

Markus Standfuß

Technische Universität Dresden

Quantenphysik

Koinzidenzmethode und Interferometer-Experimente

Dresden, 2024



Systematisierung Modelle

Photonen sind Quantenobjekte und zeigen Phänomene, die mithilfe des

<u> </u> modells -z.B. registriert Detektor ein „Klick“	oder	<u>Wellenmodells</u> -z.B. können Photonen <u> </u> zeigen
---	-------------	---

erklärt werden können.

Sie sind aber weder Teilchen noch Welle!

Beim Sprechen über Photonen nutzt man klassische Begriffe.

Systematisierung Modelle

Photonen sind Quantenobjekte und zeigen Phänomene, die mithilfe des

<u>Teilchenmodells</u> -z.B. registriert Detektor ein „Klick“	oder	<u>Wellenmodells</u> -z.B. können Photonen Interferenz zeigen
--	-------------	---

erklärt werden können.

Sie sind aber weder Teilchen noch Welle!

Leitfrage 3: Was kann man beobachten, wenn man optische Experimente mit Photonen durchführt?



Systematisierung Modelle

Photonen sind Quantenobjekte und zeigen Phänomene, die mithilfe des

<u>Teilchenmodells</u> -z.B. registriert Detektor ein „Klick“	oder	<u>Wellenmodells</u> -z.B. können Photonen Interferenz zeigen
--	-------------	---

erklärt werden können.

Sie sind aber weder Teilchen noch Welle!

Leitfrage 4: „Entscheidet“ das Photon vorher, ob es Phänomene zeigt, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können?

Delayed-Choice

Aufgabe 1:

- a) Lies dafür den angegebenen Text von Müller und fasse die relevanten Punkte so zusammen, dass du mithilfe von diesen das Thema vorstellen kannst.
- b) Tausche dich mit deinem Gruppenpartner über die Ergebnisse aus.
- c) Ein Paar stellt seine Ergebnisse vor.

Delayed-Choice

Aufgabe 1:

- a) Lies dafür den angegebenen Text von Müller und fasse die relevanten Punkte so zusammen, dass du mithilfe von diesen das Thema vorstellen kannst.
- b) Tausche dich mit deinem Gruppenpartner über die Ergebnisse aus.**
- c) Ein Paar stellt seine Ergebnisse vor.

Delayed-Choice

Aufgabe 1:

- a) Lies dafür den angegebenen Text von Müller und fasse die relevanten Punkte so zusammen, dass du mithilfe von diesen das Thema vorstellen kannst.
- b) Tausche dich mit deinem Gruppenpartner über die Ergebnisse aus.
- c) Ein Paar stellt seine Ergebnisse vor.**

Delayed-Choice

Merksatz:

Photonen „entscheiden“ nicht, welche Phänomene gezeigt werden. Sie sind Quantenobjekte und erst bei der Detektion treten Phänomene auf, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können.

Leitfrage 4: „Entscheidet“ das Photon vorher, ob es Phänomene zeigt, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können?



Polarisation

Leitfrage 5: Kann man eine „Wegmarkierung“ dem Photon geben und ihm die Information „Weg“ aufprägen?

Polarisation

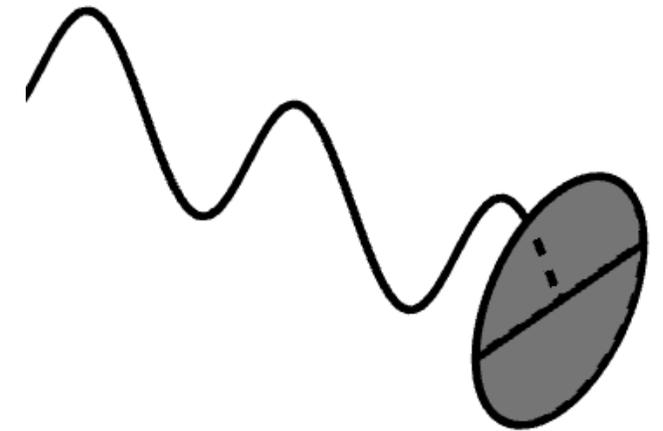
Bei Betrachtung von Licht im Wellenmodell:

