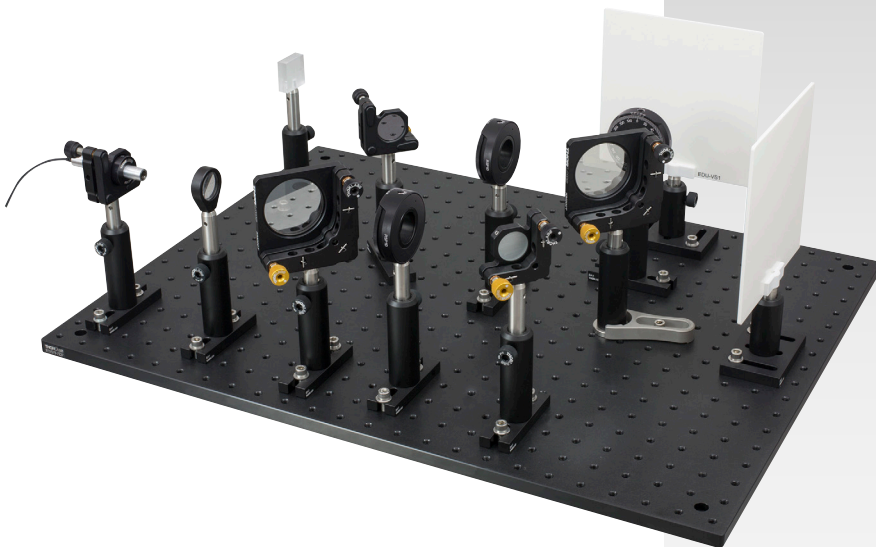


EDU-QE1
EDU-QE1/M
Quantenradierer

Handbuch


















Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Warnsymbole	1
Kapitel 2	Sicherheitshinweise	2
Kapitel 3	Kurzbeschreibung und Grundgedanken.....	3
Kapitel 4	Aufbau und Justierung	5
4.1	<i>Übersicht über die Einzelkomponenten</i>	5
4.2	<i>Zusammenbau der Komponenten</i>	8
4.3	<i>Aufbau und Justierung</i>	15
4.3.1	Laseraufbau	15
4.3.2	Spiegel und Strahlteiler.....	15
4.3.3	Beobachtungsschirme und Ausrichtung.....	17
4.4	<i>Aufbau.....</i>	20
4.4.1	Komplementäre Interferenzmuster und Phasensprünge	20
4.4.2	Ringstruktur.....	21
Kapitel 5	Experimentieranleitung.....	23
5.1	<i>Experiment 1: Welcher-Weg Information in der Quantenphysik</i>	23
5.2	<i>Experiment 2: Quantenradierer.....</i>	25
5.3	<i>Experiment 3: Gedankenexperiment</i>	26
Kapitel 6	Didaktische Kommentare.....	28
Kapitel 7	Problembehandlung	30
Kapitel 8	Weitere Ideen.....	31
Kapitel 9	Bestimmungen.....	32
Kapitel 10	Thorlabs weltweit.....	33

Kapitel 1 Warnsymbole

Die hier aufgeführten Warnsymbole finden sie eventuell in diesem Handbuch oder auf dem Produkt.

Symbol	Beschreibung
	Gleichstrom
	Wechselstrom
	Gleich- und Wechselstrom
	Erdungsanschluss
	Schutzleiteranschluss
	Chassisanschluss
	Potenzialgleichheit
	An (Versorgung)
	Aus (Versorgung)
	Ein-Position
	Aus-Position
	Vorsicht: Risiko eines elektrischen Schlages
	Vorsicht: Heiße Oberfläche
	Vorsicht: Gefahr
	Warnung: Laserstrahlung

Kapitel 2 Sicherheitshinweise



ACHTUNG



WICHTIG: Die Polarisatorfolien sind auf jeder Seite mit durchsichtigen Schutzfolien beklebt. Es empfiehlt sich dringend, beim Zusammenbau der Polarisatoren Handschuhe zu tragen, damit nicht mit blanken Fingern auf die Folie gefasst wird. Weiterhin sollte vermieden werden, die Polarisatoren längere Zeit mit UV-Licht zu bestrahlen, oder sie hohen Temperaturen und Chemikalien wie Aceton auszusetzen. Es sollte darauf geachtet werden, dass alle drei Polarisatoren so montiert werden, dass sie parallel sind.



WARNUNG



Das Lasermodul ist ein Klasse 2 Laser, der keine speziellen Schutzbrillen erfordert. Um Verletzungen zu vermeiden, sollte jedoch nicht direkt in den Strahl geblickt werden.

Kapitel 3 Kurzbeschreibung und Grundgedanken

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 Polarisierungsebenen 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.

Fügt man zwischen dem zweiten Strahlteiler und dem 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 dieselbe Polarisierung. Da nun die Weginformation wieder verloren ist, also „ausradiert“ wurde, ist wieder ein Interferenzmuster auf dem Schirm zu sehen.

Statt wie der ideale Quantenradierer einzelne Photonen zu verwenden, wird in diesem Aufbau ein kontinuierlicher Laser eingesetzt, der für das Auge sichtbar ist. Obwohl das Experiment vollständig durch klassische Physik beschreibbar ist, bietet es eine sehr gute Analogie zum Einzelphoton-Quantenradierer.

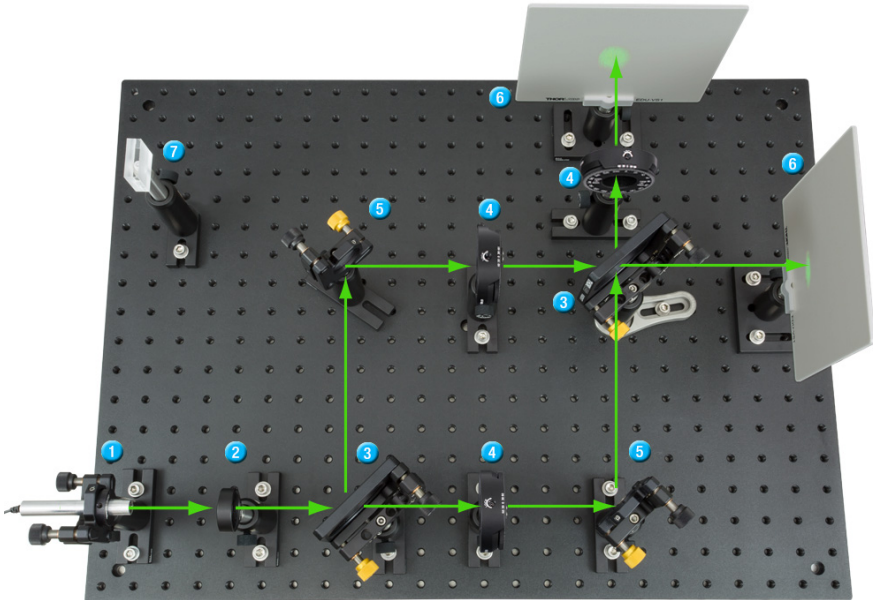


Abbildung 1: Mach-Zehnder Interferometer Aufbau mit (1) Laser, (2) Linse, (3) Strahlteiler, (4) Polarisator, (5) Spiegel und (6) Beobachtungsschirm

Kapitel 4 Aufbau und Justierung







4.1 Übersicht über die Einzelkomponenten

Für das metrische Versuchspaket gelten zum Teil andere Artikelnummern als für das zöllische Paket. Wenn die Nummern unterschiedlich sind, dann bezeichnet das „(M)“ die metrische Komponente. Die Größenangaben in Klammern beziehen sich ebenfalls auf die metrischen Teile.

