Eine neue Debatte zur Ontologie von Photonen

Matthias Rang

Dass die Vorstellung von lokalisierten Photonen, die von der Lichtquelle zu einem lichtempfindlichen Detektor unterwegs sind, im Falle von quantenoptischen Experimenten zu widersprüchlichen Folgerungen führen kann, ist seit Jahrzehnten bekannt. Mit dem Titel «Asking photons where they have been» wurde kürzlich ein überraschendes Experiment beschrieben, das auch für ein klassisch interpretierbares Interferenzexperiment, wie es in dem Artikel beschrieben wird, eine ähnliche Aussage macht (*Danan et al.* 2013). Seit der Veröffentlichung gibt es um die Interpretation der Ergebnisse eine anhaltende Kontroverse (*Salih* 2015, *Saldanha* 2014, *Potoček & Ferenczi* 2015, *Bartkiewicz et al.* 2015, *Vaidman et al.* 2015, *Vaidman* 2016).

Ein Interferenzexperiment...

Das beschriebene Experiment besteht neben Detektor und Beleuchtung durch einen Laser nur aus einem Mach-Zehnder-Interferometer mit einem zusätzlichen kleineren Mach-Zehnder-Interferometer, das in einen Arm des grösseren eingesetzt wurde (vgl. Abb. 1 (a)). Eine Besonderheit ist, dass alle verwendeten Spiegel um ihre horizontale Achse ganz leicht in Schwingungen versetzt werden. Als Folge schwingt der von den Spiegeln reflektierte Laserstrahl seinerseits auch mit der Frequenz der Spiegelschwingung auf und ab.[1] Diese Schwingung ist im Experiment zu klein und zu schnell, um sie mit blossem Auge sehen zu können, kann jedoch mit einer horizontal geteilten Detektorfläche detektiert werden: die leichte Auf- und Abbewegung, die der Laserstrahl auf der geteilten Detektorfläche ausführt, erzeugt in der Differenz der elektrischen Signale der beiden Detektorhälften eine Schwingung, die der Schwingung des Laserstrahles proportional ist.[2]

1 Dies kann man etwa mit einem kleinen Handspiegel und seinem durch eine Kerze hervorgerufenen Reflex an der Wand oder auch am Sonnenreflex des Deckglases einer Armbanduhr beobachten.

2 Auch dies kann man sich aus der Geometrie leicht klarmachen, denn der Laserstrahl erzeugt auf der Detektorfläche einen deutlich ausgedehnten Leuchtfleck, der seinerseits auf- und abwandert. Dies führt dazu, dass er abwechselnd die obere Detektorhälfte stärker ausleuchtet als die untere und dann wieder umgekehrt die untere stärker als die obere, was die Schwingung in der Differenz der beiden Detektorströme verursacht.

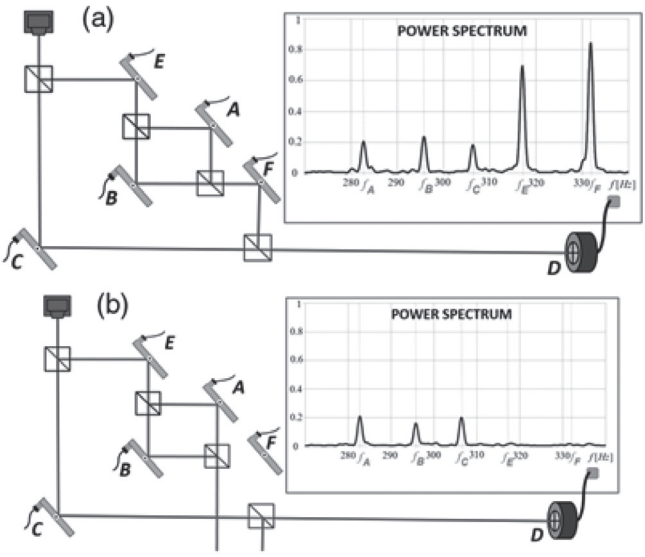

Abb. 1: (verändert nach *Danan et al.* 2013): Der optische Aufbau des Experiments von Danan et al. im Fall von konstruktiver Interferenz im kleinen Interferometer (a) und im Fall destruktiver Interferenz (b).
Mit den Buchstaben A, B, C, E und F sind die verwendeten Spiegel bezeichnet. D bezeichnet den Detektor, die Lichtquelle ist links oben dunkelgrau, die halbverspiegelten Strahlteiler durch die Quadrate mit einer Diagonalen wiedergegeben. Die nebenstehenden Graphen visualisieren die gefundenen Schwingungsfrequenzen in der Bewegung des Laserstrahls auf dem Detektor D.

... seine Variation und überraschende Resultate

Mit Hilfe einer Frequenzanalyse haben nun die Autoren des Experiments nachgewiesen, dass sämtliche Schwingungsfrequenzen der schwingenden Spiegel im so gemessenen Detektorsignal wiederzufinden sind, wenn das kleine Interferometer in Richtung des Detektors eine konstruktive Interferenz aufweist (Abb. 1 (a)). Da in diesem Fall alle Spiegel an der Beleuchtung beteiligt sind, ist dies nicht überraschend.

Durch eine geringfügige Verschiebung eines Spiegels des eingeschobenen kleinen Interferometers kann aber die konstruktive Interferenz im kleinen Interferometer in eine destruktive Interferenz verwandelt werden (Abb. 1 (b)). In der Folge wird die Detektorfläche nur noch über den Spiegel C beleuchtet (abgesehen von einem sehr kleinen Beitrag aus dem eingeschobenen Interferometer, der aufgrund einer nicht exakt realisierten destruktiven Interferenz weiterhin besteht). Man würde also erwarten, dass nur noch die Frequenz der Spiegelschwingung C in der Bewegung des Laserstrahls zu finden ist. Überraschenderweise ist dies nicht der Fall. Stattdessen findet