

Anmerkungen zur „Welcher-Weg-Information“ im Quantenradierer

Ludger Hannibal
Cäcilienchule Oldenburg / Carl v. Ossietzky Universität Oldenburg
ludger.hannibal@email.de

22.10.2023

Einleitung

Eine der grundlegenden Eigenschaften der Quantenphysik ist die sogenannte Komplementarität, nach der es unmöglich ist, in einem Experiment herauszufinden, welchen von zwei (oder mehr) Wegen ein Quantenobjekt durch einen experimentellen Aufbau genommen hat, ohne dabei die durch die mehreren möglichen Wege möglicherweise entstehende Interferenz, insbesondere in Form von Interferenzmustern mit konstruktiver und destruktiver Interferenz zu zerstören; kurz gefasst: „Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster schließen sich aus.“ [1]

Als Beispiele werden oft Elektronen am Doppelspalt angeführt (nach Feynman [2]) oder der sogenannte Quantenradierer, zumeist als ein Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern, beispielsweise in [3, 4, 5, 6].

Dabei sind zwei grundlegend verschiedene Anordnungen zu unterscheiden: Im ersten Typ wird immer bereits auf den noch getrennten Wegen des Quantenobjekts durch die Apparatur eine Wechselwirkung herbeigeführt, also in den beiden räumlich getrennten Armen des Interferometers bzw. nach den Spalten des Doppelspalts, aber bevor die Teilzustände sich wieder räumlich überlagern. In Experimenten kann dadurch der Bereich der Wechselwirkung direkt identifiziert, und so eine Information über den Weg des Quantenobjekts zu erhalten werden, beispielsweise durch einen Lichtblitz oder durch ein nichtlinear erzeugtes Markerphoton. Im zweiten Typ werden durch unterschiedliche Wechselwirkungen in unterschiedlichen Bereichen nur die Teilzustände unterschiedlich „markiert“, beispielsweise durch eine „aufgeprägte“ Polarisationsinformation, um diese dann erst nach der erneuten Überlagerung im Ausgang des Interferometers bzw. auf oder vor einem Schirm auszulesen, bzw. auch nicht auszulesen, um zu zeigen, dass die Interferenz verschwindet, sobald es schon die prinzipielle Möglichkeit gibt, die Information über den Weg zu erhalten. Dies wird so formuliert:

„Die Markierung ist eine physikalische Eigenschaft, mit deren Hilfe man von jedem der auf dem Schirm auftretenden Objekte entscheiden könnte, durch welchen der beiden Spalte es gekommen ist.“ [6]

„Durch unterschiedlich eingestellte Polarisationsfilter sind die Wege unterscheidbar. Diese Unterscheidbarkeit führt zum Verlust der Interferenzfähigkeit.“ [3]

„Durch das Einbauen der Polarisationsfilter werden die Lichtwege im Interferometer unterscheidbar. Würde man ein einzelnes Photon durch den Aufbau schicken, könnte man anschließend durch Messung seiner Polarisation eindeutig sagen, welchen der beiden Arme im Interferometer es durchlaufen hat. Das Photon befindet sich nicht mehr im Überlagerungszustand aus verschiedenen möglichen Lichtwegen, sondern ist eindeutig auf einen Weg festgelegt.“ [4]

„Jedes Photon trägt nun eine Markierung, aus der wir zurückschließen können, welches Polarisationsfilter es passiert hat.“ [5]

In diesen Anmerkungen geht es ausschließlich um Betrachtungen zum zweiten Typ, bei dem die Weg-Information nicht schon in den räumlich getrennten Bereichen ausgelesen wird, sondern nachträglich durch Messung am überlagerten Zustand – zumindest im Prinzip – bestimmt werden soll. Ich möchte zeigen, dass die Behauptung, dass der überlagerte Zustand die „Welcher-Weg-Information“ enthält, so plausibel diese erscheinen mag, nicht haltbar ist. Diese Widerlegung ist aber nicht neu: In seinem Artikel „A very common Fallacy in Quantum Physics: Superposition, Delayed Choice, Quantum Erasers,

Retrocausality, and All That“ hat David Ellerman [7] bereits 2011 schlüssig argumentiert, dass ein Quantenradierer keine Information „radiert“, weil diese nie vorhanden war, sondern fälschlicherweise angenommen wird, dass sich ein Photon bereits vor der Messung in einem der beiden Teilzustände mit unterschiedlichen Polarisationsrichtungen befunden hat, anstatt, wie theoretisch richtig, davon auszugehen, dass immer ein Überlagerungszustand der beiden Möglichkeiten vorliegt und keine Zuordnung zu einem Teilzustand möglich ist.