 <p>1 x CPS532-C2¹ 532 nm Laserdiodenmodul</p>	 <p>1 x LDS5(-EC) 5 VDC Spannungsquelle</p>	 <p>1 x AD11NT Ø2" (50.8 mm) Adapter für Ø11 mm Komponenten</p>
 <p>1 x LB1901 Ø1" Linse, f = 75 mm</p>	 <p>1 x LMR1(M) Ø1" Linsen-Mount</p>	 <p>2 x EBS2 Ø2" 50:50 Strahlteiler</p>
 <p>2 x KM200T Ø2" Strahlteilerhalter</p>	 <p>1 x LPVISE2X2 (Gestanz in 3 Ø1" Kreise) Lineare Polarisatoren</p>	 <p>3 x RSP1D(M) Ø1" Drehbarer Polarisatorhalter</p>

¹ Das CPS532-C2 ist die Klasse 2 – Ausführung unseres Klasse 3 Laserdiodenmoduls CPS532.


 <p>2 x ME1-G01 Ø1" Aluminium Spiegel</p>	 <p>3 x KM100 Kinematischer Halter, Ø1"</p>	 <p>2 x EDU-VS1(/M) Beobachtungsschirm</p>
 <p>10 x TR3 (TR75/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Post, 3" (75 mm) lang</p>	 <p>9 x PH3 (PH75/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Post- Halter, 3" (75 mm) lang</p>	 <p>2 x TR2 (TR50/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Post, 2" (50 mm) lang, für Beobachtungsschirme</p>
 <p>2 x PH2 (PH50/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Post- Halter, 2" (50 mm) lang, für Beobachtungsschirme</p>	 <p>8 x BA1(/M) Base, 1" x 3" x 3/8" (25 mm x 58 mm x 10 mm)</p>	 <p>2 x BA2(/M) Base, 2" x 3" x 3/8" (50 mm x 75 mm x 10 mm)</p>
 <p>1 x PH3E (PH75E/M) Ø1/2" Post-Halter mit Standfuß, 80.9 mm lang</p>	 <p>1 x CF125 Klemme</p>	 <p>1 x BA1S(/M) Kleine Base, 1" x 2.3" x 3/8" (25 mm x 58 mm x 10 mm)</p>

 <p>1 x MB1824 (MB4560/M) Aluminium Breadboard, 18" x 24" (45 cm x 60 cm)</p>	 <p>1 x RDF1 4 GummifüÙe</p>	 <p>3 x SM1RR Halteringe, SM1 Gewinde</p>
 <p>4 x F25SSK1-GOLD Goldene Schraubenköpfe</p>	 <p>1 x AT1(/M) Justierhilfe, Plexiglas 1.18" x 1.18" (30.0 mm x 30.0 mm)</p>	 <p>1 x SPW606 SM1 Halteringschlüssel, 1" (25.4 mm) lang</p>

Zöllisches Kit

Typ	Anzahl	Typ	Anzahl
1/4"-20 x 1/2" Schraube	11	1/4" Mutter	4
1/4"-20 x 5/8" Schraube	11	1/4" Unterlegscheibe	11
1/4"-20 x 3/4" Schraube	4	 <p>1 x BD-3/16L Schraubenzieher für 1/4"-20 Schrauben</p>	
8-32 Schrauben sind bei den Haltern enthalten			
1 x Inbus für 8-32 Schrauben (9/64"), 1 x Inbus für 8-32 Madenschrauben (5/64"), 1x Inbus für 6-32 Madenschrauben (1/16")			

Metrisches Kit

Typ	Anzahl	Typ	Anzahl
M6 x 12 mm Schraube	11	M6 Mutter	4
M6 x 16 mm Schraube	11	M6 Unterlegscheibe	11
M6 x 20 mm Schraube	4	 1 x BD-5ML Schraubenzieher für M6 Schrauben	
M4 Schrauben sind bei den Haltern enthalten			
1 x Inbus für M4 Schrauben (3mm), 1 x Inbus für M4 Madenschrauben (2mm), 1 x Inbus für M3 Madenschrauben (1.5mm)			

4.2 Zusammenbau der Komponenten

- Zunächst werden die Einzelkomponenten zusammengesetzt. Die 1/2" (12 mm) langen 1/4"-20 (M6) Schrauben dienen hierbei zur Verbindung von Postholdern und Bases. Die 5/8" (16 mm) langen 1/4"-20 (M6) Schrauben dienen der Befestigung der Bases an der Lochrasterplatte.
- Platzieren Sie die ME1-G01 Spiegel in zwei der KM100 Spiegelhalter und klemmen Sie sie mit der Schraube fest. Setzen Sie die EBS2 Strahlteiler in die KM200T Strahlteilerhalter und die LB1901 Linse in den LMR1(M) Linsenhalter mittels der Halterringe ein, die sich bereits im Halter befinden. Ersetzen Sie die unteren Schraubenköpfe dieser KM100 und KM200T-Halter mit den goldenen F25SSK1-GOLD Köpfen, indem Sie mit einem Inbus-Schlüssel in den Schraube greifen und den Kopf abdrehen. Ein erklärendes Video ist auch auf der Webseite des KM100 auf www.thorlabs.com zu finden.

**Abbildung 2: Zusammenbau der Komponenten**

- Schrauben Sie die KM100, KM200T, LMR1(/M) und RSP1D(/M) Halter auf die TR3 (TR75/M) Posts mittels der mitgelieferten Schrauben und setzen Sie sie in die PH3 (PH75/M) Post-Halter. Setzen Sie einen der KM200T in den PH3E (PH75E/M). Gehen Sie für die Beobachtungsschirme analog mit den PH2 (PH50/M) und TR2 (TR50/M) vor.



Abbildung 3: Zusammenbau der Komponenten

- Schrauben Sie die AT1(/M) Justierhilfe auf einen TR3 (TR75/M) Post und setzen Sie ihn in einen PH3 (PH75/M) Post-Halter, der an der BA1S(/M) base befestigt wird.
- Schrauben Sie die EDU-VS1(/M)-Schirme auf die TR2 (TR50/M) Posts. Setzen Sie diese dann in die PH2 (PH50/M) Post-Halter, die auf den BA2(/M) bases befestigt werden.



ACHTUNG



WICHTIG: Die Polarisatorfolien sind auf jeder Seite mit durchsichtigen Schutzfolien beklebt. Es empfiehlt sich dringend, beim Zusammenbau der Polarisatoren Handschuhe zu tragen und nur die Ränder anzufassen, damit nicht mit blanken Fingern auf die Folie gefasst wird. Weiterhin sollte vermieden werden, die Polarisatoren längere Zeit mit UV-Licht zu bestrahlen, oder sie hohen Temperaturen und Chemikalien wie Aceton auszusetzen. Es sollte darauf geachtet werden, dass alle drei Polarisatoren so montiert werden, dass sie parallel sind.

