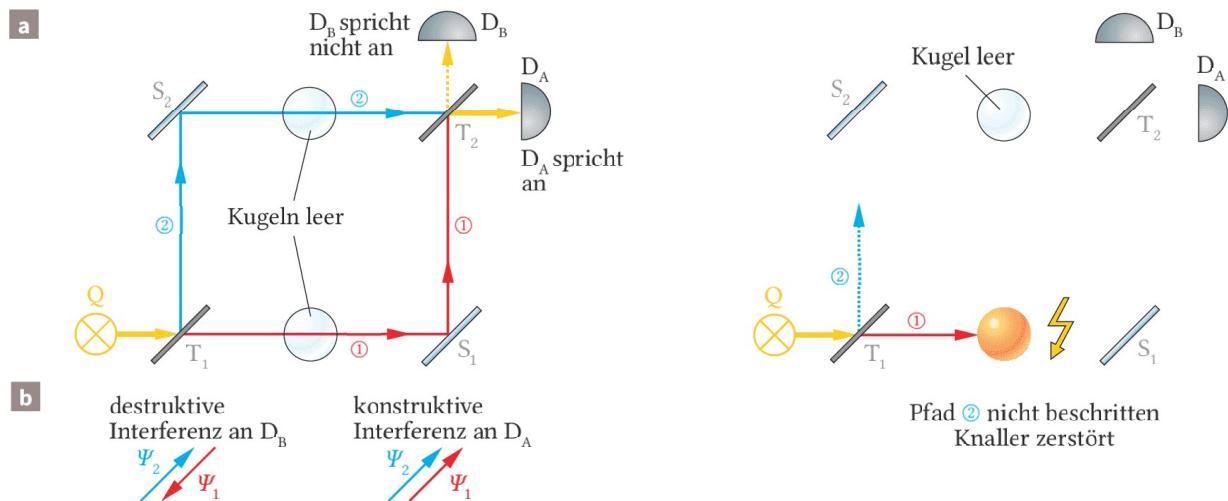


## 8.6 Messprozesse in der Quantenphysik



**B1** a) Beide Glaskugeln sind leer. Die Pfade ① und ② sind gleichberechtigt; von Q ausgehende Photonen landen stets im Detektor D<sub>A</sub>. b) Interferenz an der Platte T<sub>2</sub> konstruktiv für D<sub>A</sub>, destruktiv für D<sub>B</sub>.

**B2** Ein Photon wählt Pfad ① und zerstört den Knaller. Weg ② entfällt; die Detektoren D<sub>A</sub> und D<sub>B</sub> bleiben stumm.

**Knallertest** – In der Physik gab man sich natürlich zunächst nicht damit zufrieden, den Weg eines Quants am Doppelspalt nicht genau zu kennen. Egal, ob es zwei oder mehrere Möglichkeiten gibt, auf denen es zum Zielpunkt gelangen kann, letztendlich kann es sich nur auf einer der denkbaren Quantenbahnen bewegen. Dadurch, so die Idee, muss es auf diesem Weg auch nachweisbar sein.

Eine Möglichkeit dieser Nachweisbarkeit zeigt sich im folgenden *Gedankenexperiment*: Ein Fabrikant für Scherzartikel füllt Glaskugeln mit einem Gas, das von bereits einem Photon zur Explosion gebracht wird. Leider vermischt er diese sensiblen Knaller mit leeren Kugeln. Die funktionierenden Knaller sollen daher erkannt werden, ohne dass sie ein einziges Photon trifft, und damit zerstört werden. Anders gesagt: Ein Photon soll den Knaller umfliegen, ihn meiden und trotzdem aus der Ferne „erkennen“. Ein solches **nicht-lokales** Verhalten ist nach klassischer Physik unvorstellbar!

