

## Quantenradierer

### Versuchsziel

- Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers
- Erweiterung des Mach-Zehnder-Interferometers zum Quantenradierer

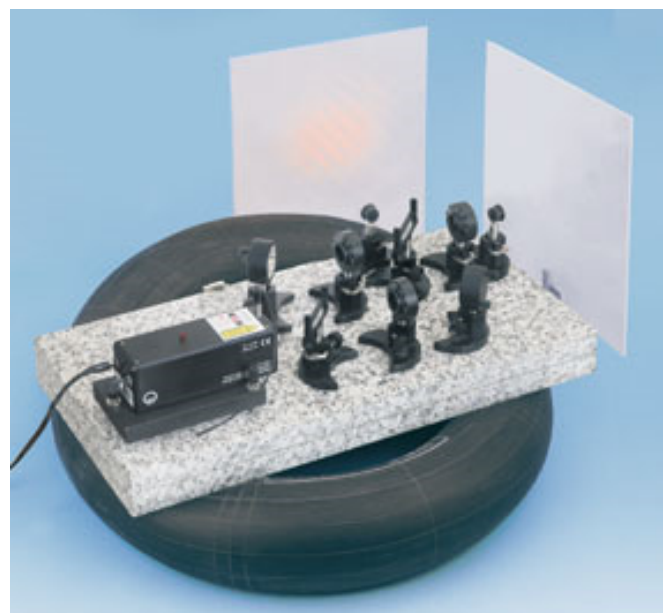
### Grundlagen

Ein grundlegender Begriff in der Quantenphysik ist das Komplementaritätsprinzip: Jedes quantenphysikalische Objekt hat stets sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Sie lassen sich aber nie gleichzeitig beobachten, auch dann nicht, wenn es gelingt, die Unschärferelation zu umgehen. Neben Ort und Impuls sind auch Welcher-Weg-Information und Interferenz zwei komplementäre Größen. Dies kann mit einem Quantenradierer gezeigt werden.

Ein möglicher Aufbau eines Quantenradierers beruht auf dem Mach-Zehnder-Interferometer (vgl. Versuch P5.3.5.1). Dieses wird mit einer Lichtquelle so beleuchtet, dass sich immer nur ein einzelnes Photon im Interferometer befindet. Am Ausgang des Interferometers befindet sich ein Detektor, der die einzelnen Photonen orts aufgelöst nachweist. Für den Nachweis, welchen Weg das Photon genommen hat, werden in die beiden Arme des Interferometers Polarisationsfilter gestellt. Stimmen die Polarisationsrichtungen der Filter überein, so ist – summiert über viele einzelne Photonen – ein Interferenzbild sichtbar. Bei gekreuzter Polarisation verschwindet das Interferenzbild jedoch. Fügt man nun an einem Ausgang des Mach-Zehnder-Interferometers einen weiteren Polarisationsfilter ein, der jeweils unter  $45^\circ$  zu den beiden anderen Filtern orientiert ist, so ist das Interferenzbild wieder sichtbar. Am anderen Ausgang ohne zusätzlichen Polarisationsfilter bleibt das Interferenzbild jedoch verschwunden.

Ursache für das Versuchsergebnis ist die Komplementarität von Welcher-Weg-Information und Interferenz. Durch die gekreuzten Polarisationsfilter kann der Weg einzelner Photonen eindeutig bestimmt werden. Daher kann anschließend keine Interferenz beobachtet werden. Durch einen weiteren Polarisationsfilter hinter einem der Interferometerausgänge haben alle Photonen anschließend wieder die gleiche Polarisationsrichtung. Die Welcher-Weg-Information wird „ausradirt“, Interferenz ist daher wieder möglich.

