

Übungen (2) zur Experimentalphysik IV

“Moderne Physik” Ss2006

Heiko Dumlich

May 3, 2006

3 Quantum-Eraser-Artikel

a+b)

Die Interferenz kann gemessen werden, indem man die Position der Spiegel variiert. Wenn man sich die Photonen als Wellenzüge vorstellt, verschiebt man so die Züge über-/in- und auseinander, womit man die Anzahl der gemessenen Photonen pro Zeit ($\sim$ Intensität) beeinflussen kann (siehe hierzu auch Phys-RevLett Vol.72 No.5 31.Jan 1994 S.631 FIG.3). Dies liegt in der Kohärenzlänge begründet, wobei die Abstände zwischen den Spiegeln innerhalb dieser liegen müssen, da sonst keine Interferenz auftreten kann. Da die Wellenzüge jedoch eine gewisse Länge besitzen (Kohärenzlänge), kann man die Spiegel auch ein Stück verschieben, wodurch die reflektierten bzw. die direkten Photonen dann etwas früher/später im Kristall aufeinander treffen und somit etwas phasenverschoben sind. Die Interferenz tritt auf, da Photonenpaare der zwei unterschiedlichen Wege miteinander interferieren. Die einen Photonenpaare, die beim ersten Durchgang durch den *LiIO₃ – Kristall* gewonnen und dann von einem Spiegel reflektiert werden, werden “reflektiert” genannt und die anderen, die beim zweiten Durchgang entstehen, indem der Pumpstrahl von einem Spiegel reflektiert wird und danach wieder auf den *Kristall* trifft, werden “direkt” genannt. Da keine “Welcher-Weg-Information” vorliegt, d.h. die Photonen sind voneinander nicht unterscheidbar, kommt es zur Interferenz.

Positioniert man nun einen Quantenmarkierer (in diesem Fall eine quarter-wave plate [QWP]) zwischen den Signal/Idler Spiegel und den nichtlinearen *LiIO₃ – Kristall*, so kann man durch die veränderte Polarisierung (von vertikal zu horizontal) des auf reflektierten Weg gewonnenen Photons “Welcher-Weg-Information” gewinnen. Da nun das auf zweitem Wege gewonnene Photon vertikal polarisiert ist und die Photonen somit unterscheidbar werden kommt es zu keinen Interferenzerscheinungen mehr, auch wenn man nicht durch einen Polarisationsfilter ausliest ob die Photonen vertikal oder horizontal polarisiert sind, da schon die Existenz der Möglichkeit des Auslesens der Information die Interferenz nach dem Komplementaritätsprinzip verbietet. Somit könnte man “Welcher-Weg-Information” also durch die Markierung durch Polarisierung und das an-

schließende auslesen mit einem Polarisationsfilter erhalten. Um die “Welcher-Weg-Information” wieder auszulöschen (quantum-erasure), benutzt man einen Polarisationsfilter von 45° , wodurch die Photonen wieder ununterscheidbar werden, da die Wahrscheinlichkeit der Filterung 50% beträgt (entweder sind die Photonen vertikal (90°) oder horizontal (0°) polarisiert bevor sie durch den Filter gehen). Eine weitere Möglichkeit ist es über die Kohärenzlänge der Photonen hinaus den Spiegel zu verschieben, wodurch man in den Wellenzug des nächsten Photons gelangt. Dann bestünde die Möglichkeit die Photonen zu unterscheiden durch eine geschickte Zeitmessung, daher verschwindet die Interferenz, auch obwohl die Messung aus technischen Gründen heutzutage noch nicht durchgeführt werden kann. Eine Radierung der Information kann durch die Verlängerung der Kohärenzlänge ermöglicht werden, wodurch die Photonen wieder ununterscheidbar wären.