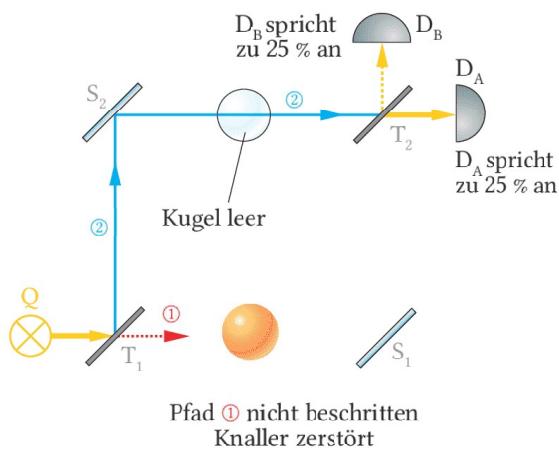
Der Fabrikant nimmt die Quantengesetze ernst und baut ein Interferenzgerät nach Bild **B1**. Es ist zum Doppelspalt analog. Wie dort gibt es zwei mögliche Pfade 1 und 2, geführt über die beiden Teilerplatten T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub> und die zwei Spiegel S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub>. Der Fabrikant lässt auch jeweils höchstens ein Photon im Apparat laufen. Es trifft von der Quelle Q kommend auf die Teilerplatte T<sub>1</sub>. Diese ist mit einer schwach reflektierenden Silberschicht so belegt, dass dem Photon die beiden weit getrennten Pfade 1

und 2 offenstehen, je mit 50% Wahrscheinlichkeit. Diese Pfade ergreift das Photon als Quantenmöglichkeiten zugleich, solange sie gleichberechtigt sind.

Sind die beiden Glaskugeln leer (Bild **B1a**), so sind die Pfade 1 und 2 gleichberechtigt. Die Endstellungen ihrer rotierenden Zeiger  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  werden an der Teilerplatte T<sub>2</sub> addiert (Bild **B1b**). Wie vom Mach-Zehnder-Interferometer bekannt (**Kapitel 7.6**), interferieren sie zu D<sub>A</sub> hin konstruktiv ( $\uparrow\uparrow$ ), zu D<sub>B</sub> hin dagegen destruktiv ( $\uparrow\downarrow$ ). Also fliegt jedes Photon zum Detektor D<sub>A</sub>, parallel zu dem die Quelle Q verlassenden horizontalen Pfad.

Nun ersetzt der Fabrikant im Dunkeln die leere Kugel im Pfad 1 durch einen sensiblen Knaller, ohne es zu wissen. Jetzt sind die Pfade nicht mehr gleichberechtigt. Wie verhält sich das Photon? Zerstört das Photon den Knaller (und sich selbst), so flog es nachweisbar längs dem roten Pfad 1 (Bild **B2**). Dies tritt in 50 % aller möglichen Fälle ein. Hier hat der Fabrikant Pech.

In den restlichen 50 % läuft das Photon längs Pfad 2, der Knaller bleibt heil (Bild **B3**). An der Teilerplatte T<sub>2</sub> entfällt der Zeiger  $\Psi_1$  für Pfad 1 und damit die Interferenz, die in Bild **B1** das Photon zwangsläufig zu D<sub>A</sub> führte. Ohne diese Interferenz ist das Photon an T<sub>2</sub> „frei“. Dort wählt es in 25 % aller Fälle (Hälfte von 50 %) den Detektor D<sub>B</sub>, der ohne Knaller nie ansprechen würde. Das Klicken von D<sub>B</sub> entlarvt den Knaller, ohne ihn zu zünden. Der Fabrikant rettet ihn schnell, bevor das nächste Photon kommt.

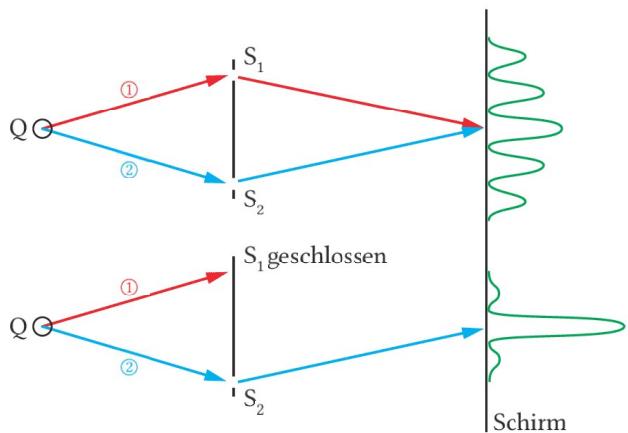


**B3** Das Photon wählt Pfad ②. Der Knaller im Pfad ① bleibt unzerstört und kann trotzdem vom Detektor  $D_B$  gemeldet werden!

Das Aufregende ist: Das Photon erkennt den Knaller, ohne mit ihm Kontakt zu haben: Es verhält sich *nichtlokal*. Es gab seine ganze, zum Zünden nötige Energie  $h\nu$  im Detektor  $D_B$  ab, nicht im Knaller. Wiederum ist also die Anordnung *als Ganzes* zu betrachten. Leider geht das Photon bei den restlichen 25% zum Detektor  $D_A$ , der Klick an  $D_B$  entfällt. Der Knaller wird fälschlich als leer deklariert. Man bedenke aber: Bestünden klassische Vorstellungen zu Recht, so hätte man keinen einzigen Knaller retten können. Denn jedes Photon, das ihn tatsächlich trifft, zerstört ihn.