- Entfernen Sie die beiden Schutzfolien auf der eigentlichen Polarisatorfolie – hierbei sollten Sie Handschuhe tragen und nicht auf die Polarisatorfolie selbst fassen. Dabei ist es hilfreich, ein Stück Klebeband so auf die Schutzfolie zu kleben, dass es über den Rand hinaus ragt. Zieht man das Klebeband dann ab, folgt der Schutzfilm. Um die Schutzfolie zu lösen kann es nötig sein die abgeflachte Kante mit einer Schere nachzuschneiden und die Schutzfolie mit einer Pinzette abzuziehen.
- Setzen Sie 2 der 3 LPVISE2X2 Polarisatorfolien (mit abgezogenen Schutzfolien) in den RSP1D(/M) Halter und schrauben Sie sie mittels der zusätzlichen Halterringe fest. Die Orientierung des Polarisators wird durch seine Form angezeigt, siehe Skizze rechts. Die Kante ist parallel zur Polarisation des transmittierten Lichts. In den nächsten Schritten wird erläutert, wie alle 3 Polarisatoren parallel eingestellt werden.



- Setzen Sie den CPS532-C2 Laser in den AD11NT-Adapter und befestigen Sie ihn mit den Halteschrauben. Setzen Sie den Adapter dann in den verbliebenen KM100 Halter, verbinden Sie den Laser mit der LDS5(-EC) Spannungsversorgung, prüfen Sie, dass am Boden des LDS5(-EC) die richtige Spannung eingestellt ist und schalten Sie ihn ein.



WARNUNG



Das Lasermodul ist ein Klasse 2 Laser, der keine speziellen Schutzbrillen erfordert. Um Verletzungen zu vermeiden, sollte jedoch nicht direkt in den Strahl geblickt werden.

- Stellen Sie beide Polarisatoren vor den Laser. Drehen Sie die Polarisatoren so, dass sie senkrecht zueinander sind. Das ist der Fall, wenn am Ende effektiv kein Licht mehr austritt. Die Einstellung der Skala ist bis hierhin egal; in unserem Beispiel im Bild zeigt die Skala „277°“ und „34°“, die beiden Polarisatoren sind aber senkrecht zueinander eingestellt.



10. Drehen Sie die erste Polarisator-Komponente um 180° um die Stiel-Achse, sodass die Skala in die andere Richtung zeigt, s. Bild unten.



11. Drehen Sie den zweiten Polarisator **im Uhrzeigersinn**, bis er senkrecht zum ersten ist. Notieren Sie sich, um welchen Winkel Sie gedreht haben, wir nennen diesen ab hier φ . Stellen Sie sicher, dass die Auslöschung optimal ist (es kann nämlich passieren, dass die Laser-Achse etwas unglücklich liegt. Dann sinkt die Transmission auch ab, aber eben nicht auf 0). In unserem Beispiel wurde der zweite Polarisator so gedreht, dass die (beliebige) Skala „143“ zeigt, s. Bild unten.



In unserem Fall ist dann $\varphi = 277^\circ - 143^\circ = 134^\circ$.

12. Drehen Sie die erste Polarisator-Komponente wieder um 180° zurück, sodass die Skala wieder zum Laser zeigt.



13. Drehen Sie den ersten Polarisator **im Uhrzeigersinn** um $\varphi/2$. In unserem Fall zeigte der erste Polarisator zu Beginn 34° . Er muss nun also auf die Position $34^\circ - 134^\circ/2 = 34^\circ - 67^\circ = 327^\circ$ gedreht werden, s. Bild unten.



14. Sie haben nun die Orientierung des Polarisators gefunden, die entweder parallel oder senkrecht zur optischen Platte ist. In unserem Beispiel muss nun also die Skala, die bisher auf „327“ steht, auf entweder 0° oder 90° geändert werden. Nehmen Sie hierfür die dritte Polarisatorfolie und testen Sie, ob Sie die 0° oder die 90° -Stellung gefunden haben (die flache Seite der Polarisatorfolie ist parallel zur Transmissionsrichtung). Verstellen Sie die Skala, indem Sie die beiden kleinen Schrauben lockern und die Skala des ersten Polarisators auf 0° oder 90° einstellen, s. Bild unten.



15. Drehen Sie den zweiten Polarisator so, dass er senkrecht zum ersten steht (bis also die Transmission wieder auf null sinkt). Verändern Sie dann auch hier die Skala durch Lösen der Schraubchen, mit Einstellung 90° oder 0° , siehe Bild unten.



16. Setzen Sie die dritte Polarisatorfolie in den verbleibenden Drehhalter und führen Sie den letzten Schritt nochmal aus, um auch für diese Komponente die Skala richtig einzustellen.

4.3 Aufbau und Justierung

4.3.1 Laseraufbau

1. Fixieren Sie den Laser an einem Ende der Lochrasterplatte.
2. Stellen Sie sicher, dass der Laser in 45° polarisiert ist, indem Sie einen auf -45° eingestellten Polarisator vor den Laser stellen und den Laser solange im Halter rotieren, bis die minimale Transmission erreicht ist. Da der Laser nicht linear polarisiert ist, wird die Intensität nicht auf null abfallen. Dann entnehmen Sie den Polarisator wieder aus dem Aufbau.

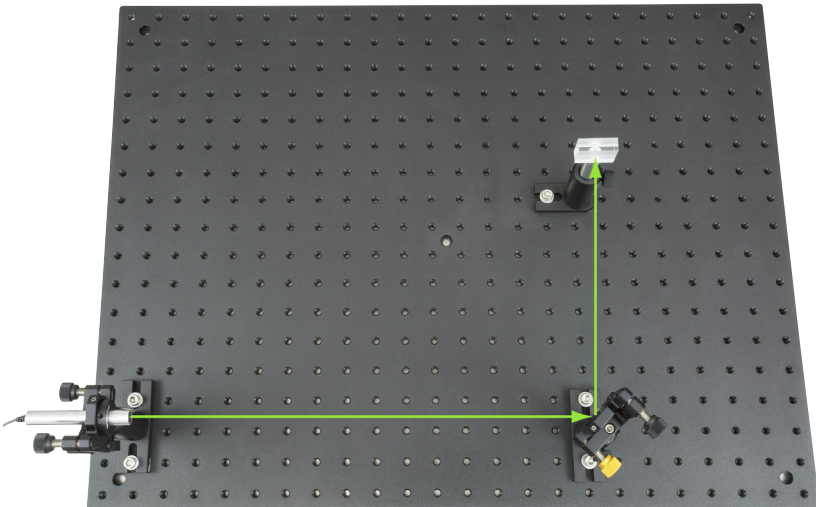


Abbildung 4: Laseraufbau

4.3.2 Spiegel und Strahlteiler

1. Stellen Sie den Laser mit Hilfe der Justierschrauben so ein, dass er so horizontal wie möglich ist. Ideal ist auch ein Verlauf parallel zu einer Lochlinie. Verschieben Sie die Justierhilfe im Strahl vor und zurück, vom Laser bis zum Ende des Breadboards, und beobachten Sie dabei die Strahlhöhe. Stellen Sie die Höhe der Justierhilfe dann so ein, dass der Laser-Spot in der Mitte des Fadenkreuzes ist. Dies ist die Referenzhöhe für alle weiteren Komponenten.