Der Aufbau eines Quantenradierers für Einzelphotonen ist sehr aufwendig. Daher wird im vorliegenden Experiment der Versuch mit einem Laser durchgeführt, aufgrund dessen Leistung sich immer viele Photonen gleichzeitig im Interferometer befinden. Für diesen Aufbau können die beobachteten Effekte auch im Rahmen der klassischen Elektrodynamik erklärt werden: Nur elektromagnetische Wellen, die eine gemeinsame Polarisationsrichtung haben, können interferieren. Stehen die Polarisationsrichtungen senkrecht zueinander, ist Interferenz nicht möglich. Bringt man einen weiteren



Polarisationsfilter unter  $45^\circ$  hinter einem Interferometerausgang an, so lässt der Filter aus beiden Armen nur den Anteil des Lichts parallel zum Polarisationsfilter durch. Diese Anteile haben die gleiche Polarisation und können daher auch wieder interferieren.

### Geräte

1 Laseroptik-Grundplatte.....	473 40
1 He-Ne-Laser, linear polarisiert .....	471 830
1 Laserträger .....	473 411
9 Optikfuß.....	473 421
2 Halter für Strahlteiler .....	473 431
2 Strahlteiler 50%.....	473 432
2 Planspiegel, feinjustierbar .....	473 461
2 Kugellinse $f = 2,7$ mm .....	473 471
3 Polarisationsfilter für Laseroptik-Grundplatte .....	473 49
2 Durchscheinender Schirm .....	441 53
2 Sockel .....	300 11
1 Holzmaßstab .....	311 03