**Nichtlokalität und Unbestimmtheit –** Der Knaller-Fabrikant freut sich, wenn in Bild **B3** das Photon den Detektor  $D_B$  auslöst. Der Knaller ist erkannt, bleibt unbehelligt, aber nicht unbeteiligt. Allein seine Anwesenheit im Pfad 1 ermöglicht es dem Photon, nach  $D_B$  zu fliegen. EINSTEIN sprach in solchen Fällen einst von einer „spukhaften Fernwirkung“.

Hier zeigt sich die skurrilste Quanteneigenschaft, die **Nichtlokalität**. Bild **B1** zeigt die **Unbestimmtheit** der Quantenwege. Dort kann man nicht sagen, das Quant habe einen bestimmten Weg (Pfad 1 oder 2) tatsächlich, objektiv gesprochen, durchlaufen (objektiv: dem Objekt zukommend, unabhängig vom Beobachter). Solche Quantenaussagen sind **nichtobjektivierbar**. Es handelt sich nicht um subjektives Nichtwissen eines vorgeblich objektiven Sachverhalts. Sonst gäbe es bei  $T_2$  keine Interferenz.



**B4** a) Beide Spalte offen: Die Welcher-Weg-Frage „Spalt 1 oder 2“ ist nicht beantwortbar. Man erhält Doppelspalt-Interferenz. b) Nur Spalt 2 ist offen. Die Welcher-Weg-Frage „Spalt 1 oder 2“ ist beantwortbar. Die Doppelspaltinterferenz entfällt, man erhält Einzelpunkt-Interferenz.

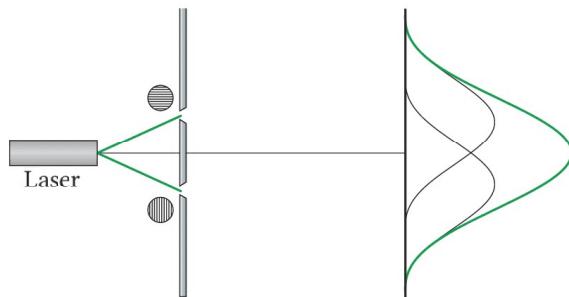
**Welcher-Weg-Frage –** Es ist also stets zu fragen, welche Wege dem Photon von der Quelle zum Zielpunkt zur Verfügung stehen, damit es Interferenz gibt:

- Ohne Knaller (Bild **B1a**) sind beide Wege 1 und 2 gleichberechtigt. Man kann nicht sagen, welchen von beiden Wegen das Photon tatsächlich geht; die **Welcher-Weg-Frage** ist prinzipiell nicht beantwortbar. Das gilt auch am Doppelspalt, wenn dort Interferenzstreifen auftreten (Bild **B4**).
- Mit dem Knaller werden dagegen die Wege 1 und 2 unterscheidbar. In Bild **B3** bleibt der Knaller unbeschadet, weil das Quant tatsächlich den Weg 2 durchläuft. Die Welcher-Weg-Frage ist beantwortet. Also gibt es keine Interferenz an der Platte  $T_2$ . Der dazu nötige Weg 1 entfällt.
- In Bild **B2** knallt es, das Quant folgte Weg 1. Auch hier ist die Welcher-Weg-Frage klar beantwortet, es gibt keine Interferenz.

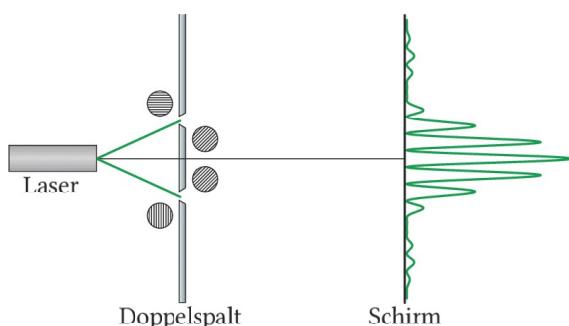
**Ergebnis:** Beobachtet man Interferenz, so ist die Welcher-Weg-Frage grundsätzlich nicht beantwortbar. Ist sie beantwortbar, dann gibt es keine Interferenz. Niels BOHR sagte: Ist die Welcher-Weg-Frage beantwortbar, dann liegt ein teilchenartiges Verhalten vor. Andernfalls, bei Interferenz, handelt es sich um Wellen. Teilchen- und Wellenmodell widersprechen sich zwar in der klassischen Physik, ergänzen sich aber bei Quanten. Diese treten entweder als Teilchen oder als Wellen in Erscheinung, nie als beides gleichzeitig. Er nannte dies das **Komplementaritätsprinzip**.