Definition:

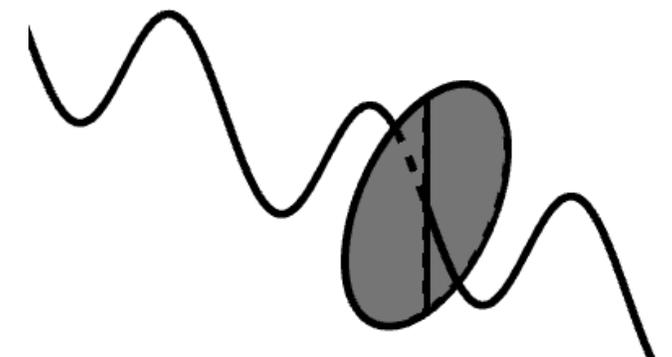
Polarisation bezeichnet die Schwingungsrichtung einer Welle im Wellenmodell.

Polarisationsfilter lassen nur Licht einer bestimmten Polarisation durch. Nach dem Polarisationsfilter hat das Licht die Polarisation des Filters!

Das funktioniert auch bei Photonen!



horizontaler (0°) Polarisationsfilter



vertikaler (90°) Polarisationsfilter

[1]

Polarisation

Bei Betrachtung von Licht im Wellenmodell:

Definition:

Polarisation bezeichnet die Schwingungsrichtung einer Welle im Wellenmodell.

Polarisationsfilter lassen nur Licht einer bestimmten Polarisation durch. Nach dem Polarisationsfilter hat das Licht die Polarisation des Filters!

Das funktioniert auch bei Photonen!



[4]

Polarisation - ein Polarisationsfilter (0°)

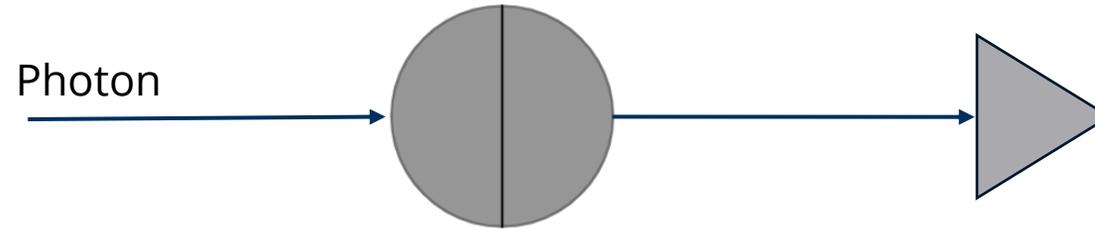


Bei Laserlicht beobachtet man:

- einen Lichtpunkt auf dem Schirm

Polarisation - ein Polarisationsfilter (0°)

Das funktioniert auch bei Photonen!



Im Experiment beobachtet man:

- das Photon wird **zufällig** transmittiert oder absorbiert
- Das geschieht mit einer bestimmten **Wahrscheinlichkeit**

Polarisation - zwei Polarisationsfilter (0°-0°)

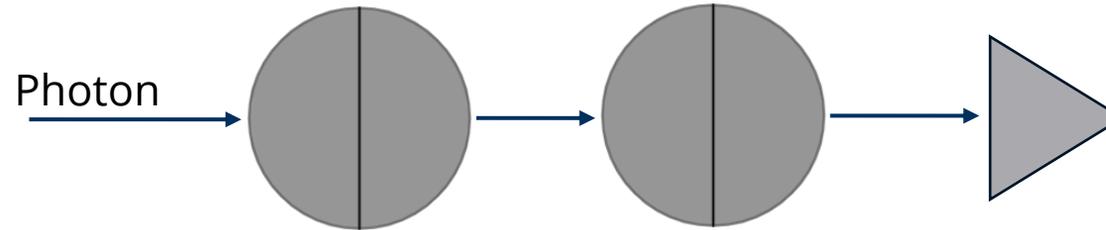


Bei Laserlicht beobachtet man:

- einen Lichtpunkt auf dem Schirm
- Dieser ist genauso hell wie bei dem Experiment mit einem Polarisationsfilter

Polarisation-zwei Polarisationsfilter (0°-0°)

Das funktioniert auch bei Photonen!