Dies spiegelt sich aber nicht in aktuellen Schulbüchern oder allgemeinen oder didaktisch motivierten Darstellungen im Internet wider, was zeigt, dass sich die Sichtweise von Ellerman nicht allgemein durchsetzen konnte. Ich möchte nun versuchen, klärende Argumente zu dieser Diskussion beizutragen. Dabei beschränke ich mich auf das Mach-Zehnder-Interferometer mit eingebauten Polarisationsfiltern.

Grundlegende Annahmen zur Polarisation

Ich gehe von folgenden allgemeinen Begrifflichkeiten aus.¹

Quantenobjekte werden durch Zustände beschrieben, welche eine Lösung der zugehörigen Grundgleichung (Schrödinger, Maxwell, Dirac, ...) sind und auf Eins normiert werden. Messgrößen werden durch einen zugehörigen Operator beschrieben, dessen Eigenwerte die möglichen Messergebnisse sind. Die stochastische Deutung der Quantenphysik besagt, dass die Amplituden der normierten Eigenzustände (bzw. Eigenräume bei Entartung) die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die möglichen Messwerte angeben. Die Messung besteht aus Einzelereignissen; welcher der möglichen Eigenwerte gemessen wird, ist im Einzelnen zufällig, und es gibt keine weiteren verborgenen Variablen, welche zusätzliche Vorhersagen erlauben.

Die Polarisation (oder Spin) von Zuständen wird mathematisch durch einen Vektor beschrieben. Licht hat zwei mögliche Polarisierungen, horizontal (h) und vertikal (v) relativ zur Bewegungsrichtung, diese werden meist vereinfacht durch zweidimensionale Vektoren dargestellt und es wird (zulässigerweise) ignoriert, dass die Richtung eigentlich immer nur relativ zum Impuls ist, sich also bei Reflexion also absolut gesehen auch ändern kann.

Unterscheidbarkeit der Wege – Argumentative Widerlegung

Wichtig für die Welcher-Weg-Interpretation des Quantenradierers ist nun, dass angenommen wird, dass Photonen durch eine Polarisation als Markierung unterscheidbar werden. Betrachten wir dazu folgenden Standard-Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers.

¹ Ausführlicher unter: Hannibal, L. *Quantenphysik erläutert am M* <https://physik-lehren.de/?bereich=projekte&seite=mycards&refcode=d3VydTk1ODUjdXNlcmNvb3RlbnRfY2NhcmRzX3F1YW50ZW5waHlzaWs=#>