**Übertragung auf Doppelspalt** – Um dieses Prinzip auch im realen Versuch beobachten zu können, wird das Doppelspaltexperiment mit Licht so verändert, dass für jedes Photon erfasst werden kann, durch welchen Spalt es geflogen ist. Versuch **V1a** zeigt den angepassten Aufbau mit zwei Polarisationsfiltern. Durch die Polarisation des Lichts in jedem der Spalte kann beim Auftreffen auf dem Schirm nachgewiesen werden durch welchen der Spalte sich die Photonen bewegt haben. Mit Aufprägen dieser nachweisbaren Eigenschaft, verschwindet das Interferenzmuster. In Versuch **V1b** ist es wieder sichtbar, da die zusätzlichen Polarisationsfilter (sog. „Quantenradierer“) hinter den Spalten die Nachweisbarkeit wieder aufheben.

### V1 Quantenradierer



a) Vor jeden der beiden Spalte im Doppelspaltexperiment wird ein Polarisationsfilter platziert. Beide sind um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht, so dass das Licht in Spalt 1 eine andere Polarisation erhält als in Spalt 2. Auf dem Schirm ist das ohne Filter noch sichtbare Interferenzmuster verschwunden. Stattdessen ist die Überlagerung zweier Einzelspaltmuster ohne Interferenz zu sehen.



b) Werden hinter den Spalten weitere Polarisationsfilter platziert, die um  $45^\circ$  gegen die beiden anderen Filter verdreht sind, so ist das Doppelspaltinterferenzmuster wieder zu sehen.

Nun wird das Ergebnis dieses Experiment niemanden verwundern, der sich streng an die klassische Physik hält und das verwendete Laserlicht ausschließlich als Welle beschreibt. Die unterschiedliche Polarisation der Wellen in den Spalten lässt keine konstruktive oder destruktive Überlagerung auf dem Schirm zu, da sie in unterschiedlichen Richtungen schwingen. Maxima und Minima können sich also aufgrund der Polarisation nicht ausbilden. Werden die Wellen hinter den Spalten jedoch erneut polarisiert, und zwar in die gleiche Schwingungsrichtung, so ist eine solche Überlagerung wieder möglich und das bekannte Interferenzmuster kann sich ausbilden.

Führt man Versuch **V1** jedoch mit einer abgeschwächten Lichtquelle durch, so dass immer nur einzelne Photonen den Doppelspalt passieren, beobachtet man das gleiche Ergebnis. Die Polarisationsfilter machen die Wege durch die beiden Spalte unterscheidbar. Dadurch wäre es theoretisch möglich zu erkennen, durch welchen Spalt jedes einzelne Photon geflogen ist. Die Welcher-Weg-Frage ist dann für jedes Photon beantwortbar, also verhält es sich wie ein Teilchen. Wird die Welcher-Weg-Markierung, die Polarisation, hinter den Spalten wieder aufgehoben („wegradiert“), so sind die Photonen auf dem Schirm nicht mehr unterscheidbar. Eine Beantwortung der Welcher-Weg-Frage ist nicht mehr möglich, also zeigen die Photonen wellenartiges Verhalten und das Doppelspaltinterferenzmuster ist zu beobachten. Die Überprüfung muss also nicht zwingend vorgenommen werden. Allein die Möglichkeit der Zuordnung lässt die Photonen teilchenartiges Verhalten zeigen.

### ! Merksatz

**Komplementaritätsprinzip:** Quanten verhalten sich entweder wie Wellen oder wie Teilchen, nie beides gleichzeitig:

Zeigt sich bei einem Experiment Interferenz, so ist die **Welcher-Weg-Frage** nicht beantwortbar (mehrere Möglichkeiten gelten zugleich).

Ist eine Anordnung so beschaffen, dass die Welcher-Weg-Frage beantwortbar ist, dann entfällt die Interferenz für diese Wege.