Bei zwei gleichen Polarisationsfiltern in Reihe beobachtet man:

- alle Photonen, die durch den 1. Polarisationsfilter transmittiert wurden, kommen auch durch den 2. → Photonen haben nach Passieren des Polarisationsfilters dessen Polarisation

Polarisation-gedrehter Polarisationsfilter (0°-45°)

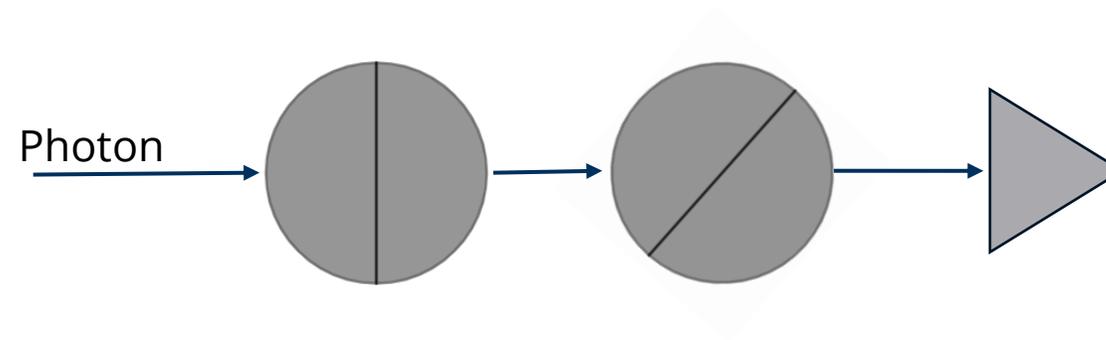


Bei Laserlicht beobachtet man:

- einen Lichtpunkt auf dem Schirm
- Dieser ist dunkler als bei dem Experiment mit einem Polarisationsfilter

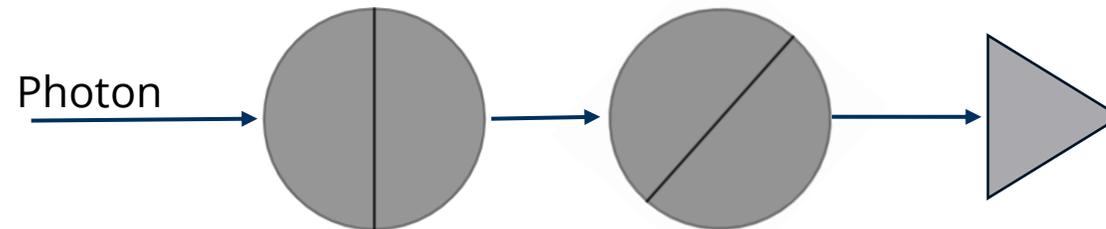
Polarisation-gedrehter Polarisationsfilter (0°-45°)

Und was passiert hier?



Polarisation-gedrehter Polarisationsfilter (0°-45°)