- 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 Abbildung 4 skizziert. Folgen Sie dafür dem Strahl mit dem Schirm oder einem Stück Papier. Passen Sie die Ausrichtung des reflektierten Strahls mit der Justierhilfe an, sodass der Strahl den Spiegel in der Mitte trifft und auch möglichst parallel zur Plattenoberfläche verläuft.
- Setzen Sie nun einen der Strahlteiler zwischen Laser und ersten Spiegel (Pfad 1 in Abbildung 5), 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, siehe Abbildung 5. Es sollte auf etwa gleiche Abstände in beiden Armen geachtet werden.

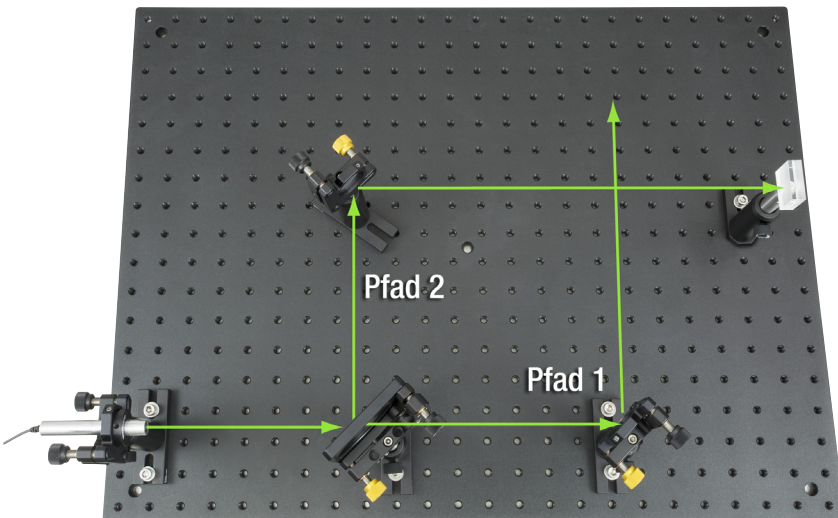


Abbildung 5: Spiegel- und Strahlteiler Aufbau

- Achten Sie wieder darauf, dass der Strahl parallel zum Lochraster steht und justieren Sie die Höhe der Komponenten ein.
- Bringen Sie den zweiten Strahlteiler am Schnittpunkt der beiden Teilstrahlen in den Aufbau ein, wie in Abbildung 6 dargestellt. Fixieren Sie ihn mit Hilfe der CF125 Klemme auf dem Breadboard. Stellen Sie mit der Justierhilfe sicher, dass auch der vom Strahlteiler reflektierte Strahl die richtige Höhe aufweist.

4.3.3 Beobachtungsschirme und Ausrichtung

7. Stellen Sie dann einen der EDU-VS1(/M) Beobachtungsschirme relativ nah hinter dem Strahlteiler auf (Schirm 1, s. Abbildung 6), den anderen in einem Abstand von etwa 2-3 Metern (wenn möglich sogar noch weiter entfernt). Ziel ist es nun, beide Teilstrahlen zu überlagern, sodass sie interferieren können.

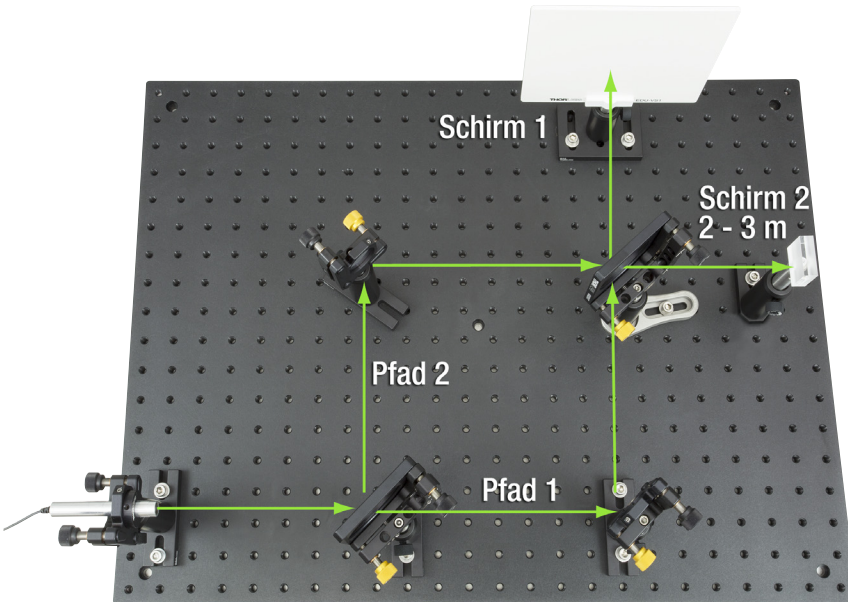


Abbildung 6: Beobachtungsschirme und Ausrichtung

8. 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 Strahlteiler-Mounts positionieren.
Hinweis: Wenn Sie die Schrauben an einem Spiegel verstellen, wird sich der Laserspot an beiden Schirmen in unterschiedliche Richtungen bewegen (also einer nach links und der andere nach rechts oder umgekehrt). Drehen Sie den Strahlteiler, dann bewegen sich beide Spots an den Schirmen in die gleiche Richtung.
9. Stellen Sie das Interferometer so ein, dass die Strahlen insbesondere am zweiten Strahlteiler gut überlappen! Es genügt nicht, dass die Spots nur auf den Schirmen gut aufeinander liegen. Ist dies nicht der Fall, muss entweder die Einstellung der Spiegel oder die Position des Strahlteilers entsprechend geändert werden. Ein Interferenzmuster wird nur dann erkennbar sein, wenn die Strahlen gut am zweiten Strahlteiler und den Schirmen überlagern.

10. Es gibt nun drei mögliche Wege, wie man bei der Justierung weiter vorgehen kann. Keiner ist besser als der andere – wählen Sie denjenigen, der Ihnen am meisten liegt:
- a. Stellen Sie die Spots so ein, wie in den vorherigen Punkten beschrieben. Nun stellen sie die Linse zwischen Laser und erstem Strahlteiler in den Strahlengang und weiten damit den Laser auf. Wenn Sie das Interferenzmuster noch nicht sehen (Normalfall!), dann drehen oder neigen Sie langsam einen der Spiegel. Finden Sie immer noch kein Muster, müssen die vorherigen Schritte wiederholt werden.
 - b. Stellen Sie die Spots so ein, wie in den vorherigen Punkten beschrieben und zwar so lange, bis sie in der Überlagerung ein Muster sehen. Nun stellen sie die Linse zwischen Laser und erstem Strahlteiler in den Strahlengang und weiten damit den Laser auf. Wenn Sie das Interferenzmuster noch nicht sehen, dann drehen oder neigen Sie langsam einen der Spiegel. Finden Sie immer noch kein Muster, müssen die vorherigen Schritte wiederholt werden.
 - c. Sie können auch einen sogenannten „Beam Walk“ anwenden. Hierbei handelt es sich um eine in der Optik sehr verbreitete, iterative Methode, um optische Strahlen mittels zweier kinematischer Elemente auszurichten. Diese beiden Elemente sind in unserem Fall der erste Strahlteiler und ein Spiegel Ihrer Wahl. Diese werden nun verändert, um den Strahl auf zwei „Ziele“ einzustellen, nämlich die Spots auf dem zweiten Strahlteiler und auf einem der Schirme. Gehen Sie wie folgend vor;
 - i. Justieren Sie den ersten Strahlteiler so lange, bis die beiden Spots auf dem zweiten Strahlteiler möglichst gut überlappen.
 - ii. Justieren Sie nun den von Ihnen gewählten Spiegel so, dass die beiden Spots am Schirm möglichst gut übereinander liegen.
- Wiederholen Sie diese beiden Schritte nun so oft, bis die Spots sowohl am Strahlteiler als auch am Schirm optimal übereinander liegen. Setzen Sie dann die Linse ein. Wenn Sie das Interferenzmuster noch nicht sehen, dann drehen oder neigen Sie langsam einen der Spiegel. Finden Sie immer noch kein Muster, müssen die vorherigen Schritte wiederholt werden.
11. Wenn Sie ein Interferenzmuster erhalten haben (s. Abbildung 12 unten), können Sie schließlich in jedem Pfad einen Polarisator platzieren. Bei gleichgestellten Polarisations Ebenen erhalten Sie Interferenz, bei gekreuzten verschwindet sie (s. Kapitel 5). Der dritte Polarisator („Radierer“) kann schließlich noch direkt vor einen der Schirme gesetzt werden.