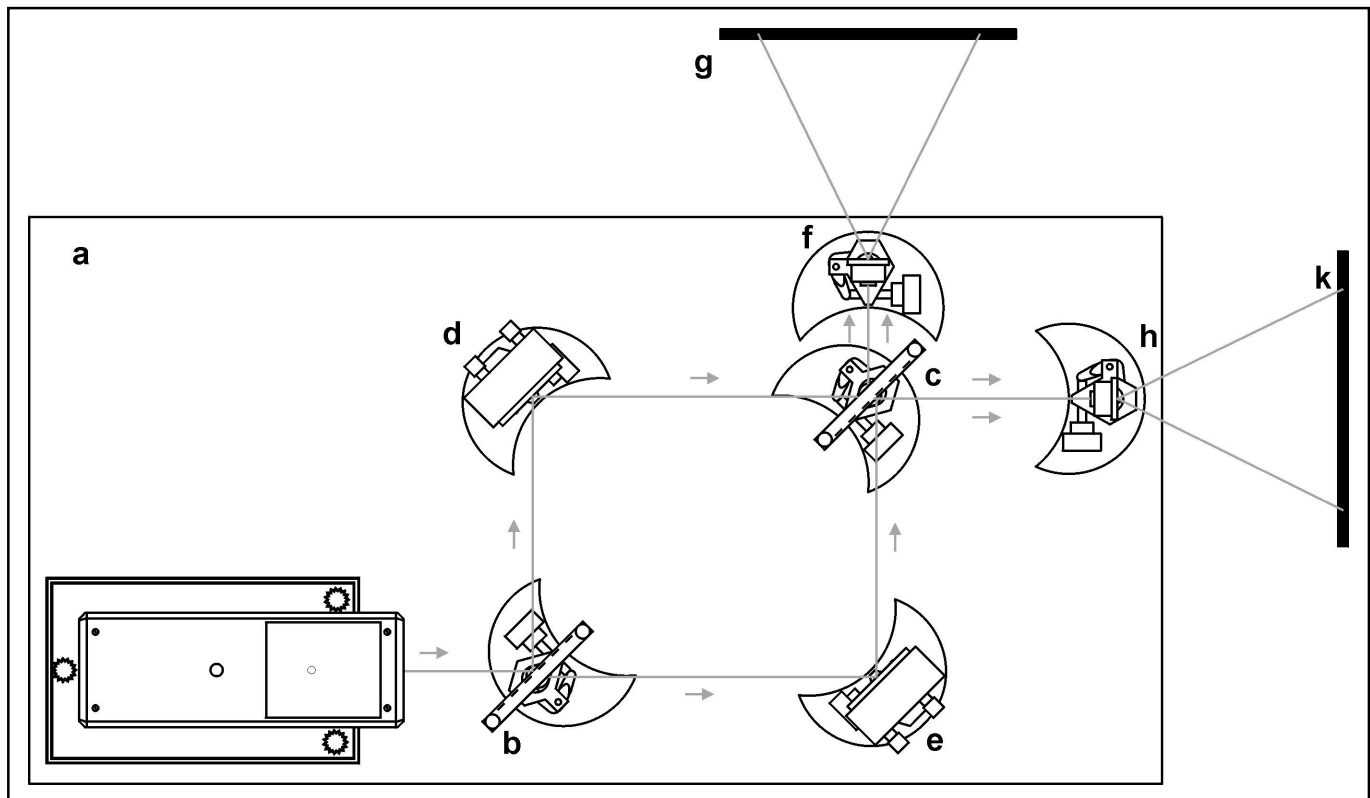


Abb. 1: Aufbau Mach-Zehnder-Interferometer

### Sicherheitshinweise

Der He-Ne-Laser entspricht den Bestimmungen zur Klasse 2 der EN 60825-1 „Sicherheit von Lasereinrichtungen“. Bei Beachtung der entsprechenden Hinweise in der Gebrauchsanweisung ist das Experimentieren mit dem He-Ne-Laser ungefährlich.

- Nicht in den direkten oder reflektierten Laserstrahl blicken
- Überschreiten der Blendungsgrenze vermeiden (d.h. kein Beobachter darf sich geblendet fühlen).
- Laserbereich durch Abschirmung auf das notwendige Maß begrenzen, unnötige Reflexionen vermeiden.

- Durchscheinende Schirme (**g**) und (**k**) in einem Sockel befestigen und gemäß Abb. 1 hinter der Laseroptik-Grundplatte aufstellen.
- Laser anschließen und einschalten.
- Kontermuttern der drei Justierschrauben des Laserträgers lösen.
- Höhe und Neigung des Lasers mit Hilfe der Justierschrauben so ausrichten, dass sein Strahl genau waagrecht etwa 75 mm über der Grundplatte verläuft (für Nachjustierung bleibt dann genügend Spielraum); mit Holzmaßstab nachmessen.
- Kontermuttern wieder festziehen.

### Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers

*Hinweis: Optische Komponenten mit beschädigten oder verschmutzten Oberflächen können Störungen im Interferenzmuster hervorrufen: Planspiegel, Strahlteiler und Kugellinse sorgfältig behandeln, staubfrei aufbewahren und nicht mit bloßen Händen anfassen.*

Die Anordnung des Mach-Zehnder-Interferometers auf der Laseroptik-Grundplatte ist in Abb. 1 dargestellt. Die Bauteile müssen in Bezug auf die Geometrie des Strahlenverlaufs besonders sorgfältig ausgerichtet werden. Zum Aufbau sind folgende Schritte notwendig:

#### Laseroptik-Grundplatte und Laser:

- Luftpolster aufpumpen.
- Laseroptik-Grundplatte (**a**) mit Luftpolster waagrecht auf stabilem Experimentiertisch aufstellen.
- Laser auf Laserträger montieren und am linken Rand der Grundplatte platzieren.

#### Vorjustierung:

- Kontrollieren, ob die Strahlteiler (**b**) und (**c**) das Laserlicht waagrecht reflektieren; dazu die Strahlteiler mit Optik-Fuß jeweils am anderen Ende der Laseroptik-Grundplatte in den Strahlengang stellen und den Lichtstrahl neben die Austrittsöffnung des Lasers reflektieren.
- Ggf. den Neigungswinkel der Strahlteiler und somit den Strahlverlauf mit Hilfe der zwei Schrauben am Stiel korrigieren.
- Planspiegel (**d**) und (**e**) mit Hilfe der oberen Justierschraube so einstellen, dass sie das Laserlicht waagrecht reflektieren; dazu die Planspiegel mit Optik-Fuß jeweils am anderen Ende der Laseroptik-Grundplatte in den Strahlengang stellen und den Lichtstrahl neben die Austrittsöffnung des Lasers reflektieren.

**Strahlteiler und Planspiegel:**

Hinweise:

Bei leicht verdunkeltem Raum ist die Justierung einfacher.

Neben den Hauptstrahlen treten durch Vielfachreflexionen noch weitere, sog. parasitäre Teilstrahlen mit geringerer Intensität auf. Diese werden später durch den Linsenhalter ausgeblendet. Die weiteren Angaben beziehen sich nur auf die Hauptstrahlen.