Die Quantenmarkierung kann an sich als “reversibel” bezeichnet werden, da nach der “Informationsauslöschung” wieder Interferenz auftritt, jedoch nur bei den Photonen, an denen die Quantenmarkierung und -radierung durchgeführt wurde. Das andere Photon des erzeugten Photonenpaares kann nicht “wissen”, dass die Information gelöscht wurde und da es keine “Fernwirkung” zwischen den Teilchen trotz des verschränkten Zustandes gibt, kommt es bei diesen nicht zur Interferenz (vgl. PhysRevLett Vol.75 No.17 23.Oct 1995 S.3035 FIG.2). In diesem Punkt ist die Quantenmarkierung dann nicht “reversibel”, zudem müssten mehrere Vorgänge durchgeführt werden, um die wieder interferierenden Photonen in ihren Urzustand zurück zu versetzen, da sie anfangs vertikal polarisiert waren und nach der Markierung und Radierung nicht mehr, dies ist aber nur eine Definitionsfrage des Wortes “reversibel”, inwiefern man “reversibel” definiert als den Urzustand oder nur als Zustand der die gleichen Effekte hervorruft und ohne weitere Experimente (vertikale Filterung zum Beispiel) nicht unterscheidbar ist vom Urzustand.

Die optischen Wegphasen Φ_S, Φ_P, Φ_I sind miteinander über die Formel $\Delta\Phi = \Phi_S + \Phi_I - \Phi_P$ korreliert. Wie oben schon beschrieben kann man selbst entscheiden, welchen Spiegel bzw. welche Wegphase man verändern möchte, somit wird entweder beim verkürzen des Weges das Photon (Wellenzug) etwas früher ankommen oder beim verlängern des Weges etwas später. Somit kommt es trotzdem zur Überlagerung solange nicht die Kohärenzlänge überschritten wird, da sich dann die Wellenzüge verfehlen und es zu keiner Überlagerung mehr kommt und somit keine Interferenz mehr auftritt.

c)

Die Erzeugung von zwei Strahlen der Wellenlängen $\lambda_2 = 632.8nm$ und $\lambda_3 = 788.7nm$ aus der ursprünglichen Wellenlänge $\lambda_1 = 351.1nm$ erfüllt den Energiesatz, da $E_1 = E_2 + E_3$ erfüllt ist mit $E_i = \hbar\omega_i (i = 1, 2, 3)$ und wir schreiben können nach kürzen durch $\hbar$:

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$$

Nun gilt der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge von $\lambda \cdot \nu =$

$c \Leftrightarrow \frac{c}{\lambda} = \nu \Leftrightarrow \omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ mit $\omega = 2\pi\nu$, wodurch wir umrechnen können, einsetzen und kürzen durch $2\pi c$:

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}$$

Einsetzen der Wellenlängen liefert nun :

$$2.85 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m} = 1.58 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m} + 1.27 \cdot 10^{-3} \frac{1}{m}$$

Somit ergibt sich bei “genauem” elektronischen rechnen eine Abweichung von $4 \cdot 10^{-9} \frac{1}{m}$, welche durch die ungenaue Angabe der Wellenlängen begründet ist. Somit ist der Energiesatz erfüllt.

Die Wellenlänge bestimmt allgemein die Abstände der Interferenzmaxima über die Formel $d \sin \alpha = n\lambda$, wobei n die Ordnung angibt. Somit folgt für die Abstände $\sin \alpha = \frac{n\lambda}{d}$. Eine höhere Wellenlänge müsste also einen höheren Abstand der Interferenzmaxima hervorrufen, da die Wellenlänge und Frequenz umgekehrt proportional sind, ruft eine niedrigere Frequenz einen höheren Abstand hervor.

Es kann keine “Welcher-Weg-Information” aus den unterschiedlichen Frequenzen gewonnen werden, da ihre Photonen eine “Vorzugsrichtung” besitzen und nur unter einem bestimmten Winkel austreten aus dem Kristall. Somit überlagern sich immer Photonen gleicher Frequenz. Für die Ergebnisse des Experimentes ist die Information der Interferenzmaxima Abstände unwesentlich, es geht darum festzustellen, ob Interferenz auftritt oder nicht. Daher ist die verschiedene Frequenz der Photonen irrelevant.

d)

Die Kohärenzlänge kann über das verschieben der Spiegel bestimmt werden. Wenn man zwei Spiegel (Idler/Signal) auf der gleichen Entfernung zum Kristall lässt und den dritten (Pump) so weit wegschiebt, dass keine Interferenz mehr auftritt, hat man die Kohärenzlänge gefunden, wobei zu beachten ist, dass ein Photon Hin- und Rückweg zwischen Kristall und Spiegel zu durchqueren hat und somit der bestimmte Abstand mit zwei multipliziert werden muss.