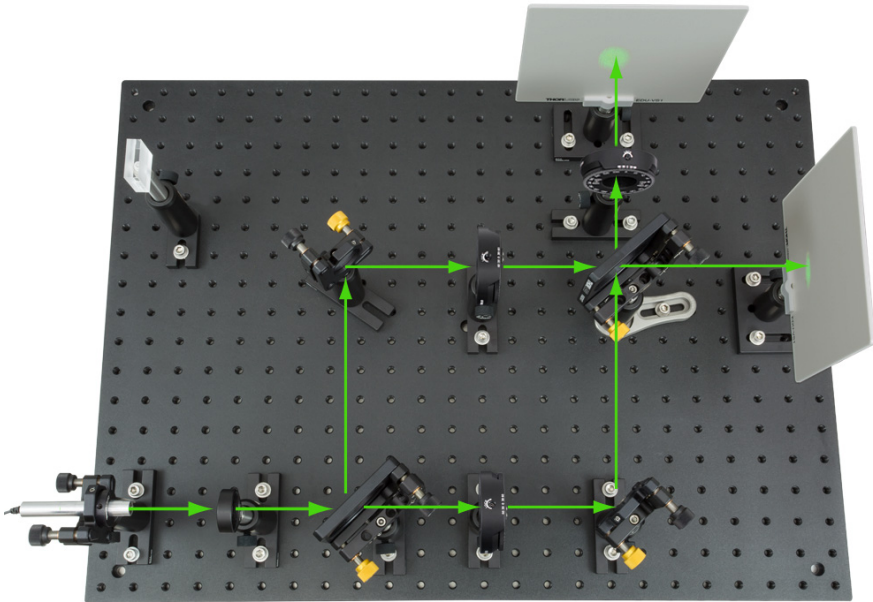


Abbildung 7: Gesamter Aufbau des Interferometers mit Polarisatoren

4.4 Aufbau

4.4.1 Komplementäre Interferenzmuster und Phasensprünge

Die beiden Interferenzmuster am Ausgang des Mach-Zehnder-Interferometers sind komplementär. Das bedeutet, dass eine helle Stelle an einem Schirm am anderen Schirm dunkel ist (und umgekehrt). Dies lässt sich durch die Phasensprünge an den Strahlteilern verstehen, was im folgenden kurz dargestellt wird.

Zunächst ist es hilfreich zu wissen, wie die Strahlteiler selbst aufgebaut sind. Es handelt sich um ein Glassubstrat mit einer reflektiven Schicht, die auf einer Seite des Glases aufgebracht ist. Abhängig davon, an welcher Seite das Licht reflektiert, treten unterschiedliche Phasensprünge um einen Winkel φ auf. Tritt das Licht erst in das Glas ein und reflektiert dann erst an der Rückseite der Schicht, tritt kein Phasensprung auf.

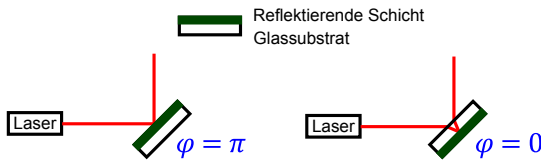


Abbildung 8: Phasensprünge am Plattenstrahlteiler

Als nächstes können wir nun die Phasenunterschiede der beiden Wege an einem Schirm betrachten:

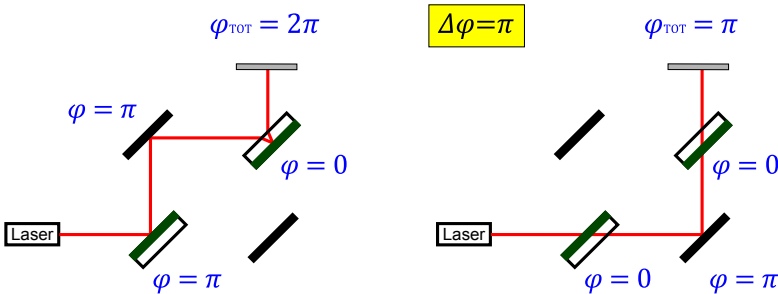


Abbildung 9: Phasenunterschied an einem der Schirme

Der Phasenunterschied am anderen Schirm ergibt sich analog:

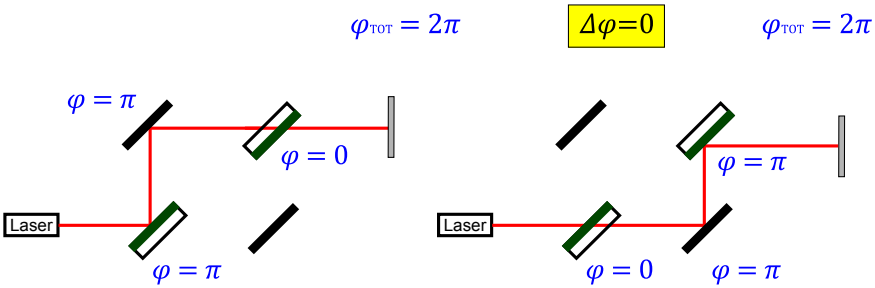


Abbildung 10: Phasenunterschied am anderen Schirm

Deshalb ergibt sich also immer ein Phasenunterschied von π (180°) zwischen beiden Schirmen.

Hierbei ist zu beachten, dass wir den Phasenversatz durch das Material selbst nicht betrachten. Hier geht es nur um die Sprünge bei Reflexionen. Der Phasenversatz im Medium verursacht eine weitere Verschiebung in der Gesamt-Phase, ändert aber nichts am Fakt, dass die Bilder an beiden Schirmen komplementär sind.

Beachten Sie auch: Sie müssen der Orientierung des Plattenstrahlteilers im Aufbau keine Beachtung schenken! Es ist egal, wie herum Sie beide Strahlteiler einbauen – der relative Phasenunterschied bleibt derselbe.

4.4.2 Ringstruktur

Wie oben angemerkt wurde, ergibt sich das deutlichste Interferenzbild, wenn die Arme des Interferometers in etwa gleich lang sind. Ist ein Arm deutlich länger als der andere, so kann ebenfalls ein Interferenzmuster beobachtet werden, jedoch ist es sehr viel kleiner als bei optimaler Justierung. Hier soll nun kurz erläutert werden, warum dies so ist und warum sich überhaupt ein ringförmiges Muster ergibt.