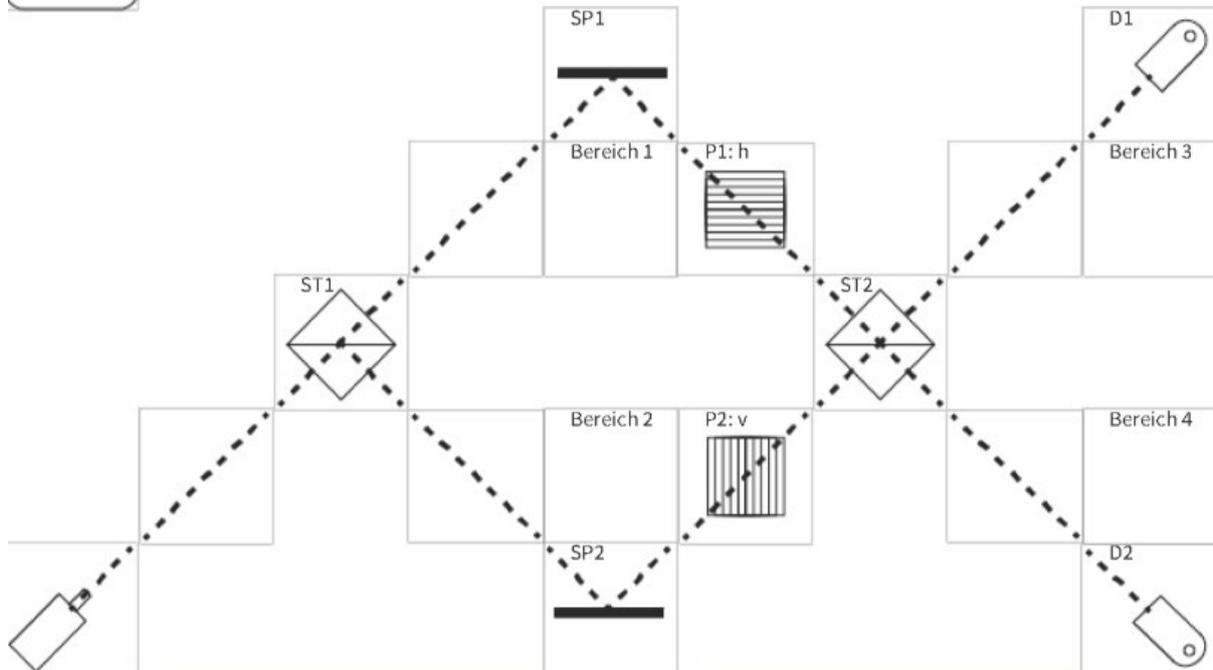


Abb 1. Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern in beiden Armen. Polarisationsrichtungen senkrecht zur Papierebene als Bewegungsrichtung²

Betrachten wir zunächst nur die optische Achse, gibt es zwischen den beiden Polarisationsfiltern P1 (h) und P2 (v) und dem Strahlteiler ST2 zwei räumlich getrennten Teilzuständen mit unterschiedlichen Polarisierungen, die sich zum Gesamtzustand überlagern, nach dem zweiten Strahlteiler überlagern sich die jeweils reflektierten und transmittierten Teilzustände aus der optischen Achse so, dass der Zustand zu Detektor D1 45° polarisiert ist, der zu D2 aufgrund der unterschiedlichen Phasenverschiebung entlang der beiden Wege -45° . Ohne die Polarisationsfilter käme es bei D1 zu konstruktiver, bei D2 zu destruktiver Interferenz. Betrachtet man auch die Wege abseits der optischen Achse, wären keine Interferenzmuster zu sehen, man könnte aber komplementäre Muster durch einfügen von $\pm 45^\circ$ -Filtern sichtbar machen, siehe Abb. 2.

² Grafik erstellt mit dem „Interferometer-Baukasten“ <https://physik-lehren.de/?bereich=projekte&seite=mysim&refcode=d3VydTk1ODUjdXNlcmNvbniRlbnRfc2ltdWxhdGlvbmVuX216aQ==&code=c652143b6a8935>

