass diese Wellenzüge keine Gangunterschiede aufweisen und daher eine konstruktive Interferenz stattfindet. In der Zeigerdarstellung würden alle Zeiger in dieselbe Richtung zeigen und es findet keine Auslöschung statt.

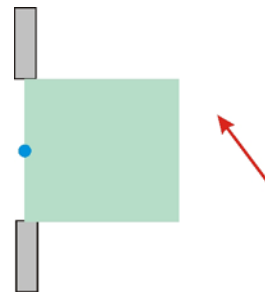


Abb.3 Einfachspalt, Hauptmaximum

Das Minimum 1. Ordnung entsteht, wenn die beiden Randstrahlen des Parallelbündels einen Gangunterschied von $k \cdot \lambda$ aufweisen.

Das Minimum k.- Ordnung entsteht dann, wenn $\Delta s = k \cdot \lambda$ für $2 \cdot k$ Teilbündel des Lichtstrahls

Die Resthelligkeiten entstehen, wenn der Gangunterschied der Randstrahlen ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge ist. Dann lässt sich nämlich das gesamte Bündel in eine ungerade Anzahl von gleich breiten Teilbündeln, von denen sich immer zwei aufheben und der übriggebliebene Teilstrahl die Helligkeit verursacht. Im Zeigerbild bedeutet das also, dass sich nicht alle Zeiger aufheben, sondern zu einem resultierenden Zeiger zusammensetzen.

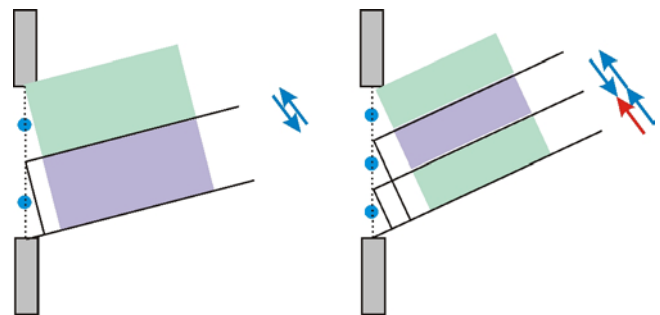


Abb.4 Einfachspalt, destruktive und konstruktive Interferenz

3.2 Interferometrie durch unterschiedliche Lichtwege

In diesen Fällen erzeugt man die unterschiedlichen Lichtwege durch Reflexion, wobei man je nach Anordnung mehrere kohärente Lichtquellen erhält, deren Wellen man miteinander interferieren lassen kann.

3.2.1 Michelson-Interferometer

Bei dem Michelson-Interferometer wird das Lichtbündel einer Quelle am sogenannten Strahlteiler, hier dem halbdurchlässigen Spiegel, in zwei Teilbündel aufgespalten.

Bei einem idealen halbdurchlässigen Spiegel werden 50 % der Strahlen reflektiert und 50 % werden

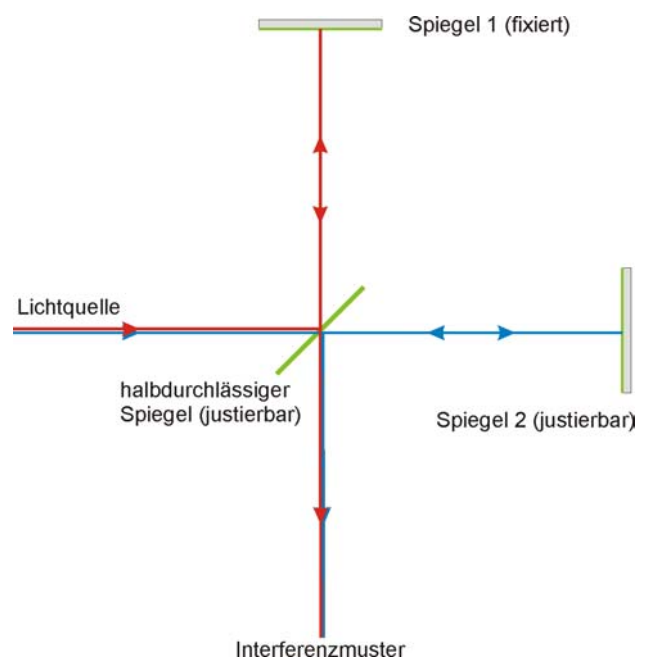


Abb.5 Michelson-Interferometer

transmittiert. Im Unterschied zum halbdurchlässigen Spiegel werden beim Vollspiegel im idealen Fall 100% reflektiert und bei Glas 100% transmittiert. In dieser Versuchsanordnung wurde an den Enden der beiden Lichtwege je ein Oberflächen-Vollspiegel benutzt, damit möglichst wenige zusätzliche Reflexionen an dünnen Schichten auftreten.