Reflektierter und transmittierter Teilstrahl sollten jeweils ähnliche Intensitäten haben. Bei Verwendung des variablen Strahlteilers (473 435) darauf achten, dass der Laserstrahl den Strahlteiler etwa in der Mitte trifft.

- Strahlteiler (**b**) mit Optik-Fuß gemäß Abb. 1 unter einem Winkel von  $45^\circ$  in den Strahlengang bringen; dabei die teildurchlässige Schicht des Strahlteilers am Besten dem Laser zuwenden.
- Planspiegel (**d**) so in den vom Strahlteiler (**b**) reflektierten Teilstrahl stellen, dass er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- Den Planspiegel durch Drehen des Optik-Fußes auf der Interferometer-Grundplatte so ausrichten, dass der Strahl um  $90^\circ$  abgelenkt wird und parallel zum transmittierten Teilstrahl verläuft.
- Planspiegel (**e**) entsprechend Abb. 1 in den transmittierten Teilstrahl gegenüber von Planspiegel (**d**) in den Aufbau fügen, so dass er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird. Zwischen Planspiegel (**e**) und Ende der Laseroptik-Grundplatte sollte mindestens 10 cm Abstand sein.
- Den Planspiegel ebenfalls durch Drehen des Optik-Fußes auf der Interferometer-Grundplatte so ausrichten, dass er den Teilstrahl um  $90^\circ$  ablenkt.
- Durchscheinende Schirme (**g**) und (**k**) so aufstellen, dass sie mittig getroffen werden.
- Strahlteiler (**c**) antiparallel zu Strahlteiler (**b**) aufstellen, so dass er von beiden Teilstrahlen unter einem Winkel von  $45^\circ$  getroffen wird, wobei die teildurchlässige Schicht dem Schirm (**g**) abgewandt ist.
- Planspiegel (**e**) parallel zur Längsseite der Laseroptik-Grundplatte verschieben und dabei so ausrichten, dass der von ihm reflektierte Teilstrahl mit dem vom Planspiegel (**d**) reflektierten Teilstrahl sowohl auf dem Strahlteiler (**c**) als auch auf dem durchscheinendem Schirm (**g**) zur Deckung kommt.
- Abstand der Schirme (**g**) und (**k**) zum zweiten Strahlteiler (**c**) verändern und überprüfen, ob die Reflexe der jeweiligen Teilstrahlen nahezu übereinander bleiben, also hinreichend parallel verlaufen.

**Nachjustierung:****a) Nachjustierung des senkrechten Strahlenverlaufs:**

Falls die Teilstrahlen in der senkrechten Ebene auseinanderlaufen:

- Höhe der Teilstrahlen über der Laseroptik-Grundplatte hinter jeder optischen Komponente exakt mit dem Holzmaßstab messen und ggf. die Neigung der Planspiegel und der Strahlteiler nachjustieren.
- Die jeweils intensivsten Strahlen der zwei auf den durchscheinenden Schirmen erscheinenden Reflexgruppen durch Nachjustieren der Bauelemente zur Deckung bringen.

- Abstand des Schirms (**g**) zum zweiten Strahlteiler (**c**) erneut verändern, um die Parallelität der beiden Teilstrahlen zu überprüfen.
- Ggf. die Nachjustierung wiederholen

**b) Nachjustierung des waagerechten Strahlenverlaufs:**

Die Teilstrahlen sollten den Strahlteiler (**c**) nahezu an der gleichen Stelle verlassen und sich auf dem durchscheinenden Schirm treffen. Falls die Teilstrahlen in der waagerechten Ebene auseinanderlaufen:

- Verlauf der Teilstrahlen von Strahlteiler (**b**) bis Strahlteiler (**c**) überprüfen und Ausrichtung der entsprechenden Bauteile korrigieren, falls der Strahlenverlauf nicht näherungsweise einem Rechteck entspricht.
- Planspiegel (**e**) erneut parallel zur Längsseite der Laseroptik-Grundplatte verschieben und dabei so ausrichten, dass der von ihm reflektierte Teilstrahl mit dem vom Planspiegel (**d**) reflektierten Teilstrahl sowohl auf dem Strahlteiler (**c**) als auch auf dem durchscheinendem Schirm zur Deckung kommt.