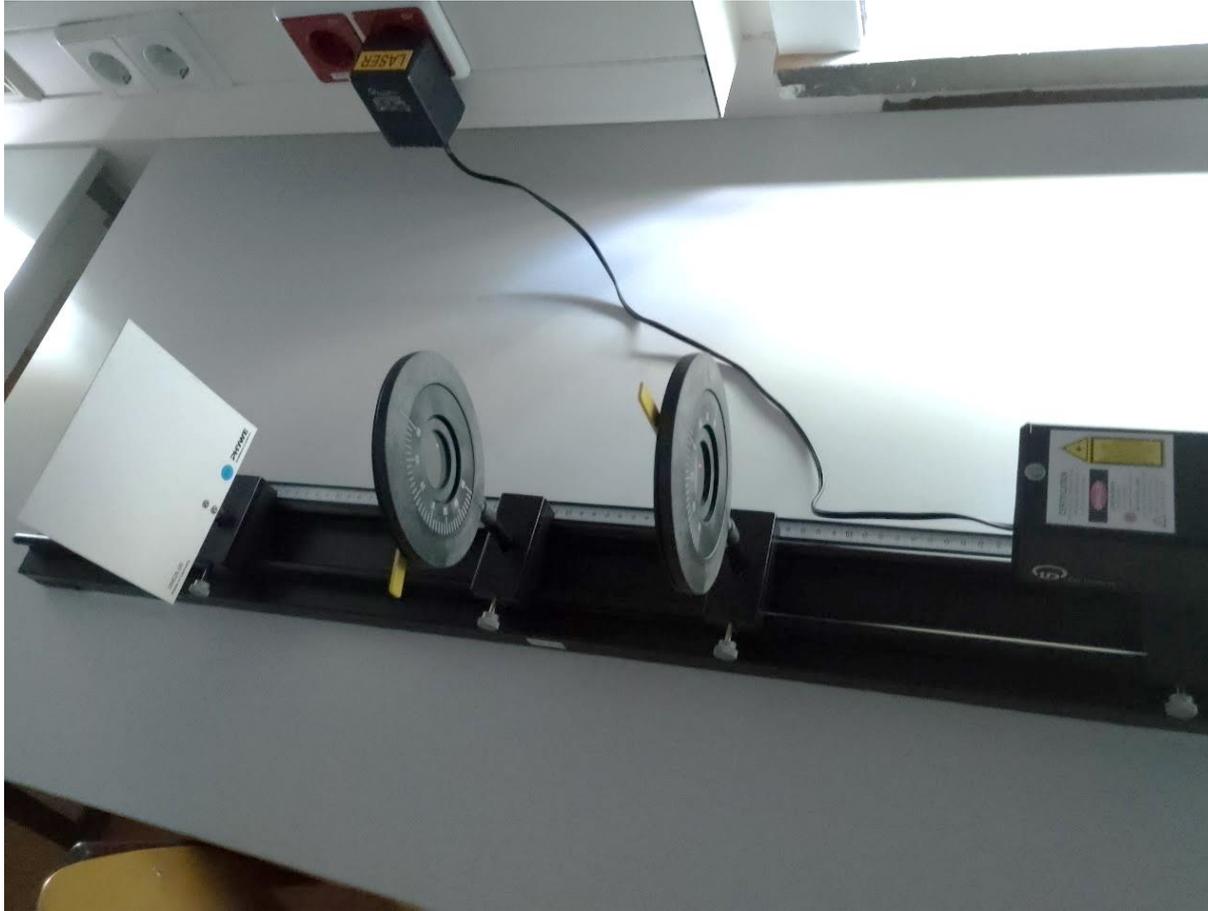
Und was passiert hier?



Beim Experiment beobachten wir, dass:

- einzelne Photonen an beiden Filtern transmittiert werden (mit bestimmter Wahrscheinlichkeit)
- Nach dem 2. Filter die Photonen 45° polarisiert sind

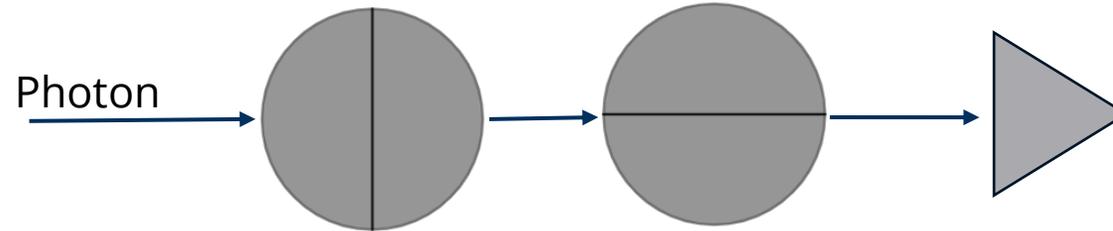
Polarisation-senkrechte Polarisationsfilter (0°-90°)



