

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 blossen 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.

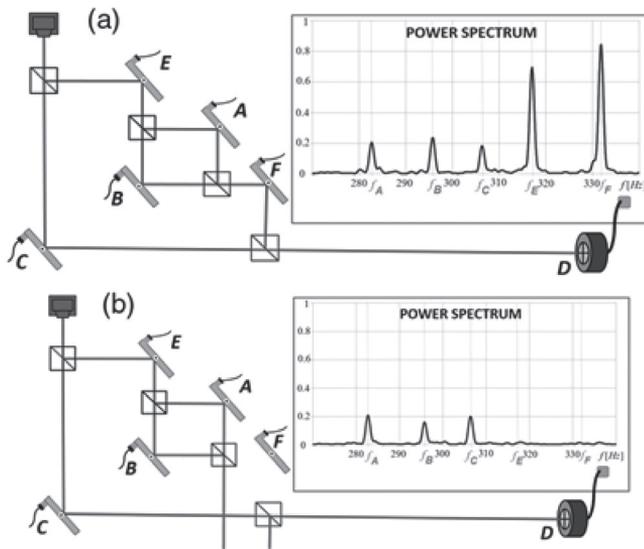


Abb. 1: (verändert nach Danan *et al.* 2013): Der optische Aufbau des Experiments von Danan *et al.* im Fall von konstruktiver Interferenz im kleinen Interferometer (a) und im Fall destruktiver Interferenz (b).

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

man die Schwingungsfrequenzen des Spiegels C und der Spiegel A und B. Wie ist es möglich, dass der Laserstrahl mit der Frequenz der Spiegelschwingung A und B schwingt, wenn er keine Berührung mit diesen Spiegeln hat?

Kontroverse Interpretationen der Ergebnisse

Die Autoren interpretieren diese Ergebnisse im Photonenbild des Lichts und schlussfolgern: einige Photonen waren im Innern des eingeschobenen Interferometers (sonst könnten sie nicht die Frequenzen der Spiegel A und B übertragen), aber sie haben das Interferometer weder betreten noch verlassen, da sie sonst auch die Frequenzen der Spiegel E und F, die in das Interferometer hinein und hinaus führen, übertragen müssten.³ Diese Schlussfolgerung aus den experimentellen Ergebnissen wurde in mehreren Kommentaren kritisch hinterfragt und hat zu der erwähnten Kontroverse geführt.

Da das Experiment als ein modifiziertes klassisches Interferenzexperiment betrachtet werden kann, sollte es sich auch mit der klassischen Optik, d.h. mit der Wellentheorie des Lichts erklären lassen. Darauf haben die Autoren des Originalbeitrags selbst hingewiesen und eine klassische Lösung skizziert. Im mathematischen Formalismus der Wellentheorie sind dann ausführliche Analysen der Ergebnisse vorgelegt worden, denen gemein ist, dass es an keinem Ort im Experiment irgendeine Diskontinuität der Lichtausbreitung gibt, wie sie sich als Konsequenz aus dem Schluss der Autoren ergibt (Salih 2015, Saldanha 2014, Potoček & Ferenczi 2015). Dieser Punkt ist besonders spannend, da auf den ersten Blick überhaupt nicht klar ist, *wie* mit einer kontinuierlichen Ausbreitung des Lichts erklärt werden kann, dass der detektierte Laserstrahl, der nur am Spiegel C reflektiert wird, neben der Schwingung in der Frequenz C mit gleicher Amplitude auch in den Frequenzen der Spiegel A und B schwingt (aber nicht mit den Frequenzen der Spiegel E und F).

Tatsächlich ergibt sich dies formal aus der klassischen Rechnung und beruht auf einer interferometrischen Verstärkung der nur unvollständig realisierten destruktiven Interferenz im kleinen Interferometer: die Schwingung der Spiegel A und B (aber nicht die Schwingung der Spiegel E und F) führt zu einer Modulation der destruktiv dominierten Interferenz, die ihrerseits dann die Strahlrichtung des Laserstrahls moduliert (Saldanha 2014).