Ein Teil des auf den halbdurchlässigen Spiegels treffenden Lichtes wird transmittiert, der andere Teil wird um 90° dazu reflektiert. Beide Strahlbündel werden von Spiegeln reflektiert und treffen am halbdurchlässigen Spiegel wieder aufeinander, wo sie erneut reflektiert bzw. transmittiert werden. Die beiden in Richtung des Schirmes verlaufenden Bündel können nun auf dem Schirm ein Interferenzmuster erzeugen.

3.2.2 Mach-Zehnder- Interferometer

Bei einem Mach- Zehnder Interferometer wird die einlaufende Welle ebenfalls durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilbündel aufgespalten. Die Teilstrahlen werden jeweils durch Vollspiegel um 90° reflektiert, sodass sie aufeinander zulaufen. An dem Ort, an dem die Teilstrahlen wieder

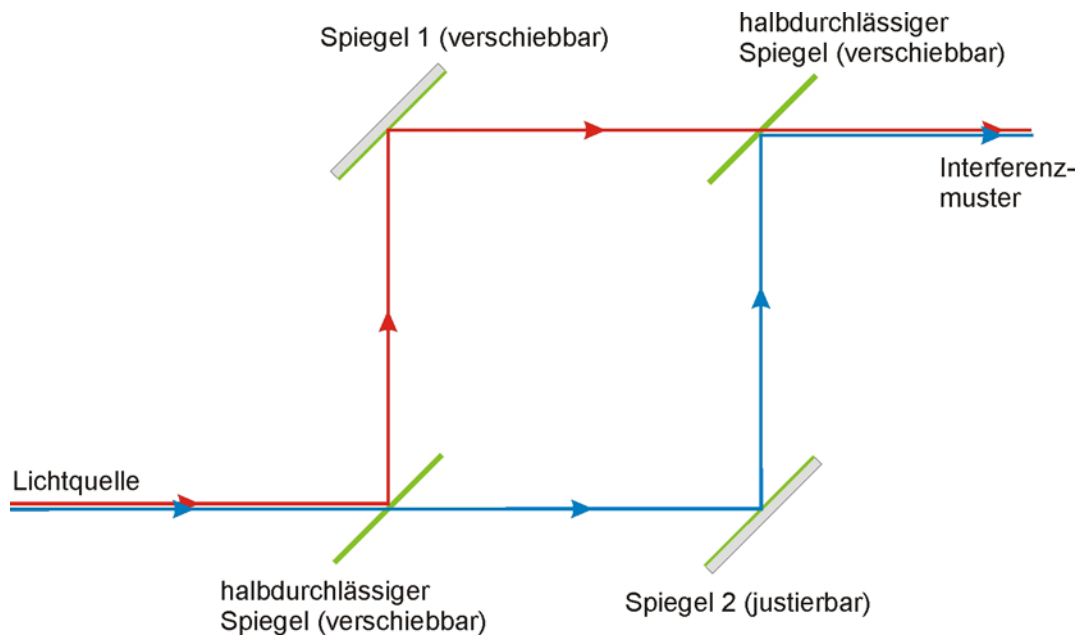


Abb.6 Mach-Zehnder-Interferometer

aufeinander treffen, steht ein weiterer halbdurchlässiger Spiegel, an diesem wird der eine Teilstrahl transmittiert, der andere reflektiert.

So entstehen zwei Teilstrahlen, die die Interferenzbedingungen erfüllen und ein Interferenzmuster erzeugen können.

3.2.3 Fabry- Pérot- Interferometer (Vielstrahlinterferenz):

Das Fabry- Pérot- Interferometer besteht aus zwei planparallelen Platten, die sowohl Transmission als auch Reflektion verursachen.

Ein leicht geneigt einfallender Lichtstrahl wird also einerseits transmittiert (blau) und andererseits reflektiert (rot). Diese Reflektion

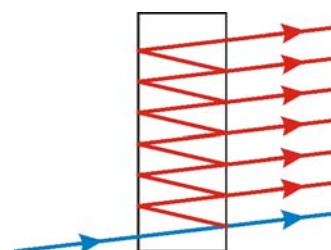


Abb.7 Fabry- Pérot- Interferometer

wiederum wird ebenfalls reflektiert oder transmittiert. So kommt es zu einer Bildung von vielen Strahlen, die zueinander kohärent, also interferieren können. Infolge der Transmission überlagern sich die einzelnen Teilbündel außerhalb der eigentlichen Versuchsanordnung und es findet Interferenz statt.

3.3 Interferenz an dünnen Schichten

Fällt ein Lichtstrahl auf eine planparallele Platte, so wird er dort sowohl reflektiert als auch gebrochen. Die gebrochene Welle wird an der Rückseite der Platte wieder reflektiert und dann von der Vorderseite der Platte erneut reflektiert bzw. gebrochen. Dadurch kommt es zu mehreren Teilstrahlen die miteinander interferieren.

Das bedeutet, dass es für das Licht zwei Wege gibt, zu einem Punkt P zu gelangen. Ein Teil wird an der Vorderseite der Platte reflektiert, der andere an der Rückseite und tritt anschließend durch die Vorderseite wieder aus.