**Kugellinse:**

- Kugellinse (**f**) (mit kleiner Eintrittsöffnung des Linsenhalters zum Strahlteiler zeigend) zwischen Strahlteiler (**c**) und durchscheinendem Schirm (**g**) auf der Laseroptik-Grundplatte platzieren.
- Kugellinse (**h**) (mit kleiner Eintrittsöffnung des Linsenhalters zum Strahlteiler zeigend) zwischen Strahlteiler (**c**) und durchscheinendem Schirm (**k**) auf der Laseroptik-Grundplatte platzieren. Zwischen Strahlteiler (**c**) und Kugellinse (**h**) sollte ausreichend Platz für einen Polarisationsfilter frei bleiben.
- Kugellinsen seitlich und in der Höhe so ausrichten, dass sie von beiden Teilstrahlen axial durchlaufen werden.
- Evtl. den Strahlengang durch Nachjustieren der Planspiegel etwas korrigieren.

**Feinjustierung:**

Falls noch kein Streifenmuster auf den durchscheinenden Schirmen zu erkennen ist:

- Strahlengang durch Ausrichtung der Strahlteiler oder der Spiegel geringfügig verändern, dabei ggf. die Kugellinse nachjustieren.

Breite und Abstand der Interferenzstreifen sind um so größer, je besser die Parallelität der beiden Teilstrahlen zwischen Strahlteiler (**c**) und Schirm (**g**) gewährleistet ist:

- Durch kleine Veränderungen der Ausrichtung der Strahlteiler und der Spiegel das Interferenzmuster auf ein bequem beobachtbares Format einstellen.

Falls die Feinjustierung nicht zum Ziel führt:

- Die Interferometeranordnung nochmals von Anfang an justieren.

*Das Interferenzmuster ist wesentlich heller und somit einfacher zu beobachten, wenn der Laser auf 1 mW Ausgangsleistung umgeschaltet wird. Weil der Strahlengang dadurch geringfügig verändert werden kann, muss der Strahlenverlauf oder die Position der Kugellinse ggf. etwas nachjustiert werden.*