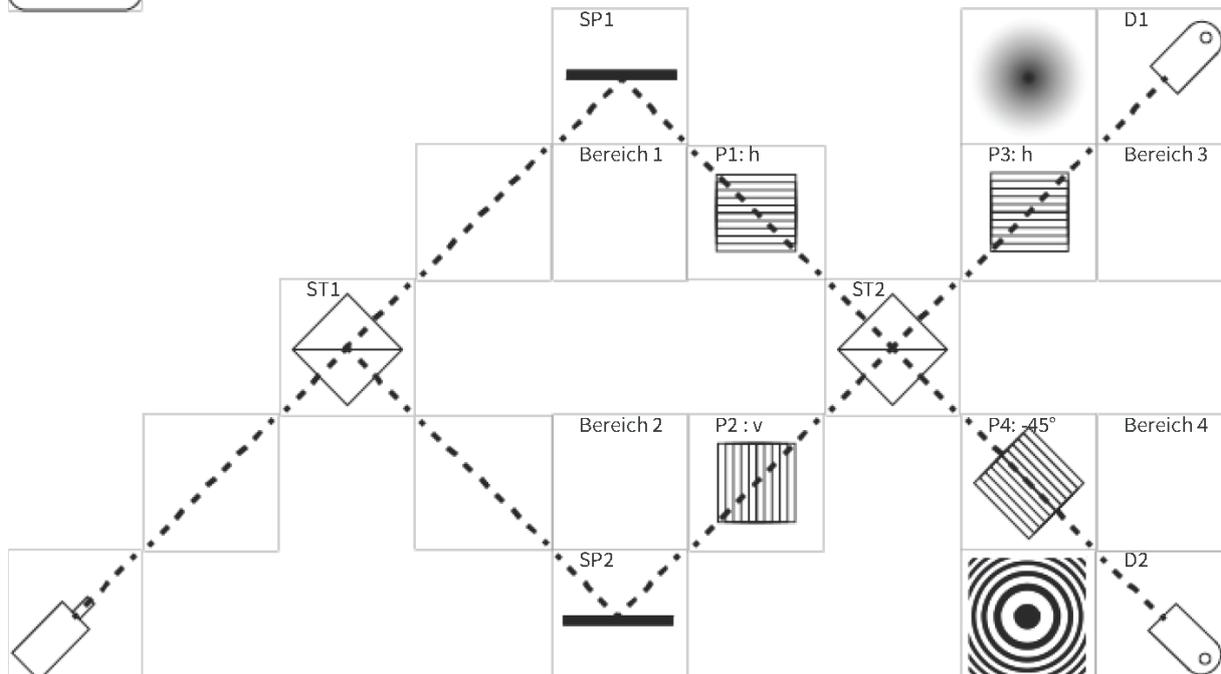


Abb. 2. Ein horizontaler Polarisationsfilter P3 führt zu keinem Interferenzmuster, wie wenn es den Bereich 2 nicht gäbe, ein -45° -Filter P4 dagegen schon, wie wenn es P1 und P2 nicht gäbe. Dies wird mit dem Vorhandensein oder Löschen der Weg-Information erklärt.

Fügt man nun vor D1 einen vertikalen/horizontalen Polarisationsfilter P3 hinzu, siehe Abb. 2, und gelangt nun ein Photon durch diesen zum Detektor, so wird angenommen, dass man dadurch die Information gewonnen hat, dass dieses zuvor den Weg mit dem vertikalen/horizontalen Polarisationsfilter genommen haben muss. Diese Annahme erscheint so plausibel, dass sie in vielen Quellen nicht weiter ausgeführt wird. In der ausführlicheren Darstellung [5] heißt es dazu:

„Überlegen wir uns, was wir folgern können, wenn wir ein senkrecht polarisiertes Photon auf dem Schirm nachweisen. Es muss offenbar auf Weg A zum Detektor gekommen sein. Weg B scheidet aus, denn das Polarisationsfilter ist dort waagrecht eingestellt und würde kein senkrecht polarisiertes Photon durchlassen. Durch Messung der Polarisationsrichtung können wir für jedes einzelne Photon entscheiden, ob es Polarisationsfilter A oder B passiert hat. So wird die Eigenschaft ‚Weg‘ durch die Polarisation markiert.“

Es wird also davon ausgegangen, dass dem einzelnen Photon eine Polarisationsrichtung zugeschrieben werden kann, und ein Photon nicht nacheinander durch zwei senkrecht zueinander ausgerichtete Polarisationsfilter gelangen kann. Dies erscheint plausibel, und ist richtig, falls zwischen den beiden Filtern nichts weiter geschieht, aber hier wird unausgesprochen zusätzlich angenommen, dass der Strahlteiler und die durch diesen entstehende Überlagerung mit einem weiteren Teilzustand keine Auswirkung auf die zugeschriebene Polarisationsrichtung hat.

Würde man rein zustandsorientiert argumentieren, so würde man davon ausgehen, dass ausschließlich die Polarisation des Zustands hinter ST2 Strahlteiler für das Passieren des Polarisationsfilters maßgeblich ist, dementsprechend aufgrund der 45° -Polarisation jedes einzelne Photon mit Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ durch einen vertikalen/horizontalen Polarisationsfilter gelangt, also von beiden Wegen gekommen sein kann und man keine Welcher-Weg-Information erhalten hat.

Hier die beiden Annahmen im Vergleich.

| Z – Zustandsbasierte Annahmen | W – Welcher-Weg-Information Annahmen |
|---|---|
| (1) Die Polarisation ist eine Eigenschaft des Zustands. (2) Jedes Photon in einem Zustand gelangt durch einen Polarisationsfilter mit derselben Wahrscheinlichkeit, welche durch das Amplitudenquadrat der Projektion des Zustands auf die Polarisationsrichtung gegeben wird. | (1) Photonen können in einer Richtung polarisiert sein. ³ (2) Ein Photon mit einer Polarisation wird von einem Polfilter mit dazu senkrecht stehender Richtung nicht durchgelassen, von einem parallel stehenden Polfilter immer. (3) Photonen, die sich im selben Zustand befinden, können unterschiedlich polarisiert sein. (4) Ein Strahlteiler ändert die Polarisation eines Photons nicht. |

Bevor ich zeige, dass W in der Summe aller vier Teilannahmen nicht haltbar ist, folgende Betrachtungen zuvor.