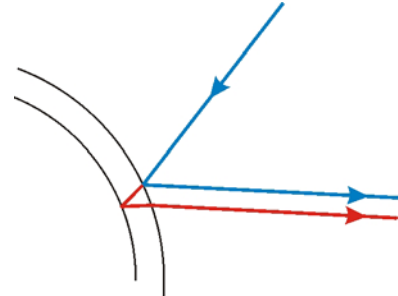


Abb.8 Interferenz an der Oberfläche einer Seifenblase

Ein häufig angeführtes Beispiel dazu sind die Newtonschen Ringe. Hier geht man von einer äußerst flachen Linse auf einer Planplatte aus. Das Licht wird in dem Luftspalt zwischen der Linse und der Unterplatte in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Die Orte gleicher Spaltdicke erzeugen im Interferenzbild konzentrische Kreise mit dem Berührungspunkt von Linse und Platte als Mittelpunkt.

Ein weiteres Beispiel dafür sind die bunten Farben auf einer Seifenblase, bei der die verschiedenen Oberflächen durch die Innen- bzw. Außenseite der Blase dargestellt werden.

3.4 Fresnelscher Spiegelversuch:

Das Besondere an dem Fresnelschen Spiegelversuch ist die Tatsache, dass aus ursprünglich einer Lichtquelle letztendlich zwei virtuelle Lichtbündel gemacht werden.

Licht fällt auf zwei ebene Spiegel, die fast einen Winkel von 180° zueinander bilden. Durch die Spiegelung entstehen zwei Teilstrahlen, die kohärent sind. Dort wo sich die reflektierten Teilstrahlen überlagern kommt es zu einem Interferenzbild.

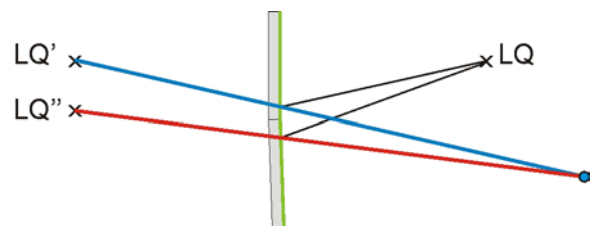


Abb.9 Fresnelscher Spiegelversuch

4 Welle- Teilchen- Dualismus

Nach dem Welle- Teilchen- Dualismus verhalten sich Quantenobjekte je nach Versuchsaufbau wie eine Welle oder ein Teilchen. Typische Nachweisaufbauten sind die Elektronenbeugungsröhre (Wellencharakter) und der Nachweis des Photoeffektes (Teilchencharakter).

4.1 Komplementarität

Niels Bohr formulierte die sogenannte Komplementarität, die aussagt, dass sich in einem Experiment

komplementäre Größen wie zum Beispiel Ort und Impuls ausschließen.

Nach dem Komplementaritätsprinzip, einem Begriff aus der Quantenphysik, zeigt ein Quantenobjekt in einem Versuchsaufbau nicht gleichzeitig Welle- und Teilchencharakter.

4.2 Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung wurde ursprünglich von dem Physiker Max Born formuliert und dann später von Bohr und Heisenberg weiterentwickelt.

Die Deutung befasst sich mit der Frage welche Eigenschaften einem Quantenobjekt zugeschrieben werden kann. Nach der Kopenhagener Deutung besitzt ein Quantensystem nur im Zusammenhang mit einer Messapparatur, die eine bestimmte Eigenschaft begünstigt, eine reale physikalische Eigenschaft.

Die Kernaussage der Kopenhagener Deutung ist genauer gesagt die Beziehung zwischen Wellenfunktion und Messprozess.

Vor der Messung befinden sich die Quantenobjekte an allen möglichen Orten, das Teilchen befindet sich also in Superposition.

Im Moment der Messung würde das Quantenobjekt dann an einen bestimmten Ort nachgewiesen werden

Bsp.: Die Fotoemulsion: Schwärzung eines Fotofilms nach dem Auftreffen eines Photons.

Danach würde die Wellenfunktion, die das Teilchen beschreibt „kollabieren“. Das Messergebnis hätte also zur Konsequenz, dass an allen anderen Orten die Welle auf Null zusammenfallen müsste, denn dort darf kein Teilchen mehr nachgewiesen werden.

4.3 Dekohärenz

Nach der Theorie der Dekohärenz kollabiert die Wellenfunktion nicht erst im Moment der Messung, sondern durch ständig andauernde Wechselwirkungen des Systems mit der Umgebung. Die Umgebung besitzt viele Freiheitsgrade, man spricht von einer Größenordnung von 10^{26} . Je größer ein System also ist, desto mehr Freiheitsgrade gibt es, daher findet sich auch keine Interferenz außerhalb der Quantenobjekte, also der kleinsten Teilchen. Denn z.B. ein LKW ist schlicht und einfach zu groß.

Aus der Kohärenz wird also nach der Dekohärenz ein nach der klassischen Physik eindeutig bestimmbarer Zustand.