Die Verlängerung der Kohärenzlänge wird durch einen Interferenzfilter erreicht, der nur eine kleinere Bandweite durchlässt, somit wir ΔE verringert und da ΔE und Δt komplementäre Größen sind ($\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$) und die Kohärenzlänge durch $\Delta t \cdot c$ bestimmt wird, vergrößert die Verringerung von ΔE auch automatisch Δt und somit auch die Kohärenzlänge.

Die spektralen Breiten der Wellenpakete müssen abnehmen, da ΔE verringert wird.

e)

Die “Interferenzkurven” müssen wenn man sie addiert wiederum keine Interferenz ergeben, da keine Information gelöscht oder hinzugefügt wird. Die Filterung liegt bei 45° und -45° (Abstand 180°), wodurch wir eine Verstärkung der

horizontalen bzw. vertikalen Komponente erhalten, daher sind die Coincidence-Messungen auch um $\pi(180^\circ)$ phasenverschoben.

4 Komplementarität und Heisenbergsche Unschärferelation

Die Heisenbergsche Unschärferelation wird in diesen Experimenten “umgangen” indem zwei Photonenpaare erzeugt werden, wobei nur an einem von diesen eine Messung stattfindet (z.B. am reflektierten und direkten Idlerphoton, die aus den zwei Photonenpaaren entstanden sind), die zudem verschränkt sind und anscheinend wechselwirken, wodurch auch nicht die Ensemble-Interpretation (s.Wikipedia Heisenbergsche Unschärferelation (Version vom 1.Mai 2006)) angewandt werden kann. Es wird keine gleichzeitige Messung von zwei komplementären Variablen an einem Objekt durchgeführt. Somit gilt also die Heisenbergsche Unschärferelation für diesen Fall nicht. Das Komplementaritätsprinzip scheint fundamentaler zu sein, da die Interferenz der Partner-Photonen aus den anderen Photonenpaaren (die anderen zwei Photonen, die auf direktem und reflektiertem Weg entstanden sind) auch verschwindet, obwohl keine Markierung an diesen stattfindet, die einzige Begründung dafür kann das Komplementaritätsprinzip liefern, da ja die Heisenbergsche Unschärferelation nicht gilt. Zudem bleibt der Zustand der “nicht-Interferenz” erhalten, auch wenn man die Markierung an den anderen Photonen wieder löscht. Dies ist damit begründbar, dass es keine Fernwirkung zwischen den Photonen gibt und somit die (z.B. Signal) Photonen nicht “wissen”, dass es keine “Welcher-Weg-Information” mehr gibt, sonst wäre überlichtschneller Informationstransport möglich. Somit erkennt man, dass ein Unterschied zwischen der Heisenbergschen Unschärferelation und dem Komplementaritätsprinzip existiert. Dieser ist hauptsächlich, dass die Heisenbergsche Unschärferelation von einer Messung von zwei komplementären Variablen ausgeht bzw. die physikalische Realität in einer Formel so beschreibt, dass man zwei Größen nur mit einer bestimmten komplementären Genauigkeit messen kann. Das Komplementaritätsprinzip geht weiter, in dem Sinne, dass es nicht nur eine Formel darstellt, sondern eine Aussage über die physikalische Realität macht. Es gilt, dass wenn man eine der komplementären Größen exakt kennt eine Aussage über die andere unmöglich ist und “alles” herauskommen könnte. Eine Verallgemeinerung der Heisenbergschen Unschärferelation könnte erreicht werden, indem man von einer Messung Abstand nimmt und davon ausgeht, dass das Wissen über den Wert einer der Größen die Kenntnis des Wertes der anderen ausschließt. Es muss nicht einmal gemessen werden, zudem auch nicht zur selben Zeit versucht werden beides zu bestimmen.