Trifft W(1) zu, so muss man sich fragen, wie man das nachweisen kann. In [3, S. 403] wird mit zwei nacheinander aufgebauten Kalkspat-Kristallen als Polarisatoren argumentiert: „Photonen besitzen nach dem Durchgang durch einen Polarisator die Eigenschaft der Polarisation, da sie nach dem Verlassen eines Polarisators in einem zweiten Polarisator die Polarisationsrichtung bestätigen“. Allerdings führt Annahme Z zu genau demselben Ergebnis: in dem Fall, dass alle Photonen dieselbe Polarisation haben, welche dann die des Zustands sein muss, gibt es keinen Unterschied. Auch von einem Polarisationsfilter muss man annehmen, dass dieser die Polarisation eines durchgelassenen Photons auf seine Richtung festlegt: Würde man annehmen, dass dies nicht der Fall ist, also z.B. 45° polarisierte Photonen durch einen horizontalen Filter zwar nur zu 50%, aber unverändert, durchgelassen würden, müsste ein nachfolgender 45°-Filter diese dann alle durchlassen, was nicht der Fall ist. Dagegen sollte ein Strahlteiler die Polarisation eines Photons unverändert lassen, obwohl dieser in den beiden Ausgängen unterschiedlich polarisierte Zustände erzeugen kann. Würde ein Strahlteiler die Polarisation neu festlegen, würde die ganze Argumentation hinfällig und auf Z reduziert.

Des Weiteren kann man sich fragen, ob die Eigenschaft Polarisation auch in anderen Fällen als bei parallel oder senkrecht gestellten Filtern relevant für das Durchlassen ist.

Dazu kann man folgenden Aufbau betrachten, siehe Abb. 3, in dem der Polarisationsfilter vor D1 auf einen Winkel φ gedreht wird und zusätzlich in den beiden Armen Graufilter eingebaut werden, sodass die Amplituden im Verhältnis $\cos(\varphi)$ zu $\sin(\varphi)$ stehen. Das bewirkt, dass der Zustand nach dem Strahlteiler in Bereich 3 im Winkel φ polarisiert wird und deshalb alle Photonen am φ -Filter durchgelassen werden, egal welchen Weg sie genommen haben, dagegen kein Photon durch einen $\varphi + 90^\circ$ -Filter durchgelassen wird.

³ „... besitzen [...] die Eigenschaft der Polarisation“, [3, S.403]