Die Dekohärenztheorie befindet sich somit im Gegensatz zur Kopenhagener Deutung, wo ein System in sich geschlossen ist und während des Prozesses keinerlei Wechselwirkungen erfährt.

Zur Verdeutlichung ist hier noch mal die Ψ -Funktion für ein Atom im Überlagerungszustand wäre bei Benennung der Lichtwege in 1 und 2:

$$\Psi^{\text{Atom}} = \Psi_1(x) + \Psi_2(x) \quad (4)$$

Beim Ausmultiplizieren des Betragsquadrats erhält man einen Interferenzterm, der das folgende Produkt enthält:

$$\Psi_1(x) \cdot \Psi_2(x) \quad (5)$$

Aus diesem Term wird deutlich, dass sich das Atom in einem Überlagerungszustand befindet.

Nun geht man aber davon aus, dass ein Atom Wechselwirkungen mit anderen Objekten erfährt. Die

Ψ -Funktion für ein Atom und ein mögliches Streuobjekt ist

$$\Psi^{\text{Atom, streu}} = \Psi_1^{\text{atom}}(x) \cdot \Psi_1^{\text{streu}} + \Psi_2(x) \cdot \Psi_1^{\text{streu}} \quad (6)$$

Im Interferenzterm treten dann für Atom und Streuobjekt die verschiedenen Möglichkeiten, die auftreten können, als Produkte auf:

$$\Psi_1^{\text{atom}}(x) \cdot \Psi_1^{\text{streu}} \cdot \Psi_2(x) \cdot \Psi_1^{\text{streu}} \quad (7)$$

Dieser Interferenzterm muss in der Realität um die Freiheitsgerade der Umgebung ersetzt werden, sodass also mehr Produkte in dem Term auftreten. Wenn aber nun von den vielen Produkten, also $\Psi_t^{\text{Atom}}(x) \cdot \Psi_t^{\text{streu}}$ eines Null ist, dann wird automatisch der gesamte Interferenzterm Null, womit die Interferenzerscheinungen ausgelöscht sind.

Damit bietet die Dekohärenztheorie eine Erklärung dafür an, wieso kein Interferenzbild zu sehen ist, wenn die Welcher-Weg-Information gegeben ist. Der Dekohärenzterm ist:

$$|\Psi_1(x) + \Psi_2(x)|^2 = |\Psi_1(x)|^2 + |\Psi_2(x)|^2 + \underbrace{2 \operatorname{Re} [\Psi_1(x) \cdot \Psi_2(x)]}_{\text{Fällt weg, da Quantenobjekt eines der Wege genommen hat, damit wird die andere Wegmöglichkeit =0}} \quad (8)$$

Da $|\Psi_1(x) + \Psi_2(x)|^2 = 1$ ist, muss ein Quantenobjekt den Weg 1 oder 2 gewählt hat. Gleichzeitig fällt aber das Interferenzbild weg.

4.4 Laser

LASER ist eine Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“.

Ich habe in meinen Aufbauten mit einem Halbleiterlaser gearbeitet. Im Folgenden werde ich die Funktionsweise des Helium- Neon- Lasers erklären, da dies anschaulicher als beim Halbleiterlaser, jedoch prinzipiell vergleichbar ist.

In einem Glasrohr befindet sich ein Helium-Neon-Gasgemisch.

Die Helium-Atome werden durch beschleunigte Elektronen angeregt und gehen dann in einen metastabilen Zustand ($E_{2,\text{He}}$). Die angeregten He- Atome stoßen an die Ne- Atome an und übertragen dabei Energie. Die Elektronen der Ne- Atome gehen dann ebenfalls in ein höheres, metastabiles Energieniveau ($E_{3,\text{Ne}}$), während das Helium- Atom auf den Grundzustand zurückfällt ($E_{1,\text{He}}$). Nun gibt es mehr Ne-Atome, die sich in einem angeregten Zustand $E_{3,\text{Ne}}$ befinden, als welche, die sich im Zustand $E_{2,\text{Ne}}$ befinden- man spricht von der sogenannten „Besetzungsinversion“

Bei einer Besetzungsinversion ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon emittiert wird größer. Das angeregte Neon-Gas emittiert also beim Übergang von $E_{3,\text{Ne}}$ auf $E_{2,\text{Ne}}$ das rote Laserlicht mit der Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$ aus. Photonen, die durch spontane Emission entstehen, regen weitere Neon-Atome dazu an in den Grundzustand überzugehen und dadurch Photonen zu emittieren. Dieser Vorgang wird als stimulierte Emission bezeichnet.

Man geht davon aus, dass die stochastische Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon emittiert wurde im gesamten Glasrohr gleich ist.