Bei Laserlicht beobachtet man:

- Keinen Lichtpunkt auf dem Schirm

Polarisation-senkrechte Polarisationsfilter (0°-90°)



Beim Experiment beobachten wir, dass:

- keine Photonen transmittiert werden

Aufgabe:

Vervollständige nun den Lückentext auf dem Arbeitsblatt.

Weginformation und Interferenz

Leitfrage 5: Kann man eine „Wegmarkierung“ dem Photon geben und ihm die Information „Weg“ aufprägen?

Aufgabe:

Ihr werdet in 2 Gruppen eingeteilt. Die eine untersucht das Experiment mit klassischem Licht, die andere mit Einzelphotonen.

- a) Zuerst untersucht jeder für sich das Experiment seiner Gruppe.
- b) Danach finden sich die beiden Gruppen jeweils zusammen und tauschen sich untereinander aus.
- c) Am Ende wird aus jeder Gruppe einer die Erkenntnisse und die Simulation der gesamten Klasse vorstellen.

Weginformation und Interferenz

Aufgabe:

Ihr werdet in 2 Gruppen eingeteilt. Die eine untersucht das Experiment mit klassischem Licht, die andere mit Einzelphotonen.

a) Zuerst untersucht jeder für sich das Experiment seiner Gruppe.

b) Danach finden sich die beiden Gruppen jeweils zusammen und tauschen sich untereinander aus.

c) Am Ende wird aus jeder Gruppe einer die Erkenntnisse und die Simulation der gesamten Klasse vorstellen.

interferometer.quantensimulation.de



Weginformation und Interferenz

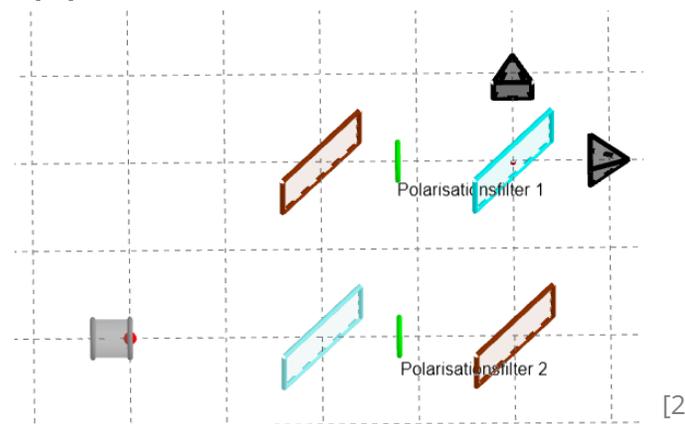
Aufgabe:

Ihr werdet in 2 Gruppen eingeteilt. Die eine untersucht das Experiment mit klassischem Licht, die andere mit Einzelphotonen.

a) Zuerst untersucht jeder für sich das Experiment seiner Gruppe.

b) Danach finden sich die beiden Gruppen jeweils zusammen und tauschen sich untereinander aus.

c) Am Ende wird aus jeder Gruppe einer die Erkenntnisse und die Simulation der gesamten Klasse vorstellen.



Weginformation und Interferenz

Aufgabe:

Ihr werdet in 2 Gruppen eingeteilt. Die eine untersucht das Experiment mit klassischem Licht, die andere mit Einzelphotonen.

a) Zuerst untersucht jeder für sich das Experiment seiner Gruppe.

b) Danach finden sich die beiden Gruppen jeweils zusammen und tauschen sich untereinander aus.

c) Am Ende wird aus jeder Gruppe einer die Erkenntnisse und die Simulation der gesamten Klasse vorstellen.