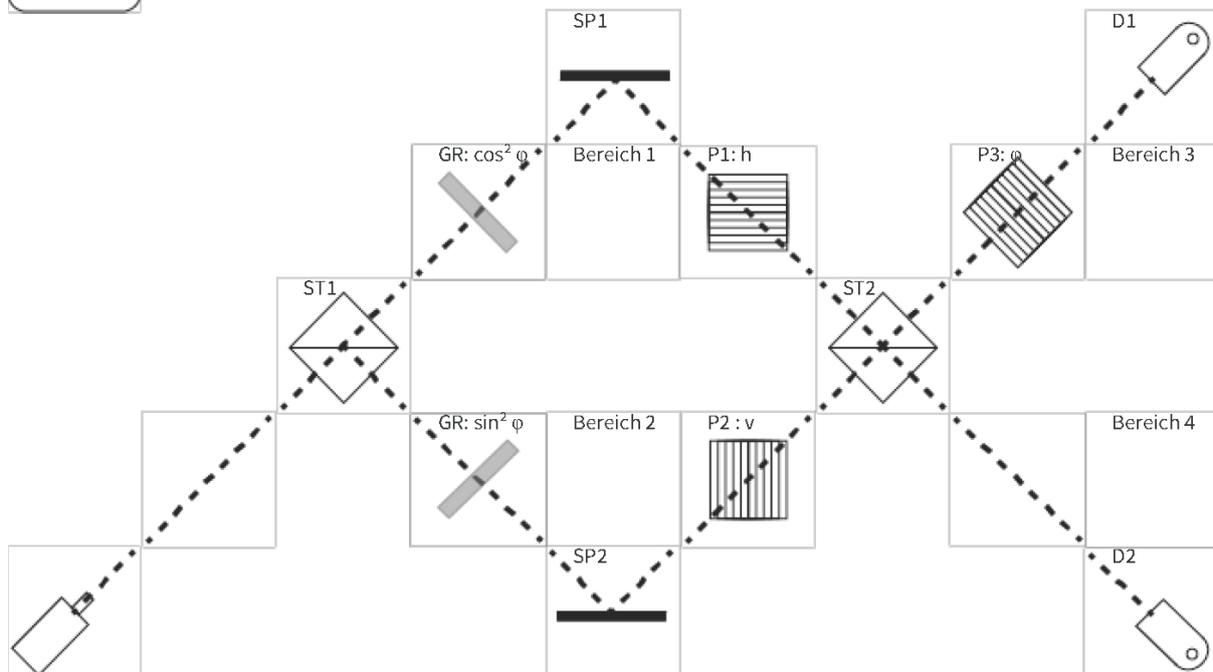


Abb. 3 Ein Polfilter P3 mit Winkel φ vor dem Detektor D1 wird durch zwei Graufilter so ergänzt, dass der Zustand nach ST2 Polarisationsrichtung φ hat und deshalb alle Photonen auf der optischen Achse dort durchlässt.

Also ist die Eigenschaft Polarisation völlig untauglich dafür, eine Vorhersage für solche Polarisationsfilter zu machen, die nicht parallel oder senkrecht zu dieser Polarisation stehen – so plausibel $W(2)$ zu sein scheint, in Kombination mit $W(4)$ wird es offenbar zu einer singulären Aussage, die nur für zwei der unendlichen vielen möglichen Winkel gilt. Dies würde auch schon bedeuten, dass, angenommen der Filter P3 in Abb. 2 wäre nur um einen geringen Bruchteil eines Grades gegen die horizontale Richtung verdreht, die Wahrscheinlichkeit aus dem Zustand berechnet werden müsste, weil sie nicht Null ist, und sie deshalb für beide Wege ungefähr $\frac{1}{2}$ wäre. Schon aus Gründen der Stetigkeit müsste sie bei horizontaler Richtung dann genau $\frac{1}{2}$ sein. Da ein solches mathematisches Argument aber kaum zwingend erscheint, nun ein am Experiment orientiertes Argument; dazu folgendes.

Es soll nun noch mit einem gedanklichen Aufbau gezeigt werden, dass $W(2)$ in Kombination mit $W(4)$ tatsächlich im Experiment zu widerlegen ist.

Dazu ersetzen wir im Aufbau in Abb. 2 den horizontalen Filter durch ein eigenes Mach-Zehnder-Interferometer, in dessen beiden Armen Polarisationsfilter mit $+45^\circ$ und -45° ausgerichtet sind, siehe Abb.4.

wird, dass die Messung der Polarisation im Ausgang des Interferometers, wenn man den Zustand mit dem entsprechenden Operator projiziert, der Zustand des zugehörigen Weges übrig bleibt, und das eben gleichbedeutend mit der gesuchten Weg-Information ist.

Schauen wir uns das an. Der Zustand vor dem Strahlteiler ST2, in den durch 1 und 2 nummerierten Bereichen in Abb. 1, wird beschrieben durch

$$(1) \quad |\psi_{in}\rangle = a_1|h\rangle|\varphi_1(x)\rangle + a_2|v\rangle|\varphi_2(x)\rangle$$

mit normierten Anteilen, Vektoren, welche die Polarisation darstellen, und Funktionen φ , welche die Ortsabhängigkeit enthalten, beschreiben, sowie Amplituden a_1 und a_2 mit $|a_1|^2 + |a_2|^2 = 1$. Eine 50-50 Aufteilung am Strahlteiler ST1 und die Phasenverschiebung um $\pi/2$ am ersten Strahlteiler führt zu $a_2 = ia_1 = \frac{1}{2}$, wenn man die Annahme der Intensität ebenfalls berücksichtigt und globale Phasen weglässt.

Hinter dem Strahlteiler gibt es zwei Bereiche, 3 und 4, zu denen Teilzustände gehören, welche sich aus den reflektierten und transmittierten Anteilen zusammensetzen:

$$(2) \quad |\psi_{out}\rangle = (a_{1,R}|h\rangle + a_{2,T}|v\rangle)|\varphi_3(x)\rangle + (a_{1,T}|h\rangle + a_{2,R}|v\rangle)|\varphi_4(x)\rangle$$