Die Photonen verteilen sich nach ihrer Emission isotrop in dem Glasrohr und geraten dabei an die Spiegel, die an der Vorder- und Rückseite des Glasrohres angebracht sind. Dadurch werden sie zurück in das

Helium- Neon- Gasmischung reflektiert und die Strahlung durch weitere stimulierte Emission verstärkt. Durch die ständige Reflexion und Verstärkung kommt es in dem Laserresonator zu Wellenzügen. Ist nun der Abstand der Spiegel ein Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, so kommt es schließlich durch Überlagerung zu einer stehenden Welle mit ansteigender Amplitude, sodass mit noch höherer Wahrscheinlichkeit eine stimulierte Emission bewirkt wird.

Der Spiegel an der Vorderseite des Laserresonators reflektiert im optimalen Fall zu 99% und transmittiert zu einem Prozent, dieser eine Prozent, der durch den vorderen Spiegel transmittiert, ist der Laserstrahl.

In einem Halbleiterlaser ist der Resonator ein Festkörper, der sich aus dem Halbleitermaterial der Laserdiode bildet und bei dem die Besetzungsinversion von elektrischem Strom verursacht wird.

Einen Laser in Versuchsaufbauten für Interferenzen zu benutzen ist also vorteilhaft, da Laserlicht dadurch, dass es nur eine stehende Welle gibt, eine ausgesprochen große Kohärenzlänge hat, extrem monochromatisches Licht emittiert und zudem meist polarisiert ist.

Damit erfüllt der Laser einen Großteil der Bedingungen die für Interferenz gelten müssen.

5 Aufbau

5.1 Die Halbdurchlässigen Spiegel

Die halbdurchlässigen Spiegel wurden mit einer Dreipunkthalterung befestigt, bei der diese mit drei Magneten an drei Schrauben befestigt wird, die von einer Wand geführt werden. Dadurch ist es möglich den Spiegel in alle drei Raumrichtungen sehr fein zu verstellen.

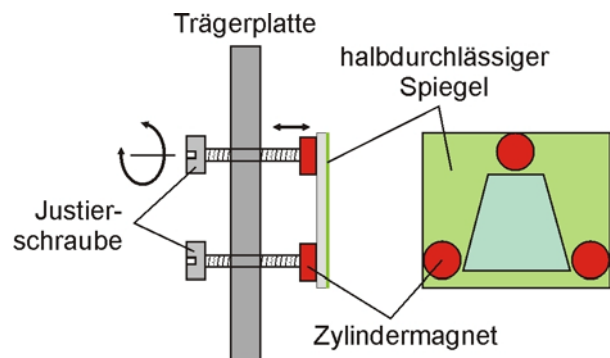


Abb.10 Montierung der halbdurchlässigen Spiegel

5.2 Das Michelson-Interferometer

Bei dem Aufbau des Michelson-Interferometers wurde der in dem Interferometer enthaltene rechte Winkel ausgenutzt. Die beiden Vollspiegel (grün) wurden auf einer rechtwinkligen Platte befestigt, dieses sollte die komplizierte Justierung des Interferometers vereinfachen.

Werden jetzt beim Michelson-Interferometer Polarisationsfilter eingeführt, so verschwindet das Interferenzmuster.

Dabei gilt es folgende Bedingungen zu beachten. Da der Laser selber polarisiertes Licht emittiert, dürfen die Polfilter nicht in dieselbe Richtung oder senkrecht zum Laser polarisieren. Die Polfilter selber sollten im 90° - Winkel zueinander stehen. Im optimalen Fall haben die Polfilter also jeweils einen 45° Winkel zu dem vom Laser ausgehenden polarisierten Licht.

Die Polfilter sollten denselben Winkel zu dem vom Laser emittierten Licht haben, damit eine möglichst gleiche Intensität sichergestellt ist. Desweiteren haben die Polfilter zueinander einen möglichst großen Winkelabstand, damit der Anteil des polarisierten Lichtes, das durch beide Filter durchgegangen sein könnte, möglichst gering gehalten wird.

Unter Beachtung dieser Bedingungen ist kein Interferenzbild zu sehen.