Wenn beide Arme des Interferometers unterschiedlich lang sind (und das ist immer der Fall, da eine nanometergenaue Einstellung praktisch nicht möglich ist), dann existieren aus Sicht des Schirms zwei (virtuelle) Lichtquellen, die den Wegen des Laserstrahls durch das Interferometer entsprechen. Denkt man sich den Lichtweg entlang einer Linie, so liegen die beiden Quellen durch die unterschiedlichen Längen der Interferometerarme hintereinander.

Wie bei anderen Interferenzmustern (z.B. beim Doppelspalt) kann man nun durch den Weglängenunterschied von Lichtquelle A zum Punkt X und von Lichtquelle B zum Punkt X bestimmen, ob an einer gewissen Stelle z.B. konstruktive Interferenz oder destruktive Interferenz stattfindet, siehe Abbildung 11.

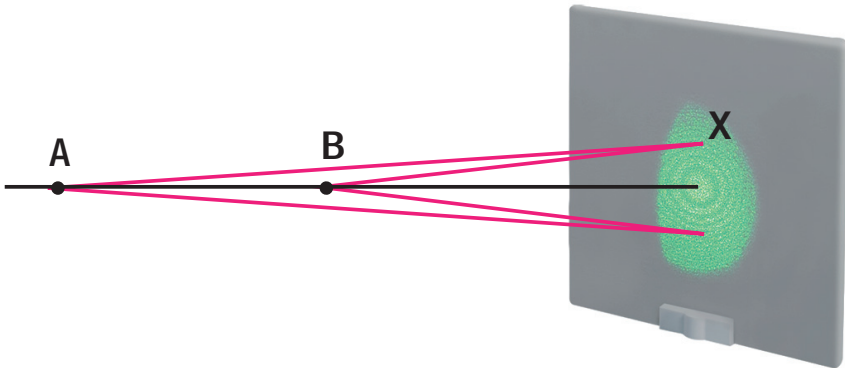


Abbildung 11: Erklärung des kreisförmigen Interferenzmusters

Sind nun die Interferometerarme deutlich unterschiedlich lang, so sind die beiden virtuellen Lichtquellen weit voneinander entfernt. Eine kleine Änderung der Position am Schirm entspricht damit einer großen Änderung im Weglängenunterschied, welche sich wiederum in eine entsprechende Änderung im Interferenzmuster übersetzt. Dies macht anschaulich klar, warum das Interferenzmuster kleiner wird, wenn die Interferometerarme verschiedene Längen aufweisen.

Diese Argumentation kann man nun für jeden beliebigen Punkt am Schirm führen. Da die Linse den einfallenden Laser-Strahl symmetrisch um die optische Achse aufweitet, muss das Interferenzmuster ebenfalls symmetrisch in Bezug auf die optische Achse, sprich kreisförmig, sein.

Kapitel 5 Experimentieranleitung

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. 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.

5.1 Experiment 1: Welcher-Weg Information in der Quantenphysik

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

Sie sollten weiterhin 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. Abbildung 12). Wir wissen nicht, „welchen Weg es genommen hat“, da beide Wege ununterscheidbar sind.

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. Abbildung 13).

Wenn das Interferenzmuster nicht vollständig verschwindet, obwohl man die Polarisatoren auf 0° und 90° eingestellt hat, dann wird das meistens dadurch verursacht, dass die Polarisatorfilme nicht in der richtigen Orientierung zueinander im Mount gehalten werden. Eventuell sollten sie die entsprechenden Schritte in Kapitel 4.2 noch einmal prüfen.



Abbildung 12: Komplementäre Interferenzmuster

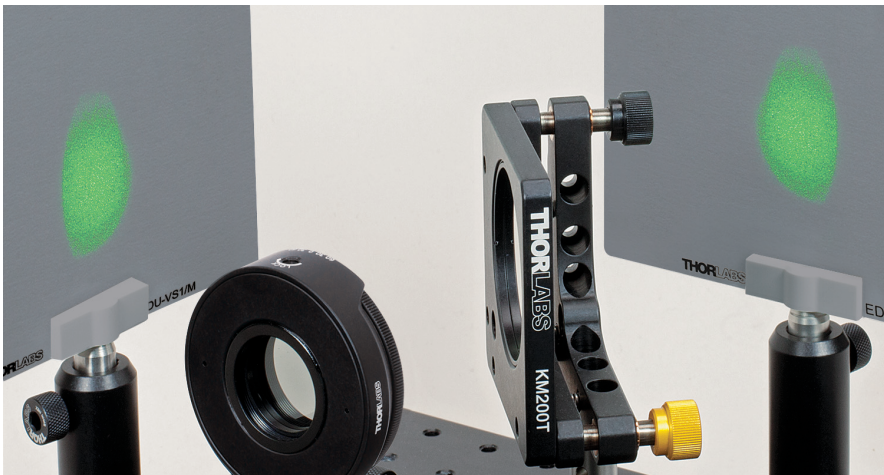


Abbildung 13: Verschwinden des Interferenzmusters

Fangfrage:

Oben haben wir erklärt, dass ein auf 0° eingestellter Polarisator in einem Interferometerarm und ein 90° Polarisator im anderen Arm zu einer Weginformation führen und wir deshalb kein Interferenzmuster sehen. Der Gedankengang war, dass am Schirm (oder einem entsprechenden Detektor) entweder 0° oder 90° als Polarisation des Photons gemessen wird und wir dadurch sagen können, durch welchen Arm es gelaufen ist. Können wir die gleiche Argumentation verwenden, wenn wir einen 0° und einen 80° Polarisator verwenden?

Antwort:

Intuitiv könnte man "ja" sagen, denn man mag der Fehlvorstellung aufliegen, dass ein Photon, das mit 80° Polarisation am Schirm detektiert wird, auch den Interferometerarm mit dem 80° Polarisator gewählt haben muss. Dies ist jedoch nicht richtig, denn es gibt eine endliche Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein 0° polarisiertes Photon am Schirm oder einem Detektor als 80° polarisiertes Photon gemessen wird. Zwar ist diese Wahrscheinlichkeit klein, die Weginformation ist dadurch aber trotzdem nicht eindeutig. Mit anderen Worten: die beiden möglichen Wege (oder Zustände) überlagern sich und wir finden ein Interferenzmuster mit geringem Kontrast.

5.2 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 Abbildung 14 erkennen kann, erscheint hier wieder ein Interferenzmuster. Abbildung 14 zeigt links den Schirm mit dem Radierer davor und rechts den Schirm ohne Radierer. Entsprechend ist auf dem linken Schirm wieder ein Interferenzmuster erkennbar, wohingegen auf dem rechten Schirm keine Interferenz zu beobachten ist.

Diese Beobachtungen können wie folgend 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. Somit ergibt sich am rechten Schirm keine Interferenz.



Abbildung 14: Rechter Schirm: kein Interferenzmuster beobachtbar, Linker Schirm: Interferenzmuster hinter dem Radierer

5.3 Experiment 3: Gedankenexperiment

Der Physiker John Wheeler erdachte folgendes Gedankenexperiment: Man stelle sich vor, der zweite Strahlteiler werde erst in den Aufbau eingebracht, wenn sich das Photon (nach klassischer Vorstellung) schon für einen Weg entschieden haben müsste. Was erwartet man als Resultat – ein Interferenzmuster oder nicht?