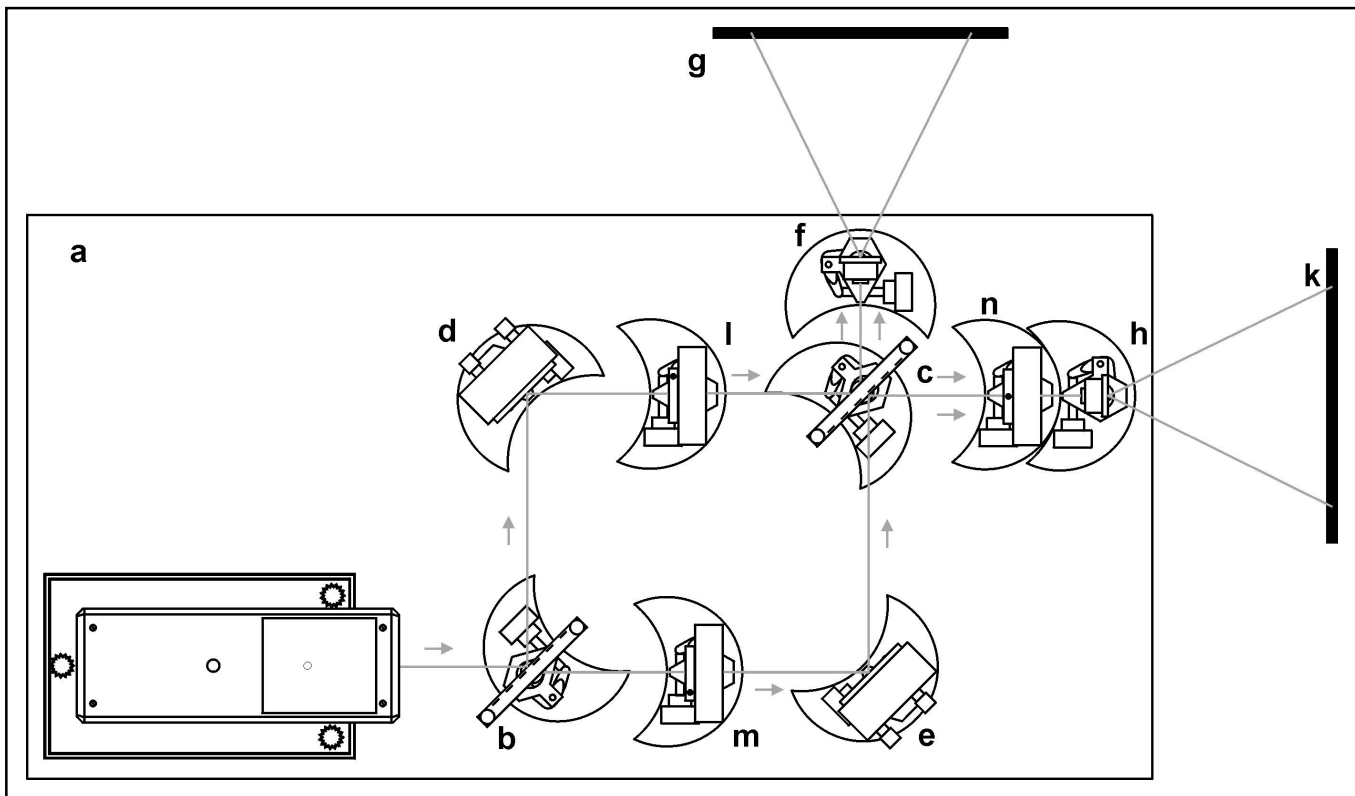


Abb. 2: Aufbau Quantenradierer

### Erweiterung zum Quantenradierer

- Einen Polarisationsfilter (**l**) so in den vom Planspiegel (**d**) reflektierten Teilstrahl stellen, dass er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- Polarisationsrichtung des Polarisationsfilters (**l**) auf  $+45^\circ$  stellen.
- Den zweiten Polarisationsfilter (**m**) so in den vom Strahlteiler (**b**) transmittierten Teilstrahl stellen, dass er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- Polarisationsrichtung des Polarisationsfilters (**m**) zunächst ebenfalls auf  $+45^\circ$  stellen.

Durch das Einbringen der Polarisationsfilter sind die Interferenzbilder auf den Schirmen (**g**) und (**k**) dunkler, da die Transmission der Polarisationsfilter nicht 100% beträgt, sonst aber unverändert.

### Durchführung und Auswertung

- Polarisationsrichtung des Polarisationsfilters (**m**) langsam auf  $-45^\circ$  stellen.

Beobachtung und Erklärung:

Der Kontrast der Interferenzstreifen wird immer kleiner; bei  $-45^\circ$  ist das Interferenzbild komplett verschwunden. Bei gekreuzten Polarisatoren kann der Weg der Photonen im Interferometer genau bestimmt werden, daher ist keine Interferenz möglich.

- Die Polarisationsrichtung des dritten Polarisationsfilters (**n**) auf  $0^\circ$  stellen.
- Polarisationsfilter (**n**) so zwischen Strahlteiler (**c**) und Kugellinse (**h**) stellen, dass er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- Polarisationsrichtung des Polarisationsfilters (**n**) langsam variieren.

Beobachtung und Erklärung:

Steht der Polarisationsfilter (**n**) auf  $0^\circ$ , so sind die Interferenzstreifen auf Schirm (**k**) wieder sichtbar, während auf Schirm (**g**) weiter keine Interferenz sichtbar ist. Der Polarisationsfilter (**n**) löscht die Weginformation, Interferenz ist daher wieder möglich.

Wird die Polarisationsrichtung des Polarisationsfilters (**n**) verändert, nimmt der Kontrast der Interferenz langsam ab. Bei  $\pm 45^\circ$  ist die Interferenz verschwunden. Durch die veränderte Richtung des Polarisationsfilters wird die Weginformation nicht mehr voll gelöscht. Nur noch ein Teil des Lichts kann interferieren.