Weginformation und Interferenz

Polarisationsfilter haben den gleichen Winkel:

Klassisches Licht: man beobachtet Interferenzmuster auf den Schirmen (sowohl bei 0° - 0° und 90° - 90°)

Einzelphotonen: nur Detektor 2 klickt (sowohl bei 0° - 0° und 90° - 90°)

Polarisationsfilter sind senkrecht zueinander eingestellt:

Klassisches Licht: man beobachtet **keine** Interferenzmuster auf den Schirmen

Einzelphotonen: beide Detektoren klicken, zufällig der 1. oder der 2. (immer nur einer pro ausgesendetem Photon)

Weginformation und Interferenz



[4]

MZI mit 0° - und 90° -Polarisationsfilter

Weginformation und Interferenz

Aufgabe:

Ihr werdet in 2 Gruppen eingeteilt. Die eine untersucht das Experiment mit klassischem Licht, die andere mit Einzelphotonen.

- a) Zuerst untersucht jeder für sich das Experiment seiner Gruppe.
- b) Danach finden sich die beiden Gruppen jeweils zusammen und tauschen sich untereinander aus.
- c) Am Ende wird aus jeder Gruppe einer die Erkenntnisse und die Simulation der gesamten Klasse vorstellen.

Aufgabe: Vervollständige nun den Lückentext auf dem Arbeitsblatt.

Weginformation und Interferenz

Wenn man Interferenz beobachten will, kann man keine Wegmarkierung setzen.

Wenn man den Weg markieren will, tritt keine Interferenz auf.

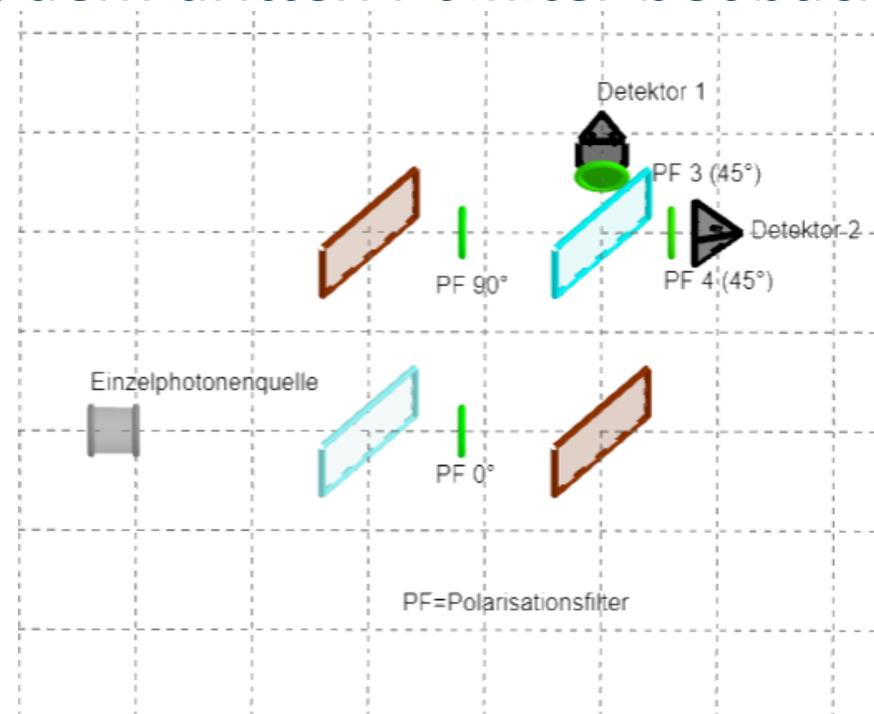
Definition:

Wegmarkierung und Interferenz schließen sich gegenseitig aus.

Quantenradierer

Aufgabe:

Mit deinem bisherigen Wissen: Stelle eine Vermutung auf, welches Phänomen man mit dem dritten Polfilter beobachten wird.