**Quantenzustände** – Allgemein geht es bei der Betrachtung von Quanten nicht nur um die Bewegung durch Doppelspaltöffnungen. Man bezeichnet die  $\Psi$ -Zeiger, die hier jeder Quantenbahn zugeordnet werden, daher auch als Wellenfunktionen, die die Zustände beschreiben, die ein Quant annehmen kann. So lange nicht näher überprüft wird, in welchem Zustand es sich befindet, nimmt es alle Zustände gleichzeitig ein, was durch die Superposition aller möglichen Wellenfunktionen ausgedrückt wird:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \dots$$

Nimmt man jedoch eine Messung am Quant vor, d.h. überprüft man in welchem der Zustände es sich tatsächlich befindet, so fällt es in einen der für ihn möglichen Zustände und behält diesen bei. Dann gilt z.B. nur noch:  $\Psi = \Psi_2$ . Eine weitere Messung, die im Anschluss durchgeführt wird, führt dann zum gleichen Ergebnis. Die quantenmechanische Messung nimmt also selbst Einfluss auf das Quant und versetzt es in einen der Zustände, die ihm zur Verfügung stehen. Man sagt, die Wellenfunktion „kollabiert“. Ohne Messung wäre es weiterhin im Überlagerungszustand aller Zustände geblieben.

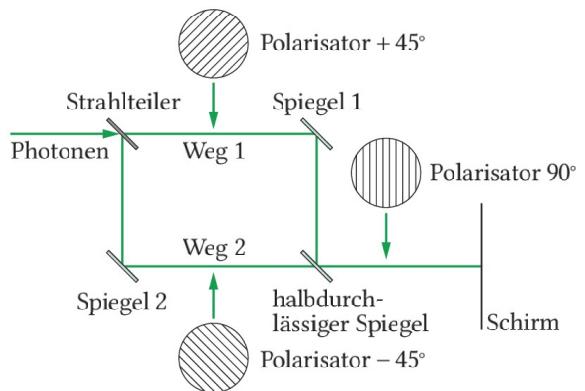
### ! Merksatz

Ein Quant befindet sich in einem Überlagerungszustand mehrerer Zustände, bis eine quantenmechanische Messung des Zustands vorgenommen wird. Diese versetzt es in einen der für ihn möglichen Zustände, den es anschließend dauerhaft beibehält.

### Lösen Sie selbst

- 1 Ein Doppelspalt wird mit grünem Laserlicht beleuchtet, dessen Intensität so niedrig ist, dass sich immer nur ein Photon im Aufbau befindet.
  - a) Beschreiben und begründen Sie die Veränderung des Schirmbildes während der Durchführung.
  - b) Eine geeignete Apparatur ermöglicht nun den sicheren Nachweis, ob ein Photon Spalt 1 passiert hat. Erläutern Sie, was dies für die Intensitätsverteilung bedeutet.
  - c) Dieselbe Apparatur wird nun für einen sicheren Nachweis für Photonen an Spalt 2 verwendet. Begründen Sie, warum nun nicht die gleiche Intensitätsverteilung wie bei Teilaufgabe b.) zu erwarten ist.

- 2 Das Licht einer monochromatischen Lichtquelle wird als einzelne Photonen durch die Anordnung geschickt.



Auf dem Schirm sind Interferenzen beobachtbar.  
 a) Zwei um  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  gegen die Horizontale gedrehte Polarisatoren werden an den eingezeichneten Punkten in den Strahlengang gebracht. Beschreiben und begründen Sie was auf dem Schirm zu sehen ist.  
 b) Beschreiben und begründen Sie den Einfluss eines dritten, um  $90^\circ$  gegen die Horizontale gedrehten, Polarisators an der eingezeichneten Stelle.

- 3 a) Eine größere Wandergruppe steht im Wald an einer Wegkreuzung. Wegweiser und Wanderkarte zeigen zwei mögliche Wege zum gewünschten Ziel. Die Gruppe teilt sich auf und vereinigt sich wieder am Ziel. Vergleichen Sie dies mit dem Verhalten vieler Photonen beim Doppelspaltexperiment.  
 b) Warum ist bei Lichtquanten schon eine kleine Differenz der möglichen Weglängen zum Ziel bedeutsam, nicht aber bei den Personen?  
 c) Einer der beiden Waldwege ist an einer vorher unbekannten Stelle gesperrt. Diskutieren Sie jetzt diese Fragen.

- 4 Das Bild zeigt eine Aufnahme der Teilnehmer an der fünften Solvay Konferenz 1927.



- a) Recherchieren Sie das Hauptthema dieser Tagung.  
 b) Wer nahm teil?