Zunächst skizzieren wir das Interferometer ohne und mit zweitem Strahlteiler:

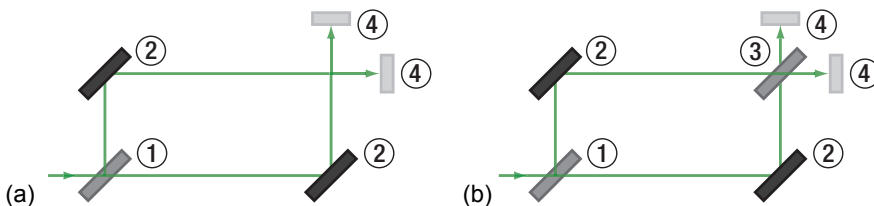


Abbildung 15 (a) Skizze des Aufbaus ohne (a) und mit (b) zweitem Strahlteiler. (1) Erster Strahlteiler, (2) Spiegel, (3) Zweiter Strahlteiler, (4) Schirme.

Das Verhalten des Systems in Abbildung 15(a) ist klar: Die Weginformation ist definiert und es bildet sich kein Interferenzmuster. Im System in Abbildung 15(b) hingegen erhalten wir wie oben diskutiert ein Interferenzmuster, da die Weginformation nicht gegeben ist. Wheeler stellt nun die folgende Frage: was passiert, wenn wir das Photon in den Aufbau aus Abbildung 15(a) emittieren und uns erst entscheiden, den zweiten Strahlteiler in den

Aufbau zu stellen, *nachdem* das Photon den ersten Strahlteiler schon passiert hat? Sehen wir ein Interferenzmuster? Haben wir einen definierten Weg oder nicht?

Zunächst einmal sollte man sich vor Augen führen, dass „nachdem das Photon den ersten Strahlteiler passiert hat“ eine Formulierung der klassischen Physik ist! Solange wir die Position des Photons nicht messen, können wir bestenfalls Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Der Satz soll bedeuten „wir warten eine gewisse Zeit, nach der das Photon (im klassischen Sinne) den ersten Strahlteiler passiert haben sollte“. Der Fehler, den man in diesem Gedankenexperiment machen kann, ist zu glauben, dass sich das Photon am ersten Strahlteiler schon entscheiden müsste. Wäre dem so, dann hätte das Einbringen des zweiten Strahlteilers keine Auswirkung mehr und wir würden kein Interferenzmuster beobachten.

Die Quantenphysik überrascht uns hier aber: es zeigt sich auch ein Interferenzmuster, wenn der zweite Strahlteiler erst im Nachhinein in den Strahlengang gestellt wird! Das Fazit lautet, dass ein quantenphysikalisches System sich erst für seine Teilchen- oder Welleneigenschaften entscheiden muss, wenn der Beobachter eine entsprechende Messung macht. Dies gilt überraschenderweise selbst dann noch, wenn wir die Eigenschaften während der Durchführung des Versuchs ändern. Aus Wheelers Gedankenexperiment ist eine ganze Klasse von Experimenten hervorgegangen, die als „Delayed-Choice-Experimente“ bezeichnet werden.

Dieses Experiment ist mittlerweile tatsächlich durchgeführt und diese Erklärung bestätigt 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.

Kapitel 6 Didaktische Kommentare

- Der Quantenradierer, respektive das Mach-Zehnder-Interferometer, kann durchaus **von Schülern selbst aufgebaut** und justiert werden. Je nach experimenteller Erfahrung ist hierbei allerdings die hohe Zahl an Freiheitsgraden problematisch – schließlich kann jeder Spiegel und jeder Strahlteiler gedreht und verkippt werden. Um den Aufbau und die Justierung zu vereinfachen, sind die goldenen Schraubenköpfe angebracht worden. Hat man nun einmal das Interferometer erfolgreich justiert, kann man es demontieren und den Schülern zum erneuten Aufbau überlassen – allerdings mit der Einschränkung, dass nur an den goldenen Schrauben gedreht werden soll. Auf diese Art wird die Justierung vereinfacht und die Zahl der experimentellen Freiheitsgrade minimiert.
- Das zentrale **Verständnisproblem**, das sich bei jedem Welcher-Weg-Experiment stellt, ist die Verhaftung in der klassischen Vorstellung, dass sich ein Photon für einen Weg durch das Interferometer entscheiden müsse. Es ist wichtig zu betonen, dass dies nur der Fall ist, wenn eine entsprechende Messung durchgeführt wird – in diesem Kontext wird die Wichtigkeit des Messprozesses in der Quantenphysik deutlich.
- Um den Schülern und Schülerinnen den Übergang zum **Zustandsbegriff** zu erleichtern, bietet es sich an, den Zustandsbegriff anhand der Schrödingerschen Katze zu diskutieren. Das System bestehend aus einer Kiste, einer Katze und einem Giftstoff, der beim Zerfall eines radioaktiven Atoms (ein zufälliger Prozess!) freigesetzt wird. Das System hat, sofern die Kiste geschlossen ist, zwei Zustände: das Gift ist noch nicht freigesetzt und die Katze lebt (Zustand 1) oder das Gift ist bereits freigesetzt und die Katze lebt nicht mehr (Zustand 2). Der zentrale Aspekt dieses Gedankenexperiments ist, dass alle Zustände des Systems gleichzeitig existieren und sich überlagern. Sobald die Kiste jedoch geöffnet wird, muss das System in *einen* Zustand übergehen.

Schrödingers Katze stellt darum einen guten Zugang zum Zustandsbegriff dar. Weiterhin hilft dieses Gedankenexperiment auch beim Verständnis des Quantenradierers, denn auch hier existieren zwei Zustände, nämlich die beiden möglichen Wege des Photons durch das Interferometer. Wird nicht explizit gemessen, in welchem Interferometerarm sich das Photon befindet (wird also die „Kiste“ nicht geöffnet), so überlagern sich die Zustände und das bekannte Interferenzmuster entsteht.

- Häufig wird mit dem Satz „**Das Photon interferiert mit sich selbst**“ versucht, eine prägnante Beschreibung für diese Art von Experiment zu verwenden. Ob man ihn verwendet, ist im weitesten Sinn eine didaktische Geschmacksfrage. Bei der Verwendung dieses Satzes sollte man sich allerdings der sehr problematischen Implikationen bewusst sein: obwohl ein Photon eine *elementare* Anregung des elektromagnetischen Feldes ist, suggeriert der Satz, dass es teilbar sei und mit sich selbst interferieren könnte. Dies ist jedoch nicht der Fall! Denn es sind eben die möglichen *Zustände*, die miteinander interferieren, welche mit ihren Wellenfunktionen Ψ eine mathematisch-physikalische Darstellung haben.