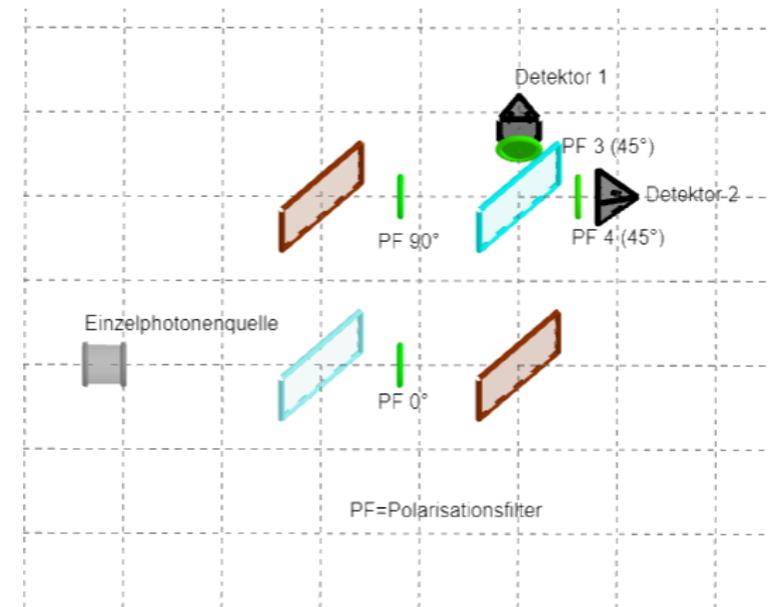
[3]

Quantenradierer

Aufgabe:

Mit deinem bisherigen Wissen: Stelle eine Vermutung auf, welches Phänomen man mit dem dritten Polfilter beobachten wird.

interferometer.quantensimulation.de

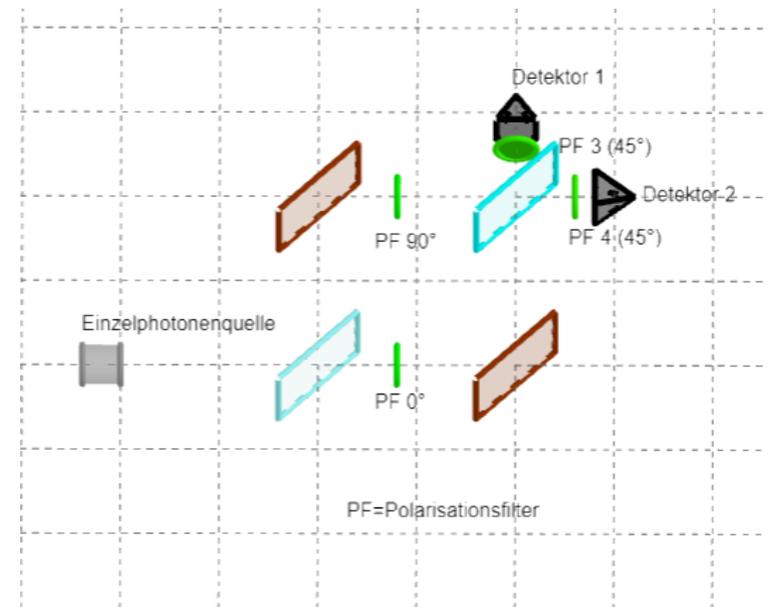


Quantenradierer

Aufgabe:

Überprüfe deine Vermutung mittels Simulation und erkläre das Phänomen. Warum heißt eine solche Anordnung „Quantenradierer“?

interferometer.quantensimulation.de



Quantenradierer

Aufgabe:

Mit deinem bisherigen Wissen: stelle eine Vermutung auf, welches Phänomen man mit dem dritten Polfilter beobachten wird.