3 “Some of them [the photons] have been inside the nested interferometer (otherwise they could not have known the frequencies f_A , f_B), but they never entered and never left the nested interferometer, since otherwise they could not avoid the imprints of frequencies f_E and f_F of mirrors E and F leading photons into and out of the interferometer.” (Danan et al. 2013)

Ein zweiter Punkt der Kontroverse bezieht sich auf eine theoretische Beschreibung der Ergebnisse, die von den Autoren des Originalbeitrags neben ihrer Schlussfolgerung im Photonenbild gegeben wurde. Die Autoren verwenden einen eher unüblichen Formalismus der Quantenphysik, der als «two-state vector formalism» bezeichnet wird und dessen Grundidee darin besteht, dass Licht durch zwei «Vektoren» beschrieben wird. Einer dieser Vektoren geht dabei von der Lichtquelle aus und entwickelt sich entlang der Abbildungswege in Lichtrichtung. Der andere geht vom Detektor aus und entwickelt sich entlang der Abbildungswege *entgegen* der Lichtrichtung bis zur Lichtquelle zurück. Die Autoren können mit ihm auf einfache Weise die Ergebnisse plausibel machen: Demnach wirken sich im Detektorsignal nur die optischen Komponenten aus, an denen beide Vektoren ungleich null sind (Abb. 2). An den Spiegeln E und F ist jeweils einer der Vektoren theoretisch null, womit die Ergebnisse deskriptiv richtig wiedergegeben sind.

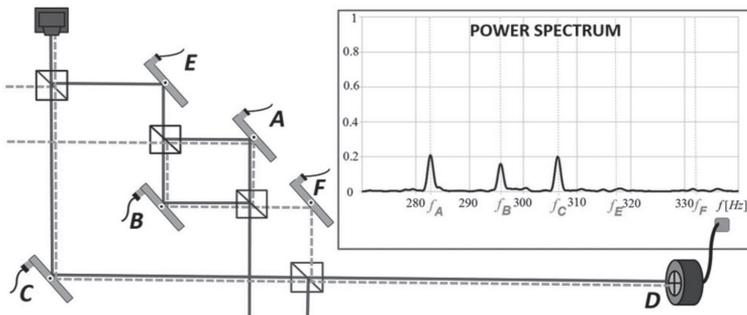


Abb. 2: (nach Danan *et al.* 2013): Der experimentelle Aufbau im Falle der destruktiven Interferenz im kleinen Interferometer (vgl. Abb. 1 (b)). Dunkelgrau und gestrichelt sind die Entwicklungswege der beiden Vektoren des two-state vector formalism angedeutet.

Mit einiger Vorsicht kann man die Grundidee des Formalismus auch in eine phänomenologische Form bringen: demnach wirken sich im Detektorsignal nur die Komponenten aus, die in der Laserbeleuchtung von einem Beobachter sowohl vom Ort der Lichtquelle, als auch vom Ort des Detektors gesehen werden können (Abb. 2). In dieser Formulierung wird deutlich, dass der «two-state vector formalism» durchaus einen von den Standard-erklärungen abweichenden Beschreibungsmodus aufweist, der sich formal durch die Symmetrisierung der Beschreibung bezüglich der Emissions- und Absorptionspunkte im Experiment auszeichnet.

Diese theoretische Beschreibung wurde in den Kommentaren dahingehend kritisiert, dass sie unnötig sei, da man die Ergebnisse sowohl klassisch als auch in dem Standardformalismus der Quantenmechanik verstehen könne (vgl. z.B. *Wieśniak* 2014). Die Kritik übersieht aber meines Erachtens, dass die Autoren offenbar auch gerade aufgrund ihrer Beschäftigung mit diesem Formalismus zu der Entwicklung dieses schönen Experimentes gekommen sind, dessen Ergebnisse gerade so überraschend sind, weil die gut etablierten Erklärungswerkzeuge keine vergleichbar intuitive Einsicht liefern (*Vaidman* 2013).⁴

Offene Fragen

Die Kontroverse um die Ergebnisse ist verständlich. Einerseits haben die Autoren des Beitrages ein interessantes Experiment vorgeschlagen und durchgeführt, das gleich nach seiner Veröffentlichung einige Aufmerksamkeit auf sich zog. Andererseits ist ihre Schlussfolgerung im Photonenbild des Lichts (die ja auch dem Titel zugrunde liegt), unabhängig von den anderen erwähnten Interpretationen, fragwürdig: ihr liegt ein klassisch-mechanisches Verständnis lokalisierter Photonen zugrunde. In diesem schliessen sie dann auf ein nicht-klassisches Verhalten der klassisch angenommenen Photonen.