- In manchen didaktischen Modellen wird die **Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte** $|\Psi(x, t)|^2$ als Größe verwendet, um die physikalischen Prozesse zu veranschaulichen. Betrachtet man die Entwicklung dieser Funktion in der Zeit, so propagiert zunächst ein Wellenpaket aus dem Laser auf den ersten Strahlteiler. Hier trennt sich $|\Psi|^2$ in zwei Anteile, die jeweils in einen Arm des Interferometers hinein propagieren. Nähert man sich dem Quantenradierer-Experiment mit dieser didaktischen Methode, so sollte man darauf achten, dass die Unteilbarkeit eines Photons stark betont wird. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Schüler und Schülerinnen den Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte zu stark mit der Position des Photons assoziieren – und damit das Photon in der Schülervorstellung doch teilbar wird.
- Die Diskussion des Quantenradierers mit einzelnen Photonen erlaubt die Anknüpfung an viele **weitere Themen der Quantenphysik**. Als lohnenswerte Inhalte bieten sich insbesondere die Verschränkung von Photonen, der abhörsichere Austausch von Daten per Quantenkommunikation und die wechselwirkungsfreie Quantenmessung (Stichwort „Knaller-Test“) an.

Kapitel 7 Problembehandlung

- **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.

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

Durch Temperaturänderungen im Kristall des Lasermoduls 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.

- **Statt des ringförmigen Interferenzmusters sind hyperbelförmige Interferenzen zu erkennen (wie in Abbildung 16).**

Diese und andere Verzerrungen des Interferenzbildes treten insbesondere dann auf, wenn die Höhe der Strahlen entlang beider Arme des Interferometers nicht exakt gleich ist. Stellen Sie sicher, dass die Höhe nach allen optischen Elementen gleich ist. Prüfen Sie auch, ob alle Strahlen im 90° -Winkel reflektiert werden. Leider gibt es keine systematische Prozedur, um von Hyperbeln auf Kreise zu kommen; die beste Methode ist noch der in Kapitel 4 beschriebene „Beam Walk“.

Weiterhin kann man das Aussehen des Musters mit der Linse verändern – eine Verschiebung der Linse zwischen Laser und erstem Strahlteiler kann Verbesserungen im Muster hervorrufen.

Wichtiger Hinweis: *Die gesamten physikalischen Überlegungen des Quantenradierer-Experiments, sowohl klassisch als auch quantenphysikalisch, sind allesamt natürlich auch dann gültig, wenn das Interferenzmuster nicht ringförmig ist, sondern andere Muster, wie z.B. Hyperbeln, zeigt.*

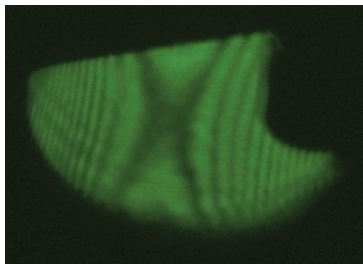


Abbildung 16: Hyperbolisches Interferenzmuster

Kapitel 8 Weitere Ideen

- Die in diesem Kit enthaltenen Teile können auch genutzt werden, um ein Michelson-Interferometer aufzubauen. Für dieses benötigen Sie lediglich einen Strahlteiler und stellen die zwei Spiegel so, dass sie das Licht zum Strahlteiler reflektieren. Eine sehr ausführliche Darstellung finden sie im Handbuch des EDU-BT1(/M) Knaller-Test.
- Die folgende Idee basiert auf einer Rückmeldung, die wir von Dr. Mark Colclough, Director of Laboratory Learning and Teaching, School of Physics and Astronomy, Universität Birmingham, UK, erhalten haben: Sein Ziel war es, die Interferenzmuster quantitativ auszuwerten. Dafür ersetzt er einen der Schirme mit einer Milchglasscheibe. Das Interferenzmuster auf der Scheibe nimmt er dann mittels einer Webcam auf, wozu er noch eine Linse verwendet. Thorlabs bietet „ground glass diffusers“ an, welche mit einem Halter wie dem FP02 verwendet werden können. Die Camera, die Dr. Colclough verwendet, ist eine C270 Logitech Webcam (die Vorteile wie eine herausnehmbare Linse, Helligkeitseinstellungen und einen günstigen Preis bietet). Durch das aufgenommene Bild können Studenten dann die Kontrastfunktion des Interferenzmusters quantitativ auswerten, jeweils in Abhängigkeit der Polarisatorstellungen. Diese Daten können anschließend mit den theoretisch erwarteten Werten verglichen werden.

Dieser Aufbau wurde von uns nicht getestet, wir können also keine Garantie für die Ergebnisse dieser Methode leisten.

Kapitel 9 Bestimmungen

Thorlabs bietet allen Endnutzern in der EG die Möglichkeit, Produkte am Ende der Nutzung ohne anfallende Entsorgungskosten zurückzugeben, wie durch die WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) der Europäischen Gemeinschaft und die entsprechenden nationalen Gesetze verlangt.

- Dieses Angebot gilt für elektrische und elektronische Komponenten von Thorlabs, welche:
- nach dem 13. August 2005 verkauft wurden
- mit dem nebenstehenden durchgestrichenen Mülltonnen-Logo versehen sind
- an ein Unternehmen oder Institut in der EG verkauft wurden
- momentan von einem Unternehmen oder Institut in der EG besessen werden
- noch intakt sind, also nicht zerlegt und nicht kontaminiert



Da sich die WEEE auf in sich geschlossene, funktionierende elektrische oder elektronische Produkte bezieht, gilt der oben beschriebene Service nicht für folgende Thorlabs Produkte:

- Fremtteile, die durch den Benutzer eingebaut wurden
- Komponenten
- Mechaniken und Optiken
- Teile, die beim Zerlegen von Einheiten übrig geblieben sind (Leiterplatten, Gehäuse usw.).

Wenn Sie ein Thorlabs Produkt zur Entsorgung geben möchten, dann setzen Sie sich bitte mit Thorlabs oder Ihrem Händler in Verbindung.

9.1 Müllentsorgung liegt in Ihrer Verantwortung

Wenn Sie ein Produkt nach Ende seines Lebenszyklus nicht an Thorlabs zurückgeben, so übergeben Sie es einem Unternehmen, welches auf Müllentsorgung spezialisiert ist. Entsorgen Sie das Produkt nicht in einem Mülleimer oder auf einer öffentlichen Müllhalde.

9.2 Ökologischer Hintergrund

Es ist bekannt, dass elektrische und elektronische Produkte bei ihrer Zersetzung die Umwelt verschmutzen, indem sie giftige Stoffe abgeben. Das Ziel der europäischen RoHS-Verordnung ist es, die Menge solcher Stoffe in den elektronischen Produkten in Zukunft zu verringern.

Das Ziel der WEEE-Verordnung ist es, das Recycling solcher Produkte durchzusetzen, da ein kontrolliertes Recycling der Produkte am Ende ihres Lebenszyklus negative Folgen für die Umwelt vermeidet.

Kapitel 10 Thorlabs weltweit



USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.
sales@thorlabs.com
techsupport@thorlabs.com

Europe

Thorlabs GmbH
europe@thorlabs.com

France

Thorlabs SAS
sales.fr@thorlabs.com

Japan

Thorlabs Japan, Inc.
sales@thorlabs.jp

UK and Ireland

Thorlabs Ltd.
sales.uk@thorlabs.com
techsupport.uk@thorlabs.com

Scandinavia

Thorlabs Sweden AB
scandinavia@thorlabs.com

Brazil

Thorlabs Vendas de Fotônicos Ltda.
brasil@thorlabs.com

China

Thorlabs China
chinasales@thorlabs.com



THORLABS

www.thorlabs.com