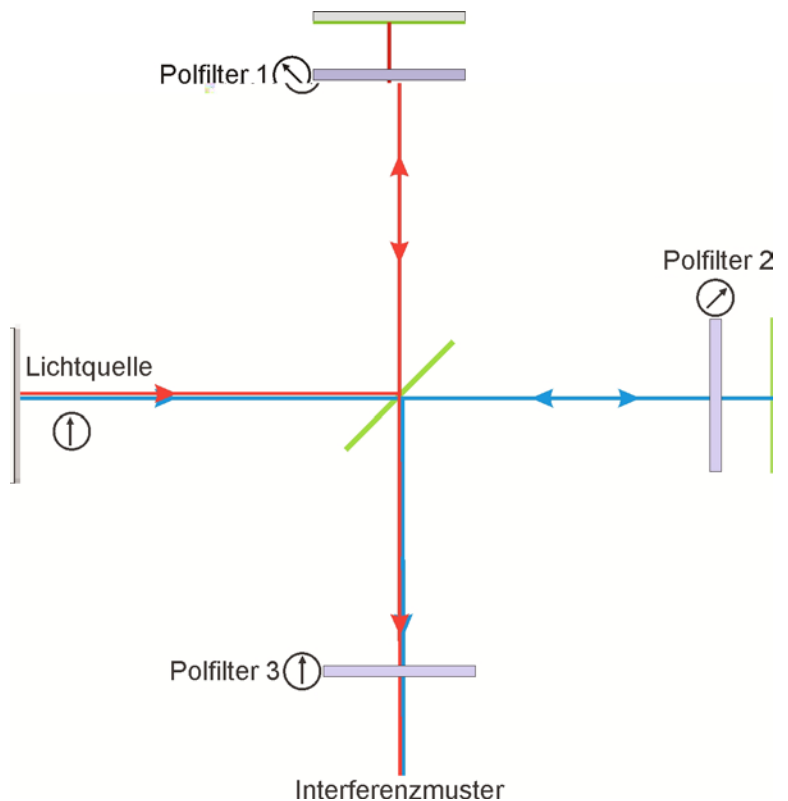


Abb.11 Michelson-Interferometer mit Polfiltern

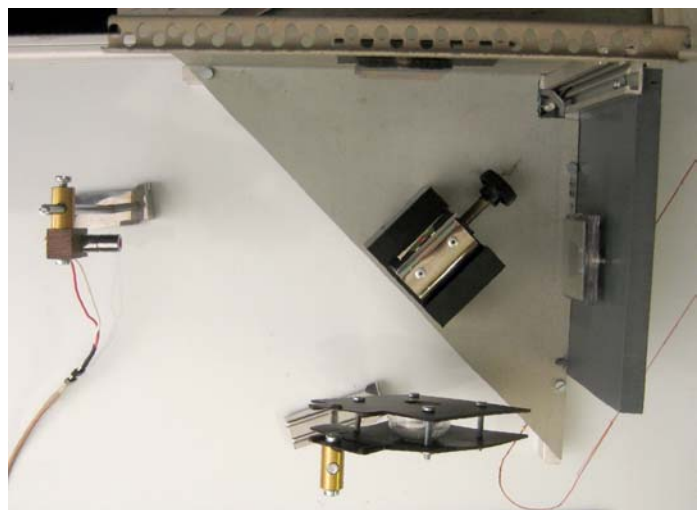


Abb.12 Aufbau Michelson-Interferometer

5.3 Das Mach-Zehnder-Interferometer

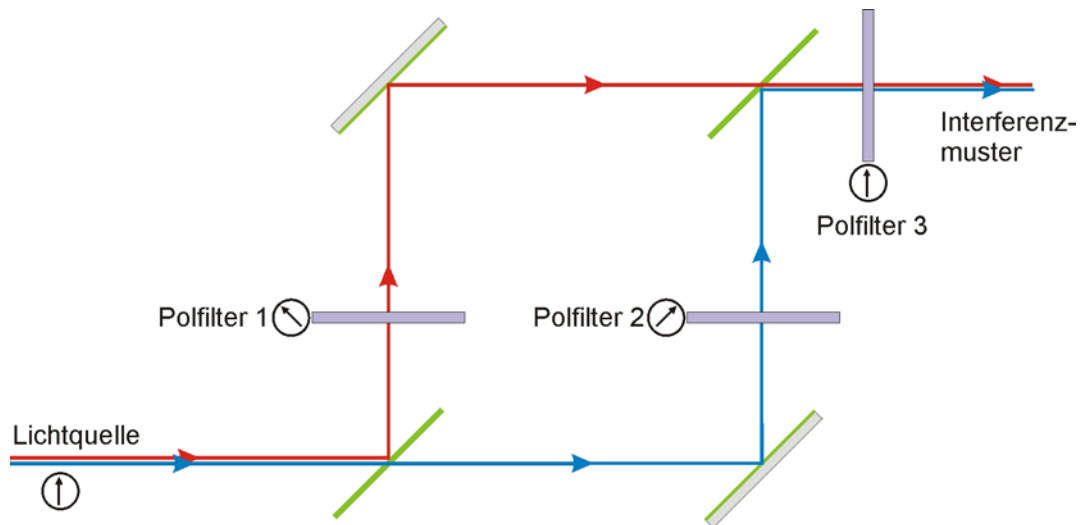


Abb.13 Mach-Zehnder-Interferometer mit Polfiltern

Bei dem Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers wurde zur Erleichterung die Symmetrie des Interferometers genutzt. Die beiden halbdurchlässigen Spiegel (grün) müssen einander genau gegenüberliegen, wurden also auf eine gemeinsame Schiene gebaut. Gleichzeitig sollte der Abstand von den beiden Vollspiegeln zu den halbdurchlässigen Spiegeln annähernd gleich sein. Alle drei Schienen sollten somit zueinander also möglichst denselben Abstand haben.

Hier ist ebenso wie bei dem Michelson-Interferometer zu sehen, dass keine Interferenz stattfindet, solange nur zwei Polfilter in dem Aufbau aufgestellt sind - unter Beachtung der Bedingungen, die auch schon bei dem Michelson-Interferometer aufgeführt worden sind. Beim Einbau des Analysators ist dann unter den entsprechenden Bedingungen ein Interferenzbild zu sehen.