Eine weitere 50-50 Aufteilung und die zusätzlichen Phasenverschiebungen am Strahlteiler ST2

berücksichtigt, gilt dann $a_{1,R} = a_{2,T} = a_{1,T} = -a_{2,R} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$, also mit $|\pm 45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle \pm |v\rangle)$, ergibt sich wie erwartet

$$(3) \quad |\psi_{out}\rangle = \frac{1}{2}|+45^\circ\rangle|\varphi_3(x)\rangle + \frac{1}{2}|-45^\circ\rangle|\varphi_4(x)\rangle,$$

sodass jeweils ein Viertel der ursprünglichen Photonen in jedem Ausgang ankommt. Misst man nun hinter dem Strahlteiler die Polarisation mit einem h-Filter, erhält man

$$(4) \quad |h\rangle\langle h|\psi_{out}\rangle = (a_{1,R} + a_{1,T})|h\rangle(|\varphi_3(x)\rangle + |\varphi_4(x)\rangle)$$

Wendet man dagegen den Projektionsoperator zum h-Filter auf (1) an, so erhält man

$$(5) \quad |h\rangle\langle h|\psi_{in}\rangle = a_1|h\rangle|\varphi_1(x)\rangle$$

Betrachtet man Gleichungen (4) und (5), so suggerieren diese, insbesondere Gleichung (5), welche oft in einer verkürzten Darstellung als einzige zu finden ist, dass zur h-Messung nur der Zustand aus Bereich 1 beiträgt und auch eine Ortsinformation liefert. In der Tat sagt die richtige Gleichung (4) aber nur, dass die Wahrscheinlichkeiten, dass ein Photon einen horizontalen Polarisationsfilter passiert, hinter dem Strahlteiler genauso groß ist wie vor dem Strahlteiler. Woher diese Photonen gekommen sind, lässt sich nicht bestimmen, da die Gleichungen (3) und (4) keine Informationen mehr über die Bereiche 1 und 2 enthalten, weil die Funktionen φ_3 und φ_4 ausschließlich zu den Bereichen hinter dem Strahlteiler 2 gehören.⁴ Es gilt aber eben nicht so etwas wie

$$(6) \quad |\varphi_3(x)\rangle = 1/\sqrt{2}(|\varphi_1(x)\rangle + |\varphi_2(x)\rangle) \text{ (falsch!)},$$

wie man annehmen könnte, da rechte und linke Seite in unterschiedlichen Bereichen von Null verschieden sind.⁵ Könnte man (6) zugrunde legen, erhielte man Gleichung (5), und wenn man diese heranziehen dürfte, wäre eine Ortsinformation enthalten – diese Gleichung gehört aber zu einer Messung vor dem 2. Strahlteiler, also wenn man direkt im Bereich 1 misst. Diese Variante liefert die gewünschte Ortsinformation, weil die Wechselwirkung eindeutig im Bereich 1 stattgefunden hat. Misst man dagegen hinter dem Strahlteiler, kann man nur behaupten, dass man eine Welcher-Weg-Information erhält, wenn man die Wechselwirkung des Strahlteilers mit dem Zustand ignoriert, also von

⁴ Mathematisch lässt sich eine Funktion φ_B , die zu einem bestimmten Bereich B gehört, mit dem Träger der Funktion beschreiben. Definiert man zu einem Bereich B $\chi_B(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \in B \\ 0 & \text{für } x \notin B \end{cases}$, so gilt für die Funktion $\varphi_B = \varphi_B \cdot \chi_B$, χ_B dient gleichzeitig als Projektionsoperator für die Ortsmessung in dem Bereich B.

⁵ Die Projektion mit χ_3 liefert in Gleichung (6) links φ_3 , rechts dagegen 0.

(5) statt (4) ausgeht bzw. von $W(2)$ in Kombination mit $W(4)$. Die formale Argumentation macht also genau die Annahmen W und führt nur so zum selben Ergebnis.

Interferenzmuster

Nimmt man die Bereiche abseits der optischen Achse hinzu, betrachtet also auch das Zustandekommen der Interferenzmuster, so ist der Unterschied nur der, dass die Polarisation des Zustands in den Ausgängen aufgrund der zusätzlichen Gangunterschiede jetzt auch noch von der Richtung zum Schirm abhängt. Dass die Einbringung der Polarisationsfilter in die Interferometerarme nicht zum Verschwinden der Interferenz führt, wie oft behauptet wird, sondern diese nur nicht unmittelbar sichtbar sind, weil es zwei komplementäre Muster gibt, hat Ellerman [7] ausführlich dargestellt. Um eines der Muster sichtbar zu machen, muss keine irgendwie geartete „Löschung“ einer Information angenommen werden, alle experimentellen Ergebnisse sind mit der Annahme Z verträglich.