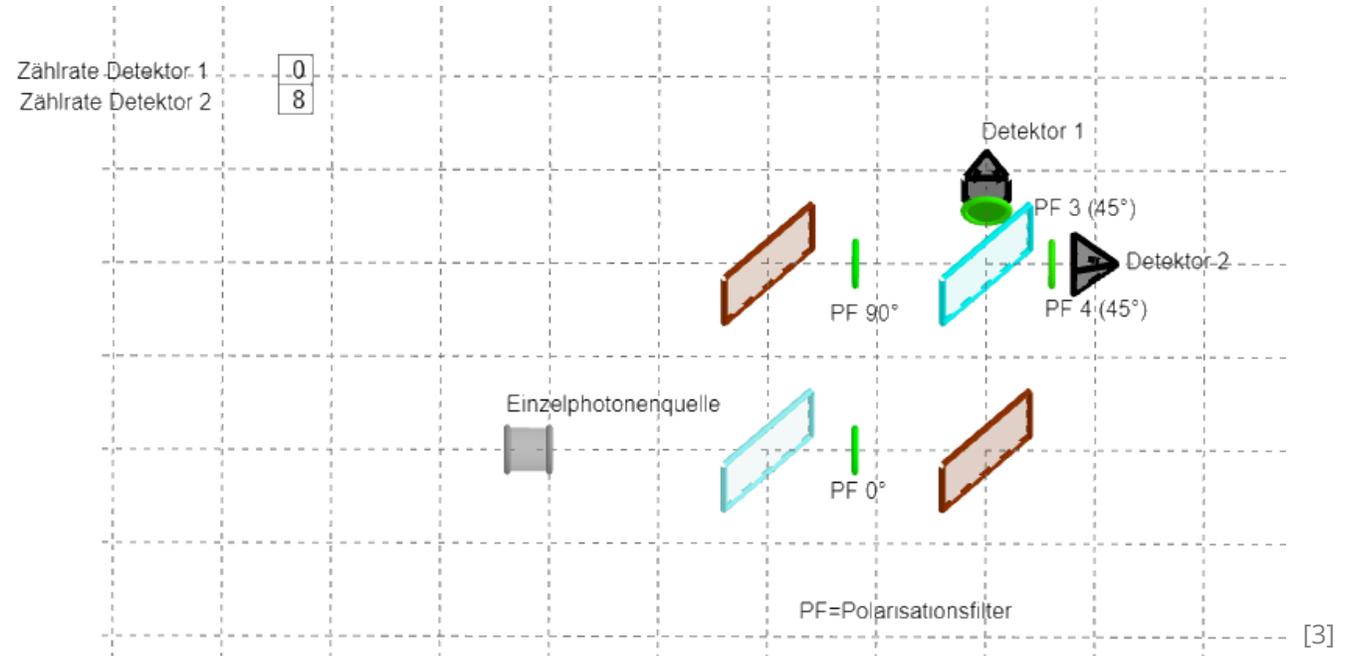
Mit dem dritten und vierten Polarisationsfilter kann man die Wegmarkierung wieder aufheben, da durch den 45°-Polarisationsfilter die 0°- und 90°-Markierung aufgehoben wird. Es ist also wieder Interferenz erkennbar (nur Klicks an einem Detektor).

Die Wegmarkierung wird also „ausradiert“.

Quantenradierer



[4]



[3]

Quantenradierer

Leitfrage 5: Kann man eine „Wegmarkierung“ dem Photon geben und ihm die Information „Weg“ aufprägen?



Zusammenfassung

Leitfrage 1: Wie können Photonen detektiert werden?



Leitfrage 2: Wie können Photonen erzeugt und nachgewiesen werden?



Leitfrage 3: Was kann man beobachten, wenn man optische Experimente mit Photonen durchführt?



Leitfrage 4: „Entscheidet“ das Photon vorher, ob es Phänomene zeigt, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können?



Leitfrage 5: Kann man eine „Wegmarkierung“ dem Photon geben und ihm die Information „Weg“ aufprägen?



Quellen

- 1: eigene GeoGebra-Simulation
- 2: eigene GeoGebra-Simulation
- 3: eigene GeoGebra-Simulation
- 4: eigenes Foto