Die beiden Interferometer zu bauen, hat insofern eine Bedeutung, weil die Polarisationsfilter unterschiedlich häufig durchlaufen werden. Außerdem konnte ich damit gleichzeitig sicherstellen, dass durch die Reflexion an den ebenen Spiegeln keine Änderung der Polarisationsrichtungen auftritt.

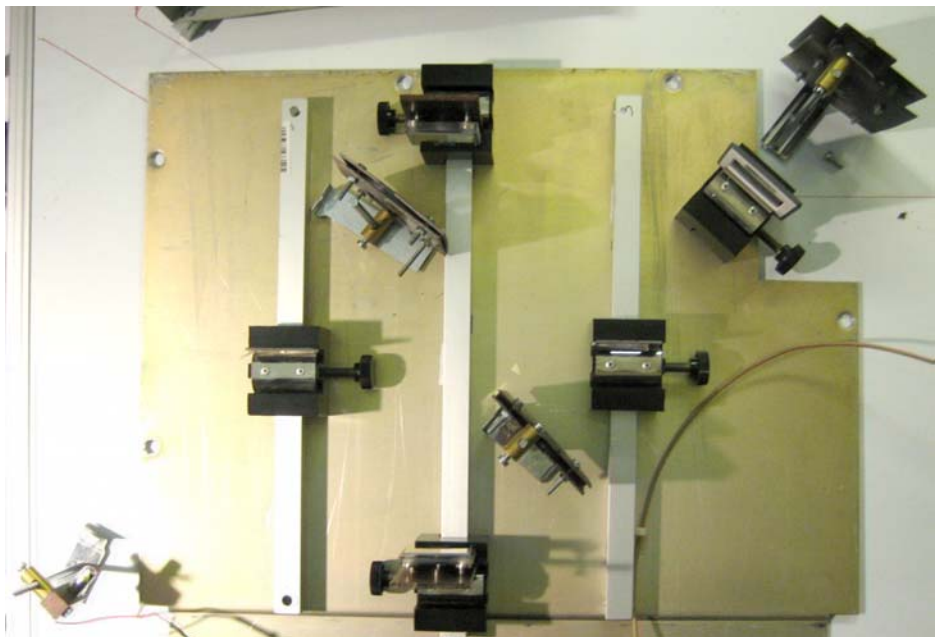


Abb.14 Aufbau Mach-Zehnder-Interferometers

6 Beobachtung/ Auswertung

Bei dem Mach- Zehnder- Interferometer wie bei dem Michelson- Interferometer sind ohne jegliche Polarisationsfilter Interferenzmuster auf dem Schirm zu sehen.

Stellt man jeweils einen Polarisationsfilter in die Lichtwege, dann verschwindet die Interferenz, wenn die Polfilter im 90° - Winkel zueinander polarisieren.

Die Polfilter müssen im 90° - Winkel zueinander polarisieren, damit mit völliger Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass ein Photon nur durch einen der beiden Polfilter gegangen sein kann. Wenn also Polfilter in den Lichtwegen stehen, dann ist keine Interferenz vorhanden, obwohl im ansonsten unveränderten Versuchsaufbau auf beiden Lichtwegen nach wie vor eine Lichtintensität nachweisbar ist. Dadurch, dass die jeweiligen Lichtwege nun unterschiedlich polarisiert sind, könnte man - und diese Tatsache alleine reicht - auf dem Schirm feststellen welchen Weg der Strahl genommen hat. Nach der Komplementarität von Quantenobjekten findet daher keine Interferenz mehr statt. Dabei ist es unwichtig, ob man tatsächlich eine Messung durchführt. Es muss nur zu dem Zeitpunkt bei dem sie auf dem Schirm auftreten theoretisch möglich sein festzustellen welche klassisch denkbare „Wegmöglichkeit“ das Quantenobjekt, hier als das Photon genommen hat.

Die Messung an einem Interferometer bedeutet den Versuch so auszurichten, dass man zumindest wissen könnte, welchen Weg ein Quantenobjekt genommen hat.

Jegliche Messung in der Quantenphysik kann durch z.B. Wechselwirkung mit Licht, Wärmestrahlung etc. eine Dekohärenz bewirken.

Durch die Dekohärenz einer Messung sind die einzelnen Wahrscheinlichkeitspakete nicht mehr verschränkt und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon durch den durch die Messung bestimmten Weg geht ist gleich 1.

Damit gibt es sowohl nach dem Komplementaritätsprinzips keine Interferenz, da die Wellenfunktion kollabiert, aber auch nach der Dekohärenztheorie verschwindet der Interferenzterm.

Besitzt nun der dritte Polarisationsfilter, der sogenannte Analysator, nicht denselben Polarisationswinkel wie einer der vorausgegangenen Polarisationsfilter, so ist wieder ein Interferenzbild zu beobachten.