Fazit

Im Ergebnis ist gezeigt, dass die üblicherweise angeführten Argumente, dass man im Prinzip eine Welcher-Weg-Information durch Markierung mit Polarisation erhalten kann, darauf zurückgeführt werden kann, dass zu Unrecht angenommen wird, dass die Wechselwirkung mit dem Strahlteiler weder die Ortsinformation noch die Polarisationsinformation der Teilzustände beeinflusst. Oder, anders formuliert: Bereits der Strahlteiler „löscht“ die Ortsinformation der Zustände aus den Interferometerarmen, ebenso die vermeintlichen individuellen Polarisationsmarkierungen. Alle Experimente lassen sich konsistent mit der Annahme Z interpretieren, welche ausschließlich mit den Zuständen argumentiert, während die Welcher-Weg-Annahmen W zu Widersprüchen führen. Photonen, die zum selben Zustand gehören, sind ununterscheidbar und für jedes Photon gilt dieselbe Wahrscheinlichkeitsvorhersage für das Passieren eines Polarisationsfilters, diese lässt sich ausschließlich aus dem Zustand bestimmen – sodass man auch weder das Spin-Statistik-Theorem, welches die Ununterscheidbarkeit der Quantenobjekte voraussetzt, noch das Nichtvorhandensein verborgener Variablen in Frage stellen braucht.

Vielmehr zeigt die Betrachtung, dass, wenn man versucht Photonen wie klassischen Teilchen individuelle Eigenschaften, hier „Weg“ und „Polarisation“ zuzuschreiben, man zu dem Schluss kommt, dass diese „Teilchen“ sich auch nicht klassisch verhalten können, weil sie Wege gehen können, die klassisch verboten wären, nämlich durch zwei senkrecht zueinander gestellte Polarisationsfilter hintereinander, vergleichbar mit dem Tunneleffekt, wo gedachte Wege stets durch einen klassisch verbotenen Potenzialbereich laufen. Durch die Möglichkeit nicht-klassischer Wege wird aber die „Welcher-Weg“-Deutung zunichte gemacht. Dies bedeutet, dass man Photonen weder eine individuelle Polarisation noch einen individuellen Weg als „Eigenschaft“ zuschreiben braucht, um experimentelle Ergebnisse zu erklären.

Und das impliziert wiederum, dass „Welle-Teilchen-Dualismus“ als Begriff überflüssig ist: Die Zustände von Quantenobjekte werden grundsätzlich mathematisch durch Wellenfunktionen beschrieben, aus denen die statischen Vorhersagen für die teilchentypischen Einzelereignisse in den Messungen berechnet werden. [8] Versuche, das, was zwischen Präparation und Messung geschieht, durch klassische Vorstellungen näher zu beschreiben, führt, wie auch hier, zu Widersprüchen.

Quellen

- [1] Müller R. *Die verschwundenen Rätsel der Quantenphysik* 2016, PdN Physik in der Schule Heft 4, 65. Jahrgang
- [2] Feynman R. P., Leighton R. B. und Sands M. 1966 *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III* (Reading: Addison-Wesley)
- [3] *Metzler Physik* Grehn J., Krause J. (Hrsg.) 2020 (Westermann: Braunschweig)
- [4] Leifiphysik.de *Interferenzfähigkeit von Photonen im Quantenradierer* (Joachim Hertz Stiftung: Hamburg) <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/interferenzfaehigkeit-von-photonen-im-quantenradierer> letzter Zugriff: 21.10.2023
- [5] Müller R., Mishina O., *milq – Quantum Physics in Secondary School* online verfügbar unter <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=138430&token=71a36b6cd9fec7ab3aae4871c95f5477b5c36039>
MILQ – Quantenphysik in der Schule *Kapitel 3 Wellen und Teilchen* (R. Müller, TU Braunschweig) https://www.milq.info/data/uploaded/Downloads/Lehrgang/milq_kap3_lek_welle_und_teilchen.pdf
- [6] Wikipedia.de *Quantenradierer* <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer> letzter Zugriff 6.10.2023
- [7] Ellerman D. *A very common Fallacy in Quantum Physics: Superposition, Delayed Choice, Quantum Erasers, Retrocausality, and All That* 2011, arXiv:1112.4522v1 [quant-ph] <https://doi.org/10.48550/arXiv.1112.4522>
- [8] Hannibal L. *Das Quantenmodell als Synthese* 2013 MNU-Zeitschrift 66/3 S.149