Zu Recht wurde darauf hingewiesen, dass dieser Schluss weder zwingend, noch alternativlos ist. Doch scheint mir dies nicht an einem falschen Schlussverfahren in der vorliegenden Veröffentlichung zu liegen: Auf der Basis der verschiedenen Varianten des Experiments, die von den Autoren mit den jeweiligen Ergebnissen berichtet wurden, sollte der Schluss auch formal logisch durchführbar sein. Die fehlende Strenge der Aussage wäre demnach nicht in einer unzulässigen Folgerung, sondern in der Inadäquatheit des klassischen Photonenbilds für die in Frage stehenden Phänomene zu sehen, das als Prämisse des Schlusses dessen Stichhaltigkeit verhindert. Wissenschaftstheoretisch wäre es interessant dieser Frage genauer nachzugehen und darauf hin auch die anderen quasi-mechanischen Erklärungen zu untersuchen.

⁴ Man könnte hier auch andere Beispiele aufzählen, die zeigen das vergleichsweise grundlegende Experimente nur deshalb nicht ausgeführt und beschrieben wurden, weil sie innerhalb der etablierten Erklärungsansätze nicht naheliegen und übersehen werden. Werden aber solche Experimente vorgeschlagen, dann kann man gelegentlich ein sich wiederholendes Muster in den Reaktionen beobachten: die spontane Antwort auf die Frage, ob ein solches Experiment mit den genannten Beobachtungen möglich wäre, ist in der Regel ein klares Nein. Hat dann jemand das Experiment durchgeführt und die überraschenden Ergebnisse schliesslich auch in gängigen Theorien verständlich gemacht, dann werden die Ergebnisse leider von manchem Wissenschaftler als trivial angesehen, der sie zuvor noch für unmöglich hielt.

Da in einem erschienen Kommentar ein weiteres Experiment theoretisch diskutiert wurde (*Fu et al.* 2015), das die Autoren der Originalarbeit dazu anregte eine weitere Modifikation vorzuschlagen (*Ben-Israel et al.* 2017), verspricht die wissenschaftliche Debatte um das Experiment von Danan et al. und seine Interpretationen weiterhin spannend zu bleiben.

Literatur

- Bartkiewicz, K., Černoch, A., Dalibor, J., Lemr, K., Soubusta, J., Svozilik, J.* (2015): One-state vector formalism for the evolution of a quantum state through nested Mach-Zehnder interferometers. *Physical Review A* 91/1, S. 12103.
- Ben-Israel, A., Knips, L., Dziejwior, J., Meinecke, J., Danan, A., Weinfurter, H., Vaidman, L.* (2017): An Improved Experiment to Determine the “Past of a Particle” in the Nested Mach-Zehnder Interferometer. *Chinese Physics Letters* 34/2, S. 20301.
- Danan, A., Farfurnik, D., Bar-Ad, S., Vaidman, L.* (2013): Asking Photons Where They Have Been. *Physical Review Letters* 111/24, S. 240402.
- Fu, L., Hashmi, F. A., Jun-Xiang, Z., Shi-Yao, Z.* (2015): An Ideal Experiment to Determine the “Past of a Particle” in the Nested Mach-Zehnder Interferometer. *Chinese Physics Letters* 32/5, S. 50303.
- Potoček, V., Ferenczi, G.* (2015): Which-way information in a nested Mach-Zehnder interferometer. *Physical Review A* 92/2, S. 23829.
- Saldanha, P. L.* (2014): Interpreting a nested Mach-Zehnder interferometer with classical optics. *Physical Review A* 89/3, S. 33825.
- Salih, H.* (2015): Commentary: “Asking photons where they have been” – without telling them what to say. *Frontiers in Physics* 3, S. 47.
- Vaidman, L.* (2013): Past of a quantum particle. *Physical Review A* 87/5, S. 52104.
- Vaidman, L.* (2016): Comment on “Which-way information in a nested Mach-Zehnder interferometer”. *Physical Review A* 93/1, S. 17801.
- Vaidman, L., Danan, A., Farfurnik, D., Bar-Ad, S.* (2015): Response: Commentary: “Asking photons where they have been” – without telling them what to say. *Frontiers in Physics* 3, S. 48.
- Wieśniak, M.* (2014): Criticism of “Asking Photons Where They Have Been”. arXiv:1407.1739 (<http://arxiv.org/abs/1407.1739>)

Matthias Rang
Forschungsinstitut am Goetheanum
Hügelweg 59
CH - 4143 Dornach
matthias.rang@goetheanum.ch