Für jedes Quant ist die Wahrscheinlichkeit durch einen der beiden Wege gegangen zu sein gleich 0,5, wenn der Analysator im 45° - Grad Winkel zwischen den beiden

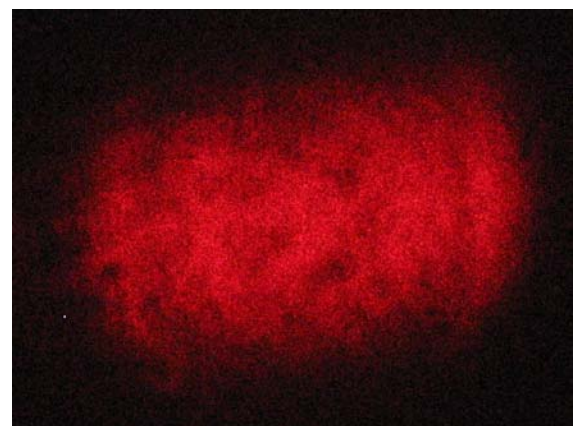


Abb.15 Schirmabbildung ohne Interferenzbild

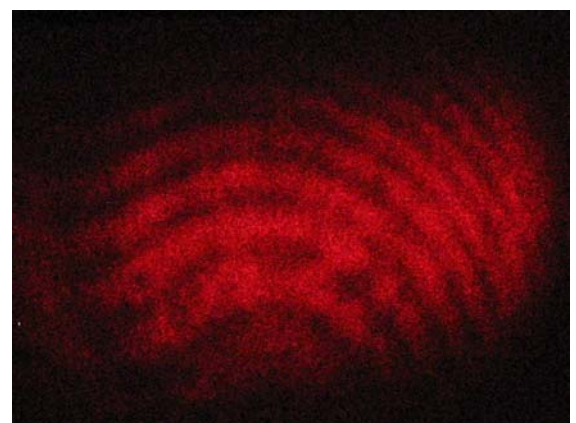


Abb.16 Schirmabbildung mit Interferenzbild

anderen Polfiltern steht. Dann ist die Welcher- Weg- Information nicht mehr gegeben und ein Interferenzbild entsteht.

Eine weitere Argumentation zur Erklärung, warum das Interferenzmuster ausgelöscht ist, wenn die WW-Information gegeben ist, wird im Zusammenhang mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation geführt.

Der Nachweis des Weges sei mit einem Impulsübertrag verbunden, der zu einer Auslöschung der Interferenzerscheinung führe, da er das Bild „verwische“.

Das Komplementaritätsprinzip, welches aussagt, dass man je nach Versuch entweder Teilchen- oder Wellencharakter hat, würde also immer im Zusammenhang mit der Unbestimmtheitsrelation betrachtet werden.

Dazu machten Scully, Englert und Walther 1991 ein Gedankenexperiment bei dem die „Welcher- Weg- Information“ mit besonders kleinen Impulsüberträgen erhalten werden könne.

Das Interferenzmuster bliebe erhalten, denn die Impulsüberträge seien zu klein um es „verschmieren“ zu können. Daraufhin kamen die Physiker zu dem Schluss, dass ein Experiment, bei dem die reine „Welcher- Weg- Information“ das Interferenzmuster ausschließt, zeigen könnte, dass das Komplementaritätsprinzip unabhängig von der Unbestimmtheitsrelation sei.

Ein solches Experiment gelang Rempe und Mitarbeitern in 1998 tatsächlich bei dem die alleinige WW-Information ausreichte um das Interferenzmuster auszublenden.

Folglich ist das Komplementaritätsprinzip als eigenständiges Prinzip in der Quantenphysik zu betrachten und somit wird der Erklärungsansatz über die Unbestimmtheitsrelation hinfällig.

(„Die Wesenszüge der Quantenphysik“, S. 117)

7 Verbesserungsvorschläge

Die Apparaturen sind sehr anfällig für Störungen. Da Licht eine Wellenlänge im Nanometerbereich hat, sind mögliche Störungen nur schwerlich zum Umgehen, machen sich doch auch schon Schallwellen bemerkbar.

Doch die Anzahl der Störungen könnten minimiert werden, indem die Apparaturen auf festen Stativen fixiert würden.

Das Stativ für den halbdurchlässigen Spiegel bei dem Michelson-Interferometer ist bis jetzt in keinsten Weise befestigt, dies erschwert das Justieren der Spiegel und Polarisationsfilter zusätzlich.

8 Fazit

In der ursprünglich so undurchsichtigen Quantenphysik haben die Naturwissenschaften schon große Fortschritte gemacht, sei es das eigentümliche Verhalten der Quantenobjekte für leistungsstärkere Computer zu nutzen. Doch immer noch birgt das Verhalten von Quanten viele Geheimnisse und viel Unerklärliches. Nicht umsonst sagte Feynman, einer der Väter der Quantentheorie: „Wer behauptet, die Quantenphysik verstanden zu haben, der hat sie nicht verstanden.“

